

# Lautsprecherboxen aus Monopol- und Dipolquellen - Richtwirkung und Nahbereich

Boris Müller

Boris Müller Audio Engineering, Großtalstraße 79a, 79117 Freiburg, Deutschland, Email: mailings@borismueller.de

Theoretisch kann man einen gerichteten Lautsprecher herstellen, indem ein Schallwandler mit Kugelcharakteristik und einer mit Achtercharakteristik kombiniert wird, vorausgesetzt die Maße des Gesamtsystems sind hinreichend klein.

Durch einen Messaufbau mit einem Mikrofonarray wurde die Umsetzung der Ansätze aus der Fachliteratur [1, 2] anhand von Prototypen vermessen.

## Monopol und Dipol

Eine geschlossene Lautsprecherbox kann als Monopol bzw. Kugelquelle betrachtet werden, solange die charakteristische Dimension [3] deutlich kleiner als die Wellenlänge  $\lambda$  ist:

$$k \cdot a \ll 1 \quad [k \dots \text{Kreiswellenzahl} = \frac{2\pi}{\lambda}] \quad (1)$$

Ein Lautsprecher ohne Gehäuse nähert einen akustischen Dipolstrahler. Dies gilt auch für einen Lautsprecher in einer Schallwand, solange der Schallweg  $d$  zwischen Vorder- und Rückseite der Membran deutlich kleiner als die Wellenlänge ist. Dabei gilt für die höchste praktisch nutzbare Frequenz [4]:  $\frac{d}{\lambda} < 0.7$ . Als Prototypen wurden gleichartige, kleine Gehäuse verwendet, wobei einmal die Rückseite geschlossen wurde und einmal auf eine Rückwand verzichtet wurde. Um Resonanzen durch die rohrartige Ausführung zu vermeiden, muss  $\lambda < 4d$  bleiben. Es wurden Lautsprecher mit einem Membranradius von  $R=6\text{ cm}$  in ein Gehäuse mit den Außenmaßen  $\{17, 17, 20\}$  cm eingebaut. Für Frequenzen  $f < 270\text{ Hz}$  kann der Einfluss des Gehäuses auf das Schallfeld weitgehend vernachlässigt werden. Unter  $212\text{ Hz}$  sollte sich das offene Gehäuse wie ein idealer Dipol verhalten.

In Abbildung 1 wird der Verlauf der Richtcharakteristik des geschlossenen Gehäuses in Isobarendarstellung gezeigt. Das offene Gehäuse 2 zeigt die achterförmige Abstrahlung als Dipol, solange der Umweg deutlich kleiner als die Wellenlänge ist. Bereits ab  $212\text{ Hz}$  zeigen sich die Resonanzerscheinungen des Rohrs.

## Kombination von Monopol und Dipol

Sowohl die kugelförmige Abstrahlung des Monopols als auch die Achtercharakteristik des Dipols sind nicht in jeder Anwendung vorteilhaft. Durch Überlagerung der beiden Quellen lässt sich jedoch jede Richtcharakteristik  $\Gamma(\varphi)$  1. Ordnung regelbar durch den Anteil der beiden Quellen erzeugen:

$$\Gamma(\varphi) = (1 - Y) + Y \cos \varphi \quad (2)$$

Dabei gibt  $Y$  den Anteil des Dipols an. Für  $Y = 0.5$  ergibt sich z.B. eine nierenförmige Abstrahlung. Gleichet man den Frequenzgang beider Boxen an und misst die Kombination erhält man die Abstrahlcharakteristik aus Abbildung 3. Zu erkennen ist die hohe Rückwärtsdämpfung im tieffrequenten Bereich und der über mehrere Oktaven nahezu konstante Abstrahlwinkel. Erst wenn das offene Gehäuse seine Dipolwirkung verliert, ergeben sich

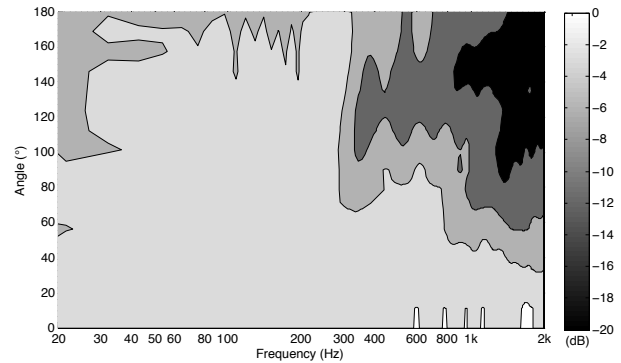


Abbildung 1: Isobarendarstellung der Richtcharakteristik: Geschlossenes Gehäuse.

