



Entwurf eines Referenzlautsprechers nach ISO 6926

Rodrigo Feitl-Schönleitner

Bachelorarbeit

angefertigt im Rahmen des Seminars

Elektro- und Raumakustik

Betreuer: Dipl.-Ing. Dr.techn. Werner Weselak

Institut für Signalverarbeitung und Sprachkommunikation

Leiter: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gernot Kubin

Technische Universität Graz

Graz, im Juni 2023

Zusammenfassung

Die Messung von Schalleistungspegeln von Maschinen und Haushaltsgeräten nach ISO 3744 im Hüllflächenverfahren erfordert für ein vergleichendes Verfahren eine Referenzschallquelle mit bekanntem Schalleistungspegel. ISO 6926 gibt hierfür Anforderungen an eine solche Schallquelle vor, hinsichtlich der Faktoren zeitliche Stabilität, spektrale Eigenschaften und Richtwirkung. Diese strengen Anforderungen werden in der Regel mit Radiallüftern erfüllt. Hierfür stattdessen ein Lautsprechersystem einzusetzen, bietet den Vorteil, dass das abgestrahlte Schallsignal an jenes der zu untersuchenden Maschine angeglichen werden kann. Doch derzeit existiert lediglich ein einziger Lautsprecher nach ISO 6926 auf dem Markt, welcher gegenüber Radiallüftern einen stark eingeschränkten Frequenzbereich abdeckt. Mit einem Lautsprechersystem die strengen Anforderungen von ISO 6926 über den vollen Frequenzbereich erfüllen zu können, stellt eine Herausforderung dar. In dieser Arbeit werden zunächst die genauen Anforderungen und anschließend bestehende Referenzschallquellen betrachtet. Darauf aufbauend, werden Ansätze für Lautsprechersysteme diskutiert und schließlich ein fertiges Konzept ausgearbeitet. Das Resultat ist der Entwurf eines Inversen Hornlautsprechers, welcher für eine ungerichtete Abstrahlung bei hohen Frequenzen sorgt, eingebettet in ein Tetraeder-Gehäuse, bei dem auf drei Seiten Tieftöner-Chassis eingebaut werden, um tiefe Frequenzen angemessen zu repräsentieren. Ein Aufbau sowie akustische Messungen zur Verifikation können als Gegenstand aufbauender Arbeiten betrachtet werden.

Abstract

For the measurement of sound power levels of machines and household appliances according to ISO 3744, a reference sound source with well-known sound power level is necessary. For this purpose, ISO 6926 makes demands on temporal stability, spectral characteristics, and directivity of such a sound source. These high requirements can be met by using centrifugal fans as reference sound source. One advantage of using a loudspeaker system instead is the possibility of adapting the sound signal to the sound of the machine. However, only a single loudspeaker fulfilling these requirements exists on the market. This speaker has a highly limited bandwidth, compared to common centrifugal fans. Complying with requirements of ISO 6926 using a loudspeaker system, can pose a challenge. In this thesis, the demands of ISO 6926 are considered, as well as existing reference sound sources. Based on these findings, approaches for loudspeaker systems are discussed. Finally, a concept for a loudspeaker, consisting of an inverse horn speaker for omnidirectional emission at high frequencies and a tetrahedral cabinet with three woofers for an adequate level at low frequencies, is designed. Based on that, it is possible to build such a loudspeaker system and to verify the compliance to ISO 6926 with acoustical surveys.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	Anforderungen nach ISO 6926	7
2.1	Meteorologische Bedingungen.....	7
2.2	Zeitliche Stabilität	7
2.3	Spektrale Eigenschaften	8
2.4	Richtwirkung.....	8
2.5	Weitere Anforderungen.....	9
2.6	Zusammenfassung.....	9
3	Bestehende Referenzschallquellen	11
3.1	Zeitliche Stabilität	12
3.2	Spektrale Eigenschaften	12
3.3	Richtwirkung.....	13
3.4	Vergleich	13
4	Ansätze für Referenzlautsprecher	17
4.1	Dodekaeder-Lautsprecher Norsonic Nor276	17
4.2	Regulärer Polyeder-/Dodekaeder-Lautsprecher	20
4.3	Inverser Hornlautsprecher	21
5	Entwurf	35
5.1	Inverser Hornlautsprecher	35
5.2	Tetraeder-Tieftonsystem	45
5.3	Gesamtsystem	47
6	Diskussion	49
7	Anhang – Daten bestehender Quellen	51

Literaturverzeichnis

- [1] Austrian Standards International, „EN ISO 6926: Acoustics – Requirements for the performance and calibration of reference sound sources used for the determination of sound power levels,“ *ISO 6926*, 01. Nov. 2021.
- [2] M. Zollner und E. Zwicker, *Elektroakustik*, Springer, 1993.
- [3] Norsonic, „Reference Sound Source Nor278,“ *Nor278 Datenblatt*.
- [4] Brüel & Kjær, „Reference Sound Source Type 4204,“ *BK4204 Datenblatt*, 2013.
- [5] Qsources, „Extreme Lightweight Sound Power Reference Source,“ *Qref Datenblatt*.
- [6] N. M. Papadakis und G. E. Stavroulakis, „Review of Acoustic Sources Alternatives to a Dodecahedron Speaker,“ *Applied Sciences*, Bd. 9, Nr. 18, p. 3705, Sep. 2019.
- [7] Austrian Standards International, „EN ISO 10140-5: Akustik – Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand – Teil 5: Anforderungen an Prüfstände und Prüfeinrichtungen,“ *ISO 10140-5*, 01. Sept. 2021.
- [8] Austrian Standards Institute, „ISO 3382-2: Akustik – Messung von raumakustischen Parametern – Teil 1: Aufführungsplätze,“ *ISO 3382-2*, 01. Sep. 2009.
- [9] Norsonic, „Noise Excitation Equipment for Building Acoustics Measurements,“ *Nor276 Datenblatt*.
- [10] T. Leishman, S. Rollins und H. Smith, „An experimental evaluation of regular polyhedron loudspeakers as omnidirectional sources of sound,“ *The Journal of the Acoustical Society of America*, Nr. 120, p. 1411, Sep. 2006.
- [11] J.-D. Polack, L. S. Christensen und P. M. Juhl, „An Innovative Design for Omnidirectional Sound Sources,“ *Acoustica*, Nr. 87, pp. 505-512, 2001.
- [12] S. Ortiz, B. Kolbrek, P. Cobo, L. M. González und C. De La Colina, „Point Source Loudspeaker Design: Advances on the Inverse Horn Approach,“ *Journal of the Audio Engineering Society*, Nr. 62, pp. 345-354, 2014.
- [13] P. Cobo, S. Ortiz, D. Ibarra und C. de la Colina, „Point source equalised by inverse filtering for measuring ground impedance,“ *Applied Acoustics*, Bd. 4, Nr. 74, pp. 561-565, 2013.
- [14] D. Ibarra, R. Ledesma und E. Lopez, „Design and construction of an omnidirectional sound source with inverse filtering approach for optimization,“ *HardwareX*, Bd. 4, 2018.
- [15] H. Levine und H. Schwinger, „On the Radiation of Sound from an Unflanged Circular Pipe,“ *Physical Review*, Bd. 4, Nr. 73, pp. 383-406, 1948.

1 Einleitung

Für die Messung des Schalleistungspegels von Maschinen wird häufig das Hüllflächen-Verfahren angewandt. Die Normen ISO 3744 und ISO 3745 geben hierfür standardisierte Messverfahren an, bei denen durch Messungen des Schalldruckpegels an mehreren Mikrofonpositionen auf einer oft halbkugelförmigen Oberfläche um die zu vermessende Schallquelle der Schalleistungspegel ermittelt wird. Nicht immer ist es möglich, im Zuge eines sogenannten Direktverfahrens durch eine solche Messung den Schalleistungspegel hinreichend genau zu erhalten; beispielsweise, wenn aus der Umgebung Störgeräusche Einzug halten, welche das Messergebnis nach oben hin verfälschen würden. Daher ist es in vielen Fällen ratsam, ein vergleichendes Verfahren einzusetzen, bei welchem der gemessene Pegel mit jenem einer Referenzschallquelle mit bekanntem Schalleistungspegel, verglichen wird. Somit können die Einflüsse durch die Umgebung berechnet und im Messergebnis berücksichtigt werden.

An eine solche Referenzschallquelle werden durch ISO 6926 hohe Anforderungen hinsichtlich spektraler Eigenschaften und Richtwirkung gestellt. Bestehende Lösungen namhafter Hersteller sind oft Radiallüfter mit rotationssymmetrischem Aufbau für eine möglichst omnidirektionale Richtcharakteristik. Es finden sich nur vereinzelt Lautsprecher, die diesen Anforderungen gerecht werden, und das auch lediglich in einem gegenüber Radiallüftern eingeschränkten Frequenzbereich.

Das Ziel, mit einer Referenzschallquelle ein „breitbandiges, dem Maschinengeräusch ähnliches“ Geräusch abzustrahlen, motiviert die Verwendung eines elektroakustischen Wandlers für diesen Zweck. Die Flexibilität in der Signalgenerierung sowie die Möglichkeit, durch signalverarbeitungstechnische Maßnahmen den Frequenzgang nahezu beliebig zu optimieren, wären wesentliche Vorteile gegenüber Radiallüftern, wengleich die Realisierung eines solchen Lautsprechers beziehungsweise Lautsprechersystems einige Herausforderungen mit sich bringt.

In dieser Arbeit sollen zunächst die genauen Anforderungen, die ISO 6926 an Referenzschallquellen stellt, in Kapitel 2 erarbeitet werden. Im Anschluss werden in Kapitel 3 bestehende, zertifizierte Quellen in Radiallüfter- und Lautsprechertechnologie analysiert und verglichen. Durch den daraus entstandenen Erkenntnisgewinn darüber, auf welche Anforderungen bei Verwendung von Lautsprechern besonderes Augenmerk gelegt werden muss, sollen nun in Kapitel 4 verschiedene Ansätze für Referenzlautsprecher analysiert werden. Im Anschluss erfolgt der Entwurf in Kapitel 5 und eine Diskussion in Kapitel 6.

2 Anforderungen nach ISO 6926

In dem folgenden Kapitel werden die Anforderungen formuliert, welche der Norm ISO 6926 und weiteren dort angeführten Normen zu entnehmen sind. Es müssen sämtliche in diesem Kapitel angeführten Anforderungen erfüllt werden, um der Norm – im festgelegten Frequenzbereich – entsprechen zu können.

2.1 Meteorologische Bedingungen

Die Referenzbedingungen für die Berechnung des Schalleistungspegels sind im Folgenden aufgelistet [1, p. 4]. Diese gelten als Voraussetzung für die angeführten Anforderungen.

Größe	Wert
Lufttemperatur	$\theta_1 = 23,0 \text{ °C} \cong 296,16 \text{ K}$
Statischer Luftdruck	$p_{s,0} = 1,01325 \cdot 10^5 \text{ Pa}$
Relative Luftfeuchte	$\phi_0 = 50 \%$

Tabelle 2.1: Meteorologische Bedingungen

Daraus ergibt sich eine Schallkennimpedanz von $Z_0 = 411,5 \frac{\text{Ns}}{\text{m}^3}$ [1, p. 4].

2.2 Zeitliche Stabilität

Anforderungen an die zeitliche Stabilität beziehungsweise Wiederholgenauigkeit unter selben Bedingungen sind gegeben in Form einer maximal zulässigen Standardabweichung σ_r für jeweils einen festgelegten Frequenzbereich [1, p. 5]. Die folgende Tabelle zeigt diese Grenzen:

Terzbänder-Mittenfrequenz	Maximale Standardabweichung σ_r
50 Hz ... 80 Hz	0,8 dB
100 Hz ... 160 Hz	0,4 dB
200 Hz ... 20 kHz	0,2 dB

Tabelle 2.2: Zulässige Standardabweichungen für den Schalleistungspegel

Außerdem müssen der Referenzschallquelle Angaben über die tolerierbare Schwankungsbreite der Speisespannung beigelegt werden, bei welcher der Schallleistungspegel in keinem Frequenzband um mehr als $\pm 0,3$ dB schwankt. Angaben über die Korrektur bei Messungen, welche nicht unter Referenzbedingungen durchgeführt werden, sind ebenfalls beizulegen.

2.3 Spektrale Eigenschaften

Innerhalb des Frequenzbereiches von 100 Hz bis 10 kHz darf der in Terzbändern gemessene Schallleistungspegel um maximal 12 dB variieren, wobei die absolute Differenz zwischen zwei benachbarten Terzbändern im angeführten Frequenzbereich höchstens 3 dB betragen darf.

Wird der Frequenzbereich nach unten auf bis zu 50 Hz und/oder nach oben auf bis zu 20 kHz erweitert, so sind zusätzlich zu obigen Vorgaben höchstens 16 dB für die maximale Schwankungsbreite innerhalb des gesamten, resultierenden Frequenzbereiches erlaubt. In den hinzugefügten Frequenzbereichen unterhalb von 100 Hz bzw. über 10 kHz sind 4 dB für die Differenz zweier benachbarter Terzbänder zulässig. Zwischen 100 Hz und dem darunterliegenden Terzband, sowie zwischen 10 kHz und dem darüberliegenden Terzband gilt ebenfalls die Vorgabe mit 4 dB.

Sämtliche spektralen Eigenschaften sind in einem reflexionsarmen Halbraum oder einem Hallraum zu evaluieren [1, p. 5].

2.4 Richtwirkung

Für eine Referenzschallquelle ist im Allgemeinen anzustreben, dass die abgestrahlte Schallleistung möglichst gleichmäßig auf alle Raumrichtungen verteilt ist, also eine möglichst (halb)kugelförmige und ungerichtete Abstrahlung vorliegt. Konkret wird vorgeschrieben, dass das maximale Bündelungsmaß im gesamten interessierenden Frequenzbereich für jedes Terzband einen Wert zwischen 0 dB und 6 dB anzunehmen hat [1, p. 6].

Hier gilt allerdings zu beachten, dass in der ISO 6926 das Bündelungsmaß mit der Formel

$$D_{Ii} = L_{pi} - \overline{L_p} \quad (2.1)$$

berechnet wird, wobei D_{Ii} das Bündelungsmaß in Richtung der i -ten Mikrofonposition ist. L_{pi} ist der Schalldruckpegel an der i -ten Mikrofonposition und $\overline{L_p}$ der über alle Mikrofonpositionen gemittelte Schalldruckpegel. Oft wird jedoch das Bündelungsmaß in der Literatur anders definiert, nämlich als Pegeldifferenz des in der interessierenden Richtung gemessenen Schalldruckpegels und jenes Schalldruckpegels, den eine gedachte Kugelschallquelle an der betrachteten Position liefern würde [2, p. 95]. Nachdem jedoch die Definition der ISO 6926 für die Messung in einem reflexionsarmen Halbraum gilt und somit eine halbkugelförmige Abstrahlung vorliegt anstelle einer kugelförmigen, ist das in obiger

Formel definierte Bündelungsmaß um 3 dB geringer als jenes, das in der Literatur für theoretische Überlegungen üblich ist.

2.5 Weitere Anforderungen

Wird eine Referenzschallquelle realisiert, welche am Boden zu platzieren ist und in einem reflexionsarmen Halbraum kalibriert werden soll, so darf diese die Abmessungen 0,5 m in vertikaler Richtung und 0,8 m in horizontaler Richtung nicht überschreiten [1, p. 1].

2.6 Zusammenfassung

Die folgenden Punkte fassen die Anforderungen gemäß ISO 6926 formal zusammen, um in weiterer Folge in kompakter Form Zugriff darauf zu haben.

1. Wiederholgenauigkeit:

$$\sigma_{r,f_k} \leq 0,8 \text{ dB für } 50 \text{ Hz} \leq f_k \leq 80 \text{ Hz}$$

$$\sigma_{r,f_k} \leq 0,4 \text{ dB für } 100 \text{ Hz} \leq f_k \leq 160 \text{ Hz}$$

$$\sigma_{r,f_k} \leq 0,2 \text{ dB für } 200 \text{ Hz} \leq f_k \leq 20 \text{ kHz}$$

2. Maximale Schwankungsbreite des Schalleistungspegels über der Frequenz:

$$\max_{f_k} \{L_{W,f_k}\} - \min_{f_k} \{L_{W,f_k}\} \leq 12 \text{ dB für } 100 \text{ Hz} \leq f_k \leq 10 \text{ kHz und}$$

$$\max_{f_k} \{L_{W,f_k}\} - \min_{f_k} \{L_{W,f_k}\} \leq 16 \text{ dB für } 50 \text{ Hz} \leq f_k \leq 20 \text{ kHz}$$

3. Maximale absolute Differenz der Schalleistungspegel benachbarter Terzbänder:

$$|L_{W,f_k} - L_{W,f_{k-1}}| \leq 3 \text{ dB für } 100 \text{ Hz} < f_k \leq 10 \text{ kHz und}$$

$$|L_{W,f_k} - L_{W,f_{k-1}}| \leq 4 \text{ dB für } 50 \text{ Hz} < f_k \leq 20 \text{ kHz}$$

4. Maximales Bündelungsmaß über alle Frequenzen:

$$D_{i,f_k} = L_{p i,f_k} - \overline{L_p} \leq 6 \text{ dB für } 50 \text{ Hz} < f_k \leq 20 \text{ kHz und alle Richtungen (Index } i)$$

5. Geometrische Abmessungen in horizontaler und vertikaler Richtung:

$$l_h \leq 0,8 \text{ m und}$$

$$l_v \leq 0,5 \text{ m}$$

f_k bezeichnet hierbei die k -te Terzbandmittenfrequenz in dem erweiterten Frequenzbereich 50 Hz ... 20 kHz, welcher von Interesse ist. Die hier angeführten Anforderungen müssen schlussendlich für jenen Frequenzbereich gelten, für den die Referenzschallquelle nach ISO 6926 zertifiziert sein soll. Dieser kann auch geringer, als oben angeführt, ausfallen.

