

## **Monopol, Dipol, Unipol – Mechanismen der Modenanregung**

### ***Monopole, dipole, unipole – Mechanisms of mode excitation***

#### **Einleitung**

Seit den Anfängen der Tonwiedergabe wurde der natürlichen Reproduktion tiefer Frequenzen eine hohe Bedeutung beigemessen. Dieser Umstand verwundert wenig, nehmen doch tiefen Frequenzen eine tragende Rolle in der Musik ein. Sie bilden sozusagen das Fundament eines jeden Musikstücks, auf dem die Melodie aufbaut. Die Reproduktion tiefer Frequenzen im Wohnraum, Studio oder auch Abhörraum wird aber nicht allein vom eingesetzten Lautsprecher, sondern auch von den akustischen Gegebenheiten bestimmt. Bedingt durch die geringe Modendichte bei tiefen Frequenzen, ist die Qualität der Tieftonwiedergabe im Raum durch Verteilung und Bedämpfung der Moden entscheidend vorbestimmt. Änderungen an diesen Parametern (Modendichte & Modenbedämpfung) erfordern in der Regel bauliche Maßnahmen am Raum von nicht geringem Ausmaße. Scheiden solche Veränderungen aus, so kann lediglich durch Auswahl und Positionierung des Lautsprechers im Raum das Übertragungsverhalten in der Hörzone beeinflusst werden.

Das Ziel eines ausgeglichenen Schalldruckverlaufes ist dabei gleichbedeutend mit einer gleichmäßigen Modenanregung im Raum. Die Anregung der Moden wird sowohl von der Position der Tieftonschallquelle im Raum, als auch von ihrer Abstrahlcharakteristik bestimmt. Eine gute Einführung in die Thematik, mit detaillierten Informationen zu Dipolquellen, findet sich in [1]. Die Arbeiten von Ferekidis und Kempe behandeln das akustische Verhalten von Monopol und Dipol im Raum. Während in [2] die jeweilige Quelle isoliert untersucht wird, werden in [3] die Ergebnisse für verschiedene Kombinationen von Monopol und Dipol vorgestellt.

Eine Abhandlung der klanglichen Unterschiede würde den Rahmen dieser Untersuchung sprengen. Es sei daher auf eine Arbeit von Linkwitz hingewiesen [4], der anhand von Sinusbursts Untersuchungen über die klanglichen Vorteile von dipolaren Tieftonquellen im Raum angestellt hat.

Ziel dieses Berichts ist es, die unterschiedlichen Mechanismen der Modenanregung von Monopol, Dipol und Unipol zu erläutern. Es werden die sich daraus ergebenden Vor- und Nachteile im praktischen Einsatz diskutiert.

## Das Abstrahlverhalten von Monopol, Dipol und Unipol

Konventionelle Lautsprecher mit geschlossenen oder ventilierten Gehäuse strahlen tiefe Frequenzen ungerichtet ab. Ein Monopol besitzt bei tiefen Frequenzen ein kreisförmiges Polardiagramm (Abb. 1). Die Wellenlänge des Schalls ist so groß, dass der Schall um das Gehäuse herum gebeugt wird und sich in alle Raumrichtungen mit gleicher Amplitude und Phase ausbreitet. Dieser Schallwandler wird auch Druckwandler genannt, da er den umgebenden Luftmolekülen eine Druckveränderung einprägt. In Abb. 2 ist der Druckverlauf einer 10-Mode dargestellt. Eine maximale Anregung der Mode wird im Bereich der Schnelleknoten erzielt. Diese liegen nahe der begrenzenden Raumwände (linker bzw., rechter Rand des Diagramms,  $x/L=0$  &  $x/L=1$ ), dort wo die Molekülgeschwindigkeit minimal, der Druck also maximal ist.

