Diskussion zur Miniaturisierung von Schallführungen

Daniel Beer, Lorenz Betz, Timo Gabb, Jan Küller, Robin Ritter
Fraunhofer-Institut für Digitale Medientechnologie IDMT, 98693 Ilmenau, Deutschland
Email: Daniel.Beer@idmt.fraunhofer.de

Einleitung

Der Trend mobiler Kommunikations- und Unterhaltungselektronik zu Geräten mit immer flacheren Gehäusen erfordert die Verwendung miniaturisierter Lautsprechersysteme. Miniaturlautsprecher haben aufgrund ihrer Größe eine sehr geringe Effizienz. Dies schlägt sich vorallem in zwei unerwünschten Produkteigenschaften nieder: einem geringen Schalldruckpegel und einer ungewünscht schmalen Übertragungsbandbreite. Aus dem Bereich der klassischen Lautsprechertechnik ist bekannt, dass die Effizienz eines Lautsprechers durch konstruktive Maßnahmen, z. B. Resonatoren, gesteigert werden kann. Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Frage, ob derartige Schallführungsformen soweit miniaturisierbar sind, dass sie auch in Verbindung mit Miniatur- bzw. MEMS-Lautsprechern eine Pegelsteigerung bzw. Frequenzbereichserweiterung ermöglichen.

Das Pegeldilemma

Die gewünschte Mobilität heutiger Mediengeräte steht in unmittelbarem Zusammenhang mit einer Verringerung der Geräteabmessungen. Damit ist der verfügbare Einbauraum für Systemkomponenten wie Lautsprecher so klein geworden, dass sogenannte Miniaturlautsprecher (Micro-Speaker) die Aufgabe der vorherigen klassischen Breitbandlautsprecher übernehmen müssen (Abb. 1). Trotz aller technischen Fortschritte erzielen aktuelle Miniaturlautsprecher die Leistungsparameter ihrer Vorgänger nicht. Beispielhaft ist dies in Abb. 2 anhand der Gegenüberstellung des Amplitudenfrequenzganges eines Miniaturlautsprechers für Mobiltelefone und eines konventionellen Breitbandlautsprechers dargestellt. So-

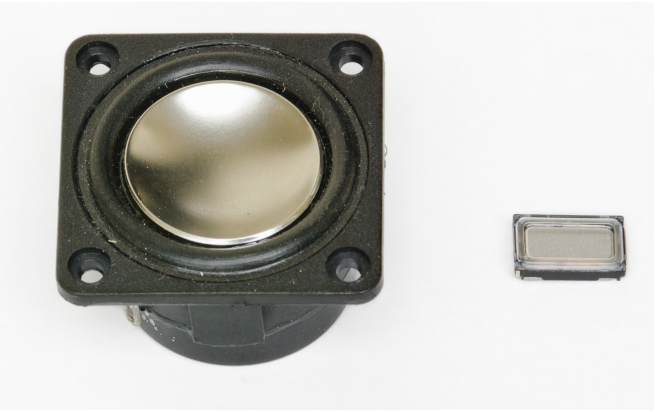


Abbildung 1: Breitbandlautsprecher (links, 8,6 cm^2 Membranfläche) und Miniaturlautsprecher eines Mobiltelefons (rechts, 0,7 cm^2 Membranfläche).

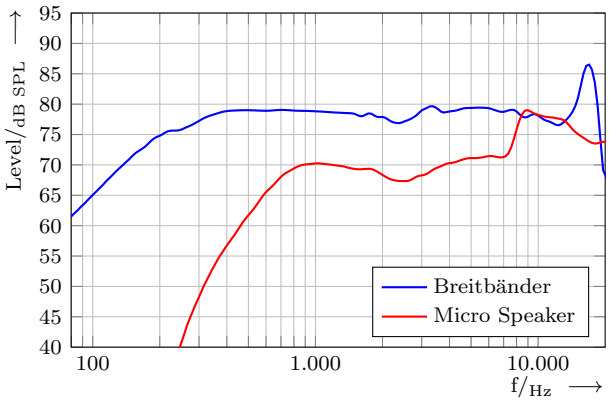


Abbildung 2: Amplitudenfrequenzgang (normiert auf 1 W/1 m) eines typischen Miniaturlautsprechers verglichen mit einem konventionellen Breitbandlautsprecher.

