

Offene Schallwände für Dipole

Wie sie funktionieren – wie man sie richtig nutzt

Version 08.11.2013

Inhalt:

0. Vorwort	3
1. Der Dipol als Punktschallquelle	
1.1 Beide Punktschallquellen auf Hörachse	4
1.2 Beide Punktschallquellen unter Winkeln zur Hörachse	5
2. Punktquellen auf Schallwänden	
2.1 Lautsprecher auf runder Schallwand	6
2.2 Lautsprecher auf quadratischer Schallwand	7
2.3 Lautsprecher auf rechteckiger Schallwand	7
2.4 Lautsprecher versetzt auf der Schallwand	8
3. Flächige Quellen auf Schallwänden	
3.1 Dipol-Membranen ohne Schallwand	10
3.2 Dipol-Membranen auf Schallwänden	11
3.3 Offene Schallwände optimieren	13
3.4 Dipole mit konstanter Richtwirkung	14
4. Simulation und Wirklichkeit	
4.1 Gemessen – von viel Schallwand zu wenig Schallwand	15
4.2 Wer simuliert wie genau?	16
5. Der praktische Einsatz	
5.1 Dipol-Hochtöner im Vergleich	18
5.2 Meine Dipole – Dipol 30	21
5.3 Meine Dipole – Swinger Club	25
5.4 H-Dipole	28
6. Dipol und Raum	
6.1 Aufstellung	30
6.2 Reflexionen	31
7. Frequenzgangkorrektur	
7.1 Der Korrekturbereich	33
7.2 Die Korrekturmaßnahmen	33
8. Meine Dipol-Geschichte	35

0 Vorwort

Es gibt nur EINEN Grund, Dipol-Lautsprecher haben zu wollen.

Wer sich Dipol-Lautsprecher baut, führt dafür viele Argumente an: kein Boxenklang, weniger Raummoden, klare Bässe, mehr Transparenz. Das ist alles gut und schön, aber der entscheidende Faktor für die besondere Wirkung eines solchen Lautsprechers im Raum ist die Schalldruckverteilung in Form einer Dipol-8:

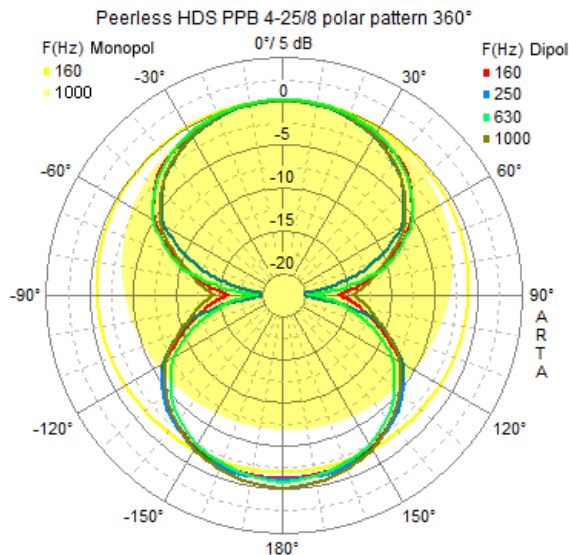


Abb.0.1 Die Dipol-8: Bei gleichem Direktschall insgesamt weniger Indirektschall als übliche Monopol-Lautsprecher

Verglichen wird die horizontale Schalldruckverteilung eines 12 cm-Tief-Mittelton-Lautsprechers – ohne Schallwand oder Gehäuse – mit dem Mittelton einer schmalen 3-Weg-Box. Für den Dipol ergibt sich bis 1 kHz eine sehr einheitliche Verteilung.

Bis 1 kHz zeigt auch die Box eine einheitliche horizontale Schalldruckverteilung in Kreisform. Bei gleichem Schalldruck auf Achse entspricht das bei 160 Hz der Fläche im gelben Kreisring. Vergleicht man diese mit der Fläche, die die Dipol-8 an ihrer maximalen Ausdehnung umschreibt, dann hat die Dipol-8 nur 70 % der Kreisfläche.

Bei 1000 Hz strahlt die Box weniger nach hinten ab – siehe beige Fläche. Das Verhältnis Direkt-/Indirektschall verbessert sich für den Monopol – ist aber immer noch schlechter als beim Dipol.

Ein konstanter Vorteil des Dipols bleibt der wesentlich reduzierte Schalldruck zur Seite (und natürlich auch nach oben und unten). Er hilft maßgeblich, schädliche erste Reflexionen an den Seitenwänden, an Boden und Decke zu reduzieren.

Wie man diese Dipol-8 erzeugen und über einen möglichst großen Frequenzbereich in möglichst gleichmäßiger Form erhalten kann, ist das zentrale Thema dieser Abhandlung.

Vieles, was auf den folgenden Seiten dargestellt wird, ist simuliert.

Und zwar mit Absicht: Damit der Blick aufs Wesentliche nicht durch die individuellen Eigenschaften von Lautsprecherchassis oder Räumen beeinträchtigt wird. Denn es geht nicht um das Verhalten bestimmter Lautsprecher in bestimmten Räumen, sondern nur um das Verhalten von Schallwänden.

Deshalb gehen alle Betrachtungen zuerst von idealen Punktquellen und später von ideal kolbenförmig schwingenden Membranen aus. Und deren Frequenzgang wird als linear von Null bis Unendlich angenommen.

Trotzdem erweist sich die Schallwand allein bereits als hochgradig klangverfälschendes Element – wenn sie nicht richtig eingesetzt wird.

Das meiste, was auf den folgenden Seiten dargestellt wird, entspricht der Realität – aber es gibt Grenzen.

Dort, wo es gelingt, die Einflüsse des Raums auszuschalten und die verwendeten Chassis sich beinahe ideal verhalten, haben sich Simulationsprogramme wie Edge (www.tolvan.com) und Boxsim (www.boxsim.de) als brauchbar erwiesen. Allerdings simulieren diese Programme die Schallbeugung an den Schallwandkanten nur in 1. Näherung. Außerdem berücksichtigen sie weder, dass Lautsprechermembranen bei hohen Frequenzen nicht mehr ideal kolbenförmig schwingen, noch den komplexen Aufbau eines Konuslautsprechers auf seiner Rückseite. Deshalb können sich Simulation und Wirklichkeit am Ende deutlich voneinander unterscheiden. Das wird im Weiteren mehrfach dokumentiert.

Alle im Folgenden präsentierten Frequenzgang-Messungen sind **nicht** kalibriert. Schalldruckwerte sind deshalb immer nur relativ. Gemessen wurde im Allgemeinen mit gehobener Zimmerlautstärke.

Alles, was auf den folgenden Seiten dargestellt wird, ist nicht neu.

Es basiert vor allem auf den dipolbezogenen Arbeiten von Kreskovsky in www.musicanddesign.com/tech.html sowie Linkwitz in www.linkwitzlab.com/models.htm.

Die Arbeiten zeigen, dass allein die Schallwand für bis zu 10 dB breite Schwankungen des Frequenzgangs verantwortlich sein kann. Dabei ist der Dipolabfall von 6 dB/Oktave am unteren Ende des Übertragungsbereichs noch gar nicht berücksichtigt.

Wie diese Schwankungen entstehen, wie man sie kontrolliert und eine gleichmäßige Dipol-8 über weite Frequenzbereiche erhält, wird im Folgenden ausführlich dargestellt.

1 Der Dipol als Punktschallquelle

In seiner abstraktesten Form besteht ein Dipollautsprecher aus zwei Punktquellen (hier Rot und Grün), die den Schall gleichmäßig in alle Richtungen, aber mit entgegengesetzter Polarität abstrahlen. Das heißt: Während die eine Quelle ein Druckmaximum erzeugt, erzeugt die andere ein Maximum an Unterdruck – und umgekehrt. Bei der Betrachtung von akustischen Schwingungen (Tönen) als Wellen spricht man auch von 180° Phasendifferenz zwischen beiden Punktquellen.

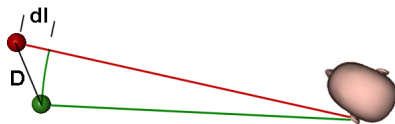


Abb. 1.1

Zur Charakterisierung der Eigenschaften eines Dipols verwendet man gern die Dipollänge D , also den direkten Abstand zwischen beiden Punktquellen auf der sogenannten Dipolachse. Für den Höreindruck maßgebend ist aber die Differenzlänge dl , also der Unterschied in den Weglängen von Punktquelle Rot zum Ohr einerseits und Punktquelle Grün zum Ohr andererseits.

1.1 Beide Punktschallquellen auf Hörachse

Das Verhalten des Dipols wird am einfachsten verständlich, wenn der Dipol genau auf den Hörer ausgerichtet ist. Dipolachse und Hörachse fallen dann zusammen und es gilt $D=dl$. Für diesen Fall betrachten wir vier unterschiedliche Wellenlängen λ :

a) Wellenlänge λ viel größer als D ($D/\lambda \ll 0,5$)

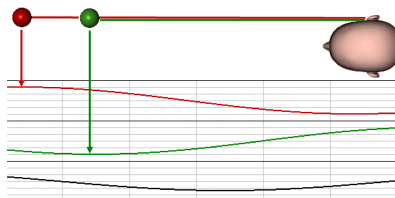


Abb. 1.2

Während sich die rote Quelle im Druckmaximum befindet, ist die grüne im Druckminimum (= Unterdruckmaximum). Die Überlagerung von Rot und Grün ergibt die schwarze Welle, die am Ohr ankommt. Ihr Schalldruckpegel ist wesentlich kleiner als der Einzelpegel der erzeugenden Wellen.

b) Wellenlänge λ gleich $2 \times D$ ($D/\lambda = 0,5$)

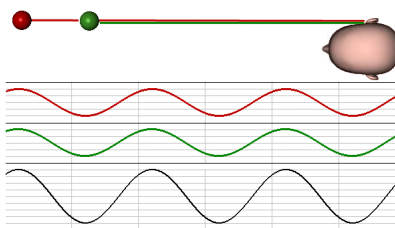


Abb. 1.3

Auch hier befindet sich die rote Quelle im Druckmaximum, während die grüne im Druckminimum ist. Beide Wellen laufen

gleichphasig. Die Überlagerung von Rot und Grün ergibt die schwarze Welle, die am Ohr ankommt. Ihr Schalldruckpegel ist doppelt so hoch wie die Einzelpegel der erzeugenden Wellen.

c) Wellenlänge λ gleich D ($D/\lambda = 1$)

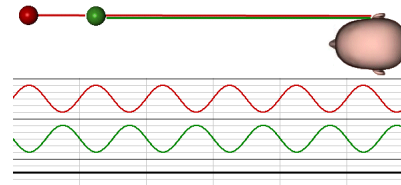


Abb. 1.4

Wenn die Wellenlänge gleich der Dipoldistanz ist, heben sich die Schallanteile beider Punktquellen am Ohr vollständig auf.

d) Wellenlänge λ gleich $D/2$ ($D/\lambda = 2$)

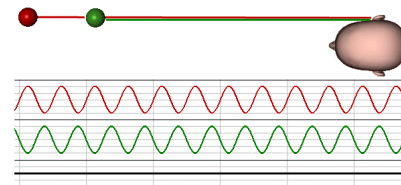


Abb. 1.5

Auch wenn zwei Wellenlängen in die Dipoldistanz passen, heben sich die Schallanteile beider Punktquellen am Ohr vollständig auf.

Betrachtet man den Schalldruckverlauf dieses Dipols über einen weiten Frequenzbereich, ergibt sich folgendes Bild:

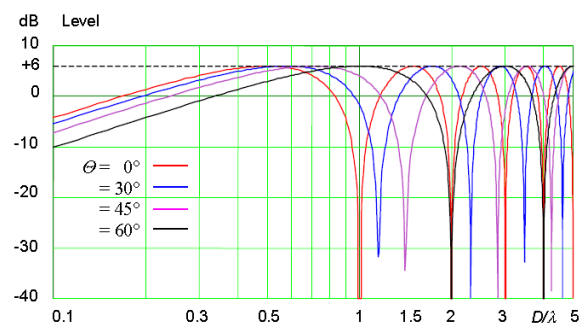


Abb. 1.6 nach Ferekidis

Die rote Linie gilt für den gerade gezeigten Fall der Punktquellen auf der Hörachse.

Bekannter ist die Darstellung des Pegels über der Frequenz. Hier für $D = 34 \text{ cm}$:

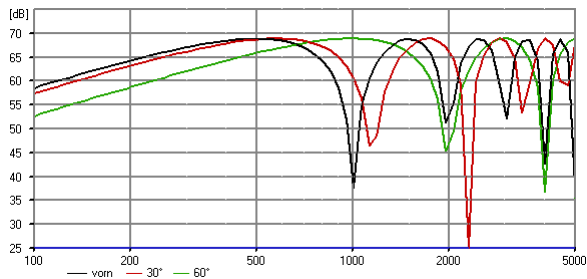


Abb. 1.7

Allgemein gilt:

Schalldruckspitzen entstehen für alle Frequenzen, deren Wellenlänge ein ungerades Vielfaches von $D/2$ ist: $1/2 D$, $3/2 D$, $5/2 D$ usw. ...

Schalldrucksenken entstehen für alle Frequenzen, deren Wellenlänge ein gerades Vielfaches von $D/2$ ist: $1 D$, $2 D$, $3 D$ usw. ...

1.2 Beide Punktschallquellen unter Winkeln zur Hörachse

In Abb. 1.6 und 1.7 sieht man, dass sich nur unterhalb von $D/\lambda = 0,5$ die Verhältnisse auf Achse und seitlich davon weitgehend ähneln. Unter einem Winkel von z. B. 60° ist nicht mehr $dl = D$, sondern $dl = D/2$ (wegen $\cos 60^\circ = 0,5$). Das erklärt, weshalb ein Dipol unter 60° genau dort seine erste Schalldruckspitze hat, wo auf Achse die erste Schalldrucksenke ist:

Für $D/\lambda = 1$ addieren sich die Schalldruckpegel beider Punktschallquellen unter 60° zur schwarzen Linie mit doppelter Höhe:

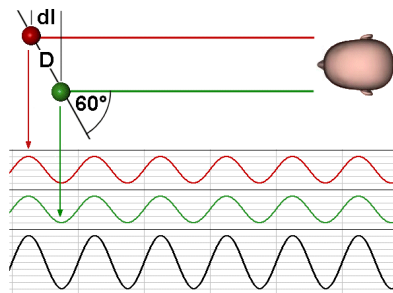


Abb. 1.8

Für $D/\lambda = 2$ heben sich die Schalldruckpegel beider Punktschallquellen unter 60° gegenseitig auf:

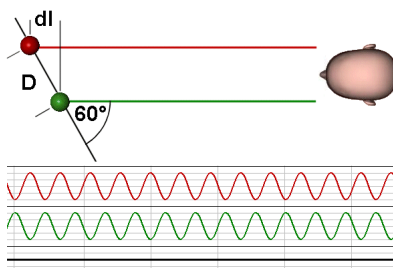


Abb. 1.9

Diese erste Schalldrucksenke unter 60° fällt mit der zweiten Schalldrucksenke auf Achse zusammen. Vergleiche Abb. 1.5 und 1.6.

Unter 90° ist die Dipollänge immer noch D , aber der Weg von beiden Punktquellen zum Ohr ist gleich lang – also $dl = 0$. Damit löschen sich die (gegenphasigen) Schallanteile beider Quellen immer aus – unabhängig von der Frequenz. So entsteht die Einschnürung des Schalldrucks senkrecht zur Dipolachse – Ursache der Dipol-8:

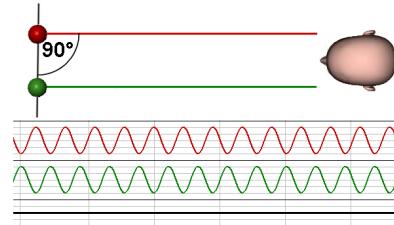


Abb. 1.10

Nicht nur der Frequenzverlauf solcher Punktschallquellen-Dipole ist sehr unruhig. Auch die horizontale Verteilung des Schalls im Raum (das Polardiagramm) ist „gewöhnungsbedürftig“:

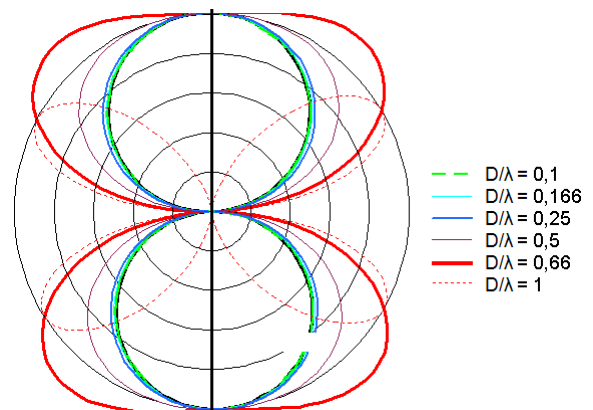


Abb. 1.11 nach Kreskovsky

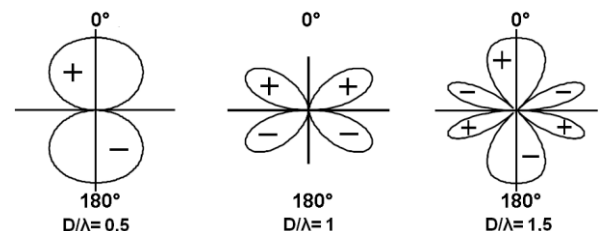


Abb. 1.12 nach Ferekidis

Nur bis zur ersten Schalldruckspitze auf Achse ($D/\lambda = 0,5$) strahlt der Punktschallquellen-Dipol ausschließlich in Acht-Form. Zu höheren Frequenzen bilden sich Mehrfachkeulen in verschiedenen Anordnungen. Gleichbleibend und unabhängig von der Frequenz sind nur die Symmetrie nach vorn und hinten sowie die Einschnürung senkrecht zur Dipolachse.

Zum Glück gibt es Wege, den Frequenzverlauf von Dipolen gleichmäßiger zu gestalten. Diese werden in den folgenden Kapiteln 2 und 3 behandelt.

Am exaktesten arbeiten Dipole allerdings, wenn ihre Richtwirkung über den gesamten Einsatzbereich konstant bleibt, also von der Frequenz unabhängig ist. Diese Arbeitsweise ist nur unterhalb der ersten Dipolspitze gegeben. Sie wird in Kapitel 4 ausführlich erläutert.

2 Punktquellen auf Schallwänden

Dipole in Form von Punktschallquellen benötigen nicht nur zwei getrennte Schallquellen. Sie zeigen auch einen sehr unruhigen Frequenzgang und brauchen einen großen Abstand der Punktquellen auf der Hörachse, um tiefe Frequenzen wiederzugeben.

Linkwitz (www.linkwitzlab.com/models.htm#B) zeigt detailliert, wie man die zwei Schallquellen eines Dipols durch die Membranvorderseite und -rückseite eines kleinen dynamischen Lautsprechers ersetzen kann und wie die Dipollänge D zum Radius einer kreisrunden Schallwand wird, in deren Mitte sich der Lautsprecher befindet:

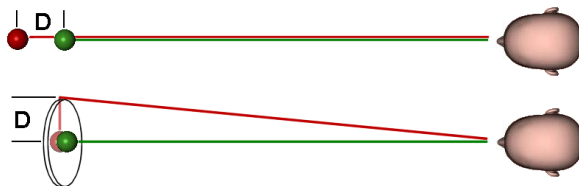


Abb. 2.1

Man kann sich demnach einen (kleinen) Lautsprecher auf einer großen runden Schallwand als Punktquelle mit positiver Polarität im Zentrum vorstellen, die von einem Ringradiator mit negativer Polarität umgeben ist:

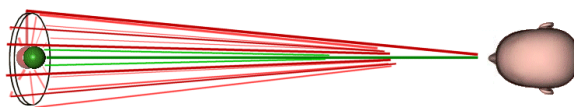


Abb. 2.2

Die rote Punktquelle auf der Rückseite der Schallwand gibt Schall (unter anderem) parallel zur Scheibe ab. Ein Teil dieses Schalls wird um die hintere Kante der Scheibe nach vorn gebeugt (1. Diffraction). Von diesem Schall wird wiederum ein Teil an der Vorderkante der Scheibe nach innen (zur vorderen Schallquelle) gebeugt (2. Diffraction). Entsprechendes gilt in Gegenrichtung für den Schall von der grünen Punktquelle:

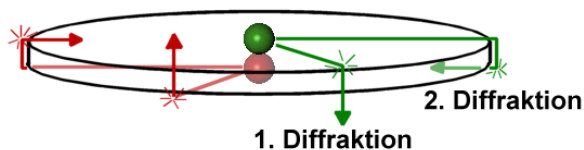


Abb. 2.3

Man kann sich vorstellen, wie der Restschall der 2. Diffraction an der gegenüberliegenden Schallwandkante noch mal gebeugt wird (3. Diffraction) usw.

Simulationsprogramme wie Edge und Boxsim berücksichtigen nur die 1. Diffraction. Das Ergebnis entspricht dem 2-Punktschallquellen-Modell von Kap. 1. Der damit errechnete Schalldruckverlauf unterscheidet sich aber erheblich von dem mit mehreren Diffractionsstufen errechneten Verlauf. Mellow und Kärkkäinen haben den Unterschied so dargestellt:

http://www.mellowacoustics.com/articles/Dipole_speaker_with_balanced_directivity.pdf

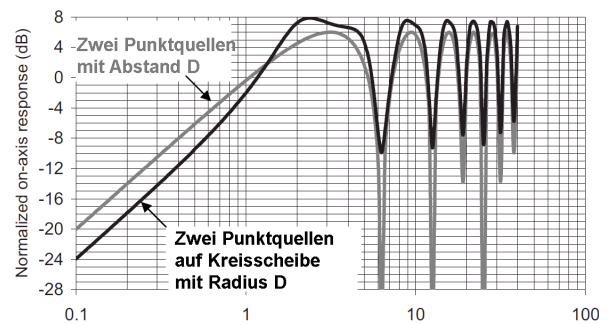


Abb. 2.4 nach Mellow und Kärkkäinen

Gemessene Schalldruckverläufe sind der schwarzen Linie bereits sehr ähnlich. Alle weiteren Simulationen in Kap. 2 (sofern nicht anders erwähnt) wurden mit Edge erstellt und basieren auf der grauen Linie.

2.1 Lautsprecher auf runder Schallwand

Wir fahren fort mit dem Ringradiator von Abb. 2.2, auf den sich die gesamte Energie verteilt, die von der rückseitigen Punktquelle in die Richtung des Hörers abgegeben wird. Dieser Dipol hat weiterhin eine klar definierte Dipollänge D . Aber die Differenzlänge dl ist nicht nur vom Winkel zur Dipolachse abhängig – im Gegensatz zum 2-Punktschallquellen-Modell variiert dl abseits der Dipolachse auch entlang des Umfangs der Schallwand:

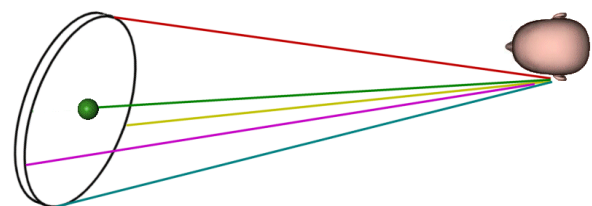


Abb. 2.5

Wie ändert sich der Frequenzgang, wenn sich die Größe der Schallwand oder der Hörwinkel zur Dipolachse ändern?