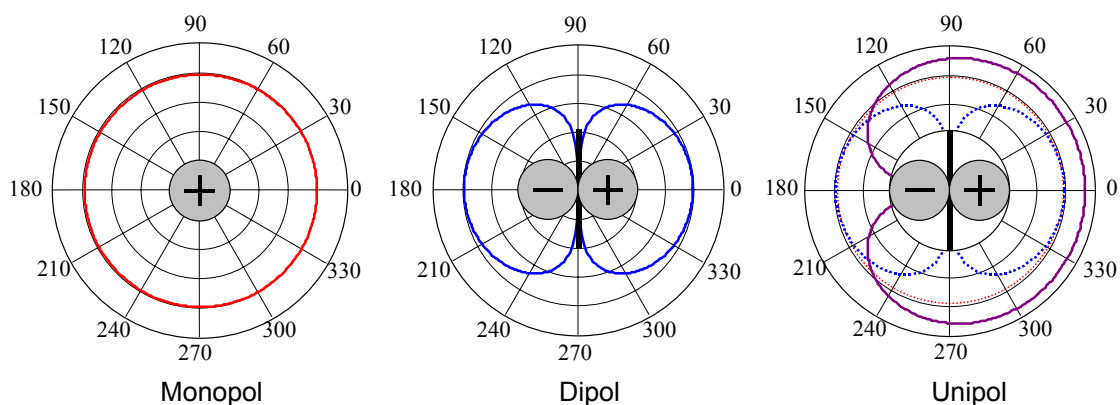


Abb. 1 Polardiagramme von Monopol, Dipol und Unipol für tiefe Frequenzen (Wellenzahl  $k < 1$ ).

Ein Dipol, lässt sich beschreiben durch zwei infinitesimal kleine, gegenphasig pulsierende Punktschallquellen, welche in einem Abstand  $D$  zueinander angeordnet sind. Die Verbindungslinie zwischen den beiden Punktschallquellen bildet dabei die Dipolachse, welche auch die Orientierung des Dipols im Raum beschreibt. Die Abstrahlcharakteristik in Abb. 1 hat die Form einer liegenden Acht. Der ideale Dipol ist infinitesimal klein und wirkt als Schnellewandler. Ein solcher Wandler prägt den umgebenden Luftmolekülen eine Geschwindigkeitsveränderung ein. Im Gegensatz zum Monopol erfolgt die maximale Anregung der 10-Mode in Abb. 2 im Druckknoten der Mode (maximale Geschwindigkeit). Dieser befindet sich im, Falle der 10-Mode aus Abb. 2, genau in der Mitte zwischen den begrenzenden Wänden ( $x/L = 1/2$ ).

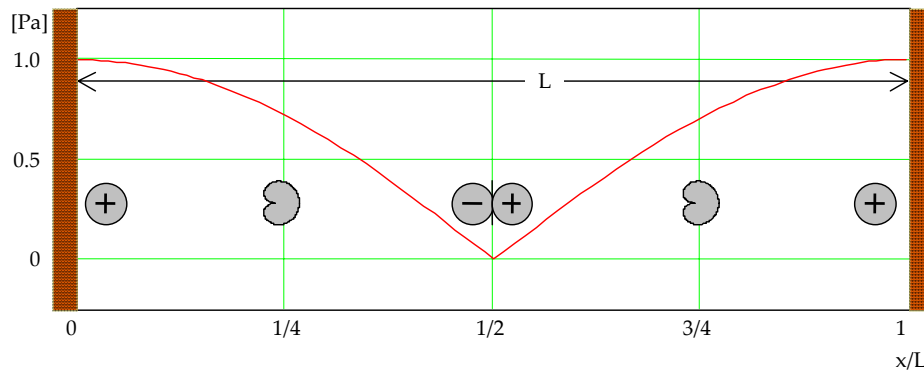


Abb. 2 Druckverteilung einer 10-Mode und die Orte maximaler Anregung für Monopol, Dipol sowie Unipol.

Dies gilt allerdings nur für den Fall, dass sich die Dipolachse parallel zur Ausbreitungsrichtung der Mode befindet. Wird, wie in Abb. 3 angedeutet, die Orientierung der Dipolachse hin zu Werten  $\alpha > 0^\circ$  verändert, so nimmt die Anregung der Mode durch den Dipol ab, bis sie schließlich für  $\alpha = 90^\circ$  verschwindet bzw. minimal wird (für die geringe Anregung zeichnet sich die Druckwandler-Komponente verantwortlich, welche bei Dipolen endlichen Ausmaßes unvermeidlich ist).