Auf diese fünf Anforderungen wird in den folgenden Kapiteln mit den hier aufgelisteten Nummern referenziert (zum Beispiel „Anforderung 3“).

3 Bestehende Referenzschallquellen

Das folgende Kapitel stellt drei bestehende Modelle für Referenzschallquellen unterschiedlicher Hersteller gegenüber. Ziel ist es, daraus Erkenntnisse zu gewinnen, bei welchen Anforderungen eine Referenzschallquelle mit einem elektroakustischen Wandler einem Radiallüfter über- beziehungsweise unterlegen ist, um in weiterer Folge auf die Schwächen eines solchen Ansatzes den Fokus legen zu können. Betrachtet werden:

- Modell „Nor278“ des Herstellers Norsonic
- Modell „4204“ des Herstellers Brüel & Kjær (im Weiteren als „BK4204“ bezeichnet)
- Modell „Qref“ des Herstellers Qsources

Die Modelle „Nor278“ und „BK4204“ bedienen sich der Technologie von Radiallüftern als Schallquelle, was sich insbesondere für die Richtwirkung positiv im Sinne einer möglichst ungerichteten Abstrahlung auswirkt, zumindest in einer horizontalen Ebene. Mit variiertem Elevationswinkel kann auch bei Radiallüftern eine Richtwirkung festgestellt werden. Beide Modelle decken den maximal erweiterten Frequenzbereich 50 Hz ... 20 kHz ab [3] [4].

Dem gegenüber steht das Modell „Qref“, welches einen einzigen, breitbandigen Lautsprecher als Schallquelle beinhaltet. Hier gilt allerdings zu beachten, dass die ISO 6926 lediglich in dem zwar nach unten erweiterten, aber nach oben eingeschränkten Frequenzbereich 50 Hz ... 8 kHz erfüllt wird, und auch nur in diesem Bereich eine Abstrahlung erfolgt [5].

Sämtliche Daten, die den Graphen in diesem Kapitel zugrunde liegen, stammen aus den jeweiligen Datenblättern und sind tabellarisch im Anhang (Kapitel 7) vorzufinden.

Die folgenden drei Abbildungen zeigen die vorgestellten Referenzschallquellen und deren Größenverhältnisse. Sie stammen aus den jeweiligen Datenblättern [3] [4] [5].



Abbildung 3.1: Nor278



Abbildung 3.2: BK4204



Abbildung 3.3: Qref

3.1 Zeitliche Stabilität

Für die zeitliche Stabilität sind für keine der drei betrachteten Referenzschallquellen konkrete Zahlenwerte angegeben. Hier kann somit auch kein Vergleich durchgeführt werden.

3.2 Spektrale Eigenschaften

Zunächst wird der typische, in Terzbändern angegebene Schallleistungspegel betrachtet, wobei für das Modell „Qref“ nur Daten von 100 Hz bis 5 kHz vorliegen.

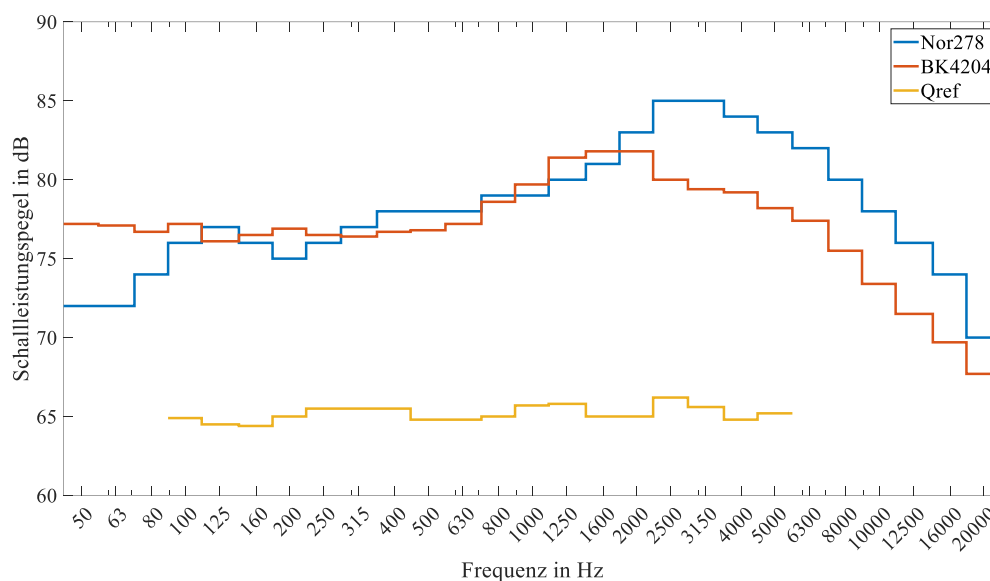


Abbildung 3.4: Vergleich Schallleistungspegel

Es zeigt sich, dass „Nor278“ und „BK4204“ im Bereich 100 Hz ... 2 kHz einen ähnlichen Verlauf haben, darüber und darunter ist eine Abweichung voneinander zu erkennen. Deutlich sichtbar ist ebenfalls, dass das Modell „Qref“ im angegebenen Frequenzbereich einen wesentlich flacheren Pegelverlauf hat, was darauf zurückzuführen ist, dass bei diesem elektroakustischen Wandler eine Entzerrung durch signalverarbeitungstechnische Maßnahmen möglich ist, im Gegensatz zu den Radiallüftern, denen nicht explizit ein Audiosignal zugeführt wird. „Qref“ hat über den gesamten Frequenzbereich einen wesentlich niedrigeren Pegel als die beiden Radiallüfter. ISO 6926 hat hierfür keine explizite Vorgabe.

3.3 Richtwirkung

Es wird das ebenfalls in Terzbändern angegebene Bündelungsmaß untersucht.

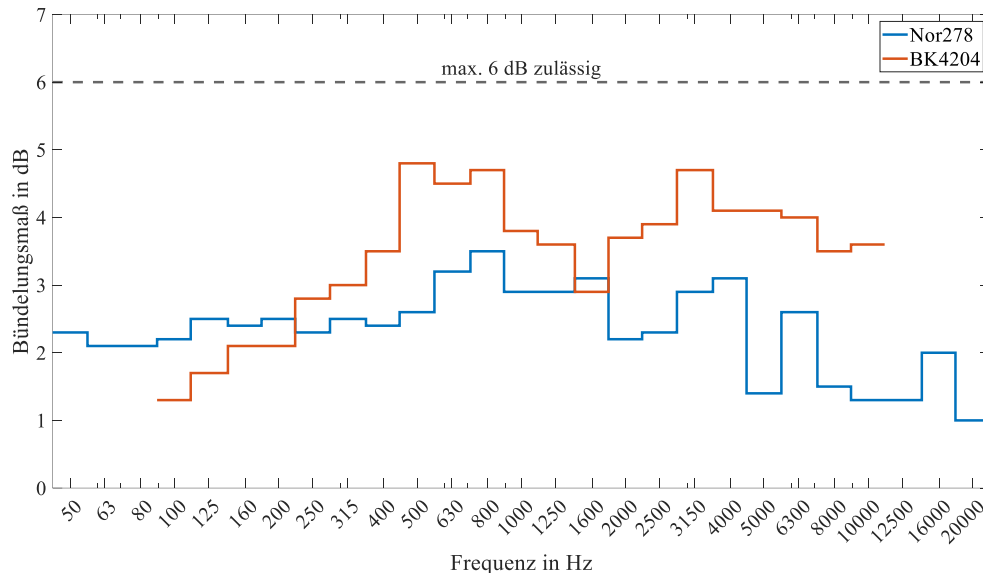


Abbildung 3.5: Vergleich Bündelungsmaß

Hier ist abzulesen, dass das Modell „Nor278“ dem Modell „BK4204“ hinsichtlich der möglichst ungerichteten Abstrahlung, über einen weiten Frequenzbereich überlegen ist. Für das Modell „Qref“ liegt kein Verlauf des Bündelungsmaßes über der Frequenz vor; es wird lediglich angegeben, dass der Wert 5 dB über den gesamten abgestrahlten Frequenzbereich 50 Hz ... 8 kHz nicht überschritten wird [5].

Die beiden Radiallüfter haben über den gesamten Frequenzbereich ein geringeres Bündelungsmaß als 5 dB. Anders als bei Lautsprechern üblich, steigt bei ihnen das Bündelungsmaß nicht mit zunehmender Frequenz an.

3.4 Vergleich

Die folgende Tabelle zeigt, welche Zahlenwerte diejenigen Parameter der analysierten Referenzschallquellen annehmen, die nach ISO 6926 durch Maximalwerte beschränkt sind. Die Angaben für das Modell „Qref“ sind – unter anderem aufgrund des eingeschränkten Frequenzbereichs – nur im Bereich 100 Hz ... 8 kHz im Datenblatt angeführt [5]. Für die Referenzschallquelle „BK4204“ sind die Herstellerangaben für das Bündelungsmaß nur im Bereich 100 Hz ... 10 kHz vorhanden. Es wird allerdings seitens des Herstellers versichert, dass das Bündelungsmaß außerhalb dieses Bereichs ebenfalls den Anforderungen von ISO 6926 genügt [4].

Nr	Größe	Zulässiger Bereich	Nor278 [3]	BK4204 [4]	Qref [5]
1	Wiederholgenauigkeit	$\leq 0,8$ dB, 50 Hz ... 80 Hz $\leq 0,4$ dB, 100 Hz ... 160 Hz $\leq 0,2$ dB, 200 Hz ... 20 kHz	keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe 0,1 dB 0,2 dB
2	Schwankungsbreite Schalleistungspegel	≤ 12 dB, 100 Hz ... 10 kHz ≤ 16 dB, 50 Hz ... 20 kHz	10 dB 15 dB	8,4 dB 14,1 dB	1,8 dB keine Angabe
3	Max. Differenz benachbarter Terzbänder	≤ 3 dB, 100 Hz ... 10 kHz ≤ 4 dB, 50 Hz ... 20 kHz	2 dB @2 kHz 4 dB @20 kHz	2,1 dB @10 kHz (beide Fälle)	1,2 dB @2,5 kHz keine Angabe
4	Max. Bündelungsmaß	≤ 6 dB	3,5 dB	4,8 dB	5 dB
5	Geometrische Abmessungen	horizontal: $\leq 0,8$ m vertikal: $\leq 0,5$ m	0,283 m 0,464 m	0,3 m 0,3 m	0,106 m 0,165 m

Tabelle 3.1: Vergleich bestehender Referenzschallquellen hinsichtlich Anforderungen nach ISO 6926

Für die Wiederholgenauigkeit kann auf Basis der gegebenen Daten keine vergleichende Aussage zwischen Radiallüftern und Lautsprecher getroffen werden.

Die Schwankungsbreite des Schalleistungspegels des Modells „Qref“ ist – aus dem oben genannten Grund – wesentlich geringer als die von „Nor278“ und „BK4204“. Ebenso verhält es sich bei dem Abstand der Schalleistungspegel benachbarter Terzbänder. Hier spielt Signalverarbeitung eine Rolle, die die Einhaltung der Anforderungen 2 und 3 für Lautsprechersysteme wesentlich erleichtert.

Hinsichtlich des Bündelungsmaßes sind die rotationssymmetrisch aufgebauten Radiallüfter dem einzelnen Lautsprecher „Qref“ überlegen. Hier wird allerdings nur das maximale Bündelungsmaß betrachtet. In der horizontalen Ebene ist das Bündelungsmaß der Radiallüfter nochmals wesentlich kleiner als das des Lautsprechers. Besonders hervorzuheben ist, dass die Radiallüfter das Bündelungsmaß bis 20 kHz geringhalten, während der Lautsprecher „Qref“ lediglich bis 8 kHz zertifiziert ist. Es ist anzunehmen, dass das Bündelungsmaß jene Anforderung ist, welche eine Zertifizierung über 8 kHz verhindert hat. Daher ist in weiterer Folge für Ansätze mit einem oder mehreren Lautsprechern auf Anforderung 4 besonderes Augenmerk zu legen.

Die Grenzen für die geometrischen Abmessungen werden von allen drei Referenzschallquellen eingehalten; am handlichsten ist naturgemäß der Lautsprecher „Qref“.

Aus der folgenden Tabelle werden weitere, nicht explizit durch die Norm beschränkte Parameter der betrachteten Modelle zum Zwecke der Einordnung der Größenordnung ersichtlich.

Größe	Nor278 [3]	BK4204 [4]	Qref [5]
Schalleistungspegel	94 dB	92,3 dB	78 dB
Masse	18 kg	21 kg	1,1 kg
Temperaturbereich	-25 °C ... 50 °C	-10 °C ... 50 °C	15 °C ... 40 °C
Leistungsaufnahme	650 W	500 VA	500 W
Preis exkl. MwSt.	6.340 €	10.351 €	10.620 € ¹

Tabelle 3.2: Vergleich bestehender Referenzschallquellen hinsichtlich weiterer Parameter

Der unbewertete Summen-Schalleistungspegel des Lautsprechers „Qref“ ist wesentlich geringer als jener der beiden Radiallüfter.

Die Masse des „Qref“ ist mit weniger als einem Zehntel derer der Radiallüfter eine wesentliche Erleichterung in der praktischen Handhabung, hat aber für ISO 6926 keine normative Relevanz; ebenso der angegebene Temperaturbereich.

Die Leistungsaufnahme (beziehungsweise der Wirkungsgrad) spielt im Allgemeinen keine besondere Rolle für messtechnische Zwecke und ist bei allen Modellen in einer Größenordnung, welche von jeder Hausinstallation problemlos bereitgestellt werden kann.

¹ inklusive Stativ und notwendigem Verstärker QamR

4 Ansätze für Referenzlautsprecher

Wie Kapitel 2 und 3 zeigen, muss der Fokus darauf gelegt werden, einen möglichst omnidirektionalen Lautsprecher zu entwerfen. Hierfür existieren zahlreiche Ansätze [6]. Eine Auswahl davon wird in diesem Kapitel vorgestellt und deren Eignung für den beabsichtigten Zweck analysiert.

4.1 Dodekaeder-Lautsprecher Norsonic Nor276

Ein besonders naheliegender Ansatz für eine breitbandige, möglichst omnidirektionale Schallquelle ist ein Dodekaeder-Lautsprecher. Am SPSC ist ein solcher des Typs „Nor276“ vom Hersteller Norsonic vorhanden, weswegen dieser auf Konformität mit ISO 6926 untersucht wird. Dieser Lautsprecher erfüllt laut Hersteller die Norm ISO 140-3 (Anhang C) „Akustik – Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen – Teil 3: Messung der Luftschalldämmung von Bauteilen in Prüfständen“ aus 2004, welche mittlerweile unter dem Namen ISO 10140-5 „Akustik – Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand – Teil 5: Anforderungen an Prüfstände und Prüfeinrichtungen“ aus 2021 zu finden ist [7]. Ebenso wird dem Hersteller zufolge die Norm ISO 3382-2 (Anhang A) „Akustik – Messung von Parametern der Raumakustik – Teil 2: Nachhallzeit in gewöhnlichen Räumen“ erfüllt. Diese Norm verweist allerdings auf ISO 3382-1 „Akustik – Messung von raumakustischen Parametern – Teil 1: Aufführungsplätze“ [8], wo tatsächlich die Anforderungen zu finden sind. Beide Normen betreffen die Richtcharakteristik der Schallquelle und zielen auf eine möglichst ungerichtete Schallquelle ab, was für den beabsichtigten Zweck durchaus wünschenswert ist.

4.1.1 Zeitliche Stabilität

Über die zeitliche Stabilität dieses Lautsprechers ist im Datenblatt keine Angabe für die Standardabweichung vorzufinden. ISO 10140-5 sowie ISO 3382-1 stellen in dieser Hinsicht auch keine Anforderungen. Daher müsste die zeitliche Stabilität – gemäß Anforderung 1 – für eine konkrete Aussage empirisch ermittelt werden.

