

# Untersuchungen zur Eignung einer elektroakustischen Schallquelle als sekundäres Schalleistungsnorm

Heinrich Bietz, Volker Wittstock, Spyros Brezas

Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 38116 Braunschweig [heinrich.bietz@ptb.de](mailto:heinrich.bietz@ptb.de)

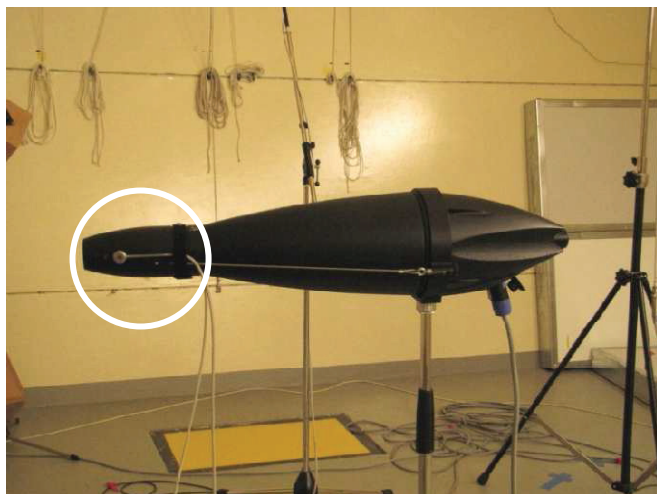
## Einleitung

Ziel des europäischen Projektes „EMRP JRP SIB 56 SoundPwr“ ist die Darstellung, Weitergabe und Anwendung der Einheit Watt in der Akustik auf Grundlage eines primären Schalleistungsnormals<sup>1</sup>. Eine Teilaufgabe besteht darin, ein Sekundärnormal für Schalleistungen mit tonalen Komponenten (kleiner Terzbandbreite) zu entwickeln. Dieses sollte neben einer gleichmäßigen Richtcharakteristik die Möglichkeit beinhalten, den erzeugten Schallfluss direkt oder indirekt messen zu können. Weiterhin soll die Schallquelle als bodennahe Quelle einsetzbar sein. Nach Diskussion verschiedener Konzepte fiel die Entscheidung für eine kommerziell verfügbare elektroakustische Schallquelle, die im Wesentlichen für raumakustische Messungen zum Einsatz kommt. Die Schallquelle wurde hinsichtlich ihrer Eignung umfassend getestet, und die erzielten Ergebnisse werden im Folgenden vorgestellt.

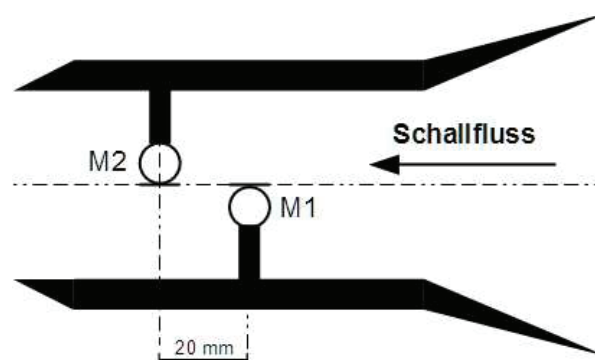
## Ausgewählte Schallquelle

Bei der ausgewählten Schallquelle handelt es sich um das Modell Omnisource™ von Brüel & Kjaer. Maßgeblich für diese Entscheidung waren die direkte Verfügbarkeit sowie die Tatsache, dass für dieses Modell ein Adapter zur Messung der Volumenschnelle erhältlich ist. Bild 1 und Bild 2 zeigen die Quelle und eine Skizze des Schnellleadapters. Dieser basiert auf der 2-Mikrofon-Technik und erlaubt die direkte Messung der abgestrahlten akustischen Wirkleistung. Weiterhin erlaubt die Bauform der Schallquelle den Einsatz als bodennahe Quelle, wie in Bild 3 dargestellt.