wohl der erzielte Schalldruckpegel, normiert auf 1 W Eingangsleistung[1], als auch die Übertragungsbandbreite des Miniaturlautsprechers fallen gegenüber dem konventionellen Breitbandlautsprecher gering aus. Besonders deutlich tritt der Pegelunterschied im Mitten- und Tieftonbereich auf. Transformiert auf die akustischen Eigenschaften aktueller Mobilgeräte kennzeichnet sie eine geringe Wiedergabelautstärke und eine deutliche Begrenzung des tonalen Umfangs im unteren Frequenzbereich. Nutzer mit HiFi-Ansprüchen sind deshalb auf die Verwendung von Zusatzlautsprechern bzw. Kopfhörern angewiesen, was wiederum die Mobilität beschränkt.

Maßnahmen zur Pegelsteigerung

Strahlungsimpedanz: Ein geringer Schalldruckpegel oder eine beschränkte Übertragungsbandbreite sind Herausforderungen, die auch den klassischen Lautsprecher von Anfang an begleiten. Interessant sind die dafür entwickelten Gegenmaßnahmen. Ausgangspunkt dafür soll die Problemanalyse auf Basis der Schallleistung $\underline{P}$ und der Strahlungsimpedanz $\underline{Z}$ sein. Für die Schallwahrnehmung ist lediglich der Realteil der Schallleistung $\mathrm{Re}(\underline{P})$ von Interesse. Er wird auch als Wirkleistung P_w bezeichnet. Für das Modell einer Kolbenmembran in einer unendlichen Schallwand bestimmt sich die Wirkleistung nach [1] gemäß Gleichung (1).

$$\mathrm{Re}(\underline{P}) = P_\mathrm{w} = \tilde{v}^2 \cdot \mathrm{Re}(\underline{Z}_\mathrm{Ko}) \cdot S_\mathrm{M} \qquad (1)$$

Zum einen ist die Membranschnelle, mit $\tilde{v}$ als Effektivwert, und damit die Membranauslenkung von entschei-

[1] Der Breitbandlautsprecher hat eine Leistungsverträglichkeit von ca. 8 W. Beim Miniaturlautsprecher liegen bereits 1 W über der Verträglichkeitsgrenze.

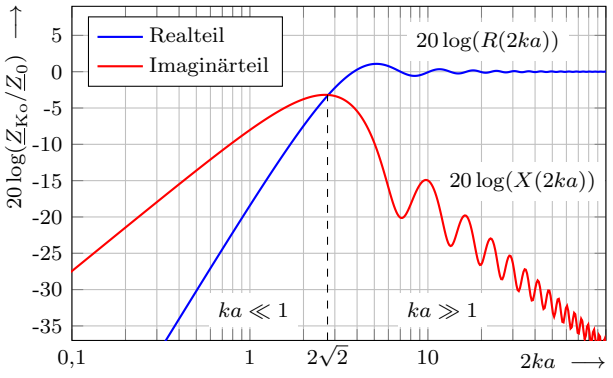


Abbildung 3: Realteil und Imaginärteil der Strahlungsimpedanz einer Kolbenmembran nach [1].

dendem Einfluss. Auf der anderen Seite geht die Membrangröße S_{M} in die Berechnung ein. Demnach kann die Wirkleistung eines Lautsprechers über die Membranauslenkung und über die -größe verändert werden. Dabei übernimmt der Realteil der Strahlungsimpedanz $\mathrm{Re}(\underline{Z}_{\mathrm{Ko}})$, auch Strahlungswiderstand genannt, eine Gewichtung beider Größen. Er ist damit von entscheidender Relevanz und muss in seinem Verlauf berücksichtigt werden. Mathematisch ist die Strahlungsimpedanz der Kolbenmembran unter Verwendung der Bessel- und der Struvefunktion erster Ordnung (J_1 bzw. H_1) beschreibbar [1], siehe Gleichung (2).

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{\mathrm{Ko}} &= \mathrm{Re}(\underline{Z}_{\mathrm{Ko}}) + \mathrm{j}\cdot\mathrm{Im}(\underline{Z}_{\mathrm{Ko}}) \\ &= Z_0\cdot[R(2ka) + \mathrm{j}\cdot X(2ka)] \\ &= Z_0\cdot\left[1 - 2\frac{\mathrm{J}_1(2ka)}{2ka} + \mathrm{j}\cdot 2\frac{\mathrm{H}_1(2ka)}{2ka}\right]\end{aligned} \tag{2}$$

Für beide Funktionen stellt das Argument $2ka$ das Verhältnis zwischen Membranumfang und Wellenlänge dar. $k = 2\pi/\lambda$ steht für die Wellenzahl und a für den Membranradius. Der Kurvenverlauf des Real- und Imaginärteils der Kolbenmembran ist in Abbildung 3 nach [1] dargestellt. Für eine möglichst effektive Schallerzeugung sollte die Strahlungsimpedanz der Kolbenmembran der Schallkennimpedanz der ebenen Welle in Luft (Z_0) entsprechen. Das Verhältnis aus beiden ist in Abbildung 3 logarithmisch aufgetragen. Ausgehend vom Größenverhältnis Membranumfang zu betrachteter Wellenlänge ist der Imaginär- bzw. der Realteil der Strahlungsimpedanz größer. Nach [1] liegt der Übergang bei $ka = \sqrt{2}$. Einfachheitshalber wird zwischen den Bereichen $ka \ll 1$ und $ka \gg 1$ unterschieden. Für den oben aufgeführten Breitbandlautsprecher liegt der Übergang ($2ka = 2\sqrt{2}$) bei 4,7 kHz. Demnach ist für tiefere Frequenzen der Imaginärteil und damit die Blindleistung größer als die Wirkleistung. Für den betrachteten Miniaturlautsprecher fällt dies noch drastischer aus. Eine Verbesserung kann durch ein geeigneteres Verhältnis des Membranumfangs zur Wellenlänge und/oder durch eine Vergrößerung der Membranschnelle (Gleichung 2) erreicht werden. Ersteres ist durch den Einsatz einer größeren Kolbenmembran möglich. Ebenso kann aber statt der Membran auch die schallabstrahlende Fläche vergrößert werden. Die Membran bliebe dazu unverändert.

Hörner: Unter Verwendung eines Trichters/Horns kann die schallabstrahlende Fläche eines Lautsprechers vergrößert werden. Dies bewirkt eine Vergrößerung des Realteils der Strahlungsimpedanz und der abgestrahlten Wirkleistung, sofern die Situation $ka \gg 1$ noch nicht erreicht ist. Der Horneinsatz im Bereich $ka \gg 1$ führt zu keiner weiteren Erhöhung des Strahlungswiderstandes. Lediglich die zunehmende Richtwirkung bedingt Pegelsteigerungen für bestimmte Abstrahlwinkel. Um die wirkleistungssteigernden Eigenschaften eines Horns nutzen zu können, sind Vorgaben für die Horngeometrie zu berücksichtigen. Diese beziehen sich sowohl auf die Größe als auch auf den Verlauf der Hornöffnung. Bzgl. der Hornausgangsfläche (Mundfläche) gelten die Zusammenhänge aus Abbildung 3. Die Membranfläche muss durch das Horn ausreichend vergrößert werden, so dass bestenfalls die Bedingung $ka \gg 1$ entsteht. Aufgrund einer guten Handhabbarkeit werden hierbei Kompromisse zur Begrenzung der Horngröße gewählt. So wird für den notwendig kontinuierlichen Übergang vom Horneingang (Hornhals) zum Hornmund vielfach der exponentielle Verlauf gewählt. Gegenüber dem linearen Trichter ist die erforderliche Hornlänge kleiner. Für das Exponentialhorn gibt es Berechnungsforschriften, z.B. in [1]. Als Ausgangsparameter ist dafür zu klären, ab welcher unteren Frequenz das Horn wirksam sein soll und wie groß der Horneingang in Abhängigkeit von der Membranfläche gewählt wird. Gleichung (3) stellt die Grundformel des exponentiellen Verlaufs dar.

$$A(x) = A_{\mathrm{Membran}}\cdot e^{\varepsilon x} \tag{3}$$

Darin beschreibt $A(x)$ die Hornquerschnittsfläche an der Hornposition x. $x = 0$ kennzeichnet den Hornbeginn am Hornhals mit einer Halsfläche A_{H} entsprechend der Membrangröße A_{Membran}. Je nach Wunsch kann hier auch die Kombination mit einer Druckkammer berücksichtigt werden, die eine spezielle Abstimmung zwischen der Membran und der Halsfläche benötigt. Für den Hornöffnungsverlauf ist die Trichterkonstante ε entscheidend (Gleichung (4)).

$$\varepsilon = \frac{4\cdot\pi\cdot f_{\mathrm{tw}}}{c} \tag{4}$$

In ihr findet die Berücksichtigung der unteren Grenzfrequenz des Horneinsatzbereiches f_{g} statt. Nach [1] ist wegen eines gleitenden Übergangbereiches die Trichtergrenzfrequenz f_{tw} in der Berechnung mit dem 0,7-fachen der Übertragungsgrenzfrequenz zu verwenden (Gleichung (5)).

$$f_{\mathrm{tw}} = 0,7\cdot f_g \tag{5}$$

Nach [3] ist für eine optimale Schallabstrahlung (Reduktion von Trichterreflexionen) eine Mindestgröße des Hornmundes A_{Mund} in Abbhängigkeit von der größten betrachteten Wellenlänge λ_{tw} erforderlich (Gleichung (6)).

$$A_{\mathrm{Mund}} \geq \frac{\lambda_{\mathrm{tw}}^2}{4\pi} \tag{6}$$

Tabelle 1: Parameter der untersuchten Exponentialhörner in Kombination mit dem Miniaturschallwandler

Variante	Parameter		
	f_{tw}	A_{Mund}	l_{H}
Horn 1 —	700 Hz	191 cm^2	22 cm
Horn 2 —	1 kHz	93,6 cm^2	13,4 cm
Horn 3 —	3 kHz	11 cm^2	2,3 cm
Horn 4 —	3 kHz	11 cm^2	2,3 cm

Auf Basis der Gleichungen (3) bis (6) ergibt sich für die Hornlänge l_{H} die Gleichung (7).

$$l_{\mathrm{H}} = \frac{ln\frac{A_{\mathrm{Mund}}}{A_{\mathrm{H}}} \cdot c}{4\pi \cdot f_{\mathrm{tw}}} \tag{7}$$

Anhand der Berechnungsvorschriften wurden vier unterschiedliche Hornabstimmungen für den Miniaturwandler des Mobiltelefons entworfen (Tabelle 1). Die akustischen Untersuchungen (Abbildung 6a) geben Auskunft darüber, ob eine Verkleinerung der Horngröße die Wirkungsweise beeinträchtigt. Ausgehend von einem Horn, abgestimmt auf den Einsatz ab 700 Hz, wurde die Größe verkleinert und damit die Trichtergrenzfrequenz erhöht. Bei Horn 4 ist die Mundfläche von Horn 3 in eine flache Form überführt worden, um den Abmessungen eines Mobiltelefons nahe zu kommen (Abbildung 4). Gegenüber dem Miniaturwandler erzielen alle Hornkombinationen einen Pegelgewinn (Abbildung 5). Entsprechend der unterschiedlichen Hornabstimmungen setzt der von Horn 1 bzw. 2 bei tieferen Frequenzen ein. Horn 1 erzielt mit ca. 17 dB den größten Pegelzuwachs. Mit zunehmender Frequenz nimmt der Pegelgewinn der Hornkombination ab. Dies ist zurückzuführen auf die Tatsache, dass oberhalb von $ka \gg 1$ das Horn keine Steigerung des Strahlungswiderstandes bewirkt. Lediglich die größere Schallfokussierung, verusacht durch die größere Strahlerfläche (Hornmund versus Membran) liefert einen verbleibenden Zuwachs von ca. 5 dB bis 8 dB. Oberhalb von 4 kHz bewirkt Horn 4 keinen durchgehenden Pegelzuwachs gegenüber Horn 3, obwohl beide die gleiche Mundfläche aufweisen. Vermutlich ist dies in der flachen Hornform begründet, die in ihrer Flächenverteilung von der Kolbenform deutlich abweicht.

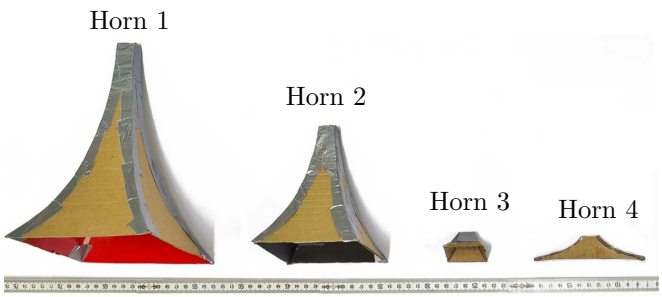


Abbildung 4: Größenvergleich der entworfenen Exponentialhörner für den Miniaturlautsprecher

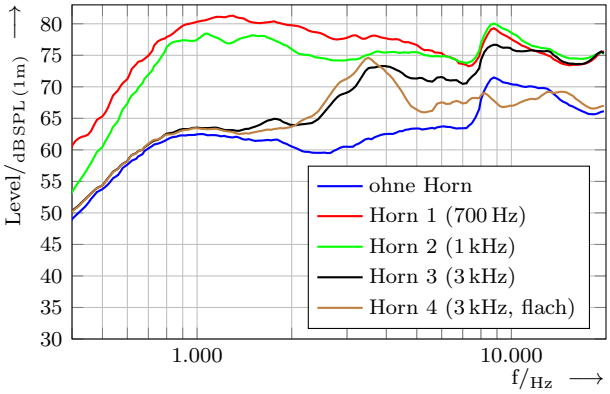
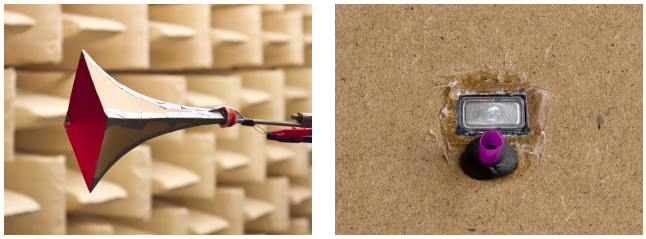


Abbildung 5: Miniaturwandler mit Hörnern (ohne Schallwand gemessen)

Resonatoren: Eine zweite Maßnahme zur Effizienzsteigerung von Lautsprechern ist die Ankopplung an einen Resonator. Dabei wird der Lautsprecher als anregendes und der Resonator als resonierendes System betrachtet. Aufgrund des Resonanzeffektes ist nur wenig Anregungsenergie nötig, um den Resonator zu aktivieren. Dennoch ist der Schallbeitrag des Resonators je nach Abstimmung mehr als doppelt so groß gegenüber der Membran. Auf diese Weise ist bspw. der untere Wiedergabebereich eines Lautsprechers erweiterbar. In Bezug auf die Schallleistung (Gleichung (1)) kann durch einen Resonator sowohl die schallabstrahlende Fläche als auch die Schnelle für einen ausgewählten Frequenzbereich (Resonanzfrequenz) vergrößert werden. Die Realisierung erfolgt gewöhnlich über einen Helmholtzresonator (Bassreflex-Gehäuse) oder eine Passivmembran. In beiden Fällen wird durch die Membranschwingung eine Masse, die Luftsäule im Rohr oder die Passivmembran, zum Schwingen angeregt. Das im Gehäuse eingeschlossene Luftvolumen wirkt hier als Feder. Die Resonanzfrequenz f_{H} eines Helmholtzresonators errechnet sich nach [1] gemäß Gleichung (8),

$$f_{\mathrm{H}} = \frac{c}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{A_{\mathrm{H}}}{V \cdot l_{\mathrm{H,eff}}}}, \tag{8}$$

mit A_{H} als Querschnittsfläche des Resonatortunnels, V als Resonatorvolumen und $l_{\mathrm{H,eff}}$ als effektive Tunnellänge. Die akustisch wirksame Tunnellänge $l_{\mathrm{H,eff}}$ ist um den Faktor $2k_{\mathrm{c}} \cdot r_{\mathrm{H}}$ größer als die geometrische l_{Kanal}. Nach [2] hat von Helmholtz k_{c} mit $\pi/4$ angenähert. Der Parameter r_{H} kennzeichnet den Radius des kreisförmigen Reflextunnels, wobei $d_{\mathrm{Kanal}} = 2r_{\mathrm{H}}$ für den Durchmesser gilt. Für die Kombination eines Lautsprechers mit einem Bassreflexgehäuse sollte dieser bestimmte Eigenschaften, beschrieben anhand der Thiele-Small-Parameter, besitzen [4]. Der betrachtete Miniaturlautsprecher erfüllte diese Forderung nicht. Dennoch wurden anhand der Gleichung (8) drei Resonatorgehäuse mit einer angestrebten Pegelerhöhung im unteren Übertragungsbereich abgestimmt. Abbildung 6 zeigt zwei der Bassreflexkombinationen, eingebaut in eine DIN-Normschallwand.



(a) (b)

Abbildung 6: Untersuchter Miniaturschallwandler mit dem Horn 1 (a) bzw. dem Bassreflex-Gehäuse BR.1 (b)

Tabelle 2: Abstimmungen des Bassreflex-Gehäuses für den Miniaturwandler

Variante	Parameter			
	V	d_{Kanal}	l_{Kanal}	f_{H}
BR. 1 —	5 ml	5 mm	25 mm	640 Hz
BR. 2 —	2 ml	2 mm	10 mm	800 Hz
BR. 3 —	2 ml	2 mm	5 mm	970 Hz

Ähnlich den Hornbetrachtungen stand auch für die Resonatoren die pegelsteigernde Wirkung in Abhängigkeit von einer Miniaturisierung des Gehäuses und des Reflextunels im Vordergrund (Tabelle 2). Allein für das Bassreflexgehäuse BR. 1 gelingt eine Pegelsteigerung im unteren Übertragungsbereich von ca. 6 dB (Abbildung 7). Trotz tiefer Resonanzfrequenzabstimmung ist mit BR. 2 und BR. 3 keine Tieftonerweiterung gegenüber dem geschlossenen Gehäuse erzielbar (Abbildung 8). Als Ursachen werden der kleine Strahlungswiderstand der Reflextunnel als auch ein abweichendes Verhalten gegenüber dem Standard-Reflextunnel vermutet. Dies erfordert eine nähere Betrachtung von Effekten, die bei Schallvorgängen in sehr kleinen Kanälen auftreten und demzufolge nicht mehr vernachlässigbar sind.

Zusammenfassung und Ausblick

Die in dieser Arbeit vorgestellten Untersuchungen zeigen, dass auch Miniaturlautsprecher für Mobiltelefone von der pegelsteigernden Wirkung klassischer Schallführungformen profitieren. Der Einsatz von Hörner bewirkt in Abhängigkeit von der Größe breitbandige Pegelgewinne bis ca. 17 dB. Jedoch sind derartige Hörner für die Integration in Mobiltelefone deutlich zu groß. Eine Größenreduktion ist möglich, allerdings verringert sich dadurch prinzipbedingt die Wirkungsbandbreite und der Pegelgewinn. Einfluss nehmen neben der Horngröße auch die Hornform. Gemäß den Untersuchungen profitiert der Miniaturlautsprecher auch von der Kombination mit einem Bassreflexgehäuse. Die Schallabstrahlung im unteren Übertragungsbereich kann um ca. 5 dB erhöht werden. Die weitere Miniaturisierung zeigt auf, dass ab bestimmten Tunnel-/Gehäusegrößen die pegelsteigernde Wirkung des Resonators nicht mehr erzielt wird. Im Hinblick auf die Anwendung im Bereich von MEMS-Lautsprechern, sind weitere Größenreduktionen erforderlich. Demzufolge ist eine tiefere Betrachtung von Einflussfaktoren bei Schallvorgängen in sehr kleinen Dimensionen notwendig. Dies betrifft unter anderem die Auseinandersetzung mit Grenzschichteffekten [5], die größeren Abmessungen vernachlässigbar sind.

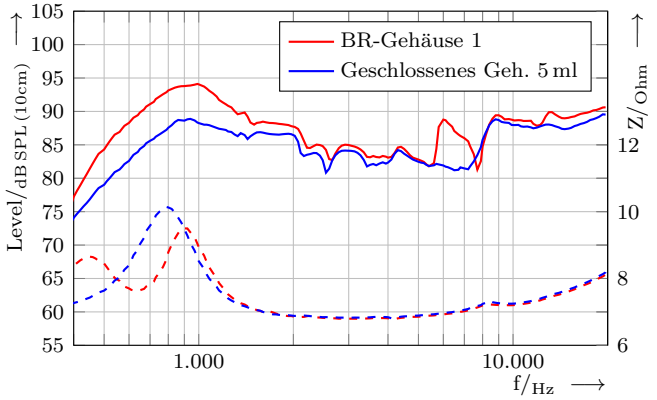


Abbildung 7: Amplitudenfrequenzgang und elektr. Impedanz (gestrichelt) eines Miniaturlautsprechers im geschlossenen Gehäuse (5 ml) und Bassreflex-Gehäuse 1.

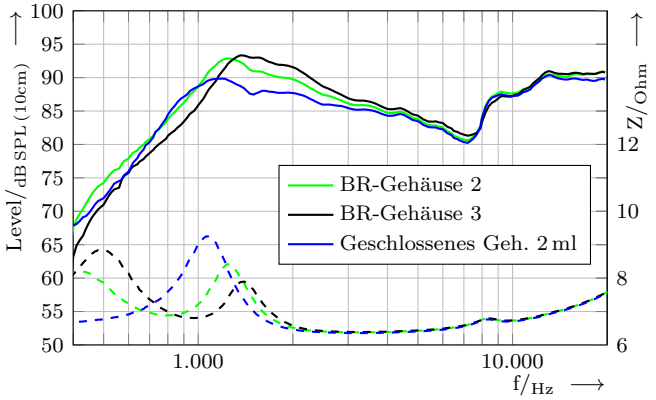


Abbildung 8: Amplitudenfrequenzgang und elektr. Impedanz (gestrichelt) eines Miniaturlautsprechers im geschlossenen Gehäuse (2 ml) und den Bassreflex-Gehäusen 2 bzw. 3.

Literatur

[1] Zollner, M.; Zwicker, E.: Elektroakustik, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 3. Auflage (2003)

[2] Lerch, R. ; Sessler, G. ; Wolf, D.: Technische Akustik - Grundlagen und Anwendungen, Springer-Verlag, Berlin, 1. Auflage (2008)

[3] Klinger, H. H.: Lautsprecher-Baubuch, Franzis-Verlag, 1. Auflage (1989)

[4] Dickason, V.: Lautsprecherbau, Elektor-Verlag Aachen, 6. Auflage (2000)

[5] Meyer, M. ; Neumann, E.-G.: Physikalische und Technische Akustik, F. Vieweg + Sohn-Verlag, 2. Auflage (1975)