Mit Verdoppelung von D halbiert sich auf der Dipolachse die Frequenz der Schalldruckspitzen und -senken. Im Tieftonbereich nimmt mit jeder Verdoppelung von D der Schalldruck um 6 dB zu:

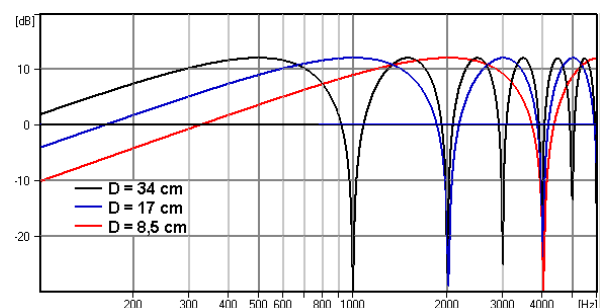


Abb. 2.6

Abseits der Dipolachse wird schnell der Einfluss der variablen Differenzlänge dl im Vergleich zur Dipollänge deutlich:

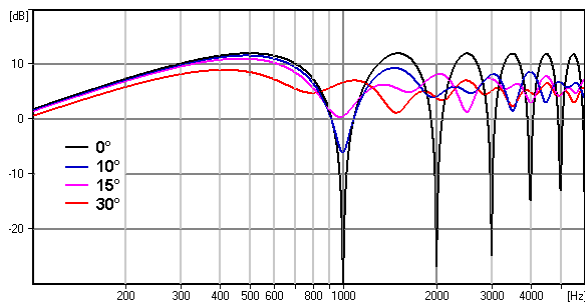


Abb. 2.7

Die Frequenzgänge unter 15° und 30° ähneln sich untereinander deutlich mehr als sie jeweils dem Frequenzgang bei 0° ähneln. Es ist klar zu sehen, dass nur eine Frequenzgangkorrektur des gleichmäßigen Dipolanstiegs unter $D/\lambda = 0,5$ und der ersten Dipolspitze sinnvoll sind. Allenfalls kommt noch eine Korrektur der ersten Dipolsenke in Frage. Alle anderen Korrekturen – insbesondere des 0°-Frequenzgangs – führen nur zur Verschlechterung anderer Frequenzgänge.

2.2 Lautsprecher auf quadratischer Schallwand

Quadratische Schallwände sind leichter herzustellen als kreisförmige. Allerdings ändert sich entlang ihrem Umfang nicht nur d_l , sondern auch die Dipollänge D :

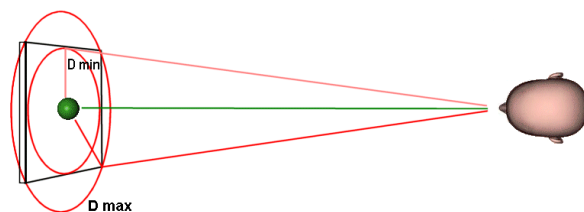


Abb. 2.8

Eine quadratische Schallwand hat die gleiche Dipollänge wie eine kreisförmige Schallwand mit gleichem Flächeninhalt. Streng genommen gilt das aber nur für die erste Dipolspitze und die erste Dipolsenke.

Aufgrund der variierenden Dipollänge sind bereits auf Achse die Dipolspitzen und -senken weniger ausgeprägt als bei der runden Schallwand:

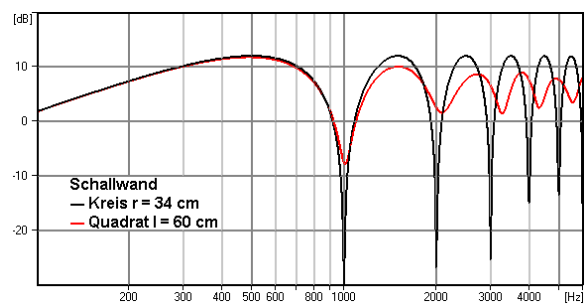


Abb. 2.9

Im Vergleich zu Abb. 2.7 ist auch der Frequenzverlauf seitlich der Dipolachse noch „geradliniger“ geworden:

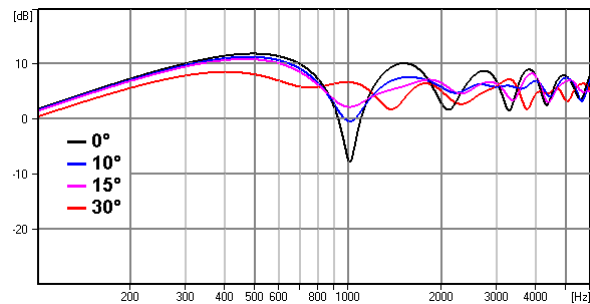


Abb. 2.10

Auch hier ist deutlich zu erkennen, dass eine Korrektur des 0°-Frequenzgangs – wenn überhaupt – nur sehr vorsichtig erfolgen sollte.

Der 0°-Frequenzgang der quadratischen Schallwand mit $l = 60$ cm, in LEAP mit 3 Diffraktionsstufen simuliert, zeigt die von Mellow und Kärkkäinen berechneten Unterschiede:

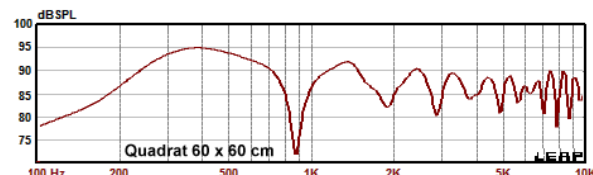


Abb. 2.11 LEAP Simulation für quadratische Schallwand

Interessant sind die dazu gehörenden Polardiagramme. Bis 640 Hz gibt es den gewünschten 8-förmigen Verlauf:

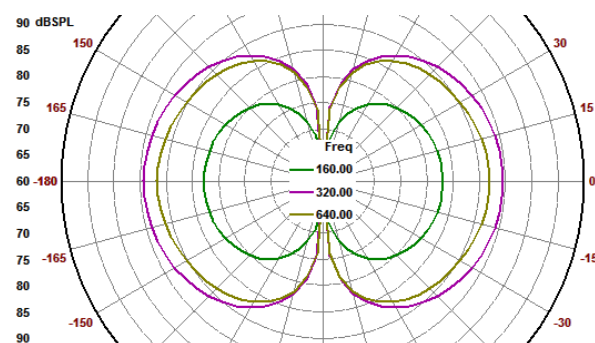


Abb. 2.12 LEAP Simulation

Oberhalb der Dipolsenke strahlt die Punktquelle im Durchschnitt fast kreisförmig – vom gleichmäßigen Abfall des Schalldrucks zu den Seiten ist kaum noch etwas zu sehen:

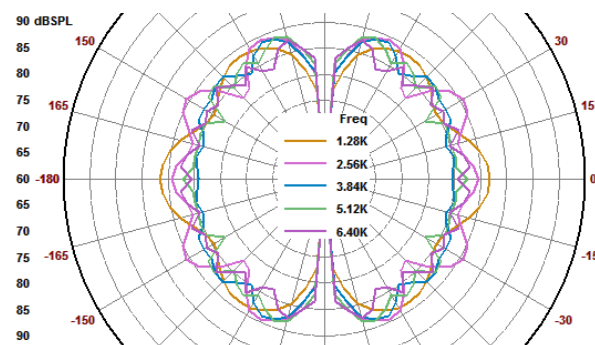


Abb. 2.13 LEAP Simulation

2.3 Lautsprecher auf rechteckiger Schallwand

Bis hierhin waren alle „Versuchsanordnungen“ weitgehend rotationssymmetrisch – die Frequenzgänge waren nach links, rechts, oben und unten gleich. Schon aus praktischen Gründen stellt sich die Frage: Was passiert, wenn man die quadratische Schallwand mit Punktquelle in der Mitte um ein gleich großes Quadrat nach unten verlängert?

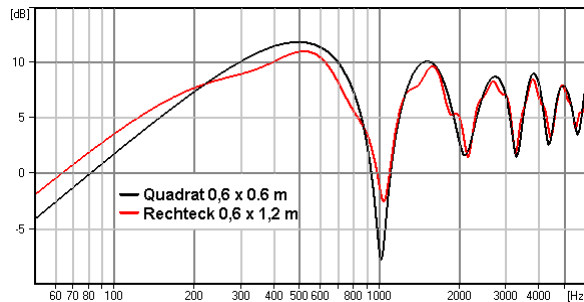


Abb. 2.14

Auf Achse der Punktquelle ergeben sich leichte Unregelmäßigkeiten im Frequenzgang und ein deutlicher Gewinn an Schalldruck bei tiefen Frequenzen. Für Frequenzen oberhalb der ersten Dipolsenke wirkt sich die Verlängerung der Schallwand nach unten offensichtlich kaum aus.

Oberhalb der ersten Dipolsenke ist der Frequenzverlauf außerhalb der Dipolachse zwar etwas unruhiger als bei der quadratischen Schallwand, aber alle Spitzen und Senken sind weiterhin am gleichen Platz:

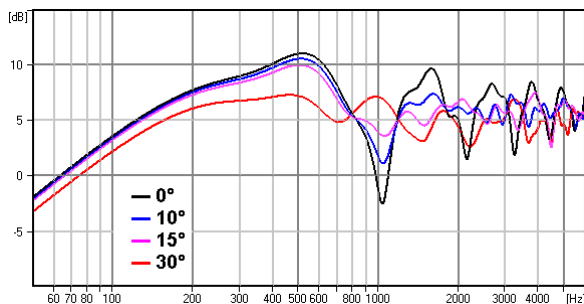


Abb. 2.15

Unterhalb der ersten Dipolsenke lässt die bisher sehr große Ähnlichkeit zwischen dem Frequenzgang auf Achse und denen außerhalb der Achse leicht nach.

2.4 Lautsprecher versetzt auf der Schallwand

Genau genommen zeigt bereits Kap 2.3 den – vertikalen – Versatz einer Punktschallquelle aus der Symmetrie – dieser wird aber von den ausschließlich horizontalen Messungen nicht berücksichtigt. Wie wirkt sich dann ein horizontaler Versatz auf einer Schallwand aus?

a) Versatz auf runder Schallwand

Auf einer runden Schallwand mit 34 cm Radius wird die Punktschallquelle vom Zentrum aus um ein Viertel und die Hälfte des Radius nach links versetzt:

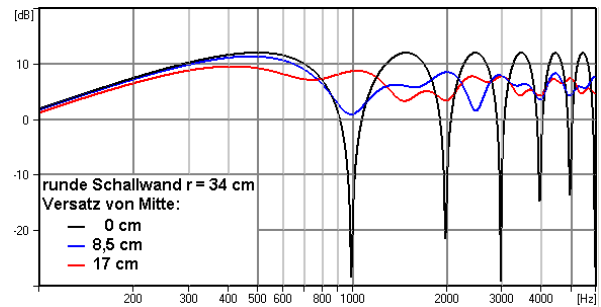


Abb. 2.16

Durch ein deutliches Verschieben aus dem Zentrum variiert die Dipollänge D entlang des Umfangs der Schallwand so stark, dass die typischen Dipolspitzen und -senken kaum noch zu erkennen sind.

Mit dem Verschieben aus dem Zentrum ändert sich auch der Frequenzverlauf zu den Seiten. Er unterscheidet sich deutlich links und rechts der Dipolachse:

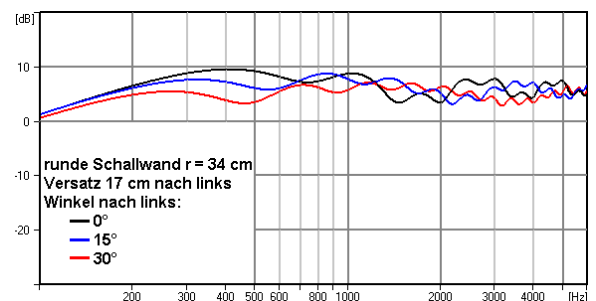


Abb. 2.17

Nach links – also auf der Seite mit dem „kurzen Weg“ von der Punktquelle zum Schallwandrand – wirkt der Frequenzgang für einen Dipol sehr ausgewogen – speziell auf 15°. Nach rechts – auf dem „langen Weg“ – sind die Unterschiede sowohl nach Frequenz als auch nach Winkel größer:

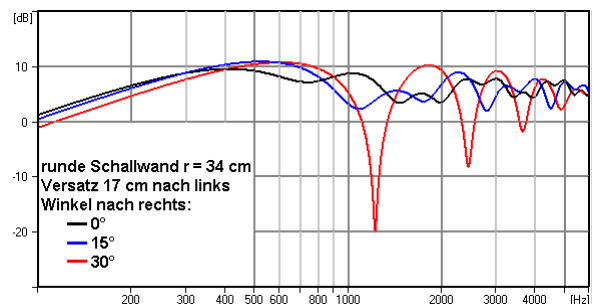


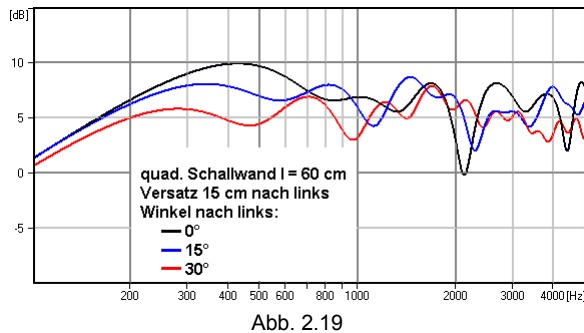
Abb. 2.18

Am Beispiel des 30°-Frequenzgangs ist gut zu sehen, dass man bei der Wahl des Abstands der Schallquelle vom Schallwandmittelpunkt tunlichst geradzahlige Teiler des Radius wie $\frac{1}{2}$ und $\frac{1}{4}$ vermeiden sollte. Es können sonst geradzahlige Verhältnisse von D zu d_l entstehen, die zu den ausgeprägten Dipolspitzen und -senken wie in Abb. 2.18 führen.

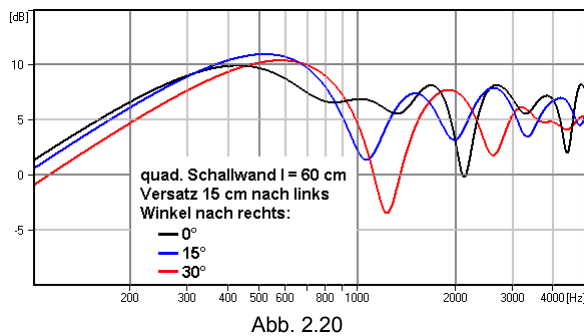
Anzumerken bleibt noch, dass zwischen 200 und 600 Hz der Schalldruck zur „kürzeren“ Seite deutlich stärker winkelabhängig abfällt als zur längeren Seite. Die Dipol-8 knickt gewissermaßen zur „längeren“ Seite der Schallwand ein.

b) Versatz auf quadratischer Schallwand

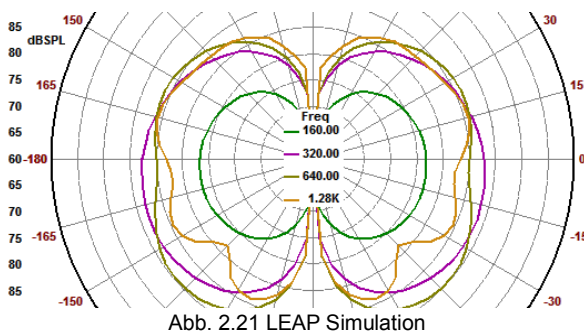
Das seitliche Verschieben der Schallquelle um 15 cm von der Mitte einer quadratischen Schallwand führt zu einem weniger ausgewogenen Ergebnis als auf der runden Schallwand:



Auch hier wieder das Einknicken zur längeren Seite von 200-600 Hz. Genau anderes herum bei 1200 Hz – allerdings nur über einen kleinen Bereich. Bei 2200 Hz (bei $D/\lambda = 2$) spaltet sich die Acht zur Doppelkeule.



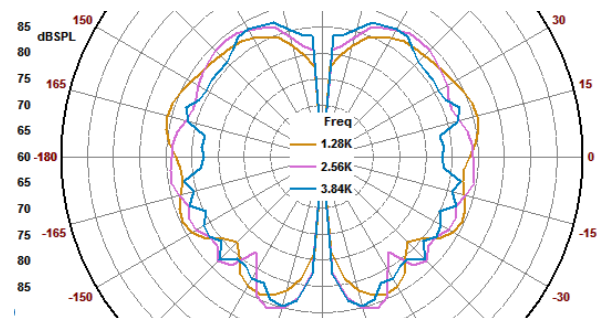
LEAP visualisiert im Polardiagramm sehr schön, wie sich bei versetzter Schallquelle die Dipol-8 verzieht:



Ganz deutlich erkennt man, wie sich an der „guten“ kurzen Seite (oben) eine gleichmäßige Richtcharakteristik bildet. Im Gegensatz dazu wird es an der langen Seite (unten) sehr unruhig. Mit steigender Frequenz „wabert“ dort die Dipol-8. Sie beugt sich je nach Frequenz ein und aus oder bildet seitliche Keulen. Siehe auch Abb. 1.12.

Dieser Effekt ist oberhalb von $D/\lambda = 1$ unvermeidlich. Jede Korrektur der Schallwandform oder der Lage der Punktquelle auf der Schallwand kann zwar den Frequenzgang für eine Frequenz und einen Winkel beheben, verstärkt aber mit Sicherheit Unregelmäßigkeiten bei anderen Frequenzen und Winkeln.

Wie schon in Abb. 2.13 bei der mittig platzierten Schallquelle zu sehen, geht auch bei der versetzten Schallquelle die dipol-typisch markante seitliche Einschnürung mit weiter steigender Frequenz fast verloren:



3 Flächige Quellen auf Schallwänden

Alle vorhergehenden Betrachtungen wurden mit Punktschallquellen durchgeführt, um das pure Verhalten der Schallwand zu diskutieren. Reale Lautsprecher haben aber Membranen von konkreter Größe. Wie sich deren Abmessungen allein und im Zusammenspiel mit der Schallwandgröße verhalten, wird im Folgenden diskutiert. Vorausgesetzt wird dabei, dass sich die Membran vollkommen steif verhält (kolbenförmig), und dass der Frequenzgang zur Rückseite der Membran der gleiche ist wie der an der Vorderseite.

3.1 Dipol-Membranen ohne Schallwand

Wir nähern uns der flächigen Membran, indem wir rund um das Zentrum der runden Schallwand immer mehr Punktquellen platzieren. Dazu verwenden wir eine Schallwand mit 34 cm Radius entsprechend Abb. 2.6 und 2.7. Die Dipollänge D bleibt so für jede Membrangröße definiert. Für jede einzelne Punktquelle ergibt sich aber eine zusätzliche Differenzlänge d_l , die zwischen „0“ und dem Membrandurchmesser jeden Wert annehmen kann. Diese verschiedenen Differenzlängen sorgen dafür, dass schon in der Dipolachse die scharfen Dipolspitzen und -senken ausgeglichen werden:

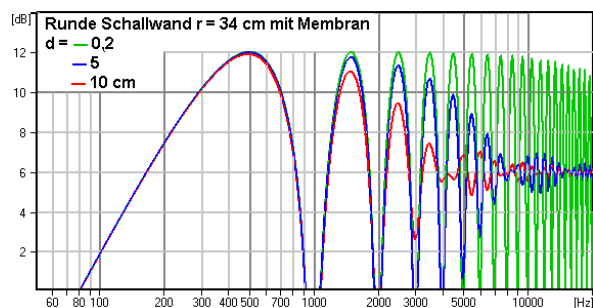


Abb. 3.1

Man sieht sofort, wie sich bereits bei kleinen Membranen das Verhalten im Hochton dramatisch gegenüber der einzelnen Punktquelle verbessert. Dieser Trend setzt sich mit steigender Membrangröße zu niedrigeren Frequenzen fort:

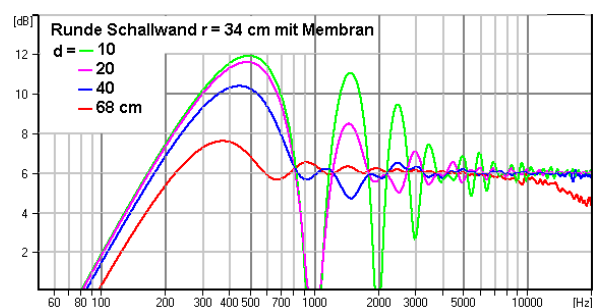


Abb. 3.2

Wenn die Membran die Größe der Schallwand erreicht hat, bleiben allein der Dipolanstieg und die erste Dipolspitze übrig. Bereits die erste Dipolspitze ist nur noch eine kleine Vertiefung.

Wie in Kap. 2 lohnt es sich auch hier, den Unterschied zwischen Edge und einer genaueren Simulation – vor allem der ersten Dipolspitze – zu sehen. Auch das haben Mellow und Kärkkäinen in der angegebenen Quelle berechnet:

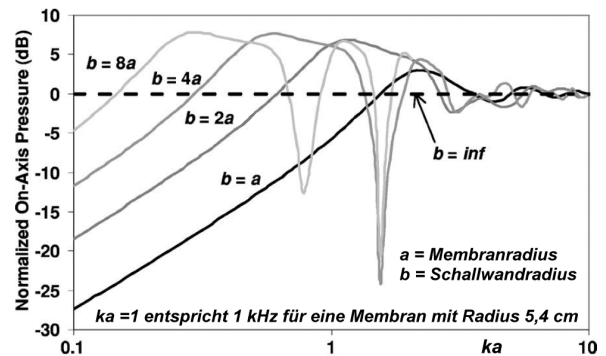


Abb. 3.3 nach Mellow und Kärkkäinen

Der Schallwandradius wird vom ein- bis zum achtfachen des Membranradius verändert. Der Fall „ $b=8a$ “ entspricht von den Dimensionen grob der blauen 5 cm-Kurve in Abb. 3.1.

Wie weit diese genauere Simulation (rot) an reale Messungen (grün) herankommt, zeigen ein paar Beispiele:

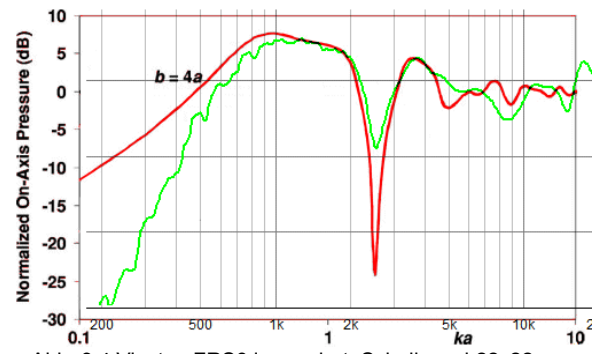


Abb. 3.4 Visaton FRS8 in quadrat. Schallwand 22x22 cm

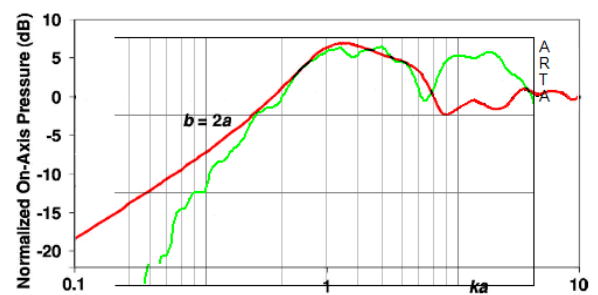


Abb. 3.5 BG Neo3 PDR ohne Schallwand

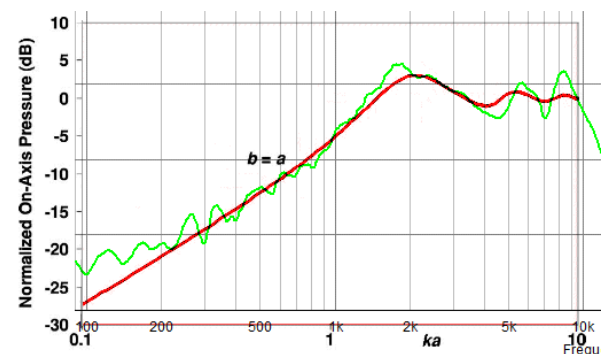


Abb. 3.6 Visaton WS 13 E ohne Schallwand

Die in Abb. 3.4-3.6 gegebenen Radiusrelationen passen nur ungefähr zu den praktischen Beispielen ($b=a$ ist technisch gar nicht herstellbar). Bei 3.4 und 3.5 begrenzen Hochpassfilter die Messungen nach unten.