4.1.2 Spektrale Eigenschaften

Diejenigen Normen, welche der Lautsprecher erfüllt, geben hinsichtlich spektraler Eigenschaften lediglich vor, dass oberhalb von 100 Hz keine Pegelschwankungen größer als 6 dB vorliegen dürfen [7, p. 16], was jedoch eine geringere Anforderung ist als die entsprechende Vorgabe in ISO 6926 (vgl. Kap. 2.3), und somit keinesfalls als Garant für die Einhaltung der Vorschriften für die spektralen Eigenschaften nach ISO 6926 gilt.

Der betrachtete Frequenzbereich wird durch ISO 3382-1 nach oben auf die Terzband-Mittenfrequenz von 5 kHz beschränkt, was zur Folge hat, dass der Lautsprecher höchstens bis

5 kHz als Referenzschallquelle nach ISO 6926 fungieren könnte [8, p. 10]. Die untere Grenzfrequenz liegt bei 50 Hz.

Da allein aufgrund der Normen, die der Lautsprecher „Nor276“ erfüllt, keine Aussagen bezüglich Konformität in spektraler Hinsicht nach ISO 6926 getroffen werden können, wird das vom Hersteller angegebene Spektrum des Schalleistungspegels in Terzbändern untersucht. Die tabellarisch erfassten Werte sind im Anhang vorzufinden.

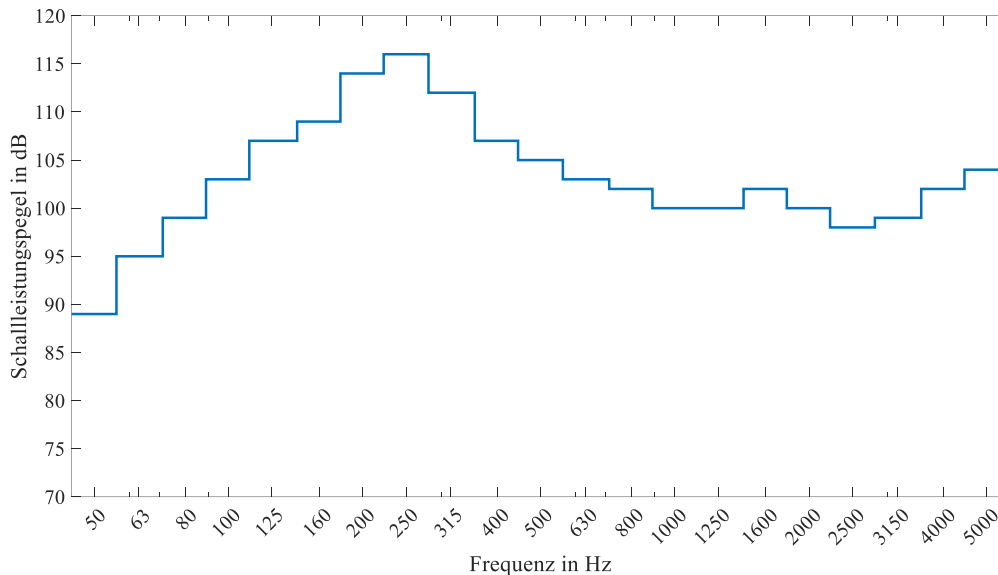


Abbildung 4.1: Schalleistungspegel Nor276

Es zeigt sich, dass im Bereich von 100 Hz bis 5 kHz der maximale Pegelunterschied 18 dB beträgt. Konkret wird somit Anforderung 2 gemäß

$$\max_{f_k} \{L_{W,f_k}\} - \min_{f_k} \{L_{W,f_k}\} = L_{W,250 \text{ Hz}} - L_{W,2500 \text{ Hz}} = 116 \text{ dB} - 98 \text{ dB} = 18 \text{ dB} \not\leq 12 \text{ dB}$$

nicht erfüllt. Das bedeutet, dass aufgrund von Anforderung 2 der Lautsprecher nicht im ohnehin schon durch den Lautsprecher begrenzten Frequenzbereich von 50 Hz bis 5 kHz den spektralen Anforderungen nach ISO 6926 entspricht. Dennoch werden die verbleibenden Anforderungen überprüft.

Auch Anforderung 3 wird verfehlt, da die Pegelabstände benachbarter Frequenzbänder im Bereich von 100 Hz bis 5 kHz bis zu 5 dB sind (zwischen 315 Hz und 400 Hz), und damit höher als das vorgegebene Limit von höchstens 3 dB.

4.1.3 Richtwirkung

Von einem Dodekaeder-Lautsprecher ist eine eher ungerichtete Schallabstrahlung zu erwarten. Die Normen ISO 140-3 und ISO 3382-2, nach denen dieser Lautsprecher zertifiziert ist, schreiben hierfür zwar Obergrenzen für das maximale Bündelungsmaß vor, jedoch sind diese über einen großen Frequenzbereich toleranter angesetzt als in ISO 6926. Somit wird das vom Hersteller angegebene Bündelungsmaß auf Konformität überprüft. Die tabellarischen Daten sind im Anhang vorzufinden.

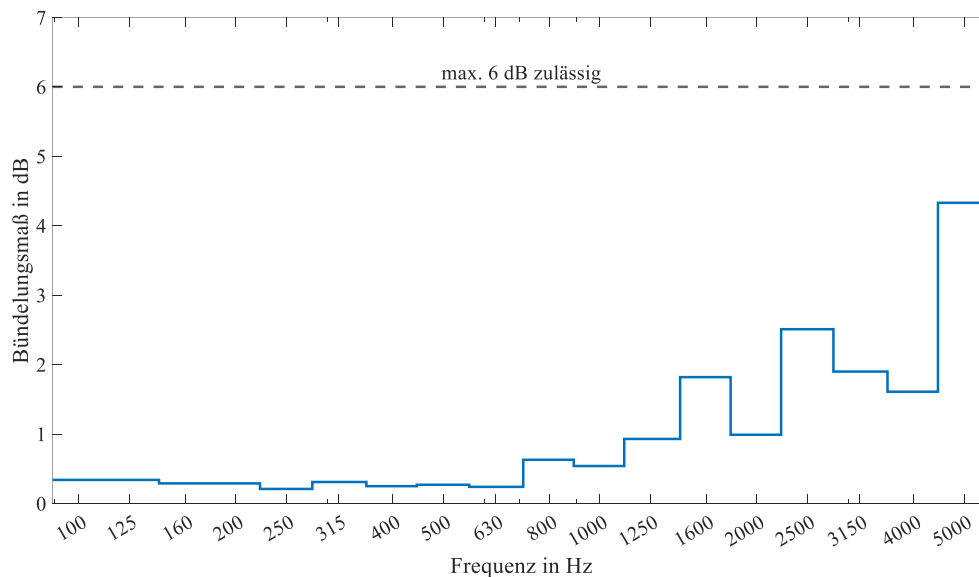


Abbildung 4.2: Bündelungsmaß Nor276

Über den Frequenzbereich von 100 Hz bis 5 kHz wird die Anforderung 4 eindeutig erfüllt. Das maximale Bündelungsmaß beträgt 4,3 dB bei 5 kHz. Unter 100 Hz liegt keine Angabe für das Bündelungsmaß vor, auch die Normen, nach denen der Lautsprecher zertifiziert ist, haben hierfür keine Obergrenze. Dennoch ist davon auszugehen, dass in diesem Bereich Anforderung 4 erfüllt wird, da im Allgemeinen bei tiefen Frequenzen eine ungerichtete Abstrahlung vorliegt [2, p. 96].

4.1.4 Zusammenfassung

In der vorliegenden Form kann der Dodekaeder-Lautsprecher Norsonic „Nor276“ nicht als Referenzschallquelle gemäß ISO 6926 verwendet werden. Zwar erzielt dieser hinsichtlich einer ungerichteten Schallabstrahlung gute Ergebnisse, doch die spektralen Eigenschaften entsprechen nicht der Norm. Es wäre zwar möglich, den Lautsprecher mit einem anderen Verstärker oder einem zwischengeschalteten Filter zu verwenden, welches eine Glättung des Schalleistungspegels vornimmt, doch würde dem Hersteller zufolge der Lautsprecher dadurch möglicherweise Schaden nehmen; in jedem Fall erlischt damit die Garantie [9]. Dennoch kann die Erkenntnis gewonnen werden, dass Dodekaeder- oder allgemein Polyeder-Lautsprecher prinzipiell eine Möglichkeit der Realisierung darstellen, wenn zusätzlich das Augenmerk auf einen flachen Schalleistungspegelverlauf, gemessen in Terzbändern, gelegt wird.

4.2 Regulärer Polyeder-/Dodekaeder-Lautsprecher

Wenngleich der Dodekaeder-Lautsprecher „Nor 276“ nicht den Anforderungen von ISO 6926 entspricht, sind Lautsprecher in Form von regulären Polyedern ein häufig gewählter Ansatz für omnidirektionale Schallquellen. Zur Auswahl stehen die folgenden platonischen Körper bzw. regulären Polyeder:

- Tetraeder (vier Seiten)
- Hexaeder/Würfel (sechs Seiten)
- Oktaeder (acht Seiten)
- Dodekaeder (zwölf Seiten)
- Ikosaeder (zwanzig Seiten)

Leishman et al. [10] konnte durch Messungen zeigen, dass bei tiefen Frequenzen das Tetraeder die größte Omnidirektionalität aufweist, während bei hohen Frequenzen eine höhere Seitenanzahl eine bessere ungerichtete Abstrahlung bedeutet. Das Optimum bei höheren Frequenzen stellt das Dodekaeder dar. Eine weitere Erhöhung der Seitenanzahl auf ein Ikosaeder bringt keine wesentliche Verbesserung, und erhöht ausschließlich Kosten und Fertigungsaufwand.

Neben der Anzahl der Seiten beeinflusst auch die Größe das Abstrahlverhalten. Will man eine hohe obere Grenzfrequenz, bei der die Bündelung einen gewissen Wert gerade noch unterschreitet, so müssen die Abmessungen des Dodekaeders klein sein. Dies geht allerdings mit dem Nachteil einher, dass bei tiefen Frequenzen kein hoher Schalldruckpegel mehr erreicht werden kann [10, p. 2].

Da bei einem Dodekaeder-Lautsprecher zwischen guter Omnidirektionalität bei hohen Frequenzen und ausreichendem Pegel bei niedrigen Frequenzen abgewogen werden muss, ist er prinzipiell nicht dafür geeignet, für sich eine Referenzschallquelle nach ISO 6926 darzustellen. Allerdings kann er als Hochtöner in einem Zweiwegesystem mit zusätzlichem Tieftöner fungieren. Die Anordnung stellt hier jedoch eine Herausforderung dar, sind doch die geometrischen Abmessungen nach Anforderung 5 begrenzt und eine rotationssymmetrische Anordnung daher schwierig.

Mögliche Ansätze sind ein auf ein Stativ angebrachter oberer Halb-Dodekaeder, welcher auf der flachen Unterseite ein einzelnes Tieftöner-Chassis verbaut hat. Alternativ wäre eine Anordnung vorstellbar, bei der ebenfalls ein (kleiner) Halb-Dodekaeder auf einem Stativ platziert wird, und sich darunter ein Tieftöner, in liegender Position, befindet.

4.3 Inverser Hornlautsprecher

Eine ungerichtete Schallabstrahlung bei hohen Frequenzen erfordert kleine geometrische Abmessungen der abstrahlenden Fläche. Ein inverser Hornlautsprecher erlaubt dies durch seine spezielle Schallführungsform, welche die Schallenergie einer kleinen bis mittelgroßen Membran durch einen Schalltrichter auf eine wesentlich kleinere Querschnittsfläche konzentriert [11, p. 1].

Gewöhnliche Hornlautsprecher vergrößern durch einen an der Membran aufgesetzten Trichter den Querschnitt und sorgen somit für eine Impedanzanpassung der Kolbenmembran an die Luft. Die abgegebene Wirkleistung und in weiterer Folge der Wirkungsgrad werden dadurch gegenüber einem gewöhnlichen geschlossenen Gehäuse wesentlich erhöht, wenngleich sich durch den hohen Mündungsquerschnitt die Bündelung erhöht [2, p. 103ff]. Gebräuchliche Trichterformen sind beispielsweise der Konustrichter und der Exponentialtrichter.

Ein inverses Horn bewirkt das Gegenteil dessen. Durch einen Trichter, welcher den Querschnitt verringert, anstatt ihn zu vergrößern, wird die Schallabstrahlung ungerichteter. Gleichzeitig wird jedoch die Impedanz-Fehlanpassung verstärkt, weshalb ein geringer Wirkungsgrad zu erwarten ist. Des Weiteren gilt zu beachten, dass aufgrund des Aufbaus Resonanzerscheinungen innerhalb des Trichters auftreten [11, p. 3]. Dies kann durch inverses Filtern des Audiosignals kompensiert werden, um den Frequenzgang zu glätten [12, p. 7].

Der inverse Hornlautsprecher besteht aus einem Chassis, das in ein rückwärtig geschlossenes Gehäuse verbaut wird, an welchem der Trichter aufsetzt. Membranseitig ist der Querschnitt durch den Membranquerschnitt festgelegt. Über eine bestimmte Länge leitet der Trichter die Schallenergie mit abnehmendem Querschnitt zu einer kleinen Öffnung, von der die Abstrahlung in die Umgebung erfolgt. Die folgende Abbildung zeigt einen inversen Hornlautsprecher schematisch im Querschnitt.

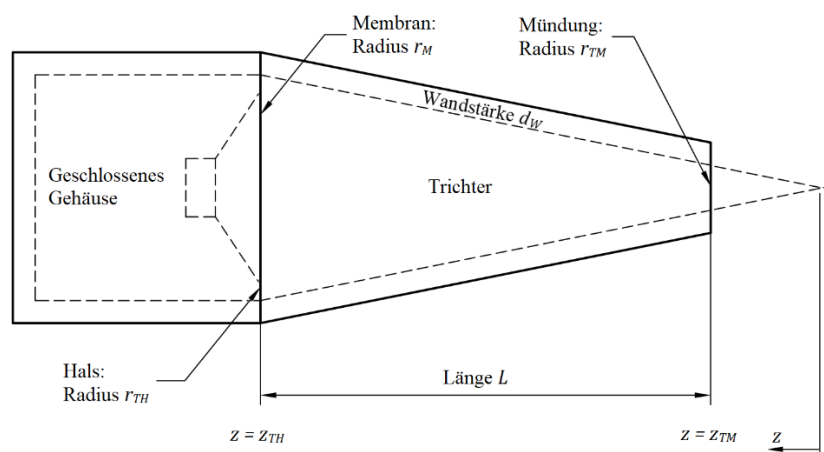


Abbildung 4.3: Inverser Hornlautsprecher im Querschnitt

Die Größen z_{TM} und z_{TH} werden mit dem Strahlensatz für ähnliche Dreiecke berechnet.

$$\frac{z_{TM}}{r_{TM}} = \frac{z_{TM} + L}{r_{TH}} \rightarrow z_{TM} = L \cdot \frac{r_{TM}}{r_{TH} - r_{TM}}, \quad z_{TH} = z_{TM} + L \quad (4.1)$$

Für den Entwurf eines inversen Horn-Lautsprechers müssen folgende Punkte/Parameter bearbeitet bzw. festgelegt werden:

- Form des Trichters/Querschnittsverlauf (Konus, Exponentialtrichter, ...)
- Radius/Querschnitt der Trichtermündung
- Radius/Querschnitt des Trichterhalses (durch Chassis vorgegeben)
- Länge des Trichters
- Auswahl des Lautsprecher-Chassis
- Gehäusevolumen des geschlossenen Gehäuses

Im Verlauf dieses Unterkapitels werden zunächst Modellbildungen vorgenommen, um den SPL-Frequenzgang (Sound Pressure Level) und die Richtwirkung des Inversen Hornlautsprechers in einer ersten Näherung vorauszusagen. Im Anschluss wird diskutiert, ob und in welcher Form ein Inverser Hornlautsprecher für den beabsichtigten Zweck geeignet ist.

4.3.1 Spektrale Eigenschaften – SPL-Frequenzgang

Um den SPL-Frequenzgang eines Inversen Hornlautsprechers zu bestimmen, ist es nützlich, diesen durch ein Ersatzschaltbild zu modellieren. Das Lautsprecherchassis wird hierbei durch den Serienwiderstand und die Induktivität der Schwingspule beschrieben, gefolgt von einem FI-Wandler, welcher den Übergang von der elektrischen in die mechanische Domäne bildet. In der mechanischen Domäne wird die Membran inklusive ihrer Aufhängung durch die drei mechanischen Elemente Reibwiderstand, Feder und Masse beschrieben, welche parallel angeordnet sind [2, p. 173]. Zusätzlich ist eine Feder parallel angeordnet, die das geschlossene Gehäuse repräsentiert, in welches das Lautsprecher-Chassis eingebaut wird.