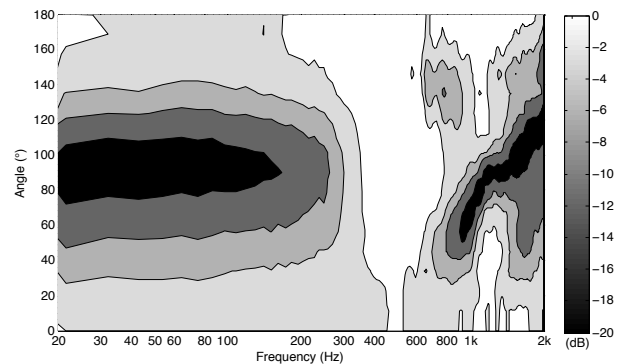


Abbildung 2: Isobarendarstellung der Richtcharakteristik: Offenes Gehäuse.

ungewollte Effekte. Zu hohen Frequenzen geht die Abstrahlung in das gewohnte Verhalten der Kolbenmembran über.

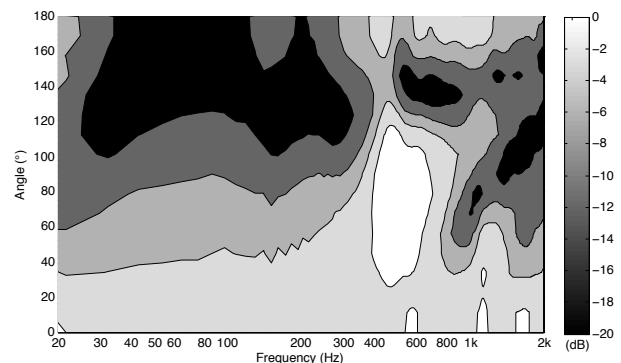


Abbildung 3: Isobarendarstellung der Richtcharakteristik: Kombination der 2 Lautsprecher.

Um die Überlagerung von Monopol und Dipol zu einer anderen Richtcharakteristik zu ermöglichen, muss der Fernfeldfrequenzgang der Quellen linearisiert sein. Im Gegensatz zu Mikrofonen ist die Entzerrung des tieffrequenten Bereichs bei Lautsprechern aufgrund des benötigten Hubs und der benötigten Leistung ein

größeres Problem. Eine Frequenzgangsentzerrung ist nur sinnvoll, solange der nötige Schallpegel noch erreicht werden kann. Der Maximalpegel ergibt sich nach [5] entsprechend

$$L_{\max_d} = L_{\max_m} - 20 \log \left( 0.17 \frac{c}{fd} \right) \quad (3)$$

für den Dipol. Für den gegebenen Lautsprecher sind die erreichbaren Pegel in Abbildung 4 angegeben.

Der nutzbare Frequenzbereich hängt somit vom geforderten Maximalpegel ab. Eine Verdopplung des Umwegs  $d$  bewirkt einen 6dB höheren Maximalpegel, allerdings liegt auch die maximale Frequenz bei der noch eine dipolförmige Abstrahlung erfolgt eine Oktave tiefer.

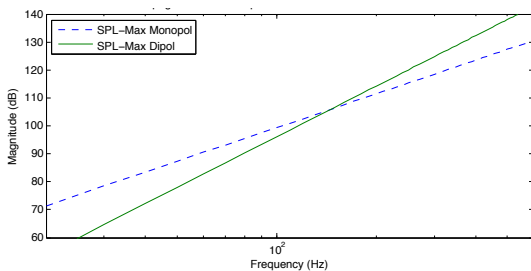


Abbildung 4: Berechnete Maximalpegel für den verwendeten Lautsprecher und die verwendeten Gehäuse nach Linkwitz

### Verhalten im Nahbereich

Der Pegel einer Kugelquelle im Nahfeld ist proportional zu  $\omega^2$  der einer Dipolquelle proportional zu  $\omega^4$  [1]. Praktisch herstellbare Dipolquellen verhalten sich aufgrund ihrer endlichen Dimensionen i.d.R. als Druckdifferenzquellen. Geht man von einer idealen Punktquelle aus, lässt sich deren Schalldruck mit

$$p_{s0}(r, t) = \frac{A}{r} e^{j(\omega t - kr)} \quad (4)$$

beschreiben [1, 3]. Dabei ist  $A$  eine Konstante die von der Quellstärke abhängt und  $r$  der Abstand zur Quelle.