Dipol und Bündelung

Wie in Kap. 1 dargestellt, entsteht die charakteristische 8-Form des Dipols durch die Auslöschung von Schallwellen, die zu den Seiten immer gegenphasiger werden. Abhängig von der Frequenz kann die Dipol-8 zwar leicht ihre Form ändern, aber der grundsätzliche Charakter der seitlichen Einschnürung bleibt unabhängig von der Frequenz erhalten.

Dass Membranen Schallwellen zu hohen Frequenzen hin zunehmend bündeln, hat ganz ähnliche Ursachen. Auch hier geht es um die Auslöschung gegenphasiger Schallwellen – abhängig von Wellenlänge und Membranradius.

Zwischen Dipolverhalten und Bündelung besteht ein enger Zusammenhang, der bereits für Dipolmembranen ohne Schallwand von Bedeutung ist:

Jede kreisrunde Membran mit Radius D (Dipollänge) hat auf Achse die erste Dipolspitze bei $\lambda = 2 D$ und die erste Dipolsenke bei $\lambda = 1 D$. Für den Beginn der Membranbündelung gilt gleichzeitig $\lambda = \pi D$ oder $\lambda = 2 \pi D$ (je nach Auslegung).

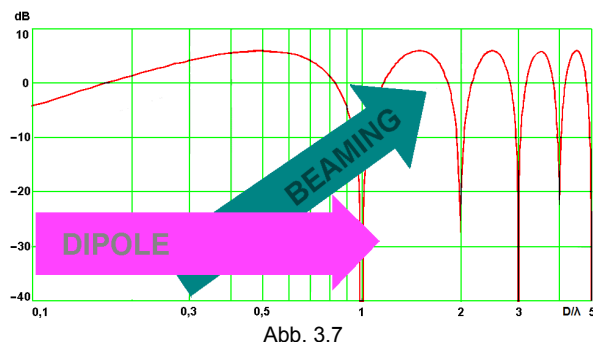


Abb. 3.7

Das bedeutet: Für Frequenzen im Bereich um und oberhalb der ersten Dipolsenke wird die Richtwirkung aufgrund des Dipolprinzips zunehmend von der Bündelung aufgrund des Membranradius abgelöst.

Gut zu sehen ist das in Winkel-Frequenzgängen, die Mellow und Kärkkäinen für [Linkwitz](#) angefertigt haben:

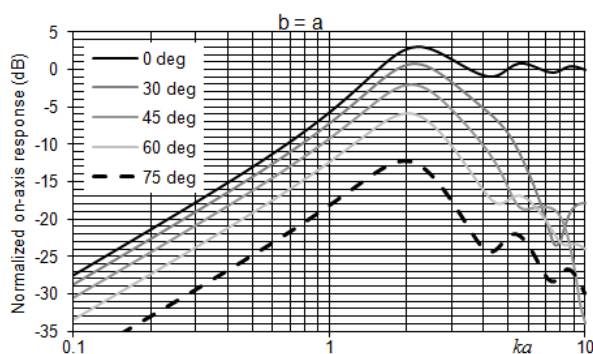


Abb. 3.8 nach Mellow und Kärkkäinen

Bis $ka=1$ (entspricht 1 kHz für eine Membran mit 5,4 cm Radius) ist die Bündelung dipoltypisch gleichmäßig. Dann

wird die Bündelung bis $ka=4$ langsam größer, um danach fast schlagartig zuzunehmen. Bereits unter 30° sinkt der Schalldruck erheblich ab. Allerdings kommt es seitlich auch zu Nebenkeulen – erkennbar am Zusammenlaufen der Linien für 30° , 45° und 60° .

Die Frequenz, ab der die Gleichmäßigkeit der Dipol-8 verloren geht, kann man erhöhen, indem man die Membran immer kleiner macht. Dabei wandert aber auch das Einsetzen des Dipolabfalls zu immer höheren Frequenzen:

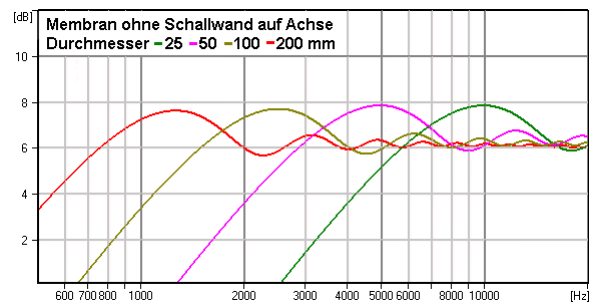


Abb. 3.9

Diesem Dilemma entgeht nur, wer für mehrere Frequenzbereiche verschieden große Lautsprecherchassis benutzt. Ansonsten muss man spätestens im Hochtonbereich auf ein echtes Dipolverhalten verzichten.

3.2 Dipol-Membranen auf Schallwänden

In der Realität ist ein Lautsprecher immer größer als seine Membran. Dabei geht es nicht nur um Sicke und Korbrand. In die Dipollänge D geht auch jeder Tiefenversatz mit ein, der auf dem Weg von der rückseitigen Schallquelle zum vorderen Schallentstehungsort Membranebene/Schallwandkante zu überwinden ist:

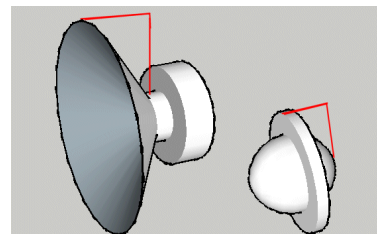


Abb. 3.10

Wie wirkt sich solch eine zusätzliche Schallwand auf das Verhalten des Dipols aus? Umgeben wir zuerst unsere Membran von Abb. 3.8 mit einer doppelt so breiten Schallwand:

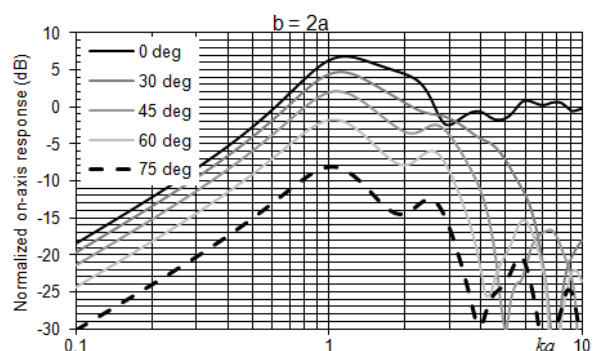


Abb. 3.11 nach Mellow und Kärkkäinen

Man sieht auf der größeren Schallwand den Versatz der Dipolspitze von $ka=2$ zu $ka=1$ und den Schalldruckgewinn zu niedrigeren Frequenzen. Außerdem ist die Dipolsenke deutlicher ausgeprägt.

Hervorragend erkennt man, wie zur Dipolsenke (hier $ka=3$) hin die Bündelung kleiner und damit die Abstrahlung breiter wird. Unmittelbar oberhalb der Dipolsenke setzt schlagartig die Bündelung aufgrund des Membranradius ein.

Die Zusammenschau steigender Schallwandradien:

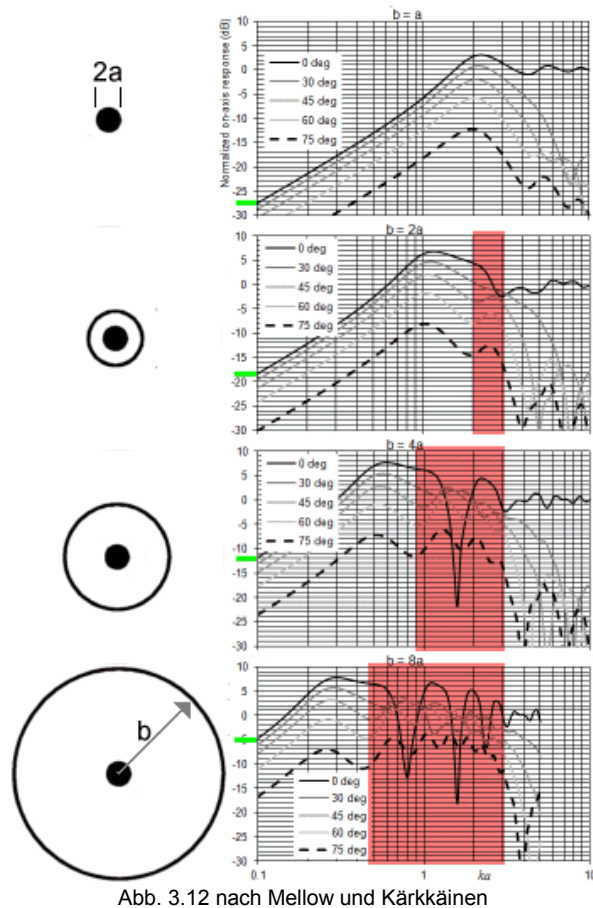
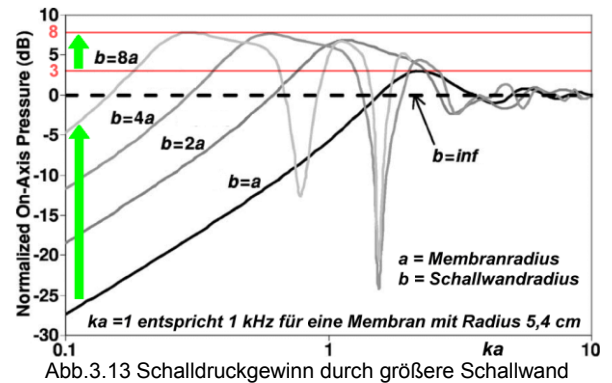


Abb. 3.12 nach Mellow und Kärkkäinen

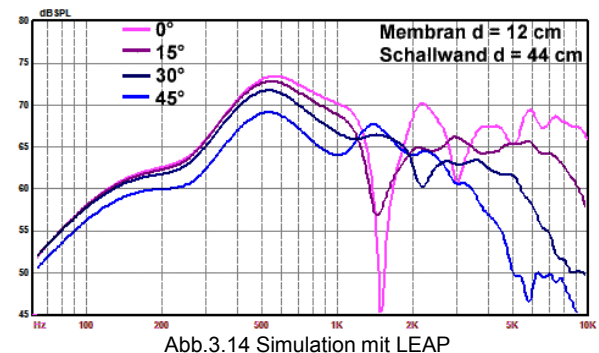
Mit steigendem Schallwandradius bildet sich zwischen dem oberen Ende der ersten Dipolspitze und dem Einsetzen der Bündelung (bestimmt durch den Membranradius) eine Zone (hier rot markiert) von wechselndem Abstrahlverhalten. Insgesamt haben wir drei verschiedene akustische Bereiche:

- Für niedrige Frequenzen bis über die erste Dipolspitze der Schallwand ist das Verhalten dipolmäßig. Der Lautstärkepegel sinkt zur Seite relativ schnell ab.
- In einem Zwischenbereich verändert sich das Dipolmuster ständig. Die Dipol-8 bricht in Mehrfachkeulen auf.
- Mit Einsetzen der Bündelung der Lautsprechermembran verengt sich die Keulenschar zunehmend zu je einer vorderen und hinteren Abstrahlkeule.

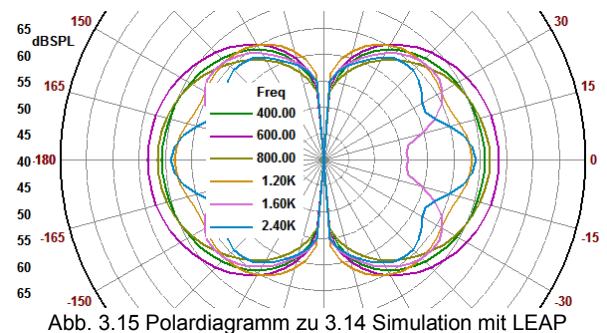
Man beachte, wie sich mit steigendem Schallwandradius bei $ka=0,1$ der Schalldruck stetig erhöht und wie die Dipolspitze 5dB zugewinnt (grüne Pfeile),



Zur Verdeutlichung folgt die Simulation des Falls „ $b=4a$ “, dargestellt in Winkel-Frequenzgängen und Polardiagramm:



Mit steigender Frequenz werden unterschiedlichste polare Muster durchlaufen (vgl. auch Abb. 1.11 und 1.12). Die „normale“ Dipol-8 bricht in immer mehr Einzelkeulen auf – meist mit entgegengesetzter Phase zu den Nachbarkeulen:



Dieser Prozess stoppt erst, wenn bei hohen Frequenzen die gebündelten Schallwellen nicht mehr die Schallwandkante erreichen. Die Einschnürung seitlich zur Dipolachse ist dann nicht mehr eine Folge des Dipoleffekts. Sie ergibt sich aus der engen Abstrahlung der verbleibenden zwei Einzelkeulen.

Nach dieser Erkenntnis gibt es zwei Handlungsalternativen:

1. Man akzeptiert die verschiedenen Formen des Dipolverhaltens entlang der Frequenzachse und versucht, die größten Abweichungen vom Dipol-Ideal zu vermeiden. Dieser Weg wird im Abschnitt 3.3 behandelt.
2. Man versucht, das ideale Dipolmuster so weit wie möglich über den Hörbereich beizubehalten. Dieses Prinzip der konstanten Richtwirkung wird in Abschnitt 3.4 dargestellt.

3.3 Offene Schallwände optimieren

Kapitel 3.1 hat gezeigt, wie größere Membranen helfen, Dipolspitzen und -senken einzuebnen. Kapitel 3.2 hat gezeigt, dass größere Schallwände das Rundstrahlverhalten negativ beeinflussen können.

Deshalb ist es oft hilfreich, Offene Schallwände nicht als ein Rechteck einheitlicher Breite zu planen, sondern zwei oder mehr Breiten vorzusehen – jede in Kombination mit der Chassisgröße passend zum vorgesehenen Frequenzbereich.

Häufig besteht der Wunsch, die Anhebung von Frequenzbereichen so weit wie möglich zu vermeiden, um eine passive Trennung zu erleichtern. Dann bietet sich an, die einzelnen Lautsprecher nur rund um die erste Dipolspitze zu betreiben. Gelingt das mit einem 2-Weg-Dipol?

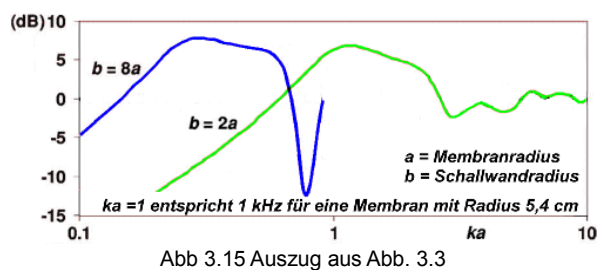


Abb. 3.15 Auszug aus Abb. 3.3

Für $a = 5,4$ cm deckt das Beispiel einen Bereich von 100 Hz bis 10 kHz ab. Die Trennung liegt bei ca. 500 Hz und ist bereits in einem kritischen Bereich. Die Schallwandbreite für den Tieftöner ist das Vierfache der Hochtöner-Schallwand. Das ändert sich auch nicht, wenn im Bass ein wesentlich größeres Chassis eingesetzt wird, da die Lage von Dipolspitze und -senke ganz überwiegend von der Schallwandbreite vorgegeben wird.

Harmonischere Übergänge und eine Erweiterung im Hochton gestattet ein 3-Weg-Dipol:

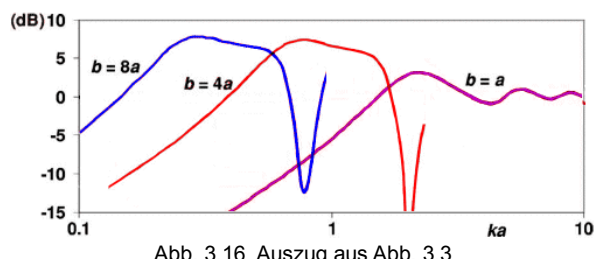


Abb. 3.16 Auszug aus Abb. 3.3

Auffallend ist, wie rapide die sinnvolle Schallwandbreite jeweils abnimmt.

Weitere Empfehlungen für Offene Schallwände

1. Den Lautsprecher nicht auf linearen Frequenzgang auf Achse hin konstruieren oder korrigieren und nicht exakt auf Achse hören. 10-15° (oder noch mehr) außerhalb der Achse sollte der Frequenzgang wesentlich besser zu den anderen Winkeln passen.

Wenn man übrigens in Edge die Mikrofon-Distanz auf 4 m einstellt und dann das Mikro seitlich 1 m von der Chassismitte platziert, entspricht das ca. 15°.

2. Ein Chassis sollte im Verhältnis zur umgebenden Schallwand nicht als „Punkt“quelle wirken. Die Schallwand sollte möglichst die dreifache Membranbreite nicht überschreiten. Wenn das nicht möglich ist, kann man dem Chassis eine schmalere Schallwand zumindest in eine Richtung „vorgaukeln“, indem es dichter an einer Schallwandkante platziert wird. Betrachten wir eine 12 cm Membran auf einer 50 cm breiten Schallwand. Zuerst mittig montiert:

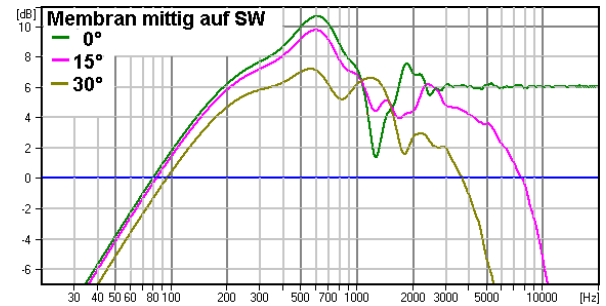


Abb. 3.17

Das Ergebnis ist eine Serie von seitlichen Frequenzgängen, die schlecht miteinander in Einklang stehen.

Versetzt man die Membran 15 cm nach rechts, harmonisieren die Frequenzgänge zu dieser „kurzen“ Seite bereits viel besser. Von 200-2000 Hz wird fast keine Korrektur gebraucht:

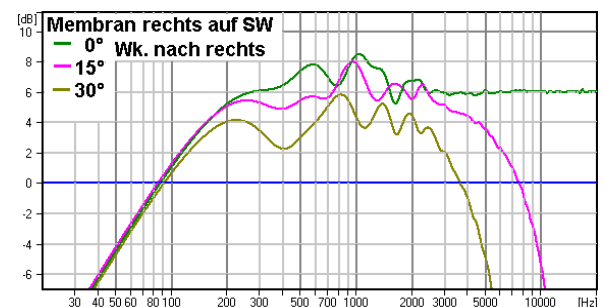


Abb. 3.18

Zur „langen“ Seite erhält man Frequenzgänge, die zumindest bis 1000 Hz noch besser zusammen passen, aber wesentlich mehr Korrektur erfordern als die zur „kurzen“ Seite:

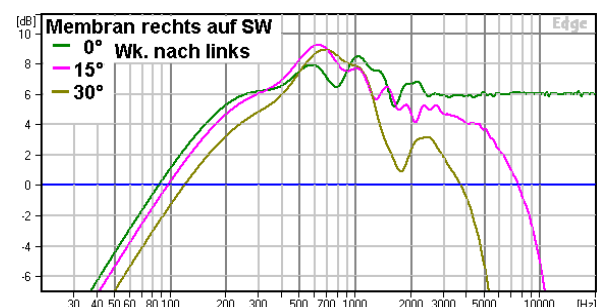


Abb. 3.19

Es gibt also in jedem Fall eine „gute“ und eine „schlechte“ Richtung, was beim Design des Lautsprechers oder seiner Platzierung im Raum zu berücksichtigen ist.

3.4 Dipole mit konstanter Richtwirkung

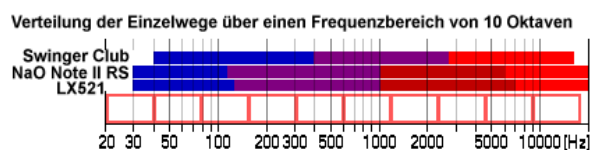
Die in Kap. 3.2 beschriebenen Offenen Schallwände haben bis 6 dB unterhalb der Dipolspitze eine konstante Richtwirkung: Der Schalldruck zur Seite wird genau so wiedergeben wie auf Achse – nur mit weniger Lautstärke. Diese sinkt mit steigendem Winkel von der Lautsprecherachse. Mit geringen Einschränkungen gilt das auch noch bis kurz über die Dipolspitze. Diese Richtwirkung ist unabhängig von Membran- oder Schallwandradius.

Dieses Verhalten sorgt erstens dafür, dass der zu den Seiten abgegebene indirekte Schall insgesamt die gleiche Frequenzzusammensetzung hat wie der direkte Schall. Das wird als besonders ausgewogen empfunden.

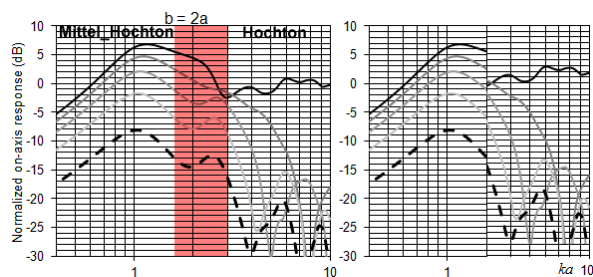
Zweitens erreichen die sogenannten frühen Reflexionen, besonders von der nächstgelegenen Raumwand, den Hörer mit weniger Pegel und mit einem „besseren“ Frequenzspektrum, als wenn sie von einem Lautsprecher ohne konstante Richtwirkung kämen.

Einteilung der Frequenzbereiche

Gute Gründe also, diese konstante Richtwirkung möglichst weitgehend einzusetzen. Da sie nicht über beliebig weite Frequenzbereiche erreichbar ist, muss ein Mehrwegsystem her. Siegfried Linkwitz (LX521) und John Kreskovsky (NaO Note II RS) haben Vierweg-Dipole entwickelt, deren Treibergrößen und Übergangsfrequenzen sich sehr ähneln. Mein Swinger Club (Kap. 5.3) ist ein Dreiweg-Kompromiss, der bei weniger Komplexität geringere Bandbreite und Lautstärke hat.



In Kap. 3.2 haben wir gesehen, dass – insbesondere für Hochtöner-Dipole – die Schallwand aus technischen Gründen mindestens doppelt so groß wird wie die Membran. Nach Mellow und Kärkkäinen geht es in etwa um den Fall $b=2a$. In einem Dreiweg-System muss man die dabei auftretende Aufweitung rund um $k=3$ hinnehmen (linkes Diagramm):



Linkwitz und Kreskovsky beenden in ihren Vierweg-Systemen den Einsatz des Mittel-Hochtöners links vom roten Bereich und schließen mit Hochtönern an, die ausschließlich rechts vom roten Bereich in Bündelung betrieben werden. Der grafische Zusammchnitt (rechtes Diagramm) zeigt, dass so ein relativ stetiger Übergang im Bündelungsverhalten möglich ist.