Den Übergang in die akustische Domäne bildet ein pF-Wandler. Das Verhalten des Trichters kann durch seine Kettenmatrix beschrieben werden [12, p. 4]. Schlussendlich wird die Trichteröffnung durch die Impedanz einer gedachten Kolbenmembran mit entsprechendem Querschnitt belastet. Abbildung 4.4 zeigt das Ersatzschaltbild des Inversen Hornlautsprechers.

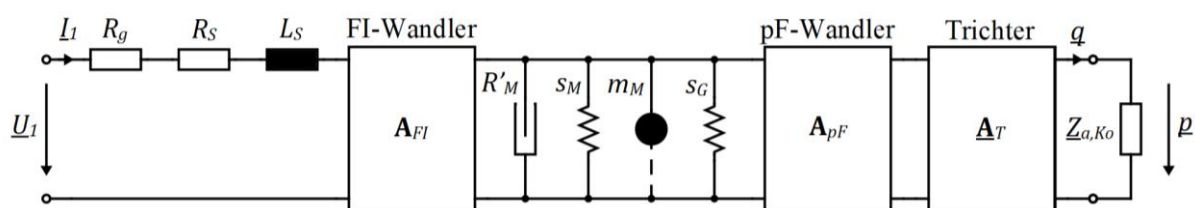


Abbildung 4.4: Ersatzschaltbild des Inversen Hornlautsprechers

R_g ... gesamter Serienwiderstand (Verstärker, Kabel, etc.)

R_S ... Ohm'scher Widerstand der Schwingspule

L_S ... Induktivität der Schwingspule

A_{FI} ... Kettenmatrix des FI-Wandlers mit der Wandlerkonstante Bl

R'_M ... mechanischer Reibwiderstand der Membranaufhängung

$s_M = \frac{1}{c'_M}$... mechanische Federkonstante der Membranaufhängung (c'_M ... Nachgiebigkeit)

m_M ... Masse der Membranstruktur (alle schwingenden Teile)

s_G ... mechanische Federkonstante der Luft im geschlossenen Gehäuse (akustische Feder)

\mathbf{A}_{pF} ... Kettenmatrix des pF-Wandlers mit Wandlerkonstante S_M ... Membranfläche

\mathbf{A}_T ... Kettenmatrix des Trichters – siehe (4.8)

$\underline{Z}_{a,Ko} = \frac{p}{q}$... akustische Impedanz der gedachten Kolbenmembran (Trichtermündung)

Um die Berechnung zu erleichtern, werden nun einige Äquivalenzumformungen des Ersatzschaltbildes getätigt. Zunächst wird der Schaltungsteil der Membranaufhängung und des geschlossenen Gehäuses bestehend aus R'_M , s_M , m_M und s_G , mit dem FI-Wandler vertauscht. Dadurch entsteht nun links neben dem FI-Wandler ein zusätzliches elektrisches Netzwerk anstelle des mechanischen Netzwerks rechts von ihm. Nachdem FI-Wandler und pF-Wandler nun direkt hintereinandergeschaltet sind, können sie zu einem pI-Wandler zusammengefasst werden.

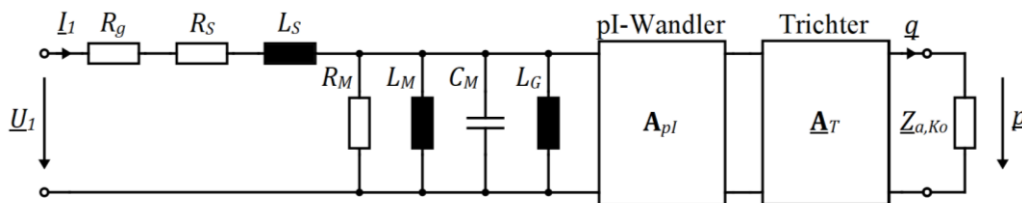


Abbildung 4.5: Ersatzschaltbild des Inversen Hornlautsprechers (erste Vereinfachung)

$R_M = \frac{(Bl)^2}{R'_M}$... elektrische Entsprechung von R'_M

$L_M = \frac{(Bl)^2}{s_M}$... elektrische Entsprechung von s_M

$C_M = \frac{m_M}{(Bl)^2}$... elektrische Entsprechung von m_M

$L_G = \frac{(Bl)^2}{s_G}$... elektrische Entsprechung von s_G

\mathbf{A}_{pI} ... Kettenmatrix des pI-Wandlers

Für die weitere Berechnung werden nun die seriell verschalteten Elemente R_g , R_s und L_s zu einer Impedanz \underline{Z}_S zusammengefasst. Dasselbe wird mit den parallel geschalteten Elementen R_M , L_M , C_M und L_G vollführt, welche zu einer Impedanz \underline{Z}_M kombiniert werden, wobei $\omega = 2\pi f$ die Kreisfrequenz ist:

$$\underline{Z}_S = R_g + R_S + j\omega L_S \quad (4.2)$$

$$\underline{Z}_M = \frac{1}{\frac{1}{R_M} + \frac{1}{j\omega L_M} + \frac{1}{j\omega L_G} + j\omega C_M} = \frac{j\omega R_M L_M L_G}{(j\omega)^2 R_M L_M L_G C_M + j\omega L_M L_G + (L_M + L_G) R_M} \quad (4.3)$$

Das maximal vereinfachte Ersatzschaltbild kann nun Abbildung 4.6 entnommen werden. Hierbei sind sämtliche Potential- und Flussgrößen eingezeichnet, welche zur Berechnung der Kettenmatrizen verwendet werden.

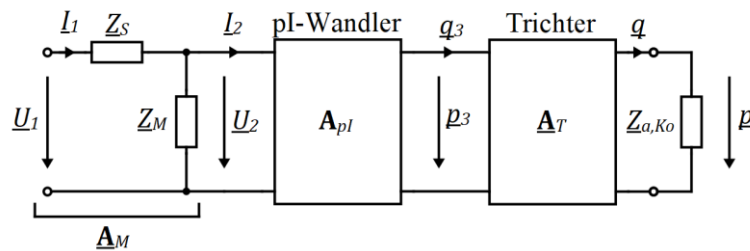


Abbildung 4.6: Ersatzschaltbild des Inversen Hornlautsprechers (zweite Vereinfachung)

Nun kann Schritt für Schritt die Übertragungsfunktion des Systems berechnet werden. Zunächst wird die Kettenmatrix $\underline{\mathbf{A}}_M$ der Zusammenschaltung von \underline{Z}_S und \underline{Z}_M ermittelt. Mit den Knoten- und Maschengleichungen

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_2 + \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_M}, \quad \underline{U}_1 = \underline{I}_1 \underline{Z}_S + \underline{U}_2 = \underline{I}_2 \underline{Z}_S + \underline{U}_2 \left(1 + \frac{\underline{Z}_S}{\underline{Z}_M}\right)$$

ergibt sich

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{\underline{Z}_S}{\underline{Z}_M} & \underline{Z}_S \\ \frac{1}{\underline{Z}_M} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_2 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix} = \underline{\mathbf{A}}_M \begin{bmatrix} \underline{U}_2 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix}, \quad \underline{\mathbf{A}}_M = \begin{bmatrix} 1 + \frac{\underline{Z}_S}{\underline{Z}_M} & \underline{Z}_S \\ \frac{1}{\underline{Z}_M} & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.4)$$

Die Kettenmatrix $\underline{\mathbf{A}}_{pI}$ setzt sich zusammen aus der Kettenmatrix $\underline{\mathbf{A}}_{FI}$ des FI-Wandlers sowie jener Kettenmatrix $\underline{\mathbf{A}}_{pF}$ des pF-Wandlers. Diese sind gemäß [2, p. 156] wie folgt gegeben:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_2 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix} = \underline{\mathbf{A}}_{FI} \begin{bmatrix} \underline{F} \\ \underline{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & Bl \\ 1 & 0 \\ Bl & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{F} \\ \underline{v} \end{bmatrix}, \quad \underline{\mathbf{A}}_{FI} = \begin{bmatrix} 0 & Bl \\ 1 & 0 \\ Bl & 0 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$\begin{bmatrix} \underline{F} \\ \underline{v} \end{bmatrix} = \underline{\mathbf{A}}_{pF} \begin{bmatrix} \underline{p}_3 \\ \underline{q}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_M & 0 \\ 0 & \frac{1}{S_M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{p}_3 \\ \underline{q}_3 \end{bmatrix}, \quad \underline{\mathbf{A}}_{pF} = \begin{bmatrix} S_M & 0 \\ 0 & \frac{1}{S_M} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix} &= \mathbf{A}_{pI} \begin{bmatrix} p_3 \\ q_3 \end{bmatrix}, \quad \alpha := \frac{Bl}{S_M}, \\ \mathbf{A}_{pI} = \mathbf{A}_{FI} \mathbf{A}_{pF} &= \begin{bmatrix} 0 & \frac{Bl}{S_M} \\ \frac{S_M}{Bl} & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \alpha \\ \frac{1}{\alpha} & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.7)$$

\underline{F} ... Kraft

\underline{v} ... Schnelle

Der Trichter kann nach [12, p. 4] näherungsweise durch folgende Kettenmatrix $\underline{\mathbf{A}}_T$ modelliert werden:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} p_3 \\ q_3 \end{bmatrix} &= \underline{\mathbf{A}}_T \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix}, \\ \underline{\mathbf{A}}_T &= \begin{bmatrix} \frac{z_{TH}}{z_{TM}} \cos kL - \frac{1}{kz_{TM}} \sin kL & \frac{j\rho c z_{TH}}{S_{TH} z_{TM}} \sin kL \\ \frac{jS_{TM}}{\rho c} \left(\frac{z_{TH}}{z_{TM}} + \frac{1}{(kz_{TM})^2} \right) \sin kL - \frac{L}{k \cdot z_{TM}^2} \cos kL & \frac{z_{TM}}{z_{TH}} \cos kL + \frac{1}{kz_{TH}} \sin kL \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.8)$$

$S_{TH} = r_{TH}^2 \pi$... Halsquerschnittsfläche

$S_{TM} = r_{TM}^2 \pi$... Mündungsquerschnittsfläche

Dieses Modell konnte durch experimentelle Evaluierung durch Ortiz et al. verifiziert werden [12]. Die Messungen stimmen hierbei einigermaßen gut mit der Vorhersage überein.

Schallgeschwindigkeit und Luftdichte werden mit $c = 340 \frac{m}{s}$ und $\rho = 1,2 \frac{kg}{m^3}$ angenommen. Gesamt ergibt sich also für den Inversen Hornlautsprecher die folgende Kettenmatrix:

$$\begin{aligned} \underline{\mathbf{A}} &= \underline{\mathbf{A}}_M \mathbf{A}_{pI} \underline{\mathbf{A}}_T = \begin{bmatrix} \underline{a}_{11} & \underline{a}_{12} \\ \underline{a}_{21} & \underline{a}_{22} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} U_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \underline{\mathbf{A}} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix}, \\ \underline{a}_{11} &= \frac{(kz_{TH} \cos kL - \sin kL) \underline{Z}_S}{\alpha kz_{TM}} - j \frac{(kL \cos kL - (1 + k^2 z_{TM} z_{TH}) \sin kL) \alpha S_{TM} (\underline{Z}_M + \underline{Z}_S)}{(kz_{TM})^2 \rho c \underline{Z}_M} \\ \underline{a}_{12} &= \frac{(kz_{TH}^2 \cos kL + z_{TM} \sin kL) \alpha (\underline{Z}_M + \underline{Z}_S)}{kz_{TM} z_{TH} \underline{Z}_M} + j \frac{\rho c z_{TH} \underline{Z}_S \sin kL}{\alpha S_{TH} z_{TM}} \\ \underline{a}_{21} &= \frac{kz_{TH} \cos kL - \sin kL}{\alpha kz_{TM}} - j \frac{(kL \cos kL - (1 + k^2 z_{TM} z_{TH}) \sin kL) \alpha S_{TM}}{(kz_1)^2 \rho c \underline{Z}_M} \\ \underline{a}_{22} &= \frac{(kz_{TH}^2 \cos kL + z_{TM} \sin kL) \alpha}{kz_{TM} z_{TH} \underline{Z}_M} + j \frac{\rho c z_{TH} \sin kL}{\alpha S_{TH} z_{TM}} \end{aligned} \quad (4.9)$$

Die Impedanz der Kolbenmembran ist nach [2, p. 99] gegeben als

$$\underline{Z}_{Ko} = \frac{p}{\underline{v}} = Z_0 \left(1 - 2 \frac{J_1(2kr_{TM})}{2kr_{TM}} + j2 \frac{H_1(2kr_{TM})}{2kr_{TM}} \right). \quad (4.10)$$

$Z_0 = 412 \frac{Ns}{m^3}$... Schallkennimpedanz der Luft

$J_1(\dots)$... Bessel-Funktion erster Ordnung

$H_1(\dots)$... Struve'sche Funktion erster Ordnung

Die im Ersatzschaltbild verwendete akustische Impedanz der Kolbenmembran ergibt sich mit $\underline{q} = \underline{v}S_{TM}$ zu

$$\underline{Z}_{a,Ko} = \frac{p}{\underline{q}} = \frac{p}{\underline{v}S_{TM}} = \frac{\underline{Z}_{Ko}}{S_{TM}}. \quad (4.11)$$

Aus (4.9) und (4.11) folgt nun

$$\underline{U}_1 = \underline{a}_{11}\underline{p} + \underline{a}_{12}\underline{q} = \left(\underline{a}_{11} + \frac{\underline{a}_{12}}{\underline{Z}_{a,Ko}} \right) \underline{p}, \underline{H}(f) := \frac{\underline{p}}{\underline{U}_1} = \frac{1}{\underline{a}_{11} + \frac{\underline{a}_{12}}{\underline{Z}_{a,Ko}}}, \quad (4.12)$$

wobei $\underline{H}(f)$ die Übertragungsfunktion des Inversen Hornlautsprechers ist. Sie gibt das Verhältnis des Schalldrucks in Achsrichtung zur Eingangsspannung an. Es gilt zu beachten, dass die Größen \underline{a}_{11} , \underline{a}_{12} sowie $\underline{Z}_{a,Ko}$ allesamt frequenzabhängig sind. Da alle diese Größen keine gebrochen rationalen Funktionen in der Variable $j\omega$ sind, ist auch $\underline{H}(f)$ nicht in gebrochen rationaler Form darstellbar. Aufgrund der Komplexität der resultierenden Formel wird auf eine Rücksubstitution dieser Größen verzichtet.

Für die graphische Darstellung im folgenden Diagramm werden folgende Designparameter gewählt, welche einen direkten Vergleich mit dem theoretischen und gemessenen SPL-Verlauf von Ortiz et al. [12] ermöglichen:

- Mündungsradius $r_{TM} = 7,5$ mm
- Halsradius $r_{TH} = 40$ mm
- Trichterlänge $L = 200$ mm
- Lautsprecher-Chassis: „AuraSound NS3-193-8A“ [12]

Gemäß Abbildung 4.8 kann der Einfluss durch das Gehäusevolumen über 200 Hz vernachlässigt werden. Somit wird diese akustische Feder (repräsentiert durch L_G) in allen folgenden Frequenzgangs-Darstellungen vernachlässigt. Für \underline{U}_1 wird 1 V gewählt.

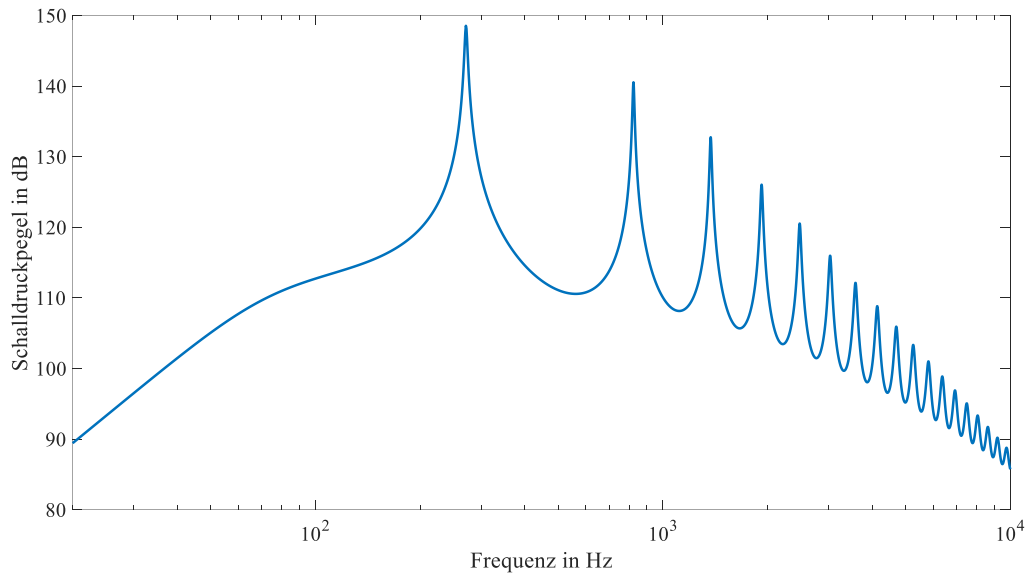


Abbildung 4.7: Theoretischer SPL-Verlauf (bezogen auf 20 μ Pa) des Inversen Hornlautsprechers

Ortiz et al. stellt den SPL-Verlauf in der folgenden Abbildung dar [12, p. 5], wobei hier das Volumen des geschlossenen Gehäuses variiert wird. Da sich der Einfluss des Gehäuses nur gering und bei niedrigen Frequenzen bemerkbar macht, kann ein direkter Vergleich angetreten werden.