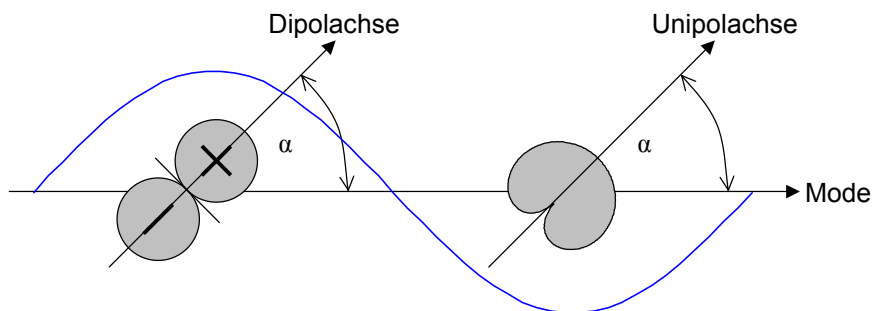


Abb. 3 Abhängigkeit der Erregung einer Mode von der Ausrichtung der Dipol- bzw. Unipolachse relativ zur Ausbreitungsrichtung der Mode.

Der Unipol entsteht aus der Überlagerung von Monopol und Dipol und weist ein nierenförmiges Abstrahlverhalten auf (Kardioid in Abb. 1). Da er sowohl Druck- als auch Schnellewandler in einem ist, erregt er die 10-Mode aus Abb. 2 über die gesamte Länge  $L$ . Voraussetzung hierfür ist allerdings, dass die Unipolachse in Ausbreitungsrichtung der Mode weist. Wie beim Dipol schon zu beobachten, nimmt auch beim Unipol die Anregung ab, wenn er aus der Ausbreitungsrichtung der Mode heraus gedreht wird ( $\alpha > 0^\circ$  in Abb. 3). Im Gegensatz zum Dipol verschwindet die Anregung jedoch nie vollständig, sondern fällt lediglich auf den halben Wert ab. Verantwortlich dafür ist die omnidirektional wirkende Druckwandlerkomponente des Unipols.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der Monopol seine maximale Modenanregung im Schnelleknoten erreicht, unabhängig von seiner Orientierung. Hingegen besitzen Dipol als auch Unipol eine vektorielle Anregungskomponente, die von der Orientierung der Quelle bezüglich der Ausbreitungsrichtung der Mode abhängt. Dieser zusätzliche Freiheitsgrad, erlaubt es, die Anregung bestimmter Raummoden durch Drehen der Quelle gezielt zu verändern. Darüber hinaus vereint der Unipol die Anregungsmechanismen von Monopol und Dipol. Diese Eigenschaft ist besonders dann nützlich, wenn die Position der Tieftonquelle nicht frei im Raum gewählt werden kann. Auf Grund seiner Eigenschaften ist der Unipol die Quelle, die am universellsten im Raum aufgestellt werden kann.

### Untersuchungen der Modenanregung im Hallraum

Im Folgenden werden die oben aufgeführten Eigenschaften der drei Tieftonquellen experimentell verifiziert. Dazu wurden in einem ca. 4.0x5.0x2.6m messenden Hallraum die Raumübertragungsfunktionen der drei Quellen an drei Positionen (Abb. 4) ermittelt. Die geringe Dämpfung im Hallraum bedingt, dass die Unterschiede in der Modenanregung besonders deutlich hervortreten.

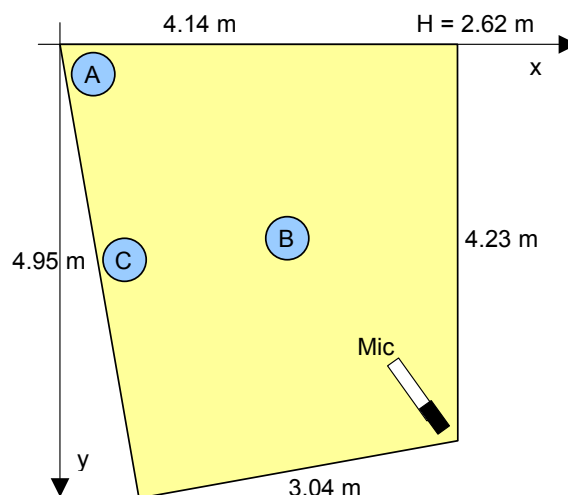


Abb. 4 Abmessungen des Hallraums und Position der Messpunkte A, B und C.

Die Interpretation der Ergebnisse erfolgt auf Basis der ersten beiden Axialmoden, welche sich über die Raumlänge (100-Mode, 38 Hz) sowie die Raumbreite (010-Mode, 46 Hz) ausbreiten. Typ, Position und Orientierung (Dipol, Unipol) der Schallquellen gehen aus den Skizzen links neben den Diagrammen hervor. Das Mikrofon befand sich bei allen Messungen in der linken unteren Ecke. Die Länge der aufgezeichneten Impulsantworten betrug ungefähr 1 Sekunde.

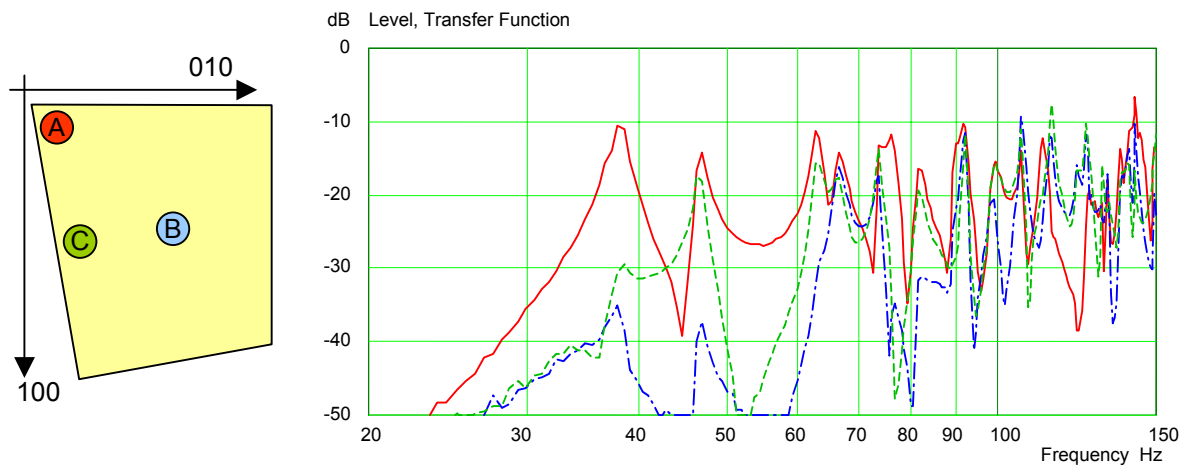


Abb. 5 Raumübertragungsfunktion des Monopols an den Positionen A (— rot) B (-.- blau) und C (--- grün).

Abb. 5 zeigt die Raumübertragungsfunktionen des Monopols in einer Raumecke stehend (A), in der Mitte des Raumes (B), sowie mittig an einer Wand (C). Wie zu erwarten werden in der Eckposition A beide Axialmoden am stärksten angeregt. Wie nicht anders zu erwarten werden in der Raumecke (A) beide Grundmoden maximal angeregt. Ein Verschieben des Monopols entlang der Wand in den Druckknoten der 100-Mode (C), lässt die Anregung dieser Mode abnehmen. In der Raummitte (B) befindet sich der Monopol sowohl im Druckknoten der 100- als auch der 010-Mode, sodass beide Moden nur schwach angeregt werden.

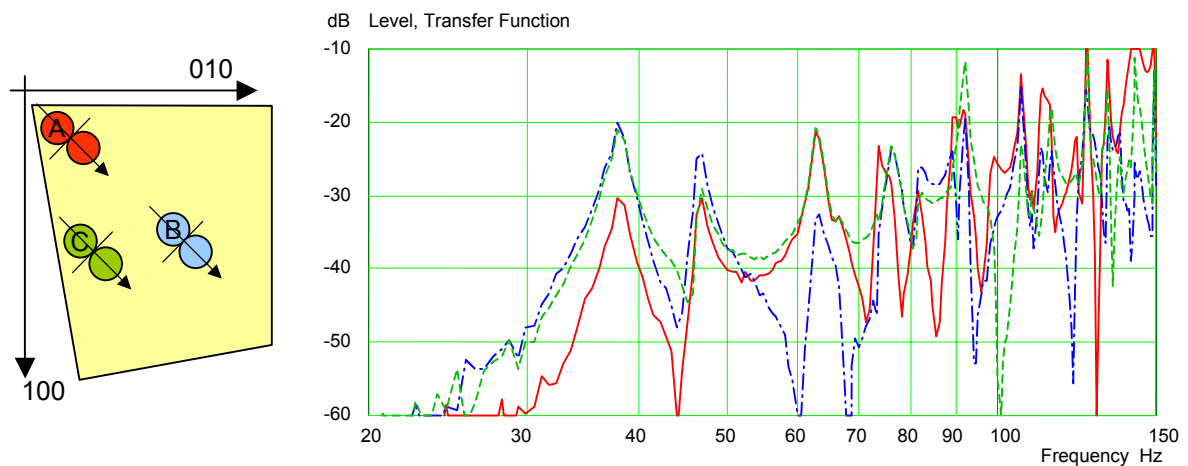


Abb. 6 Raumübertragungsfunktion des Dipols mit diagonaler Orientierung an den Positionen A (— rot) B (-.- blau) und C (--- grün).