Die Mittel-Hochtöner haben einen Membranradius von $\sim 3,4$ cm. Damit entspricht $ka=1$ etwa 1,8 kHz. Die untere Trennfrequenz ist 1 kHz. Das entspricht $ka=0,6$. Wie das Diagramm auch zeigt, ist praktisch nur die Dipolspitze auszugleichen. Das trifft genauso auf den Hochtöner im Swinger Club zu, bei dem ebenfalls kein Dipolabfall ausgeglichen wird.

Weiter zum unteren Mittelton der Vierweg-Dipole. Der Membranradius der Chassis ist $\sim 8,5$ cm. Damit wird $ka=1$ zu 636 Hz. Die obere Trennung ist 1 kHz mit $ka=1,57$, die untere ist 115 Hz mit $ka=0,18$. Die Schallwand ist hier nicht doppelt so breit wie die Membran, deshalb liegen wir zwischen Fall $b=a$ und $b=2a$. Ein Vergleich von Abb. 3.8 und 3.11 zeigt, dass das Chassis von der Dipolspitze bis zu einem ca. 22 dB darunter legenden Schalldruck betrieben wird. Rund 5 dB davon sind durch die Dipolspitze „gewonnen“. Es bleiben echte 16-17 dB unterhalb der 0 dB-Linie, die entzerrt werden müssen. Eine harte Aufgabe ... und ein Grund für meinen Dreiweg-Dipol, bei weit höherer Frequenz an den Bass anzukoppeln.

Im Bassbereich greift die Betrachtung einer runden Membran in runder Schallwand nicht mehr, da hier alle betrachteten Systeme mit zwei Chassis in H-Dipolen arbeiten (vergleiche Kap. 5.4). 110 Hz hat eine Wellenlänge von 3 m. Das ist 30 mal der Membranradius der verwendeten Treiber. Sie können also als „punktförmig“ betrachtet werden. Ihre Bündelungsfrequenz spielt keine Rolle.

Eine Dipolspitze bei 200 Hz entspricht ungefähr einem Schallwandradius von 86 cm. Dieser ist in Praxis kaum erreichbar. Wir gehen deshalb davon aus, dass der Bass komplett auf der mit 6 dB/okt. abfallenden Flanke unterhalb der Dipolspitze betrieben wird. Die Vierweg-Dipole geben eine untere Grenzfrequenz von 30 Hz an. Bis 120 Hz überspannen sie zwei Oktaven und müssen daher nur 12 dB entzerren.

Der H-Dipol des Dreiwegsystems arbeitet von 40-400 Hz über 3,2 Oktaven, entsprechend fast 20 dB. Das gelingt nur, wenn im Bass auf Unterstützung durch Raummoden gehofft werden kann und die Lautstärkeansprüche bescheiden sind.

Chassis- und Schallwandgrößen

Wenn man für den Hochtönbereich keine Doppellösung will, kommen dynamische 2" Treiber wie Visaton FRS5X oder Peerless FR2 in Frage, kleine AMTs oder B&G Neo3. Erstere werden über 4 kHz kaum noch nach hinten strahlen. Kleine Kalotten wie Dayton ND20FA oder Vifa OX20 können nur versetzt eingebaut werden. Alle Treiber sind nur bis ~ 2 kHz einsetzbar und vertragen nur minimale Schallwände – wenn überhaupt.

Für den Mittelton unter 2 kHz eignen sich 5-6" Treiber, möglichst mit 5 mm Hub. Diese reichen bis 300-400 Hz herunter. Geht der Hochtöner bis 1,5 kHz, kommen auch 6-7" Treiber in Frage, die bis 200 Hz reichen. Auch hier dürfen die Schallwände nicht viel breiter als das Chassis sein.

Im Tieftöner werden in allen drei betrachteten Systemen zwei 10"-Chassis in Variationen des H-Dipols verwendet. Eine unterschiedliche Leistung beruht hauptsächlich auf der Hubfähigkeit und Klirrfreiheit der verwendeten Chassis. Die maximal mögliche Kammergröße lässt sich mit Hilfe von Kap. 5.3 abschätzen.

4 Simulation und Wirklichkeit

Die bisherigen Kapitel beschäftigten sich vorwiegend mit abstrakten Begriffen, Konzepten und Beispielen. Alle Randbedingungen wurden bewusst einfach gehalten. Was ändert sich, wenn man offene Schallwände im praktischen Leben betreibt? Wie „dipolig“ sind sie dann wirklich. Und wie unterscheiden sich Simulation und Messung voneinander? Diese Fragen werden im Folgenden erörtert.

4.1 Gemessen – von viel Schallwand zu wenig Schallwand

Anhand des 3-Zoll Breitbandlautsprechers Visaton FRS8 wird überprüft, wie weit die theoretischen Betrachtungen aus Kapitel 3 mit der Realität übereinstimmen. Dazu wurde ein FRS8 in drei verschiedene Schallwände eingebaut und sein Abstrahlverhalten nach vorn gemessen:



Abb. 4.1 Visaton FRS8 in 3 verschiedenen Schallwänden

Verglichen werden der FRS8 ohne Schallwand, mittig in einer quadratischen Schallwand von 22 x 22 cm sowie in der gleichen Schallwand, nachdem diese links auf 16 cm Breite gekürzt wurde.

Die folgenden Frequenzgänge enthalten alle unter 1 kHz ein Hochpassfilter. Zuerst der Vergleich der Frequenzgänge auf Achse:

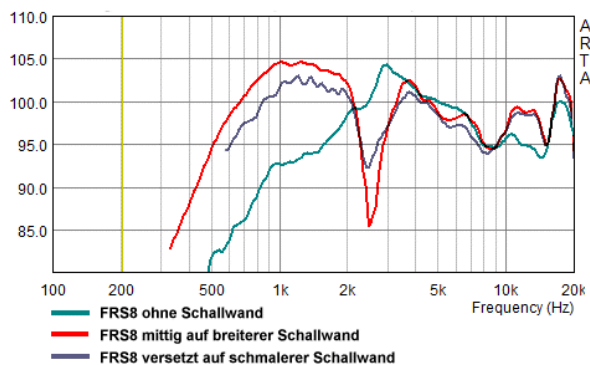


Abb. 4.2 Frequenzgänge auf Achse

Gut sichtbar sind die verschiedenen Schalldruckpegel unterhalb 1 kHz und die Verschiebung der ersten Dipolspitze und -senke zu höheren Frequenzen bei sinkender Schallwandbreite. Man beachte auch, wie die Dipolspitze mit verringerter Schallwandbreite schrumpft.

Es folgen die Frequenzgänge nach vorn unter verschiedenen Winkeln:

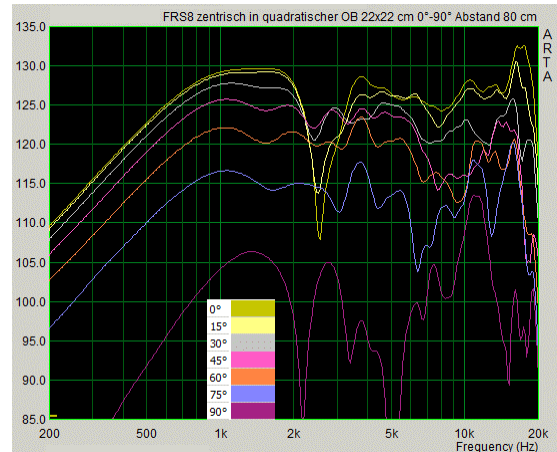


Abb. 4.3 Frequenzgänge 0-90° auf breiter Schallwand

Aufgrund der großen Schallwandbreite (im Vergleich zur Membrangröße) ist die erste Dipolspitze schmal und tief. Man vergleiche mit Kapitel 2.2 und Kapitel 3.2.

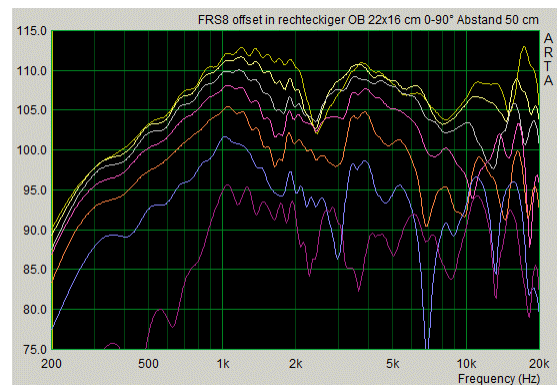


Abb. 4.4 Frequenzgänge 0-90° auf schmaler Schallwand

Mit seitlichem Versatz des Chassis wird die Dipolspitze zwar kleiner, aber auch breiter und über einen weiteren Winkel wirksam.

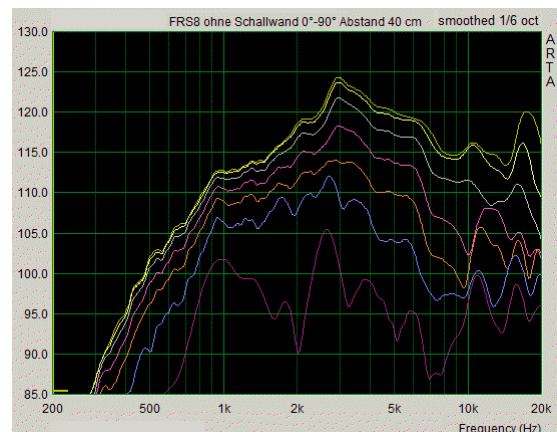


Abb. 4.5 Frequenzgänge 0-90° ohne Schallwand

Das völlige Fehlen einer Schallwand verschiebt die Dipolspitze hier auf 3 kHz. Eine Dipolspitze ist nicht mehr erkennbar. Vergleiche mit Abb. 3.11.

Was die unterschiedlichen Frequenzgänge für das Verhalten als Dipol bedeuten, wird anhand der entsprechenden Polardiagramme noch deutlicher. Gezeigt wird das Verhalten von 2-8 kHz:

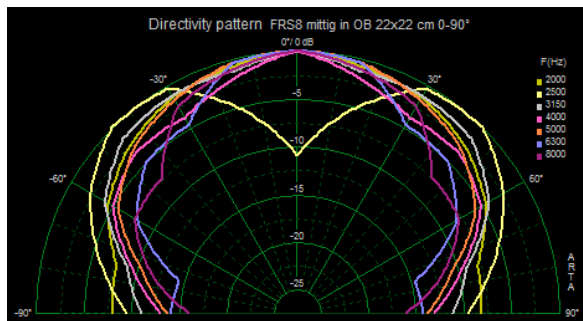


Abb. 4.6 Polardiagramm 0-90° auf breiter Schallwand

Ein kleines Chassis auf breiter Schallwand strahlt auch breit ab. Die Dipolsenke bei 2,5 kHz ist deutlich ausgeprägt. Zu höheren Frequenzen bleibt das Rundstrahlen unruhig.

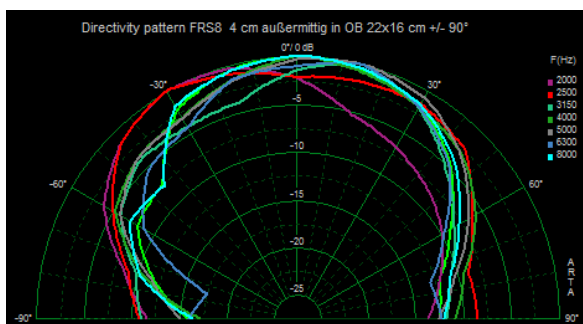


Abb. 4.7 Chassis versetzt auf schmalere Schallwand

Bei versetztem Chassis ist der Einbruch auf Achse stark reduziert, dafür pendelt das Schalldruckmaximum zwischen 2 und 3 kHz von links nach rechts. Ein Sonogramm macht das deutlich:

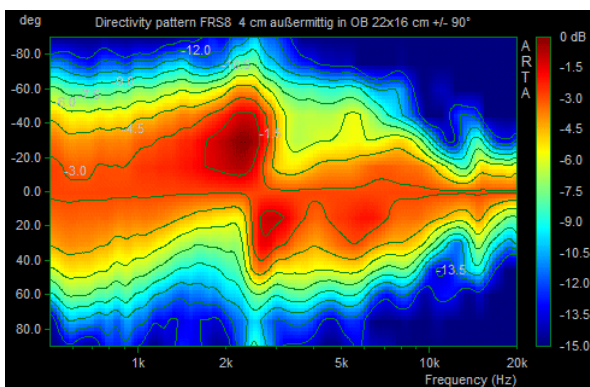


Abb. 4.8 Sonogramm linearisiert auf 0°

Erst das pure Chassis ohne zusätzliche Schallwand erzeugt eine gleichmäßige und schmale Dipol-8 über den ganzen angesprochenen Frequenzbereich:

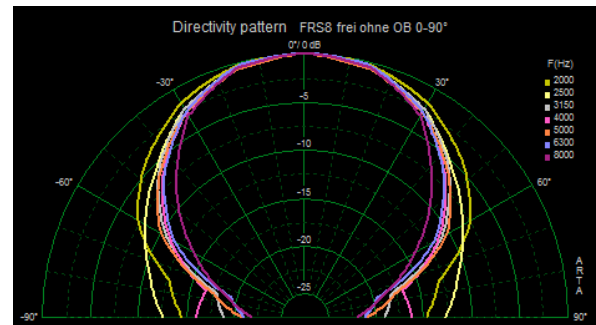


Abb. 4.9 Polardiagramm 0-90° ohne Schallwand

4.2 Wer simuliert wie genau?

Ein Simulationsprogramm wie Edge rechnet mit „idealen“ Lautsprechern – schnurgerader Frequenzgang von 0 Hz bis unendlich. Die Ergebnisse stellen praktisch nur das Verhalten der Schallwand dar. Boxsim rechnet zusätzlich mit individuellen Lautsprechereigenschaften wie Thiele-Small-Parameter, berücksichtigt aber auch nicht die Partialschwingungen der Membran bei höheren Frequenzen oder die komplexen Korbverhältnisse auf der Rückseite eines Lautsprechers. Wie unterscheidet sich die Simulation von richtigen Messungen, wenn solche Eigenschaften mit ins Spiel kommen?

Das untersuchen wir ebenfalls am 3-Zoll Breitbänder Visaton FRS 8 auf der quadratischen Schallwand von 22 x 22 cm. Das Chassis wurde bewusst im Zentrum montiert, um die erste Dipolsenke klar herauszuarbeiten. Unterhalb 1 kHz arbeitet ebenfalls ein Hochpassfilter. Zuerst wieder die Frequenzgänge der Vorderseite in 15° Abstand. Der Schalldruck ist nicht kalibriert:

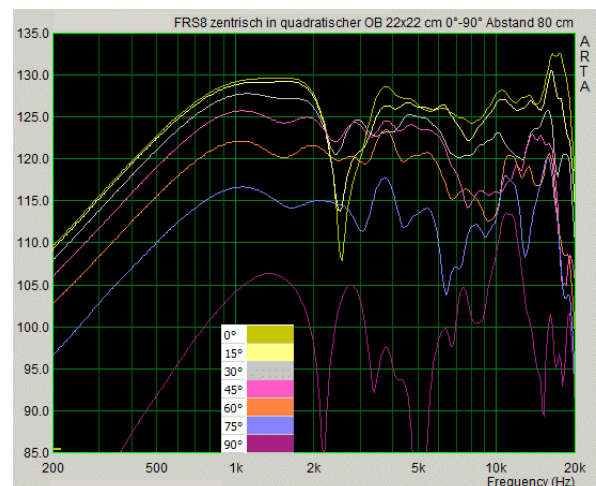


Abb. 4.10 Frequenzgänge 0-90° auf breiter Schallwand

Bis ca. 5 kHz entspricht das Verhalten den theoretischen Erwartungen – auf der Mitte zwischen Abb. 3.14 und 3.15. Es fällt auf, dass der FRS 8 in einer so großen Schallwand weit unter Wert eingesetzt wird, da er als Dipol erst ab 5-6 kHz zunehmend bündelt. Bis dahin ist die Richtwirkung auch jenseits des Einbruchs bei 2,5 kHz noch sehr gleichmäßig.

Anschließend die Frequenzgänge der Rückseite:

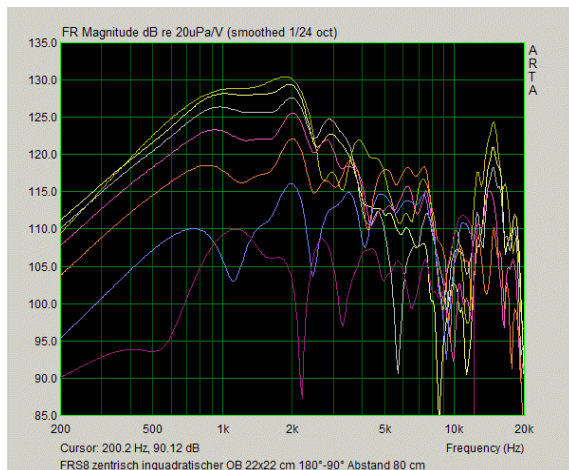


Abb. 4.11 Frequenzgänge 90-180° auf breiter Schallwand

Bis 2 kHz ist auch hier das Verhalten sehr akzeptabel und unterscheidet sich nicht zu sehr von der Vorderseite. Jenseits von 2,5 kHz bricht aber der rückseitige Teil der Dipol-8 völlig zusammen. Als Dipol ist der FRS 8 also nur bis 2 kHz zu gebrauchen – unabhängig von der Lage auf der Schallwand.

Was ergeben im Vergleich dazu die Simulationen? Wir verwenden nur die gemessenen 0°-Frequenzgänge des Visaton FRS8 und die Simulationen von Edge und Mellow/Kärkkäinen (Abb. 3.3):

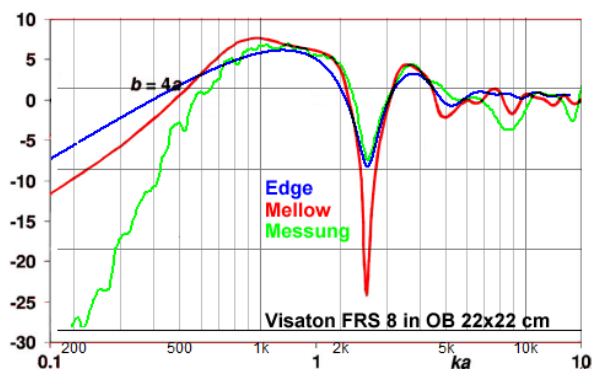


Abb. 4.12 Simulationsvergleich 0° breite Schallwand

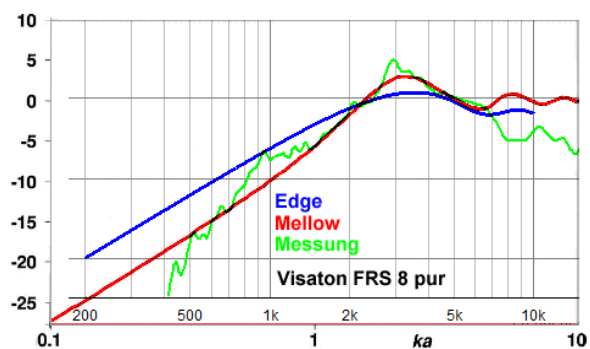


Abb. 4.13 Simulationsvergleich 0° ohne Schallwand

Unter 1 kHz sind die Messungen hochpassgefiltert und weichen deshalb von den Simulationen ab. Edge erreicht mit nur einer Diffraktionsstufe nur eine begrenzte Genauigkeit, während Mellow und Kärkkäinen die erste Dipolspitze recht genau wiedergeben. Erst oberhalb der Dipolsenke kommen die individuellen Eigenschaften der Chassis voll zur Geltung.

Messungen von Chassis ohne Schallwand zeigen bisweilen eine zusätzliche Schalldruckspitze kurz vor oder auf der Dipolspitze, die beim Einbau in Schallwände verschwindet. Zwei Beispiele:

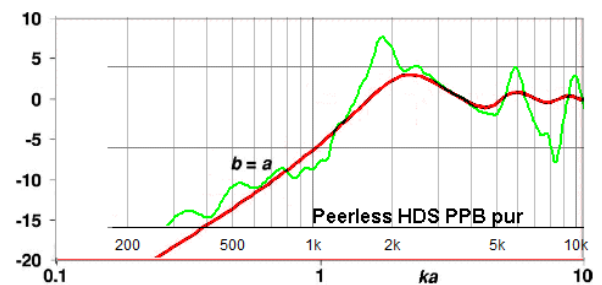


Abb. 4.14 Peerless HDS PPB 0° ohne Schallwand

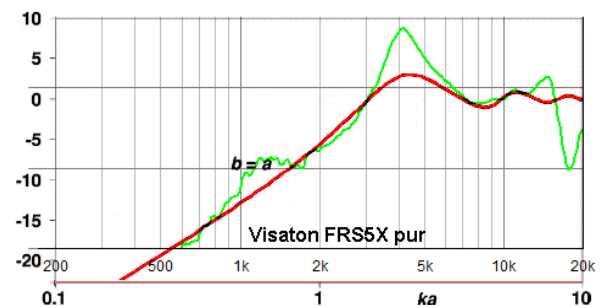


Abb. 4.15 Visaton FRS5X 0° ohne Schallwand

Simulationen für Winkel > 30° haben sich bei mir als so ungenau erwiesen, dass ich sie nicht verwende. Hier der Vergleich von Messungen mit den entsprechenden Edge Kurven:

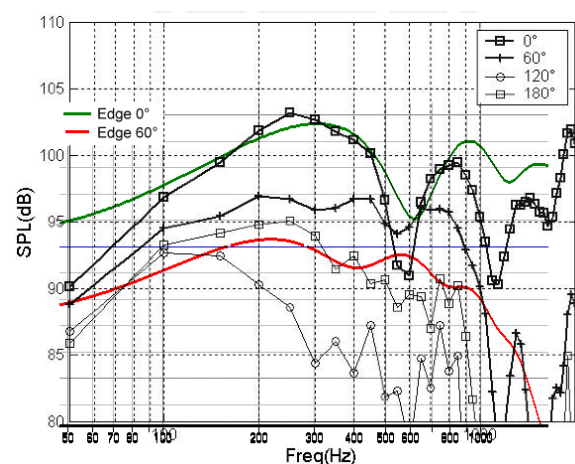


Abb. 4.16 Vergleich Messung – Simulation mit Edge

5 Der praktische Einsatz

Der Bau von Dipolen erfordert Kompromisse – weil z. B. die Quellen nicht beliebig punktförmig sind und der Dipolabfall nicht beliebig weit kompensiert werden kann. Wie man dabei das beste Ergebnis herausholt, ist Thema dieses Kapitels.

5.1 Dipol-Hochtöner im Vergleich

Dipol-Hochtöner haben das generelle Problem, dass die Wellenlängen hoher Frequenzen klein werden im Vergleich zu den Chassis-Abmessungen. Dipole mit Flächenmembran wie BG Neo3 oder beidseitig offene Air Motion Transformer (AMT) machen dabei die geringsten Probleme, sind aber auch am teuersten.

