

Theoretische und praktische Aspekte für den Entwurf von Dipollautsprechern

L. Ferekidis, l.ferekidis@nxtsound.com
 NXT, New Transducers Ltd., Huntingdon, UK

1. Einführung

Schallwandler, die nach dem Dipolprinzip arbeiten besitzen immer noch Exotenstatus. Dabei vereint diese Bauform eine Reihe von raumakustisch motivierten Vorteilen gegenüber herkömmlichen Lautsprechern. Eingesetzt zur Wiedergabe tiefer Frequenzen zeichnen sich Dipollautsprecher durch eine gleichmäßigere Modenanregung als konventionell, omni-direktional abstrahlende Lautsprecher aus [1]. Ebenso wurde gezeigt, daß Dipole ein besseres Impulsverhalten aufweisen [2]. Diese Vorteile wiegen besonders schwer in kleinen und mittelgroßen Räumen, welche eine geringe Modendichte unterhalb von 100Hz aufweisen. Eine ungleichmäßige Anregung der Fundamentalmoden würde hier zu einer Überbetonung einzelner Frequenzbereiche führen. Darüber hinaus ermöglicht der Dipol, aufgrund seiner Gradientenwandler Charakteristik, eine gezielte Kontrolle über die Anregung einzelner Moden [1][3].

Aber auch im höheren Frequenzbereich bis etwa 5kHz macht ein dipolares Abstrahlverhaltens Sinn. Ein sorgfältiges Design vorausgesetzt, reduziert sich der störende Einfluß von Primärreflexionen wahrnehmbar [4]. Aufgrund der gerichteten Abstrahlung ist es sogar möglich die Lautsprecher verhältnismäßig nah zu seitlichen Begrenzungsflächen aufzustellen.

Oberhalb von 5kHz nimmt der Bündelungsgrad konventioneller Kolbenstrahler so stark zu, daß die Dipolcharakteristik nur schwer aufrecht erhalten werden kann. Einen Ausweg weisen hier sogenannte Distributed Mode Loudspeaker, kurz DML, welche ein gleichmäßiges Rundstrahlverhalten bis 20kHz aufweisen [5].

2. Dipolmodell

Das einfachste Beschreibungsmodell besteht aus zwei infinitesimal kleinen, gegenphasig pulsierende Punktschallquellen, welche in einem Abstand D zueinander angeordnet sind. Die Punktschallquellen können auch als omni-direktional abstrahlende Monopole interpretiert werden. Zusammen bilden sie einen Gradientenstrahler 1. Ordnung. Sind die Abmessungen eines Lautsprechers klein im Verhältnis zur abgestrahlten Wellenlänge, so ist die Randbedingung dieses Modells erfüllt.

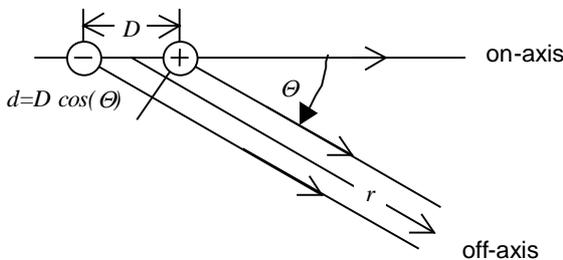


Fig. 1. Schematische Darstellung eines Gradientenstrahlers 1. Ordnung (aus [6])

Der Laufzeitunterschied im Abstand r , mit $r \gg D$, beträgt mit $c =$ Schallgeschwindigkeit

$$T = \frac{D \cdot \cos(\theta)}{c} \quad (1)$$

Die Impulsantwort des Dipols und seine Fouriertransformierte können geschrieben werden zu

$$h(t) = \delta(t) - \delta(t-T) \quad \text{O} \text{---} \bullet \quad H(s) = 1 - e^{-sT} \quad (2)$$

Mit $s = \sigma + j\omega$ ($\sigma = 0$) und $\omega = 2\pi f$ ergibt sich der Betragsfrequenzgang $|H(\omega)|$ als Funktion von D/λ zu

$$|H(\omega)| = 2 \cdot \sin\left(\frac{\omega T}{2}\right) \rightarrow |H(D/\lambda)| = 2 \cdot \sin\left(\pi \frac{D}{\lambda} \cdot \cos(\theta)\right) \quad (3)$$

In Fig. 2. ist $20 \log |H(\omega)|$ für verschiedene Winkeln θ dargestellt. Charakteristische Merkmale von $|H(\omega)|$ sind der Pegelabfall von 6dB/Oktave zu tiefen Frequenzen hin, sowie die Lage der lokale Minima und Maxima. Für $\theta = 0^\circ$ kommt es bei $D/\lambda = 1, 2, 3, \dots, N$ zu Auslöschungen bzw. bei $D/\lambda = 1/2, 1 1/2, 2 1/2, \dots, N+1/2$ zu maximalen Additionen (+6dB).