Eine Druckdifferenzquelle bestehend aus zwei hintereinanderliegenden ( $\varphi = 0$ ) gegenphasigen Punktquellen im Abstand  $d$ :

$$p_{s1}(r, t, d) = p_{s0}(r, t) - p_{s0}(r + d, t) \quad (5)$$

Nach Einsetzen von (4) erhält man

$$p_{s1}(r, t, d) = \frac{A}{r} e^{j(\omega t - kr)} \left( 1 - \frac{r}{r + d} e^{-jkd} \right). \quad (6)$$

Im Vergleich zur Punktquelle hängt der Schalldruck der Druckdifferenzquelle also von  $r, d$  und  $\omega$  ab. In Abbildung 5 werden die nach dieser Berechnung zu erwartenden Pegeldifferenzen im Nahfeld mit den entsprechenden Messwerten verglichen.

Eine reale gerichtete Quelle 1. Ordnung lässt sich wie in (2) beschrieben in Druck- und Druckdifferenzquelle zerlegen und hat im Nahbereich einen Pegelanstieg der tiefen Frequenzen, der von den Abmessungen und vom Anteil der Druckdifferenzquelle sowie von der Frequenz und vom Abstand abhängt. Zum Entzerren des Frequenzgangs muss der Hörabstand also entweder fest, oder größer als der Nahbereich sein, sonst ändert sich der nötige Filter mit dem Abstand entsprechend (7).

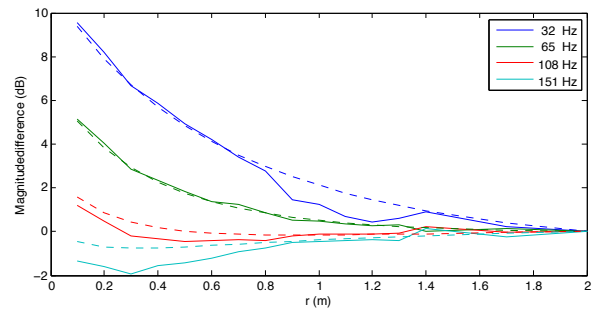


Abbildung 5: Entfernungsabhängige Pegeldifferenzen zwischen Dipol und Monopol bei verschiedenen Frequenzen - Messung und Berechnung (strichliert).

$$\Delta L_{sY}(r, d, \omega, Y) = 20 \log \left( 1 - \frac{r \cdot Y}{r + d} e^{-j \frac{\omega}{c} d} \right) \quad (7)$$

Da sich der Anteil des Dipols auch mit dem Winkel ändert gilt diese Formel nur für die Situation frontal vor der Quelle. Für die seitliche Abstrahlung verringert sich der Anteil des Dipols entsprechend (2) und somit auch der Nahbereich.

### Zusammenfassung

Die Messung der Abstrahlcharakteristik von Prototypen aus geschlossenen und hinten offenen Boxen ergab gute Übereinstimmungen mit den theoretischen Werten. Ausserdem wurde eine einfache Formel gefunden, mit welcher der Pegel im Nahbereich realer Quellen 1. Ordnung beschrieben werden kann. Für gängige Boxengrößen bei Nahfeldmonitoren oder Hifi-Anlagen kann der Nahbereich unter Umständen relevant sein. In Verbindung mit dem geringen Wirkungsgrad des Dipols bei tiefen Frequenzen bleibt es zu überprüfen, in wieweit eine gerichtete Abstrahlung im Bereich sehr tiefer Frequenzen sinnvoll ist, auch wenn Raummoden mit gerichteten Quellen besser kontrolliert werden können [6].

### Dank

Für das Ausleihen von Messmikrofonen, fachliche Gespräche und die Mithilfe bei der Messdurchführung möchte ich mich bei den folgenden Personen bedanken: Institut für Elektronische Musik und Akustik, Franz Zotter, Matthias Frank, Christoph Böhm, Daniel Deboy, Ludwig Mohr, Tina Reichhardt.

### Literatur

- [1] Blauert, J. Xiang, N.: Acoustics for Engineers. Springer-Verlag, Heidelberg, 2008
- [2] Veit, I.: Technische Akustik. Vogel-Verlag, Würzburg, 2008
- [3] Russel, D. Titlow, J. Bemmen, Y.: Acoustic monopoles, dipoles and quadrupoles: An experiment revisited. American Association of Physics Teachers 1998
- [4] Ferekidis, L.: Theoretische und praktische Aspekte für den Entwurf von Dipollautsprechern. DAGA 2001
- [5] Linkwitz Lab - Loudspeaker Design, URL: <http://www.linkwitzlab.com/>
- [6] Ferekidis, C. Kempe, U.: Monopol, Dipol, Unipol – Mechanismen der Modenanregung. TMT 2002