Kalottenhochtöner Rücken an Rücken

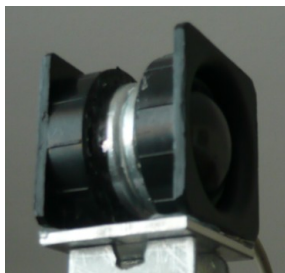


Abb. 5.1 Kalotten-HT Rücken an Rücken

Besonders bei diesen ist die anzunehmende Schallwand deutlich größer als die sichtbare, da noch der Tiefenversatz beider Chassis in die Breite mit eingerechnet werden muss:

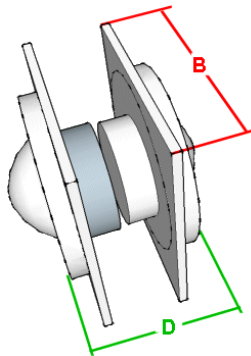


Abb. 5.2 Die wirksame Schallwandbreite bei Kalotten-HTs

Die wirksame Breite entspricht in etwa der geometrischen Breite B plus der doppelten Schallwanddistanz D. Diese virtuelle Überbreite der Schallwand führt zu einem Einbruch im Frequenzgang (hier um 7 kHz):

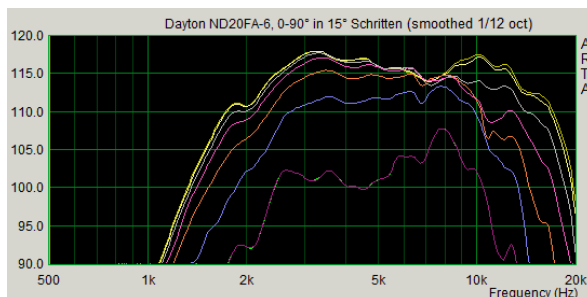


Abb. 5.3 Frequenzgang zweier Kalotten-HTs als Dipol

Wenn dieser Einbruch auf Achse linearisiert wird, ergibt das einen erhöhten Schalldruck außerhalb der 0°-Achse:

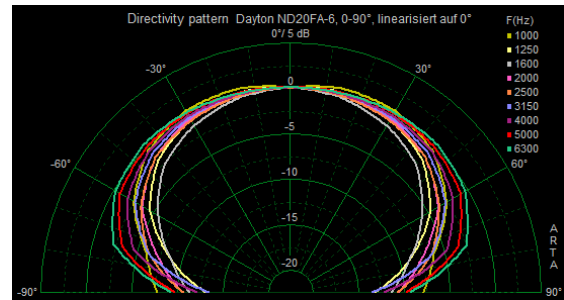


Abb. 5.4 Frequenzgang linearisiert auf 0°

Im Sonogramm entsteht das „Klingonen-Raumschiff“-Profil:

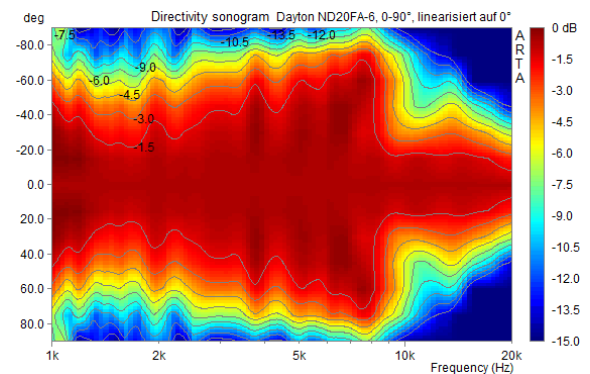


Abb. 5.5 Sonogramm linearisiert auf 0°

Eine Linearisierung auf einen anderen Winkel (hier graue Linie 30° in Abb. 5.3 als Hörwinkel) vermindert das Problem etwas, ohne es zu beseitigen:

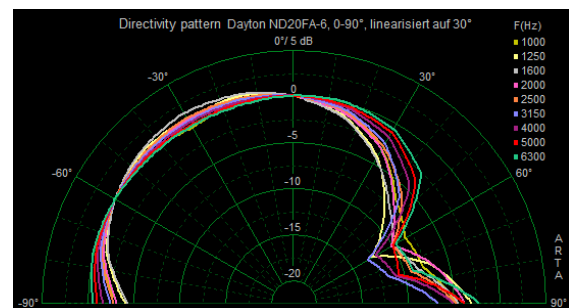


Abb. 5.6 Frequenzgang linearisiert auf 30°

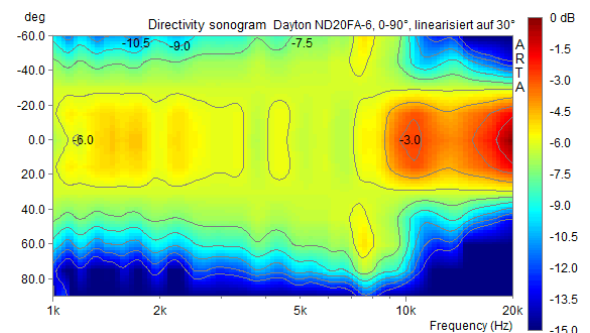


Abb. 5.7 Sonogramm linearisiert auf 30°

Dass dieses Verhalten für alle kompakten Kalotten-Dipole typisch ist, zeigen weitere Beispiele:

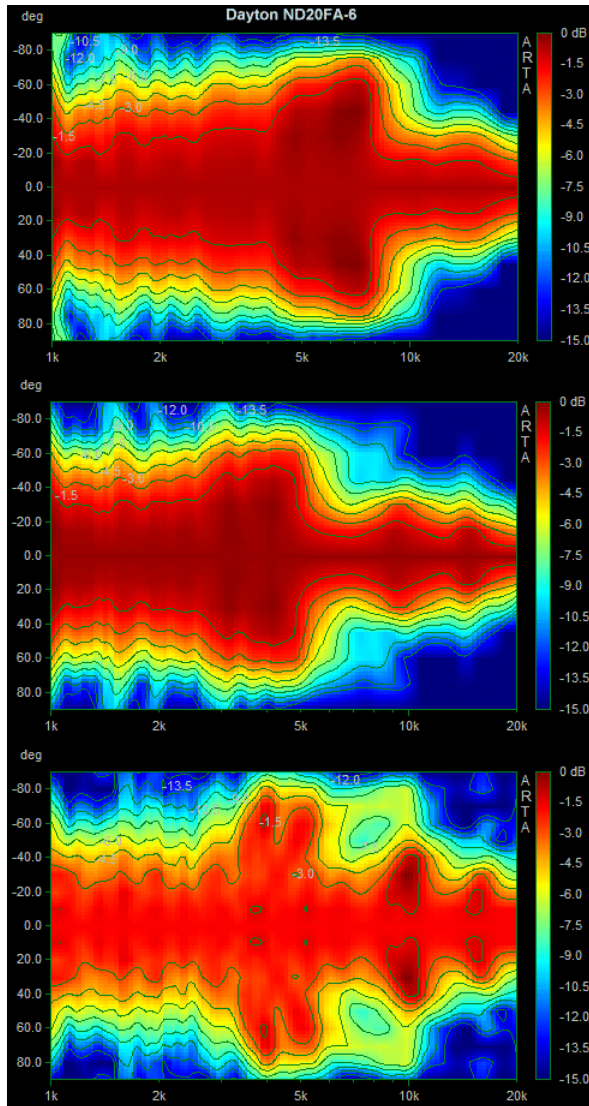


Abb.5.8 Sonogramme mehrerer Kalotten-HT-Paare

Konus-Hochtöner als Dipol

Konus-Hochtöner, die auch nach hinten offen sind, vermeiden weitgehend den Tiefenversatz zwischen vorderer und hinterer Membranfläche. Wir schauen uns als Beispiel den [Visaton FRS 5 X](#) ohne zusätzliche Schallwand an:



Abb.5.9 Konus-Hochtöner Visaton FRS 5 X

Der Freifeld-Frequenzgang zeigt die typische Dipolspitze eines „nackten“ Konus-Chassis (vergleiche auch Abb. 4.5):

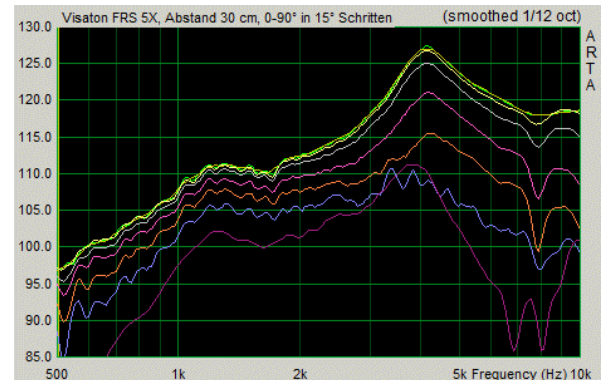


Abb. 5.10 FRS 5 X ohne Schallwand

Nach grober Begradigung (mit Hochpass unter 1 kHz) sehen die Frequenzgänge nach vorn und hinten so aus:

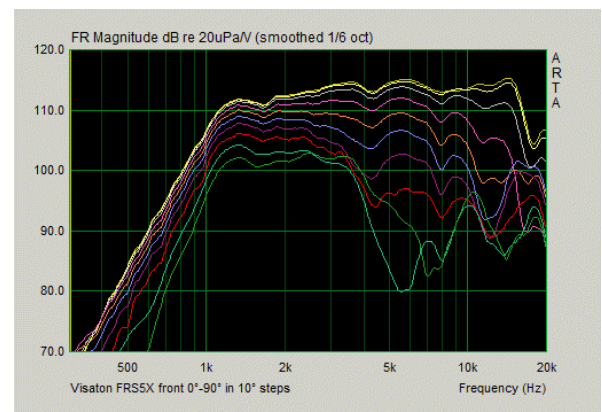


Abb. 5.11 FRS 5 X ohne Schallwand, Frequenzgang 0-90°

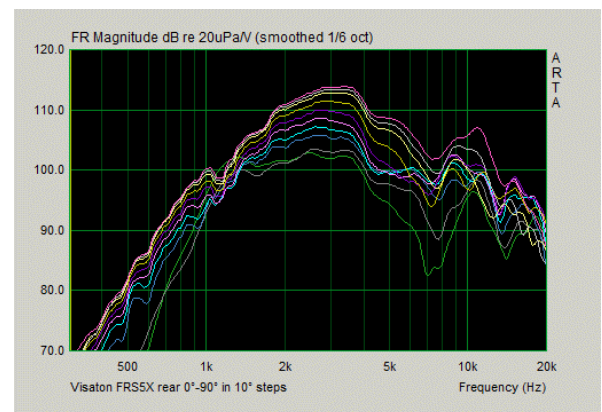


Abb. 5.12 FRS 5 X ohne Schallwand, Frequenzgang 90-180°

Der Frequenzgang nach hinten unterscheidet sich deutlich von dem nach vorn. Er fällt insbesondere zu hohen Frequenzen früher ab.

Ein Einbruch des Achsfrequenzgangs gegenüber den anderen Winkeln ist kaum zu erkennen. Das führt – im Unterschied zu den Kalotten – über weite Strecken zu einer relativ engen Dipol-Acht, vor allem nach vorn:

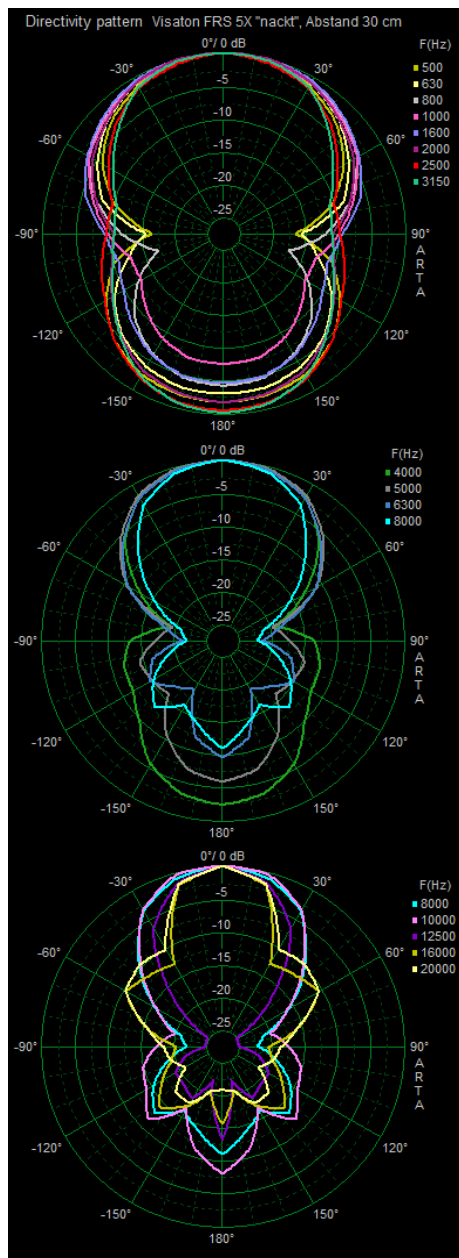


Abb. 5.13 FRS 5 X ohne Schallwand, Polardiagramme

Das Sonogramm (0-90°) zeigt vergleichsweise ebene Bündelung:

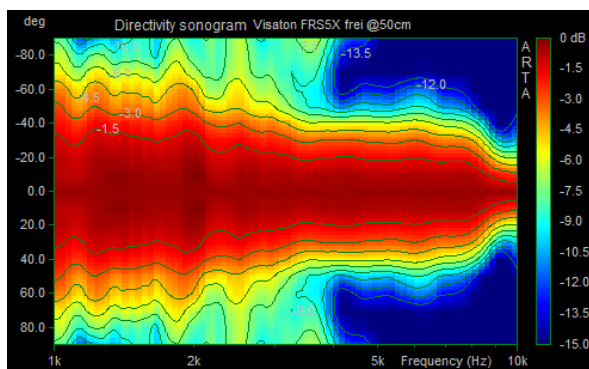


Abb. 5.14 FRS 5 X ohne Schallwand

Man beachte, dass trotz des nach hinten abnehmenden Hochtons die seitliche Einschnürung der Dipol-8 bis zu hohen Frequenzen relativ gleichmäßig erhalten bleibt.

Flächenmembranen

„cuibono“ setzt in dem weitgehend schallwandlosen Dipol [Fin](#) ab 3 kHz einen Magnetostat-Hochtöner [BG Neo3 PDR](#) ein:



Abb. 5.15 Dipol „Fin“ mit Hochtöner-Magnetostat BG Neo3 PDR

Aufgrund der Baugröße bricht der Achsfrequenzgang des Neo3 um 8 kHz schmalbandig ein. Das darf nicht korrigiert werden. Ansonsten ist der Dipol-Frequenzgang tadellos – zumal er zumindest im Hochtonbereich auch nach vorn und hinten symmetrisch ist:

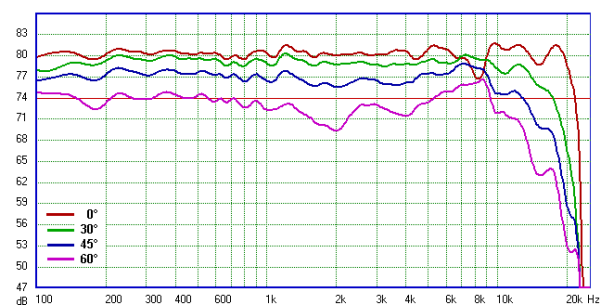


Abb. 5.16 Frequenzgang „Fin“ mit BG Neo3 ab 3 kHz

Die Dipol-8 ist ideal, wenn der Frequenzgang bei 30° um 1 dB abfällt, bei 45° um 3 dB und bei 60° um 6 dB. Das wird hier über einen weiten Bereich erreicht.

5.2 Meine Dipole – Dipol 30

Meine eigenen Dipolsysteme sind stets „work in progress“. Es gibt keine Endprodukte, sondern nur Zwischenstände. Beschrieben werden ein 3-Weg-System mit relativ kleiner Schallwand für den Mittelton (Dipol 30) und ein System ohne Schallwand für Hoch- und Mittelton (Swinger Club).

Dipol 30

Dieses System hat eine Mittelton-Schallwand von durchschnittlich 30 cm Breite (oben 20 cm, unten 40 cm). Zuerst die Hörsituation:



Abb. 5.17 Der Hörraum des Autors

Der Raum ist 4,07 m breit und 5,12 m lang. Die Dipole stehen unter einer Dachschräge an der „kurzen“ Vorderwand. Ein großes Regal füllt die Wand hinter dem Hörer. Die Deckenhöhe ist 2,47 m. Die Proportionen sind also eher ungünstig.

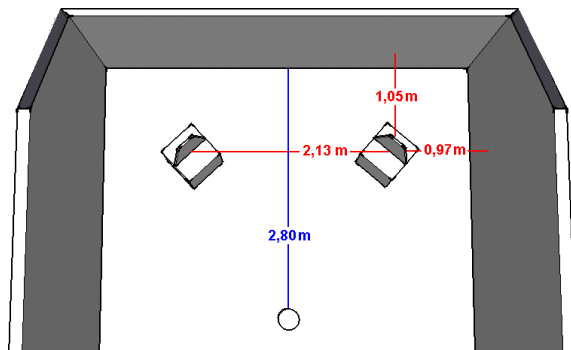


Abb. 5.18 Abstände der Lautsprecher

Die Hörposition ist mittig auf 55 % der Raumlänge (Kreis = Kopf). An verschiedenen Punkten entlang der Raumachse wurde der Summenfrequenzgang gemessen (Teilung 10 dB):

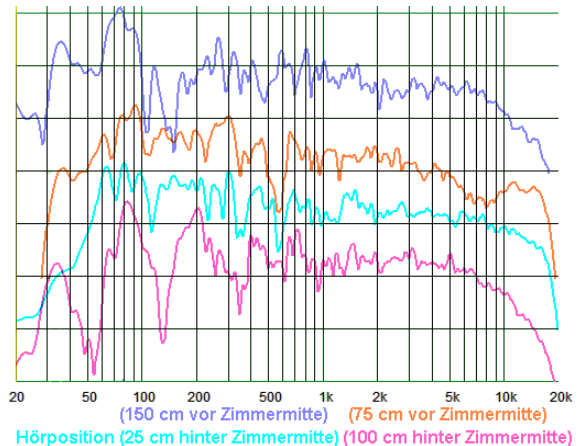


Abb. 5.19 Frequenzgänge entlang der Raumlänge

Zur besseren Übersicht sind die Frequenzgänge vertikal verschoben. Der Frequenzgang am Hörplatz ist besonders ausgeglichen. Allerdings ist dort auch die niedrigste Raummode bei 36 Hz besonders schwach.

Als nächstes sollte bei 42 Hz die niedrigste Mode der Raumbreite erscheinen. Da ich genau in der Raumachse im Schalldruckminimum sitze, höre ich diese ebenfalls nicht. Aber 70 cm seitlich von dieser Raumachse wäre die 42-Hz-Mode da:

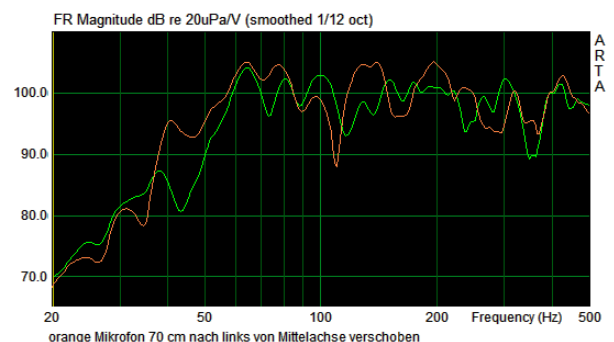


Abb. 5.20 Verschieben des Mikros zur Seite

Ich verzichte auch darauf, um ein möglichst symmetrisches Klangbild von links und rechts zu erhalten. Deshalb beginnt der Bass erst bei 50 Hz, ist dann aber frei von störenden Spitzen oder Löchern. Ein Vergleich der Einzelfrequenzgänge mit der Summe zeigt, dass beide Lautsprecher am Hörplatz ähnlich „ankommen“:

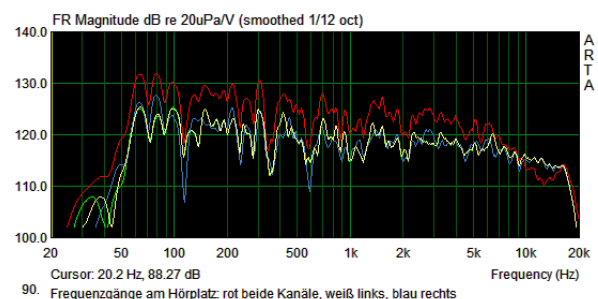


Abb. 5.21 Frequenzgänge am Hörplatz

Hinter den Dipolen ist ein Wandabstand von 1 m. Dieser ist aber im Bereich des Tieftons nicht frei. Allerdings verändert auch ein Entleeren der Regale den Frequenzgang kaum.



Abb. 5.22 Lautsprecher von der Seite

Interessant ist noch das Verhalten der ersten Reflexionen im Raum:

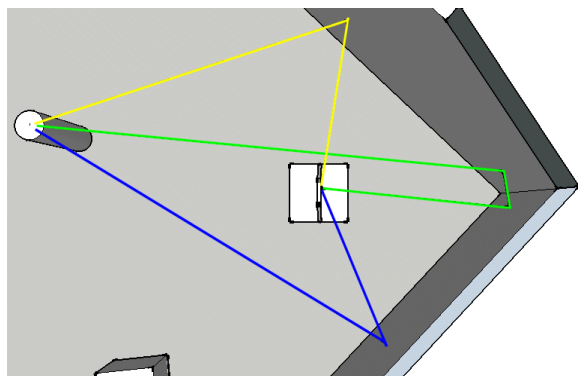


Abb. 5.23 Richtungen der frühen Reflexionen

Es fällt auf, dass nur die Boden- und Deckenreflexion von der Vorderseite des Dipols gespeist werden. Die gelbe seitliche Reflexion geht unter sehr flachem Winkel (9°) von der Rückseite der Schallwand aus. Hier ist die Dipol-8 im Normalfall 12-15 dB unter dem 0° -Pegel. Die blaue Reflexion an der Stirnwand startet unter ca. 35° von der Schallwand und ist deshalb ca. 3-6 dB schwächer als der 0° -Pegel.

Volle Leistung hat nur der grüne Schall direkt nach hinten. Er muss gegenüber dem Direktschall aber auch 3 m Umweg bis zum Hörer zurücklegen. Die Reflexion an der „fernen“ Seitenwand (hier links unten) wurde nicht berücksichtigt.

Die verwendeten Chassis

Den Bass bildet je ein 15" Tieftöner [A&D Audio 15308](#) in einem H-Dipol von 46 x 44,5 x 42 cm (HxBxT). Im Mittelton arbeitet der 7" [Monacor SPH 176](#). Den Hochtון gibt je ein Paar 1" [Monacor DT-25N](#) mit Neodym-Magneten wieder, die als Dipol Rücken an Rücken montiert sind.

Alle Chassis sind günstig, bieten für ihren Preis aber einen hohen Gegenwert. Sie sind nicht auf hohen Wirkungsgrad und hohe Lautstärken ausgelegt. Nachbarschaftsfeindliche Hörpegel im Reihenhaus werden trotzdem erreicht.