In Abb. 6 sind die Übertragungsfunktionen des diagonal orientierten Dipols dargestellt. Der Vergleich mit Abb. 5 lässt ein dem Monopol entgegengesetztes Verhalten erkennen. Die 100- und 010-Mode wird vom Dipol in der Raummitte stehend (B) am stärkste angeregt. Wird der Dipol aus dem Druckknoten der 010-Mode heraus Richtung Wand (C) verschoben, so nimmt

die Anregung dieser Mode ab. In der Eckposition (A) reduziert sich der Pegel beider Grundmoden.

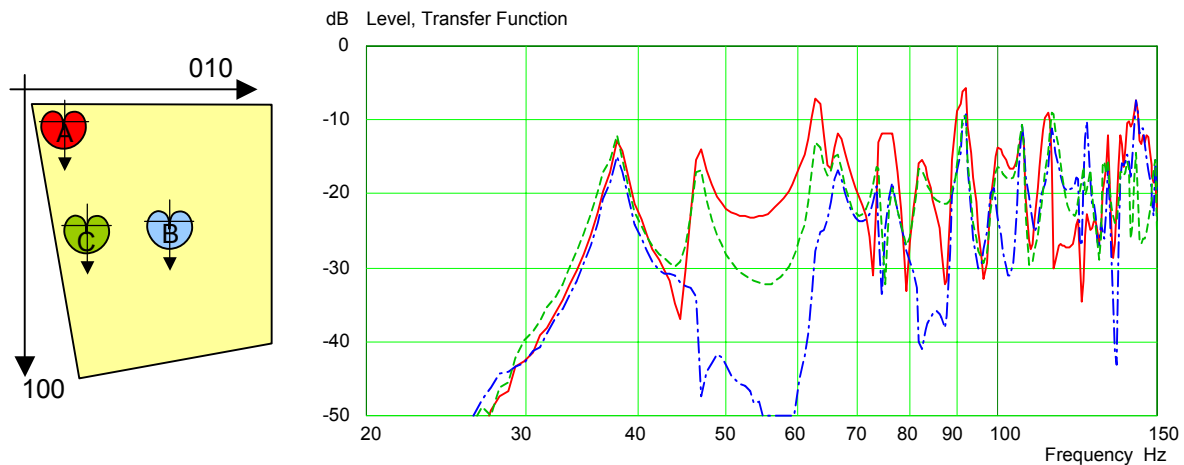


Abb. 7 Raumübertragungsfunktion des Unipols mit Orientierung in Längsrichtung an den Positionen A (— rot) B (-.- blau) und C (--- grün).

Abb. 7 zeigt das Verhalten des Unipols für Orientierung in Längsrichtung. Deutlich zu erkennen ist die nahezu positionsunabhängige Anregung der 100-Mode bei 38 Hz. Durch die Kombination von Druck- und Schnellewandler in einer Quelle wird unabhängig von der Position Energie in die Mode eingekoppelt. Ist in der Raummitte (B) maßgeblich die Schnellekomponente hierfür verantwortlich, so wird in der Raumecke (A) die Mode vorzugsweise über die Druckkomponente angeregt. Dies erklärt auch den geringen Pegelunterschied der 010-Mode (Breitenmode bei 46 Hz) zwischen der Position A und C.

Die Untersuchungen im Hallraum zeigen deutlich die gegensätzlichen Anregungsmechanismen von Monopol und Dipol auf. Vor dem Hintergrund dieser Ergebnisse überrascht es, dass die Mehrzahl der kommerziell erhältlichen Tieftonmodule, dem Prinzip nach als Monopol arbeiten, welche eine Veränderung der Modenanregung ausschließlich durch Verschieben der Quelle ermöglichen. Hingegen besitzt der Dipol eine vektorielle Anregungskomponente, die es erlaubt durch Drehen der Quelle die Übertragungseigenschaften am Hörplatz zu verändern. Am interessantesten erscheint jedoch die Fusion von Monopol und Dipol in einer physikalischen Einheit. Aufgrund seiner hybriden Wirkungsweise bringt der Unipol das größte Potential mit, auch in akustisch schwierigen Räumen eine gleichmäßige Modenanregung zu erzielen. Im Folgenden sollen daher zwei unterschiedliche Bauformen für den Unipol miteinander verglichen werden.

## Unterschiedliche Unipol Bauformen

Die „einfachste“ Bauform für einen Unipol ist die Kombination von Monopol und Dipol in einem gemeinsamen Gehäuse. Dazu wird ein Tieftöner in ein geschlossenes Gehäuse eingebaut und auf diesem ein zweiter Tieftöner in einer offenen Schallwand montiert. Das linke Bild in Abb. 8 zeigt einen solchen Unipol. In dem für Heimkinoanwendungen konzipierten Tieftonmodul bilden zwei 25cm Tieftöner in geschlossenem Gehäuse den Monopol. Ein 30cm Tieftöner in einer offenen Schallwand übernimmt die Dipolkomponente. Nachteil dieser Bauform ist das aufwendige Gehäuse, sowie der Einsatz von mindestens zwei Chassis.

Eine günstigere Alternative besteht in der Konstruktion eines "halboffenen" Gehäuses. Im einfachsten Fall wird die Rückseite eines geschlossenen Gehäuses durch einen akustischen Fließwiderstand ersetzt, dessen Aufgabe es ist die Schallabstrahlung nach hinten zu verzögern. Idealerweise sollte lediglich die Phase um einen konstanten Betrag von 160 Grad (nach [1]) gedreht werden. Praktische Versuche haben jedoch gezeigt, dass eine Reduktion der Amplitude in der Regel unvermeidbar ist. Die Firma *musikelectronic geithain* hat diesen Aufbau in ihrem Regielautsprecher RL901K [1] erfolgreich eingesetzt (Abb. 8 rechts). Unter kommerziellen Gesichtspunkten sprechen vor allem die geringeren Herstellungskosten für einen solchen Aufbau.



Abb. 8 Links: Unipol mit getrenntem Monopol (unten) und Dipol (oben) (*wvier*).  
Rechts: Vorder- und Rückansicht des Regielautsprechers RL901K (*musikelectronic geithain*). Die schmalen Streifen rechts und links des Elektronikeinschubs sind die Austrittsöffnungen der zwei Fließwiderstände. (Bilder aus [5])

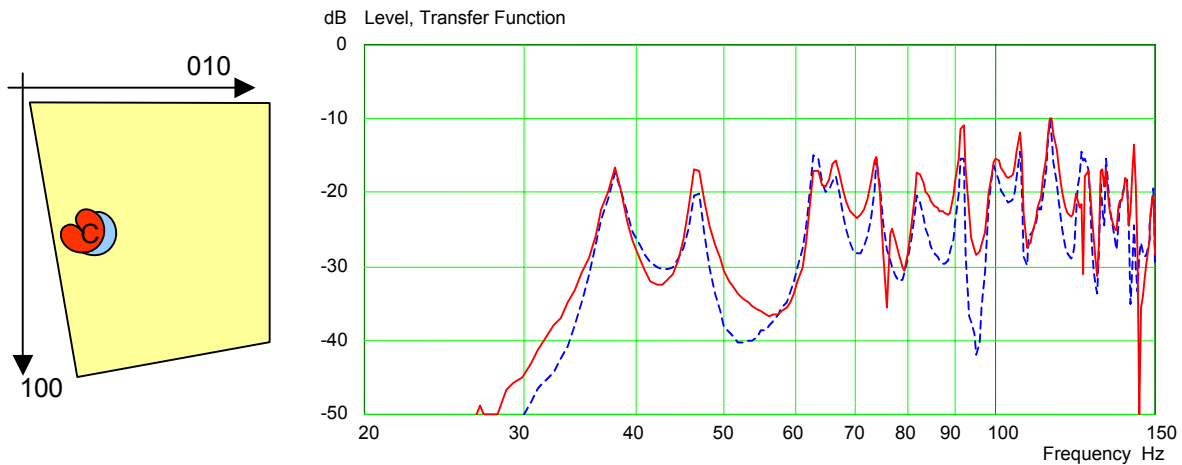


Abb. 9 Raumübertragungsfunktion des Unipols mit diagonaler Orientierung an Position C. Unipol mit Fließwiderstand (— rot) und Unipol bestehend aus Dipol + Monopol (--- blau).

Für die Messung in Abb. 9 wurde eine Testbox mit Fließwiderstand und 17cm Tieftöner angefertigt einer Monopol/Dipol-Kombination gegenüber gestellt. Der Vergleich zeigt nur geringe Differenzen zwischen beiden Bauformen, deren Ursache überwiegend auf die unterschiedlichen geometrischen Formen zurückzuführen sind und in der Praxis vernachlässigt werden können. Für den Vergleich wurden die Pegel des Mono- und Dipols so eingestellt, dass sich ein Nahfeldfrequenzgang einstellt, der dem des Unipols mit Fließwiderstand entspricht. Dieser weist eine geringere Rückwärtsdämpfung auf als die Monopol/Dipol-Kombination. Mit anderen Worten, die Druckwandlerkomponente ist stärker ausgeprägt als die Schnellewandlerkomponente. Absolut gesehen lässt sich also mit der Monopol/Dipol-Kombination eine höhere Rückwärtsdämpfung erzielen. Diese Eigenschaft birgt allerdings nur Vorteile in direkter Nähe zu reflektieren Wänden. Auslöschungen, welche durch Spiegelschallquellen bedingt sind, werden dann effizienter unterdrückt.

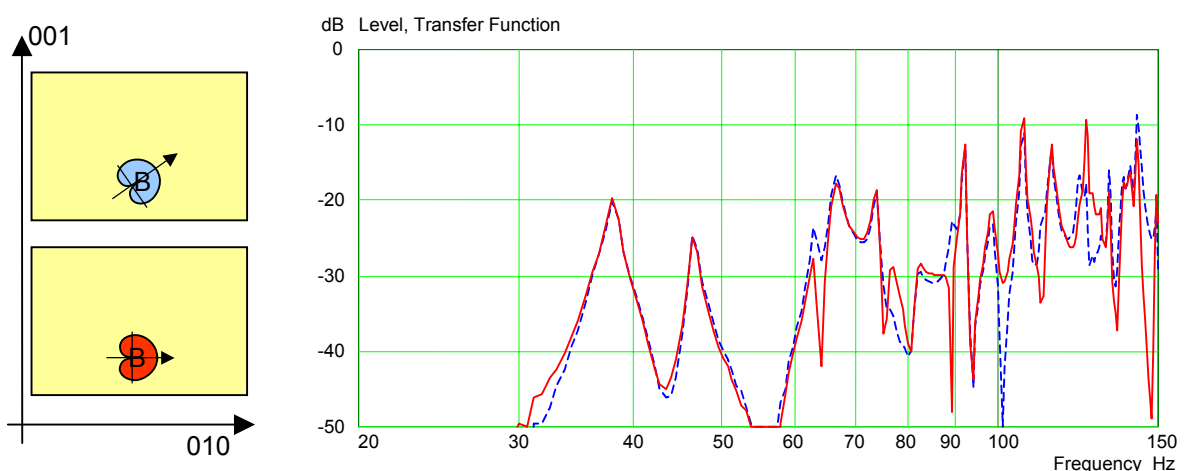


Abb. 10 Raumübertragungsfunktion des Unipols in Position B mit vertikaler Neigung der Unipolachse von  $0^\circ$  (— rot) und  $30^\circ$  (--- blau).

Bezüglich der Modenanregung ergibt sich aber, wie Abb. 9 zeigt, ein fast identisches Verhalten.

Unberücksichtigt bleibt, dass bei getrennter Ansteuerung von Monopol und Dipol, nicht nur die Pegelverhältnisse, sondern auch die Verzögerung der einzelnen Quellen unabhängig von einander variiert werden können. Damit ist es möglich die Abstrahlrichtung auch in der Vertikalen zu verändern. Da sich dieser Effekt ausschliesslich auf Moden auswirkt, die eine vertikale Komponente besitzen, ist der Einfluss in Abb. 10 eher gering ausgeprägt. Der Grund hierfür ist in der Raumhöhe von 2.60m zu suchen, die vertikale Moden höherer Ordnung in den Frequenzbereich oberhalb 100Hz verschiebt. Es ist daher davon auszugehen, dass mit zunehmender Raumhöhe der Einfluss zunimmt.

### Folgerungen für die Praxis

Aus den bisher vorgestellten Ergebnissen geht der Unipol eindeutig als die am universellsten einsetzbare Tieftonschallquelle hervor (diese Aussage bezieht sich allein auf die Art der Modenanregung). Abschliessend wurden exemplarisch die Raumübertragungsfunktionen von Monopol, Dipol und Unipol mit Fließwiderstand in einem Hörraum mittlere Größe am Hörplatz ermittelt. Damit eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleistet ist, sind alle drei Quellen an der gleichen Position im Raum platziert worden. Dipol und Unipol wiesen die gleiche Orientierung im Raum auf. Die Orientierung ist so gewählt, dass sich für den Dipol ein möglichst ausgeglichener Verlauf einstellt.

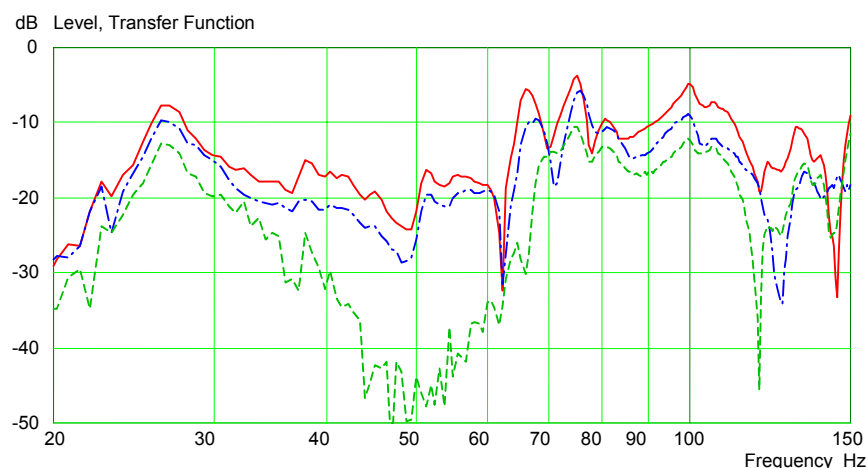


Abb. 11 Übertragungsfunktion des Unipols (— rot), Dipols (-.- blau) und Monopols (--- grün) im Hörraum gemessen am. Die Orientierung von Dipol und Unipol ist identisch.

Die Messungen in Abb. 11 bestätigen die im Hallraum gefundenen Ergebnisse. Der Monopol hat speziell zwischen 40 Hz und 70 Hz (010 und 110 Modenkomponenten) Probleme Energie in die Moden einzukoppeln. Dieses Phänomen ist typisch für monopolare Quellen und daher

in der Praxis relative häufig zu beobachten. Dagegen haben weder der Dipol noch der Unipol Probleme die Moden in diesen Frequenzbereich anzuregen. Insgesamt betrachtet, gelingt es dem Unipol am besten den Frequenzbereich zwischen 30 und 70 Hz aufzufüllen.

### **Zusammenfassung**

Es wurde die Modenanregung der drei Tieftonquellen Monopol, Dipol und Unipol untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass die gerichtete Abstrahlung tiefer Frequenzen die Platzierung der Quelle im Raum vereinfacht und die Ausgeglichenheit der Raumübertragungsfunktion verbessert. Der Unipol kann dabei klare Vorteil gegenüber Monopol und Dipol aufweisen, weil er Druckwandler und Schnellewandler in sich vereint. Dadurch ist es möglich eine ausgewogene Anregung aller Raummoden an unterschiedlichsten Positionen im Raum zu erzielen. Die Bauform des Unipols hat dabei weniger Einfluss auf das Resultat als zunächst vermutet. Viel wichtiger ist, dass die Tieftonquelle Raummoden sowohl durch Druck- als auch durch Schnellekomponenten anzuregen vermag.

### **Literatur**

- [1] Gyn Adams, John Borwick, „*Loudspeaker and Headphone Handbook*“, Focal Press 3rd Edition 2001, pp. 353-359.
- [2] Charalampos Ferekidis & Uwe Kempe, „*Room mode excitation of monopolar and dipolar low frequency sources*“, Preprint no. 4193, 100th AES Convention, Kopenhagen 1996.
- [3] Charalampos Ferekidis & Uwe Kempe, „*Über den Einfluß der Richtcharakteristik tieffrequenter Schallquellen auf die Anregung der Moden kleiner Räume*“, 20. Tonmeistertagung, Karlsruhe 1998.
- [4] Siegfried Linkwitz, „*Investigation of Sound Quality Differences between Monopolar and Dipolar Woofers in Small Rooms*“, Preprint no. 4786, 105th AES Convention, New York 1998.
- [5] Jochen Kiesler, Interview von Dieter Thomsen, Produktion Partner 5/2002