Als Verstärker kam ein Modell (TIRA BAA 120) zum Einsatz, das hauptsächlich zur Ansteuerung von Schwingerregern verwendet wird. Monitorausgänge für Strom und Spannung erlauben eine einfache Messung der abgegebenen elektrischen Leistung. Weiterhin kann der Verstärker sowohl als spannungsgesteuerte Spannungsquelle als auch als spannungsgesteuerte Stromquelle verwendet werden.



**Bild 1:** Omnisource™; der Kreis markiert den aufgesetzten Adapter zur Messung der Volumenschnelle



**Bild 2:** Prinzipskizze des Volumenschnelleadapters



**Bild 3:** Einsatz als bodennahe Punktquelle

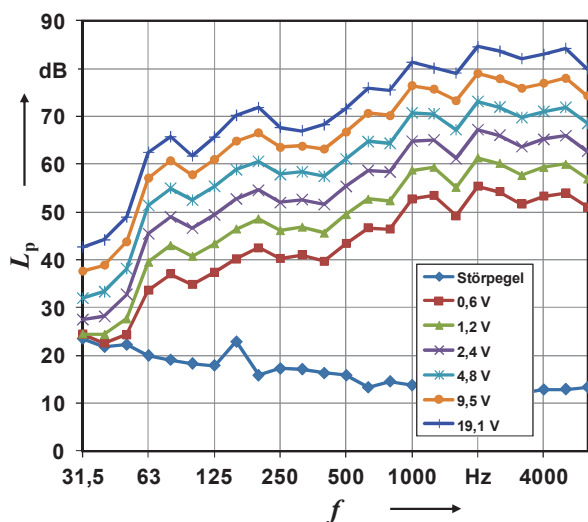
## Durchgeführte Untersuchungen

Vorteil einer elektroakustischen Quelle ist die Möglichkeit, prinzipielle beliebige Signale abgeben zu können. Dem gegenüber stellt sich die Frage nach Linearität und Langzeitstabilität. Weiterhin existieren bisher keine dokumentierten Erfahrungen mit dem Adapter zur Messung der Volumenschnelle. Da die Richtcharakteristik nur für den Fall bekannt ist, dass die Quelle frei in einen Raum abstrahlt, wurde diese für den Einsatz als bodennahe Quelle ebenfalls untersucht.

### Linearität

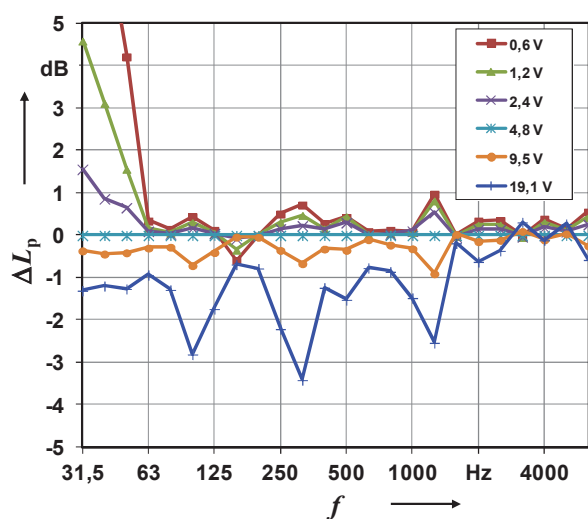
Um eine Aussage über das pegelabhängige Verhalten der Schallquelle zu bekommen, wurde die Quelle in einem Hallraum betrieben und der mittlere Schalldruckpegel im Raum bei verschiedenen Aussteuerungspegeln gemessen. Als Anregungssignal wurde ein Multisinus mit einer Frequenzauflösung von 3,125 Hz verwendet, wobei die Amplitude bei allen Frequenzen gleich war. Dieses Anregungssignal wurde auch für alle weiteren Untersuchungen verwendet, soweit nichts anderes aufgeführt ist. Mittels eines Multikanal-Analysators wurden der Schalldruckpegel im Raum an 6 Mikrofonpositionen, die Ausgangssignale der Volumensonde sowie Strom und Spannung am Verstärkeraus-

gang zeitgleich gemessen. Der Verstärker wurde immer in der Stellung „Cal“ betrieben, um Reproduzierbarkeit zu gewährleisten. Der Pegel des Eingangssignals wurde in einem Bereich von 78 mV bis 2,5 V (Spannungen immer als RMS angegeben) variiert, wodurch sich eine Ausgangsspannung am Verstärker von 0,6 V bis 19,1 V ergibt. Bei einer Spannung von 19,1 V werden ca. 50 VA an die Schallquelle abgegeben, was der vom Hersteller angegebenen Maximallast für den Dauerbetrieb entspricht. Bild 4 zeigt die gemessenen Schalldruckspektren.



**Bild 4:** Mittlerer Schalldruckpegel im Hallraum in Abhängigkeit vom Eingangssignal am Verstärker

Obwohl die Quelle für einen Frequenzbereich von 80-6300 Hz spezifiziert ist, kann, abhängig vom Signalpegel, auch bei tieferen Frequenzen ein hinreichender Störsignalabstand erreicht werden. Deformationen des Spektrums durch nicht-lineares Verhalten sind in dieser Darstellung schwer zu erkennen. Deshalb wurden die gemessenen Spektren auf die Eingangsspannung normiert und, bezogen auf 2,4 V, als Pegeldifferenz in Bild 5 dargestellt.



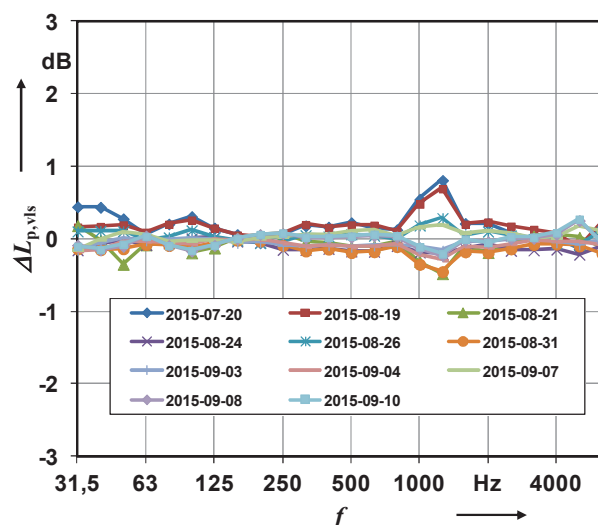
**Bild 5:** Pegeldifferenzen der auf die Eingangsspannung normierten Schalldruckpegel bezogen auf 4,8 V Quellenspannung

Bis zu einer Spannung von 9,5 V bewegen sich die Pegelabweichungen in einem Bereich von  $\pm 1$  dB. Bei 19,1 V macht sich das Erreichen der Belastungsgrenze deutlich bemerkbar. Deshalb wird eine Ansteuerspannung von 9,5 V

(entspricht ca. 13 VA elektrischer Leistung) als sinnvolle Obergrenze für den Betrieb der Quelle angenommen.

### Zeitliche Stabilität

Hier soll zunächst das Langzeitverhalten betrachtet werden. Die Schallquelle wurde über einen Zeitraum von ca. 8 Wochen mehrmals gemessen, wobei die Aufwärmzeit immer ca. 30 Minuten betrug. Um Einflüsse des Messraumes weitestgehend auszuschließen, soll hier der mit der Volumenschnellesonde gemessene Schalldruckpegel betrachtet werden. Wie in Bild 6 zu sehen ist, bewegen sich die Schwankungen überwiegend in einem Bereich  $< 0,5$  dB bei Messung in Terzbandbreite. Lediglich bei 1 kHz und 1,25 kHz sind größere Schwankungen zu beobachten. Eine Betrachtung des Schmalbandspektrums zeigt hier, dass in diesen Frequenzbereichen eine ausgeprägte modale Struktur vorliegt, die offensichtlich auf Klimaschwankungen sehr empfindlich reagiert.



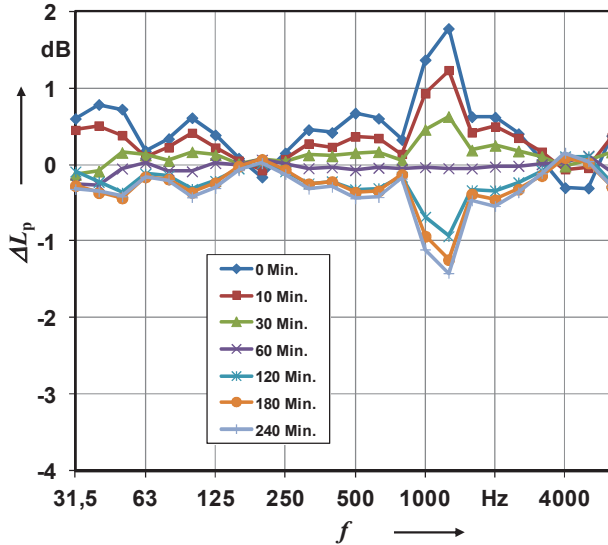
**Bild 6:** Langzeitverhaltens des Schalldruckpegels in der Quelle, gemessen mit Volumenschnellesonde, 1 Messung / Tag

### Einlaufverhalten

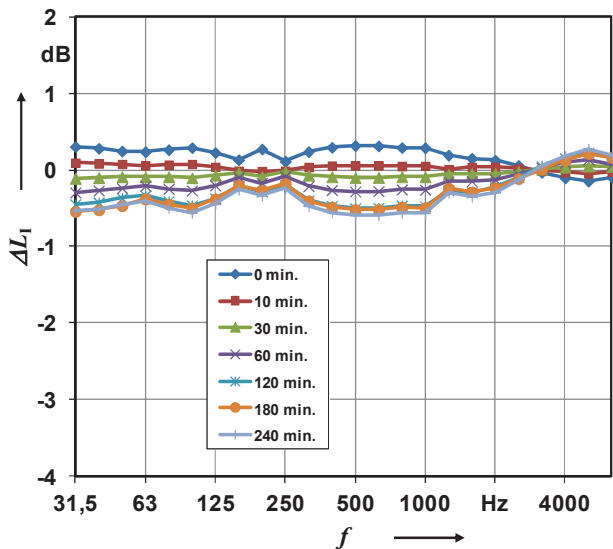
Bei einer elektroakustischen Schallquelle ist zu erwarten, dass der erzeugte Schalldruck, bedingt durch die Erwärmung der Schwingspule, erst nach einer gewissen Zeit einen stabilen Wert annimmt. Um dieses Verhalten zu beobachten, wurde die Schallquelle „kalt“ gestartet, und der Schalldruckpegel in der Quelle wurde über einen Zeitraum von vier Stunden beobachtet. Der Verstärker wurde mit einem Ausgangssignal von 9,5 V als Spannungsquelle betrieben. Bild 7 zeigt die Ergebnisse bezogen auf den arithmetischen Mittelwert der Schalldruckpegel. Es zeigt sich, dass der Schalldruckpegel bei den meisten Frequenzen kontinuierlich abnimmt und erst nach eine Zeit von ca. 120 Minuten (!) einen konstanten Wert annimmt. Erneut sind im Frequenzbereich um 1,25 kHz deutlich stärkere Schwankungen zu beobachten. Dass diese wahrscheinlich auf akustische Effekte innerhalb der Quelle zurückzuführen sind, zeigt auch Bild 8. Hier ist der in die Quelle eingespeiste Strom in gleicher Weise dargestellt. Die beobachtete Zeitabhängigkeit ist grundsätzlich dieselbe, aber es treten keine Überhöhungen wie beim akustischen Signal auf.

Natürlich ist eine Einlaufzeit in der Größenordnung von zwei Stunden nicht akzeptabel. Der Modus „Spannungsquelle“ wurde zunächst auch gewählt, weil viele Verstärkermodelle nur diesen Betriebsmodus anbieten. Da die Schwing-

schnelle eines elektrodynamischen Wandlers aber proportional zur Stromstärke ist, bestand die Hoffnung, mittels des Stromquellenmodus eine kürzere Einlaufzeit zu erzielen. Bild 9 zeigt deutlich, dass dies auch gelingt, der Spulenstrom zeigt keine signifikante Zeitabhängigkeit mehr. Als Konsequenz wurde die Schallquelle für die weiteren Untersuchungen ausschließlich im Stromquellenmodus betrieben.



**Bild 7:** Einlaufverhalten des Schalldruckpegels in der Schallquelle, Generatorsignal 1,25 V, Modus „Spannungsquelle“

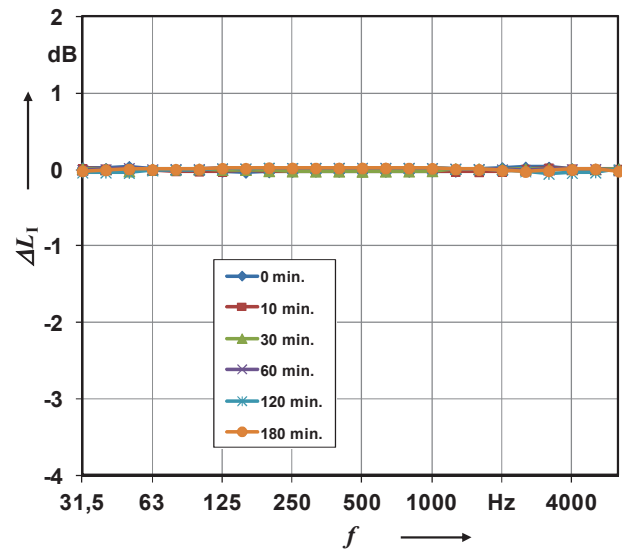


**Bild 8:** Einlaufverhalten des eingespeisten Stroms als Pegel re 1A, Generatorsignal 1,25 V, Modus „Spannungsquelle“

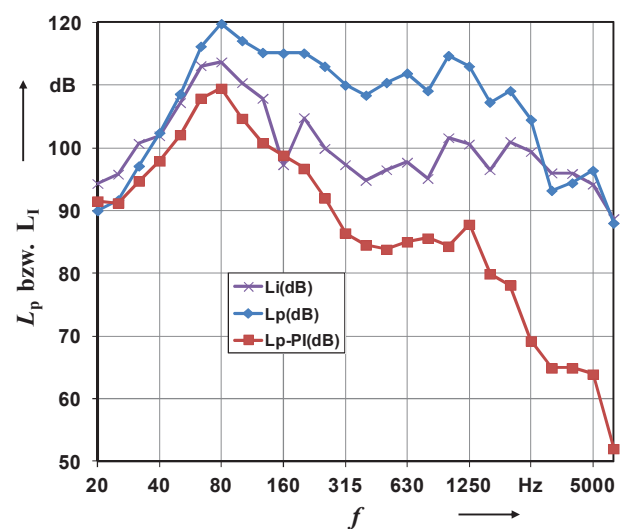
**Qualifikation des Volumenschnelleadapters**

Die Volumenstromsonde bietet grundsätzlich die Möglichkeit, die abgestrahlte Schallleistung direkt zu messen. Hierzu wird die Schallintensität nach dem 2-Mikrofon-Verfahren bestimmt, diese ergibt dann durch Multiplikation mit der Fläche der Mündungsöffnung direkt die abgestrahlte Schallleistung. Die Dynamik einer solchen Intensitätssonde wird wesentlich durch den Phasengleichlauf der beiden Messkanäle bestimmt. Werden beide Mikrofone in einem Kuppler dem gleichen Schallfeld ausgesetzt, ist die gemessene Intensität theoretisch null. Durch die praktisch immer vorhandene Phasenabweichung zwischen den Messkanälen wird jedoch trotzdem eine sogenannte Restintensität gemessen. Die Dif-

ferenz zwischen Restintensität und Schalldruckpegel im Kuppler stellt eine Obergrenze für Messungen in Räumen dar. Hier muss diese Differenz für eine Klasse 1 Messung 10 dB kleiner sein<sup>2</sup>. Der Restintensitätsindex wurde für die Sondenmikrofone in einem Kuppler ermittelt. Anschließend wurde eine Messung mit montierter Sonde im Hallraum durchgeführt. Bild 10 zeigt die gemessene Schallintensität und den gemessenen Schalldruckpegel. Weiterhin ist die Differenz zwischen Schalldruckpegel und Restintensitätsindex eingezeichnet. Es wird deutlich, dass die geforderte Differenz von 10 dB erst ab einer Frequenz von ca. 315 Hz überhaupt erreicht wird, und dass das Schallfeld in der Sonde stark reaktiven Charakter hat. Dies lässt bereits vermuten, dass die Messung der Schalleistung mittels Intensitätsverfahren nur in einem eingeschränkten Frequenzbereich funktionieren wird.



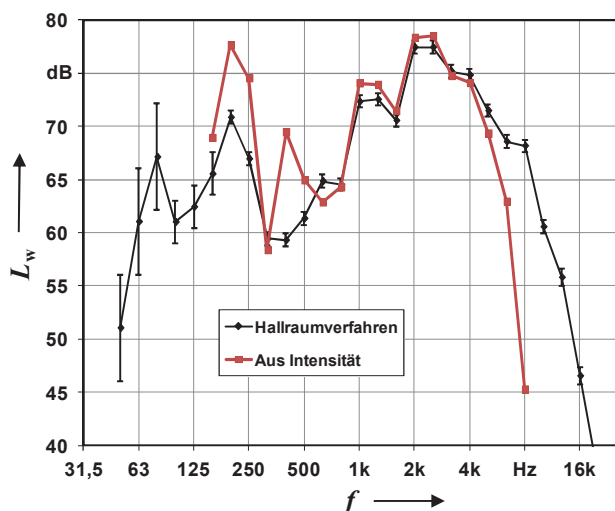
**Bild 9:** Einlaufverhalten des eingespeisten Stroms als Pegel re 1A, Generatorsignal 40 mV, Modus „Stromquelle“



**Bild 10:** Schalldruck und Schallintensität, Sonde im Hallraum  
**Schalleistung im Hallraum**

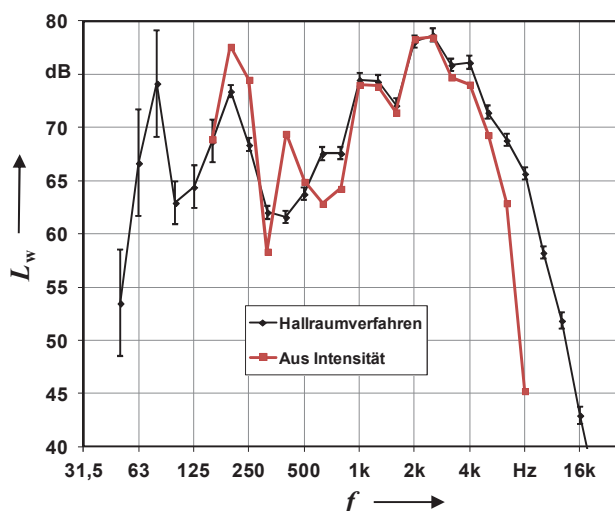
Zur Verifikation wurde die Schalleistung der Quelle nach dem Hallraumverfahren bestimmt und mit der zeitgleich gemessenen Leistung nach dem Intensitätsverfahren verglichen. Die Quelle wurde hierbei sowohl frei in den Raum

strahlend als auch bodennah betrieben, die eingespeiste Leistung betrug ca. 10 VA. Bild 11 und Bild 12 zeigen die Ergebnisse der Messungen.



**Bild 11:** Schallleistung im Hallraum, Quellenmündung 1,51 m über Boden

Das Intensitätsverfahren trifft die mit dem Hallraumverfahren ermittelte Leistung nur in einem sehr engen Frequenzbereich. Die Differenzen zwischen 315 Hz und 1 kHz können nicht durch unzureichenden Restintensitätsindex erklärt werden. Oberhalb 4 kHz ist der Abstand von 20 mm zwischen den beiden Mikrofonen zu groß, was die kontinuierlich zunehmende Abweichung gut erklärt. In Bild 13 ist die Differenz zwischen bodennaher Messung und freier Abstrahlung für die beiden Schalleistungen und den Schalldruckpegel dargestellt. Die mit der Sonde gemessene Schalleistung gibt in einem Frequenzbereich von 1 kHz bis 6 kHz die relative Änderung gut wieder. Der Schalldruckpegel in der Sonde eignet sich dagegen nicht für diese Beurteilung.

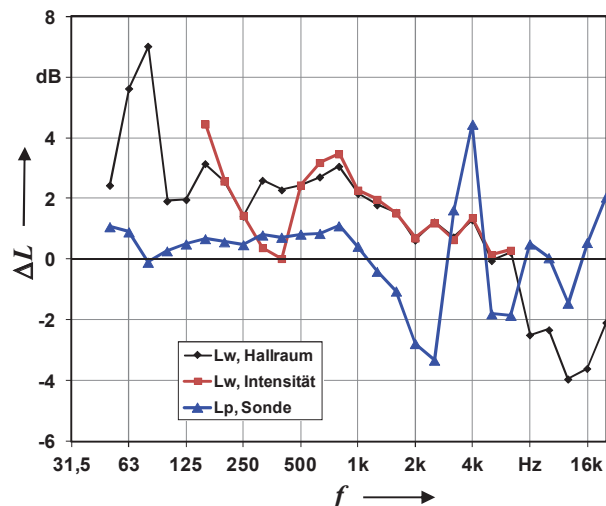


**Bild 12:** Schallleistung im Hallraum, Quelle bodennah

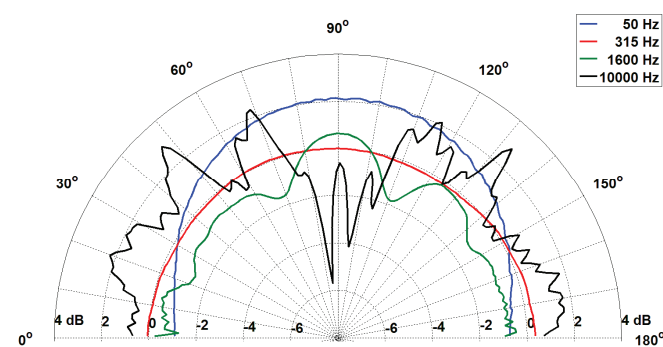
### Richtcharakteristik

Die Richtcharakteristik für die Schallquelle in Meridianebene wurde im reflexionsarmen Halbraum (bodennaher Betrieb) gemessen und ist in Bild 14 für ausgewählte Frequenzen dargestellt. Die Abweichungen bei 50 Hz sind eher auf die untere Grenzfrequenz des Messraumes zurückzuführen, ansonsten ist die Richtcharakteristik in ihrer Ausprägung mit

den ebenfalls als Sekundärnormalen vorgesehenen Lüfterquellen vergleichbar.



**Bild 13:** Differenzen zwischen freier und bodennaher Abstrahlung



**Bild 14:** Richtcharakteristik der Quelle in Meridianebene; Betrieb als bodennahe Punktquelle

### Zusammenfassung und Ausblick

Eine kommerziell erhältliche Schallquelle mit Volumenstromsonde wurde hinsichtlich ihrer Eignung als sekundäres Schalleistungsnormale getestet. Die Quelle lässt sich unter bestimmten Bedingungen linear und zeitstabil betreiben. Der Betrieb als bodennahe Punktquelle ist mit zufriedenstellender Richtcharakteristik möglich. Leider liefert die Volumenstromsonde nur in einem sehr eingeschränkten Frequenzbereich zufriedenstellende Ergebnisse, was auf das stark reaktive Schallfeld innerhalb der Sonde zurückzuführen ist. Eventuell kann hier mit Dämpfung eine Verbesserung erzielt werden, ansonsten müsste gegebenenfalls ein alternatives Konzept für ein Sekundärnormal diskutiert werden.

<sup>1</sup> Wittstock, V., Schmelzer, M.; Bethke, C.: Establishing traceability for the quantity sound power. Tagungsband der Internoise 2013 auf CDROM, Innsbruck, September 2013

<sup>2</sup> z.B.: DIN EN ISO 9614-1:2009-11: Akustik - Bestimmung der Schalleistungspegel von Geräuschquellen aus Schallintensitätsmessungen - Teil 1: Messungen an diskreten Punkten (ISO 9614-1:1993); Deutsche Fassung EN ISO 9614-1:2009