Zuerst eine 0° - 90° -Messung (in 15° Schritten) der Hochtoneinheit aus 40 cm Entfernung. Sie wurde dabei von der Mittelton-Schallwand getrennt frei im Raum gemessen. Das Dipolverhalten im Hochtון zeigt konstante Richtwirkung bis 3

kHz, seitliches Aufblähen der Dipol-8 um 4 kHz und zunehmende Bündelung ab 5 kHz:

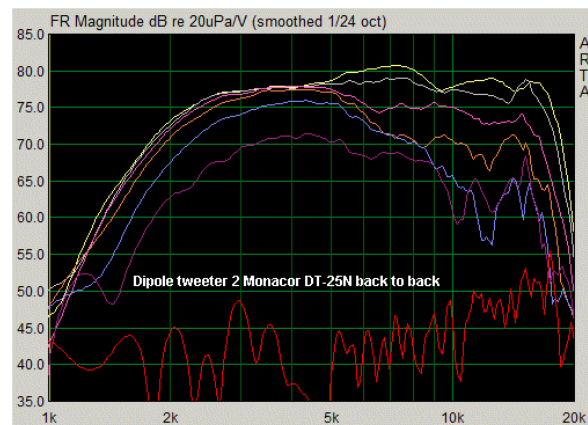


Abb. 5.24 Frequenzgänge Hochtון-Dipol allein

Zusätzlich zwei 90° -Messungen der kompletten Hoch/Mittelton-Einheit in 10° -Schritten aus 40 cm Entfernung. Um auch bei 200 Hz noch sinnvolle Messwerte zu erhalten, musste das Messfenster so groß gewählt werden, dass bei den 80° - und 90° -Messungen Raumeinflüsse stark mitwirken. Zur besseren Übersicht wurde außerdem stärker geglättet:

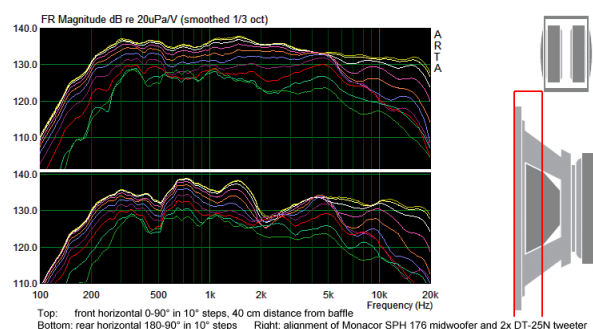


Abb. 5.25 Alte Frequenzgänge vorn/hinten 0,2-20 kHz

Der Hochtון-Dipol war noch wie in Abb. 5.22 montiert. Das führte zu einer gut sichtbaren Auslöschung im rückwärtigen Frequenzgang bei der Übergangsfrequenz von ca. 2 kHz.

Ein Vorziehen des Hochtון-Dipols um 4 cm ergab eine deutliche Verbesserung:



Abb. 5.26 Neue Anordnung des Hochtון-Dipols

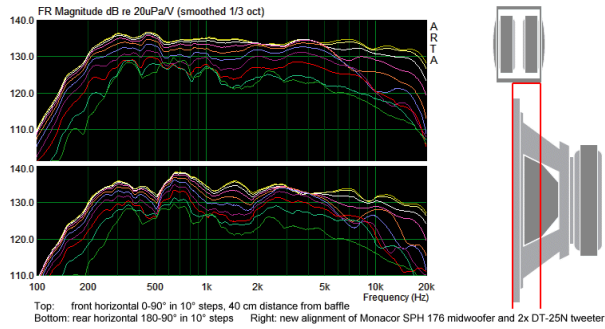


Abb. 5.27 Neue Frequenzgänge vorn/hinten 0,2-20 kHz

Aus diesen Messungen wurden Polardiagramme erzeugt. Im Bereich 250-2000 Hz verhält sich der Dipol wie erwartet – eine weitgehend ideale Dipol-8, die nur um 500 Hz einen deutlich verringerten Schalldruck auf der Rückseite zeigt:

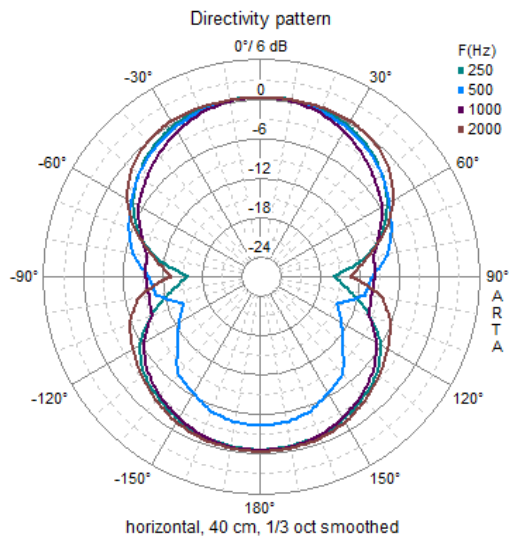


Abb. 5.28 Frequenzgänge 250-2000 Hz

Der Frequenzgang im Hochtון bis 5000 Hz:

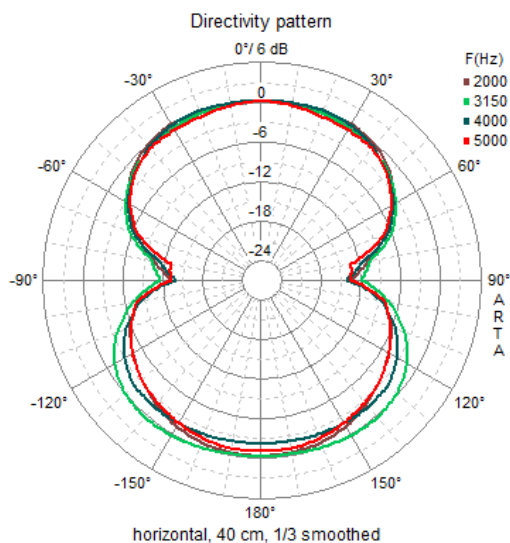


Abb. 5.29 Frequenzgänge 2000-5000 Hz

Dank der fehlenden Schallwand bläht sich die Dipol-8 nur geringfügig auf. Ab 5 kHz bündelt der Dipol dann immer stärker:

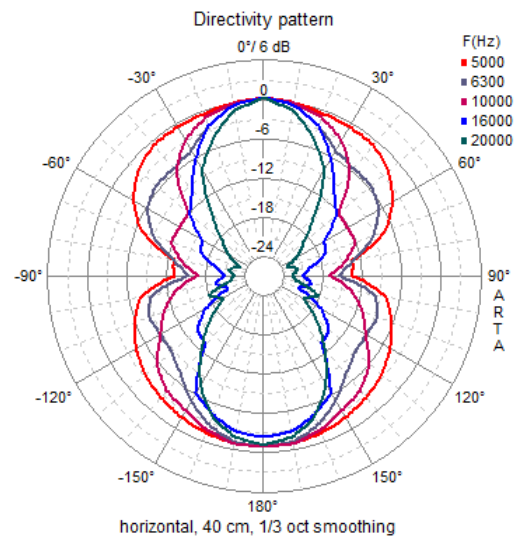


Abb. 5.30 Frequenzgänge 5-20 kHz

Auch hier sehen wir im Hochtון die klassischen Fehler einer zu großen Dipollänge, wie in Kap. 5.1 beschrieben. Um 3 kHz sind Interferenzen mit dem Mitteltönen sichtbar. Sie sind eine Folge des kleinen Messabstands und treten im Hörabstand nicht auf:

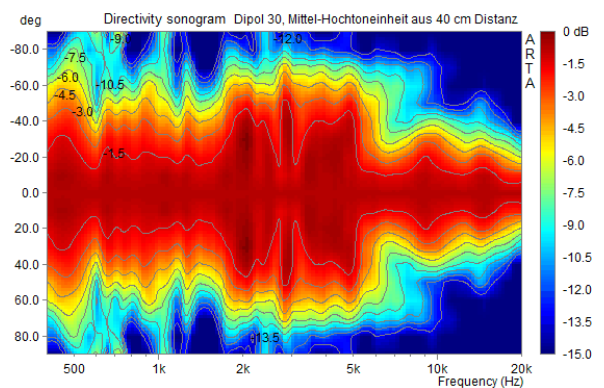


Abb. 5.31 Sonogramm der Mittel-Hochtoneinheit

Weiche und Verstärker

Mein System ist vollaktiv. Eingangsstufe ist die Behringer DCX 2496, die von DVD-Spieler und PC ausschließlich über SP/DIF versorgt wird. Die Übergänge zwischen den Treibern sind bei 300-400 Hz und bei 2,2 kHz. Die Abbildung zeigt eine Messung des linken Dipols am Hörplatz:

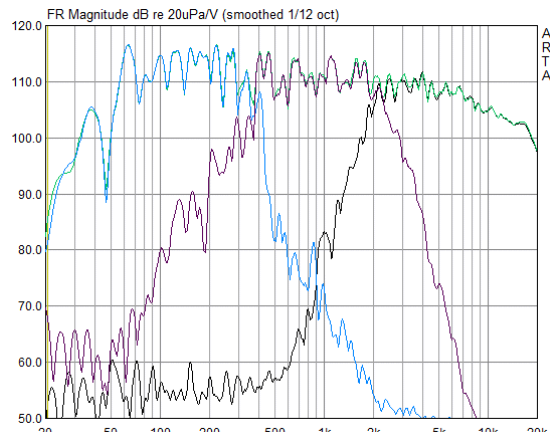


Abb. 5.32 Dipol 30 Übergangsfrequenzen

Die Filtereinstellungen der DCX gleichen im Wesentlichen den Dipolabfall von Tief- und Mitteltönen aus und heben den Hochton hinter der Dipolspitze an. Die unterschiedlichen Wirkungsgrade der Komponenten und die dadurch erforderliche Anhebung des Schalldrucks sind im Diagramm nicht berücksichtigt:

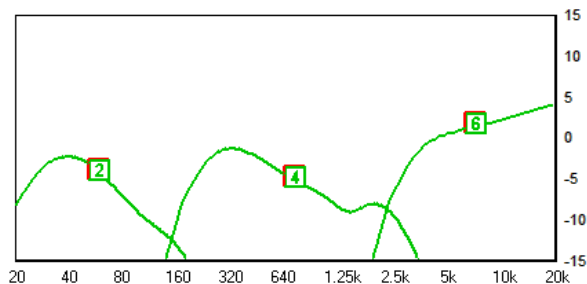


Abb. 5.33 EQ Einstellungen der DCX 2496

Die analogen Ausgangssignale des DCX gelangen über 10:1 Spannungswandler in die Mehrkanaleingänge eines 7.1-AV-Receivers Onkyo TX-SR505E, der auch die Lautstärkeregelung übernimmt.

Dieses System kann nach meiner Erfahrung mit viel teureren mithalten, solange die Lautstärkeanforderungen moderat bleiben. So etwas wie „Originallautstärke“ von Rockbands oder Symphonieorchestern bleibt allerdings ausgeschlossen.

Verhalten im Raum

Der Hörraum wurde akustisch völlig naturbelassen. Er enthält weder zusätzliche Diffusoren oder Absorber noch Basstraps. Allerdings wirken zusätzliche Trockenbau-Vorsatzwände zur Wärmeisolation an der Frontwand (hinter den Lautsprechern) und an der linken Seitenwand als Bassabsorber.

Für die Nachhallzeit wurden am Hörplatz diese Werte gemessen:

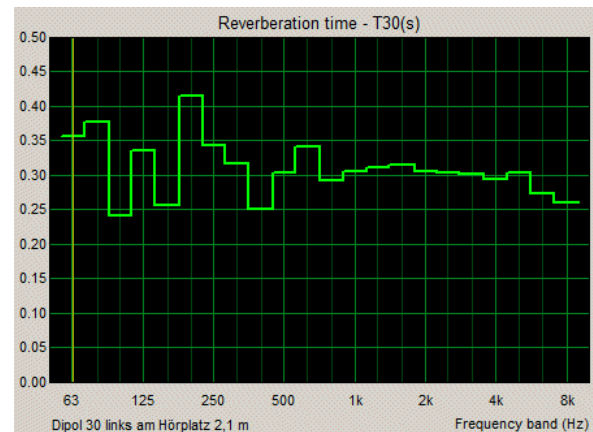


Abb. 5.33 Nachhallzeit T30

Die Nachhallmessung lässt sich auch als „burst decay“ darstellen. [Elias Pekonen](#) war so freundlich, meine [Messung](#) besonders eingängig als normalisiertes [Bark Wavelet](#) aufzubereiten:

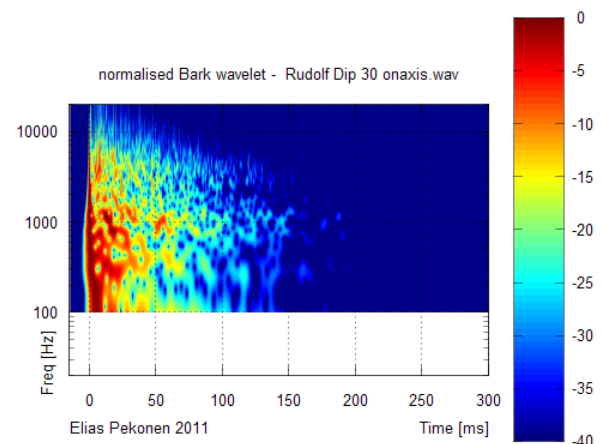


Abb. 5.34 Bark wavelet des Dipol 30 im Hörraum

Die Nachhallschleife wird nicht durch eine lange fallende Linie von links oben nach rechts unten begrenzt, wie es vielfach der Fall ist. Sie bildet eher ein Rechteck, bei dem hohe und tiefe Frequenzen ungefähr gleich schnell verfallen. Das ist nicht zuletzt auch ein Verdienst der vergleichsweise großen Hochtonenergie, die in den Raum abgegeben wird.

Obwohl die zur Rückseite des Dipols abgegebene Energie praktisch gleich groß ist wie die zur Vorderseite, entsteht keinesfalls ein verhallter oder diffuser Klangeindruck. Dafür sorgt die hohe Korrelation von Hoch-, Mittel- und Tieftönen. Sie macht es dem Gehirn einfacher, auch späte Reflektionen aus unterschiedlichen Richtungen dem ursprünglichen Signal zuzuordnen.

5.3 Meine Dipole – Swinger Club

Bei der Konstruktion dieses Systems stand das optimale Rundstrahlverhalten (vor allem nach vorn) im Zentrum. Das erforderte minimale Schallwandgrößen im Mittel- und Hochton. Das Ergebnis ist ein kompakter H-Dipol für den Bass mit einer frei aufgehängten Mittel-/Hochtonkombination:



Abb. 5.35 Swinger Club in zwei Entwicklungsschritten



Abb. 5.36 Swinger Club zweite Entwicklungsstufe

Verbaut sind je zwei [Visaton W 250](#) im Bass, ein [Peerless HDS PPB 4-25/8](#) und ein [Visaton FRS 5 X](#) als Konus-Hochtöner (siehe auch S. 19-20). Auch bei diesem System kommen also niedrigpreisige Chassis zum Einsatz.

Frequenzgänge (mit Klirr) an der Hörposition – zuerst links:

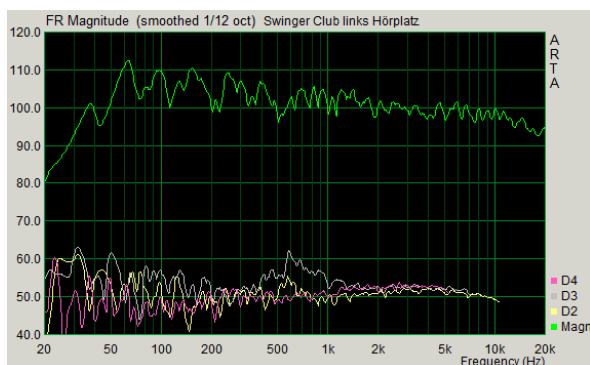


Abb. 5.37 Gesamtfrequenzgang links in 2 m Entfernung

Gut zu erkennen ist die erhöhte Beanspruchung des Mitteltöners am unteren Ende seines Übertragungsbereichs um 600 Hz.

Zusätzlich rechts:

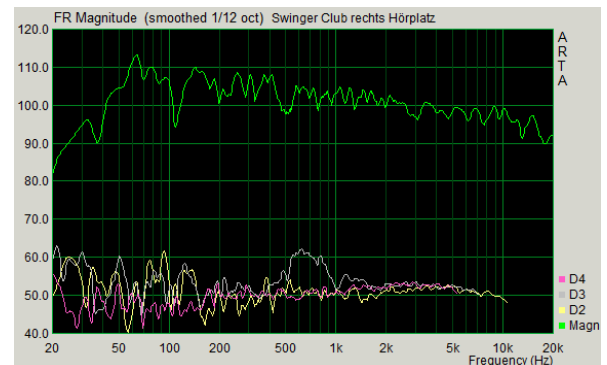


Abb. 5.38 Gesamtfrequenzgang rechts in 2 m Entfernung

Man vergleiche den deutlich abfallenden Frequenzgang am Hörplatz mit dem geraden Frequenzgang im Nahfeld:

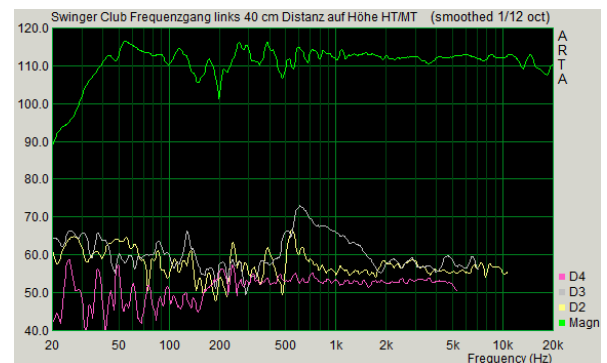


Abb. 5.39 Gesamtfrequenzgang links in 40 cm Entfernung

Es folgen die Einzelfrequenzgänge auf der 0°-Achse:

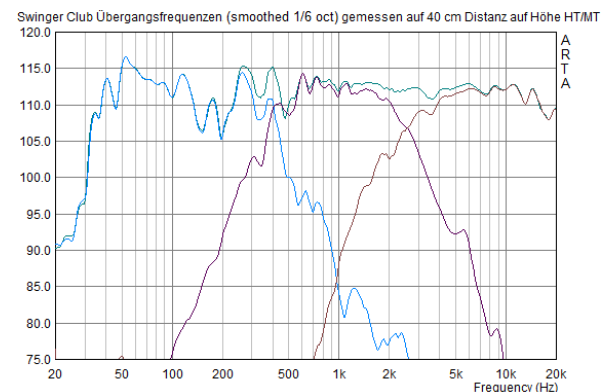


Abb. 5.40 Swinger Club Übergangsfrequenzen

Die Unregelmäßigkeit im Tiefton zwischen 100 und 500 Hz entstehen durch die Messung im Raum (Bodenreflexion und Messung schräg über H-Dipol).

Die Einstellungen der als Frequenzweiche fungierenden Behringer DCX 2496 unterscheiden sich trotz ähnlicher Übergangsfrequenzen deutlich vom System Dipol 30:

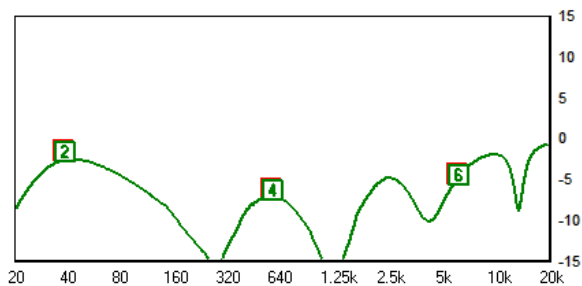


Abb. 5.41 EQ Einstellungen der DCX 2496

Der Hochtton zeigt deutlich, wie heftig ein Konus-Dipol den EQ-Bedarf steigern kann.

Dreht man zum Erzeugen von Polardiagrammen den Swinger Club im Raum, zeigt sich sehr schön die Trennung von modalem und nichtmodalem Bereich im Raum:

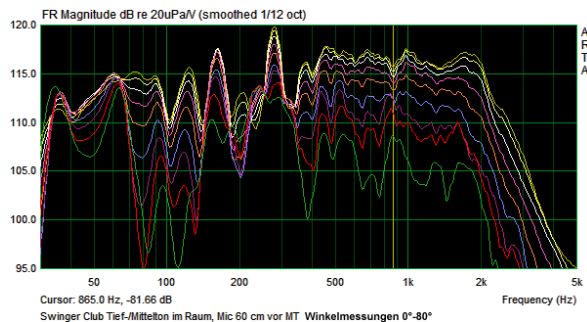


Abb. 5.42 Messung von Tief- und Mittelton unter Winkeln

Ab 500 Hz ist der Verlauf bis auf eine kleine Störung bei 860 Hz sehr ausgewogen. Unter 500 Hz bestimmt die vom Winkel abhängige Anregung der verschiedenen Raummoden das Bild. Ein Polardiagramm oder Sonogramm für den Bereich unter 500 Hz ist deshalb sinnlos. Über 500 Hz ist das Rundstrahlverhalten nach vorn bis 7 kHz ausgesprochen gleichmäßig:

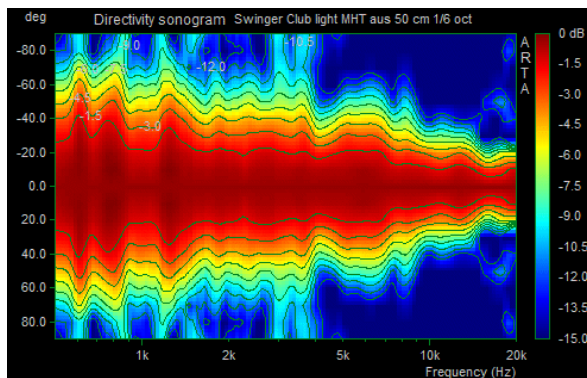


Abb. 5.43 Sonogramm der Mittel-/Hochtoneinheit

Der Unterschied zwischen Vor- und Rückseite des Swinger Club lässt sich nur an den nicht linearisierten Sonogrammen erkennen:

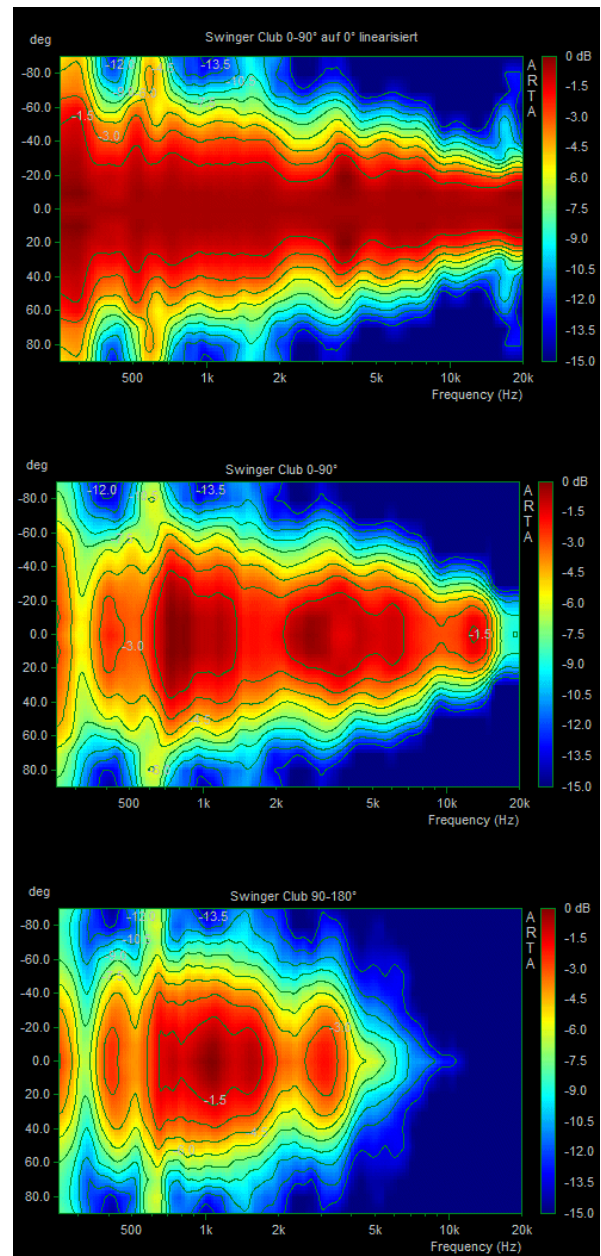


Abb. 5.44 Sonogramm der Mittel-/Hochtoneinheit

Bis 4 kHz ist das Frequenzverhalten der Rückseite ähnlich zur Vorderseite. Darüber klinkt sich die Rückseite schnell aus.

