

Photo Story

Dipol und Cardioid Lautsprecher

Ein aktuelles Thema der Lautsprechertechnik ist der Dipol Subwoofer. In der Literatur sind nicht alle Beschreibungen richtig. Diese Untersuchung soll zum einen die akustischen Eigenschaften der Dipol und Cardioid Lautsprecher beschreiben und zum anderen eine Ausführungsform liefern. Der aus der Forschung abgeleitete Dipol-Cardioid Subwoofer besitzt gegenüber den bekannten Dipol oder Cardioid Lautsprechern einen besseren Wirkungsgrad, ausgeglichenen Frequenzgang und einfacheren Aufbau.

Das Team



Michael Borowski,
unser Techniker



Dipl.-Ing. Leo Kirchner
der Autor

Eine Entwicklung der
Kirchner elektronik
Brunnenweg 10
D-38118 Braunschweig
Telefon: +49531 46412

Inhaltsverzeichnis

Photo Story	1
1. Mikrofone	3
2. Schallausbreitung	6
2.1 Schallausbreitung im Tieftonbereich	6
2.2 Schallausbreitung im Mitteltonbereich	9
2.3 Schallausbreitung im Hochtonbereich	9
3. Die offene Schallwand	11
3.1 Der akustische Kurzschluss	11
3.2 Die Nahfeldmessung und der akustische Kurzschluss	14
3.3 Dipollautsprecher Ausführungen mit zwei Tieftönern	15
3.4 Die Thiele-Small Parameter vom Doppelbass mit V-Anordnung	18
4. Der gesteuerte akustische Kurzschluss	19
4.1 Der Cardioid Lautsprecher	19
4.2 Der Dipol mit Schallführung	19
5. Der Dipol-Cardioid Lautsprecher	20
5.1 Aufbau	21
5.2 Frequenzgang	21
5.3 Thiele-Small Parameter	23
5.4 Polarplots	24
5.5 Aufstellung im Raum	25
5.6 Vorteile des Dipol-Cardioid Subwoofers	26
6. Vergleichende Messungen	27
6.1 Frequenzgänge	27
6.2 Akustische Phase	28
6.3 Einschwingen	30
6.4 Sprungantwort	32
7. Anhang	34
7.1 Gehäusezeichnung für Diopol-Cardioid	34

1. Mikrofone

Für akustische Messungen sind Mikrofone notwendig. Als erstes werden die verwendeten Mikrofone vorgestellt.

Mikrofone für die Messtechnik lassen sich im Allgemeinen in zwei Gruppen einteilen: Die Druckwandler mit der Kugelcharakteristik und die Schnellewandler mit der Achtercharakteristik.

Kugelcharakteristik

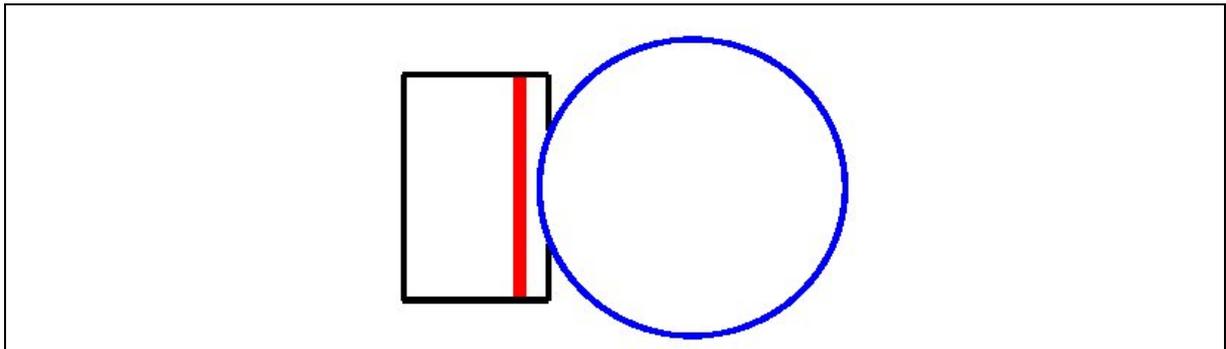


Bild 1.1

Bei der Kugelcharakteristik ist hinter der Membran (rot) ein geschlossenes Gehäuse (Bild 1.1). Das Mikrofon reagiert dadurch auf Druckänderungen. Durch den Gegendruck der im Mikrofongehäuse eingeschlossenen Luft kann die Membran der Schnellenbewegung der Luftmoleküle nicht folgen. Mikrofone mit Kugelcharakteristik sind in ihrer Empfindlichkeit nicht richtungsabhängig, daher ist der Aufnahmebereich (blau) kreisförmig.

Diese Mikrofone werden in der Messtechnik hauptsächlich benutzt. Sie besitzen den linearsten Frequenzgang.

Auch das Ohr ist ein Druckwandler. Durch die Ohrmuschel und den Gehörgang besitzt es eine Richtwirkung.

Achtercharakteristik

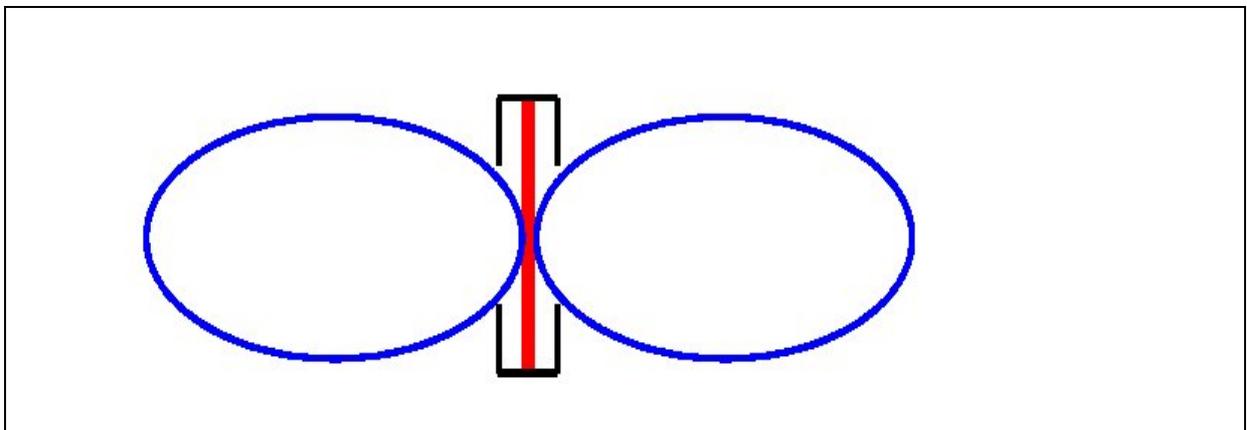


Bild 1.2

Mikrofone mit Achtercharakteristik haben eine auf der Vorderseite und Rückseite offen aufgehängte Membran (rot) (Bild 1.2). Dadurch sind sie in der Lage die Schnelle aufzunehmen. Die Schnelle beschreibt die gerichtete Geschwindigkeit der Luftmoleküle. Die Schnelle ist richtungsabhängig. Die Richtung wird mit dem Mikrofon mit der Achtercharakteristik gemessen. Bild 1.2 zeigt den Aufnehmbereich, der die Form einer Acht (blau) besitzt.

Die Mikrofone für die Messung der Schnelle werden auch als Druckgradienten Empfänger bezeichnet.

Das Mikrofon für Druck und Schnelle.

Für die Beschreibung der Dipol oder Cardioid Subwoofer müssen der Schalldruck und die Schnelle gemessen werden. Hierzu ist ein Mikrofon mit Druck- und Schnellewandler nötig.

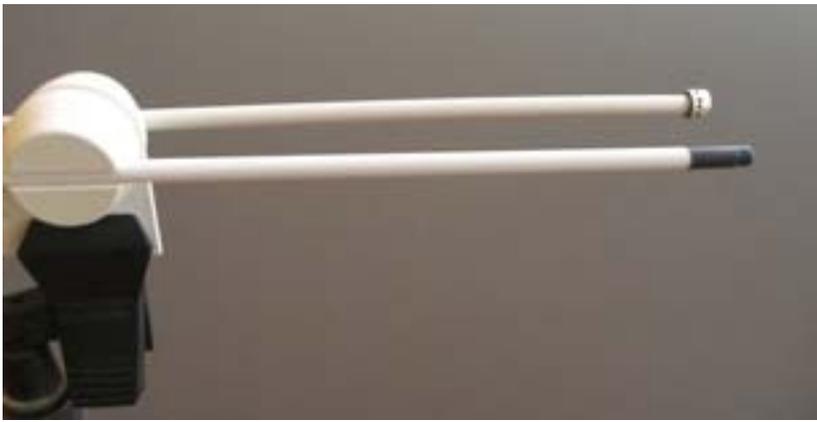


Bild 1.3

Der Druckwandler besteht aus dem M1 vom ATB PC und der Schnellewandler ist eine eigene Anfertigung. Zum Test des Schnellewandlers werden der Druck und die Schnelle in einem Bassreflexkanal gemessen.



Bild 1.4



Bild 1.5

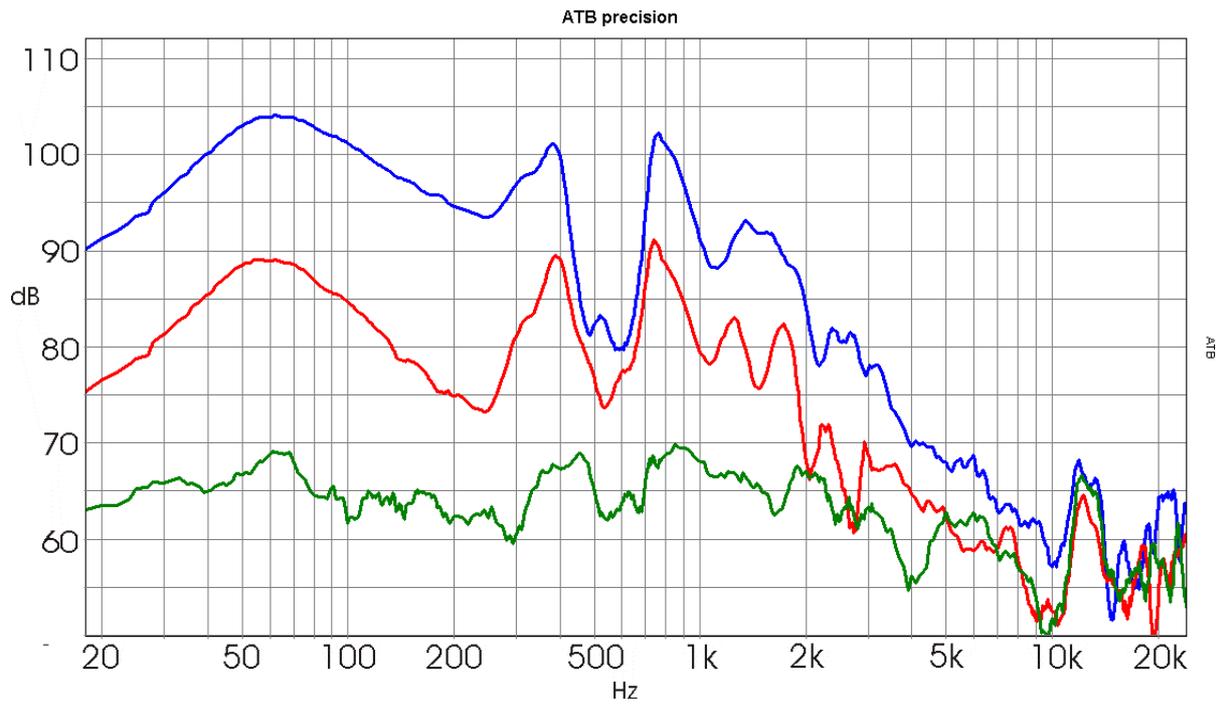


Bild 1.6

Das Bild 1.4 zeigt die Anordnung der Mikrofone vor dem Bassreflexgang. In Bild 1.6 wird gezeigt, dass die Frequenzgänge von Druckaufnehmer (blau) und Schnelleaufnehmer (rot) angeglichen sind. Bei Bild 1.5 ist der Schnelleaufnehmer senkrecht zur Richtung der Schnelle angeordnet. Dies zeigt auch die Messung in Bild 1.6. Die grüne Kurve zeigt die Schnelle nur angedeutet. Beide Messungen zeigen die richtige Funktion des Schnellewandlers.

2. Schallausbreitung

Der Schallausbreitung ist von der Frequenz der Schallwelle abhängig.. Hier unterscheidet man zwischen den tiefen, mittleren und hohen Tönen.

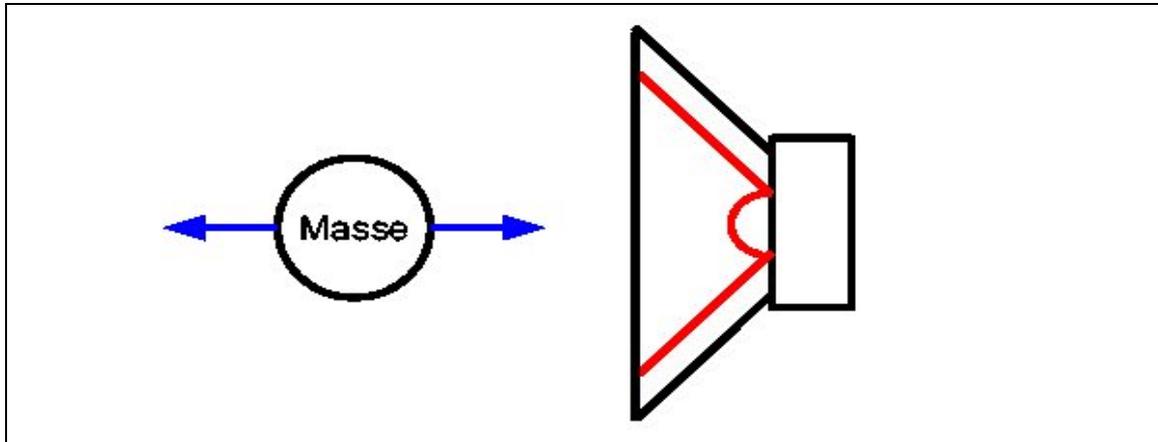


Bild 2.1

Der Schall breitet sich durch die Bewegung der Luftmoleküle aus. Jedes Luftmolekül hat eine Masse (Bild 2.1). Wenn sich nun Schall durch die Bewegung dieser Luftmoleküle ausbreiten soll, muss diese Masse beschleunigt werden. Zum Beschleunigen dieser Masse benötigt man eine Kraft. Die Kraft wird vom Lautsprecher geliefert. Dieser überträgt auf das Luftmolekül eine Energie. Die Ausbreitung des Schalls erfolgt über die Weitergabe dieser Energie an benachbarte Moleküle durch Stöße.

Die Funktion der Schallausbreitung wird in drei Frequenzbereiche aufgeteilt:.

1. Den Tieftonbereich von 20Hz bis 300Hz
2. Den Mitteltonbereich von 300Hz bis 3kHz
3. Den Hochtonbereich von 3kHz bis 20kHz

2.1 Schallausbreitung im Tieftonbereich

Im Tieftonbereich werden die Moleküle bei den langsamen Schwingungen nur mit einer geringen Energie angeregt. Diese ist nicht sehr viel größer als die Eigenenergie im ungestörten Zustand. So kann die Energie auch bei nicht direkten Stößen und mit großen Richtungsänderungen weitergegeben werden. Wie noch gezeigt wird, ist die Schnelle der Moleküle sehr klein.

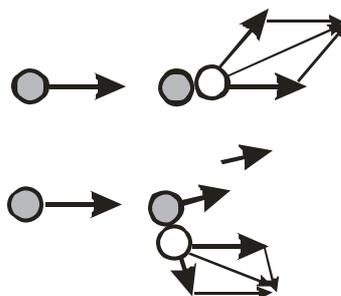


Bild 2.1

Trifft nun ein beschleunigtes Molekül ein anderes, sich nicht direkt in der Flugbahn befindliches Molekül, Bild 2.1, so kann dieses nicht seine gesamte Energie an das nächste Molekül abgeben und fliegt mit einem Teil der Energie in eine andere Richtung. Wenn es auf ein weiteres Molekül trifft, kann es wiederum die Energie nicht optimal weitergeben. Im Tieftonbereich werden die Moleküle durch die langsamen Schwingungen ohnehin nur mit einer geringen Energie angeregt. Diese ist nicht sehr viel größer als die Eigenenergie im natürlichen Zustand. So kann die Energie auch bei nicht direkten Stößen und mit großen Richtungsänderungen weitergegeben werden. Ebenso ist bei der Ausbreitung im Raum die Schnelle der Moleküle gering und schwer zu messen.

Die Ausbreitung wird auch durch den Strahlungswiderstand beschrieben. Der Strahlungswiderstand ist eine Funktion der Membranfläche und Frequenz. Bei gleicher Membranfläche steigt er zu hohen Frequenzen hin an. Entsprechend sieht auch der Schalldruckfrequenzgang aus. Bei tiefen Frequenzen hat er einen niedrigen Wert. Der Schalldruck wird durch viele Luftmoleküle mit niedriger Schnelle erzeugt. Ein höherer Schalldruck wird durch größere Membranflächen erreicht. Zu den höheren Frequenzen hin steigen Strahlungswiderstand und Frequenzgang an. Im Hochtonbereich werden für den gleichen Schalldruck kleine Membranflächen benötigt. Die Schallausbreitung erfolgt über weniger Luftmoleküle, die aber eine hohe Schnelle besitzen.

Eine Ausführung für einen Wandler, bei dem die Lüftmoleküle eine höhere Schnelle besitzen, ist der Bandpass Subwoofer. Bei diesem Lautsprecher kann die Eigenschaft der Schnelle im Tieftonbereich gut gezeigt werden.



Bild 2.2

Das Bild 2.2 zeigt einen Bandpass Lautsprecher für die Beschallung.

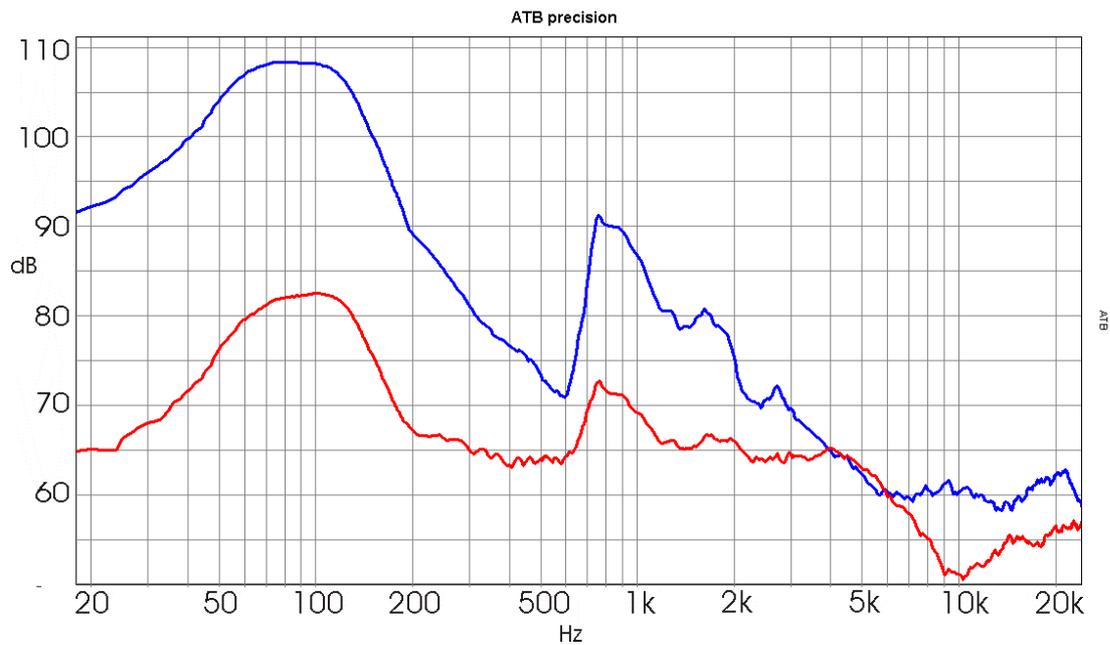


Bild 2.3

Bild 2.3 zeigt den Schalldruck (blau) und die Schnelle (rot) im Nahfeld. Bei dem Bandpass Subwoofer besitzt die Schnelle eine hohe Amplitude.

Die weiteren Diagramme zeigen den Zusammenhang von Schalldruck und Schnelle.

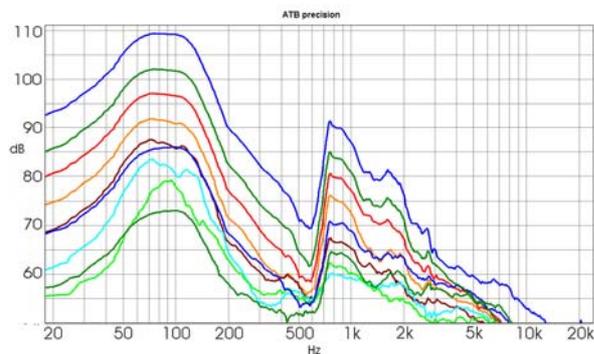


Bild 2.4

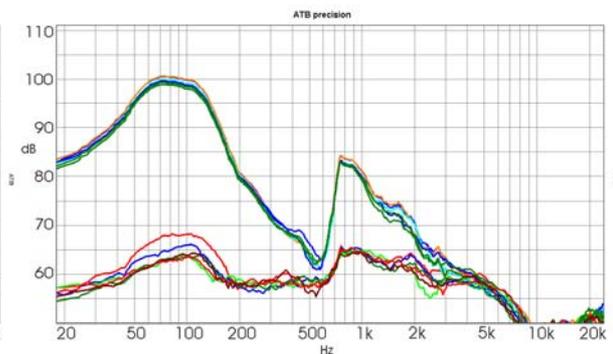


Bild 2.5

Bild 2.4 zeigt die Schalldruck und Schnelle Amplituden in Abhängigkeit vom Abstand.

Blau = 0, grün = 6,3cm, rot = 12,5cm, orange = 25cm, braun = 50cm, hellblau = 1m, hellgrün = 2m (Raumeinfluss).

Während die Schalldruckkurven bei der Verdoppelung des Abstands die -6dB zeigen, nimmt die Amplitude der Schnelle mit -12db ab.

Bild 2.5 zeigt die Amplituden des Schalldrucks und der Schnelle bei einem Abstand von 15cm unter verschiedenen Winkeln gemessen. Die Schnelle zeigt eine Richtwirkung. Die maximale Amplitude zeigt die Messung mit 0° (rot). Bei 15° (blau) wird sie schon schwächer. Die Amplitude des Schalldrucks bleibt konstant.

2.2 Schallausbreitung im Mitteltonbereich

Im Mitteltonbereich besteht ein Übergang von der Schallausbreitung des Tieftonbereichs zum Hochtonbereich. Die Richtwirkung des Schalls ist hier weniger ausgeprägt und von der Konstruktion des Lautsprechers bestimmt. Zur Schallerzeugung werden die Konuslautsprecher des Tieftonbereichs und die Kalotten- und Hornlautsprecher des Hochtonbereichs benutzt.

2.3 Schallausbreitung im Hochtonbereich

Im Hochtonbereich besitzen die Luftmoleküle eine hohe Energie und entsprechend hohe Schnelle. Die Energie kann nur durch den direkten Stoß übertragen werden. Bei einem schrägen Stoß ist der Energieverlust zu groß. Die Folge hiervon ist die fast gradlinige Ausbreitung der Schallwelle.

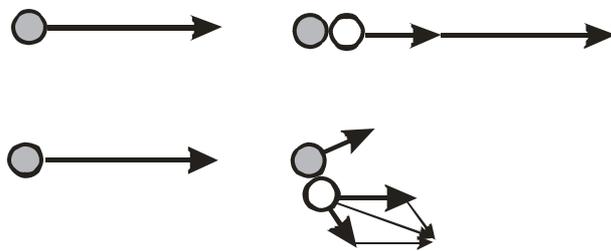


Bild 2.6

Das Bild 2.6 zeigt die Schallausbreitung durch direkte Stöße im Hochtonbereich. Die gerichtete Schallausbreitung kann auch durch die Schnelle erklärt werden.

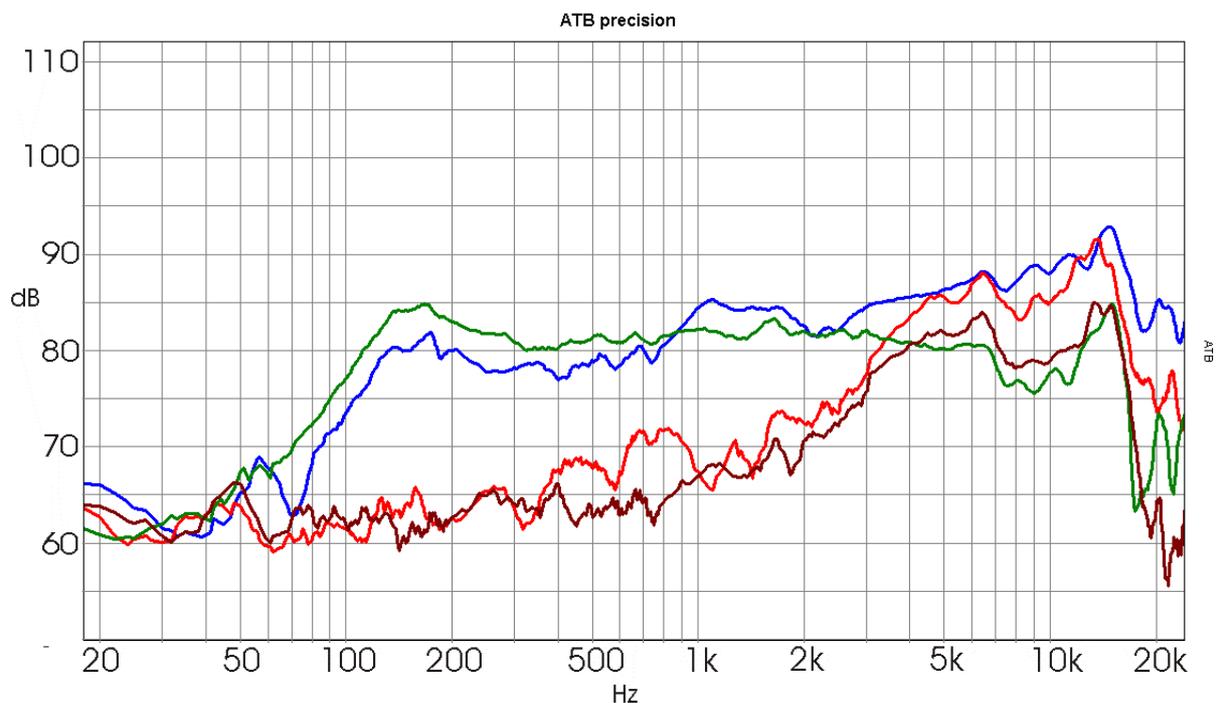


Bild 2.7

Das Bild 2.7 zeigt den Schalldruck- (blau) und den Schnellefrequenzgang (rot) eines Breitbandlautsprechers. Oberhalb von 3kHz gleichen sich die Kurven an. Dies bedeutet, dass in diesem Frequenzbereich Druck und Schnelle zusammen auftreten. Die gleiche Messung ist unter einem Winkel von 45° durchgeführt worden. Der Schalldruck- (grün) und der Schnellefrequenzgang (braun) zeigen die Richtwirkung des Lautsprechers. Es ist deutlich zu sehen, dass die Richtwirkung dort beginnt, wo die Schnelle die Größe des Drucks erreicht. Dies zeigt auch, dass die Schnelle eine gerichtete Ausbreitung besitzt.

Eine weitere Eigenschaft des Schalls ist, dass zwischen Druck und Schnelle ein Phasenwinkel von 90° besteht.

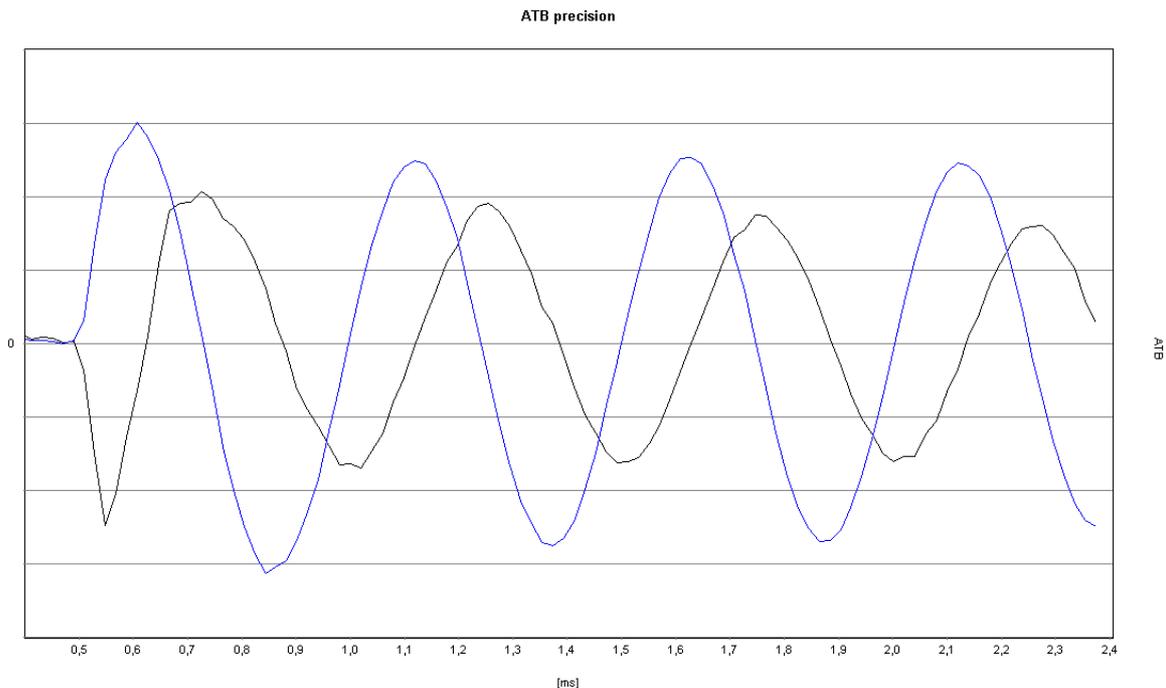


Bild 2.8

Das Bild 2.8 zeigt das Oszillogramm einer 2-Channel Messung. Das Messsignal ist ein Sinus mit der Frequenz von 2kHz. Die blaue Kurve zeigt den Schalldruck und die schwarze Kurve die Schnelle. Da die Schnelle bei 2kHz nicht die Amplitude vom Druck besitzt, ist ihre Amplitude verstärkt dargestellt. Es ist deutlich zu sehen, dass im Nulldurchgang des Drucks die Schnelle das Maximum und beim Maximum des Drucks die Schnelle den Nulldurchgang besitzt.

Im Hochtonbereich ist der Strahlungswiderstand groß. Dadurch kann der Schalldruck auch mit kleinen Membranflächen erzeugt werden. Ein Hochtöner benötigt so nur eine kleine Membran, muss aber die hohe Schnelle an die Moleküle abgeben. Dies kann er nur durch eine geringe dynamische Masse, die aus leichter Schwingspule und Membran besteht. Durch die leichte Schwingspule wird die elektrische Leistung begrenzt. Eine höhere Leistung besitzen Hornlautsprecher, da das Horn den Strahlungswiderstand erhöht.

3. Die offene Schallwand

3.1 Der akustische Kurzschluss

Im HiFi Bereich ist der Dipol Lautsprecher eine übliche Konstruktion. Diese besteht aus einer nach hinten offenen Schallwand. Die Lautsprecher besitzen kein Gehäuse. Da diese Lautsprecher gerade im Tieftonbereich Vorteile haben, wird auch dieser Frequenzbereich betrachtet.

An Hand von Beispielen soll die Funktion der Dipole im Tieftonbereich erklärt werden. Die beschriebene Schallwand hat die Abmessungen 44 x 44cm. Als Lautsprecher wird ein professioneller 12“ Tieftöner verwendet.



Bild 3.1



Bild 3.2



Bild 3.3

Die Bilder 3.1 und 3.2 zeigen einen Lautsprecher in ein offenes Gehäuse montiert. Das schmale Gehäuse bildet hier die Schallwand nach. Da die Seitenwände im Tieftonbereich sehr klein gegenüber der Wellenlänge des Schalls sind, können sie vernachlässigt werden.

Bild 3.3 zeigt die Anordnung des Mikrofons für die Nahfeldmessung.

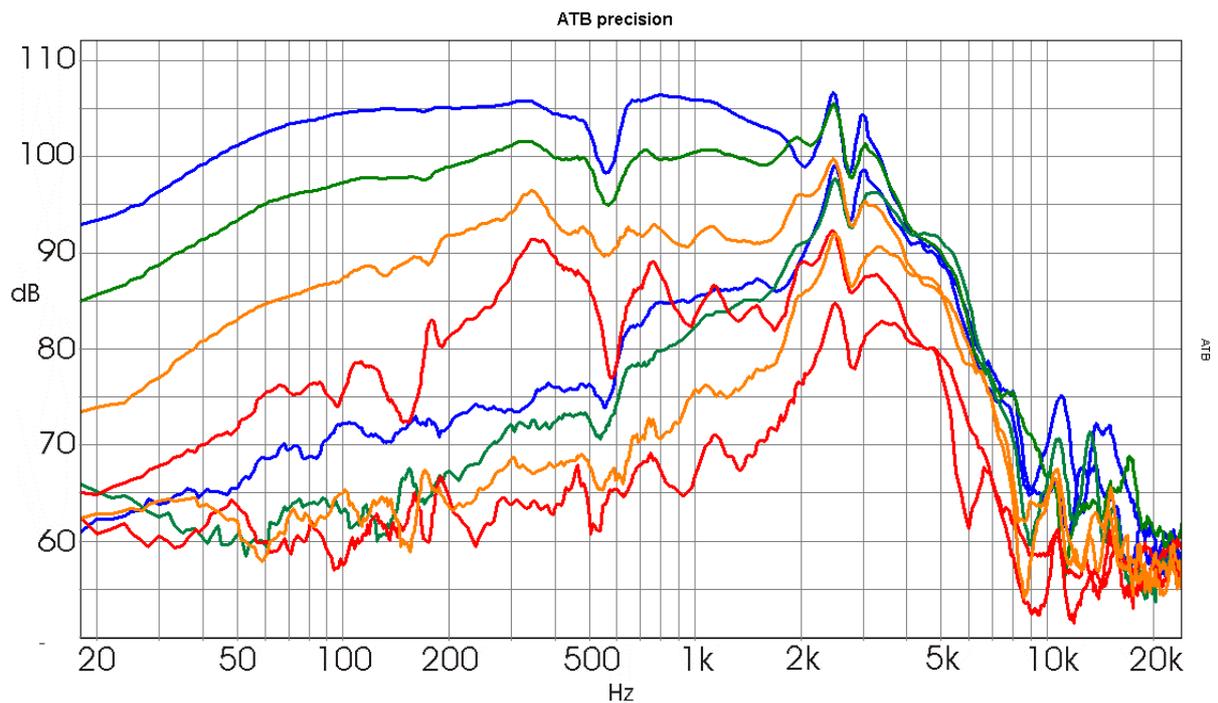


Bild 3.4

Das Bild 3.4 zeigt mit den oberen Kurven die Schalldrücke und mit den gleichfarbigen unteren Kurven die Schnelle des Lautsprechers in verschiedenen Abständen.

Blau = 0,10m, grün = 0,20m, orange = 0,40m und rot = 1m.

Deutlich ist zu sehen, dass der Schalldruck mit wachsenden Abstand kleiner wird. Im Nahfeld, blau = 0,10m, liegt die -6dB Grenze bei 38 Hz und bei der Messung mit größerem Abstand, rot=1m, bei 240Hz. Die Schnelle ist im Nahfeld für Frequenzen < 200Hz noch messbar, bei einem Abstand von 0,20m nicht mehr.



Bild 3.5



Bild 3.6

Um zu ermitteln, warum im Abstand >0,20m für tiefe Frequenzen keine Schnelle mehr zu messen ist, werde entsprechend Bild 3.5 und 3.6 der Schalldruck und die Schnelle an der Schallwandkante gemessen.

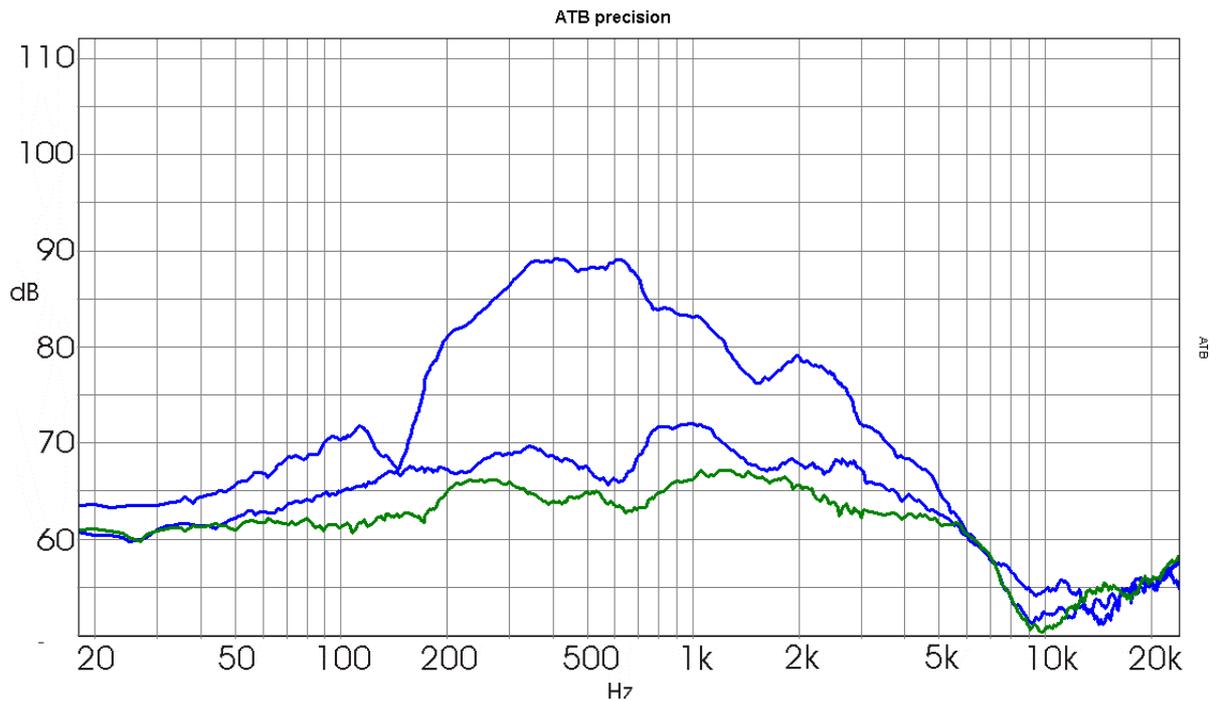


Bild 3.7

Das Bild 3.7 zeigt mit der oberen Kurve den Schalldruck und mit den unteren Kurven die Schnelle. Für Frequenzen $< 200\text{Hz}$ ist der Schalldruck fast verschwunden. Die Schnelle ist vorhanden. Dies weist auf eine Luftbewegung von der Vorderseite zur Rückseite des Lautsprechers hin. Um die Richtung der Schnelle zu ermitteln wird das Schnellemikrofon entsprechend Bild 3.6 quer zur Schallwandkante positioniert. Die Messung wird in Bild 3.7 durch die grüne Kurve gezeigt. In dem Bereich $< 200\text{Hz}$ ist nur eine kleine Amplitude zu messen. Dies zeigt auch, dass die Luftmoleküle sich von der Vorder- zur Rückseite bewegen. Dies wird als akustischer Kurzschluss bezeichnet.

3.2 Die Nahfeldmessung und der akustische Kurzschluss

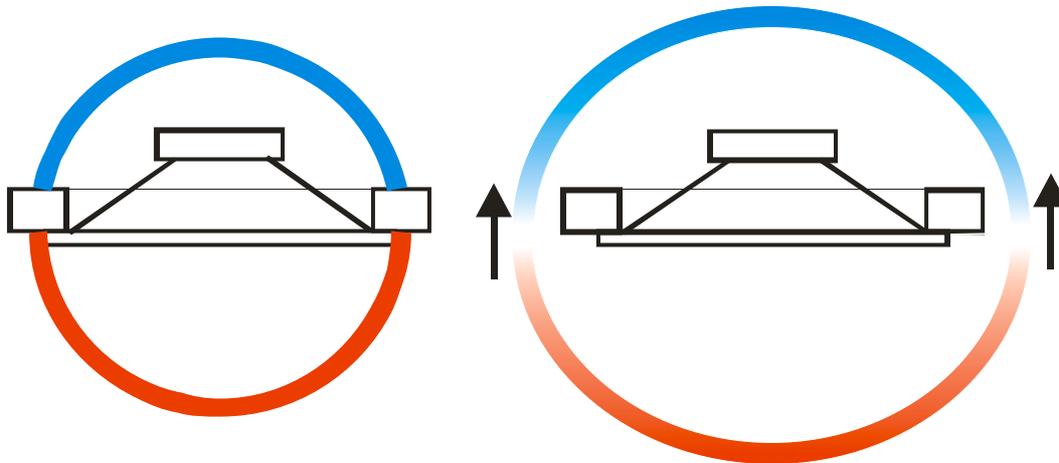


Bild 3.8

Bild 3.9

In Bild 3.8 wird das Nahfeld gezeigt. In dem betrachteten Tieftonbereich breitet sich die Schallwelle kugelförmig aus. Vor der Schallwand z.B. als Druck (rot) und hinter der Schallwand als Unterdruck (blau). Solange der Abstand des Messmikrofons nicht größer als die halbe Schallwandbreite ist, wird im Nahfeld gemessen. Dies zeigen die Schalldruckkurven in Bild 3.4. Die blaue = 0,10m Abstand und die grüne = 0,20m Abstand Kurve laufen parallel. Die grüne Kurve zeigt durch den doppelten Abstand einen um 6dB kleineren Schalldruck. Bild 3.9 zeigt den akustischen Kurzschluss. Bei einem Mikrofonabstand $> 0,20\text{m}$ wird der akustische Kurzschluss gemessen. Der vor der Schallwand erzeugte Überdruck trifft im Bereich der Schallwandkante auf den Unterdruck der Schallwandrückseite. Bei dem Druckausgleich entsteht eine schnelle Bewegung der Luftmoleküle, die Schnelle. Dies wird mit dem Messaufbau von Bild 3.5 gemessen. Das Bild 3.7 zeigt den Frequenzgang von Druck und die Schnelle, blaue Kurven, an der Gehäusekante gemessen. Der Schalldruck für Frequenzen $< 150\text{Hz}$ ist sehr klein und die Schnelle relative groß. Die grüne Kurve zeigt die Schnelle in Richtung der Schallwand mit dem Messaufbau von Bild 3.6. Die Messung mit einem Abstand des Mikrofons $>$ der halben Schallwandbreite zeigen den für den Hörer entscheidenden Schalldruck.

Das akustische Verhalten der Schallwand wird in der Photo Story OK² beschrieben.

<http://kirchner-elektronik.de/~kirchner/Photo-Story-OK.pdf>

Dort werden auch der Waveguide und der Baffel Step erklärt.

3.3 Dipollautsprecher Ausführungen mit zwei Tieftönern.



Bild 3.10



Bild 3.11



Bild 3.12

Die Bilder 3.10, 3.11 und 3.12 zeigen Anordnungen von Dipollautsprechern. Die Anordnung von Bild 3.10 ist üblich. Bei Bild 3.11 soll gezeigt werden, welche Wirkung die Grenzfläche des Bodens besitzt. Bild 3.12 zeigt die V-förmige Anordnung. Diese wird in dem weiteren Artikel noch näher beschrieben.

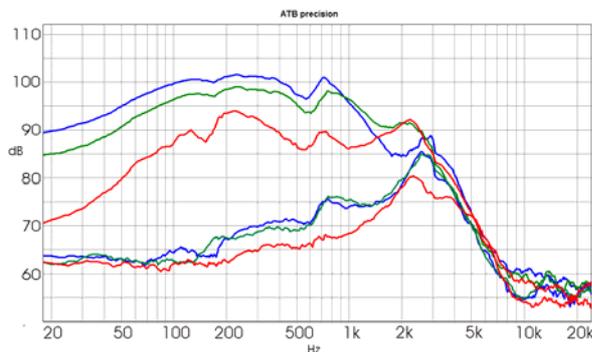


Bild 3.13 Doppelbass übereinander

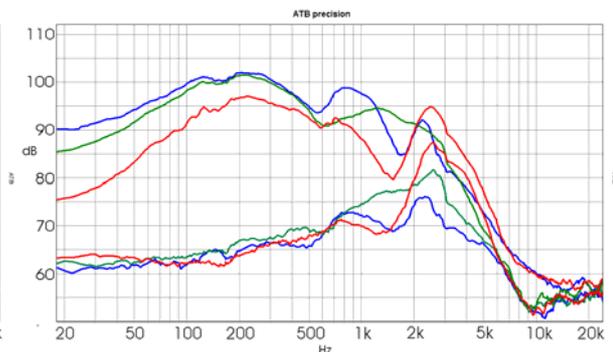


Bild 3.14 Doppelbass nebeneinander

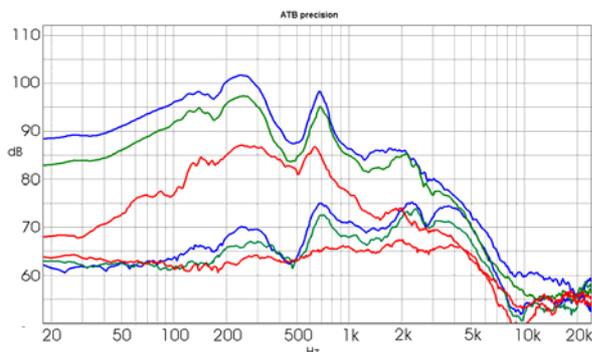


Bild 3.15 Doppelbass V-Anordnung

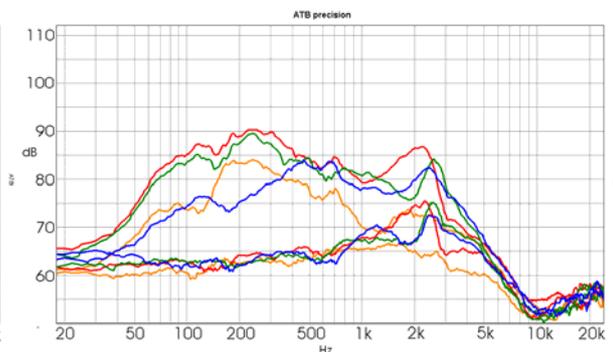


Bild 3.16 Räummessung, Sitzposition

Die Bilder 3.13, 3.14 und 3.15 zeigen die Frequenzgänge mit den Mikrofonabständen
Blau = 10cm, grün = 20cm, rot = 1m

Bild 3.16 zeigt die Schalldruck und Schnelle Frequenzgänge im Raum bei der Sitzposition gemessen.

Blau = Einzellautsprecher, grün = Doppelbass stehend, rot = Doppelbass liegend, orange = Doppelbass V-Anordnung

Während bei dem stehenden und liegenden Doppelbass eine Tieftonwiedergabe angedeutet ist, sind der Einzelbass und die V-Anordnung für die einfache Schallwand ohne Gehäuse nicht geeignet.

Die Messungen zeigen, dass neben dem Doppelbass stehend die V-Anordnung am ehesten als Schnellewandler betrachtet werden kann. Diese Anordnung besitzt neben dem Einzellautsprecher den schwächsten Tieftonbereich.



Bild 3.7



Bild 3.8

Bild 3.7 zeigt die Anordnung der Mikrofone in Richtung zur Schnelle

Bild 3.8 zeigt die Anordnung der Mikrofone senkrecht zur Richtung der Schnelle

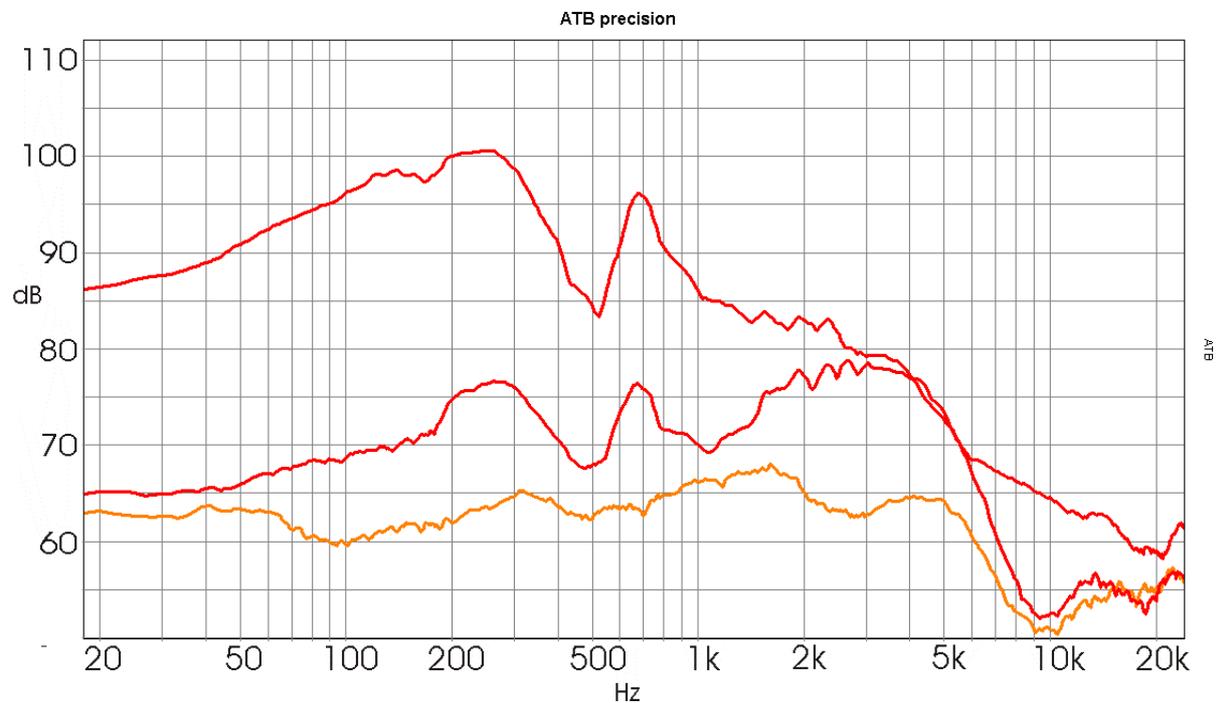


Bild 3.9

In Bild 3.9 zeigt die obere Kurve den Schalldruck. Die untere rote Kurve zeigt die Schnelle an der Gehäusekante. Die starke Schnelle erklärt auch, warum die Anordnung an der Sitzposition keinen Bass hat. Es besteht ein besonders starker Druckausgleich.

Die orange Kurve zeigt die Schnelle senkrecht zur Ausbreitungsrichtung gemessen.

Die Schnelle beim Doppelbass mit V-Anordnung

Der Doppelbass in V-Anordnung zeigte bei der Nahfeldmessung eine hohe Schnelle. Diese Anordnung kann den in der Literatur beschriebenen Schnellewandler bilden. Als erstes wird die Abhängigkeit der Schnelle von der Öffnungsfläche untersucht.

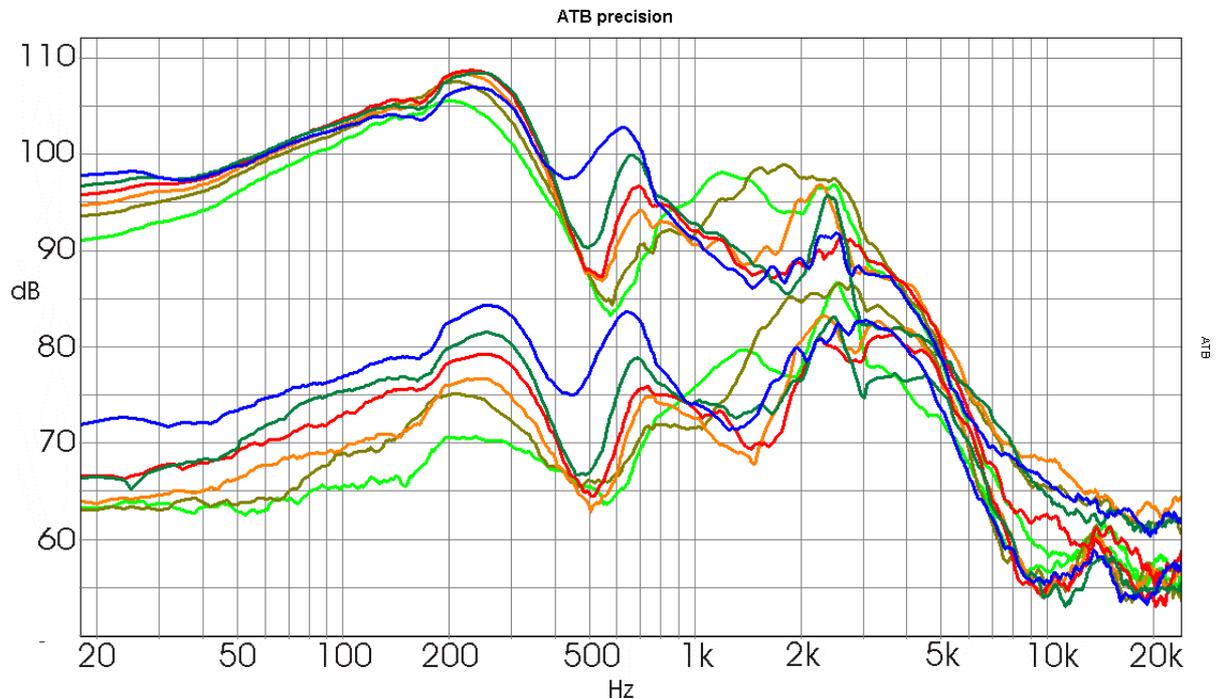


Bild 3.10

Das Bild 3.10 zeigt den Schalldruck vom Doppelbass mit V-Anordnung im Nahfeld gemessen. Die oberen Kurven sind der Druck und die unteren die Schnelle. Es werden folgende Öffnungsflächen gemessen:

Blau = 220cm², grün = 440cm², rot = 660cm², orange = 880cm², braun = 13200cm², hellgrün = 1980cm²

Während sich der Druck nur wenig verändert, wird die Schnelle mit kleiner Spaltbreite größer. Bei der Spaltbreite von 5cm haben die Kurven eine andere Charakteristik. Hier ist das Verhältnis von Membranfläche zur Öffnungsfläche kritisch. Für die weitere Entwicklung wird die Öffnungsfläche 440cm² entsprechend der Spaltbreite von 10cm gewählt. Die Membranfläche der Lautsprecher ist 1080cm².

In der Photo-Story Lautsprecherentwicklung

<http://kirchner-elektronik.de/~kirchner/photostory.pdf>

wird die Schnelle der Schallwelle im Raum, Lautsprechergehäuse oder Hörraum, beschrieben.

3.4 Die Thiele-Small Parameter vom Doppelbass mit V-Anordnung

Die elektrischen Eigenschaften vom Doppelbass in V-Anordnung in Abhängigkeit zur Öffnungsfläche werden mit der Impedanzmessung untersucht.

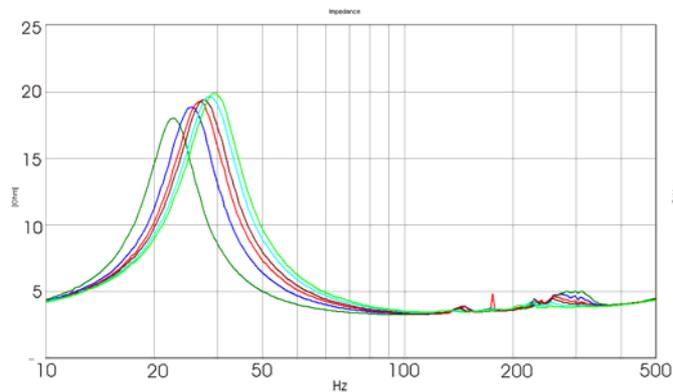


Bild 3.11

Für die Öffnungsflächen werden folgende Resonanzfrequenzen ermittelt

Blau = 220cm² 23Hz, grün = 440cm² 25Hz, rot = 660cm² 27Hz, orange = 880cm² 28Hz, braun = 13200cm² 29Hz, hellgrün = 1980cm² 30Hz

Als weitere Messung werden die Thiele-Small Parameter bestimmt. Diese sind zur Beurteilung der Abstimmung der V-Anordnung wichtig.

Der Tieftöner besitzt die folgenden Parameter:

RDC: 5,41 Ohm	SD: 540,00 cm ²	fs: 30,56 Hz
Qm: 1,94	Qe: 0,36	Qt: 0,30
Mms: 61,75 g	Rms: 6,64 kg/s	Cms: 0,44 mm/N
VAS: 179,90 l	B*L: 12,81 Tm	
No: 1,37 %	SPL: 93,38 db 1W/1m	SPL: 95,08 db 2.83V/m

In der V-Anordnung werden folgende Parameter gemessen:

RDC: 2,71 Ohm	SD: 1080,00 cm ²	fs: 24,18 Hz
Qm: 2,88	Qe: 0,51	Qt: 0,43
Mms: 193,04 g	Rms: 11,07 kg/s	Cms: 0,22 mm/N
VAS: 367,66 l	B*L: 12,06 Tm	
No: 0,98 %	SPL: 91,92 db 1W/1m	SPL: 96,56 db 2.83V/m

Die V-Anordnung besitzt eine niedrigere Resonanzfrequenz, die sich durch die effektive Vergrößerung der bewegten Masse erklären lässt. Der Massezuwachs kommt durch die Luftlast. Die Messung wird durch den Vergleich des B*L Faktors geprüft. Bei beiden Messungen ist dieser fast identisch. Dies bedeutet, dass die Messungen richtig sind.

4. Der gesteuerte akustische Kurzschluss

4.1 Der Cardioid Lautsprecher

In der Beschallungstechnik werden die Cardioid Subwoofer benutzt. Diese besitzen eine gerichtete Schallabstrahlung mit Cardioid (herzförmig) Charakteristik. Der Tieftonbereich wird nach vorne und reduziert zur Seite abgestrahlt. Nach hinten wird der Schall unterdrückt. Dies wird durch einen nach hinten abstrahlenden Lautsprecher erreicht. Der hintere Lautsprecher wird mit eigenem Verstärker und DSP angesteuert, wobei seine akustische Phase um 180° zum vorderen Lautsprecher gedreht wird. Gegenüber der Achtcharakteristik des Dipols wird der zur Seite abgestrahlte Schall fast nicht reduziert. So sind die Vorteile der Cardioid Lautsprecher eher gering. Dieser große Aufwand ist für die Wiedergabe im Studio oder Wohnzimmer nicht geeignet.

4.2 Der Dipol mit Schallführung

Die beschriebenen Dipolanordnungen zeigen im Nahfeld einen sehr hohen Schalldruck im Tieftonbereich. Bei größeren Abständen wird der Schalldruck immer geringer. Der Schalldruckverlust liegt bei 15dB – 20dB. Die verlorene Leistung muss mit starken Verstärkern und sehr hoch belastbaren Lautsprechern ersetzt werden. Das Problem ist hier die Belastbarkeit der Lautsprecher. Der maximale Schalldruck wird weniger durch die elektrische Leistung als durch den linearen Hub des Lautsprechers begrenzt. Dieser kann schon bei einem $1/5$ der elektrischen Leistung erreicht werden. So werden bei den Dipol Lautsprechern mit der nach hinten offenen Schallwand gerade Zimmerlautstärken erreicht.

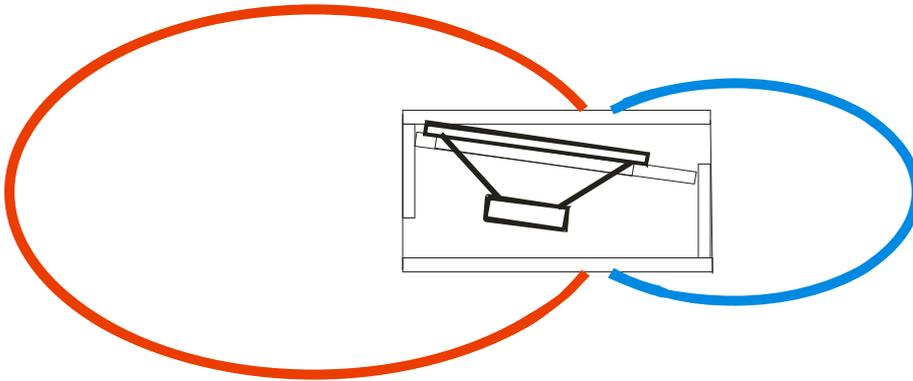
Mit der oben beschriebenen V-Anordnung für den Subwoofer besitzen die Luftmoleküle auch eine erhöhte Schnelle. Dieser besitzt aber den schlechten Wirkungsgrad der Dipol Systeme. Durch eine Schallführung soll der akustische Kurzschluss verringert werden.

Als erstes wurden bei der Entwicklung die bekannten Konstruktionen nachgebaut. Diese zeigten kein befriedigendes Ergebnis.

Die Frage stellte sich, ob es möglich ist, die vorteilhafte Schallabstrahlung eines Dipol Lautsprechers mit besserem Wirkungsgrad zu erreichen. Bei diesem Lautsprecher muss der akustische Kurzschluss teilweise verhindert werden.

Die für Lautsprecher üblichen Berechnungsprogramme konnten bei dieser Aufgabe nicht helfen.

5. Der Dipol-Cardioid Lautsprecher



Die Schallverteilung des Dipol-Cardioid Lautsprechers

5.1 Aufbau



Bild 5.1



Bild 5.2

Am Ende der Entwicklung ist eine Demo Ausführung für den Subwoofer aufgebaut worden. Dieses dient nur zum Messen, um die Schallausbreitung zu zeigen. Bild 5.1 zeigt die Front und Bild 5.2 die Rückseite des Subwoofers.

Zuerst sollte der akustische Kurzschluss durch Experimente mit unterschiedlichen Schallführungen verhindert werden. Dies funktionierte nicht.

Zur Vermeidung des akustischen Kurzschlusses musste ein theoretischer Ansatz gefunden werden. Die Lösung kann nur über die Schnelle erfolgen. Die Schallschnelle wird schon seit Jahren bei der Konstruktion von Lautsprechergehäusen von uns gemessen. Die Schnelle gibt wichtige Hinweise für das Verständnis der Schallausbreitung. Dieses Wissen haben wir bei der Entwicklung des Dipollautsprechers benutzt.

Der optimale Subwoofer strahlt den Tieftonbereich nach vorne ab, während an den Seiten und hinter dem Lautsprecher keine tiefen Töne abgestrahlt werden sollen. Dies soll durch die Überlagerung von zwei Schallquellen erreicht werden. Die erste Schallquelle ist der nach vorn und die zweite der nach hinten abgestrahlte Schall. Die Konstruktion des Gehäuses wird so ausgelegt, dass die vordere Schallquelle einen für die tiefen Töne höheren Schall als die hintere erzeugt. Für die hintere Schallquelle ist es vorteilhaft, dass sie einen höheren Schalldruck für die höheren Frequenzen als die vordere erzeugt. Durch diese Verteilung bleibt der nach vorn abgestrahlte Tieftonbereich erhalten. Durch den höheren Schallanteil für höhere Frequenzen der hinteren Schallquelle wird dieser Frequenzbereich vor dem Lautsprecher verringert. Es entsteht eine Tiefpassfunktion.

Diesen Überlegungen entsprechend wird für den nach vorn abgestrahlten Schalldruck eine große Kammer und für den nach hinten abgestrahlten Schalldruck eine kleine Kammer gewählt. Die unterschiedlichen Luftmassen schwingen bei der Anregung durch den Lautsprecher unterschiedlich. In der großen Kammer schwingt die Luft mit einer tieferen Frequenz als die Luft in der kleinen Kammer.

5.2 Frequenzgang

An den Seiten treffen sich die nach vorn und hinten abgestrahlten Schallwellen. Da die beiden Schallwellen eine Phasendifferenz von 180° besitzen, löschen sie sich aus. Hierdurch besitzt

die Schallabstrahlung die Charakteristik einer Acht. Diese entspricht dem oben beschriebenen Schnelle Mikrofon.

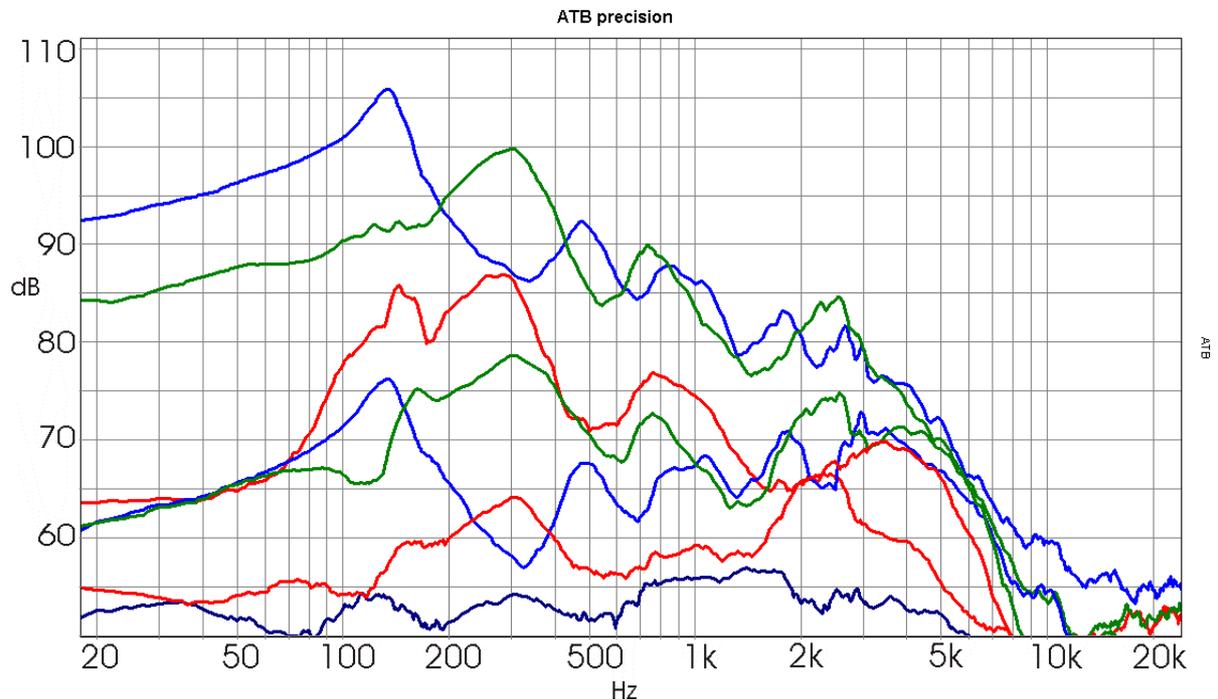


Bild 5.3

Das Bild 5.3 zeigt die Nahfeldmessungen an dem neuen Dipol-Cardioid Subwoofer. Die hellblauen Kurven zeigen den Schalldruck und die Schnelle an der vorderen Öffnung. Beide Kurven haben den größten Anteil im entscheidenden Übertragungsbereich $< 100\text{Hz}$. Die roten Kurven zeigen Schalldruck und Schnelle an der Gehäuseseite. Für den Bereich $< 100\text{Hz}$ ist der Schalldruck gering. Dies bedeutet, dass zur Seite wenig Schall abgestrahlt wird und die Konstruktion des Dipols gelungen ist. Zu dem schwachen Schalldruck passt auch die geringe Amplitude für die Schnelle. Es besteht ein Ausgleich der Schallwellen nur für die Frequenzen $> 100\text{Hz}$, wie geplant.

Die grünen Kurven zeigen den Schalldruck und die Schnelle für die hinteren Öffnungen. Es wird der Schalldruck für eine hintere Öffnung gezeigt. Durch die zweite Öffnung ist er um 3dB höher als in der Kurve gezeigt. Durch den geringeren Schalldruck der hinteren Öffnungen entsteht die Cardioid Charakteristik.

Schalldruck und Schnelle haben die größten Amplituden für den Frequenzbereich $> 100\text{Hz}$. Hierdurch wird der nach vorne abgegebene Schalldruck im Übertragungsbereich nicht geschwächt.

Die dunkelblaue Kurve ist eine Referenzkurve für die Schnelle mit geringer Amplitude.

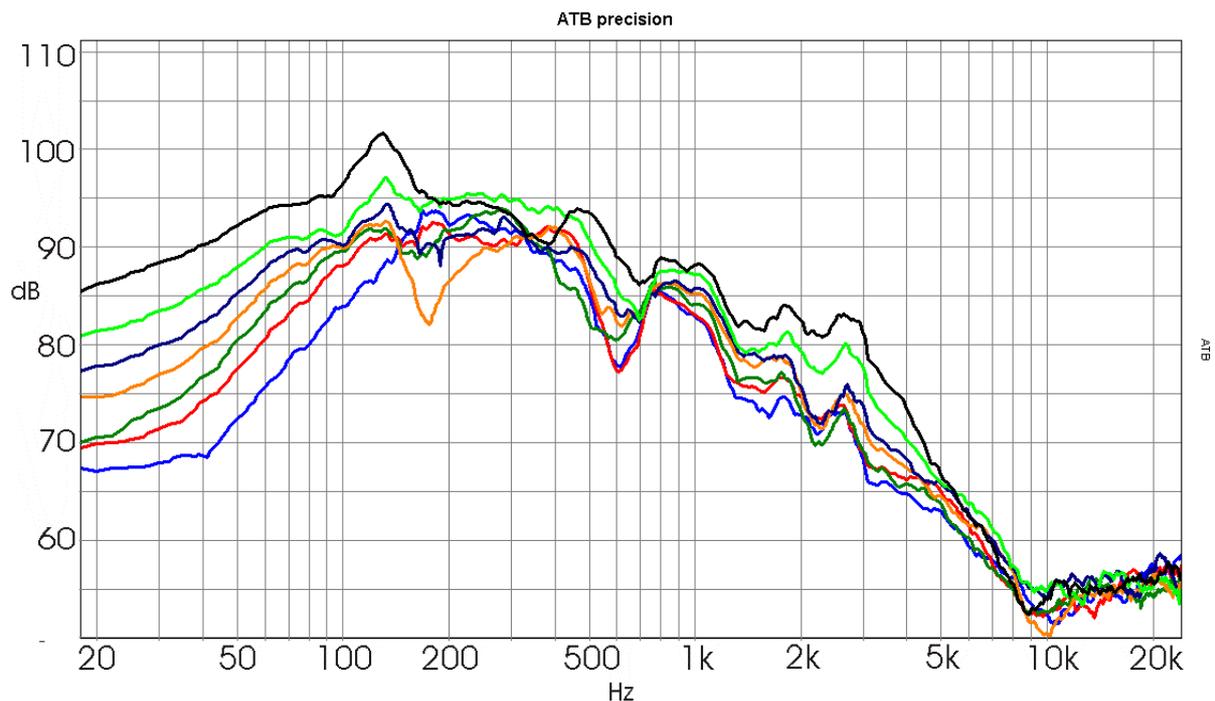


Bild 5.4

Das Bild 5.4 zeigt eine weitere Eigenschaft des Dipol-Cardioid Subwoofers. Der Schalldruck wird im Raum mit einem Grenzflächenmikrofon gemessen. Die Kurven zeigen verschiedene Wandabstände.

Blau = 0,25m, rot = 0,5m, grün = 0,75m, orange = 1m, dunkelblau = 1,25m, hellgrün = 1,5m, schwarz = 1,75m

Die blaue Kurve mit dem Abstand von 0,25m zeigt die schwächste Tieftonwiedergabe.

Bei einem Abstand von 1m zeigt die orange Kurve einen Einbruch bei 180Hz, der schon außerhalb des Übertragungsbereichs liegt.

Die schwarze Kurve zeigt schon die Nahfeldmessung.

Sehr bemerkenswert ist der hohe Schalldruck. Ein 40W Verstärker reicht schon für laute Musikwiedergabe.

5.3 Thiele-Small Parameter

RDC: 2,71 Ohm

SD: 1080,00 cm²

Qm: 3,10

Qe: 0,58

Qt: 0,49

fs: 21,80 Hz

Bemerkenswert ist die niedrige Resonanzfrequenz. Diese liegt in der Nähe der tiefsten hörbaren Frequenz und beeinflusst den Klang nicht. Das beste Impulsverhalten besitzt ein Lautsprecher mit der Güte von 0,5. Mit der Güte $Q_t = 0,49$ besitzt der Dipol-Cardioid Subwoofer die optimale Impuls wiedergabe. Ein Q_t von 0,5 bewirkt bei Gehäuselautsprechern, geschlossene oder Bassreflex, einen Abfall im Tieftonbereich. Dieser kann mit einer elektronischen Schaltung durch eine Anhebung der tiefen Frequenzen ausgeglichen werden.

5.4 Polarplots



Bild 5.5

Bild 5.6

Die Bilder 5.5 und 5.6 zeigen den Aufbau der Freifeldmessung

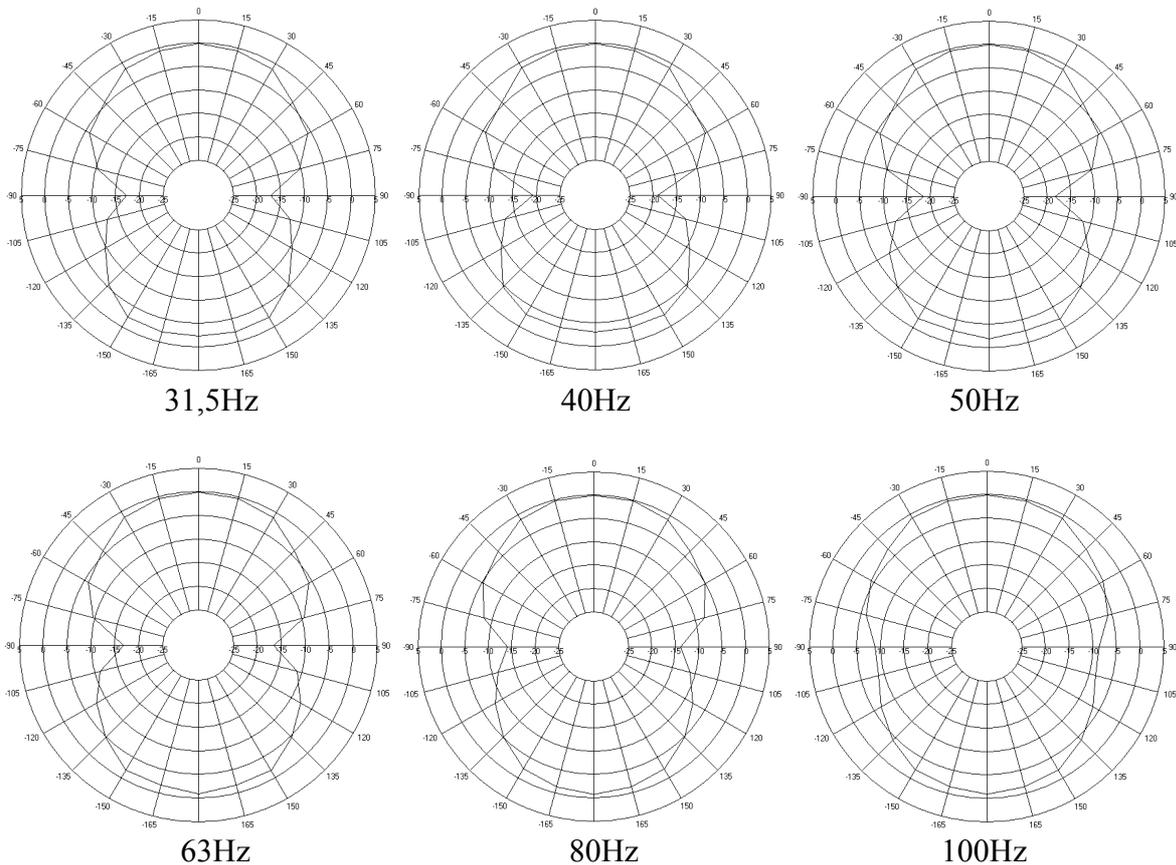


Bild 5.6

Bild 5.6 zeigt die Polarplots für den das Demomodel des Dipol-Cardioid Subwoofer. Bei 31,5Hz, 40Hz 50Hz wird der an der Seite der Schalldruck um -18dB verringert. Der Schalldruck auf der Rückseite ist um -3dB kleiner als der nach vorne abgestrahlte Schall. Für 63Hz und 80Hz wird der seitliche Schalldruck um -15dB verringert. Für 100Hz wird der seitliche Schalldruck mit -10db nicht mehr so stark verringert. Für Frequenzen > 100Hz wird der seitliche Schalldruck größer. Für diese Frequenzen besteht keine Dipolcharakteristik mehr.

5.5 Aufstellung im Raum

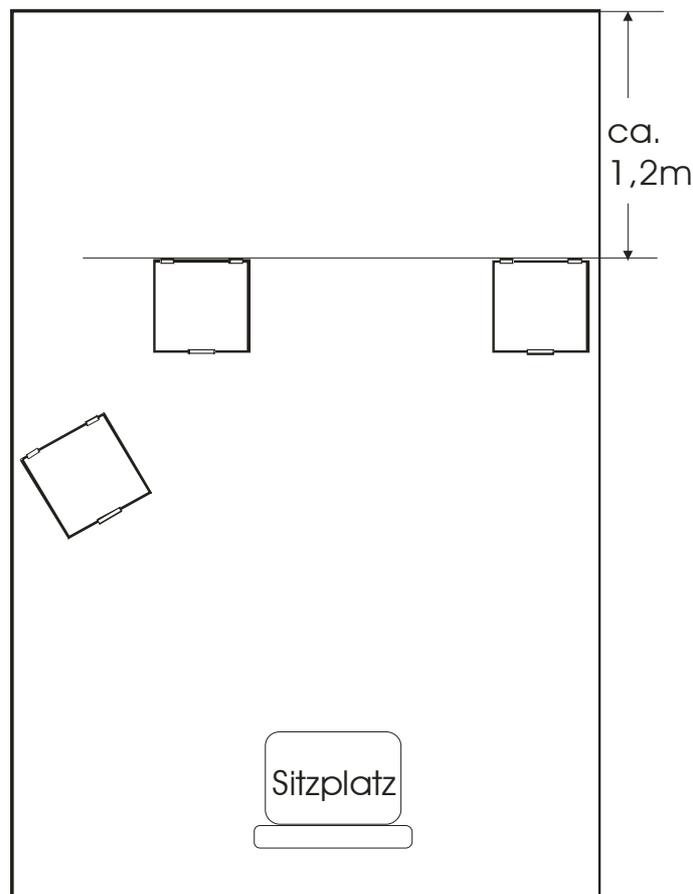


Bild 5.7

Bild 5.7 zeigt die Aufstellung des Dipol-Cardioid Lautsprechers im Raum. Der Lautsprecher sollte immer mit der Front zum Hörer gerichtet ist. Es soll auch ein minimaler Abstand zur Rückwand von 1,2m eingehalten werden.

Der Abstand zur Rückwand des Raums schränkt den Einsatz des Dipol-Cardioid Subwoofers ein. Diese Aufstellung ist nicht in jedem Wohnraum möglich.

Die Aufstellung von Subwoofern ist immer kritisch. Der in der Photostory beschriebene Bassreflex Subwoofer zeigt bei Wandnahe Aufstellung einen starken Einbruch im Frequenzgang und ist für wandnahe Aufstellung auch nicht geeignet.

Die Tieftonwiedergabe ist sehr stark vom Hörraum abhängig. Eine natürliche Wiedergabe erfordert eine exakte Aufstellung der Lautsprecher. Ist diese aus räumlichen Gegebenheiten nicht möglich, kann ein Equalizer verwendet werden. Die Aufstellung der Boxen sowie die Equalizer Einstellungen erfordern die akustische Messtechnik. Hierbei sollte nicht nur der Frequenzgang sondern, besonders wichtig bei Subwoofern, auch die akustische Phase gemessen werden.

Ein kostenloses Messprogramm für den Tieftonbereich kann mit folgenden Link geladen werden:

http://www.kirchner-elektronik.de/~kirchner/ATB_PC_DEMO.zip ATB_PC_DEMO.zip

Als Messmikrofon für den Tieftonbereich haben viele PC Multimedia Mikrofone eine ausreichende Genauigkeit.

5.6 Vorteile des Dipol-Cardioid Subwoofers

1. Im Wohnraum bei der HiFi Anlage

Nicht mehr alle Raumresonanzen, Moden, werden angeregt. Besonders die Moden längs der Aufstellungslinie der Lautsprecher werden nicht angeregt. Diese liegen meist bei der Aufstellung der Lautsprecher auf der kürzeren Seite bei höheren Frequenzen, die besonders den Klang verfälschen.

Der Dipol-Cardioid Lautsprecher besitzt das beste Impulsverhalten. Er ist sehr schnell und ist so die ideale Ergänzung für Flächenstrahlern, Elektrostaten oder Magnetstaten.

2. Im Saal bei der Beschallung.

Im Saal bestehen auch die Bedingungen des Wohnraums, nur bei etwas tieferen Frequenzen. Bei Lifemusik besteht der große Vorteil, dass die meist seitlich neben der Bühne stehenden Lautsprecher im Tieftonbereich einen geringeren Schalldruck erzeugen. Dies verhindert die gefürchteten Rückkopplungen.

3. Bei Freiluftveranstaltungen mit Diskothek oder Lifemusik

Bei Veranstaltungen im Freien wird durch die Dipol-Cardioid Charakteristik das Verhältnis der Gesamtlautstärke zur Lautstärke im Publikum verringert. Dies bedeutet, dass die Lautstärke für die Umgebung reduziert wird. Bei der Lifemusik werden auch hier die Rückkopplungen im Tieftonbereich vermieden.

6. Vergleichende Messungen

6.1 Frequenzgänge



Als Referenzlautsprecher wird ein 15“ Bass mit tiefer Resonanzfrequenz gewählt. Der Bass wird in den aufwendigsten Studiomonitoren und den besten High End Lautsprechern eingesetzt. Wir betreiben ihn in einem optimal abgestimmten 110 l Gehäuse.

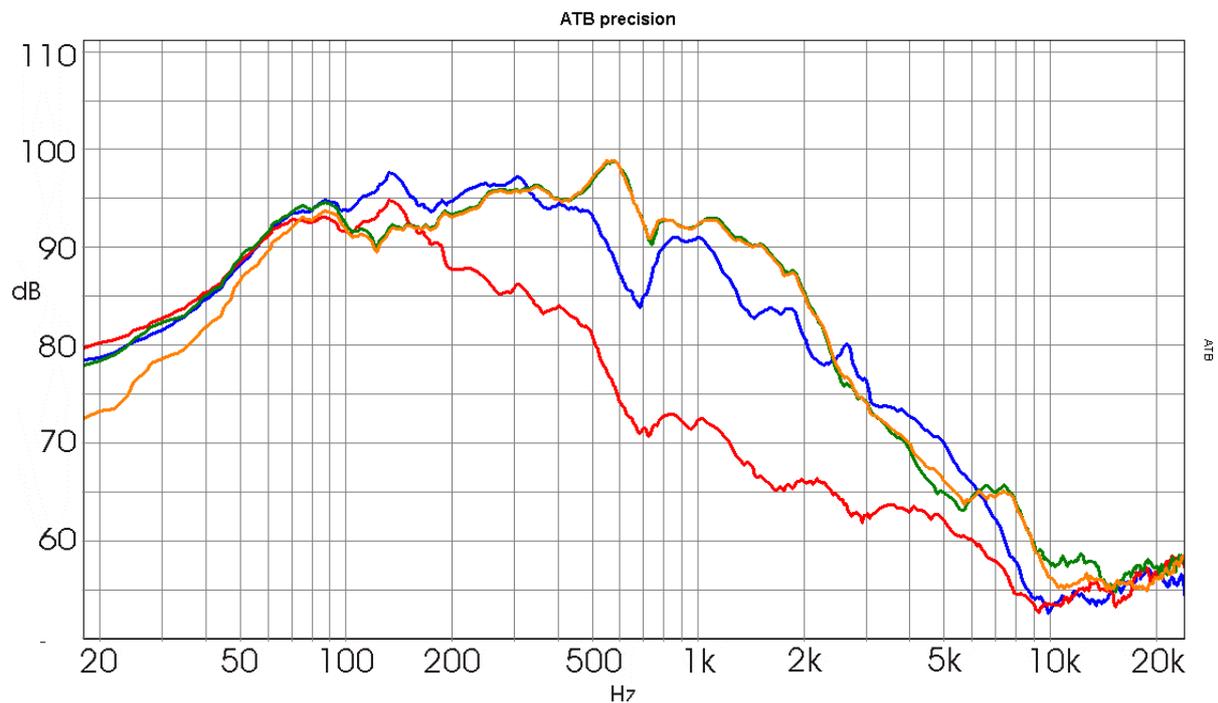


Bild 6.1

Das Bild 6.1 zeigt die Frequenzgänge von Referenz und dem Demomodel vom Dipol-Cardioid Lautsprecher im Wohnraum gemessen. Grün ist der Referenzlautsprecher im Bassreflexgehäuse und orange im geschlossenen Gehäuse. Blau der Dipol-Cardioid Lautsprecher ohne Weiche und rot mit passiver Weiche, 12dB mit Saugkreis. Der Bassreflex und Dipol-Cardioid Lautsprecher besitzen den identischen Tieftonbereich und die identische Lautstärke. Der Wirkungsgrad vom Dipol-Cardioid ist um 3dB geringer, da der Referenzlautsprecher 8Ω und der Dipol-Cardioid 4Ω besitzt.

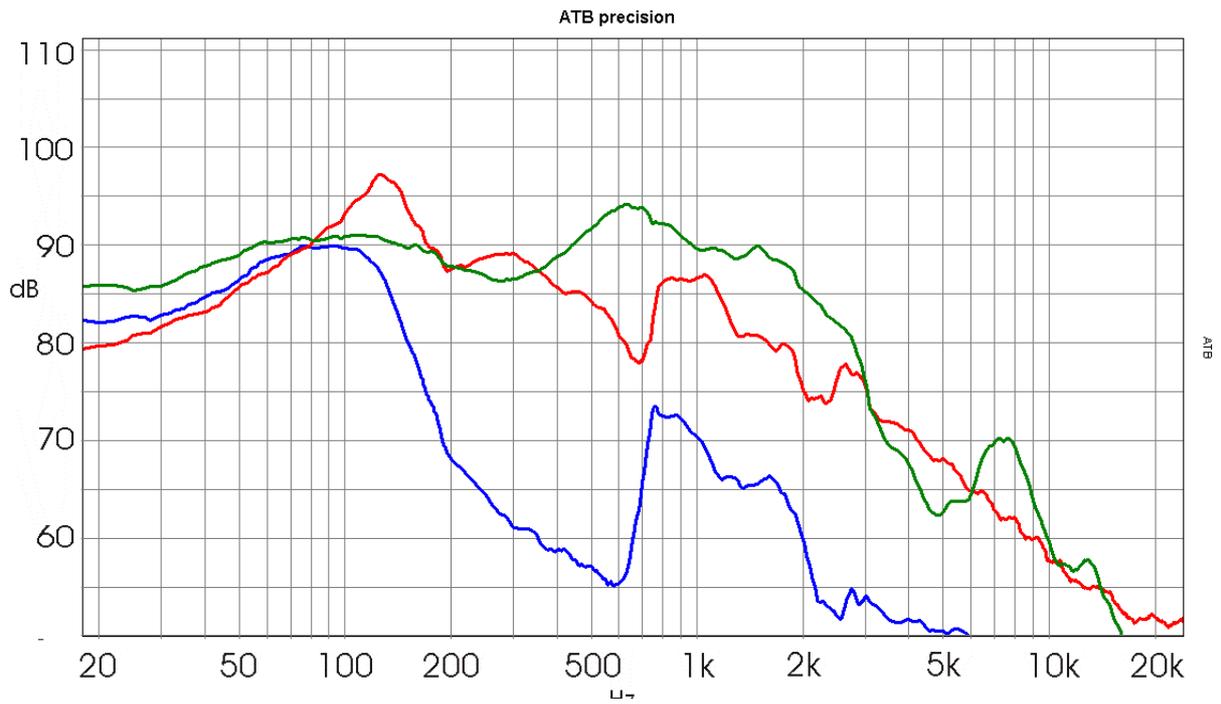


Bild 6.2

Bild 6.2 zeigt die Frequenzgänge der Subwoofer im Freifeld mit 2m Mikrofonabstand.
 Rot = Dipol-Cardioid, grün = Bassreflex, blau = Bandpass

6.2 Akustische Phase

Neben dem Schalldruckfrequenzgang ist die akustische Phase die entscheidende Größe zur Beurteilung eines Lautsprechersystems.

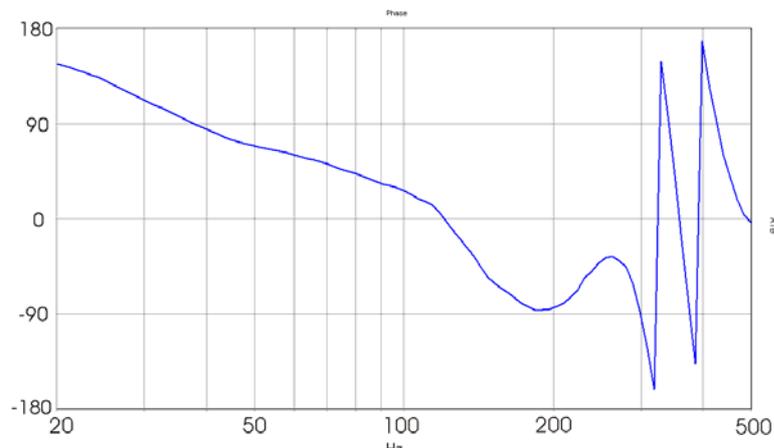


Bild 6.3 Dipol-Cardioid

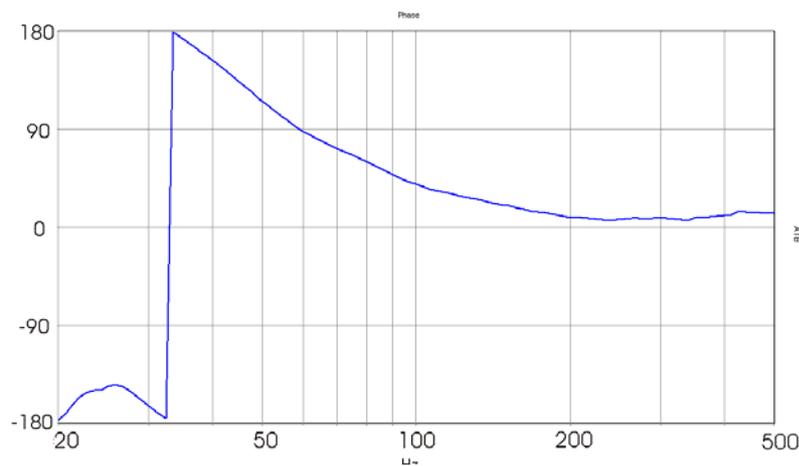


Bild 6.4 Bassreflex

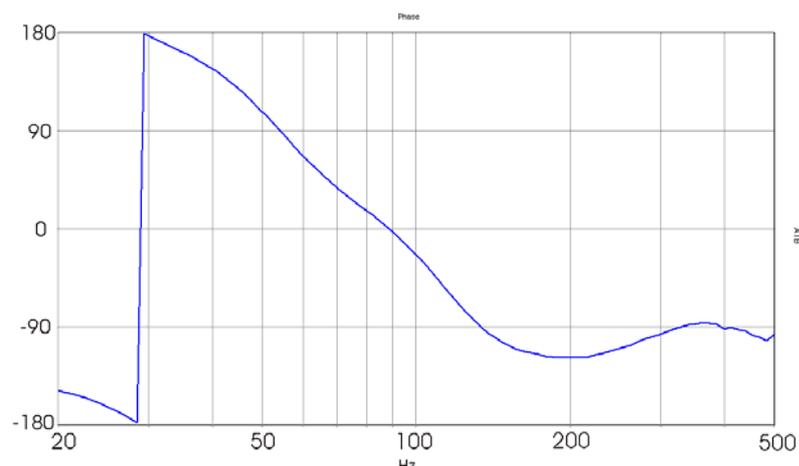


Bild 6.6 Bandpass

Bei der Darstellung der akustischen Phase wird der Bereich von -180° bis 180° gezeigt. Bei einer größeren Phasendrehung erreicht die Kurve die Diagrammgrenze. Um die weitere Drehung zu zeigen, wird bei der Darstellung ein Sprung zur anderen Grenze durchgeführt. So kann die Darstellung auch über einen größeren Bereich als die 360° des Diagramms erfolgen. Der Phasensprung in dem Bild 6.5 bei 32 Hz entsteht dadurch, dass die Kurve die -180°

Grenze erreicht und nicht weiter nach unten angezeigt werden kann. Während die Phase unterhalb des Diagramms verläuft, wird sie durch den Sprung bei 180° weiter dargestellt. Bei der Phasemessung von Tieftönern in geschlossenen Gehäuse oder Bassreflexgehäusen ist die Phasendrehung im Mitteltonbereich nahe bei 0° . Bei diesen Tieftönern fällt der Frequenzgang zu tieferen Frequenzen hin mit ca. 12dB/Oktave ab. Diese Tiefpassfunktion besitzt die Phase von $+180^\circ$. Dies ist in der Messung vom Bassreflexlautsprecher auch gut zu sehen.

Die akustische Phase vom Dipol-Cardioid, Bild 6.3 zeigt in dem Frequenzbereich von 20Hz – 100Hz die geringste Phasendrehung von 90° . Dies bedeutet, dass der Lautsprecher für eine zeitrichtige Lautsprecherkombination geeignet ist. Für den Frequenzbereich $> 120\text{Hz}$ entstehen starke Phasensprünge durch den Schall der hinteren Öffnungen. Dieser Bereich liegt aber außerhalb des Übertragungsbereich und ist zu vernachlässigen.

Bei dem Bassreflexlautsprecher, Bild 6.4, beträgt die Phasendrehung 180° . Für eine zeitrichtige Lautsprecherkombination ist diese Phasendrehung ungeeignet.

In Bild 6.6 wird der Bandpasslautsprecher gezeigt. Seine akustische Phasendrehung von fast 360° ist ein Problem bei allen Lautsprecherkombinationen.

Die Bandpassfunktion des Lautsprechers wird akustisch erzeugt, was als Vorteil beschrieben wird. Die Phasemessung zeigt aber, dass für eine Übertragungsfunktion nicht entscheidend ist ob sie akustisch, elektrisch, passive oder aktiv oder digital erzeugt wird. Der Zusammenhang von Amplitude und Phase entspricht immer der mathematischen Funktion. Auch die digitalen FIR Funktionen sind keine Ausnahme. Sie bilden nur einen besonderen Filter Typ, bei dem an Stelle der Phase der Impuls eine Funktion der Amplitude ist.

6.3 Einschwingen

Zur Messung des Einschwingverhaltens wird ein Sinus-Burst mit der Frequenz von 60Hz benutzt.

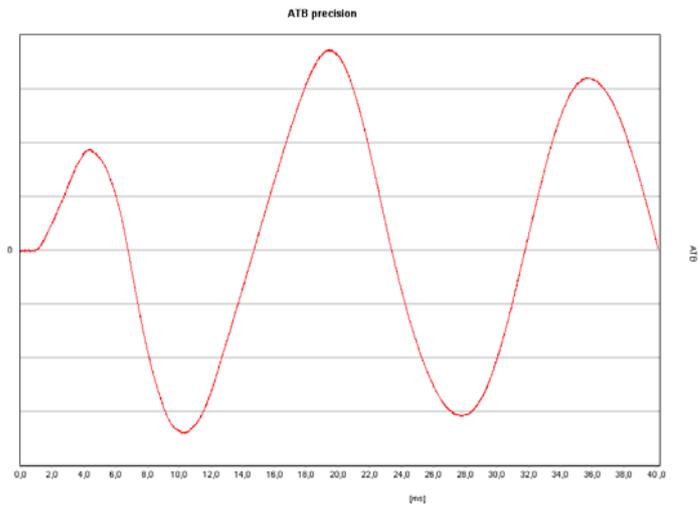


Bild 6.7 Dipol-Cardioid

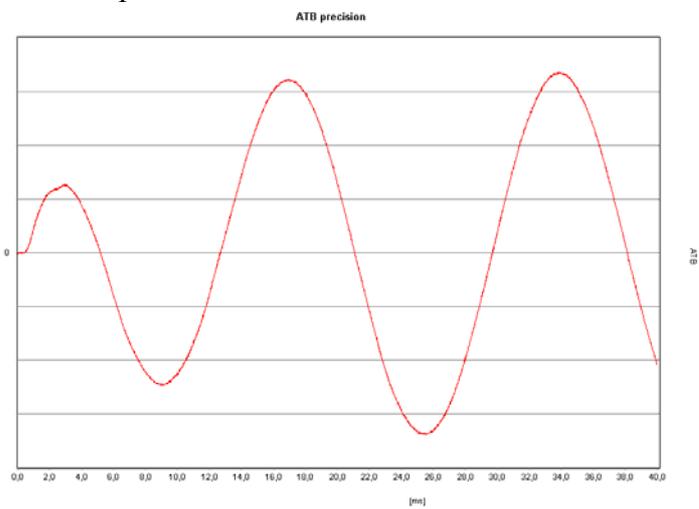


Bild 6.8 Bassreflex

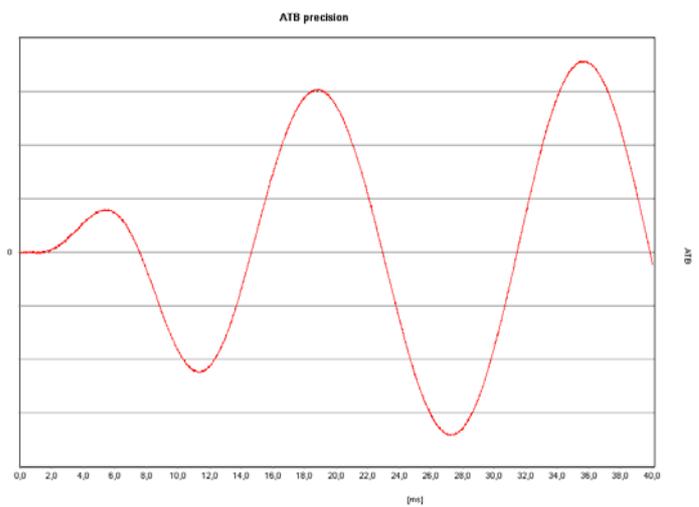


Bild 6.9 Bandpass

Ein Dipol-Cardioid Subwoofer, Bild 6.7, zeichnet sich durch ein besonders gutes Impulsverhalten aus. Bei einer Darstellung für einen längeren Zeitraum zeigt sich, dass das Überschwingen durch die Resonanzfrequenz von 22Hz erzeugt wird. Diese Frequenz liegt unterhalb der Hörschwelle.

Der Bassreflexlautsprecher, Bild 6.8, benötigt eine Halbwelle länger um die Signalamplitude zu erreichen.

Bild 6.9 zeigt den Bandpass. Die Bandpassfunktion des Subwoofers bewirkt ein langsames Einschwingen.

6.4 Sprungantwort

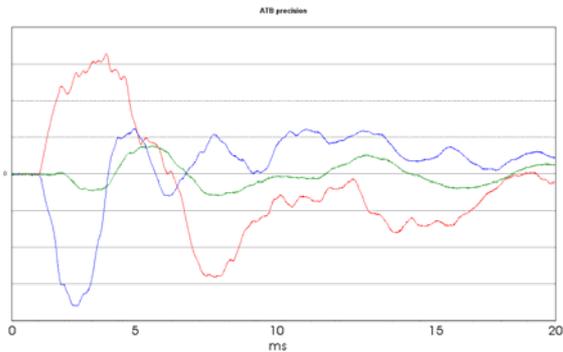


Bild 6.10

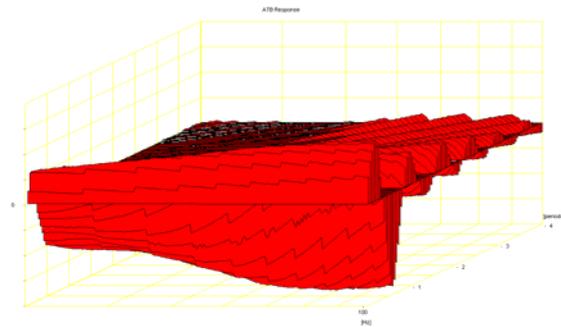


Bild 6.11

Das Bild 6.10 zeigt die Sprungfunktion des Cardioid Subwoofers im Nahfeld. Die rote Kurve zeigt den Schalldruck der vorderen Öffnung mit dem Tieftonanteil. Die grüne Kurve zeigt den Schalldruck der hinteren Öffnung. Diese zeigt eine gegenüber der vorderen Öffnung doppelte Frequenz. Die blaue Kurve zeigt den geringen Schalldruck an der Seite gemessen.

Bild 6.10 zeigt das Zeitverhalten der vorderen und hinteren Öffnung getrennt. Die Sprungfunktion zeigt die Amplitude des Schalls über der Zeit. Die im signal enthaltenen Frequenzen sind nur schlecht zu erkennen. Diese werden in der 3D Messung mit dem Dynamic Measurement Programm ausgeführt. Es wird die vordere Öffnung im Nahfeld gemessen. Das Bild 6.11 zeigt drei Gebirgszüge. Der vordere ist das positive Signal der vorderen Öffnung. Der mittlere zeigt das negative Signal der hinteren Öffnung sowie das Überschwingen des vorderen Signals. Da beide Signale zeitlich genau übereinander liegen, besteht ein exaktes Impulsverhalten. Der hintere Gebirgszug zeigt das Überschwingen der hinteren Öffnung.

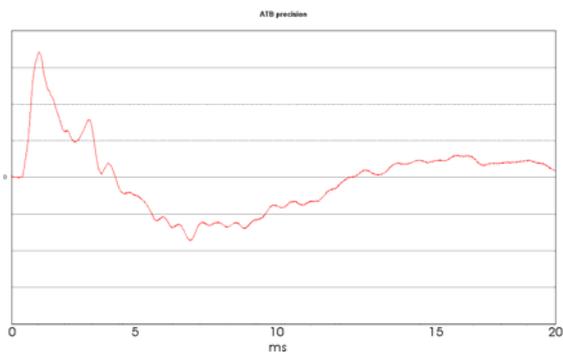


Bild 6.12

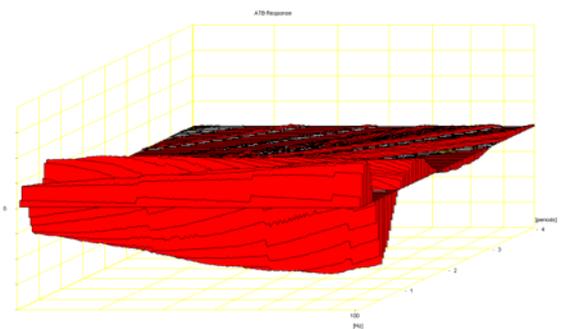


Bild 6.13

Bild 6.12 zeigt die Sprungantwort des Bassreflex Lautsprechers.

Bild 6.13 die Dynamic Measurement Darstellung. Das dritte Gebirge ist das Signal der Bassreflexöffnung.

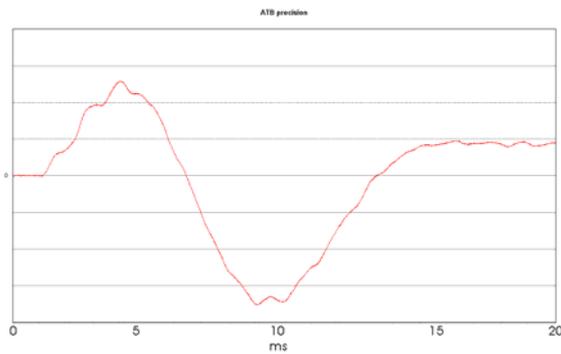


Bild 6.14

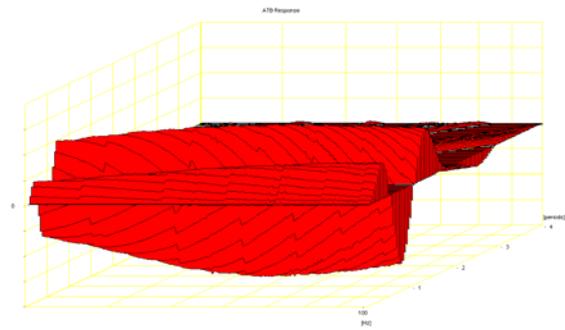
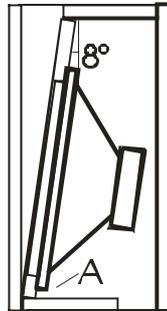


Bild 6.15

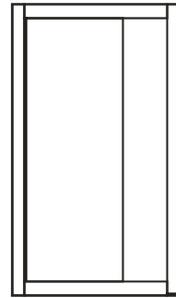
Bild 6.14 zeigt die Sprungantwort vom Bandpass Lautsprecher. Durch die Bandpassfunktion, bei der die höheren Frequenzen unterdrückt werden, entsteht der langsame Anstieg des Signals. Die Welligkeit zeigt den Frequenzbereich bei 750Hz.
 Bild 6.15 zeigt die Dynamic Measurement Darstellung. Der erste Gebirgszug ist niedrig. Dies zeigt ein schlechtes Einschwingverhalten. Das eigentliche Signal besteht aus dem negativen Überschwinger und dem dritten Gebirgszug, der sehr ausgeprägt ist.

7. Anhang

7.1 Gehäusezeichnung für Dipol-Cardioid



Querschnitt



vorne