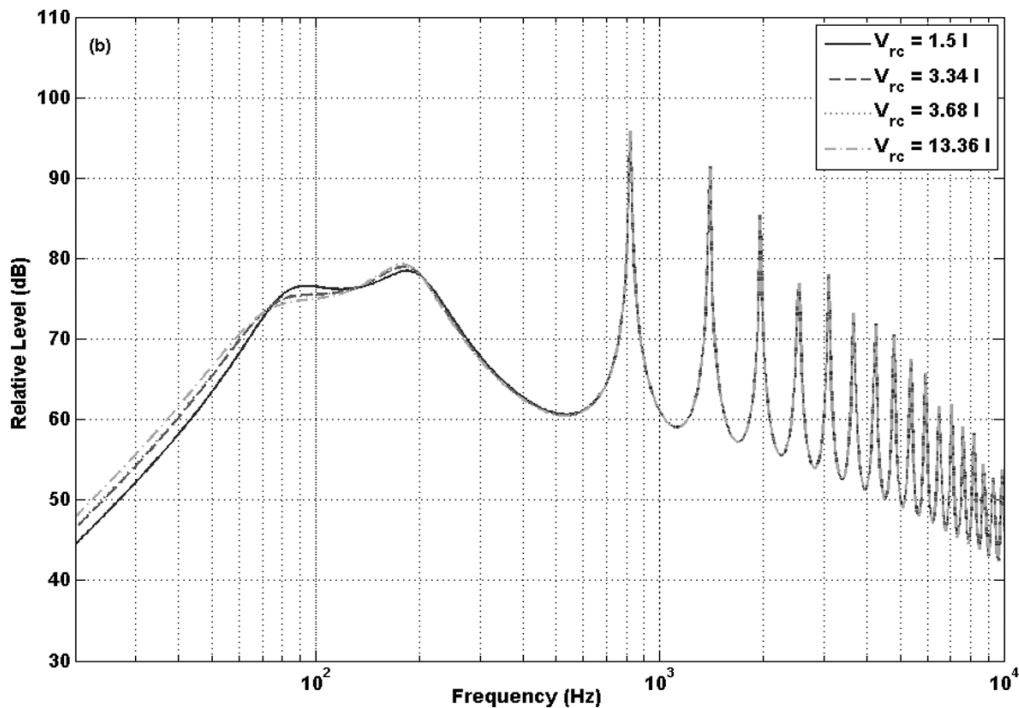


Abbildung 4.8: Theoretischer SPL-Verlauf nach Ortiz et al. (variirtes Gehäusevolumen)

Für $f > 300$ Hz zeigt sich ein qualitativ sehr ähnlicher Verlauf. Die Resonanzspitzen, welche durch den Trichter verursacht werden, sind bis auf die erste an denselben Positionen. Das

unterschiedliche Verhalten unter 300 Hz ist möglicherweise durch unterschiedliche Modellbildung der Membran zu erklären.

Die folgende Abbildung (Kurve „aslc“, durchgezogen) [12, p. 7] zeigt allerdings, dass für niedrige Frequenzen ohnehin ein anderer Verlauf zu Tage tritt, als erwartet. Hier wurde von Ortiz et al. [12] eine Messung mit denselben Parametern wie in den obigen Abbildungen durchgeführt.

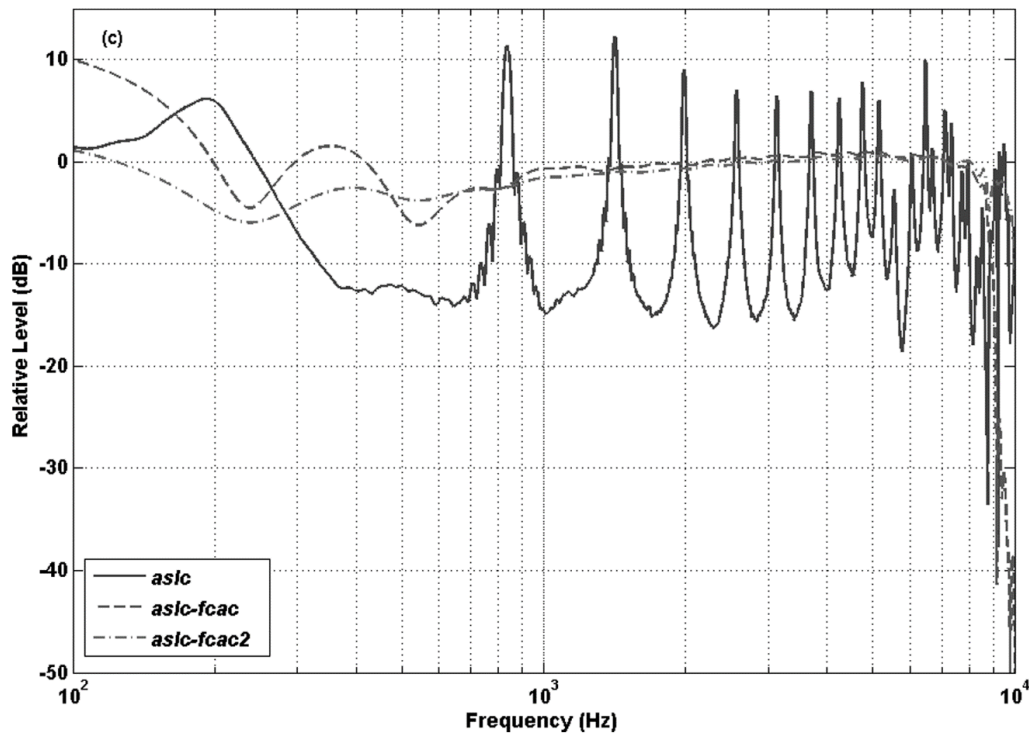


Abbildung 4.9: Gemessener SPL-Verlauf nach Ortiz et al.

Die Resonanzspitzen sind näherungsweise an den vorhergesagten Positionen, wenngleich der Verlauf für niedrige Frequenzen erheblich von der Modellbildung abweicht. Da der Inverse Hornlautsprecher hauptsächlich für höhere Frequenzen eingesetzt wird, weil er bei den Tiefen eine schwache Abstrahlung hat, wird dies bei der Dimensionierung eine untergeordnete Rolle spielen.

Das zunächst für die Anforderungen 2 und 3 negativ anmutende Verhalten der starken Trichterresonanzen konnte von Ortiz et al. und anderen [13] [14] durch inverse Filter, die dem Lautsprecher vorgeschaltet werden, weitgehend eliminiert werden. Es kann somit auch mit dem Inversen Hornlautsprecher ein flacher Frequenzgang erreicht werden (siehe Kurve „aslc-fcac2“ in Abbildung 4.9).

4.3.2 Eingangsimpedanz

Für einen Verstärkerentwurf ist die Eingangsimpedanz \underline{Z}_{ein} des Inversen Hornlautsprechers relevant. Diese kann ebenfalls aus der Kettenmatrix $\underline{\mathbf{A}}$ und der akustischen Impedanz $\underline{Z}_{a,Ko}$ der Kolbenmembran errechnet werden. Gemäß (4.9) und (4.11) gilt:

$$\begin{aligned}\underline{U}_1 &= \underline{a}_{11}\underline{p} + \underline{a}_{12}\underline{q} = (\underline{a}_{11}\underline{Z}_{a,Ko} + \underline{a}_{12})\underline{q} \\ \underline{I}_1 &= \underline{a}_{21}\underline{p} + \underline{a}_{22}\underline{q} = (\underline{a}_{21}\underline{Z}_{a,Ko} + \underline{a}_{22})\underline{q} \\ \underline{Z}_{ein} &= \frac{\underline{U}_1}{\underline{I}_1} = \frac{\underline{a}_{11}\underline{Z}_{a,Ko} + \underline{a}_{12}}{\underline{a}_{21}\underline{Z}_{a,Ko} + \underline{a}_{22}}\end{aligned}\quad (4.13)$$

Der Impedanzverlauf unter Verwendung des Chassis „AuraSound NS3-193-8A“ [12] mit einer Nennimpedanz von 8Ω wird aus dem folgenden Graphen ersichtlich. Damit das Verhalten bei den Trichterresonanzfrequenzen ersichtlich wird, wird zusätzlich zur Frequenzachse auch die y-Achse logarithmisch dargestellt.

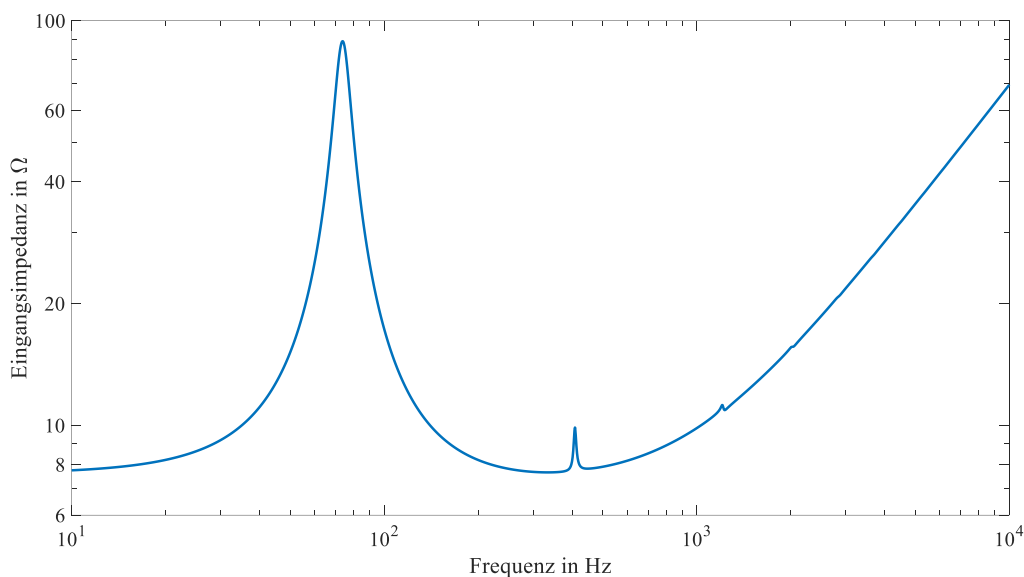


Abbildung 4.10: Verlauf der Eingangsimpedanz des Inversen Hornlautsprechers

Für diesen Graphen werden die folgenden Parameter verwendet (vgl. Kapitel 5.1 „Entwurf“):

- Mündungsradius $r_{TM} = 10 \text{ mm}$
- Halsradius $r_{TH} = 40 \text{ mm}$
- Trichterlänge $L = 200 \text{ mm}$
- Lautsprecher-Chassis: „AuraSound NS3-193-8A“ [12]

Es zeigt sich eine leichte Rückwirkung der Trichterresonanzen auf die elektrische Domäne. Die Größenordnung der Impedanzerhöhung bei den Trichterresonanzfrequenzen (ab 407 Hz, vgl. Kap. 5.1.4) liegt jedoch weit unter jener, die die Membranresonanz bei etwa 75 Hz hervorruft.

4.3.3 Richtwirkung

Im Allgemeinen tritt eine Richtwirkung dann auf, wenn der Umfang der abstrahlenden Kreisfläche in die Größenordnung der Wellenlänge oder größer fällt. Während dieses Phänomen bereits aus der Kolbenmembrantheorie bekannt ist [2, p. 94], kann ein ähnliches Verhalten auch bei der Trichteröffnung beobachtet werden. Die Größe der Trichteröffnung ist also jene Größe, die maßgeblich für die Erfüllung von Anforderung 4 ist.

Die Grundlage für die folgenden Berechnungen liefert eine analytische Betrachtung eines Rohres mit offenem Ende (Mündung) durch H. Levine und J. Schwinger [15]. Auch bestehende Entwürfe inverser Hornlautsprecher beziehen sich auf diese Erkenntnisse [11]. Gegenstand der Untersuchungen ist die Richtwirkung, welche von einer Öffnung eines Rohres oder Trichters ausgeht. Sei θ der zur Achse des Trichters gemessene Winkel, dann ist die um die Achse symmetrische leistungsmäßige Verteilung $G(\theta, kr_{TM})$ näherungsweise gegeben durch

$$G(\theta, kr_{TM}) = \frac{1}{N} \left(\frac{J_1(kr_{TM} \sin \theta)}{\sin \theta} \right)^2 \frac{1}{1-|\underline{R}|^2} \left((1 + \cos \theta)^2 - 2 \Re\{\underline{R}\} \sin^2 \theta + (1 - \cos \theta)^2 |\underline{R}|^2 \right), \quad (4.14)$$

wobei $J_1(\dots)$ die Bessel-Funktion erster Ordnung, kr_{TM} die Helmholtz-Zahl, $\Re\{\dots\}$ der Realteil, und \underline{R} der komplexe Reflexionsfaktor, welcher am Übergang vom Trichter in die Umgebung auftritt, sind. N ist ein numerisch zu ermittelnder, frequenzabhängiger Normierungsfaktor im Bereich 0,85 ... 1,08 welcher zur Einhaltung der Bedingung

$$\int_0^\pi G(\theta, kr_{TM}) \sin \theta \, d\theta = 2 \quad (4.15)$$

gemäß [15, p. 21] dient. N wird durch numerische Integration über θ ermittelt:

$$N(kr_{TM}) = \frac{1}{2} \int_0^\pi N \cdot G(\theta, kr_{TM}) \sin \theta \, d\theta \quad (4.16)$$

$N \cdot G(\theta, kr_{TM})$ bezeichnet hier die leistungsmäßige Verteilung $G(\theta, kr_{TM})$ ohne Normierung.

Es zeigt sich eine Ähnlichkeit von (4.14) zu dem aus der Kolbenmembrantheorie stammenden Richtungsfaktor [2, p. 94] einer Membran mit Radius a gemäß

$$\Gamma_{Ko}(\theta, ka) = \frac{2 J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta}, \quad (4.17)$$

der ein Verhältnis von Schalldrücken ist und deshalb in der leistungsproportionalen Größe $G(\theta, kr_{TM})$ in quadrierter Form vorkommt. Die $\frac{1}{ka}$ -Abhängigkeit ist bei $G(\theta, kr_{TM})$ nicht explizit vorhanden. Zusätzlich wird bei $G(\theta, kr_{TM})$ jedoch berücksichtigt, dass Reflexionen auftreten, welche die Richtwirkung beeinflussen. Für den Reflexionsfaktor [15, p. 1]

$$\underline{R} = -|\underline{R}|e^{2jkr_{TM}\frac{l}{r_{TM}}} \quad (4.18)$$

existiert eine Näherung für den Betrag. $\frac{l}{r_{TM}}$ bezeichnet eine ebenfalls frequenzabhängige Längenkorrektur.

Der Betrag ist nach Levine und Schwinger [15, p. 21f] näherungsweise gegeben durch

$$|\underline{R}| = \begin{cases} e^{-\frac{(kr_{TM})^2}{2}} \left(1 + \frac{(kr_{TM})^4}{6} \left(\frac{19}{12} - \ln(\gamma kr_{TM}) \right) \right), & kr_{TM} < 1 \\ \sqrt{\pi kr_{TM}} e^{-kr_{TM}} \left(1 + \frac{3}{32 (kr_{TM})^2} \right), & kr_{TM} \geq 1, \end{cases} \quad (4.19)$$

wobei $\gamma = 1,781$ ist. Für die Längenkorrektur wird gelegentlich von dem konstanten Wert $\frac{l}{r_{TM}} = 0.6113$ bei $kr_{TM} = 0$ ausgegangen [15, p. 2] [11, p. 2]. Da der graphisch dargestellte Verlauf von Levine und Schwinger über einen weiten Bereich linear verläuft, wird näherungsweise mit

$$\frac{l}{r_{TM}} = 0.6113 - 0.1 kr_{TM}, \quad kr_{TM} < 3,5 \quad (4.20)$$

gerechnet. Die Näherung ist, gemeinsam mit dem aus einem Diagramm von Levine und Schwinger [15, p. 3] extrahierten Verlauf für die Längenkorrektur, der folgenden Abbildung zu entnehmen.

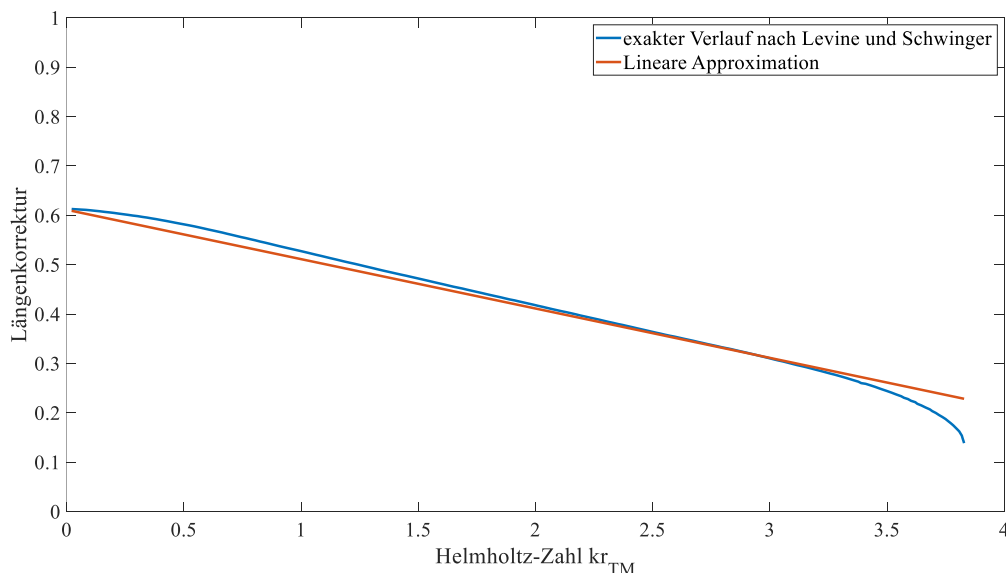


Abbildung 4.11: Längenkorrektur – exakter Verlauf und Näherung

Das Bündelungsmaß $D_I(kr_{TM})$ wird nach [2, p. 96] durch Integration des quadrierten Richtungsfaktors (entspricht der leistungsproportionalen Größe $G(\theta, kr_{TM})$) über eine Kugeloberfläche S berechnet. Das folgende Diagramm zeigt Richtungsmaß ($10 \lg G(\theta, kr_{TM})$) und Bündelungsmaß² des Inversen Hornlautsprechers mit variiertem Helmholtz-Zahl. Aufgrund des rotationssymmetrischen Aufbaus wird eine 2D-Darstellung gewählt.

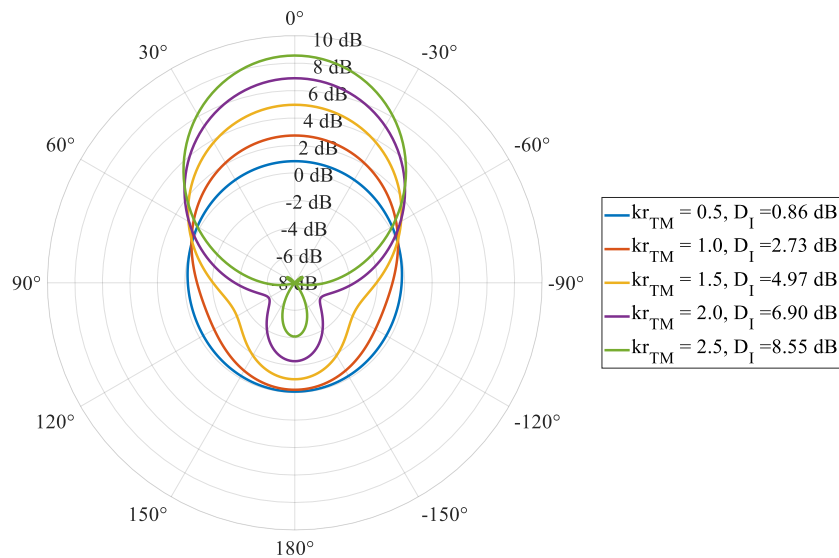


Abbildung 4.12: Richtungsmaß des Inversen Hornlautsprechers

Deutlich ist sichtbar, dass die Abstrahlung in die obere Halbkugel wesentlich stärker erfolgt als in die untere. Gemeinsam mit Anforderung 4, welche ohnehin lediglich die Betrachtung einer Halbkugel verlangt, ergibt sich, dass das Inverse Horn mit der Mündung zur Decke zeigen sollte.

Nachdem Anforderung 4 die Betrachtung einer Halbkugel verlangt, wird für das Bündelungsmaß anstelle einer Kugeloberfläche über eine Halbkugeloberfläche S integriert; zudem wird das Integral durch eine Summe angenähert. Weil $G(\theta, kr_{TM})$, anders als beim quadrierten Richtungsfaktor üblich, nicht auf 1 normiert ist, muss dies zusätzlich durch den Faktor $G_{max} = \max_{\theta} G(\theta, kr_{TM})$ berücksichtigt werden. Es gilt also:

$$\begin{aligned}
 D_I(kr_{TM}) &= 10 \lg \frac{S}{\frac{1}{G_{max}} \int_S G(\theta, kr_{TM}) dS} = \\
 &= 10 \lg \frac{G_{max} 2\pi r^2}{\int_{\theta=0}^{\pi} G(\theta, kr_{TM}) \pi r^2 \sin \theta d\theta} \cong \\
 &\cong 10 \lg G_{max} - 10 \lg \left(\frac{\Delta\theta}{2} \sum_{\theta=0^\circ}^{90^\circ} G(\theta, kr_{TM}) \sin \theta \right).
 \end{aligned} \tag{4.21}$$

² Für diese Abbildung wird das Bündelungsmaß nach [2, p. 96] berechnet (Kugelbetrachtung), nicht nach (4.21). Der Unterschied besteht darin, dass bei der Kugelbetrachtung über $\theta = 0 \dots \pi$ integriert bzw. summiert wird.

Es sei angemerkt, dass hier, anders als in (4.15), lediglich bis $\frac{\pi}{2}$ integriert wird anstatt bis π , da lediglich eine Halbkugel anstelle einer Kugel betrachtet wird. Deswegen muss trotz Normierung nach (4.15) für die Halbkugel das Integral ausgewertet werden.

Für weitere numerische Berechnungen wird die Summe in 1° -Schritten für θ ausgewertet:

$$\Delta\theta = \frac{\pi}{180}. \quad (4.22)$$

Das Bündelungsmaß, das sich durch Halbkugelbetrachtung ergibt, sowie die Dimensionierung der Trichtermündung, finden sich in Kapitel 5.1.2.

4.3.4 Zusammenfassung

Mit einem Inversen Hornlautsprecher können voraussichtlich gute Ergebnisse hinsichtlich Anforderung 4 für höhere Frequenzen erzielt werden. Bei niedrigen Frequenzen ist Unterstützung durch einen weiteren Lautsprecher bzw. ein Lautsprechersystem notwendig, welches die Schwäche des Inversen Hornlautsprechers mit kleinem Chassis bei der Abstrahlung tiefer Frequenzen ausgleicht. Dieses Zusatzsystem hätte aufgrund niedriger Frequenzen weniger Probleme, Anforderung 4 (ungerichtete Abstrahlung) zu erfüllen, da bei großen Wellenlängen ohnehin eine niedrige Bündelung zu erwarten ist.

Durch entsprechende Entzerrung durch ein vorgeschaltetes Filter können die auf Anforderung 2 und 3 vermeintlich negativ wirkenden Effekte der Trichterresonanzen ausgeglichen werden. Somit kann der Inverse Hornlautsprecher als eine vielversprechende Realisierungsmöglichkeit eines Referenzlautsprechers nach ISO 6926 im gehobenen Frequenzbereich angesehen werden.

5 Entwurf

Aus Kapitel 4 geht hervor, dass sowohl bei einem Polyeder-Lautsprecher als auch bei einem Inversen Hornlautsprecher abgewogen werden muss zwischen omnidirektionaler Abstrahlung bei hohen Frequenzen und angemessenem Pegel bei tiefen Frequenzen. Aus diesem Grund wird ein Zweiwegesystem realisiert, welches die Vorteile von beiden Ansätzen kombiniert.

Das folgende Kapitel dokumentiert den Entwurf des Referenzlautsprechers nach dem Konzept eines **Inversen Hornlautsprechers, eingebaut in einen Tetraeder-Lautsprecher für die Unterstützung bei tiefen Frequenzen**. Leishman et al. [10] konnte zeigen, dass mit einem Tetraeder (Kantenlänge 31,1 cm) bis etwa 1 kHz eine kugelartige Abstrahlung erzielt werden kann. Dies legt die Übernahmefrequenz des Zweiwegesystems fest³. Da für ISO 6926 eine halbkugelartige Abstrahlung gewünscht ist, wird auf eine Membran in der Grundfläche des Tetraeders verzichtet. Somit werden die drei Seiten der Pyramide mit dreieckiger Grundfläche mit Tieftöner-Chassis bestückt.

Zunächst wird der Inverse Hornlautsprecher dimensioniert, im Anschluss daran der Tetraeder-Lautsprecher. Schlussendlich erfolgt eine Diskussion über das zu erwartende Ergebnis.

5.1 Inverser Hornlautsprecher

In diesem Kapitel wird der Einfluss der Designparameter auf Frequenzgang und Richtwirkung des Inversen Hornlautsprechers diskutiert. Danach erfolgt jeweils die Dimensionierung bzw. Festlegung des jeweiligen Parameters.

5.1.1 Trichterform

Die Trichterform wurde in Kapitel 4.3 als Konus- bzw. Kegelstumpf angenommen. Wenngleich bei gewöhnlichen Hornlautsprechern Formen wie Exponentialhörner bzw. hyperbolische Hörner gebräuchlich sind, liegen zum gegenwärtigen Zeitpunkt für Inverse Hörner ausschließlich Versuche mit Konustrichtern vor.

Aufgrund der geringen Abmessungen liegt keine Notwendigkeit vor, die Länge durch einen inversen Exponentialtrichter oder Ähnliches zu verkürzen. Zudem liegt kein mathematisches Modell für Frequenzgang und Richtwirkung für alternative inverse Hornformen zum Konustrichter vor, weswegen ein Konustrichter verwendet wird.

³ Das Tetraeder von Leishman et al. hat eine geringere Kantenlänge, als in 5.2.1 festgelegt wird. Jedoch ergibt sich für diese Länge ein Bündelungsmaß von lediglich 1 dB bei 1 kHz [10], wodurch noch eine Reserve vorhanden ist.

5.1.2 Trichtermündung

Gemäß Kapitel 4.3.3 steht die Trichtermündung in direktem Zusammenhang mit der Richtwirkung des Inversen Hornlautsprechers. Um Anforderung 4 erfüllen zu können, ist eine geeignete Wahl des Mündungsradius wesentlich. Die folgende Abbildung zeigt die Abhängigkeit des Richtungsmaßes nach (4.14) von der Helmholtz-Zahl kr_{TM} . Im Gegensatz zu Abbildung 4.12 wird hier eine Halbkugel betrachtet. Dies gilt auch für die Berechnung des Bündelungsmaßes nach (4.21).

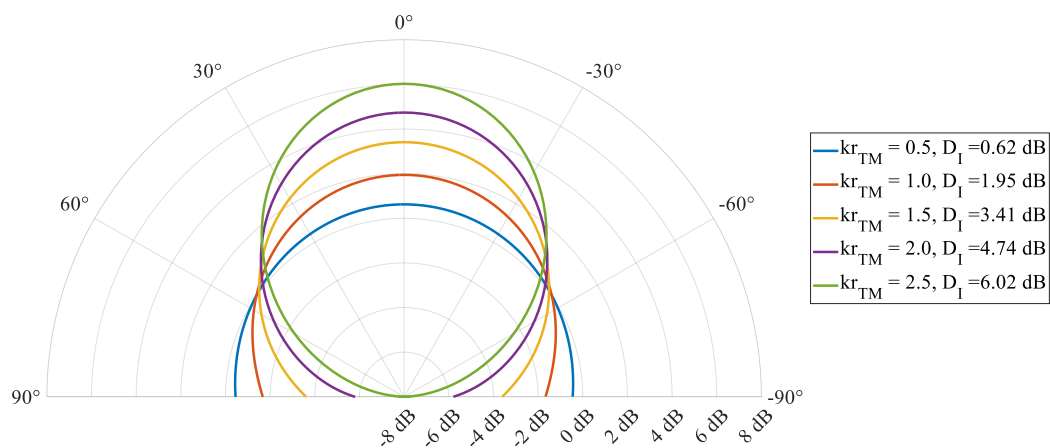


Abbildung 5.1: Richtungsmaß des Inversen Hornlautsprechers

Erwartungsgemäß steigt das Bündelungsmaß D_I mit zunehmender Frequenz. Um einen direkten Vergleich mit dem Richtungsmaß aus der Kolbenmembrantheorie zu ermöglichen, zeigt die folgende Abbildung ein äquivalentes Diagramm mit dem Richtungsmaß einer Kolbenmembran mit Membranradius a .

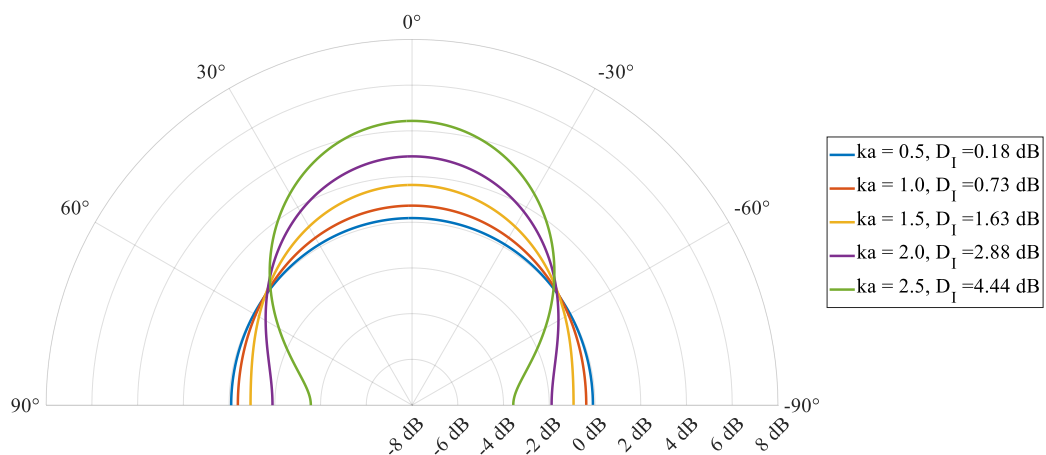


Abbildung 5.2: Richtungsmaß der Kolbenmembran

Es zeigt sich, dass von der Hornmündung eine etwas stärkere Bündelung als von einer gleich großen Kolbenmembran ausgeht. Der laut Anforderung 4 maximal zulässige Wert von 6 dB wird bei $kr_{TM} = 2,5$ erreicht. Da das Ziel ist, bis 10 kHz dieser Anforderung zu entsprechen, muss folgendes gelten:

$$kr_{TM} \leq 2,5 \rightarrow r_{TM} \leq \frac{2,5}{k} = \frac{2,5c}{2\pi f} = \frac{2,5 \cdot 340 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{2\pi \cdot 10 \text{ kHz}} = 13,5 \text{ mm} \quad (5.1)$$

Eine Reserve ist gegeben bei

$$r_{TM} = 10 \text{ mm.} \quad (5.2)$$

Dies entspricht einer oberen Grenzfrequenz von 13,5 kHz und einem maximalen Bündelungsmaß von 5,63 dB bei 10 kHz.

Bei einer Kolbenmembran würde sich mit $ka = 2,95$ ein Bündelungsmaß von 6 dB ergeben. Dies entspräche bei 10 kHz einem Membranradius von 16 mm.

Wenngleich der Mündungsradius primär anhand seines Einflusses auf die Richtwirkung gewählt wird, sei dennoch seine Auswirkung auf den Frequenzgang untersucht. Hierfür wird exemplarisch eine Eingangsspannung von 1 V gewählt. Der dargestellte Schalldruckpegel an der Hornmündung ergibt sich mit (4.12) zu

$$L_p = 20 \lg \left| \frac{p}{p_0} \right| = 20 \lg \left| \frac{H(f) \cdot 1 \text{ V}}{20 \mu\text{Pa}} \right|. \quad (5.3)$$

Für den Graphen werden folgende Parameter verwendet:

- Mündungsradius $r_{TM} = 5 \text{ mm} \dots 15 \text{ mm}$
- Halsradius $r_{TH} = 40 \text{ mm}$
- Trichterlänge $L = 200 \text{ mm}$
- Lautsprecher-Chassis: „AuraSound NS3-193-8A“ [12]

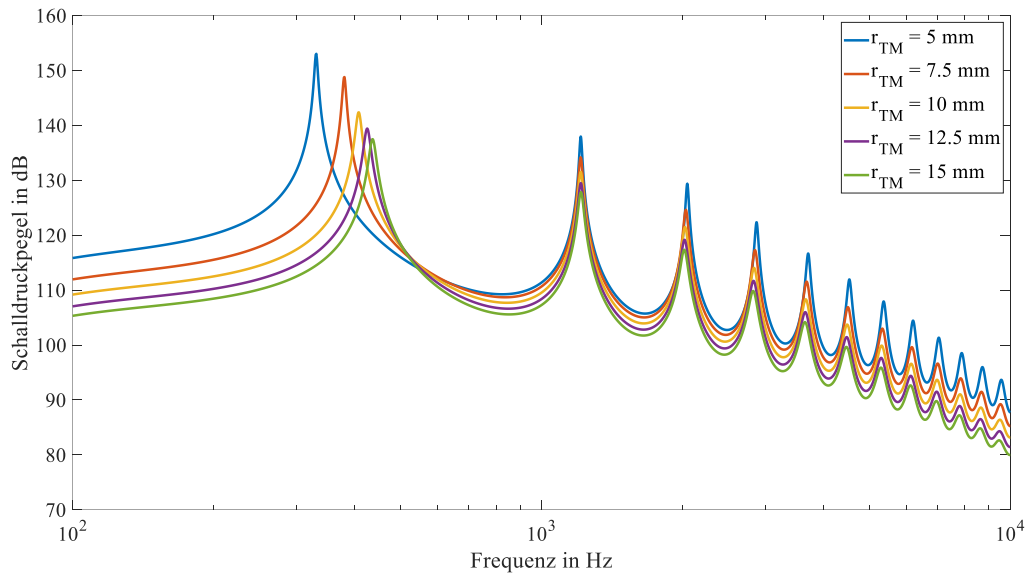


Abbildung 5.3: SPL-Verlauf (bezogen auf 20 μPa) des Inversen Hornlautsprechers mit variiertem Mündungsradius

Es wird erkenntlich, dass ein kleinerer Mündungsradius die Resonanzspitzen verstärkt. Dem Ansatz, den Mündungsradius möglichst klein zu halten, um eine ungerichtete Abstrahlung zu erhalten, sind somit Grenzen gesetzt. Der gewählte Mündungsradius von 10 mm (hier orange eingezeichnet) stellt somit einen Kompromiss dar.

5.1.3 Trichterhals

Der Halsradius des Trichters beeinflusst nach (4.9) in Verbindung mit (4.12) den SPL-Frequenzgang des Inversen Hornlautsprechers. Er wird in erster Linie durch den Radius des verwendeten Lautsprecher-Chassis bestimmt. Da der Einfluss des Halsradius nicht analytisch aus der Übertragungsfunktion erkenntlich ist, wird im Folgenden dieser Parameter variiert und das Ergebnis visualisiert. Für den Graphen werden folgende Parameter verwendet:

- Mündungsradius $r_{TM} = 10 \text{ mm}$
- Halsradius $r_{TH} = 20 \text{ mm} \dots 50 \text{ mm}$
- Membranradius $r_M = 0,9 r_{TH}$
- Trichterlänge $L = 200 \text{ mm}$
- Lautsprecher-Chassis: „AuraSound NS3-193-8A“ [12]

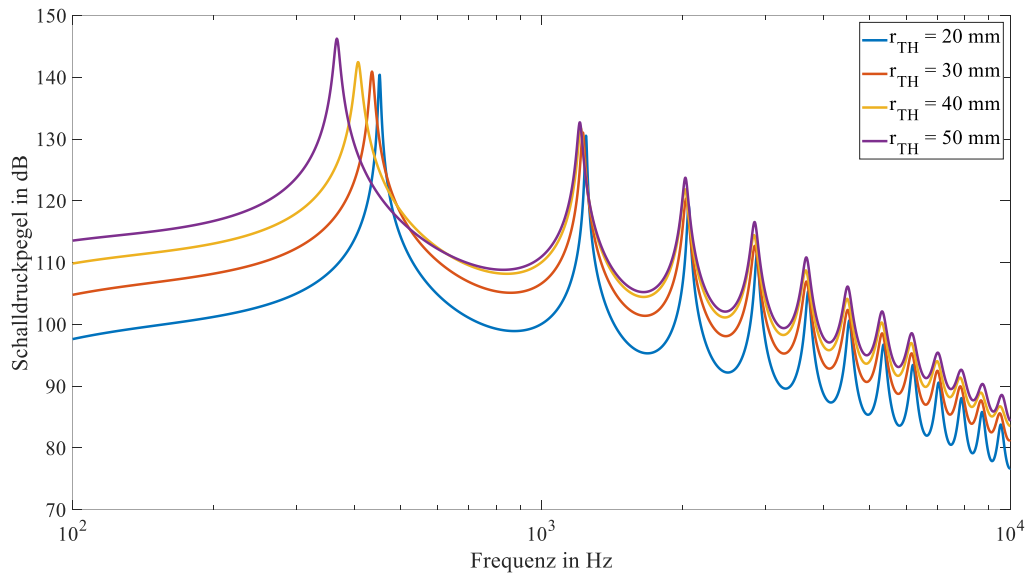


Abbildung 5.4: SPL-Verlauf (bezogen auf 20 μPa) des Inversen Hornlautsprechers mit variiertem Halsradius

Die Position der Resonanzfrequenzen sind vom Halsradius weitgehend unabhängig, wird dieser doch um den Faktor 2,5 variiert, ohne dass sich die Resonanzfrequenzen in dieser Größenordnung verschieben würden.

Dem Graphen ist zu entnehmen, dass bei einem kleineren Halsradius der Pegel zwischen den Resonanzspitzen geringer ist. Es wird ein mittlerer Wert von 40 mm für den Halsradius festgelegt, und das Chassis entsprechend ausgewählt (Kapitel 5.1.5).

Es sei angemerkt, dass in dieser Simulation zwar der Membranradius variiert wurde, nicht aber die elektrischen und mechanischen Parameter der Membran.

5.1.4 Trichterlänge

Die Trichterlänge wird durch Anforderung 5 begrenzt. Die folgende Kurvenschar zeigt den Einfluss, den die Trichterlänge auf den Frequenzgang ausübt. Die Parameter hierfür sind:

- Mündungsradius $r_{TM} = 10 \text{ mm}$
- Halsradius $r_{TH} = 40 \text{ mm}$
- Trichterlänge $L = \{100 \text{ mm}, 200 \text{ mm}, 400 \text{ mm}\}$
- Lautsprecher-Chassis: „AuraSound NS3-193-8A“ [12]

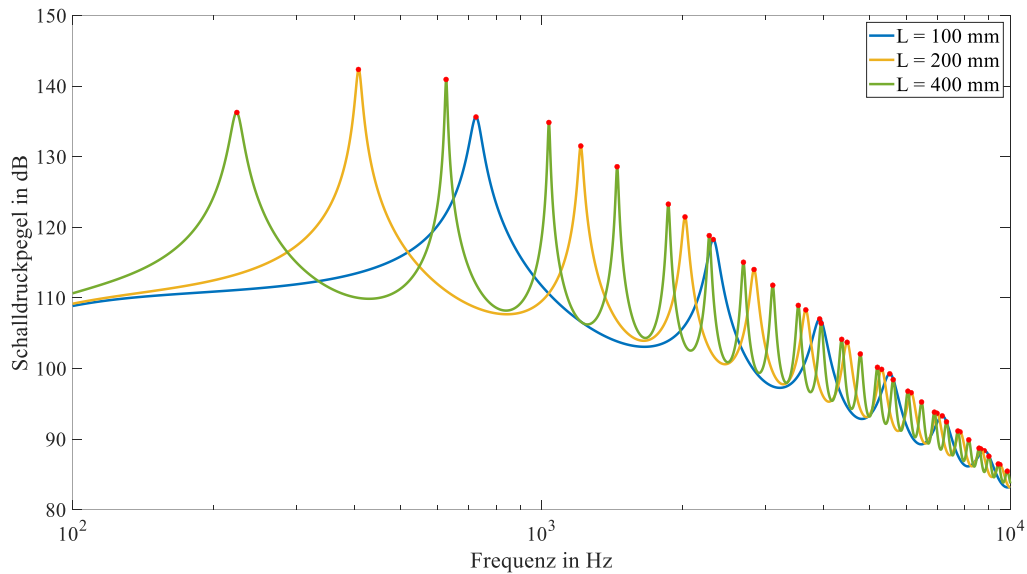


Abbildung 5.5: SPL-Verlauf (bezogen auf 20 μPa) des Inversen Hornlautsprechers mit variiertem Trichterlänge

Es zeigt sich, dass die Trichterlänge jene Größe ist, welche die Trichter-Resonanzfrequenzen $f_{TR,n}$ bestimmt, die mit roten Punkten an den lokalen Maxima markiert sind. $f_{TR,n}$ bezeichnet die n -te Resonanzfrequenz. Die folgende Tabelle listet die ersten acht Resonanzfrequenzen auf.

n	$f_{TR,n}$ in Hz		
	$L = 100$ mm	$L = 200$ mm	$L = 400$ mm
1	725	407	224
2	2325	1213	626
3	3921	2024	1037
4	5533	2841	1450
5	7158	3663	1865
6	8802	4488	2280
7	⁴	5316	2697
8	-	6146	3114

Tabelle 5.1: Trichter-Resonanzfrequenzen

⁴ keine weiteren Resonanzfrequenzen bis 10 kHz

Durch lineare Regression kann für die betrachteten Längen mit $n \geq 1$ der folgende Zusammenhang beobachtet werden:

- $L = 100$ mm: $f_{TR,n} \cong (1619 n - 928,6)$ Hz
- $L = 200$ mm: $f_{TR,n} \cong (825,5 n - 455,0)$ Hz
- $L = 400$ mm: $f_{TR,n} \cong (415,6 n - 210,5)$ Hz

Die Trichter-Resonanzfrequenzen sind somit offensichtlich indirekt proportional zur Trichterlänge. Berücksichtigt man dies, so kann man die drei obigen Gleichungen zusammenfassen.

Da die rechten Seiten der Gleichungen lediglich näherungsweise und nicht exakt Vielfache voneinander sind, wird für die Polynomkoeffizienten 170 und -85 der folgenden Formel je ein mittlerer Wert gewählt.

$$f_{TR,n} \cong \frac{1}{L} (170 n - 85) \text{ m Hz}, \quad n \geq 1 \quad (5.4)$$

Die Einheit m Hz bezeichnet „Meter Hertz“.

Eine weitere Umformung führt auf einen Ausdruck für die Helmholtz-Zahl $k_{TR,n}L$:

$$k_{TR,n}L = \frac{2\pi f_{TR,n}}{c} L \cong \left(\frac{2 \cdot 170}{340} n - \frac{2 \cdot 85}{340} \right) \pi = (2n - 1) \frac{\pi}{2}, \quad n \geq 1 \quad (5.5)$$

Dass die Helmholtz-Zahl $k_{TR,n}L$ für Resonanzfrequenzen ein ungeradzahliges Vielfaches von $\frac{\pi}{2}$ ist, passt zu (4.9), da sie dort als Argument von Sinus- und Kosinustermen vorkommt. Nachdem die Resonanzfrequenzen mit n linear ansteigen, könnte hier für das inverse Filter mit einem Kammfilter-Effekt experimentiert werden.

Auf die Höhe der Resonanzspitzen hat die Trichterlänge keinen Einfluss, ebenso wenig auf den Grundpegel.

Eine größere Trichterlänge hat zur Folge, dass mehr Trichterresonanzen im Nutzfrequenzband vorhanden sind. Eine geringe Länge verschlechtert jedoch das Verhalten bei mittleren Frequenzen in Form von zusätzlichen Pegelschwankungen [12, p. 8]. Einen Kompromiss stellt die Länge von 200 mm dar. Es wird somit festgelegt:

$$L = 200 \text{ mm} \quad (5.6)$$

5.1.5 Lautsprecher-Chassis

Die Anforderungen an das Lautsprecher-Chassis ergeben sich folgendermaßen:

- kleiner Membranradius $r_M \cong 40$ mm (vgl. Kapitel 5.1.3)
- breiter, flacher Übertragungsbereich (1 kHz ... 20 kHz, für eventuelle Erweiterung)
- hohe Sensitivität/Leistung, aufgrund geringen Wirkungsgrades des Inversen Hornlautsprechers (vgl. Kapitel 4.3)

Die folgende Tabelle zeigt exemplarisch die Kenndaten von vier Chassis, die diesen Anforderungen gerecht werden.

Parameter	AuraSound NS3-193-8A	Visaton SC 8 N	Visaton <u>FRS 8 M</u>	Visaton FRS 8
Membranradius	35 mm	36,5 mm	37,5 mm	36,5 mm
Membranfläche	31 cm ²	26 cm ²	29 cm ²	31 cm ²
Nennleistung	20 W	30 W	30 W	30 W
Musikleistung	k. A.	50 W	50 W	50 W
Nennimpedanz	8 Ω	8 Ω	8 Ω	8 Ω
Resonanz- frequenz f_r	80 Hz	110 Hz	125 Hz	120 Hz
Übertragungs- bereich	80 ... 15000 Hz	70 ... 20000 Hz	70 ... 20000 Hz	70 ... 20000 Hz
Sensitivität (1 W, 1 m)	80 dB	81 dB	88 dB	82 dB
Wandler- konstante Bl	4,7 $\frac{N}{A}$	2,4 $\frac{N}{A}$	4,0 $\frac{N}{A}$	3,2 $\frac{N}{A}$
Serienwiderstand R_S	7,6 Ω	7,0 Ω	7,2 Ω	7,2 Ω
Serien- induktivität L_S	1,1 mH	300 μH	300 μH	900 μH
Temperatur- Bereich	k. A.	-25 ... 70 °C	-40 ... 130 °C	-25 ... 70 °C
mech. Güte Q_m	8,00	3,86	3,24	4,85
elektr. Güte Q_e	0,73	1,31	0,58	1,32
Gesamtgüte	0,67	0,97	0,49	1,04
Äquivalenz- volumen	1,25 l	1,5 l	1,1 l	0,9 l
$R_M = R_S \frac{Q_m}{Q_e}$	83,29 Ω	19,66 Ω	40,22 Ω	26,45 Ω
$L_M = \frac{R_M}{2\pi f_r Q_m}$	20,71 mH	9,214 mH	15,81 mH	7,233 mH
$C_M = \frac{Q_m}{2\pi f_r R_M}$	191,1 μF	355,2 μF	102,6 μF	243,2 μF
Listenpreis	26,50 € ⁵	31,29 €	19,93 €	19,71 €

Tabelle 5.2: Vergleich Chassis für den Inversen Hornlautsprecher

⁵ nicht mehr erhältlich

Als erstes wird das Modell „AuraSound NS3-193-8A“ angeführt, welches in den vergangenen Kapiteln als Referenz verwendet wurde. Dieses wurde von Ortiz et al. [12] verwendet, ist allerdings nicht mehr erhältlich. Die verbleibenden drei Modelle sind von Visaton.

Aufgrund der hohen Sensitivität und des flachen SPL-Frequenzgangs wird das Modell „Visaton FRS 8 M“ gewählt. Dieses erlaubt auch eine höhere Temperatur, was für den Einsatz bei höheren Leistungen von Vorteil ist.

Aus dieser Wahl ergibt sich aufgrund des Membranradius auch der Halsradius:

$$r_{TH} = 40 \text{ mm} \quad (5.7)$$

5.1.6 Geschlossenes Gehäuse

Wie Ortiz et al. [12] zeigen konnte, hat das Gehäusevolumen lediglich Einfluss auf das Verhalten des Inversen Hornlautsprechers unter 200 Hz (vgl. Abbildung 4.8). Dass sich durch die hinzugefügte akustische Feder des Luftvolumens im geschlossenen Gehäuse die Resonanzfrequenz nach oben verschiebt, ist deswegen eher unwesentlich, weil für diesen Frequenzbereich das Tetraeder zuständig ist. Daher wird das geschlossene Gehäuse so dimensioniert, dass der Querschnitt des Trichterhalses nach unten (von der Mündung weg) extrudiert wird. Die Höhe wird so festgelegt, dass Anforderung 5 erfüllt werden kann und zusätzlich die Höhe des Tetraeders nicht wesentlich überschritten wird. Gemäß Kapitel 5.2.1 befindet sich die Hornmündung auf einer Höhe von 305 mm. Werden Plattenstärke des Tetraeders, Trichterlänge und zusätzlich 3 mm für die Befestigung des Chassis abgezogen, ergibt sich für die Höhe des Gehäuses

$$h_G = 305 \text{ mm} - 19 \text{ mm} - L - 3 \text{ mm} = 83 \text{ mm} \quad (5.8)$$

Der Gehäuseradius von 37 mm wird passend zum Chassis gewählt. Die Wandstärke wird mit 5 mm für den Boden und 10 mm für die Seite beziffert.

Das geschlossene Gehäuse für das Chassis des Inversen Hornlautsprechers soll mittels 3D-Druck gefertigt werden, ebenso wie das Horn. Die Wandstärke des Horns beträgt am Trichterhals 7 mm und verringert sich zur Mündung auf 2 mm. Die folgende Abbildung zeigt das geschlossene Gehäuse sowie den Trichter. Zwischen den beiden Komponenten wird die Membran Platz finden. Alle Angaben sind in Millimetern.

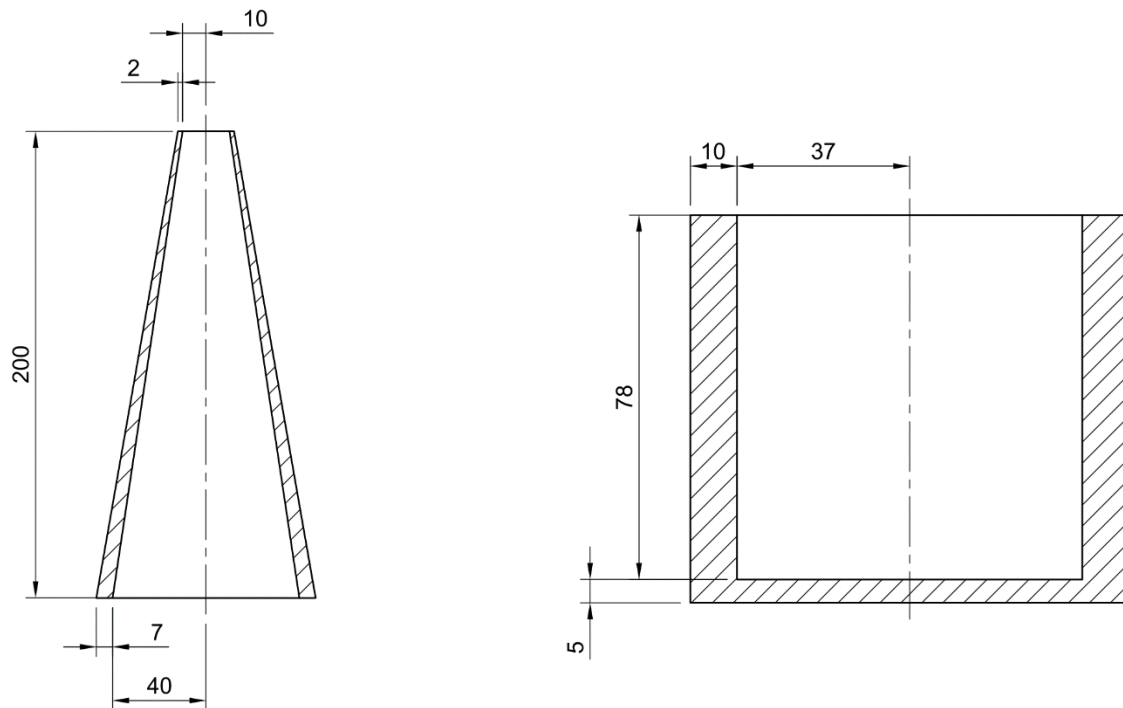


Abbildung 5.6: Trichter und geschlossenes Gehäuse im Querschnitt

5.1.7 Zusammenfassung – Inverser Hornlautsprecher

Die Kenndaten des Inversen Hornlautsprechers sind folgende:

- Form des Trichters: Konustrichter
- Mündungsradius: $r_{TM} = 10 \text{ mm}$
- Halsradius: $r_{TH} = 40 \text{ mm}$
- Trichterlänge: $L = 200 \text{ mm}$
- Lautsprecher-Chassis: „Visaton FRS 8 M“
- Höhe des geschlossenen Gehäuses (innen): 78 mm
- Frequenzbereich: 1 kHz ... 10 kHz

Mit der Wahl dieser Parameter erfüllt der Inverse Hornlautsprecher die Anforderungen von ISO 6926 im Bereich 1 kHz ... 10 kHz.

5.2 Tetraeder-Tieftonsystem

5.2.1 Abmessungen

Für ein gutes omnidirektionales Verhalten sollte das Tetraeder möglichst klein dimensioniert werden. Zudem muss Anforderung 5 erfüllt werden. Nach unten ist die Größe jedoch begrenzt, da der Inverse Hornlautsprecher beherbergt werden muss, und gleichzeitig die Tieftöner-Chassis an den Seitenflächen platziert werden müssen. Die kleinstmögliche Innenkantenlänge $a_{T,i}$, bei der Horn und Tieftöner noch Platz finden, ergibt sich zu

$$a_{T,i} = 350 \text{ mm.} \quad (5.9)$$

Als Material wird eine 19 mm starke MDF-Platte gewählt. Um die Außenkantenlänge und somit die größte vertikale Abmessung zu erhalten, die gemäß Anforderung 5 begrenzt ist, wird zunächst der Innenkugelradius $r_{T,i}$ berechnet. Durch Addieren der Plattenstärke und rückrechnen auf die Kantenlänge ergibt sich diese Größe zu

$$r_{T,i} = \frac{\sqrt{6}}{12} a_{T,i}, \quad a_{T,a} = \frac{12}{\sqrt{6}} (r_{T,i} + 19 \text{ mm}) = 443 \text{ mm} \quad (5.10)$$

Anforderung 5 wird also für die maximale vertikale Abmessung $< 800 \text{ mm}$ erfüllt.

Die obere Spitze des Tetraeders wird bei einer Höhe von 285 mm abgeschnitten, damit das Inverse Horn, welches auf einer Höhe von 305 mm ins Freie mündet, herausragen kann. Die drei Seitenplatten werden aus demselben Grund oben verjüngt.

5.2.2 Lautsprecher-Chassis

Aufgrund der engen Platzverhältnisse muss ein Tieftöner-Chassis verbaut werden, welches eine möglichst geringe Einbautiefe hat. Ein solches findet sich mit dem 13 cm-Tiefmitteltöner „Visaton WF 130 ND“, welcher mit lediglich 19,4 mm Einbautiefe fast vollständig in den 19 mm starken Seitenplatten versenkt werden kann. Der Übertragungsfrequenzbereich liegt bei diesem Lautsprecher bei 46 Hz ... 10 kHz.

Somit deckt das Tetraeder-Tieftonsystem den Frequenzbereich 50 Hz ... 1 kHz ab.

5.2.3 Konstruktion

Die folgenden Skizzen zeigen die Teile der Konstruktion aus 19 mm starkem MDF-Material, welche das Tetraeder bilden. Neben der dreieckigen Grundplatte sind drei identische Seitenplatten mit Ausschnitten für die Befestigung der drei Tieftöner-Chassis notwendig. Alle Angaben sind in Millimetern.

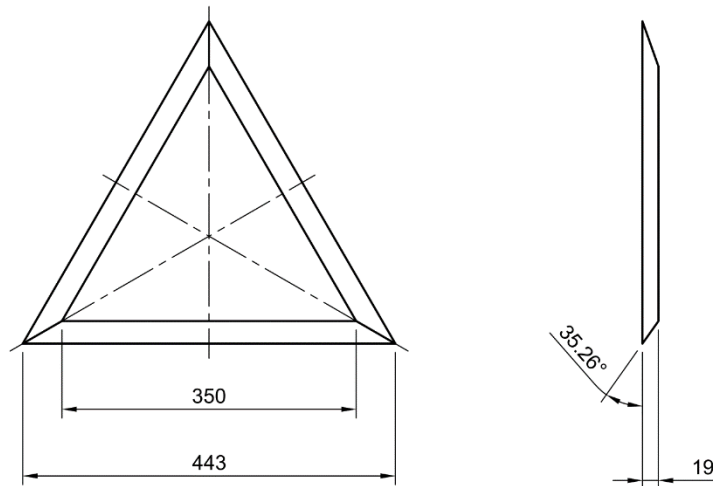


Abbildung 5.7: Grundplatte des Tetraeder-Lautsprechers

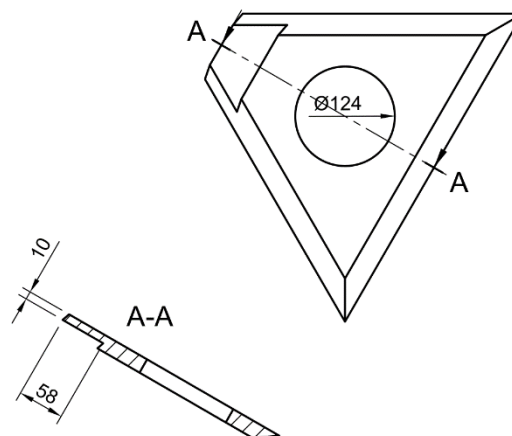


Abbildung 5.8: Seitenplatte (3x) des Tetraeder-Lautsprechers

5.3 Gesamtsystem

Das Gesamtsystem aus Inversem Hornlautsprecher mit umgebendem Tetraeder-Tieftongehäuse hat folgende Kenndaten:

- Maximale vertikale Abmessung: 305 mm (ohne allfällige Gehäusefüße)
- Maximale horizontale Abmessung: 443 mm
- Übertragungsfrequenzbereich: 50 Hz ... 10 kHz
- Übernahmefrequenz des Zweiwegesystems: 1 kHz
- Hochtöner-Chassis: „Visaton FRS 8 M“
- Tieftöner-Chassis: 3 x „Visaton WF 130 ND“

In der folgenden Abbildung wird das Gesamtsystem, bestehend aus Inversem Horn (grau) und Tetraeder-Tieftongehäuse (schwarz), visualisiert, wobei die Chassis für eine bessere Sicht ausgespart sind, ebenso wie eine notwendige Abdichtung zwischen der Hornmündung und der Spitze des Tetraeders.

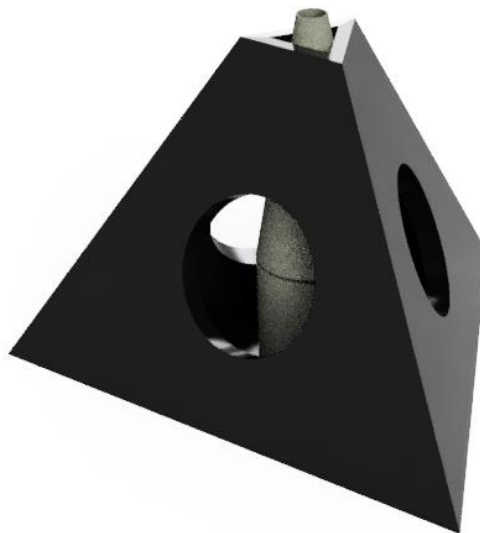


Abbildung 5.9: Inverser Hornlautsprecher mit Tetraeder-Tieftongehäuse

6 Diskussion

Mit dem vorgestellten Zweiwegesystem „Inverser Hornlautsprecher mit Tetraeder-Tieftöner“ ist es mit vier Lautsprechern und einer geeigneten Konstruktion möglich, einen Referenzlautsprecher nach ISO 6926 für den Frequenzbereich 50 Hz ... 10 kHz zu realisieren.

Der einzige bestehende Referenzlautsprecher „Qsources Qref“ kann bis höchstens 8 kHz arbeiten. Er besteht aus lediglich einem Lautsprecher; dies führt jedoch laut Hersteller bei voller Leistung zu einer erheblichen Hitzeentwicklung. Dem wird bei dem Zweiwegesystem entgegengewirkt, indem der Hochtöner unter 1 kHz durch den Tieftöner entlastet wird. Nachdem die verwendeten drei Tieftöner-Chassis einen Übertragungsbereich bis 10 kHz haben, kann die Übernahmefrequenz für eine weitere Entlastung des Hochtöners noch höher gesetzt werden, sollte sich experimentell herausstellen, dass der Tetraeder-Tieftöner auch bis über 1 kHz noch Anforderung 4 (Bündelungsmaß < 6 dB) erfüllt.

Für einen funktionierenden Prototyp sind noch weitere Schritte erforderlich. Zunächst müssen ein geeigneter Verstärker und eine Signalquelle gefunden werden. Durch Messungen in einem reflexionsarmen Halbraum kann anschließend der Schalleistungspegelverlauf über der Frequenz ermittelt werden, um ein inverses Filter zu entwerfen, welches der Entzerrung des Frequenzganges des Inversen Hornlautsprechers dient, der von starken Trichterresonanzen geprägt ist. Gleichzeitig muss das Bündelungsmaß erfasst und verifiziert werden.

Durch Experimente mit noch kleineren Mündungsradien könnte der Frequenzbereich nach oben zusätzlich erweitert werden bis zu 20 kHz, wobei gleichzeitig der Fokus auf einen immer noch flachen Frequenzgang des Schalleistungspegels gelegt werden muss. Dazu könnte beispielsweise die Übernahmefrequenz angehoben werden, um die Schalleistung in Richtung der Tieftöner umzuverteilen. Sollte es möglich sein, die obere Grenzfrequenz in den Bereich von 20 kHz zu versetzen, ohne dass der flache Schalleistungspegelverlauf darunter leidet, kann sich der vorgestellte Entwurf auch in dieselbe Klasse wie die Radiallüfter einreihen, welche den maximal erweiterten Frequenzbereich 50 Hz ... 20 kHz abdecken. Gegenüber Radiallüftern bietet ein Lautsprecher den Vorteil, dass der Schalleistungspegel verstellt werden kann, um dem Geräusch angeglichen zu werden, das von der zu untersuchenden Maschine erzeugt wird.

7 Anhang – Daten bestehender Quellen

Die folgende Tabelle zeigt typische Werte für den Schalleistungspegel dreier Referenzschallquellen nach ISO 6926 pro Terzband sowie einen Dodekaeder-Lautsprecher, der auf Konformität nach ISO 6926 untersucht wird, wobei nicht für jedes Modell Angaben über den gesamten Frequenzbereich vorliegen.

Mittenfrequenz des Terzbandes in Hz	Schalleistungspegel in dB			
	Nor278	BK4204	Qref	Nor276
50	72	77,2	-	89
63	72	77,1	-	95
80	74	76,7	-	99
100	76	77,2	64,9	103
125	77	76,1	64,5	107
160	76	76,5	64,4	109
200	75	76,9	65	114
250	76	76,5	65,5	116
315	77	76,4	65,5	112
400	78	76,7	65,5	107
500	78	76,8	64,8	105
630	78	77,2	64,8	103
800	79	78,6	65	102
1000	79	79,7	65,7	100
1250	80	81,4	65,8	100
1600	81	81,8	65	102
2000	83	81,8	65	100
2500	85	80	66,2	98
3150	85	79,4	65,6	99
4000	84	79,2	64,8	102
5000	83	78,2	65,2	104
6300	82	77,4	-	N/A ⁶
8000	80	75,5	-	N/A
10000	78	73,4	N/A ⁷	N/A
12500	76	71,5	N/A	N/A
16000	74	69,7	N/A	N/A
20000	70	67,7	N/A	N/A

⁶ Der Frequenzbereich des Lautsprechers „Nor276“ reicht lediglich bis 5 kHz.

⁷ Der Frequenzbereich des Lautsprechers „Qref“ reicht lediglich bis 8 kHz.

Tabelle 7.1: Schalleistungspegel verschiedener Schallquellen

Die Quellen für diese Daten sind folgende:

- Nor278: Tabelle im Datenblatt [3]
- BK4204: Tabelle im Datenblatt [4]
- Qref: Erfassung aus einem Diagramm im Datenblatt [5] (gerundet auf 0,1 dB)
- Nor276 (Dodekaeder-Lautsprecher): Erfassung aus einem Diagramm im Datenblatt [9] (gerundet auf 1 dB aufgrund der geringen Auflösung)

Für die oben angeführten Schallquellen wird nun auch das Bündelungsmaß in Terzbändern tabellarisch dargestellt. Auch hier sind die Daten nicht für alle Frequenzen vollständig vorhanden.

Mittenfrequenz des Terzbandes in Hz	Bündelungsmaß in dB		
	Nor278	BK4204	Nor276
50	2,3	-	-
63	2,1	-	-
80	2,1	-	-
100	2,2	1,3	0,34
125	2,5	1,7	0,34
160	2,4	2,1	0,29
200	2,5	2,1	0,29
250	2,3	2,8	0,21
315	2,5	3	0,31
400	2,4	3,5	0,25
500	2,6	4,8	0,27
630	3,2	4,5	0,24
800	3,5	4,7	0,63
1000	2,9	3,8	0,54
1250	2,9	3,6	0,93
1600	3,1	2,9	1,82
2000	2,2	3,7	0,99
2500	2,3	3,9	2,51
3150	2,9	4,7	1,90
4000	3,1	4,1	1,61
5000	1,4	4,1	4,33
6300	2,6	4	N/A
8000	1,5	3,5	N/A
10000	1,3	3,6	N/A
12500	1,3	-	N/A
16000	2	-	N/A
20000	1	-	N/A

Tabelle 7.2: Bündelungsmaß verschiedener Schallquellen

Für die Referenzschallquelle „Qref“ gehen aus dem Datenblatt keine genauen Angaben diesbezüglich hervor. Es wird lediglich angeführt, dass der Wert 5 dB entlang einer vertikalen Halbkreisbahn über den Lautsprecher nicht überschritten wird; bei einer horizontalen Kreisbahn um den Lautsprecher sind es höchstens 1 dB [5].

Die Quellen für diese Daten sind folgende:

- Nor278: Tabelle im Datenblatt [3]
- BK4204: Erfassung aus einem Diagramm im Datenblatt [4] (gerundet auf 0,1 dB)
- Nor276: Erfassung aus einem Diagramm im Datenblatt [9] (gerundet auf 0,01 dB)