In der aktuellen Version sieht der Swinger Club Dipol etwas anders aus und hat ein anderes Hochtönochassis bekommen:



Abb. 5.45 Swinger Club dritte Entwicklungsstufe

Auch hier werden je zwei [Visaton W 250](#) im Bass und ein [Peerless HDS PPB 4-25/8](#) im Mittelton verwendet. Hinzu kommt ab 2 kHz ein B&G Neo 3 PDR als Hochtöner. Mittel- und Hochtönochassis werden jetzt getrennt aufgehängt:



Abb. 5.46 Aufhängung der Mittel-/Hochtoneinheit

Die Gesamtmessung unter Winkeln von 0-90°

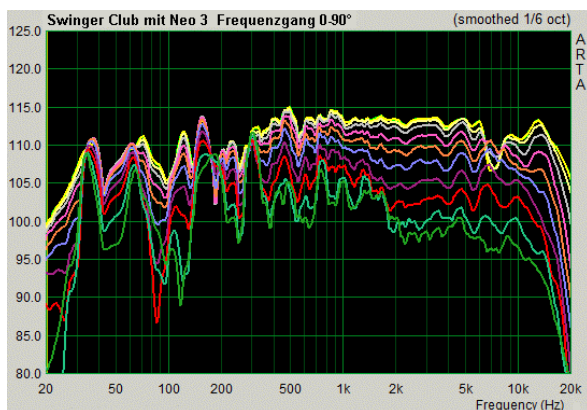


Abb. 5.47 Gesamtfrequenzgang 0-90°

Weil bei der Messung der Dipol um seine Achse gedreht wird, bestimmen auch hier bis 300 Hz die Raummoden das Bild. Man vergleiche mit Abb. 5.42. Bei 500 Hz ist der Übergang zum Mittelton, bei 2 kHz zum Hochtöner. Der Neo 3 strahlt etwas enger ab als der Tief- und Mitteltonbereich. Außerdem zeigt er auf Achse einen Einbruch bei 7-8 kHz, der erst unter 30° verschwindet. Das Sonogramm macht das deutlich:

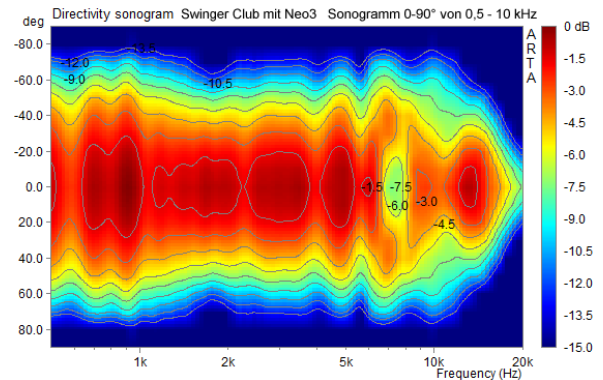


Abb. 5.48 Sonogramm von 500 Hz bis 10 kHz

Die leichte Verengung des Abstrahlbereichs von 1 auf 2 kHz ist auch hier zu sehen. Das gilt auch für das Polardiagramm:

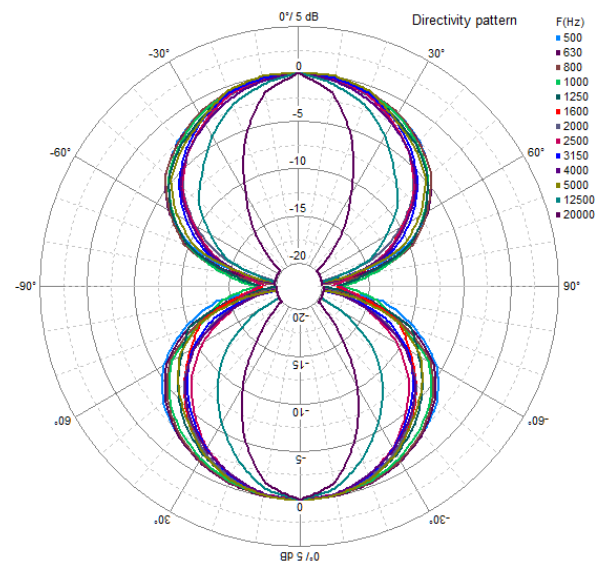


Abb. 5.49 Sonogramm von 500 Hz bis 10 kHz

Das Polardiagramm musste aus zwei Hälften (vorn/hinten) zusammengesetzt werden, da ARTA das Komplettdiagramm nicht korrekt wiedergibt. Das gleiche gilt für den Bereich des Einbruchs auf Achse von 6-10 kHz. Dieser wurde im Polardiagramm ausgespart.

Auch hier die Einstellungen der Behringer DCX 2496:

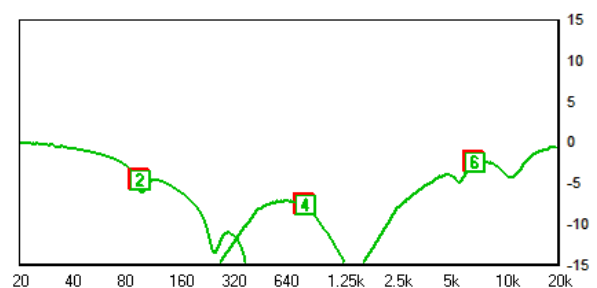


Abb. 5.50 EQ Einstellungen der DCX 2496

Die Entwicklung des Swinger Club ist [hier](#) übrigens noch viel ausführlicher beschrieben.

5.4 H-Dipole

Tiefe Frequenzen brauchen große Schallwände. Theoretisch möchten sie gern über 50 cm breit sein. Praktisch nehmen sie im Raum zu viel Platz weg und sehen nur selten gut aus.

Schmalere Schallwand

Große Schallwände werden kleiner, wenn man sie faltet. Die einfachste Form bildet dabei das U. Es entwickelt sich, wenn man die äußeren Teile einer breiten OB nach hinten klappt:

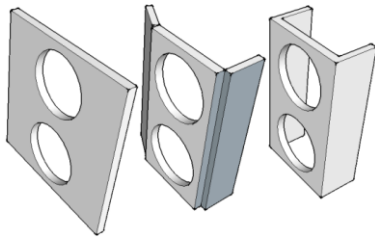


Abb. 5.51 Von der Offenen Schallwand zum U-Dipol

Für den Schall von der Rückseite nach vorn ergibt sich sogar eine Verlängerung des Umwegs (grün). Für den Schall von der Vorderseite nach hinten wird der Weg aber kürzer (rot).

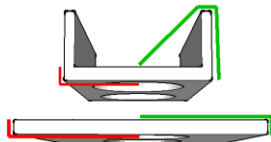


Abb. 5.52 Unsymmetrische Schallwege beim U-Dipol

Das führt dazu, dass der U-Dipol zu höheren Frequenzen die 8er-Charakteristik verliert und dann rund strahlt. Um das zu verhindern, ergänzt man die Seitenteile nach vorn und erhält einen vollsymmetrischen H-Dipol:

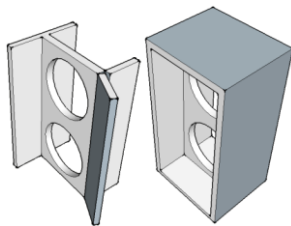


Abb. 5.53 Vom U- zum H-Dipol

So unterscheidet sich der Frequenzgang eines U-Dipols mit 12 cm Kammertiefe von einem H-Dipol mit 9 cm Kammertiefe:

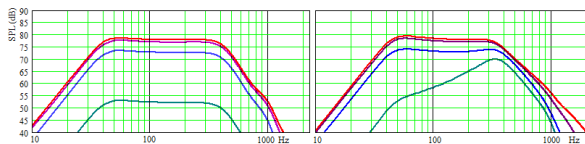


Abb. 5.54 Links H-Dipol, rechts U-Dipol

Simulation von 0, 30, 60 und 90°. Bei 300 Hz ist der U-Dipol weitgehend zum Rundstrahler geworden. Beide Dipole wurden mit dem gleichen Tiefpass 2. Ordnung linearisiert.

Wie unterscheiden sich die Frequenzgänge von H-Dipol und einer „gleichwertigen“ OB? Wir vergleichen bei identischer Frontfläche und ohne Filterung. Die Kammertiefe ist 9 cm:

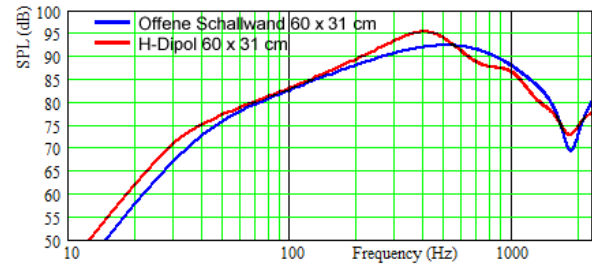


Abb. 5.55 Vergleich von Offener Schallwand und H-Dipol

Der H-Dipol gewinnt vor allem im Tiefton an Schalldruck. Man beachte bei der OB die Dipolspitze bei 500-600 Hz, während der H-Dipol eine ausgeprägte Spitze bei 400 Hz hat.

Tiefgang und Resonanzfrequenz

Für beides sind die Kammern des H-Dipols verantwortlich. Sie bilden jeweils eine $\lambda/4$ -Transmissionline, in der die eingeschlossene Luft mitschwingt. Dabei endet die Luftsäule nicht abrupt an der Kammeröffnung, sondern ragt in einem Kreisbogen darüber hinaus:

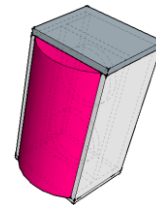


Abb. 5.56 Luftsäule in einem H-Dipol

Diese „Ausbeulung“ tritt nicht nur horizontal auf, sondern auch vertikal. Außerdem ist sie effektiv weit ausgedehnter als hier dargestellt. Deshalb ist $\lambda/4$ größer als die Kammertiefe L (hier 9 cm). Martin J. King gibt als Anhaltswert für diese L_{eff} an:

$$L_{eff} = L + 0,6 \times R_{eff}$$

Dabei ist R_{eff} der Radius eines Kreises mit dem gleichen Flächeninhalt wie die Kammeröffnung des H-Dipols. Für den hier dargestellten Fall ergibt sich eine Kammeröffnung von $56 \times 27 = 1512 \text{ cm}^2$. Das entspricht $R_{eff} = \sim 22 \text{ cm}$. Daraus erhält man $L_{eff} = 9 + 0,6 \times 22 \text{ cm} = \sim 22 \text{ cm}$. Da $L_{eff} = \lambda/4$, ergibt sich $\lambda = L_{eff} \times 4$ und daraus eine Frequenz von $\sim 390 \text{ Hz}$.

Die Kammerresonanz ist in der roten Kurve in Abb. 5.55 gut bei knapp 400 Hz zu sehen. Sie liegt auf der normalen Frequenzgangkurve einer resonanzlosen OB (blaue Kurve) auf. Sie ist also in diesem Fall nur 3-4 dB hoch.

Bei niedriger Frequenz erhöht die Luftlast vor der Membran den Parameter „mms“. Immerhin wiegt die Luft in den Kammern auf jeder Seite 13 g. Das „mms“ der simulierten Tieftöner Visaton W 250 ist jeweils 27 g. Es wächst durch die Luftlast auf das 1 1/2fache. Entsprechend unterscheiden sich die Einbau-Resonanzfrequenzen zwischen H-Dipol und OB:

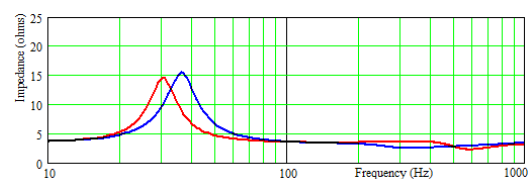


Abb. 5.57 Impedanz von H-Dipol (rot) und OB (blau)

Wer will, kann bei 400 Hz sogar eine leichte Resonanz des H-Dipols erkennen.

Entzerrung

Die Entzerrung eines H-Dipols ist im Allgemeinen einfach – besonders, wenn der Qts-Wert der Treiber > 0,5 ist. Dann reicht meistens ein verteilter Tiefpass 2. Ordnung aus:

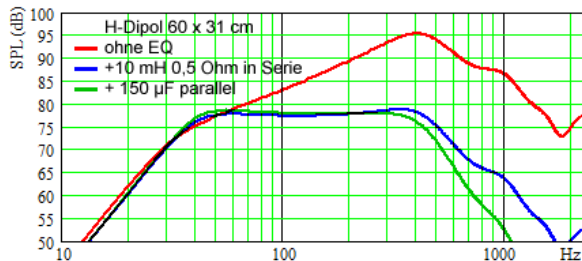


Abb. 5.58 Entzerrung des H-Dipols mit Tiefpass 2. Ordnung

Mit passender Serienspule zieht man den Frequenzgang ab der Resonanzfrequenz des Treibers gerade. Ein Kondensator parallel zum Treiber kontrolliert die $\lambda/4$ -Resonanz und senkt darüber den Mittelton weiter ab. So kann man den H-Dipol in maximaler Bandbreite nutzen.

Wenn ein aktives Subwoofer-Tiefpassfilter im Bereich 80-200 Hz eingesetzt wird, kann der Kondensator natürlich entfallen.

Variation von Kammertiefe und -breite

Durch Vergrößern der Kammertiefe kann man den Tiefton eines H-Dipols nach unten erweitern. Gleichzeitig prägt sich die $\lambda/4$ -Resonanz deutlicher aus und wandert zu niedrigerer Frequenz:

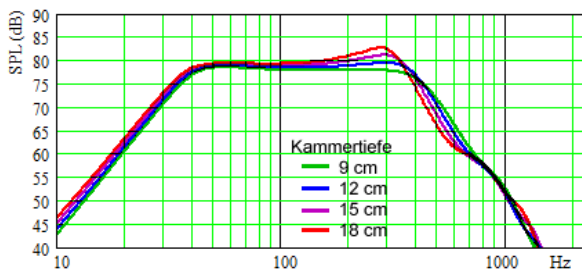


Abb. 5.59 Die Kammertiefe steigt von 9 auf 12, 15 und 18 cm

Zum Vergleich der Unterschied zwischen 9 und 18 cm Kammertiefe mit passender Korrektur der $\lambda/4$ -Resonanz:

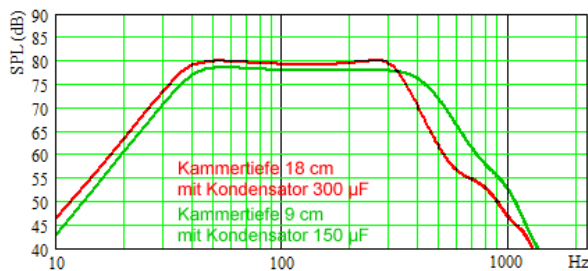


Abb. 5.60 Unterschied zwischen 9 und 18 cm Kammertiefe

Wenn man den H-Dipol nicht wesentlich tiefer als breit macht, ist die Kontrolle der $\lambda/4$ -Resonanz kein Problem.

Der hier beschriebene H-Dipol hat zwei Treiber übereinander. Man kann genauso gut auch mit einem oder drei Treibern bauen. In allen Fällen sollte das Gehäuse nicht viel höher oder breiter sein, als man für das Chassis Platz braucht.

Zum Vergleich hier der bisher verwendete H-Dipol mit 31 cm Breite im Vergleich zu 51 cm Breite:

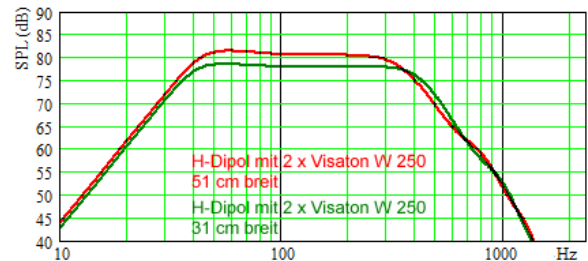


Abb. 5.61 Verstrebung ja – Dämmung nein!

Man gewinnt praktisch nichts an Tieftgang – nur der Wirkungsgrad wird besser. Aber auch nur in einem Bereich, in dem der Wirkungsgrad nicht mehr entscheidend ist. Wenn ein breiteres oder höheres Gehäuse gewünscht wird, sollte man über ein größeres Chassis nachdenken.

Optimierung

Ein H-Dipol ist weniger stabil als eine gleich große Box, weil Vorder- und Rückwand fehlen. Deshalb sollten bei H-Dipolen mit mehreren Treibern Zwischenwände eingesetzt werden. Diese beeinträchtigen in keiner Weise die akustische Wirkung der Kammern.

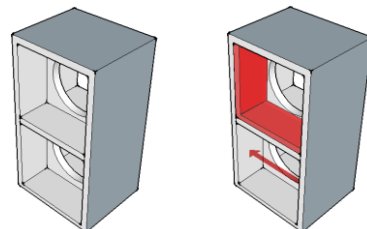


Abb. 5.62 Verstrebung ja – Dämmung nein!

Völlig überflüssig ist eine Bedämmung der Kammern. Im Nutzungsbereich unter 500 Hz gibt es keine Resonanzen zwischen den Seitenwänden der Kammern.

Alle bisherigen Simulationen des H-Dipols berücksichtigen nicht den Einfluss des Bodens. Stellt man den H-Dipol auf den Boden, wird der Tieftass um 6 dB angehoben.

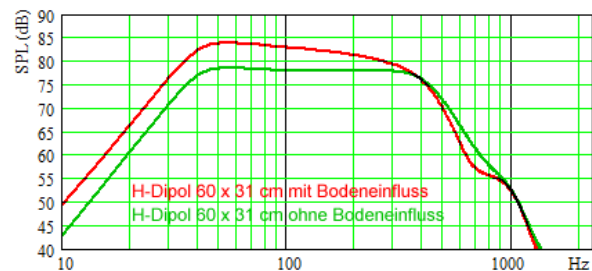


Abb. 5.63 Verstärkung des Tieftasses durch Bodenreflexion

6 Dipol und Raum

Ein Lautsprecher kann noch so gut konstruiert sein – wie gut er letzten Endes klingt, hängt sehr vom Raum ab, in dem er spielt. Dabei geht es nicht nur um ausgewogenen Klang, sondern auch um die beeindruckende Stereoperspektive, die Dipole aufbauen können. Die richtige und exakte Aufstellung der Lautsprecher im Raum hat daran großen Anteil.

6.1 Aufstellung

Dipole können hinter sich einen breiten, tiefen und detaillierten Klangraum erzeugen, der sich gegebenenfalls bis weit hinter die Frontwand erstreckt:



Abb. 6.1 Klangperspektive

Um das voll auszuschöpfen, braucht man eine symmetrische Stereowiedergabe, die nicht durch stark unsymmetrische Raumeinflüsse gestört wird. Deshalb sollte man möglichst auf einer Mittelachse des Raums sitzen und die Lautsprecher gleich weit von den Seitenwänden aufstellen.

Wie schnell man sich vom Optimum entfernt, zeigt ein kleines Experiment: Zwei Dipole stehen mit genau gleichem Abstand zur Mittelachse eines symmetrischen Raums. Dann gibt man ein Mono-Signal auf beide Dipole und misst den Schalldruck am Hörplatz (grün). Diese Summe sollte ca. 6 dB lauter sein als der Schalldruck jedes einzelnen Lautsprechers (rot/blau):

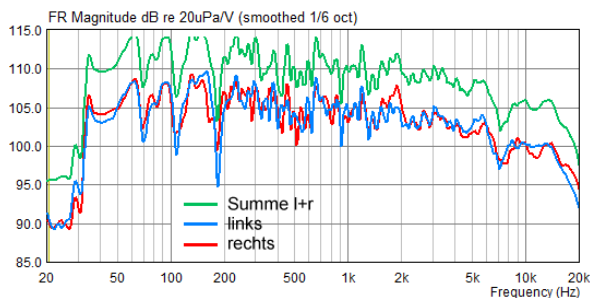


Abb. 6.2

Dann verpolt man einen Lautsprecher und misst wieder (rot). In einem akustisch ideal symmetrischen Raum müsste sich der Schall von beiden Seiten komplett auslöschen. In realen Räumen ergibt sich ein Abstand zwischen beiden Kurven:

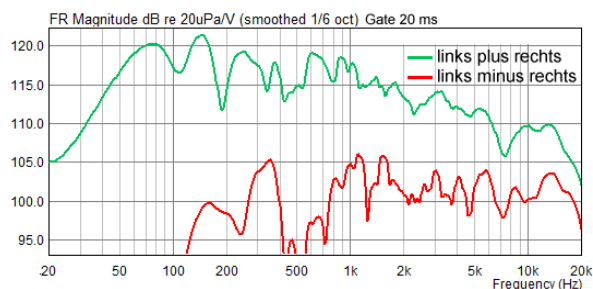


Abb. 6.3 Messung auf Raum-Mittelachse

Bei den großen Wellenlängen tiefer Töne wirken sich kleine Unregelmäßigkeiten im Raum kaum aus. Bei 10 kHz und 3,4 cm Wellenlänge sorgen bereits eine Kommode links an der Wand und ein Sofa rechts gegenüber für messbar geringere Symmetrie und damit weniger Auslöschung. Die Messungen spiegeln das wider. Es werden nur die ersten 20 ms ausgewertet, da sie für den räumlichen Eindruck maßgebend sind

Bewegt man jetzt den Kopf nur 20 cm zur Seite, verändert sich das Bild bereits dramatisch:

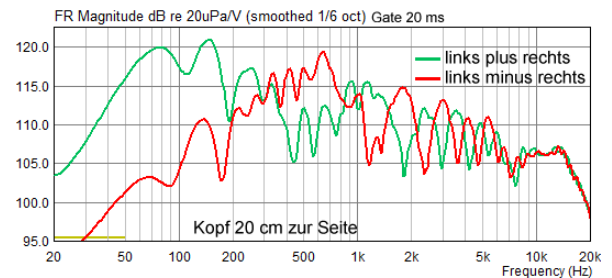


Abb. 6.4 Messung 20 cm seitlich von Raum-Mittelachse

Nicht ganz so dramatisch ist die Wirkung, wenn man statt der Hörposition einen der Dipole aus der Symmetrie verschiebt:

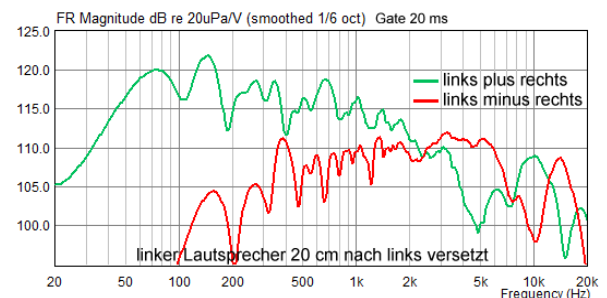


Abb. 6.5 Lautsprecher 20 cm nach außen verschoben

Die dargestellten Unterschiede lassen sich nicht ausgleichen, indem man den Balanceregler verstellt oder ein Delay für einen Kanal hinzu gibt. Ein bedeutender Teil der Stereoperspektive geht unrettbar verloren, wenn man nicht in einem symmetrischen Stereodreieck hört bzw. sich dieses nicht symmetrisch im Raum befindet.