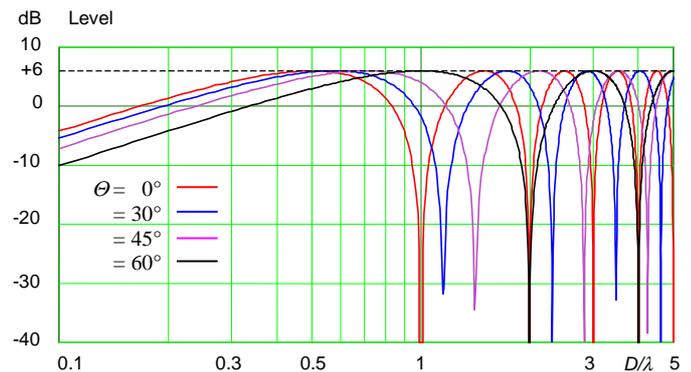


Fig. 2. Betragsfrequenzgang $|H(\omega)|$ als Funktion von D/λ für $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ (von oben nach unten)

Betrachtet man die Polardiagramme in 0so erkennt man, daß für $D/\lambda < 0.5$ eine dipolare Abstrahlcharakteristik vorliegt. Der Bereich $0.5 < D/\lambda < 1$ beschreibt den Übergang vom Dipol zum Quadrupol, so daß

$$D/\lambda < 0.7 \quad (4)$$

den oberen Grenzwert für bipolare Abstrahlung markiert.

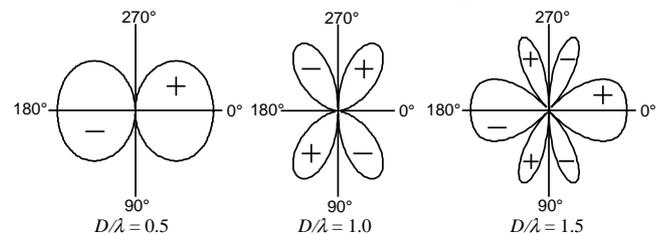


Fig. 3. Polardiagramme für charakteristische Frequenzen

Gleichzeitig nimmt die Anzahl der Pole mit $4D/\lambda$ zu. Benachbarte Pole weisen immer entgegengesetzte Phasenlage auf. Dies ist besonders nachteilig, wenn Mehrwege-System aufgebaut werden sollen und eine konstruktive Schalladdition im Überlappungsbereich erforderlich ist.

3. Der Kolbenstrahler als Dipol

Das vorgestellte Modell ist praktikabel solange die abgestrahlte Wellenlänge λ groß gegenüber dem mittleren Durchmesser der Schallwand D bzw. dem Membrandurchmesser d des Lautsprechers ist. Für Frequenzen deren Wellenlänge λ gleich dem Umfang der Membran $d \pi$ oder kleiner ist, weisen Kolbenstrahler einen progressiv schmaler werdenden Abstrahlwinkel auf. Im Umkehrschluß bedeutet dies, daß für

$$d \pi < \lambda \quad (5)$$

ein Lautsprecher annähernd kugelförmig abstrahlt. Die Frage nach dem maximal zulässigen Schallwanddurchmesser D für den ein Lautsprecher mit Membrandurchmesser d gerade keine Auslöschung für $\theta = 0^\circ$ aufweist, läßt sich nun durch Kombination der Ungleichungen (4) und (5) wie folgt beantworten. Solange die Schallwandbreite

$$D \leq 0.7 \pi d \approx 2.2 d \quad (6)$$

,also kleiner dem 2.2-fachen des effektiven Membrandurchmessers ist, kommt es nicht zur Ausbildung von unerwünschten Seitenkeulen, bzw. Auslöschungen.

Um die Näherung aus (6) zu verifizieren wurden mit Hilfe der Simulationssoftware AkAbak® unterschiedliche Verhältnisse von Schallwandbreiten D zu Membrandurchmesser d simuliert. Die Ergebnisse sind in Fig. 4. dargestellt und berücksichtigen das Bündelungsverhalten eines kreisförmigen Kolbenstrahlers, sowie Beugungseffekte am Schallwandrand. Damit die Ergebnisse einfacher vergleichbar sind wurde das Verhältnis D/λ als x-Achse gewählt. Man erkennt, daß mit abnehmendem D die Auslöschungen

bei $D/\lambda = 1$ und $D/\lambda = 2$ kleiner werden um dann für $D = 2.2 d$ ganz zu verschwinden.

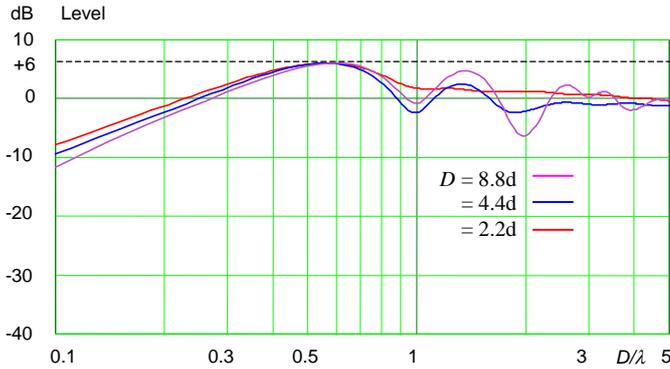


Fig. 4. Betragshistogramm $|H(\omega)|$ als Funktion von D/λ für $D = 8.8d, 4.4d, 2.2d$ (von oben nach unten, $\Theta = 0^\circ$)

Unberücksichtigt bleibt in dieser Betrachtung der Einfluß der konusförmige Membrangeometrie konventioneller Lautsprecherchassis, sowie die akustische Tiefpaß-Filterung, welche durch rückseitig, zwischen Korb und Membran, eingeschlossene Luftpolster, hervorgerufen wird. Trägt man die Kurven aus Fig. 4. als Funktion von d/λ auf (Fig. 5.), so wird auch erkennbar, daß mit einer Halbierung der Schallwandbreite D eine Verdopplung der unteren Grenzfrequenz einher geht.

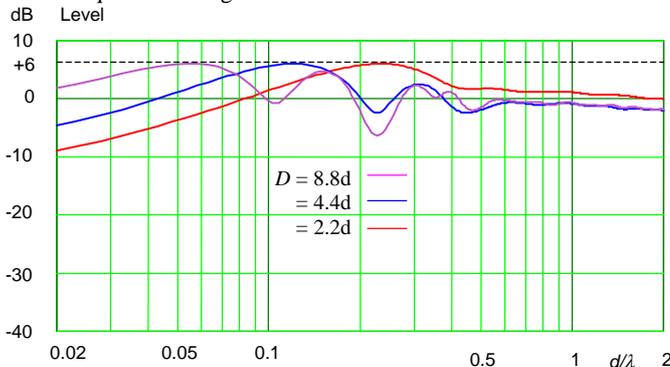


Fig. 5. Betragshistogramm $|H(\omega)|$ als Funktion von d/λ für $D = 8.8d, 4.4d, 2.2d$ (von oben nach unten, $\Theta = 0^\circ$)

Für $D = 2.2d$ beginnt somit der nutzbare Übertragungsbereich bei $d/\lambda \approx 0.07$ vorausgesetzt, die Frequenzgangüberhöhung von ca. +4dB, welche bei $d/\lambda = 0.23$ auftritt, wird kompensiert. Ein typischer 10cm Mitteltonlautsprecher mit 8cm effektivem Membrandurchmesser kann somit den gesamten Mitteltonbereich ab 300 Hz übertragen und weist zudem, bis zum Einsetzen von Bündelungseffekten, ein kontrolliertes, dipolares Abstrahlverhalten auf.

4. Der Distributed Mode Loudspeaker als Dipol

Der DML ist ein BiegeWellenwandler, bestehend aus einer, in der Regel flachen, steifen aber leichten Membran, dessen Eigenmoden idealerweise gleichmäßige über den Übertragungsbereich verteilt sind. Die Moden werden von sogenannten Excitern angeregt, welche dann ein weitgehend diffuses Schallfeld erzeugen. Die Abstrahlcharakteristik eines frei abstrahlenden DML ähnelt dem eines Dipols.

In Fig. 6. sind beispielhaft die Polardiagramme für ein 36x41 cm messendes Panel dargestellt ($D = 0.36m$). Der gleichmäßige Verlauf der Richtcharakteristik für Wert von $D/\lambda < 1$ belegt, daß sich lediglich eine Abstrahlkeule jeweils nach vorne bzw. hinten ausbildet. Daraus kann geschlossen werden, daß sich die Schallanteile von Vorder- und Rückseite gegenphasig zueinander verhalten.

Mit zunehmenden Werte von $D/\lambda > 1$ ist erst eine leichte ($D/\lambda = 3.2$), bei höheren Frequenzen ($D/\lambda = 10$) dann eine stärkere Welligkeit im Kurvenverlauf erkennbar. Hier liegt der Ursprung für die Diffusität der Schallabstrahlung von DMLs, nämlich eine, mit der Frequenz, zunehmende Zahl von Abstrahlkeulen, welche unterschiedliche Phasenlagen zueinander aufweisen.

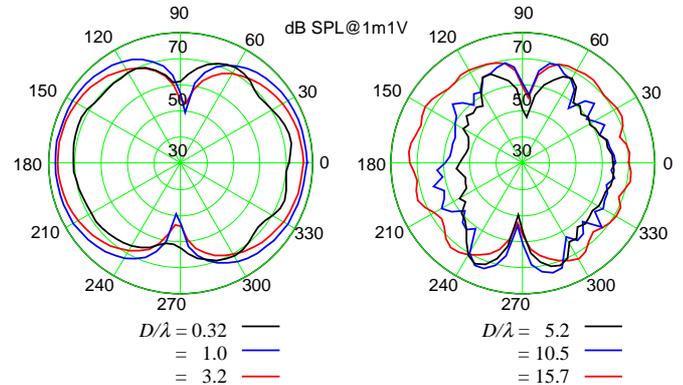


Fig. 6. Abstrahlcharakteristik eines 36x41cm messenden DML für 1/3-Oktavebänder

Aufgrund ihrer sehr gleichmäßigen Abstrahlcharakteristik eignen sich DMLs hervorragend für den Aufbau von bipolaren Lautsprechern. Probleme, wie Auslöschungen oder Multipol-Bildung, wie sie bei der Verwendung kohärenter Schallwandler auftreten, werden effektiv vermieden.

5. Zusammenfassung

An dem sehr vereinfachten Modell zweier gegenphasig pulsierender Punktschallquellen und unter der Annahme idealer Kolbenstrahler wurde eine „rule of thumb“ hergeleitet, welche die maximale Schallwandbreite D zum 2,2-fache des effektiven Membrandurchmessers d bestimmt. Für diesen Wert ergänzen sich das dipolare Abstrahlverhalten bei tiefen Frequenzen, hervorgerufen durch die Schallwand, und das Bündelungsverhalten des Kolbenstrahlers optimal. Bei geschickter Wahl der Dimensionen kann ein solchermaßen konstruierter Lautsprecher den gesamten kritischen Mitteltonbereich mit einem nahezu konstanten Bündelungsmaß wiedergeben.

Als Alternative bietet sich der DML an, dessen Abstrahlcharakteristik bei tiefen Frequenzen sehr dem eines konventionellen Kolbenstrahlers ähnelt, daß jedoch mit zunehmender Frequenz mehr und mehr diffusen Charakter annimmt. Der Begriff „diffuser Bipol“ beschreibt dabei das akustische Verhalten wesentlich trefflicher als das Wort Dipol, da für Frequenzen $D/\lambda > 1$ der abgestrahlte Phasenwinkel nicht mehr konstant ist, sondern eine Funktion des Raumwinkels darstellt.

Ist das Ziel eine konstante und gleichmäßige abgestrahlte Schallleistung, so stellen DMLs eine ernst zunehmenden Alternative zu konventionellen Kolbenstrahlern dar.

6. Literatur

- [1] Lamos Ferekidis & Uwe Kempe, „Room mode excitation of monopolar and dipolar low frequency sources“, presented at the 100th AES Convention 1996, pre-print #4193
- [2] Siegfried Linkwitz, „Investigation of Sound Quality Differences between Monopolar and Dipolar Woofers in Small Rooms“, presented at the 105th AES Convention 1998, preprint #4786
- [3] Lamos Ferekidis & Uwe Kempe, „Über den Einfluß der Richtcharakteristik tieffrequenter Schallquellen auf die Anregung der Moden kleiner Abhörräume“, präsentiert auf der 20. Tonmeistertagung 1998
- [4] Siegfried Linkwitz, „Development of a Compact Dipole Loudspeaker“, presented at the 93rd AES Convention 1992, preprint #3431
- [5] N. Harris, „The Distributed Mode Loudspeaker (DML) as a broad-band acoustic radiator“, presented at the 103rd AES Convention 1997, preprint #4526
- [6] Siegfried Linkwitz, „Models for dipole loudspeaker design“, www.linkwitzlab.com/models.htm