Wohlgemerkt: Diese Kurven zeigen nicht, wie gut das Ohr Stereo hört – oder nicht. Sie sind auch nicht dipol-spezifisch, sondern gelten für alle Lautsprecher. Und sie sagen auch nichts über den Klangeindruck aus. Aber sie zeigen, wie schnell der von den Raumwänden zurückgeworfene Schall seine Symmetrie verlieren und damit den Stereoeindruck verwässern kann.

Im Übrigen gilt allgemein:

Dipole sollten mindestens 1 m vor der Frontwand stehen. Der Hörplatz sollte ebenfalls mindestens 1 m von der Rückwand entfernt sein. Der Abstand zur Seitenwand darf abhängig von der Ausrichtung der Lautsprecher auch sehr klein werden.

Größere Abstände verbessern die Stereowirkung, verkleinern aber auch das Stereodreieck – bis sich die optimale Hörzone möglicherweise auf nur noch eine Kopfbreite beschränkt. Der Kompromiss zwischen Qualität und Mehrhörertauglichkeit muss jeweils individuell gefunden werden.

6.2 Reflexionen

Gut gemachte Dipole zeichnen sich durch eine gleichmäßige und weitgehend frequenzneutrale Dipol-8 mit breiter und tiefer seitlicher Einschnürung aus. Das sollte man nutzen, um

- die frühesten Reflexionen so weit wie möglich aus diesen „Schalldrucklöchern“ heraus zu „bedienen“ und
- möglichst viel von den späteren breitbandigen Reflexionen im Raum zu erhalten.

Das funktioniert bereits in wirklich kleinen Räumen, wenn die Dipole optimal platziert und ausgerichtet werden. [James Heddle](#) hat dafür ein [Excel-Formular](#) entwickelt, das die frühen Reflexionen für omnipolare und dipolare Abstrahlung simuliert. Unser Beispiel strebt eine Mindestverzögerung von 6 ms bei einer Mindestabschwächung von 15 dB am Hörplatz an. Das kann schon bei einer Raumgröße von 3,7 x 3,5 m gelingen – mit diesen Eingaben:

Loudspeaker Separation m	1,200
Loudspeaker Toe-in, degrees	45,0
Listener's Distance from line between Loudspeakers m	1,000
Room Height m	2,400
Loudspeaker Distance to Front Wall m	1,100
Loudspeaker Distance to Closest Sidewall m	1,250
Distance to Wall Behind Listener m	1,400
Listener Height m	0,900
Loudspeaker Height m	0,900

Abb.6.6 Eingabewerte für Raum von 3,7 x 3,5 m Größe

		Closest Sidewall	Front Wall	Front Corner
Reflection Level dB	Reflection	-18,5	-16,6	-17,4
Delay, msec		6,1	6,1	9,5
Rear Wall	Rear Corner	Furthest Sidewall	Ceiling	Floor
-14,9	-38,1	-15,7	-20,6	-13,6
7,8	10,8	9,4	6,0	2,8

Abb.6.7 Berechnung für Dipol mit 45° Einwinkelung

Das Ergebnis beweist die große Wirkung der Einwinkelung:

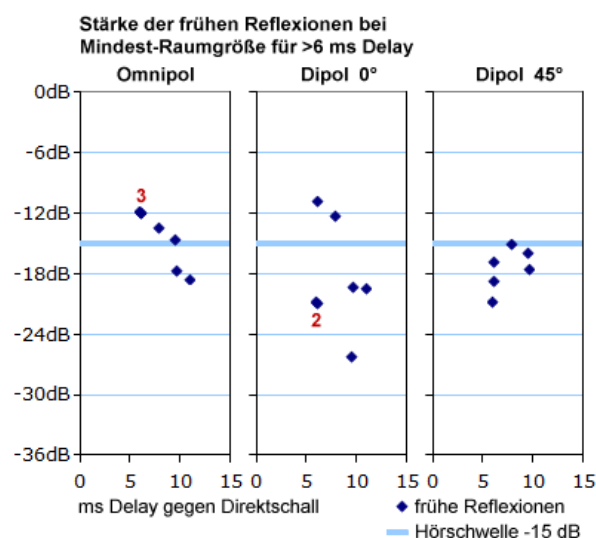


Abb.6.8 Zeitpunkt und Stärke der ersten 7 Reflexionen (ohne Fußboden). Rote Ziffern für Anzahl der überlagerten Werte

Bei gleicher Position der Lautsprecher im Raum haben alle Bauformen gleiche Verzögerungszeiten. Bei der Stärke der Reflexionen kann der Dipol die 8er-Charakteristik ausspielen. Schon ohne Einwinkelung auf den Hörplatz (0°) verbessern sich die Reflexionswerte erheblich. Die Einwinkelung von 45° drückt alle frühen Reflexionen unter -15 dB.

Ein praktisches Beispiel

Die Skizze zeigt die Umsetzung in meinem Hörraum. Die gezeichnete Aufstellung weicht etwas von der später gemessenen ab. Die kleine Tabelle zeigt berechnete Werte für Dämpfung und Verzögerung der vier Reflexionen:

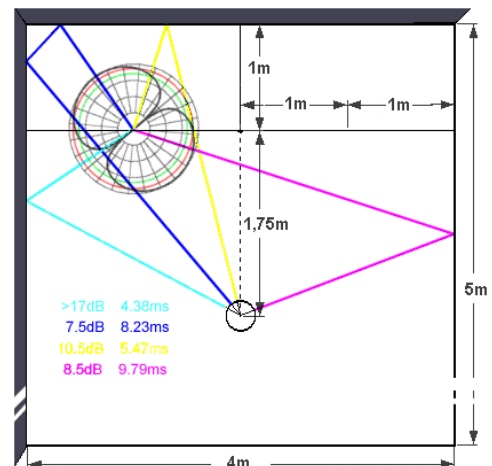


Abb.6.9 Horizontale erste Reflexionen von vorn

Der linke Dipol ist je 1 m von Frontwand und linker Seitenwand entfernt und auf den Hörer ausgerichtet. Die früheste Reflexion (türkis = Closest Sidewall) geht über die linke Seitenwand und kommt fast genau aus der Dipol-Null. Da diese mindestens 12 dB „tief“ ist, kommt die erste Reflexion mindestens 17 dB leiser als der Direktschall ans Ohr. Eine Bedämpfung der Wand ist überflüssig.

Die zweite Reflexion (blau = Front Corner) kommt aus der vorderen Ecke. Sie hat den vollen Pegel und kommt praktisch aus Richtung des Lautsprechers. Unbedämpft zieht sie das Stereopanorama noch weiter in die Ecken, was bombastisch klingen kann. Dabei wird aber der Raum zwischen Ecke und Mittenphantom akustisch ausgedünnt. Also besteht Handlungsbedarf.

Die dritte Reflexion (gelb = Front Wall) ist nur gering abgeschwächt und hat geringen Umweg. Zudem kommt sie aus dem Raum zwischen den Lautsprechern. Diese Reflexion führt zu Unruhe bei Phantomquellen, die zwischen Stereomitte und Lautsprecher liegen. Sie wandern je nach Frequenz. Auch hier muss gehandelt werden.

Die vierte Reflexion (lila = Furthest Sidewall) hat wieder vollen Pegel, aber einen langen Umweg. Außerdem trifft sie von der kontralateralen Seite ein. Eine Wandbedämpfung ist überflüssig.

Ich habe an den Spiegelpunkten der zweiten und dritten Reflexion je eine 4 cm starke und 50x50 cm große Basotect-Platte angebracht. Ihre Wirkung zeigt das Impulsdiagramm:

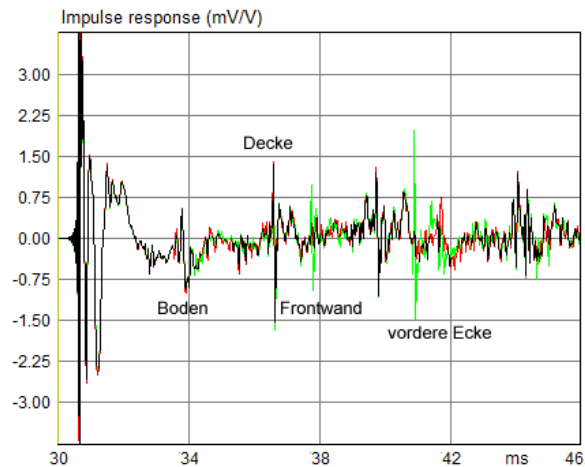


Abb.6.10 Absorption der ersten Reflexionen

Beide Reflexionen (grüne Spitzen) werden fast komplett ausgeschaltet. Die Zeiten stimmen nicht genau mit den Zeiten im Grundriss oben überein, weil das Stereodreieck anders ist.

Die Dämpfung von 41 mm Basotect setzt bei ca. 500 Hz ein:

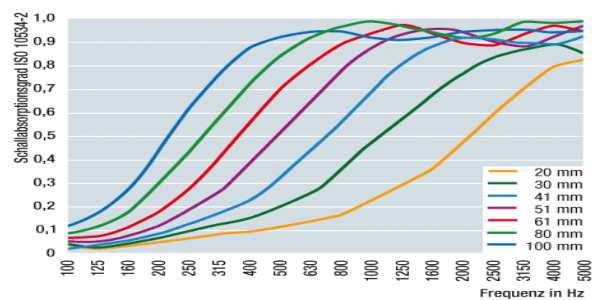


Abb.6.11 Absorptionsverhalten von Basotect

Abb. 6.10 zeigt, dass trotzdem die Reflexionen ausreichend unterdrückt werden. Außerdem werden Attribute wie Richtung und Größe einer Phantom-Schallquelle hauptsächlich im Frequenzbereich 0,5-5 kHz bestimmt:

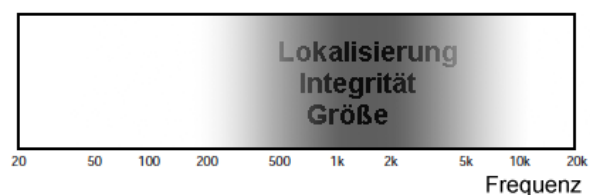


Abb.6.12 nach Toole

Statt einer Bedämpfung bietet sich – etwa in der Raumecke – alternativ eine Diffusion an, z.B. durch eine Zimmerpflanze. Großflächige Lösungen, wie etwa in Tonstudios zu sehen, sind hier völlig überflüssig.

7 Frequenzgangkorrektur

Bereits im Vorwort wurde erwähnt, dass der Frequenzgang eines Dipols-Lautsprechers durch die Schallwand verändert wird und korrigiert werden muss. Die Strategie dazu unterscheidet sich vom Vorgehen bei üblichen Lautsprechern. Sie wird deshalb im Folgenden ausführlich beschrieben.

7.1 Der Korrekturbereich

Die Korrektur eines Dipol-Frequenzgangs ist nur in einem bestimmten Bereich sinnvoll. Um diesen Bereich zu verstehen, betrachten wir in Boxsim die verschiedenen Einflüsse am Beispiel des Tieftöners Visaton WS 25 E, der auf einer 100 x 40 cm großen Schallwand mittig auf 80 cm Höhe montiert ist:

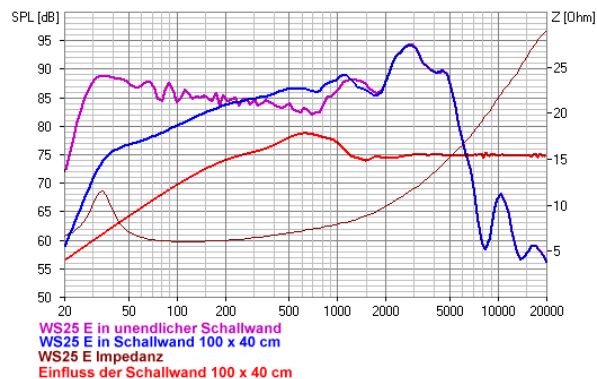


Abb.7.1 Frequenzgang WS 25 E in Schallwand

Die lila Kurve ist der Frequenzgang des WS 25 E in unendlicher Schallwand. Die hohe Güte ($Q_{ts}=1,43$) sorgt dafür, dass der Frequenzgang zu tiefen Frequenzen hin ansteigt. Unter der Resonanzfrequenz von 34 Hz (vergl. Impedanzkurve) fällt der Frequenzgang steil ab. Oberhalb von 700 Hz verläuft die lila Kurve unregelmäßig. Möglicherweise verlässt das Chassis hier seinen linearen Bereich und es kommt zu Resonanzen/Eigenschwingungen in Konus bzw. Aufhängung.

Die rote Kurve ist die Edge-Simulation der Schallwand. Sie stellt praktisch die Frequenzgang-„Verbiegung“ durch diese Schallwand dar. Man beachte die Ähnlichkeit mit der Kurve für $b=a$ in Abb. 3.3 auf Seite 10. Die Dipolspitze liegt bei 600-700 Hz, die kaum erkennbare erste Senke bei 1,2-1,4 kHz. Bezugsniveau der roten Linie ist hier die 75 dB Linie. Sie entspricht der gestrichelten Linie für $b=\infty$ in Abb. 3.3.

Wenn die rote Linie unter 75 dB fällt, muss der entsprechende Wert von der lila Kurve abgezogen werden. Jede Erhebung über 75 dB wird zur lila Kurve hinzuaddiert. Auf diese Weise entsteht die blaue Kurve für den Frequenzgang des WS 25 E in der gewählten Schallwand.

Die gerade blaue Kurve macht in dieser Simulation den Eindruck, als läge der nutzbare Bereich bei 40-1000 Hz. Die rote und lila Kurve sagen uns aber unabhängig voneinander, dass am oberen Ende bei 800 Hz Schluss sein muss. Am unteren Ende gibt die Resonanzfrequenz die Grenze vor. Es macht keinen Sinn, den Abfall unterhalb von 34 Hz in irgendeiner Weise anzuheben. Mit diesem Wissen stellen wir jetzt einen sinnvollen linearen Frequenzverlauf her.

7.2 Die Korrekturmaßnahmen

Die Korrektur wird mit aktiver und passiver Entzerrung dargestellt. Boxsim erlaubt beide Verfahren. Der hohe Q_{ts} -Wert des WS 25 E macht diese Korrekturen besonders einfach und damit übersichtlich. Wir müssen davon ausgehen, dass die Korrektur für Chassis mit niedrigem Q_{ts} aufwändiger ausfällt.

Aktive Entzerrung

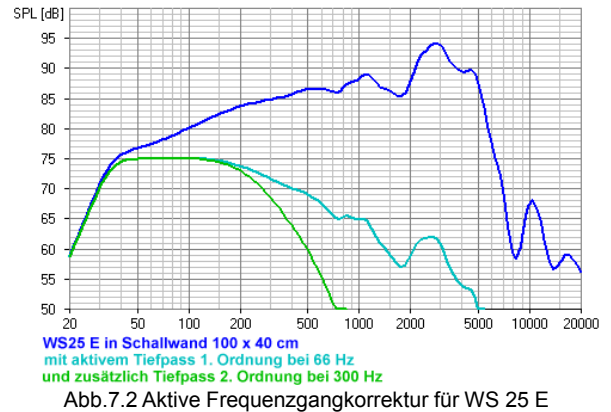


Abb.7.2 Aktive Frequenzgangkorrektur für WS 25 E

Die blaue Linie entspricht dem unentzerrten Fall in Abb. 7.1. Ein Tiefpass 1. Ordnung bei 66 Hz reduziert den Frequenzgang auf ein lineares Niveau bei 75 dB (türkis). Um den Einsatzbereich am oberen Ende sinnvoll abzuschließen, wird zusätzlich ein Tiefpass 2. Ordnung bei 300 Hz gesetzt (grün).

Dieser Einsatz ab 30 Hz stellt hohe Anforderungen an das Hubvermögen eines WS 25 E. Entsprechend gering ist die Lautstärke, die das Chassis erreichen kann. Alternativ stelle ich eine Korrektur vor, die den WS 25 E vom Tiefton entlastet. Sie erfordert einen zusätzlichen Subwoofer mit Trennung bei 80 Hz:

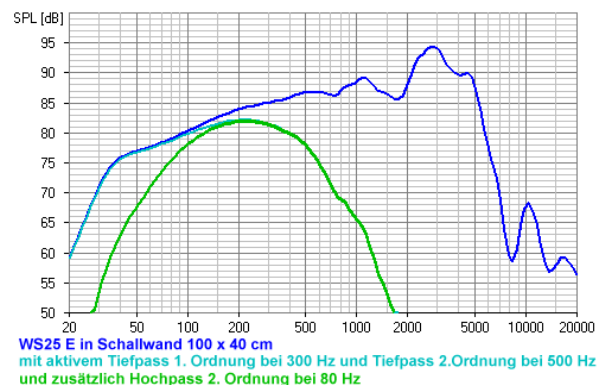


Abb.7.3 Alternative Korrektur für zusätzlichen Subwoofer

Blau ist wieder der nicht entzerrte Fall. Türkis (bei höheren Frequenzen von grün verdeckt) kombiniert einen Tiefpass 1. Ordnung bei 300 Hz mit einem Tiefpass 2. Ordnung bei 500 Hz. Grün enthält zusätzlich die Tiefton-Entlastung durch einen Hochpass 2. Ordnung bei 80 Hz. Auf diese Weise deckt der WS 25 E den Bereich von 80-600 Hz ab.

Passive Entzerrung

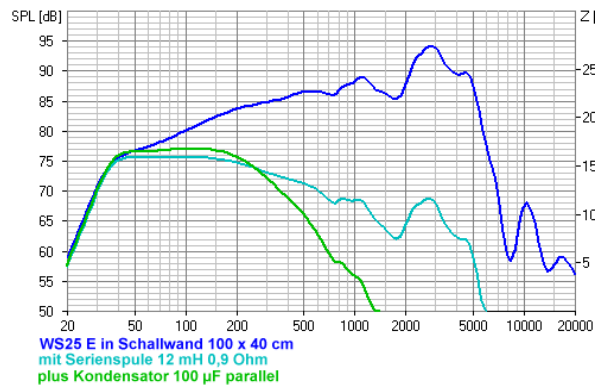


Abb.7.4 Passive Frequenzgangkorrektur für WS 25 E

Auch passiv gelingt die Entzerrung ab 30 Hz sehr gut. Eine Serienspule mit 12 mH und 0,9 Ohm zieht den Frequenzgang flach (türkis). Ein zusätzlicher Kondensator 100 µF parallel zum Chassis stellt über 200 Hz eine brauchbare Tiefpassflanke her (grün). Die LC-Kombination sorgt sogar um 40 Hz für einen kleinen Tiefbassgewinn gegenüber dem unbeschalteten Chassis.

Die zusätzliche Tiefbassabsenkung gelingt nicht genauso elegant. Außerdem wird die Impedanz strapaziert:

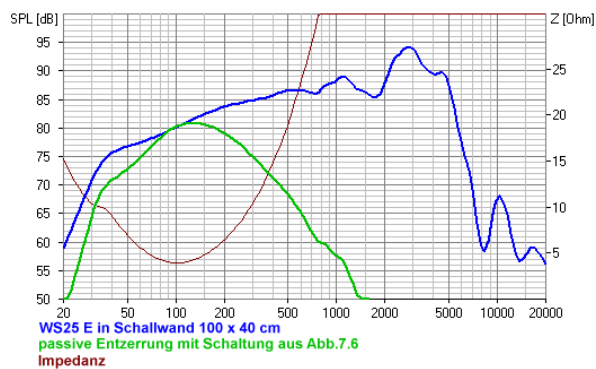


Abb.7.5 Passive Korrektur für zusätzlichen Subwoofer

Erforderlich ist eine etwas komplexere Beschaltung:

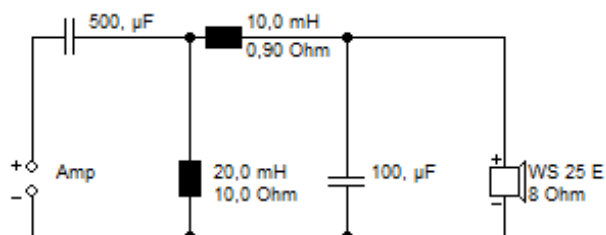


Abb.7.6 Passive Korrektur für zusätzlichen Subwoofer

Für Chassis mit niedrigem Q_{ts} wird es viel aufwändiger, passive Korrekturen für den Dipoleinsatz herzustellen. Das zeigt sich etwa beim Visaton TIW 250 XS mit $Q_{ts} = 0,33$. Ein halbwegs linearer Einsatz ab 40 Hz gelingt nur mit massiven Spulen und der Ausnutzung von kritischen Impedanzminima:

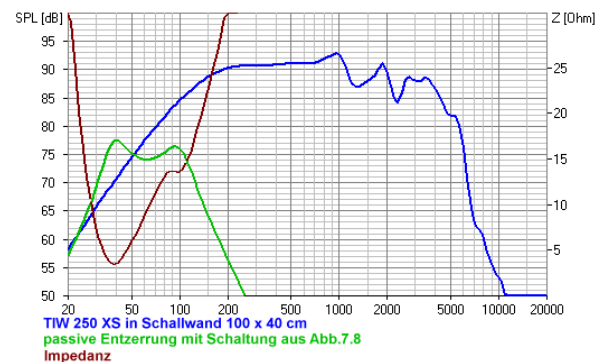


Abb.7.7 Passive Frequenzgangkorrektur für TIW 250 XS

Man vergleiche mit Abb. 7.4. Die notwendige Weiche ist ein wahres Kupfergrab:

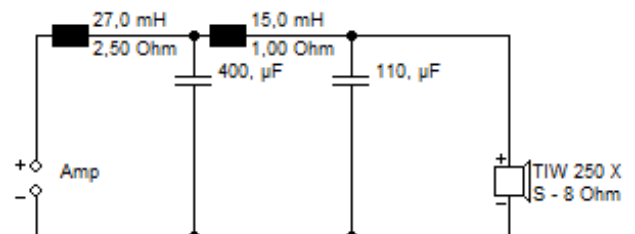


Abb.7.8 Passive Frequenzgangkorrektur für TIW 250 XS

8 Meine Dipol-Geschichte

In 10 Jahren von 0 auf 100

2003 Bau der ersten OB mit Fostex FF85K

2003 OB mit Mivoc MHE –
schmale Schallwand mit breiten Flügeln:



2004 TQWT auf N-Frame („Ripol“) mit Visaton W 250:



2005 M-Frame mit Visaton W 250:



2006 M-Frame mit Veravox 3 in OB:



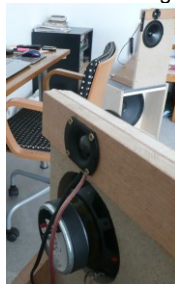
2007 Coax Dipol auf H-Frame



2008 OB mit aufgesetztem HT auf H-Frame:



2008 OB mit eingesetztem HT-Dipol auf H-Frame:



2009 Schmale OB mit aufgesetztem HT-Dipol:



2010 OB mit aufgesetztem HT-Dipol ohne Schallwand:

