

Photo Story

Lautsprecherentwicklung, mit Hilfe des ATB PC Pro

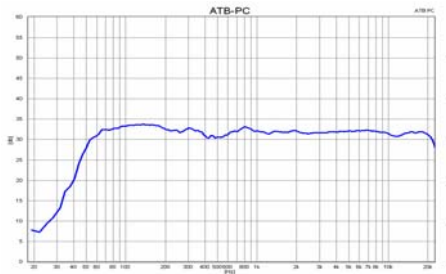
Die mit **Wissen** gekennzeichneten Artikel liefern die physikalischen Grundlagen zu dem jeweiligen Thema.

1. Die Analog.on Nugget

Die Analog.on Nugget ist ein kleiner High End Lautspechers für Hi-Fi Anlage, Studio und Surround. Der optimale Anschlusswert und die besondere Bassabstimmung prädestinieren die Nugget für Digital-Verstärker. Daher ist sie auch für Plasma- und LCD-Fernseher bestens geeignet



Design Studie der Nugget (Goldklumpen)



Der superlineare Frequenzgang



Die extrem günstigen Bauteile

1.1 Die Bauteile



Die Lautsprecher



Die entwickelte Weiche



Gehäuse besteht aus Stein?

2. Das Team



Von der Technikerschule
Braunschweig, Thomas Mohring,
Ralf Freymuth und Markus Sievers



Der Praktikant
Jürgen Knoop



Der Diplom Ingenieur
Leo Kirchner

Ich bedanke mich bei den Mitarbeitern für deren ausgezeichnete Artikel.

Ralf Freymuth mit *Grundlagen der Akustik*

Thomas Mohring mit *Auswahl der Chassis* und *Thiele-Small*

Markus Sievers mit *Frequenzweiche*

Jürgen Knoop mit dem *Thiele-Small Rechner* Programm

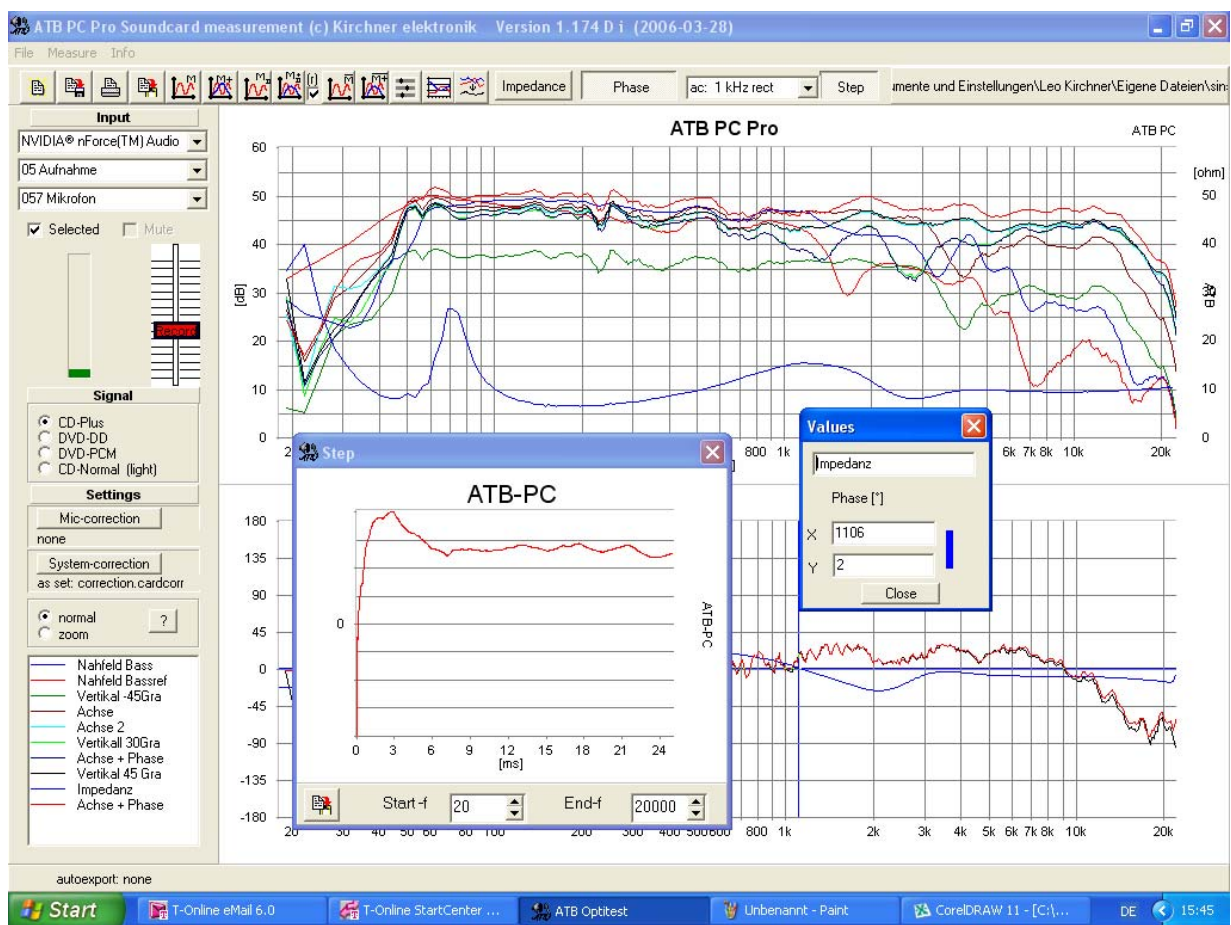
Projektleiter Leo Kirchner

3. Das Messsystem ATB PC Pro

Wissen W1. Grundlagen der akustischen Messtechnik

Bei der Entwicklung der Nugget kommt die neueste Messtechnik zum Einsatz. Alle Messungen werden mit dem ATB PC Pro durchgeführt. Bei dem ATB PC wird das Messsignal von einem CD oder DVD Spieler erzeugt. Die Messung wird mit dem PC durchgeführt, wobei die Soundkarte die Messwerte aufnimmt.

Das ATB PC Pro ist ein Werkzeug für den Entwickler. Daher muss die Durchführung der Messung so einfach sein, dass sich der Techniker voll auf die Entwicklung konzentrieren kann. Dies wird durch das selbsterklärende Windows Messprogramm erreicht.



In dem Bild werden SPL, Impedanz mit Phasenmessung und Sprungantwort sowie der Cursor gleichzeitig gezeigt. Die einzelne Messung ist übersichtlicher.

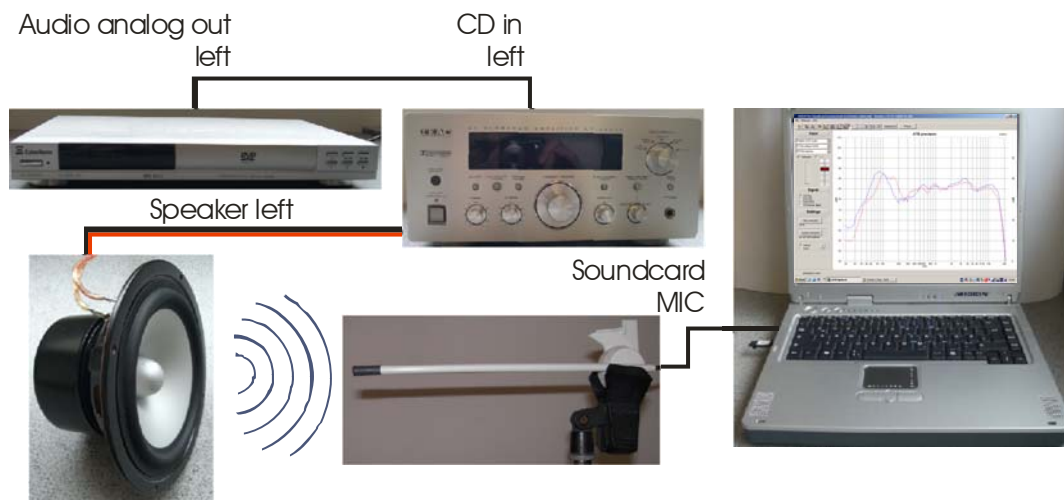
System-correction



Die Funktion der System-Correction testet den Frequenz- und Phasengang der Soundkarte. Hierbei werden Korrekturdateien erzeugt, mit denen die hohe Messgenauigkeit erreicht wird.

Messaufbau für akustische Messungen

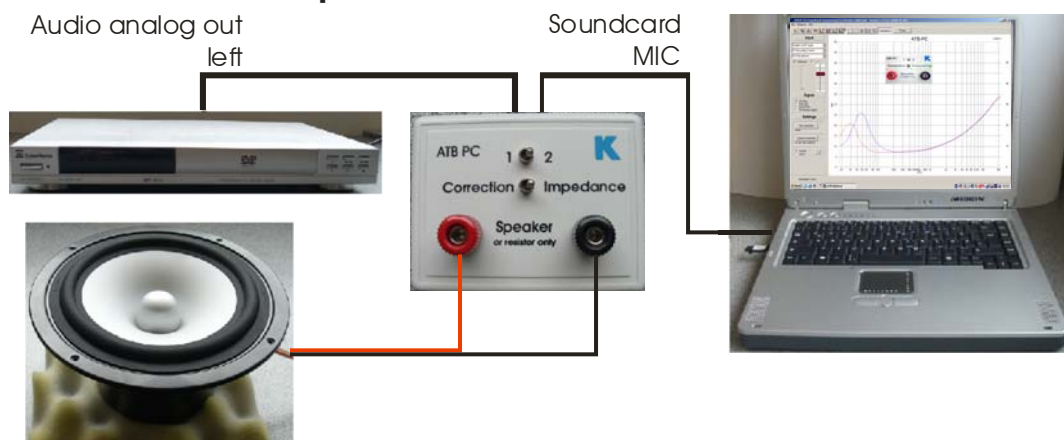
SPL



Mit dieser Anordnung werden die SPL (Sound-Pressure-Level) Frequenz- und Phasengänge des Lautsprechers gemessen.

Messaufbau für elektrische Messungen

Impedance



So wird die

frequenzabhängige Impedanz mit Betrag und Phase gemessen.

4. Die Chassis

Wissen: W2. Auswahl der Chassis

Der Tief-Mitteltöner W 130 AL8



Lautsprecher W 130 AL8
Aluminiummembran, durch
Nawi-Form resonanzarm



Doppelmagnet,
magnetisch geschirmt



Stahlkorb,
stabil und resonanzärmer
als Gusskorb

Der Hochtöner GRT 85



Air-Motion Hochtöner,
erfunden von Oskar Heil,
bewährt sich seit 20 Jahren
in ESS Boxen



gefaltete Folienmembran
mit aufgedruckten Leiter-
bahnen, sehr leicht und
daher schnell und neutral



Neodymmagnete erzeugen
das starke Magnetfeld für
die präzise Klangwieder-
gabe

5. Das Gehäuse

Bei der Gehäuseentwicklung sind entscheidend:

1. Die Größe des Gehäuses wird durch das Volumen für den Tieftöner vorgegeben.
2. Die Anordnung der Lautsprecher soll den Phasengang linearisieren.
3. Der Innenaufbau vermeidet stehende Wellen im Gehäuse.
4. Die Öffnung für die Bassreflexabstimmung soll optimal sein.
5. Die Gehäusewände sollen resonanzfrei sein.
6. Ein ansprechendes Aussehen ist wohnraumfreundlich.

5.1 Thiele-Small

Credit: ATB_TS_Tool.zip Thiele-Small Rechner

Wissen: W3. Thiele-Small Parameter

Das Lautsprechervolumen wird vom Tieftöner bestimmt.

Für die Gehäuseberechnung werden die Thiele-Small Parameter gebraucht.

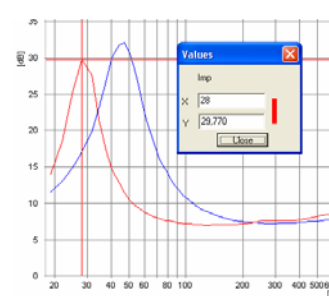
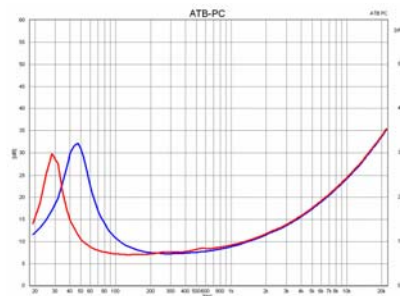
Die Parameter werden aus zwei Impedanzmessungen, mit und ohne Zusatzmasse, berechnet.



Für die Impedanzmessung wird der Lautsprecher senkrecht gehalten oder auf Schaumstoff gelegt.

Die Masse wird auf einer Waage ausgewogen, Genauigkeit 2 Gramm.

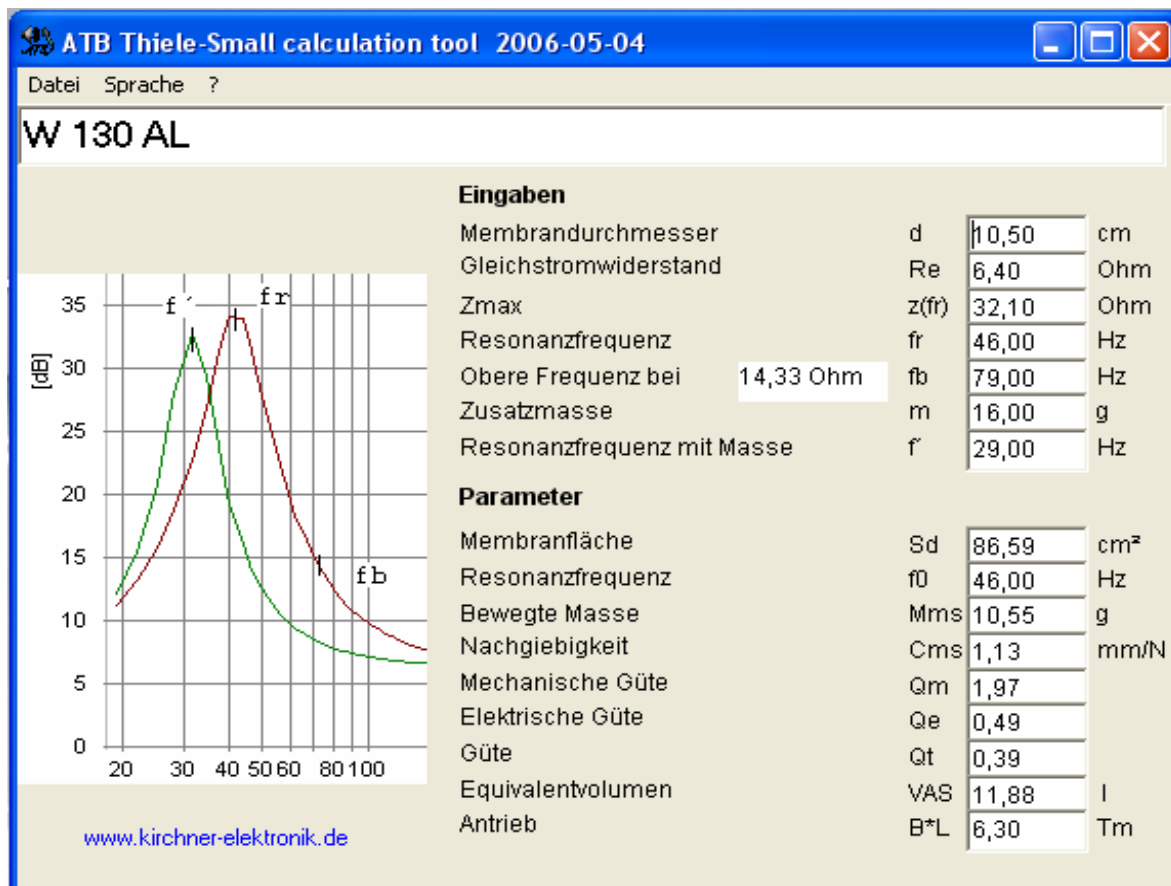
Die Masse wird auf der Membran befestigt



Der Durchmesser wird von halber Sicke bis halber Sicke ausgemessen

Impedanzmessung
blau = ohne Masse
rot.= mit Masse

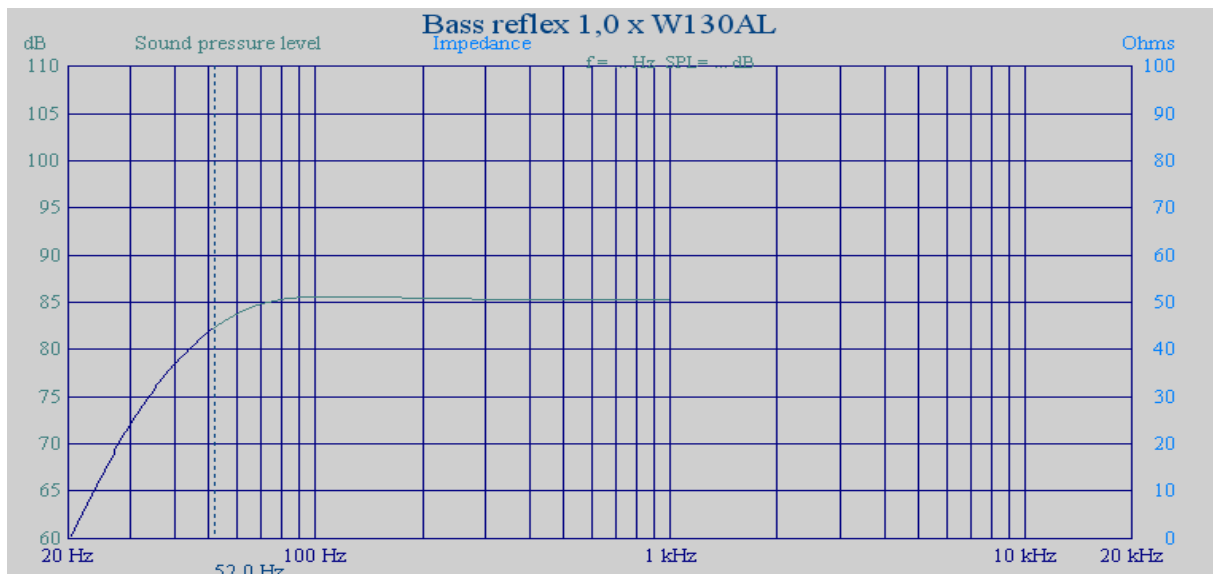
Die Werte werden mit dem Cursor ausgelesen. Hierbei sollte gemittelt werden.



Nachdem die Werte in den Rechner eingetragen sind, werden die Lautsprecherparameter automatisch berechnet. Die gemessenen Parameter entsprechen mit einer geringen Abweichung den Herstellerangaben. Zur Berechnung des optimalen Gehäuses werden die Parameter in ein CAD-Programm zur Gehäuseberechnung eingetragen.

CAAD Info Box			
BOX CALCULATION			
Driver name	W130AL	Net box volume (Vb) l	8,0
Box type	Bass reflex	Port diameter (Dp) cm	4,068
Number of equal driver	1,0	Port length (Lv) cm	23,99
Resonance frequency (fs) Hz	44,0	Port resonance frequency (fp) Hz	42,384
Equivalent volume (Vas) l	11,88	-3 dB frequency (f3) Hz	0,0
Total Q (Qt)	0,431	Reference SPL dB	85,232
Mechanical Q (Qm)	1,97	Efficiency bandwidth produkt (EBP)	94,94
Electrical Q (Qe)	0,49	Alpha (fcb/fs) ² -1 (a)	1,485
DC resistance (Re) Ohms	6,4	Ratio fp/fs (h)	0,963
Serial resistance (Rs) Ohms	0,6		
MONACOR MBR		SUGGESTED BOX (inclusive Vb-)	
Effective cone area (Sd) cm ²	86,0	Internal width cm	16,14067
Port area (Ap) cm ²	13,0	Internal height cm	21,50105
Leakage-Q (QL)	7,0	Internal depth cm	25,93418
Leakage volume (Vb-) l	0,0	Box volume (VbG) in l	9,0
Get values from data base		Calculate optimum box	
Calculate Data			

Das Volumen ist auf 8 Liter berechnet wurden.



Der berechnete Frequenzgang zeigt eine leichte Überhöhung von 1dB in dem Frequenzbereich um 100Hz. Dies ist bei kleinen Lautsprechern die gehörmäßig richtige Abstimmung. Der Vergleich von gemessener (Bild Seite 1) und berechneter Frequenzgangkurve zeigt eine große Übereinstimmung. Mit der tiefen Grenzfrequenz von 42Hz ist die Nugget ein vollwertiger Lautsprecher, der sogar zur Wiedergabe großer Orchester geeignet ist.

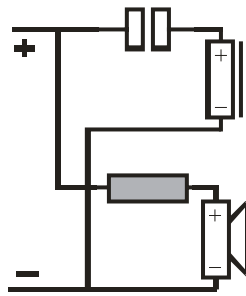
5.2 Der Phasenausgleich

Wissen: W4. Die Phase

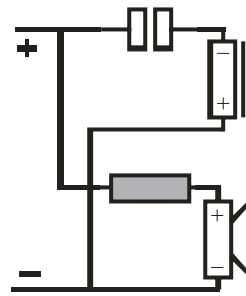
Bestimmung des Phasenausgleichs für das optimale Zeitverhalten. Der Ausgleich berücksichtigt die akustischen Zentren der Lautsprecher sowie die Phasendrehung der Weiche.



Lautsprecher werden in Probegehäuse montiert



Die Lautsprecher werden mit der 6dB pro Oktave Weiche angeschlossen



Der Hochtöner wird verpolt, da bei gleicher Phase der Ausgleich 9cm beträgt

Messung der Phase



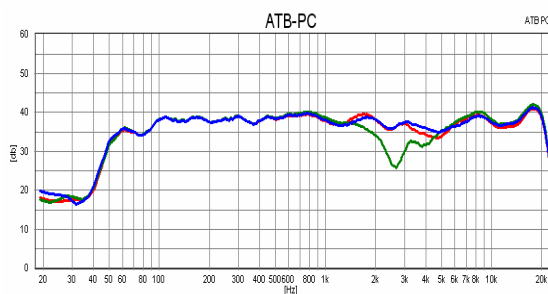
1. Position, rot



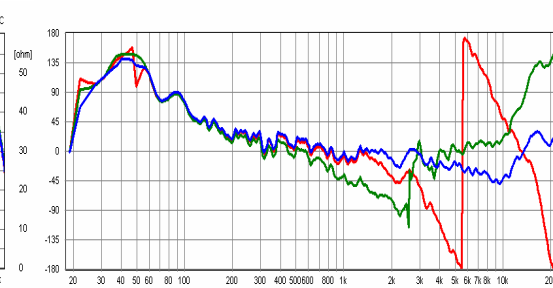
2. Position, blau



3. Position, grün



Der Frequenzgang zeigt das Verschieben des Hochtöners



Die Phase 1. Position rot = nachlaufend
2. Position blau = linear
3. Position grün = vorlaufend



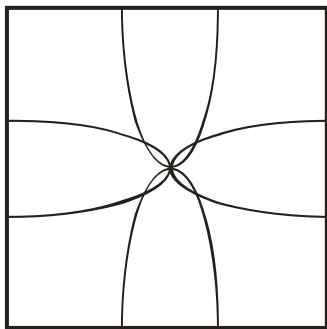
Der Versatz des Hochtöners wird gehörmäßig mit dem Pink Noise Signal, Track 7 der Auto-Test CD, ermittelt. Die Phase stimmt, wenn das Rauschen zwischen beiden Lautsprechern zu hören ist. Dann bilden die beiden Lautsprecher gehörmäßig eine Schallquelle. Der Versatz kann auf den Millimeter genau bestimmt werden.

5.3 Die stehenden Wellen

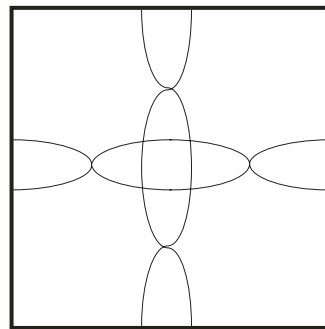
Wissen: W5. Grundlagen der Akustik

Der Schall in einem Raum, hier dem Gehäuse, bildet stehende Wellen oder Moden. Dies sind Resonanzen der Schallwellen im Gehäuse. Bei Lautsprechern mit steifer Membran haben die Resonanzen eine Rückwirkung auf den Lautsprecher. Dies bewirkt eine zusätzliche, zeitlich verzögerte Schallabstrahlung des Lautsprechers und Verfälschung des Kluges.

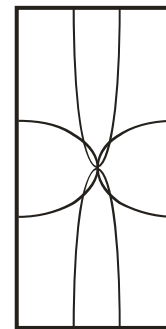
Die Moden im Gehäuse mit den Abmessungen der fertigen Box. Es wird der Schalldruck gezeigt, der an den Gehäusewänden sein Maximum hat. Bei dem Knoten hat die Schnelle das Maximum.



1. Mode bei $\lambda/2$
 Höhe der Box 25cm
 Frequenz der Mode
 $f = 340 \text{ m/s} \times 1/0,25 \times \frac{1}{2} = 680 \text{ Hz}$



2. Mode, $f = 1360 \text{ Hz}$

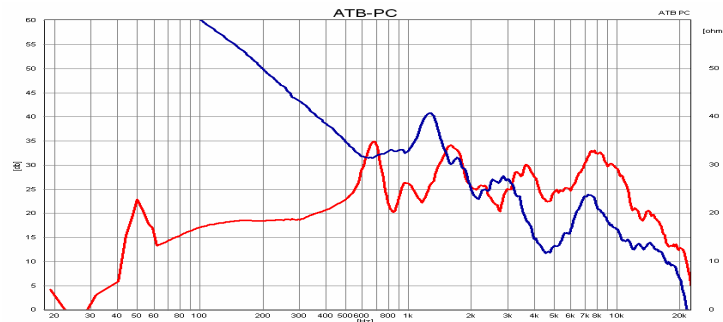


Mode in Querrichtung, $f = 2,8 \text{ kHz}$.
 Die Frequenz kann einfach mit
 Dämmmaterial auf der Gehäusewand
 bedämpft werden.

Messung der Moden in einem Probegehäuse mit den Abmessungen der fertigen Box. Das Gehäuse wird für die Messung geschlossen.



Mittige Anordnung von
 Mikrofon oder Druck-
 gradienten-Empfänger
 im Gehäuse

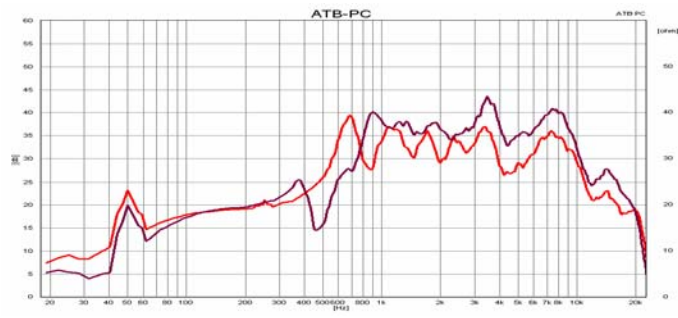


Frequenzanalyse

blau = Messmikrofon ist Druck-Empfänger => geringer
 Druck bei 1. Mode, hoher Druck bei 2. Mode

rot = Druckgradienten-Empfänger => hohe Schnelle bei 680Hz

Die Resonanzen werden durch ein schräges Brett bekämpft.

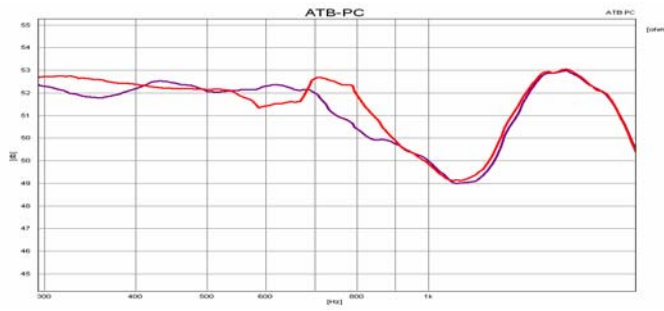


Anordnung des schrägen Brettes zur Unterdrückung der 1. Mode

Messung im Gehäuse

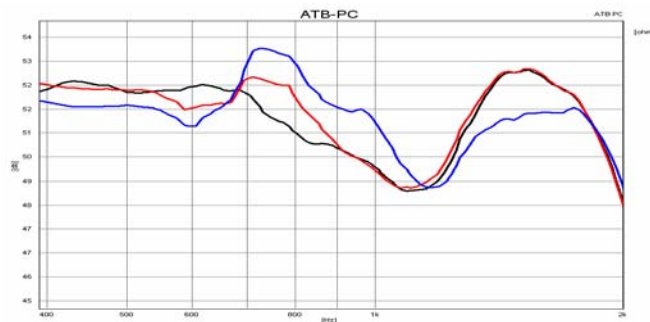
rot = ohne Brett

violett = mit Brett, die 1. Mode ist weg und die Kurve glatter



Die Nahfeldmessung in 1cm vor der Lautsprechermembran zeigt die Rückwirkung der stehenden Welle auf den Lautsprecher

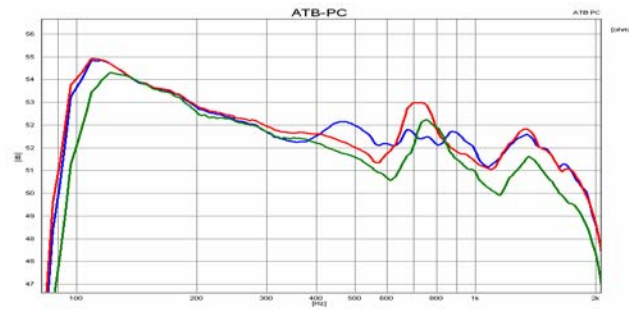
Messung mit 1cm vor dem Lautsprecher die rote Kurve zeigt deutlich die Resonanz bei 680Hz



Das Brett wird mit unterschiedlichen Winkeln angeordnet. Nur ein Winkel unterdrückt die Resonanz.

Messung mit 1cm vor dem Lautsprecher blau, das Öffnen der Bassreflexöffnung verstärkt die Resonanz. Die schwarze Kurve zeigt den optimalen Winkel für die Anordnung des Brettes

Als Weiteres wird die Wirkung gerundeter Seitenwände untersucht.



Das Bild zeigt die Anordnung zur Messung gerundeter Seitenwände. Das Gehäuse wird geschlossen.

rot = ohne Brett, blau = mit Brett.
grün = die Rundung bringt keinen Vorteil, aber durch das kleinere Volumen geht Bass verloren.

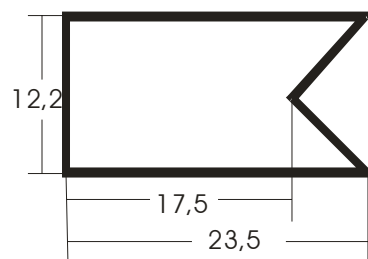
Die Verfälschung des Klanges durch die stehenden Wellen entsteht weniger durch den unausgeglicheneren Frequenzverlauf. Dieser ist nur ein Hinweis auf die zeitverzögerten Schallanteile.

5.4 Die Bassreflexabstimmung

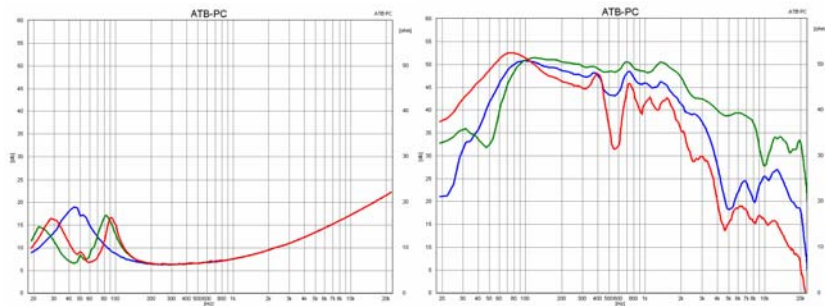
Bei der Konstruktion der Bassabstimmung muss Folgendes berücksichtigt werden:

1. Die Öffnung muss sich auf der Front befinden, da sonst eine Aufstellung im Regal nicht möglich ist.
2. Es sollte kein Rohr verwendet werden. Ein längeres Rohr besitzt Resonanzen im Mitteltonbereich, die den Klang verschlechtern.
3. Eine Öffnung auf der Front darf keinen Schall im Mitteltonbereich durchlassen. Hierdurch wird der Klang verwaschen, weil die Schallwellen von der Öffnung verzögert abgestrahlt werden.

Die bei der Nugget gewählte Konstruktion hat sich schon bei vielen Lautsprechern bewährt.



Der dreieckige Ausschnitt des Brettes wirkt als akustischer Tiefpass. Der Tiefpass wirkt als Sperre für die Mitteltöne. Zur Vermeidung von Resonanzen im Kanal wird das Brett schräg gestellt.



Brett mit Winkel

Impedanzmessung zur Abstimmung.

blau = Tief-töner ohne Gehäuse

grün = Brett gerade, Abstimmung zu tief

rot = richtiger Winkel, die Maxima der Impedanzkurve sind gleich groß

Nahfeldmessung

blau = zwischen Tief-töner und Öffnung

rot = vor Öffnung

grün = vor Tief-töner

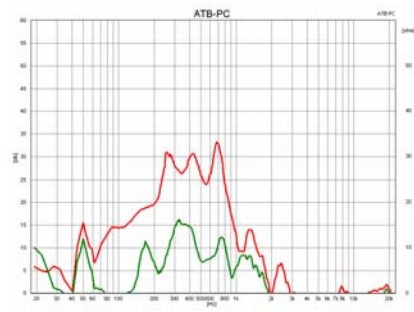
Die Nahfeldmessung zeigt, dass die Kurve der Öffnung das Maximum bei der abfallenden Flanke der Kurve des Tief-töners hat. Die blaue Kurve bildet die Summe des Schalls von Tief-töner und Öffnung. Diese ist sehr ausgeglichen. Die Messungen zeigen die optimale Abstimmung.

Die sehr aufwendige Thiele-Small Theorie ist hilfreich bei der Bestimmung des benötigten Volumens, aber für die Berechnung der Reflexöffnung noch nicht aufwendig genug.

5.5 Resonanzarmes Gehäuse

Wissen: W6. Beschleunigungsaufnehmer

Von dem Lautsprecher zu Schwingungen angeregte Gehäusewände verfälschen den Klang eines Lautsprechers. Deshalb werden auch Gehäuse aus kaum zu Schwingungen anregbaren Materialien, z.B. Stein, gebaut. Sinnvoller ist aber die Verwendung von Holzgehäusen mit Versteifungen. Um die Versteifungen an die richtigen Stellen zu setzen, werden die Schwingungen des Gehäuses gemessen. Hierzu wird ein Beschleunigungsaufnehmer verwendet. Der Beschleunigungsaufnehmer misst nur die Gehäuseschwingungen. Der Schall zum Anregen des Gehäuses wird nicht mitgemessen.

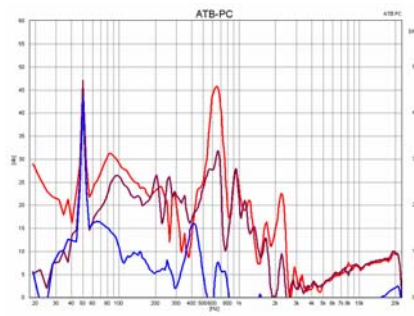


Beschleunigungsaufnehmer wird an den Mic-Eingang der Soundkarte angeschlossen

Mit doppeltklebendem Teppichband wird der Aufnehmer auf die Seitenwand geklebt

Schwingungsmessung der Seitenwand
rot = ohne Versteifung
grün = Wand durch das schräge Brett versteift

Schwingungsmessungen an der Anschlussdose



Befestigung des Beschleunigungsaufnehmers an der Anschlußdose

Frequenzanalyse, die Spitze bei 50Hz ist eine Netzstörung.
rot = Anschlußdose ohne Bedämpfung
violet = die Rückseite ist mit einer Bitumenplatte bedämpft
blau = die Dose ist mit Acryl-Dichtung eingesetzt.

Anhand der Anschlussdose wird gezeigt, wie wichtig die Messung ist. Die Bedämpfung mit der Bitumenplatte, was als High End Lösung verkauft wird, bringt wenig.

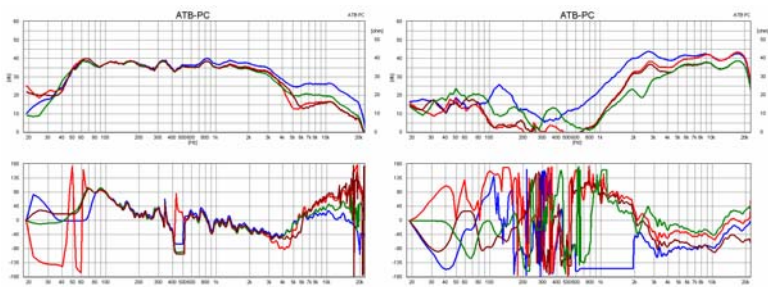
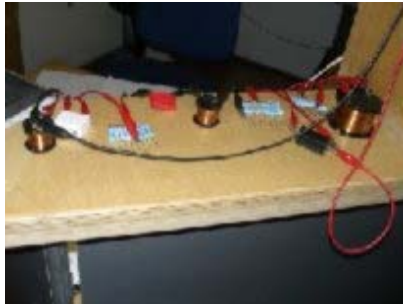
Bei dem Einkleben mit der Acryl-Dichtung wird die Innenseite der Bohrung für die Anschlussdose mit einer ca. 5mm dicken Schicht beklebt. Die Dose wird so mit der Rückwand des Gehäuses verbunden und ist akustisch tot, hat keinen Einfluss auf den Klang mehr.

6. Die Weiche

Wissen: W8. Frequenzweiche

6.1 Weichenentwicklung

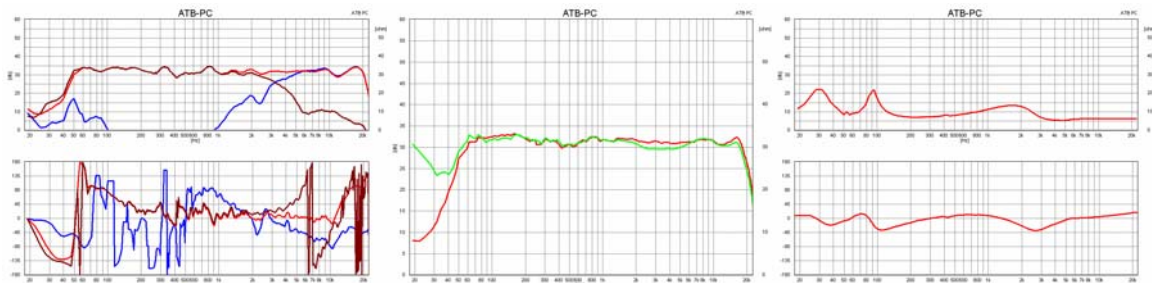
Eine vorläufige Weiche wurde für die Bestimmung des Phasenausgleichs entwickelt. Für das endgültige Gehäuse wird die Weiche optimiert.



Bei der Entwicklung wird die Weiche mit Krokodilklemmen aufgebaut

Tiefpass für Tieftöner
blau = ohne Weiche
grün = mit Induktivität
rot = mit Saugkreis 1,5µF
braun = mit Saugkreis 1µF

Hochpass für Hochtöner
blau = ohne Weiche
rot = mit Kapazität
braun = Vorwiderstand
grün = mit Saugkreis

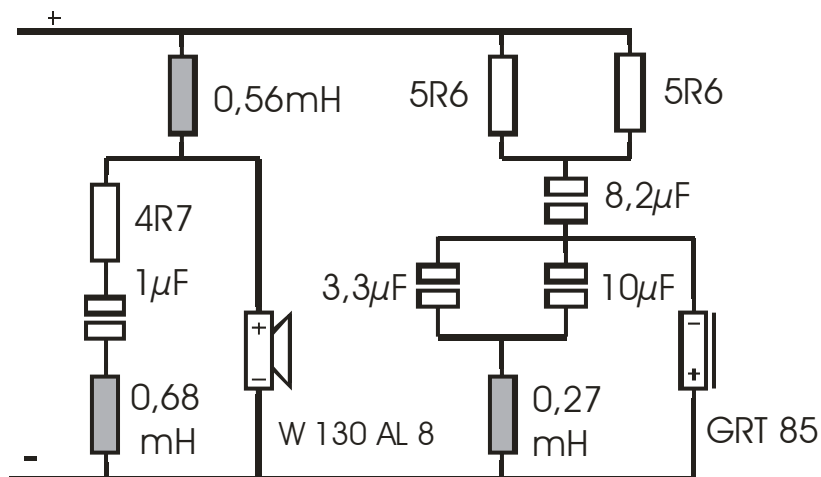


Frequenzgänge
rot = Summe
blau = Hochtöner
braun = Tieftöner

Abstrahlverhalten,
 gemessen mit Dauermessung
 mit Mitteln, Bereich $\pm 30^\circ$
 horizontal und vertikal

Impedanzkurve,
 mit einem Minimum von
 5,4 Ohm einem Phasenwinkel
 kleiner als $\pm 45^\circ$ auch für
 kleine Verstärker geeignet

6.2 Weichenplan



Weichenbauteile:

Spule 0,56mH als Luftspule 1,4mm \varnothing , Spule 0,68mH und 0,27mH als Luftspule 0,7mm \varnothing

Kondensator 8,2 μ F als MKP, Kondensator 1 μ F, 3,3 μ F und 10 μ F als MKT

Widerstände als 5W MOX

Weichenbauteile High End:

Spule 0,56mH als cfc-14Kupfer-Flachbandspule 1,4mm³ Querschnitt

Kondensator 8,2 μ H als Mundorf MKP- Kondensator 400V

6.3 Platinenlayout und Bestückung



Platinenlayout

Bei der Entwicklung zu beachten:

Die Spulen sind mit max. Zwischenräumen platziert, die Leiterbahnen bestehen aus gut leitenden Flächen, die Lautsprecher werden an einem Massepunkt zusammengeführt.

Für die Innenverdrahtung wird Lautsprecherkabel mit 1,5mm² verwendet.

Als High End Verbindungsleitungen das Supra Kabel mit der Bezeichnung:

Supra Classic Mini 1.6

Mit 0,01 Ω /m ist der Querschnitt wegen der kurzen Längen ausreichend.

Als High End Anschlusskabel empfehlen wir das Supra Rondo 4x2,5.

Die vier Drähte werden kreuzverschaltet, sodass die Induktivität kompensiert wird.



Bild der Weiche

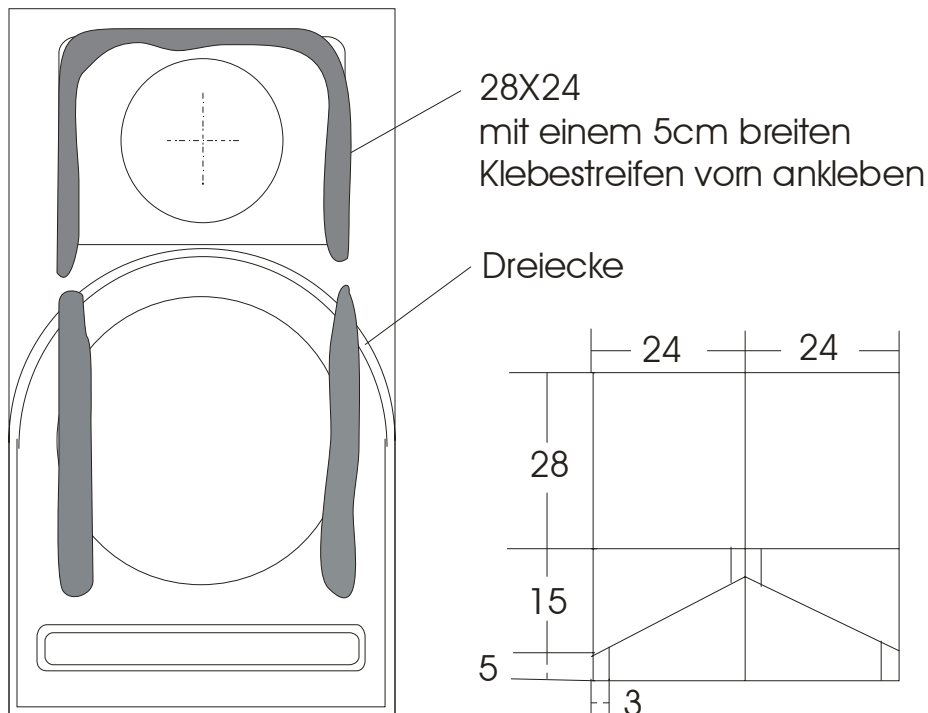
7. Das Dämmmaterial

Das Dämmmaterial soll bei der Nugget nur die stehenden Wellen im mittleren Frequenzbereich absorbieren. Es wird nur an den Seitenwänden und unter der Oberwand befestigt. Der weitere Raum wird nicht ausgefüllt. Dies ist durch die Konstruktion mit dem schrägen Brett nicht mehr nötig. Der Vorteil der Bedämpfung an den Wänden ist eine impulsechte Wiedergabe. Wird im Gegensatz hierzu ein Gehäuse z.B. mit Polyesterwatte ausgefüllt, schwingt die Watte mit und absorbiert Energie, die dann dem Lautsprecher bei der Impulswiedergabe fehlt.



Das spezielle Dämmmaterial besteht aus locker verbundenen Textilfasern. Es ist selbstklebend.

Bedämpfungsplan



8. Zusammenbau

8.1 Vorbereitung der Lautsprecher



Der Tieftöner wird mit einer Dauerdichtung für Fenster und Türen, 4x9mm, abgeklebt



Beim Hochtöner können die Hohlräume in der Montageplatte mit der Acryl-Dichtung ausgefüllt werden. Hierdurch wird die Platte akustisch günstiger als eine Metallplatte. Abgeklebt wird der Hochtöner mit Schaumstoff.

8.2 Gehäuse vorbereiten



Folgende Schrauben werden benötigt:

Lautsprecher: Panhead Z2-Bits schwarz 4x20, 2,5mm vorbohren 16 Stück

Oder High End: Imbus Holzschraube schwarz 4x25, 3mm vorbohren

Anschlussdose: Spanplattenschraube Senkkopf schwarz 3,5x16, 2mm vorbohren 4 Stück

Das Gehäuse wird entsprechend vorgebohrt.

8.3 Befestigen des Dämmmaterials

Das Dämmmaterial wird entsprechend der Zeichnung unter Kapitel 8. *Das Dämmmaterial*, zugeschnitten. Die Dreiecke werden an die Seiten geklebt. Das große Stück wird auf der langen Seite auf einem 5cm breiten Streifen von der Schutzschicht für den Kleber befreit. Das Stück wird dann U-förmig oben in die Box geklebt, sodass die klebende Fläche nach vorn zeigt.

8.4 Montage der Weiche

Die Kabel an der Weiche werden entsprechend der Beschriftung auf der Weiche gekennzeichnet.

Die Weiche wird mit der Acryl-Dichtung oben auf das mittlere, schräge Brett geklebt.



Die Lage der Weiche in der Box. Gut ist die eingeklebte Anschlussdose zu sehen.

8.5 Einbau der Lautsprecher

Zuerst wird der Hochtöner angelötet. Das Kabel von der Weiche wird abisoliert. Danach wird es verzinkt. Ebenso werden die Lötflächen des Hochtöners verzinkt.

Achtung:

Auf die Polung achten. Das gekennzeichnete Kabel an die Lötfläche mit dem roten Draht verlöten.

Das verzinkte Kabel wird auf die Lötfläche gelegt und die Spitze des Lötkolbens soll so an Kabel und Lötfläche gehalten werden, dass beide gleichzeitig erwärmt werden. Wenn das Lötzinn verflossen ist, die Lötspitze wegnehmen und bis zum Erkalten des Zinns das Kabel festhalten.

Danach wird der Hochtöner festgeschraubt.

Beim Tieftöner wird entsprechend dem Hochtöner vorgegangen.

Das gekennzeichnete Kabel kommt an die Lötfläche mit dem roten Punkt.

Die Anschlussdose wird angelötet, wobei wieder auf + und- geachtet wird. Das gekennzeichnete Kabel ist +. Die Anschlussdose wird zuerst nur festgeschraubt. Verklebt, entsprechend der Anleitung unter, Kapitel 6.5 *Resonanzarmes Gehäuse*, wird sie erst, wenn der Lautsprecher getestet wurde.

8.6 Testmessung

Die Funktion des Lautsprechers wird am Besten mit einer Frequenzgangmessung getestet. Wenn der Übergang vom Mittel zum Hochtöner stimmt, ist die Weiche richtig aufgebaut und die Mittel- und Hochtöner sind richtig angeschlossen.

Das Entscheidende bei dieser Messung ist, dass beide Lautsprecher einen fast gleichen Frequenzgang zeigen. Der Frequenzgang wird etwas anders aussehen, da der Raum und die Aufstellung bei der einfachen Messung die Kurve beeinflussen.

9. Der Hörtest

Ein Lautsprecher kann nicht nur mit Messungen entwickelt werden.

Zur klanglichen Abstimmung musste die Nugget verschiedene Prozesse durchlaufen. Die gezeigte Weiche entstand erst nach dem Hörtest.

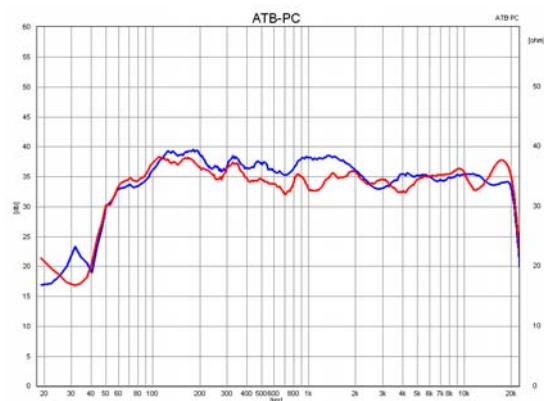
Hilfreich war hierbei, dass die Tests in einem Ladengeschäft mit Kunden aus allen Bereichen der Akustik, wie einfache Musikhörer, Musiker, Tonmeister, High End Kunden, Entwickler aus dem Car HiFi Bereich und die Lautsprecherbastler durchgeführt werden konnten. Für die Hörtests wurde die Weiche für drei Monate außerhalb des Gehäuses platziert. So konnte die Abstimmung einfach geändert werden.

9.1 Vergleich mit eigenen Entwicklungen



9.2 Vergleich mit Referenzbox

Als Referenzbox wurde eine englische Hi End Box gewählt.



blau = Referenzbox, rot = Nugget

Die Referenzbox ist mittenbetont. Um in Richtung der anerkannten Abstimmung zu gelangen, wurden die Mitteltonwiedergabe der Nugget etwas lauter gewählt.

9.3 Test bezüglich Verstärker

Die Entwicklung wurde ist mit dem Sansui Verstärker durchgeführt. Als Signalquelle diente ein modifizierter TEAC DVD Player.



Bei der weiteren Abstimmung wurden Surroundverstärker sowie der TEAC CD Receiver mit 2x20W verwendet. Die Digital-Verstärker zeigen mit der Nugget ihre volle Leistungsfähigkeit.

9.4. Im Wohnraum

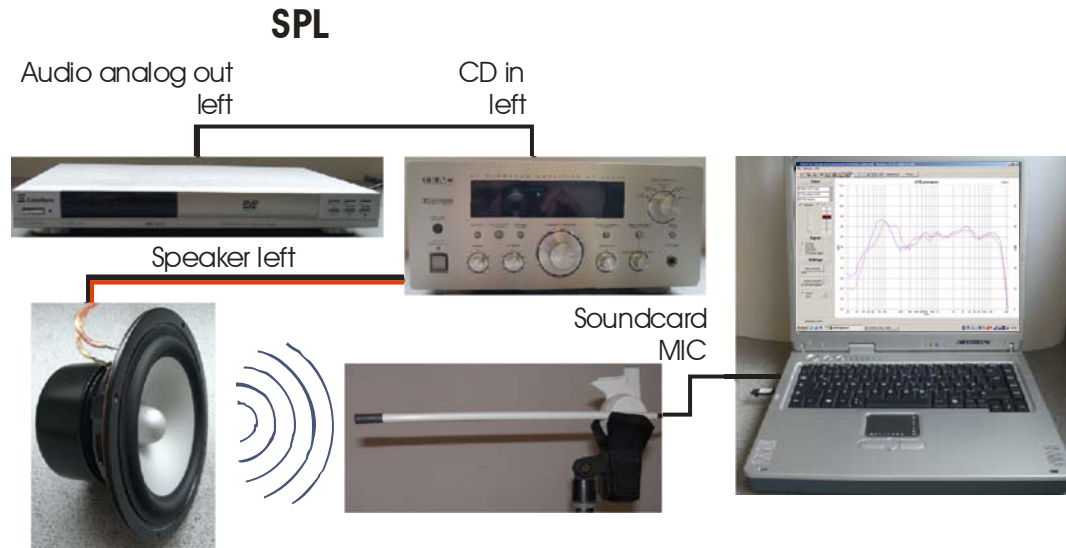


Die Nugget am LCD-Fernseher im Wohnraum.

Wissen

W1. Grundlagen der akustischen Messtechnik

Die SPL, Sound-Pressor-Level Messung zeigt den Frequenzgang des Lautsprechers.



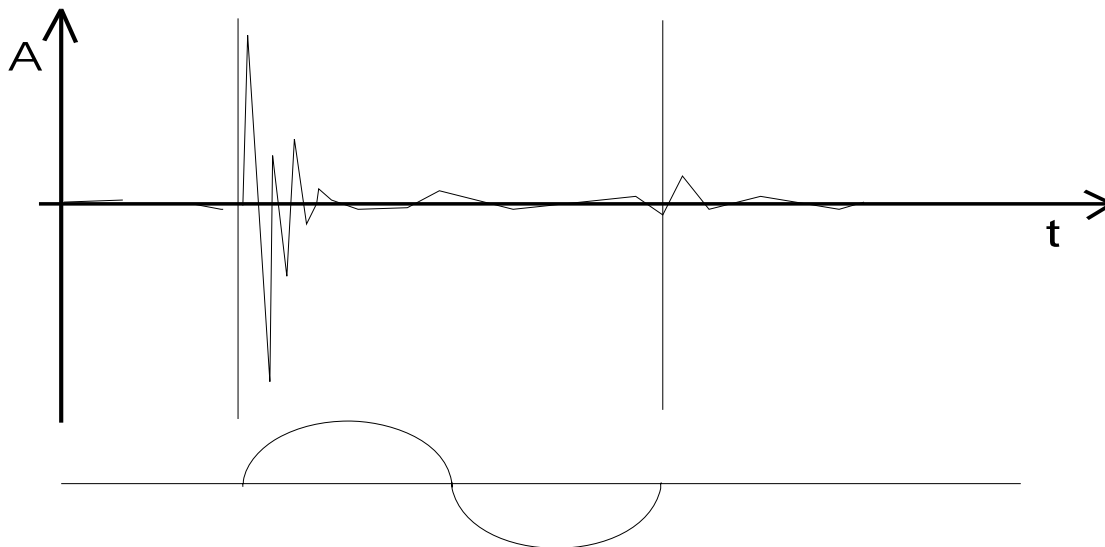
W1.1 Messungen im Raum

Die Messung des Schalldruckes eines Lautsprechers über den Frequenzgang SPL (Schalldruckkurve) sowie der akustische Phasengang und das Impulsverhalten sind akustische Messungen. Die akustischen Messungen werden im Gegensatz zu den elektrischen Messungen von den akustischen Eigenschaften der Umgebung beeinflusst. Folgend soll gezeigt werden, wie der Einfluss des Messraumes verringert werden kann. Bei der Messung mit dem Pegelschreiber ist diese Trennung nicht möglich. Der Pegelschreiber, der als Messsignal den Sinus-Sweep benutzt, benötigt einen schalltoten Messraum. In dem Raum sind die Wände so akustisch bedämpft, dass Reflexionen unterdrückt werden. Im Tieftonbereich, wo die Abmessung des Raumes im Bereich der Wellenlänge des Tones liegt, entstehen stehende Wellen, die nicht unterdrückt werden können. Hier hilft die Schreibgeschwindigkeit des Pegelschreibers als Glättungsfunktion. Auch im übrigen Frequenzbereich wird durch die Schreibgeschwindigkeit mehr geglättet als der Entwickler zugibt oder ihm bewusst ist.

W1.2 Zeitfenster

Da nicht jedem Entwickler ein schalltoter Raum zur Verfügung steht, wurde, um den Einfluss von Raumreflexionen auf die Lautsprechermessung zu verringern, die FFT-Messung entwickelt. Bei dieser Messung wird als Messsignal ein Rauschen benutzt, in dem alle Frequenzen mit gleicher Amplitude enthalten sind. Dies kann ein MLS oder das Signal des ATB PC Messsystems sein. Bei den Messungen werden Zeitfenster gesetzt, sodass nur der direkt vom Lautsprecher abgestrahlte Schall gemessen wird. Die verzögert am Messmikrofon eintreffenden Raumreflexionen liegen außerhalb des Zeitfensters und erscheinen nicht im Frequenzgang.

Diese auf den ersten Blick ideale Messmethode stellt bestimmte Bedingungen an das Zeitfenster. Werden diese Bedingungen nicht eingehalten, führt dies zu falschen Messergebnissen. Die Bedingungen für das Zeitfenster sollen folgend gezeigt werden. Zum Setzen des Zeitfensters ist immer eine Testmessung erforderlich. Diese Messung ist eine Impulsmessung, die mit dem MLS-Signal durchgeführt werden kann. Das Messergebnis ist die Impulsantwort. In der Impulsantwort wird die Amplitude des vom Mikrofon aufgenommenen Schalldruckes zeitlich dargestellt.



Das Bild zeigt eine Impulsantwort (Impulse Response) eines Lautsprechers. Auf der y-Achse wird die Amplitude A und auf der x-Achse die Zeit t dargestellt.

Von der Zeit $t = 0$ bis zum Anfang der großen Amplitude ist die Laufzeit des Schalles zu sehen. Die große Amplitude wird über die Zeit immer kleiner und nach einiger Zeit erscheint eine neue höhere Amplitude. Dieses verzögerte Signal zeigt eine Reflexion. Um die Reflexion bei der folgenden Berechnung des Frequenzganges auszublenden, wird ein Zeitfenster vom Anfang des Signals bis zur Reflexion gesetzt. Aus den Messwerten innerhalb dieses Zeitfensters wird mithilfe der FFT der Frequenzgang des Lautsprechers berechnet.

Unter dem Zeitfenster wird eine Periode einer Sinusschwingung gezeigt.

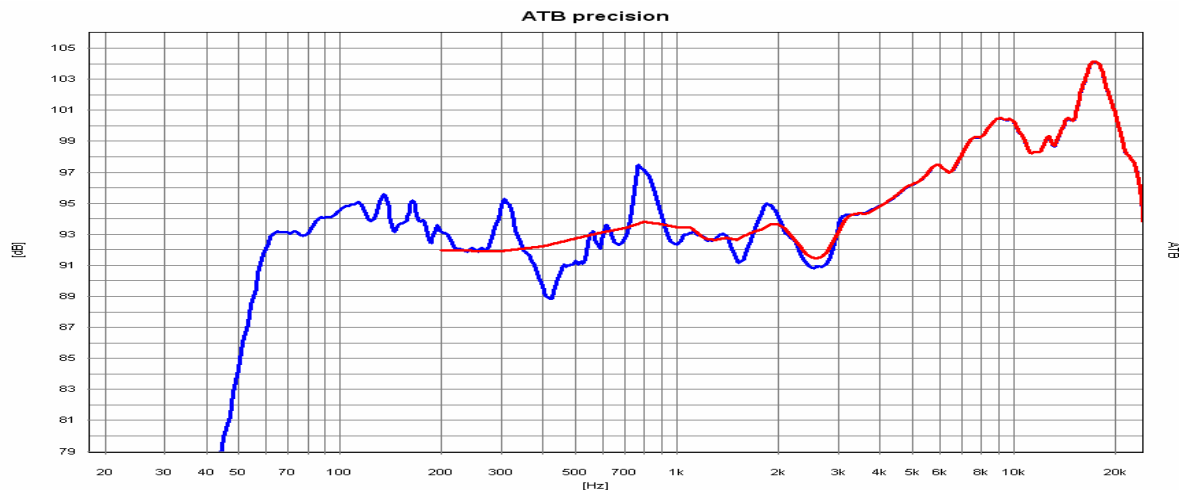
Für die Auswertung der Impulsantwort mit der FFT bestehen folgende Bedingungen:

1. Die Wellenlänge der niedrigsten auszuwertenden Frequenz kann nur der Länge des Zeitfensters entsprechen. Je kürzer das Zeitfenster, desto höher die niedrigste Frequenz. In den Frequenzgangschrieben der teureren Messprogramme wird die Frequenz gezeigt.
2. Die niedrigste auszuwertende Frequenz hat noch weitere Konsequenzen. Sie legt bei der FFT den Abstand der FFT-Punkte fest. Die FFT-Punkte sind die Frequenzen, für die Amplitudenwerte berechnet werden. Der Frequenzabstand der FFT-Punkte ist konstant und hat den Wert der niedrigsten Frequenz. Die Amplitudenwerte der FFT-Punkte bilden die

Messkurve. Dies bedeutet, dass bei einer niedrigsten Frequenz von z.B. 300Hz auch nur alle 300Hz ein Amplitudenwert angezeigt wird. Diese geringe Frequenzauflösung lässt eine Messkurve zwar glatt erscheinen, verfälscht aber das Messergebnis gewaltig.

3. Im Auto werden die Zeitfenster wegen der sofort auftretenden Reflexionen in dem relativ kleinen Innenraum so kurz, dass keine Zeitfenster benutzt werden können.

Vergleich der Messung ATB PC Messung, **blau**, mit der üblichen Zeitfenstermessung, **rot**.



Das vom Messtechniker gewählte kurze Zeitfenster zeigt einen glatten Frequenzgang, der angeblich durch die Ausblendung der nach kurzer Zeit auftretenden Raumreflexionen entsteht. In Wahrheit wird der schöne Frequenzgang nur durch die mangelhafte Frequenzauflösung erreicht.

Diese Verfälschung der Messung wird beim ATB PC durch eine andere Messmethode vermieden.

W1.3 Die ATB PC Messung für mittlere und hohe Frequenzen

Für mittlere und hohe Frequenzen wird die Dauermessung mit Mitteln benutzt. Bei dieser Messung wird das Mikrofon langsam in einem Kreis mit dem Radius 10cm bewegt. Hierbei werden die Raummoden für höhere Frequenzen gemessen und durch das Mitteln der Einfluss auf die Frequenzgangmessung beseitigt.

W1.4 Die Nahfeldmessung

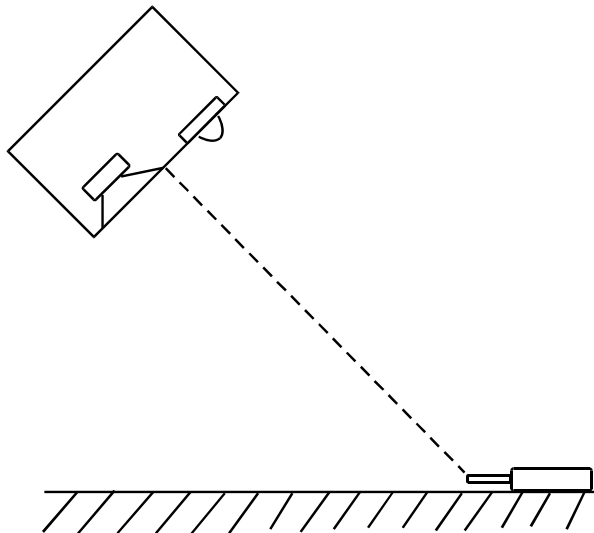
Für tiefe Frequenzen im Bassbereich wird die Nahfeldmessung benutzt. Die Grundlage für die Nahfeldmessung ist die physikalische Eigenschaft des Schalls, dass der Schalldruck mit dem Quadrat der Entfernung abnimmt. Dies bedeutet, dass die Raumreflexionen gegenüber dem direkten Schall des Lautsprechers einen viel geringeren Schalldruck besitzen. Wird ein Messmikrofon im Abstand von 10cm vor den Tieftöner gestellt. So ist der direkte Schall um ein Vielfaches größer als der Reflektierte, sodass nur der direkte Schall gemessen wird. Diese Messung wird unterhalb von 300Hz durchgeführt und durch eine Messung für den Frequenzbereich oberhalb von 300Hz ergänzt. Die zweite Messung wird im Abstand von 1m durchgeführt, um Mittel- und Hochtöner zusammen zu messen. Ein Nachteil der Nahfeldmessung ist das Bündelungsmaß, eine Überhöhung des Schalldruckes im Nahfeld.

Dies wird aber im Combine Menü des ATB PC ausgeglichen. Sind im Tieftonbereich mehrere Schallquellen vorhanden, z.B. Tieftöner und Bassreflexrohr, können beide Schallquellen durch die Dauermessung mit Mitteln erfasst werden. Hierbei wird das Mikrofon während der Messung langsam zwischen den Schallquellen bewegt.

Die Nahfeldmessung ist auch bei schalltoten Räumen zu benutzen. Wie schon beschrieben, besitzt auch der schalltote Messraum eine untere Grenzfrequenz, die die Messung verfälscht. Außerdem entspricht die Messung im schalltotem Raum auch nicht dem Hörergebnis, da der Lautsprecher beim Hören auf dem Boden steht und der Tieftöner eine andere Umgebung als im schalltoten Raum sieht. Der Boden bewirkt eine Anhebung von ca. 3dB für tiefe Frequenzen, wobei der Frequenzbereich von der Konstruktion des Lautsprechers abhängt.

W1.5 Die Grenzflächenmessung

Bei der Grenzflächenmessung wird das Messmikrofon als Grenzflächenmikrofon betrieben. Das Mikrofon liegt flach auf dem Boden und besitzt dabei eine Halbkugelcharakteristik.



Das Bild zeigt die Anordnung von Lautsprecher und Mikrofon.

Die Schallwellen des Lautsprechers treffen schräg auf den Boden und werden in den Raum reflektiert. Dies macht sich besonders im Mittel-Hochtonbereich positiv bemerkbar. Auch im Tieftonbereich, in dem sich die Raumresonanzen ausbilden, wird deren Energie vom Grenzflächenmikrofon nur zur Hälfte erfasst, sodass sie die Messung nicht mehr so stark beeinträchtigen.

Wegen der Raumresonanzen gilt auch hier: je größer der Messraum desto besser.

W2. Auswahl der Chassis

Bei der Auswahl der Chassis stand ein Ziel im Vordergrund, modernste Technologie zu einem bezahlbaren Preis.

Um eine erste Bewertung der Chassis durchführen zu können, sollte der Lieferant ein Bild des Frequenzgangs und alle erforderlichen Parameter bereitstellen.

Gute Marktkenntnisse und eine sorgfältige Marktbeobachtung vor der Entwicklung bringen weitere Vorteile.

So fiel zum Beispiel bei der Sichtung von Fachliteratur sofort der Hochtöner GRT 85 auf. Ein Air Motion Hochtöner mit einem zweistelligen Preis. Früher waren diese Hochtöner nur in der dreistelligen Preisklasse zu finden. Da dieser Hochtönen konstruktiv und geschichtlich eine Besonderheit darstellt, wird er im Kapitel *Air Motion Hochtöner* gesondert dargestellt. Bei der Auswahl des Tieftöners gab die geplante Gehäusegröße die ersten Parameter vor. Das Gehäusevolumen sollte unter 10 Liter betragen, damit der Lautsprecher später über wohnraumfreundliche Dimensionen verfügt, und sich die Aufstellung mehrerer Lautsprecher für den Surroundbetrieb realisieren lässt. Trotz des kleinen Volumens war es die Vorgabe, dass der Lautsprecher noch über ein gutes Tiefbassvermögen verfügt. Mit welchen Mitteln dies erreicht wird, ist im *Kapitel 6 Das Gehäuse* zu lesen.

Im Programm des Herstellers vom Hochtöner fand sich schließlich auch ein Tieftöner mit einem Außendurchmesser von ca. 13cm, einer Gehäuseempfehlung des Herstellers von 8 Litern und einem sehr guten PreisLeistungsverhältnis. Dieser Tieftöner ist im Kapitel „Tieftöner“ 5.5.8 näher beschrieben.

Letztendlich stellt sich aber erst bei der Gehäusekonstruktion, der Frequenzweichenentwicklung *Kapitel 7 Die Weiche* und letztendlichen Hörprobe heraus, ob die beiden Lautsprecher wirklich zueinander passen.

Doch bevor die einzelnen Chassis näher beschrieben werden, gehen wir noch einmal zur Theorie.

W2.1 Die ideale Schallquelle

Der Idealfall wäre ein Lautsprecher mit nur einem Lautsprecherchassis, auch Breitbandchassis genannt, das den gesamten Frequenzbereich des menschlichen Gehörs überträgt. Einige Hersteller bekommen solch ein Breitbandchassis in Konusform schon mit einem ziemlich linearen Frequenzgang, einer gleich bleibenden Lautstärke über den gesamten Hörbereich, hin.

Leider macht uns hier die Physik einen Strich durch die Rechnung. Die gleich bleibende Lautstärke ist nämlich nur auf der 0°-Achse vorhanden. Bewegt man sich aber nun ein Stück zur Seite und steht dann im 30°-Winkel zum Lautsprecher, fällt Folgendes auf:

Bis zu einer gewissen Frequenz bleibt die Lautstärke gleich und sinkt dann mit steigender Frequenz. Das Rundstrahlverhalten des Lautsprechers nimmt oberhalb dieser Frequenz ab, da der Schall mit steigender Frequenz immer mehr gebündelt wird.

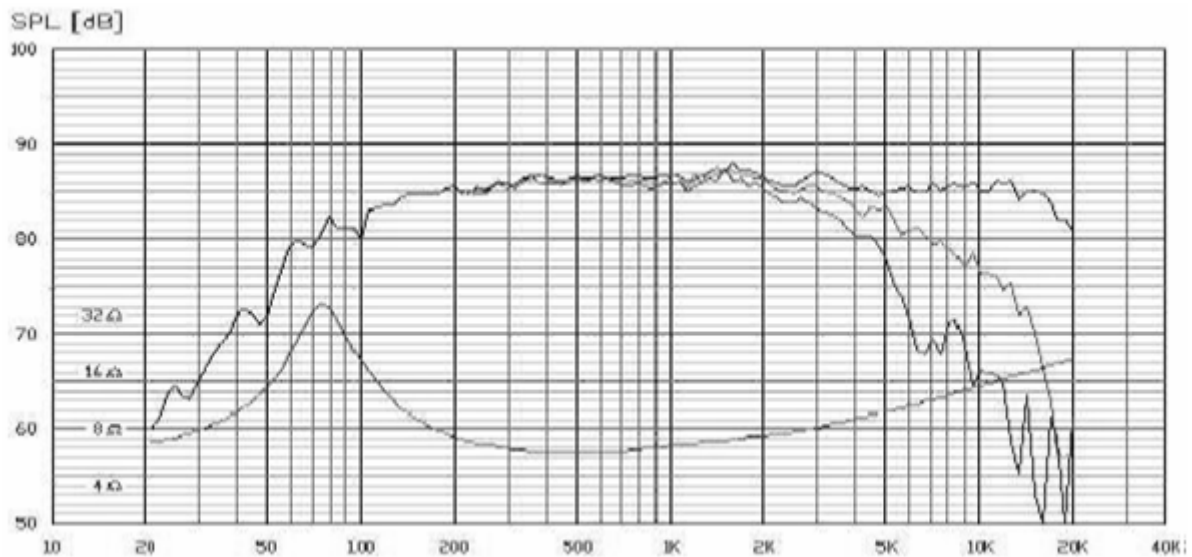


Abbildung 2.1

Dies läßt sich anhand des Frequenzgangs Abbildung 2.1 sehen. Die fast gerade durchgehende Kurve beschreibt die Messung bei 0°, die Mittlere bei 30° und die Untere die Messung bei 60°. Die Kurve ganz unten zeigt die Impedanzmessung auf die aber an dieser Stelle noch nicht eingegangen werden soll.

Die Frequenz (f_{\max}) bis zu der die Bündelung noch akzeptabel ist, kann berechnet werden. Die Schallgeschwindigkeit wird durch den effektiven Membrandurchmesser geteilt.

$$f_{\max} = \frac{c}{D_d}$$

Nimmt man nun die vom Hersteller angegebene Membranfläche von 38 cm² und errechnet dann den effektiven Membrandurchmesser D_d von 7 cm, so ergibt sich folgende Maximalfrequenz.

$$f_{\max} = \frac{34300 \frac{cm}{s}}{7cm}$$

$$\underline{f_{\max} = 4900Hz}$$

Oberhalb dieser Frequenz (Abbildung 5.1) nimmt die Lautstärke im 30°-Winkel so stark ab, dass schon bei 10 kHz eine Halbierung der Lautstärke vorhanden ist.

W2.2 Das Zweiwegkonzept

Um ein gutes Rundstrahlverhalten über den gesamten Frequenzbereich zu bekommen, ist es nötig, den Frequenzbereich auf mehrere Chassis zu verteilen.

Durch den Einsatz einer Frequenzweiche, die aus Hoch- und Tiefpass besteht, wird diese Aufteilung realisiert. Näheres hierzu ist im Kapitel 15 „Frequenzweichen“ zu lesen.

Bei einem Zwei- oder Mehrweglautsprecher besteht jedoch die Gefahr, dass sich der Übergang vom Hoch- zum Tieftöner klar hören lässt. Die Wiedergabe des Lautsprechers verliert stark an Räumlichkeit und Auflösungsvermögen.

Woran liegt das?

Das menschliche Ohr ist in der Lage einzelne Töne sehr genau zu orten. Durch diese Fähigkeit nimmt der Mensch allerdings auch minimale Schallverzögerungen wahr. So ist es uns möglich im Bereich von 500-3000 Hz Schallverzögerungen von ca. 3 hunderttausendstel Sekunden wahrzunehmen.

Dieser akustische Zeitversatz wird auch als akustische Phasenverschiebung bezeichnet. Eine bildliche Darstellung dazu befindet sich im Kapitel 17 „Laufzeit, akustische Phase“.

Da bei den meisten Lautsprechern während der Entwicklung nicht auf den akustischen Phasenverlauf geachtet wird, war die Hauptaufgabe dieser Entwicklung einen phasenrichtigen Lautsprecher zu entwickeln, bei dem beide Chassis akustisch nicht mehr voneinander differenziert werden können.

Dies wurde durch den Einsatz von angewandtem Wissen und der Messsoftware ATB PC Pro mit Messequipment der Firma Kirchner Elektronik erreicht.

W2.3 Der Air Motion Transformer



Abbildung 2.2



Abbildung 2.3

Der Air Motion Transformer wurde vom deutschen Physiker Dr. Oskar Heil am Anfang der siebziger Jahre erfunden. Bekannt wurde Dr. Oskar Heil (Abbildung 2.2) durch die Erfindung des Feldeffekttransistors (FET), dessen Grundlagen er 1934 zum Patent anmeldete. Vor und während des 2. Weltkriegs arbeitete er an der Entwicklung von Mikrowellenröhren. Später wurde auch ein Mikrowellengenerator nach ihm benannt.

Nach dem Krieg ging er in die Vereinigten Staaten. 1963 gründete er die Firma ESS. Hier entwickelte er der ersten Air Motion Transformer (Abbildung 23), der 1973 auf dem Markt kam und noch bis heute produziert wird. Bevor Dr. Oskar Heil mit der Entwicklung des Hochtöners begann, beschäftigte er sich ausgiebig mit der Funktion des menschlichen Ohrs und der Schallerzeugung in der Natur.

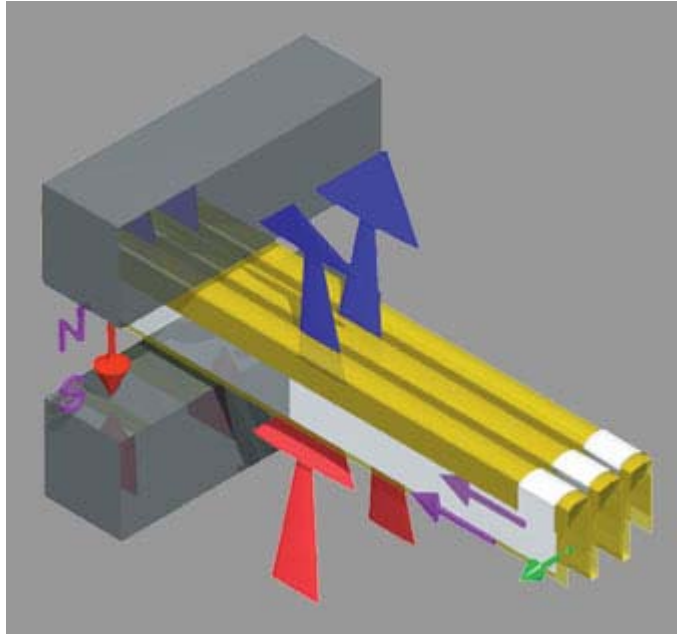


Abbildung 2.4

Bei den fliegenden Insekten fand er schließlich die Lösung für sein Vorhaben. Diese verfügen über ein geringes Flügengewicht und einer besonderen Technik die Flügel zu öffnen und zu schließen. Sie können durch ihre Flügel fliegen und erzeugen damit gewollt oder ungewollt Geräusche. Dr. Oskar Heils Patent beschreibt eine gefaltete Folie ähnlich einer Ziehharmonika mit einer darauf angeordneten Leiterbahn. Setzt man diese Folie nun einem Magnetfeld aus und legt ein Musiksinal an die Enden der Leiterbahn so öffnet und schließt sich die Faltung der Membran (Abbildung 2.4) mit der Geschwindigkeit der angelegten Frequenz.



Abbildung 2.5

Die Membranmasse M_{ms} liegt bei einem Air Motion Hochtöner (Abbildung 2.5) unter 1 Gramm. Durch die Faltung der Membran verfügt er je nach Hersteller und Ausführung über eine 4 bis 20 mal größere Membranfläche als ein konventioneller Hochtöner ohne Einbußen

im Rundstrahlverhalten. Früher waren die Air Motion Hochtöner sehr groß und schwer, da ein sehr starkes Magnetfeld, und somit große Magneten benötigt wurden. Heute lässt sich das einfacher durch den Einsatz von Neodymmagneten realisieren.

W2.4 Der Tiefmitteltöner



Abbildung 2.6

Die größte Anforderung an den Tiefmitteltöner (Abbildung 2.6) ist die Wiedergabe von sehr tiefen Frequenzen bei kleinstem Volumen und gleichzeitig einer feinauflösenden Mitteltonwiedergabe. Dies lässt sich heute durch neue Membranmaterialien, Wissen der Hersteller und dem richtigen Einsatz im Lautsprechergehäuse realisieren.

Das Membranmaterial

Geht man von einer theoretischen Wunschvorstellung aus, so hat die ideale Membran ein sehr geringes Gewicht und ist aus einem fast unverwindbaren Material. Diese beiden Anforderungen werden bei diesem Chassis durch die spezielle Verformung eines dünnen Bleches aus einer Aluminiumlegierung zu einer Membrane erreicht.

Die Membranform

Bei der Membranform wird heute bei Tieftönern zwischen Konusform und speziellen Kurvenformen unterschieden.

Während die Konusform nur eine gerade Linie zwischen Spule und Sicke bildet und dadurch wie ein dünnes Stück Blech zum Schwingen neigt, ist die spezielle Kurvenform wie ein Bogen, dessen Radius sich auf der gesamten Strecke verändert. Durch diese Form bekommt die Membran eine extrem hohe Stabilität, die vergleichbar mit der Stabilität eines Eis ist. Diese Membran wird Nawi-Membran, von nicht abwickelbar, genannt.

Der Doppelmagnet mit Schirmung

Durch einen Kompensationsmagnet und einer magnetische Abschirmung durch einen Blechkorb ist auch eine Aufstellung direkt neben einer Bildröhre möglich.

Der Stahlkorb

Der Korb bildet die äußere Verbindung zwischen der Antriebseinheit des Lautsprechers und der Membran beziehungsweise der Sicke. Der Korb sollte über eine sehr hohe Stabilität verfügen und dadurch sehr schwingungsarm sein.

Die Chassisparameter des Tieftöners

Mechanische Parameter:

Außendurchmesser: 147 mm

Schallwandöffnung: 128 mm

Befestigungslochkreis: 137 mm

Einbautiefe: 77 mm

Thiele-Small-Parameter:

Freiluftresonanzfrequenz: $f_s = 44$ Hz

Effektive Membranfläche: $S_d = 85$ cm²

Dynamische Masse: $M_{ms} = 9,8$ g

Äquivalentvolumen: $V_{as} = 13,4$ l

Mechanische Güte: $Q_{ms} = 1,75$

Elektrische Güte: $Q_{es} = 0,42$

Gesamtgüte: $Q_{ts} = 0,34$

Schalldruck: 88 dB (1W;1m)

Abmessungen der Schwingspule

Durchmesser: 26mm

Höhe: 10mm

Lineare Auslenkung: ± 2 mm

Elektrische-Parameter

DC-Widerstand: $R_{DC} = 6,14$ Ω

Impedanz: $Z = 8$ Ohm

Nennbelastbarkeit: $P_n = 70$ W

Äußere Abmessungen

Die ersten Parameter beschreiben die Ausmaße und die Befestigung des Chassis.

Außendurchmesser des Chassis

Hierbei muss beachtet werden, dass es sich lediglich um die rein mechanische Abmessung des Lautsprecherkorbes handelt. Der Außendurchmesser lässt keinen Rückschluss auf die Membranfläche zu.

Durchmesser der Schallwandöffnung

Dieses Maß sollte beim Bau möglichst genau eingehalten werden, da es einen Einfluss auf die Auflagefläche des Lautsprecherkorbes im eingebauten Zustand und somit auf die Kräfteverteilung zwischen Lautsprecher und Gehäuse hat.

Befestigungslochkreis

Durch einen ordentlich aufgezeichneten und vorgebohrten Lochkreis lässt sich das Chassis einfach in die gewünschte Position bringen. Wichtig dabei ist, dass der Befestigungslochkreis angezeichnet wird, bevor man mit den Aussägen der Schallwandöffnung beginnt, da sonst der Mittelpunkt für den Zirkel fehlt. Bei der Befestigung des Chassis ist darauf zu achten, dass die Schrauben diagonal angezogen werden, damit es nicht zu Verspannungen im Chassis kommt.

Einbautiefe

Die Einbautiefe bestimmt den kleinstmöglichen Abstand zwischen der Außenseite der Frontplatte und Innenseite der Rückwand, wenn der Lautsprecher frontseitig eingebaut wird.

W3. Thiele-Small-Parameter

Nach den mechanischen Parametern kommen wir nun zu den wichtigsten Parametern, den so genannten Thiele-Small-Parametern. Dazu noch kurz etwas Geschichtliches. Im Jahr 1930 wurde bereits der erste Bassreflexlautsprecher patentiert. Das Patent für einen geschlossenen Lautsprecher, basierend auf dem Prinzip einer Luftfeder, folgte 1944.

Der Bassreflexlautsprecher hatte lange Zeit den Ruf von etwas Mystischen, da es keinerlei Berechnungsgrundlage für diese Gehäuseart gab. Um den Wirkungsgrad der Bassreflexöffnung zu ermitteln, stellte man beispielsweise brennende Kerzen vor die Öffnungen.

Erst durch die wissenschaftliche Arbeit des Australiers Neville Thiele von 1961 und den späteren Ergänzungen des Amerikaners Richard Small im Jahr wurden die Grundlagen für die Lautsprecherberechnung gelegt. Beide führten langwierige Versuchsreihen durch und stellten mathematische Zusammenhänge auf.

Heute sind die Thiele-Small-Parameter in der Lautsprecherindustrie anerkannt und schaffen eine Vergleichbarkeit von Lautsprecherchassis.

W3.1 Die Freiluftresonanzfrequenz f_s

Die Freiluftresonanzfrequenz ist die Frequenz, bei der nicht nur die beweglichen (Membran, Kalotte, Schwingspule und Teile der Aufhängung) sondern auch einige der normalerweise feststehenden Teile, wie z.B. der Korb, zum Mitschwingen angeregt werden. Da sich die Steifigkeit der Zentrierspinne und der Sicke in der ersten Zeit noch verändern, sollte die Freiluftresonanz an einem eingespielten Chassis ermittelt werden.

Bei dieser Messung wird das Chassis komplett von seiner Umgebung mechanisch entkoppelt, die Hersteller treiben hierbei einen erheblichen Aufwand.

Fast exakt kann dieser Wert auch bestimmt werden, wenn das Chassis auf einigen Lagen Lautsprecherdämmwatte liegt.

W3.2 Die effektive Membranfläche S_d

Um diese Fläche zu berechnen, wird zuerst der effektive Membrandurchmesser D_d in cm bestimmt. Er besteht aus dem Durchmesser der Membran und der Hälfte der mitschwingenden Randaufhängung. Oder einfacher gesagt der Abstand vom höchsten Punkt der Sicke zum gegenüberliegende höchsten Punkt der Sicke.

Die Hälfte dieses Wertes wird nun quadriert und dann mit π multipliziert.

$$S_d = \left(\frac{D_d}{2} \right)^2 \times \pi$$

W3.3 Die dynamische Masse M_{ms}

Aus der Summe aller Massen, die beim Betrieb des Lautsprechers in Bewegung gesetzt werden müssen, errechnet sich die dynamische Masse. Hierzu zählen die Masse der Membran, Staubschutzkalotte, Spule und Spulenträger sowie anteilig die Masse der Sicke und Zentrierspinne und die Luftmasse in Membrannähe.

W3.4 Das Äquivalentvolumen V_{as}

Ist das Volumen, das wenn es 1m^3 komprimiert wird, die gleiche Kraft aufbringt wie die Federkraft des Lautsprechers.

Durch diesen vom Hersteller vorgegebenen Wert lassen sich schon einige Berechnungen durchführen. Zum Beispiel kann die Resonanzfrequenz des Lautsprecherchassis im eingebauten Zustand f_c durch folgende Formel ermittelt werden. Neben f_s und V_{as} muss nur noch das Volumen V_b des geplanten Lautsprechers eingegeben werden.

$$f_c = f_s \sqrt{\frac{V_{as}}{V_b} + 1}$$

Auch andere wichtige Parameter, wie z.B. der Q_{tc} des Lautsprechers lassen sich damit ermitteln.

W3.5 Die Compliance der Aufhängung C_{ms}

Die mechanische Nachgiebigkeit der Aufhängung nennt man Compliance (engl. Befolgung), sie wird in mm pro Newton angegeben. Durch Vermessung kann der Wert für C_{ms} ermittelt werden.

Die Hersteller geben diesen Wert nicht immer an, er lässt sich aber auch mithilfe der dynamisch bewegten Masse (M_{ms}) und der Freiluftresonanz (f_s) berechnen.

$$C_{ms} = \frac{1}{(2\pi \times f_s)^2 \times M_{ms}}$$

W3.6 Die mechanische Güte Q_{ms}

Q_{ms} beschreibt die Güte der mechanischen Kontrolle der sich bewegende Teile des Lautsprecherchassis bei Erreichen der Resonanzfrequenz. Die mechanische Kontrolle ist durch die Zentrierspinne und die Sicke gegeben.

Q_{ms} lässt sich wie folgt berechnen:

$$Q_{ms} = \frac{2\pi \times f_s \times M_{ms}}{R_{ms}}$$

W3.7 Die elektrische Güte Q_{es}

Elektrisch werden die sich bewegenden Teile des Lautsprecherchassis bei Erreichen der Resonanzfrequenz durch das Zusammenwirken von Spule und den Magnet kontrolliert.

$$Q_{es} = \frac{2\pi \times f_s \times M_{ms} \times R_{dc}}{BI^2}$$

Wobei R_{dc} der Gleichstromwiderstand der Spule, B die magnetische Flussdichte und I die wirksame Breite des Magnetfeldes ist.

W3.8 Die Gesamtgüte Q_{ts}

Sie errechnet sich aus den Werten von Q_{ms} und Q_{es} wie folgt

$$Q_{ts} = \frac{Q_{ms} \times Q_{es}}{Q_{ms} + Q_{es}}$$

Über die Werte Q_{ts} , V_{as} und V_b ist es nun möglich, die Güte des Chassis im eingebauten Zustand Q_{tc} mit folgender Formel zu bestimmen.

$$Q_{tc} = Q_{ts} \sqrt{\frac{V_{as}}{V_b} + 1}$$

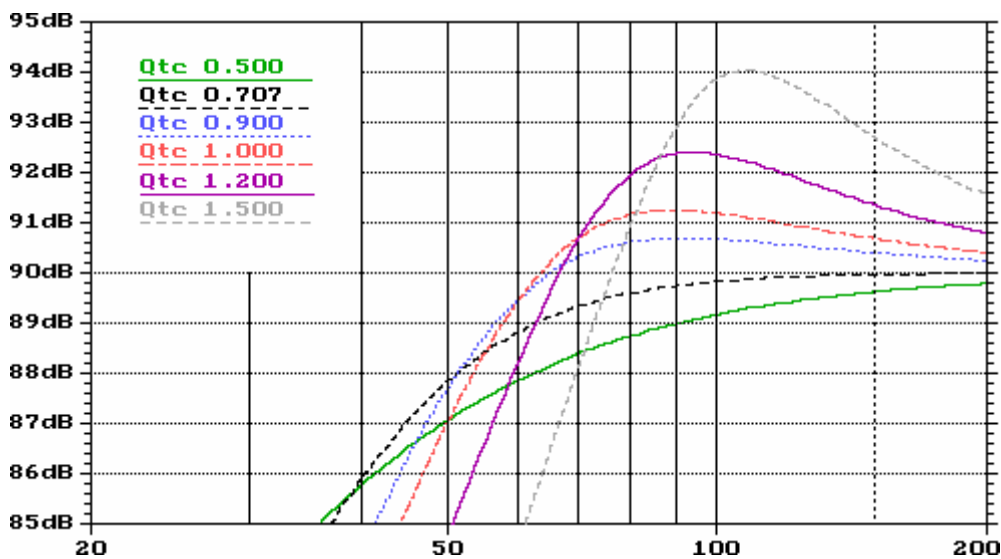


Abbildung 3.1

Der Q_{tc} Wert (Abbildung 3.1) ist eine maßgebliche Aussage über den Frequenzgang im Bereich der Resonanzfrequenz des Chassis. Er zeigt das Verhalten im eingebauten Zustand. Stellt man die Formel einfach um, kann so das benötigte Lautsprechervolumen bei einem bestimmten Tiefbassverhalten ermitteln.

$$V_b = \frac{V_{as}}{\left(\frac{Q_{tc}}{Q_{ts}}\right)^2 - 1}$$

Mit einem beispielsweise ausgewählten Q_{tc} von 0,707 lässt sich nun folgendes Volumen V_b für einen geschlossenen Lautsprecher berechnen.

$$V_b = \frac{13,4l}{\left(\frac{0,707}{0,34}\right)^2 - 1}$$

$$V_b = \frac{13,4l}{\left(\frac{0,707}{0,34}\right)^2 - 1}$$

$$\underline{V_b = 4,0l}$$

Durch das errechnete Volumen V_b kann nun noch einmal die passende Resonanzfrequenz des eingebauten Chassis f_c ermittelt werden.

$$f_c = f_s \sqrt{\frac{V_{as}}{V_b} + 1}$$

$$f_c = 44Hz \sqrt{\frac{13,4l}{4,0l} + 1}$$

$$\underline{f_c = 92Hz}$$

Auf den Gleichstromwiderstand R_{DC} und die Impedanz Z wird im Kapitel *W8*.

Frequenzweichen eingegangen.

Die Nennleistung P_n bleibt bei dieser Entwicklung unbeachtet, da sie hier eine untergeordnete Rolle spielt. Die meisten Chassis sind heute so leistungsfähig, dass man sie fast nur noch mutwillig zerstören kann.

W3.9 Gehäusevarianten

Warum ein Gehäuse?

Um zu verhindern, dass die von der Membranbewegung ausgelöste Luftbewegung, und der damit entstehende Unterdruck und Überdruck, nicht sofort wieder ausgeglichen wird, (Abbildung 3.2, akustischer Kurzschluss) muss man die Vorderseite und die Rückseite der Membran durch eine Wand, im Idealfall ist dies eine unendliche Schallwand, voneinander trennen. Da dies nicht praxistgerecht ist, faltet man diese Wand einfach zu einer Box zusammen, die sich hinter der Membran schließt. So kann sich die Luft ebenfalls nicht wieder ausgleichen, da der Weg, durch die geschlossene Box, ebenfalls unendlich lang ist.

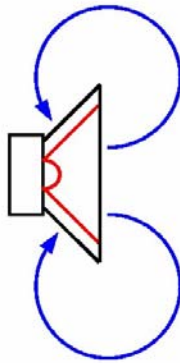


Abbildung 3,2

Im weiteren Verlauf zeigen die blauen Pfeile immer die Kräfte oder Bewegungsrichtungen an. Die Membranen sind immer rot dargestellt.

Gehäuseformen

Es gibt zum einen verschiedene Gehäuseformen z.B. rund, viereckig, dreieckig. Sie werden nach ihrer Bauform unterschieden.

Zum anderen gibt es verschiedene Wirkungsweisen. Es gibt zum Beispiel geschlossene, Bassreflex, Transmissionline und Horn-Gehäuse.

Wir gehen an dieser Stelle nur auf die zwei verbreitetsten Arten ein. Diese sind Bassreflex und geschlossene Gehäuse.

Geschlossene Gehäuse

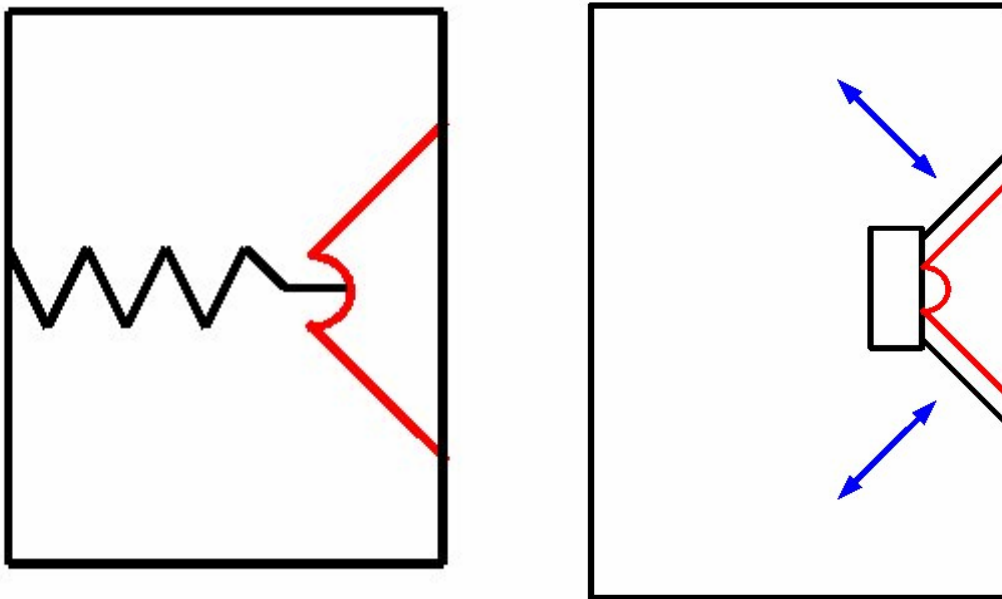


Abbildung 3.3

Die eingeschlossene Luft in einem geschlossenen Gehäuse wirkt auf die Membran des Lautsprechers wie eine Feder (Abbildung 3.3). Je größer das Volumen der Box, desto weicher ist diese Feder. Zusammen mit der Masse der Membran bildet sich eine Resonanzfrequenz, bei der ein geringer Energieaufwand zur Erzeugung eines Tones nötig ist.

Bassreflex

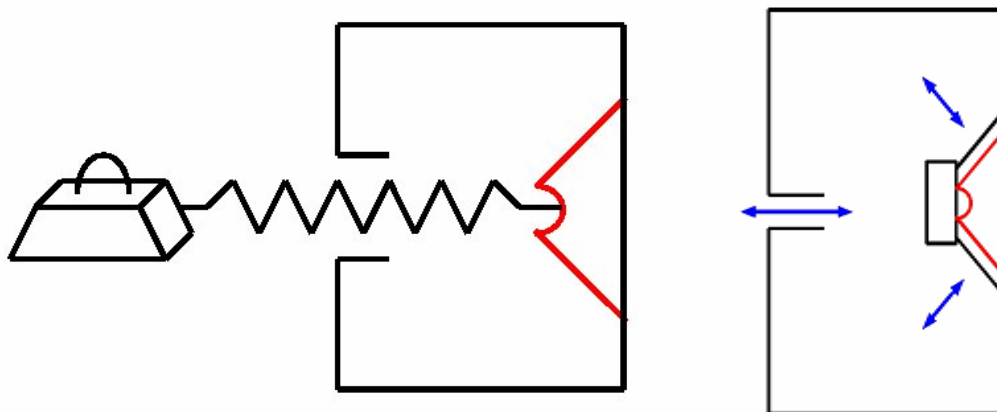


Abbildung 3.4

In einer Bassreflexbox gibt es zusätzlich zum Volumen im Lautsprecher, das auch hier wie in einer geschlossenen Box als Feder fungiert, noch ein weiteres Volumen und somit eine Verlängerung dieser Feder (Abbildung 3.4). Diese befindet sich im Bassreflexrohr. Sie wirkt zusammen mit der Luft, die außerhalb der Box ist, wie ein Gegengewicht zur Lautsprechermembran. Diese Masse-Feder-Membranmasse Kombination, hat zwei Resonanzfrequenzen, da sich an den Enden der Feder zwei unterschiedliche Massen befinden.

W3.10 Berechnung der Gehäusegröße

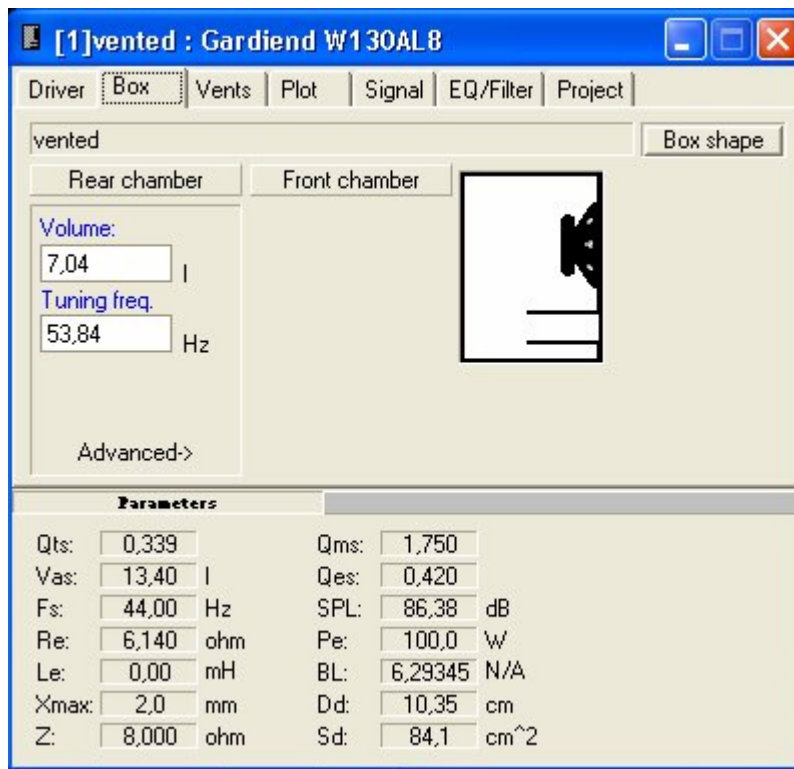


Abbildung 3.5

Zur Berechnung der Gehäusegröße nahmen wir ein Simulationsprogramm, in diesem Fall „Win ISD pro alpha“ (Abbildung 3,5). An dieser Stelle möchten wir darauf hinweisen, dass es noch eine ganze Reihe verschiedener Simulationsprogramme gibt.

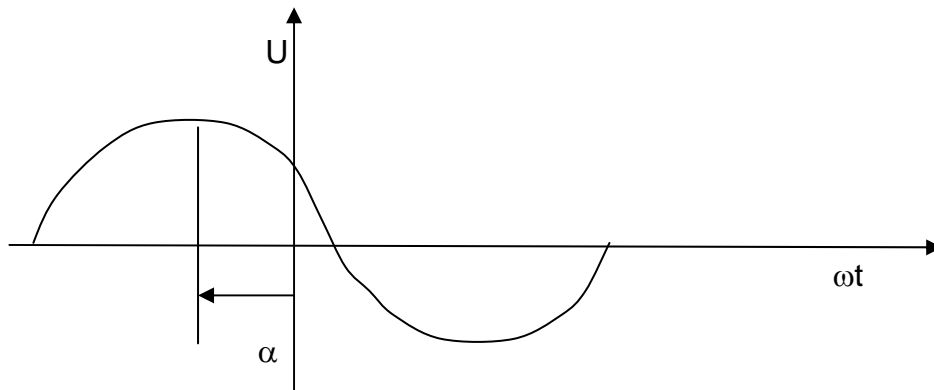
Gehäusegröße

Daraus ergab sich eine Gehäusegröße von 7,04 Litern bei einer Bassreflexabstimmung von 53,8 Hz. Die Breite des Gehäuses wurde durch den Durchmesser des Tieftöners vorgegeben. Die Höhe sollte Platz für eine Bassreflexöffnung, den Tieftöner und den Hochtöner bieten. Die Tiefe ergab sich dann aus dem benötigten Volumen. Aufgrund all dieser Parameter wurden für das Versuchsgehäuse folgende Außenmaße festgelegt, Höhe 30cm, Tiefe 28cm, Breite 16cm.

W4. Die Phase

W4.1 Grundlagen

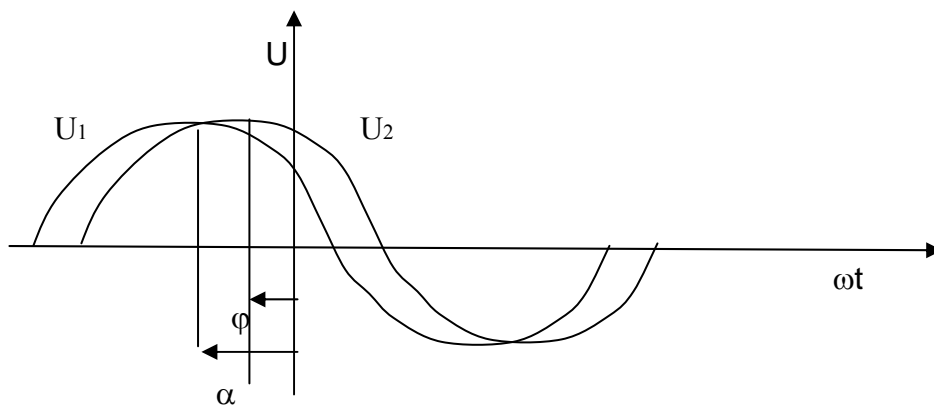
Die Phase wird bei der Beschreibung von sinusförmigen Vorgängen wie mechanischen Schwingungen, Wechselstrom, Funkwellen und Schallwellen.



$$U(t) = U_s \cos(\omega t + \alpha)$$

t Zeit, $U(t)$ Augenblickswert der Spannung, U_s Scheitelwert (max. Amplitude),
f Frequenz, $T = 1/f$ Periodendauer, $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$ Kreisfrequenz,
 α Nullphasenwinkel

Der Phasenwinkel α tritt schon in der Grundgleichung auf. Dort wird er willkürlich durch einen Bezugspunkt, die Zeit 0, gesetzt. Bei zwei oder mehr Schwingungen, die z.B. bei akustischen Signalen vorliegen, ist der Phasenwinkel für die Beschreibung der Messung wichtig.

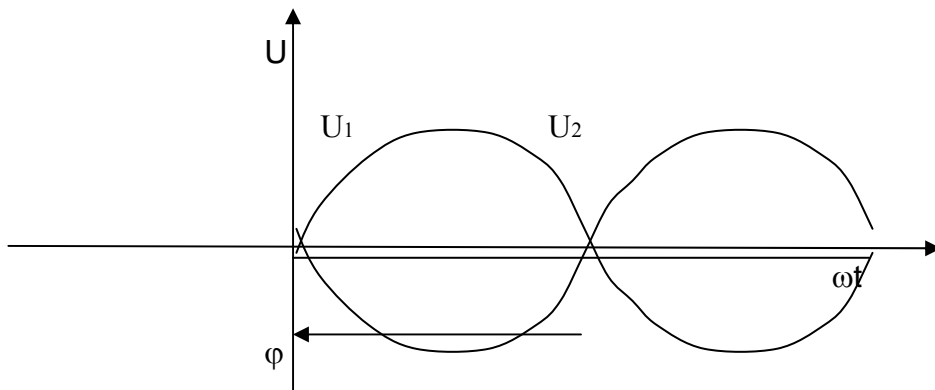


$$U(t) = U_{s1} \cos(\omega t + \alpha) + U_{s2} \cos(\omega t + \alpha + \varphi)$$

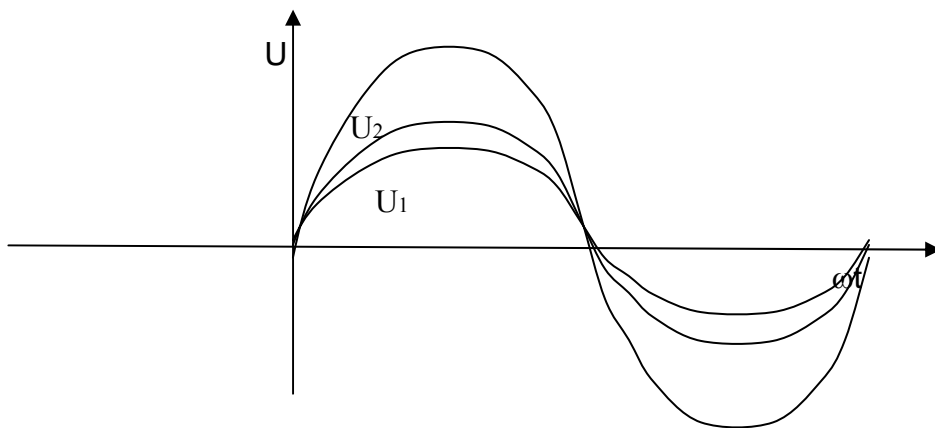
Der Winkel φ bestimmt, wie sich die Schwingungen überlagern.

Beispiele für den die Auswirkung des Winkels φ auf die Schwingung:

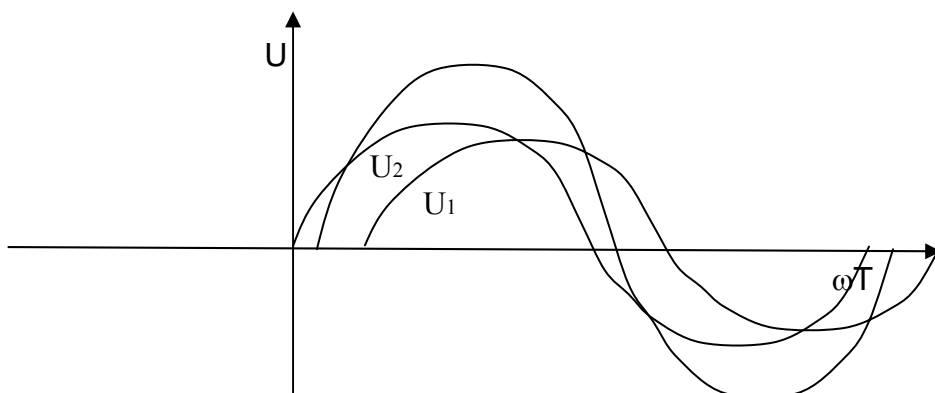
$\varphi = 180^\circ \Rightarrow$ Auslöschung



$\varphi = 0^\circ, 360^\circ \Rightarrow$ maximale Verstärkung



$\varphi = 90^\circ, 270^\circ \Rightarrow$ teilweise Verstärkung oder auch als teilweise Auslöschung

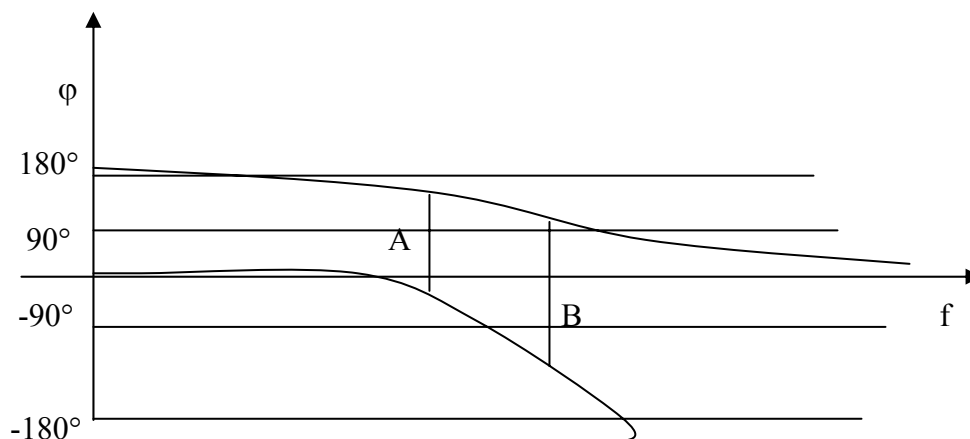


W4.2 Die Phase beim Lautsprecher

Auch bei einem Lautsprecher gelten die Grundlagen der Physik. Zu einer richtigen Beschreibung des abgestrahlten Schalldruckes gehören die Amplitude und die Phase. Die übliche Theorie, dass im Frequenzgang die Phase zu erkennen ist, ist falsch. Dies ist nur bei einfachen elektrischen Schaltungen gegeben. Bei einem Lautsprecher verhindert die sehr aufwendige Übertragungsfunktion, die auch noch Laufzeiten enthält, eine Phasenerkennung aus dem Amplitudenfrequenzgang. Eine Box mit absolut ausgeglichenem Frequenzgang kann extreme und damit hörbare Phasensprünge besitzen.

Eine übliche Praxis zur Erkennung der Phasenbeziehung beim Lautsprecher ist folgende. Um zwischen zwei Einzellautsprechern, beim Übergang z. B. vom Mitteltöner zum Hochtöner die Phasenbeziehung aus dem Frequenzgang zu erkennen, wird die Weiche so konstruiert, dass eine maximale Auslöschung zwischen den beiden Lautsprechern entsteht. Wenn nach dem Verpolen eines der beiden Lautsprecher der Frequenzgang ausgeglichen ist, stimmt auch die Phasenlage. Hierbei liegen die Phasen aber meistens 180° , 360° oder 540° auseinander und das Einschwingverhalten ist schlecht.

Außerhalb der Trennfrequenz bringt die Methode keinen Erfolg. Dies soll das folgende Beispiel zeigen.



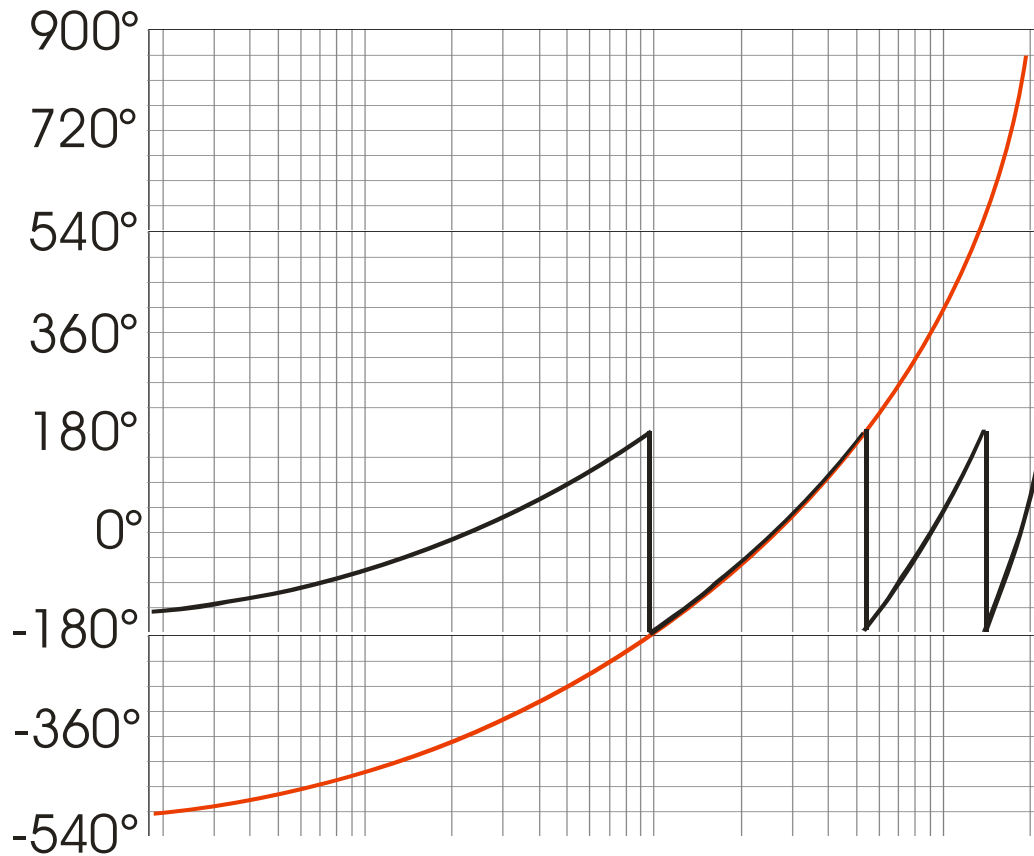
Das Bild zeigt das Phasenverhalten von Tief- und Hochpass

A = entsprechend der oben beschriebenen Methode ermittelte Phase von 180°
B = Phasenwinkel von 270° . Bei diesem Winkel löschen sich die Schallanteile von Mittel- und Hochtöner teilweise. Ein Verpolen der Lautsprecher zeigt den gleichen Frequenzgang, sodass der Fehler bei der Weichenentwicklung auf die übliche Art nicht entdeckt wird. Da bei einem Phasenwinkel von 90° oder 270° die einzelnen Lautsprecher zu laut sind, entsteht ein nerviger Klang. In diesem Fall ist die übliche Frequenzgangmessung ohne Aussage.

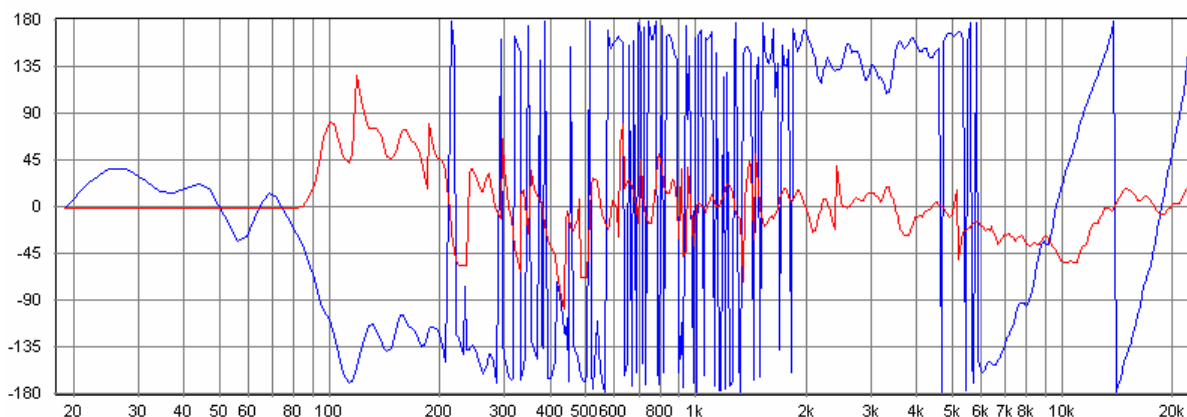
Etliche Untersuchungen zeigen, dass ein ausgeglichener Phasenfrequenzgang für eine natürliche Klangwiedergabe zwingend notwendig ist.

W4.3 Darstellung der Phase

Die grafische Darstellung der Phase in einem Plot erfolgt in dem Winkelbereich von -180° bis 180° . Dieser Bereich ist für die Phasendrehung nicht ausreichend. Ein größerer Bereich für den Winkel verschlechtert die Darstellung durch fehlende Auflösung in der y-Achse.



Das Bild zeigt die reale Phase (rote Kurve) und die Darstellung (schwarze Kurve). Die Sprünge in der dargestellten Kurve sind keine Phasensprünge, sondern entstehen bei der Darstellung. Dies führt besonders bei der akustischen Phasemessung zu Fehlinterpretationen, wenn der Phasenwinkel in dem Bereich um 180° oder -180° liegt. Dann springt die Kurve zwischen den Werten. Die blaue Kurve zeigt einen verpolten Lautsprecher.



W4.4 Elektrische Phasenmessung

Bei der elektrischen Messung wird z.B. die Phase einer Lautsprecherimpedanz gemessen. Diese Messung ist für den störungsfreien Betrieb des Lautsprechers notwendig. Große Phasenwinkel zeigen ein kapazitives oder induktives Verhalten der Lautsprecherimpedanz. Die Folge ist eine Überlastung des Verstärkers. Ebenso kann der Verstärker instabil werden und Schwingungen erzeugen.

Nachdem eine System-Correction vorhanden ist, wird der Lautsprecher an die Klemmen der Testbox angeschlossen. Mit der Schaltfläche IMPEDANCE wird von der Frequenzgangmessung auf die Impedanzmessung umgeschaltet und die Phasenmessung aktiviert. Bei der Phasenmessung wird ELECTRIC gewählt.



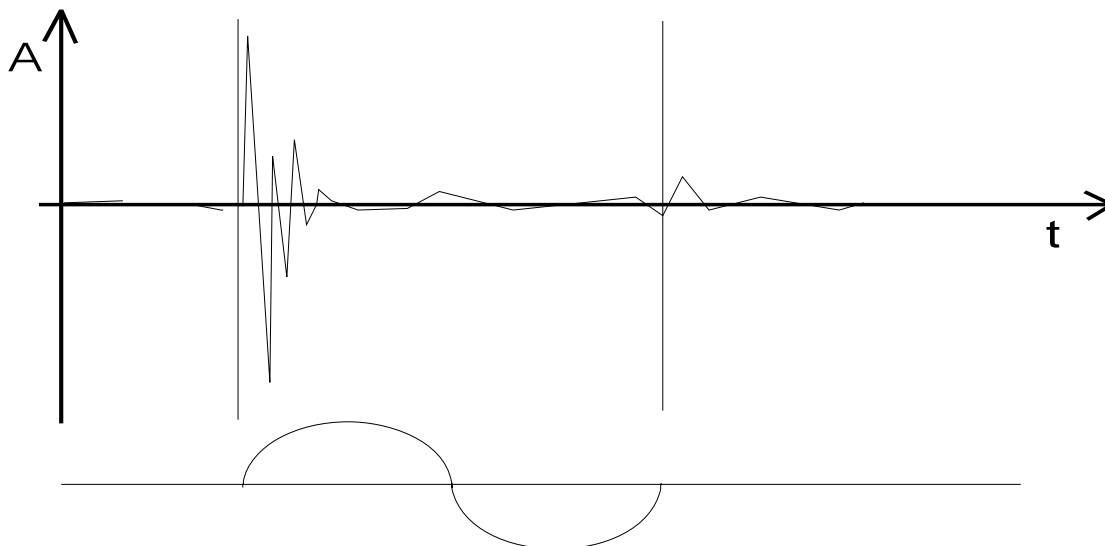
Bei der Phasenmessung zeigt sich die Qualität von Soundkarte sowie CD/DVD Spieler. Für Frequenzen $> 5\text{kHz}$ kann die Messung falsch sein. Dies zeigt sich an der zu negativen Winkeln abfallenden Kurve.

Bei der Messung der Impedanz eines Lautsprechers sollte kein Lärm vorhanden sein. Der Lärm kann die Messung verfälschen, da der Lautsprecher bei der Impedanzmessung wie ein Mikrofon wirkt.

W4.5 Akustische Phasenmessung

Bei der akustischen Phasenmessung muss die Laufzeit des Schalls vom Lautsprecher zum Mikrofon berücksichtigt werden. Beim ATB PC pro wird die Laufzeit automatisch durch die Berechnung der Nullphase kompensiert.

Bei den Messsystemen, die mit dem MLS-Signal arbeiten, wird die Laufzeit automatisch ermittelt oder vom Bediener eingestellt. Dies erfolgt über das Setzen eines Zeitfensters. Der Anfang des Zeitfensters bestimmt die Laufzeit des Schalls.



Das Bild zeigt die Messung zum Setzen des Zeitfensters. Aus dem MLS-Signal wurde der Impuls berechnet. Die Zeit vom Anfang der Zeitachse bis zum Impuls ist die Laufzeit des Schalls. Der erste Teil des Impulses wird von den höchsten Frequenzen des zu messenden Signals gebildet. Die höchsten Frequenzen werden sehr oft verzögert wiedergegeben, z.B. bei

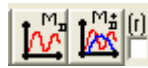
einem Einzellautsprecher, der eine Tiefpassfunktion besitzt. Bei Lautsprecherboxen mit mehreren Einzellautsprechern hat der Hochtöner eine vorlaufende Charakteristik, sein Signal kommt zu schnell. Die Ausnahme sind die zeitrichtigen Lautsprecher. Bei all den anderen Lautsprechern wird durch das Setzen des Zeitfensters als Bezugspunkt für die Nullphase die verzögerten oder vorlaufenden höchsten Frequenzen benutzt. Deswegen ist die Darstellung der akustischen Phase falsch.

Wenn diese falschen Darstellungen auch noch als Argument gegen die akustische Phasenmessung benutzt werden, zeigt dies den Mangel an Fachwissen.

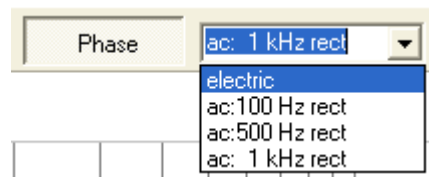
Durchführung der Messung

Die akustische Phasenmessung von einem Lautsprecher kann nur in ruhigen Räumen durchgeführt werden. Sie ist nicht so unempfindlich gegenüber Störspannungen wie die Frequenzgangmessung. Starke Reflexionen im Messraum verfälschen ebenfalls das Ergebnis. Bei kleinen Räumen sollte der Abstand nicht $> 0.5\text{m}$ sein.

Die Messung sollte mit der Dauermessung durchgeführt werden.



Da die automatische Phasenberechnung hoch komplex ist, kommt es zu Fehlanzeigen. Neben der Schaltfläche für die Phase befindet sich eine Einstellmöglichkeit zur Unterstützung der Messung. Hier wird bei der laufenden Dauermessung einer der drei Bereiche



gewählt. Der richtige Bereich ist gefunden, wenn die Phasenkurve sich nicht ändert. Bei der Messung kann es zu Fehlanzeigen kommen. Dies wird an der sehr zerstückelten Kurve sofort erkannt. Ist die Kurve im Bereich der hohen Amplitude ausgeglichen, kann auf eine richtige Messung geschlossen werden. Bei der getrennten Messung von Lautsprechern kann nur der Verlauf der Phase verglichen werden. Phasenunterschiede von 180° können vom Programm nicht immer richtig ermittelt werden. Bei der gemeinsamen Messung der Lautsprecher ist die Zuordnung aber wieder richtig.

Da die Abstandsmessung beim ATB PC nicht benötigt wird, kommt jeder Messtechniker zum gleichen Ergebnis.

W5. Grundlagen der Akustik

W5.1 Grundbegriffe

Hören

Schwingungen, die wir mit dem menschlichen Ohr wahrnehmen, werden als Schall bezeichnet. Diesen Vorgang nennt man hören.

Schall

Physikalisch gesehen ist Schall eine Welle. Genauer sind das Schwingungen von Molekülen in einem Medium, die sich wellenförmig ausbreiten. Diese Schallwellen können sich in Luft, Wasser oder auch festen Gegenständen fortbewegen.

Schallausbreitung

Schallausbreitung ist eine Druckveränderung in der Luft. Hierbei stoßen sich die einzelnen Moleküle gegenseitig an und breiten sich aus. Schall ist ein permanenter Wechsel der Druckverhältnisse. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit beträgt in der Luft bei Zimmertemperatur ungefähr 343 m/s (Meter in der Sekunde). Schallwellen, die auf eine glatte Ebene treffen, werden zum Teil reflektiert.

Schalldruck oder auch Lautstärke

Der Mensch empfindet den Schalldruck oder Schallpegel als Lautstärke. Je höher der Druck, desto lauter der Ton. Auch der Abstand zwischen Ohr und Schallquelle verändern die empfundene Lautstärke, je weiter die Schallquelle entfernt sie ist, desto geringer ist die empfundene Lautstärke.

Die Lautstärke eines Tones drückt sich im Schalldruck (oder im Schallpegel) aus. Sie wird in der Physik in der Einheit Dezibel (dB) bzw. beim menschlichen Ohr als dB(A) angegeben. Dabei liegt die Schmerzgrenze des menschlichen Ohres bei 120 bis 130 Dezibel. Zum Vergleich: Blätterrauschen wird mit 10 Dezibel gemessen, eine normale Unterhaltung mit 50 Dezibel und ein Düsenjet beim Start mit 125 Dezibel.

Eine Zunahme um 10 dB(A) bedeutet bei hohen Schallpegeln, dass das Ohr die Lautstärke doppelt so laut empfindet.

Was ist die Frequenz?

Die Anzahl der Druckänderungen (in der Luft oder einem anderen Medium) pro Sekunde wird Frequenz genannt. Die Einheit hierfür wurde in Hertz (Hz) festgelegt.

In einem Medium, wie zum Beispiel Luft, bewegen sich nicht die Moleküle selbst mit Schallgeschwindigkeit fort, sondern nur ihre Schwingung (Frequenz) ähnlich wie die "Welle" in einem Fußballstadion. Der hörgesunde Mensch kann einen Bereich von 20 bis 20000Hz hören. Im Alter nimmt dieser Frequenzbereich ab. Schall mit niedriger Frequenz als 16Hz wird als Infraschall, Schall mit höherer Frequenz als 20000Hz als Ultraschall bezeichnet.

Aufbau des Ohrs

Das Ohr besteht aus Außen-, Mittel- und Innenohr. Die Schallwellen gelangen durch den Gehörgang zum Trommelfell und regen dies zu Schwingungen an. Im Mittelohr werden diese Schwingungen durch Hammer, Ambos und Steigbügel verstärkt und zum Innenohr weitergeleitet. Dort regen verschiedene Töne an unterschiedlichen Stellen in der Gehörschnecke die Haarzellen an, die diese Information durch die Gehörnerven an das Gehirn weiterleiten. Durch Überlastung werden die Haarzellen zerstört. Das Ohr bzw. die Ohrmuschel und der Gehörgang sind so gebaut, dass Töne der Frequenz 3000 Hz maximal verstärkt werden.

Schallerzeuger

Als Schallerzeuger bezeichnet man alles, was die Luft zum Schwingen anregt, z.B. Instrumente, Lautsprecher und die Stimme.

Ton

Hörbare, gleichmäßige Schwingung.

Klang

Zusammenklingen mehrerer Töne. Bei der E-Saite eines Kontrabasses sind das z.B. der Grundton mit 44 Hz und die dazugehörigen Obertöne (Frequenzvervielfachungen) mit 88 Hz, 132 Hz usw. Die Lautstärke der einzelnen Obertöne ist abhängig vom Klangkörper des Instruments und bildet so den Klangcharakter.

W5.2 Die stehende Welle

Es ist im Allgemeinen bekannt, dass sich in einem Gehäuse, in dem sich Schallwellen durch die Bewegung der Luftmoleküle ausbreiten, auch immer, bei einer bestimmten Frequenz, eine so genannte stehende Welle auch Mode genannt ausbildet. Es gibt zwei Arten diese darzustellen.

Das Schnellemaximum

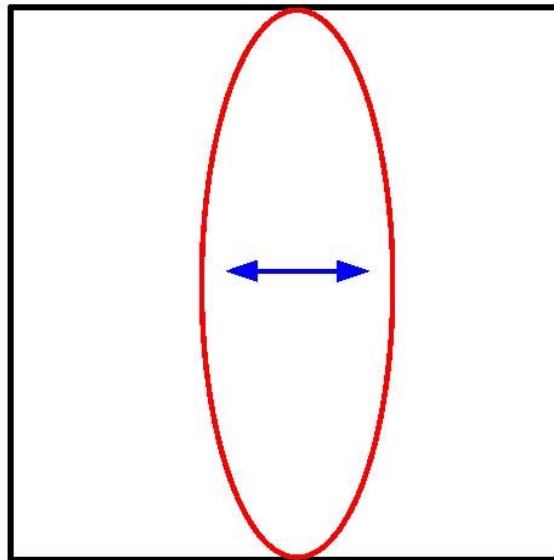


Abbildung 5.1

Die stehende Welle als Schnellemaximum (Abbildung 9.1) bedeutet, dass die größte Geschwindigkeit als das Maximum der Welle angegeben wird.

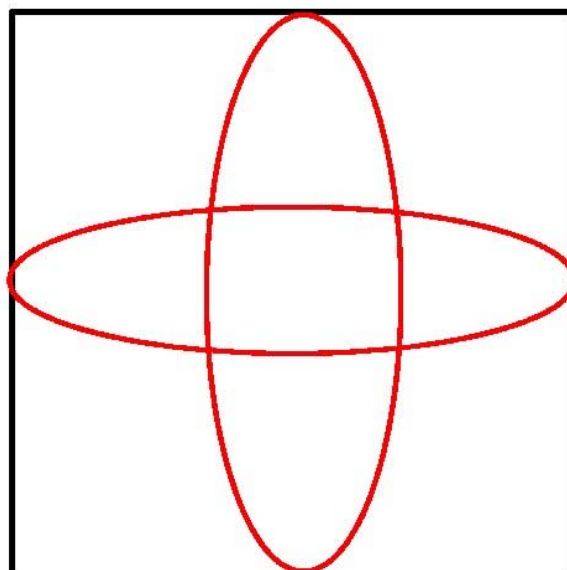


Abbildung 5.2

In Abbildung 5.2 sind die horizontale und die vertikale Welle eingezeichnet.

Das Druckmaximum

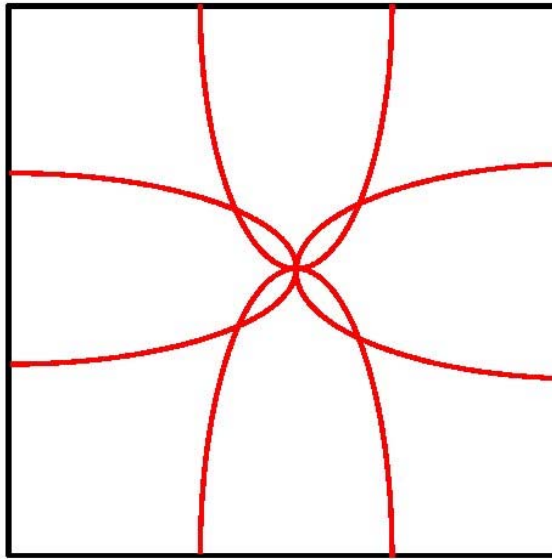


Abbildung 5.3

Die stehende Welle als Druckmaximum (Abbildung 5.3) bedeutet, dass der größte Druck als Maximum der Welle angegeben wird.

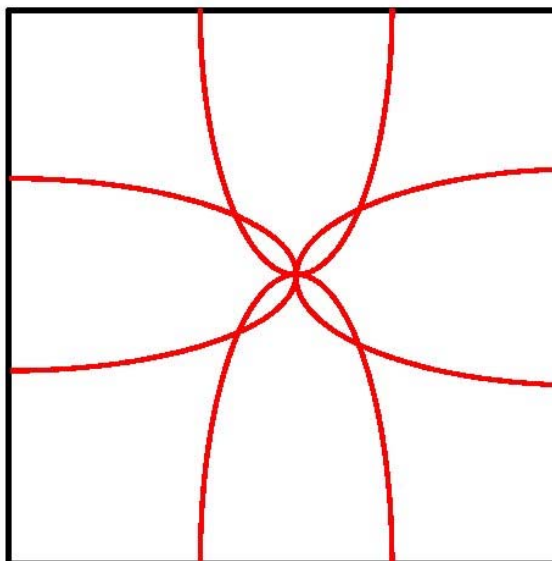


Abbildung 5.4

In Abbildung 5.4 sind die horizontale und die vertikale Welle eingezeichnet.

Die Frequenz

Die Frequenz dieser stehenden Welle läßt sich durch folgende Formel bestimmen:

$$f = 340 \text{ m/s} \cdot ((1 \div \text{Weg in Meter}) \cdot \frac{1}{2})$$

Für einen Wandabstand im Gehäuse von ungefähr 25cm bedeutet das:

$$f = 340 \text{ m/s} \cdot ((1 \div 0,25) \cdot \frac{1}{2})$$

Daraus folgt:

$$f = 680 \text{ Hz}$$

Für diesen Lautsprecher bedeutet es, dass die Luft bei dieser Frequenz von 680Hz eine Resonanz bildet. Diese Resonanz hat eine Rückwirkung auf die Membran, die eine zusätzliche, zeitlich verzögerte Schallabstrahlung bewirkt. Eine solche Schallabstrahlung sollte unterbunden werden, da sie Töne erzeugt, die nicht zum eigentlichen Klangbild gehören.

W5.3 Schall im Gehäuse

Um die Verhältnisse im Gehäuse zu verdeutlichen, werden im Folgenden einige vereinfachte Modelle aufgezeigt, mit denen wir versuchen die Bewegung von Luftmolekülen im Gehäuse darzustellen.

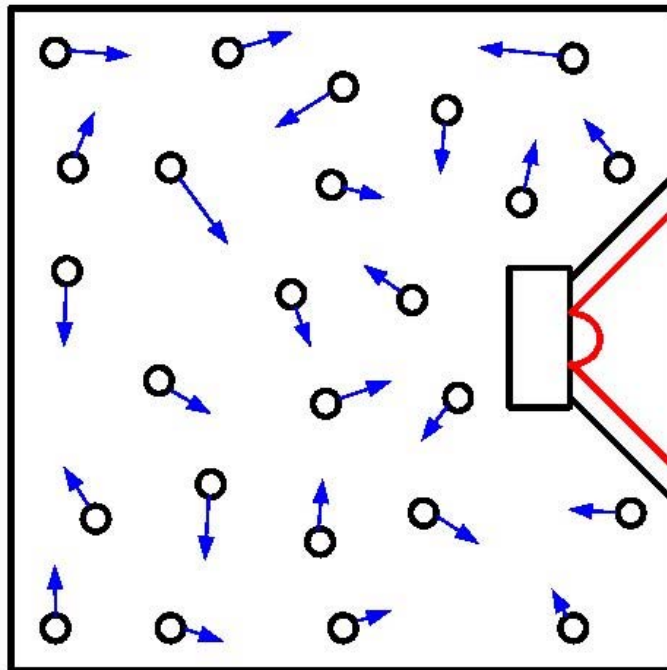


Abbildung 5.5

Im ersten Modell (Abbildung 10.1) sind die Luftmoleküle als kleine runde Kreise dargestellt. Die Moleküle sind chaotisch angeordnet, so wie sie sich in der Natur verhalten. Die blauen Pfeile an den Molekülen geben durch ihre Länge die Schnelle und durch ihre Ausrichtung die Bewegungsrichtung an. In der Summe addieren und subtrahieren sich alle Kraftpfeile durch ihre Länge und Richtung zu null: Thermisches Gleichgewicht.

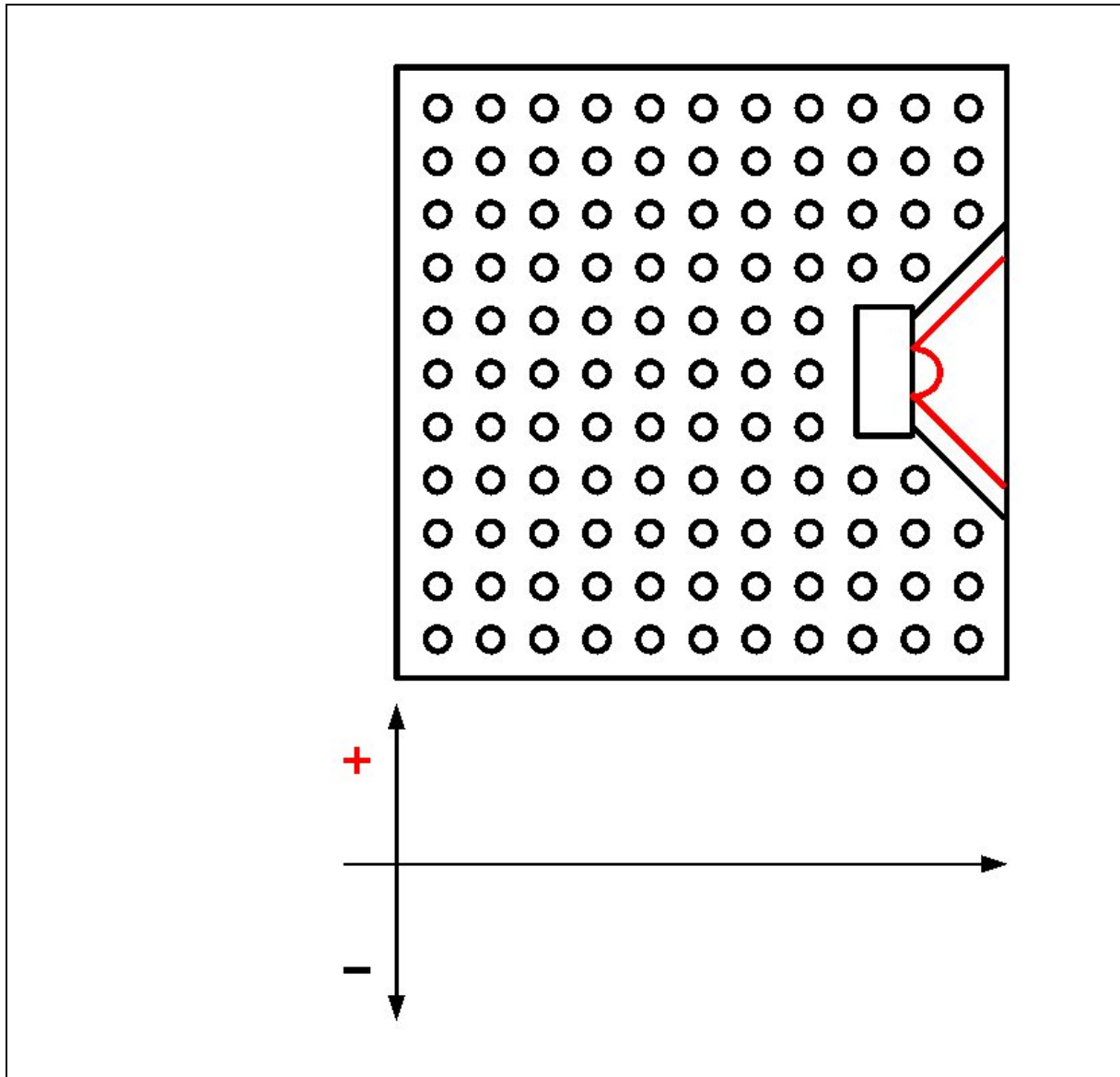


Abbildung 5.6

Für unsere Betrachtung wurde ein vereinfachtes Modell gewählt (Bild 5.6). Unter dem Lautsprecher ist in ein Koordinatenkreuz dargestellt. Auf der X-Achse ist der Weg durch den Lautsprecher und auf der Y-Achse ist der Druck im Lautsprecher angegeben.

In der Abbildung 5.6 ist der Abstand zwischen den Luftmolekülen überall gleich. Der Abstand zwischen den Molekülen gibt hierbei auch den Druck an dieser Stelle an.

Sprung im Gehäuse

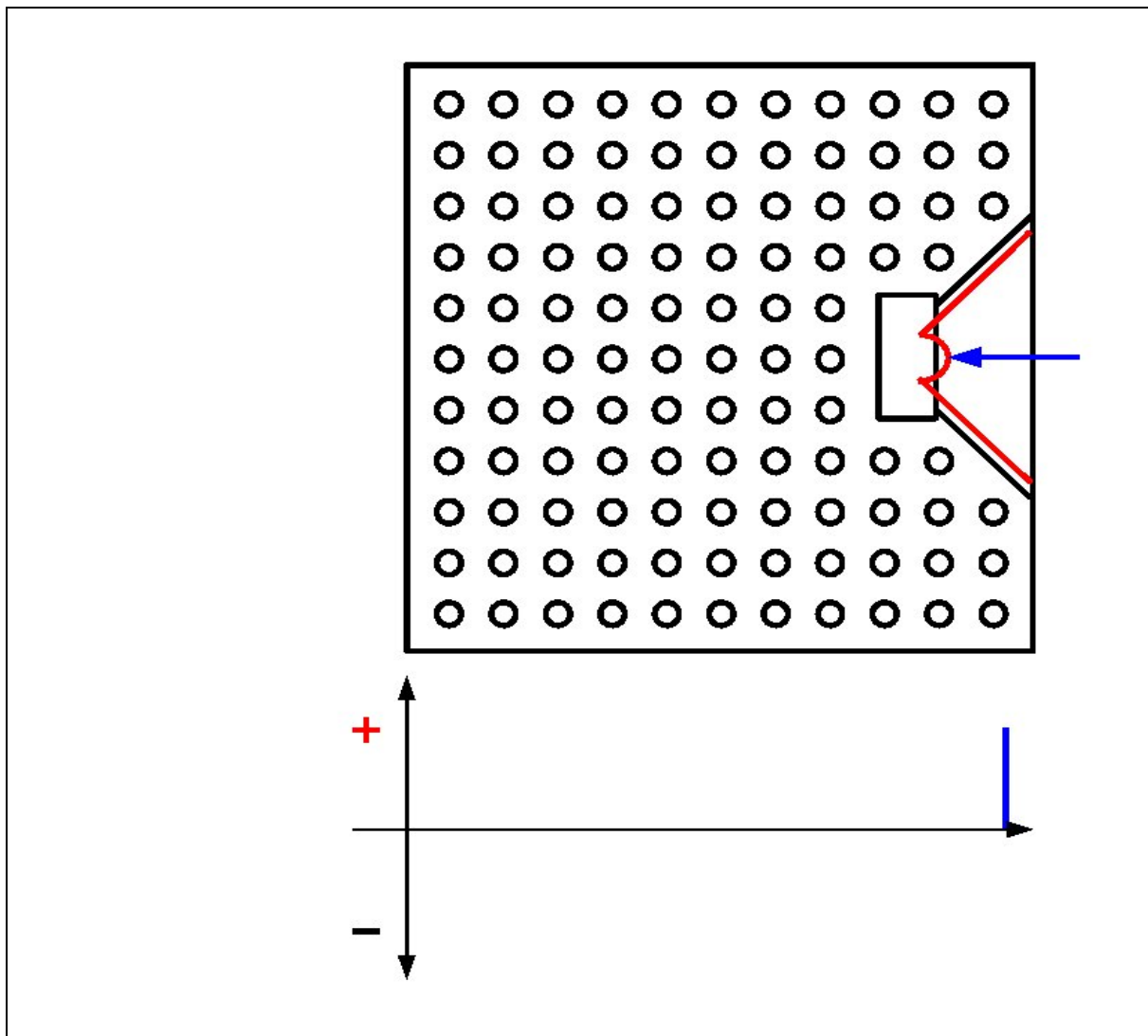


Abbildung 5.7

Wie nun in der Abbildung 5.7 zu erkennen ist, startet die Modellreihe mit einem Sprung. Hierbei wird die Membran in das Gehäuse gedrückt. Im ersten Moment resultiert daraus nur ein Druckanstieg. Dieser ist hier als blaue Spitze auf der X-Achse zu erkennen.

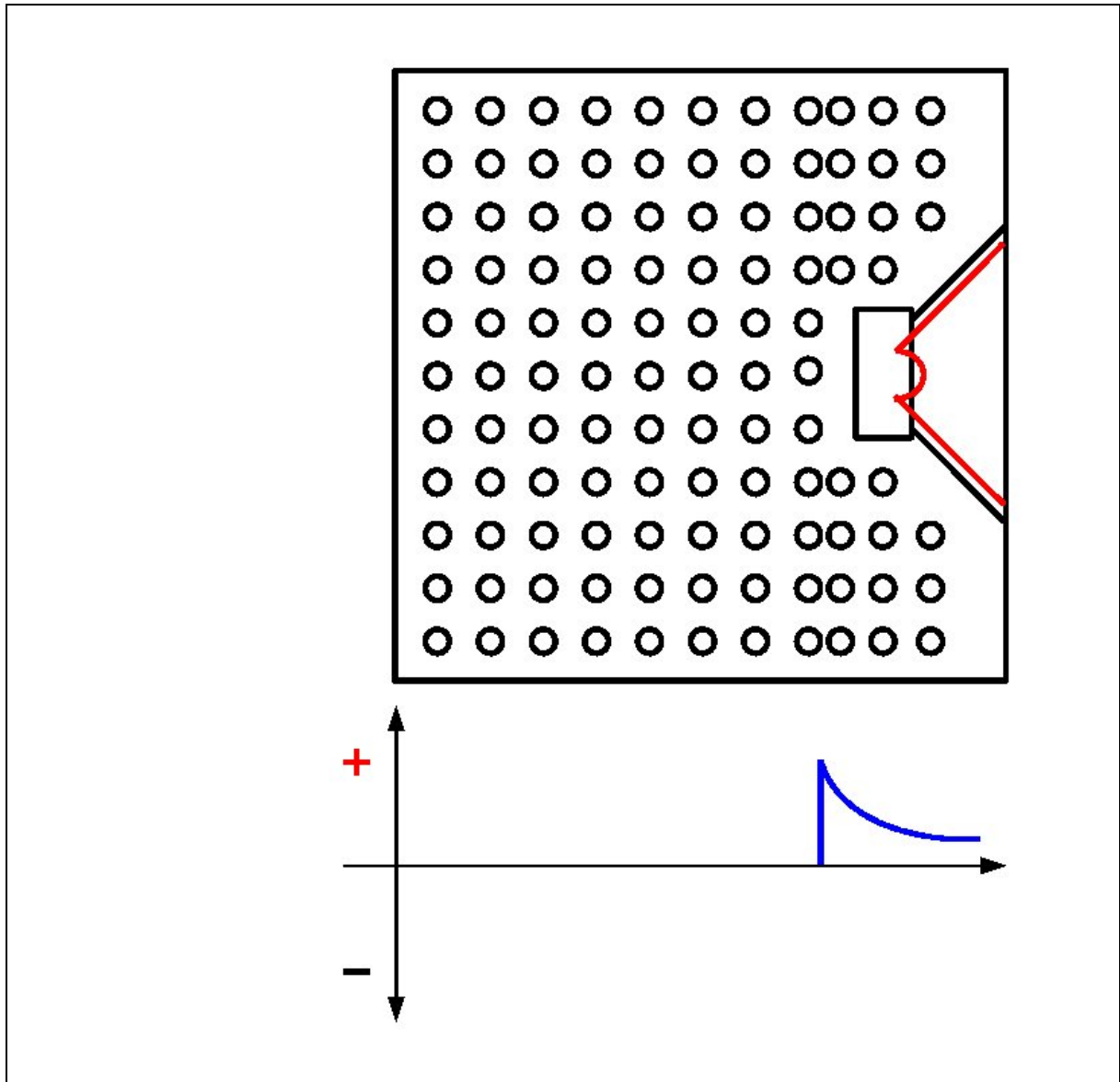


Abbildung 5.8

Im nächsten Schritt wandert jetzt dieser Sprung durch das Gehäuse. Hierbei stoßen sich die beschleunigten Luftmoleküle im Gehäuse gegenseitig an und übertragen so ihre Energie. Dabei kommt es zu einer Verdichtung an dieser Stelle. Nach dem Sprung fällt der Überdruck bei länger werdendem Weg ab.

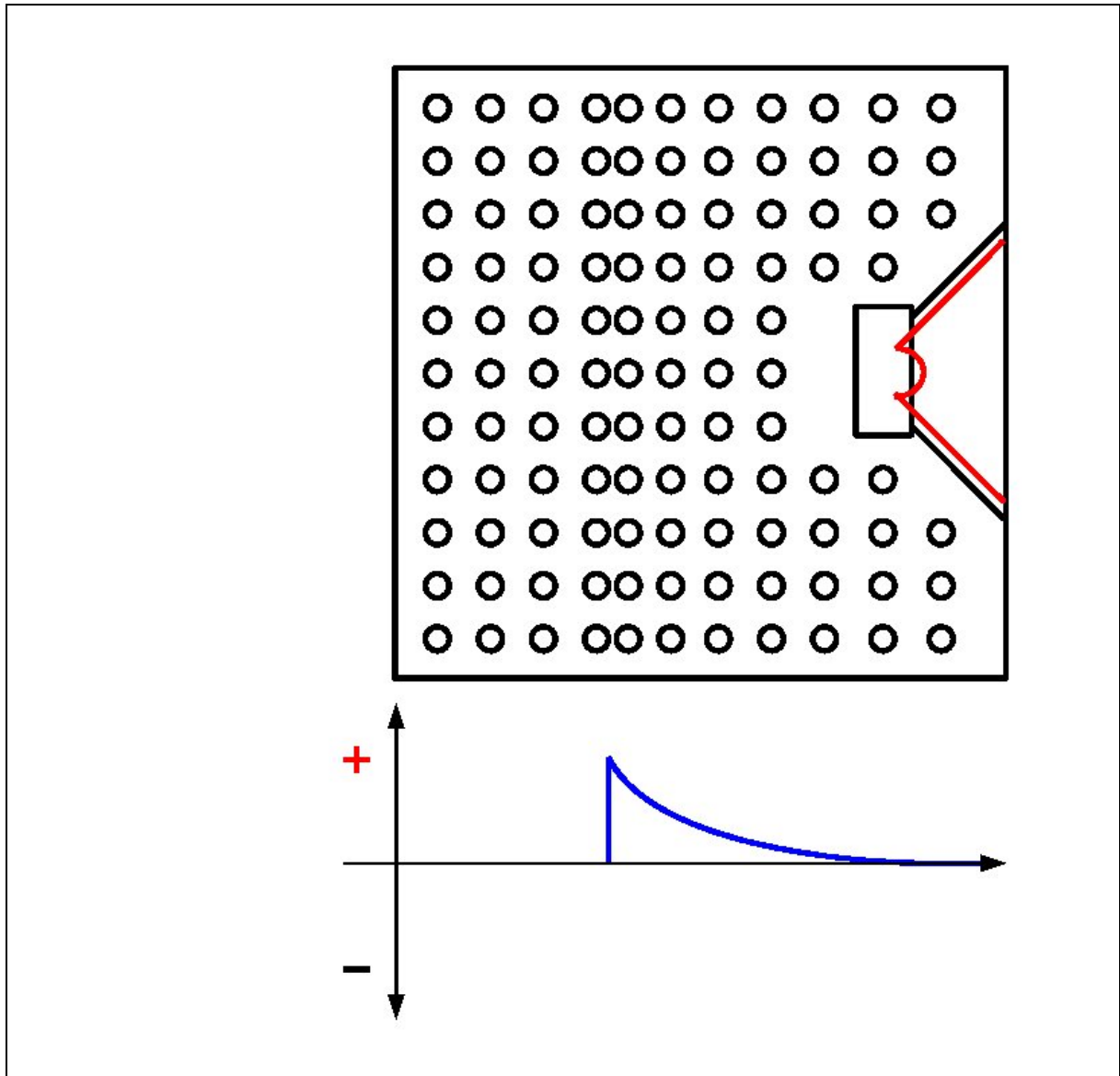


Abbildung 5.9

Wie man auf der Abbildung 5.9 erkennen kann, ist der Druck am Anfang des Gehäuses wieder null. Der Sprung wandert weiter.

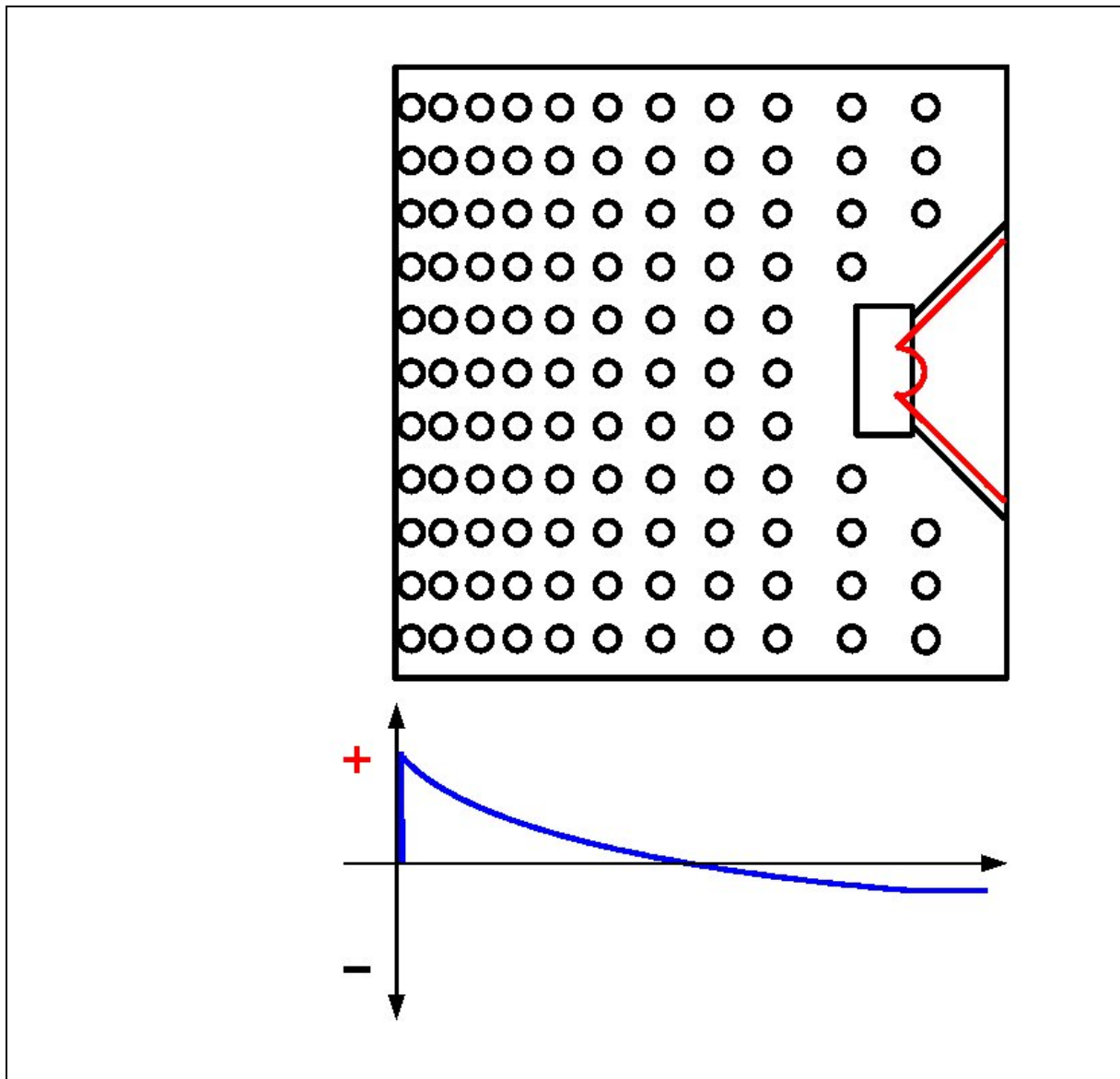


Abbildung 5.10

An dieser Stelle passiert das für eine stehende Welle Entscheidende (Abbildung 5.10). Die Masse der beschleunigten Luftmoleküle ist noch nicht zur Ruhe gekommen und bewirkt durch ihr Weiterwandern, dass sich am Anfang des Gehäuses ein Unterdruck bildet. Diesen Vorgang nennt man Überschwingen. Bei einer Stehenden Welle ist dieses Überschwingen maximal.

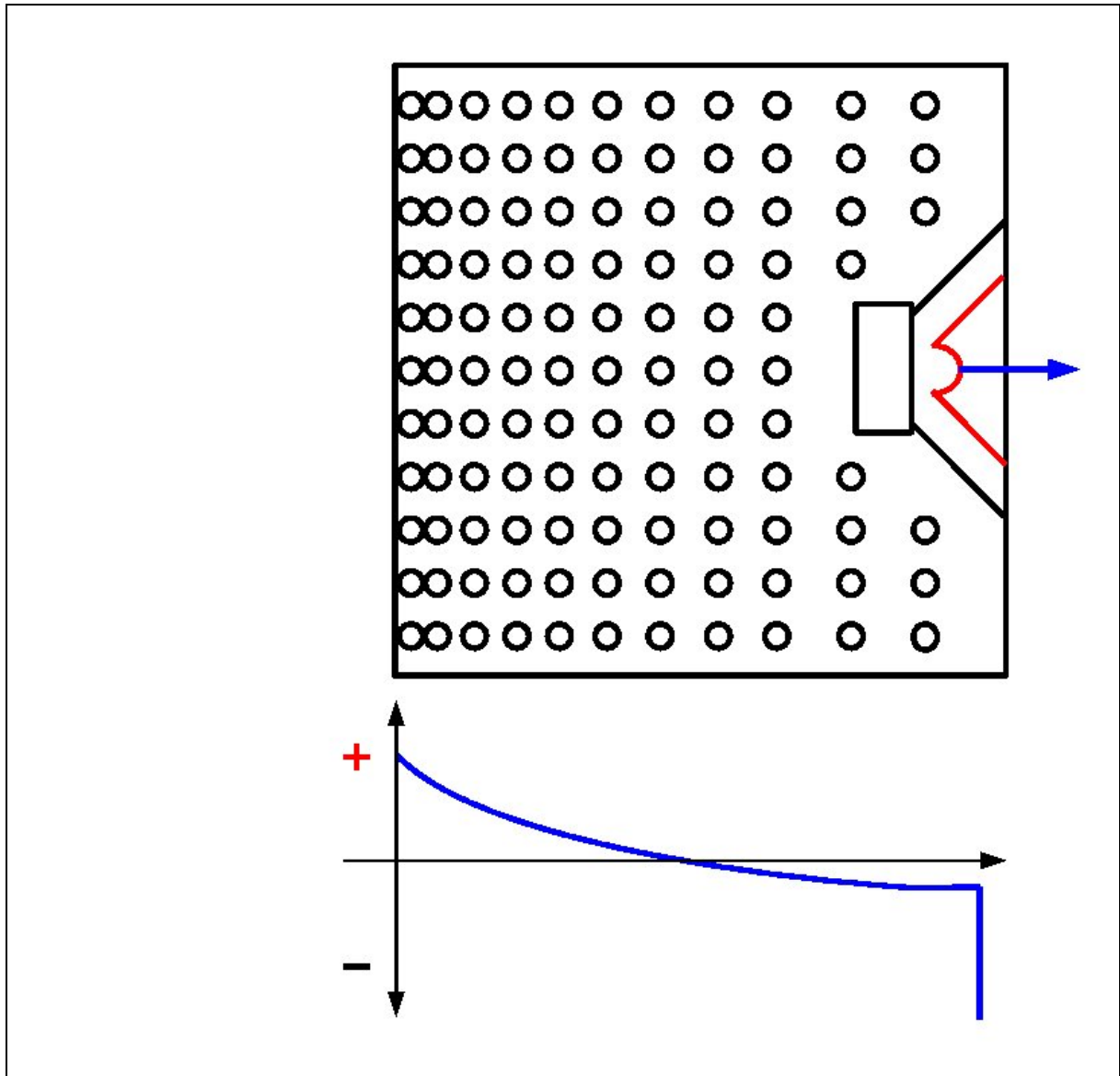


Abbildung 5.11

Die Frequenz gibt vor, ob zu diesem Zeitpunkt die Membran des Lautsprechers ausschwingt (Abbildung 5.11). Für eine stehende Welle ist dieses nötig, denn nun erzeugt dieses Ausschwingen zusätzlich, zum durch das Überschwingen hervorgerufenen Unterdruck, einen weiteren Unterdruck.

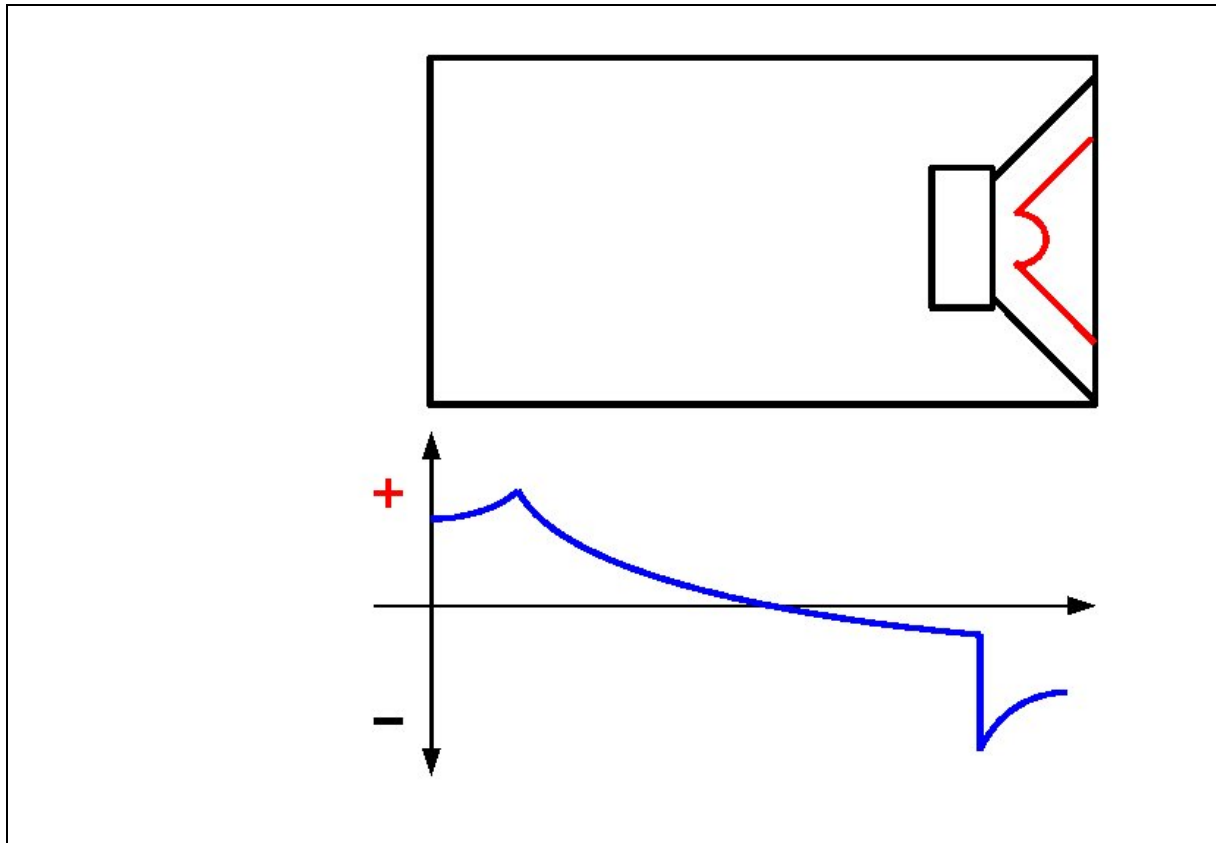


Abbildung 5.12

In der Abbildung 5.12 ist zu erkennen, dass sich nun auch dieser Sprung durch das Gehäuse bewegt. Zusätzlich kommt die Reflexion des ersten Sprunges zurück. Die Grafik wurde hierbei vereinfacht, denn die Bewegungen der Luftmoleküle wurden in den Abbildungen 5.7 bis 5.11 dargestellt.

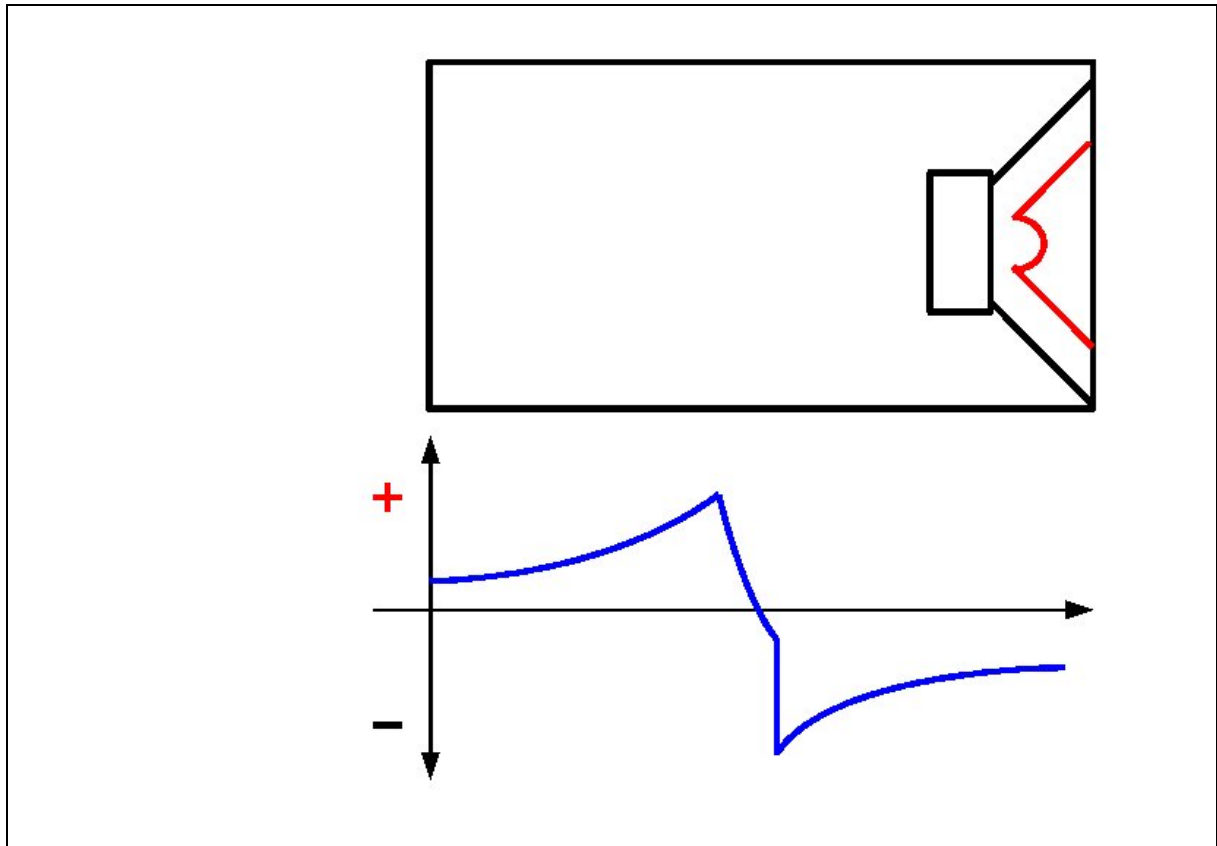


Abbildung 5.13

Die sich entgegenlaufenden Sprünge kommen sich näher, wobei die Drücke am Anfang und am Ende des Gehäuses kleiner werden (Abbildung 5.13).

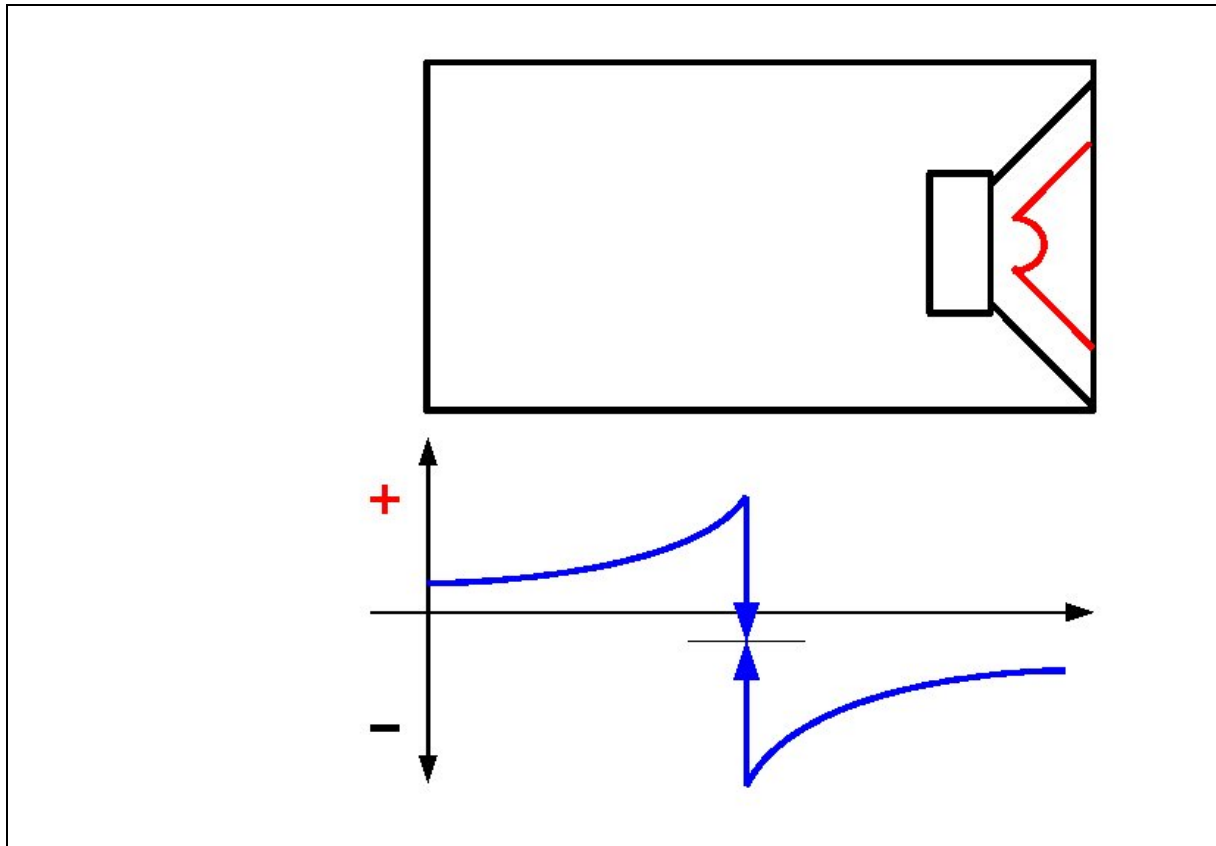


Abbildung 5.14

An dieser Stelle treffen sich die beiden Sprünge (Abbildung 5.14). Der durch das erste Überschwingen hervorgerufene Unterdruck ist hier als Betrag dargestellt. Die beiden Druckwellen sind um diesen Betrag von der X-Achse verschoben. Der Ausgleich erzeugt die hohe Schnelle der Luftmoleküle.

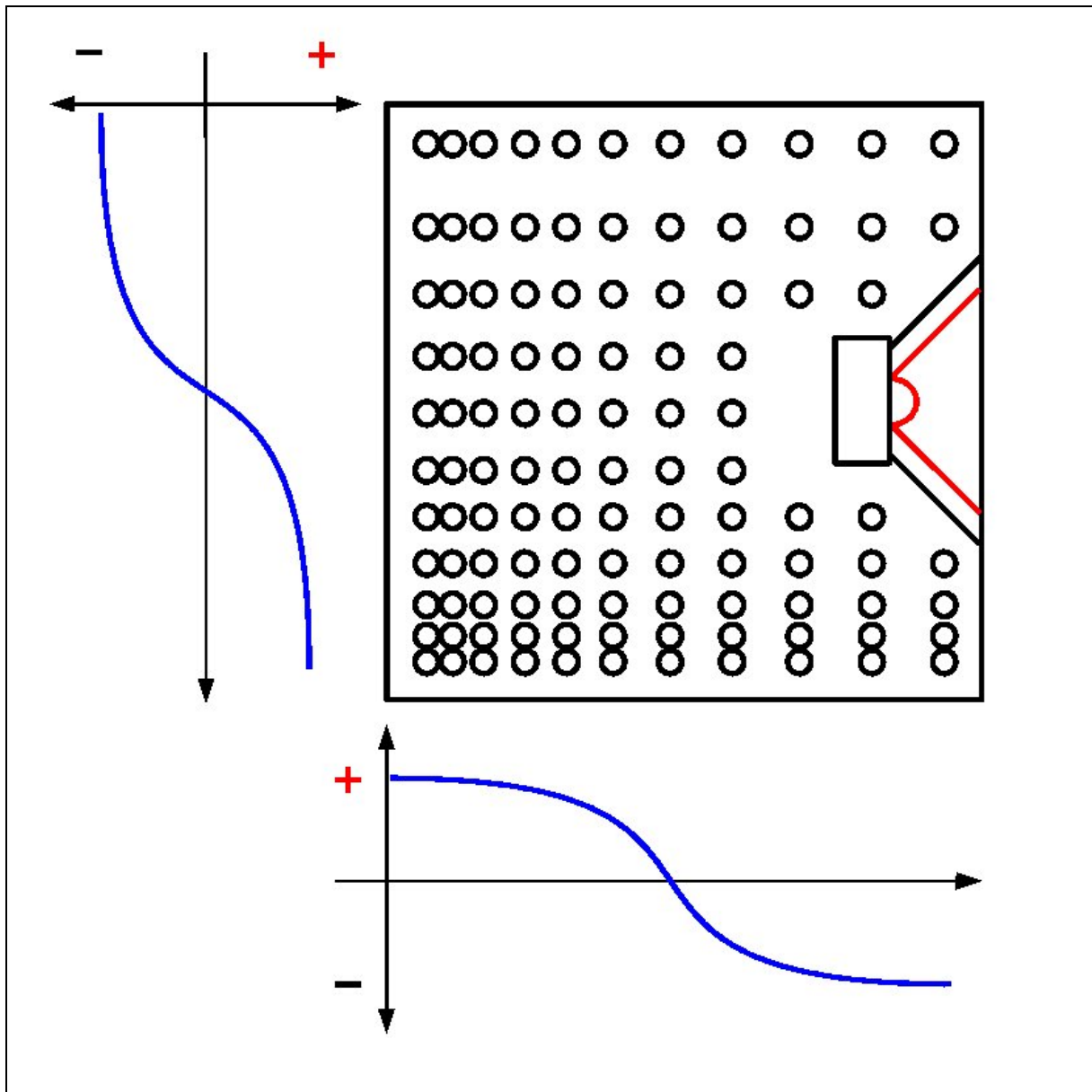


Abbildung 5.15

In Abbildung 5.15 ist der eingeschwungene Zustand der Welle zu erkennen. Diese Welle ist nun einmal in der Horizontalen und in der Vertikalen zu beobachten. Sie wechselt ihre Druck- und Unterdruckmaxima mit der Frequenz. In den Ecken wechselt sich immer ein Überdruckmaximum mit einem Unterdruckmaximum ab. Der Austausch erfolgt über die Mitte und erzeugt hier ein Geschwindigkeitsmaximum. Dieses bedeutet, dass zum Messen einer solchen Welle Geschwindigkeitsaufnehmer und Druckaufnehmer benötigt werden.

W5.4 Mikrofone

An dieser Stelle werden Druck- und Geschwindigkeits-Messmikrofone vorgestellt.

Mikrofone lassen sich im Allgemeinen in zwei Gruppen einteilen. Es gibt Mikrofone mit Nierenkarakteristik und mit Kugelkarakteristik.

Kugelkarakteristik

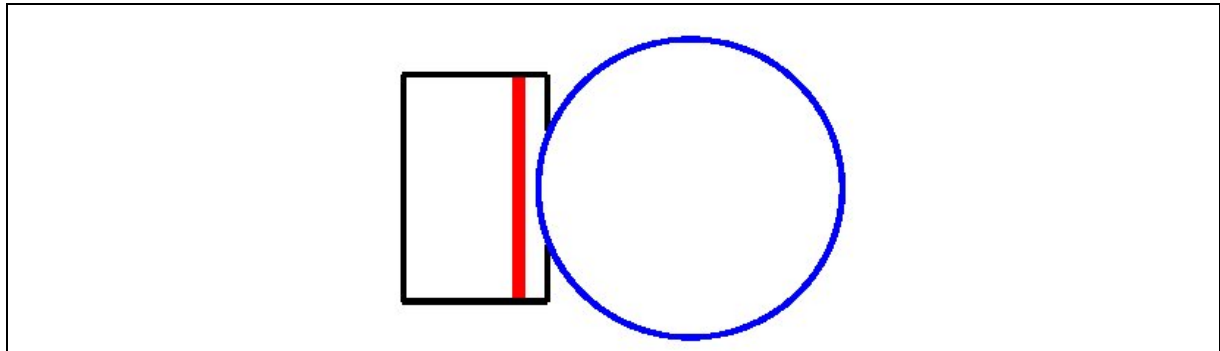


Abbildung 5.16

Bei der Kugelcharakteristik ist hinter der Membran (rot) ein geschlossenes Gehäuse (Abbildung 5.16). Das Mikrofon reagiert dadurch sehr stark auf Druckänderungen. Die Membran kann aber durch die Federwirkung der im Mikrofongehäuse eingeschlossenen Luft keiner Schnellenbewegung folgen. Mikrofone mit Kugelcharakteristik sind in ihrer Empfindlichkeit nicht richtungsabhängig, daher ist der Aufnahmebereich (blau) kreisförmig.

Nierenkarachteristik

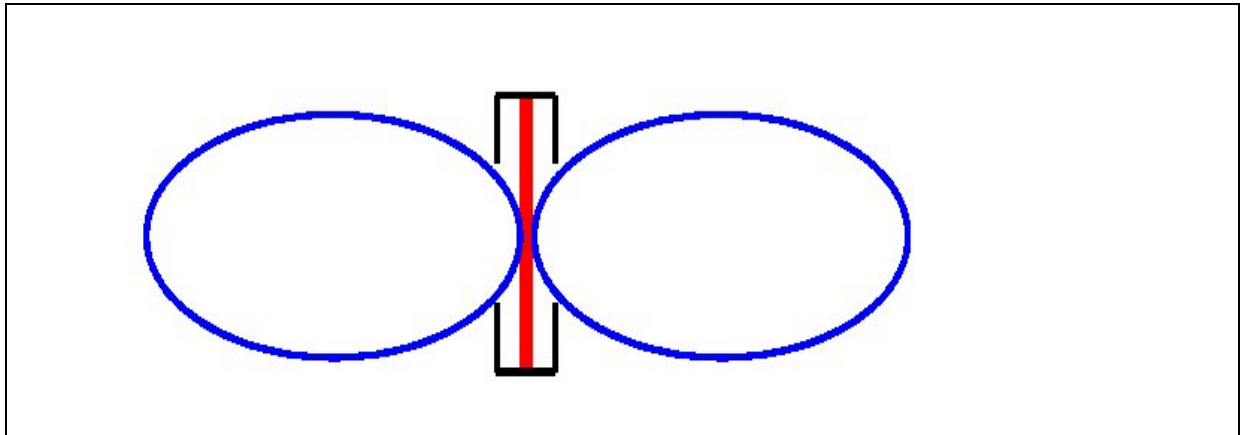


Abbildung 5.17

Mikrofone mit Nierencharakteristik haben eine auf der Vorderseite und Rückseite offen aufgehängte Membran (rot) (Abbildung 5.17). Dadurch sind Sie in der Lage Luftbewegungen aufzunehmen, die sich durch Geschwindigkeitsänderungen bemerkbar machen. Sie haben eine Richtwirkung, das bedeutet sie nehmen Schallquellen, die axial zur Membran liegen stärker wahr als solche, die etwas außerhalb dieser Richtung liegen. Deshalb ist der Aufnahmbereich nierenförmig (blau).

W5.5 Schallausbreitung

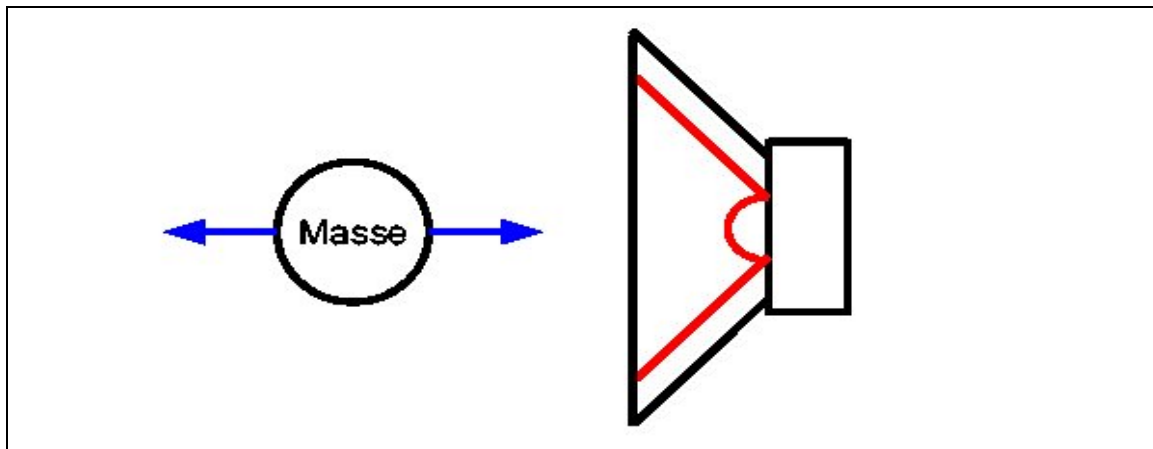


Abbildung 5.18

Jedes Luftmolekül hat eine Masse (Abbildung 5.18). Wenn sich nun Schall durch die Bewegung dieser Luftmoleküle ausbreiten soll, muss diese Masse beschleunigt werden. Zum Beschleunigen dieser Masse benötigt man eine Kraft. Für eine schnelle Beschleunigung dieser Masse, also hohe Frequenz, ist eine große Kraft nötig. Wenn die Masse langsam beschleunigt werden soll, also tiefe Frequenz, ist der Kraftaufwand nicht so hoch. Um aber die gleiche Energie umzusetzen, muss man bei tiefen Frequenzen viele Moleküle anregen.

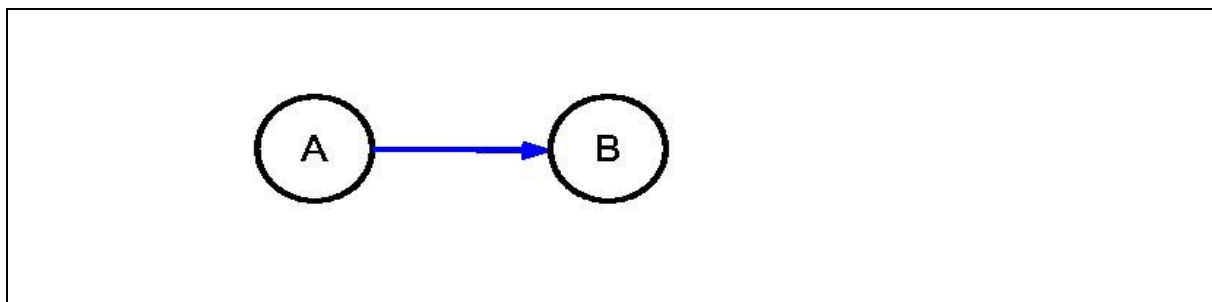


Abbildung 5.19

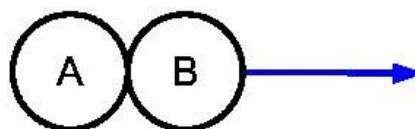


Abbildung 5.20

Die zur Übertragung von hohen Tönen benötigte hohe Energie wird nur bei einem direkten Stoß optimal weitergegeben (Abbildung 5.19 und 5.20). Hier erklärt sich, dass sich hohe Töne gerichtet ausbreiten. Denn nur der direkte Weg hat die zur Übertragung nötigen geringen Verluste.

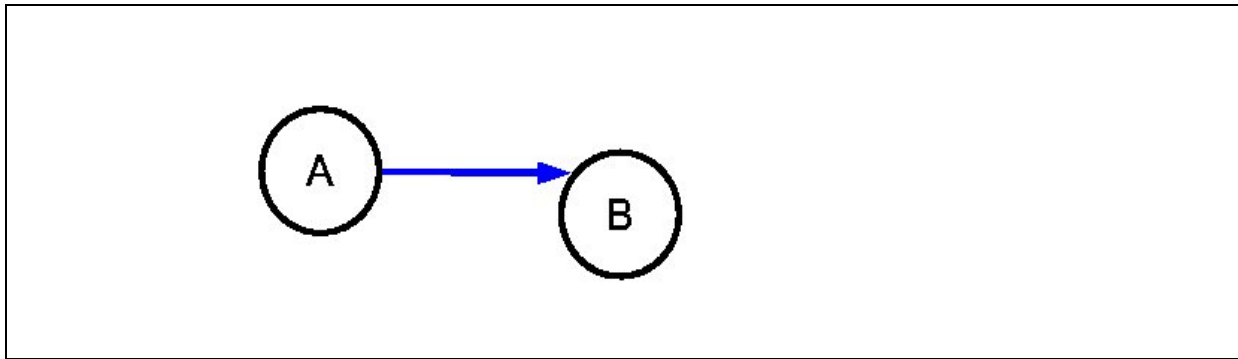


Abbildung 5.20

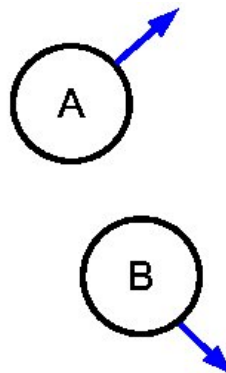


Abbildung 5.21

Trifft nun ein schnell beschleunigtes Molekül ein anderes, sich nicht direkt in der Flugbahn befindliches Molekül, (Abbildung 5.20) so kann dieses nicht seine gesamte Energie an das nächste Molekül abgeben und fliegt mit einem Teil der Energie in eine andere Richtung (Abbildung 5.21). Wenn es auf ein weiteres Molekül trifft, kann es wiederum die Energie nicht optimal weitergeben.

Hier erklärt sich nun, warum hohe Töne bündeln. Denn nur der direkte Weg hat die zur Übertragung nötigen geringen Verluste.

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.

Die Ausbreitung wird auch durch den Strahlungswiderstand beschrieben. Bei tiefen Frequenzen hat er einen niedrigen Wert. Der Schalldruck wird durch viele Luftmoleküle mit niedriger Schnelle erzeugt. Hierzu sind große Membranflächen erforderlich. Bei hohen Frequenzen werden für den gleichen Schalldruck nur wenige Luftmoleküle mit großer Schnelle benötigt. Wegen dem im Hochtonbereich hohen Wert für den Strahlungswiderstand ist die Membranfläche klein. 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 erfolgen, die aus leichter Schwingspule und Membran besteht. Durch die leichte Schwingspule wird die Leistung begrenzt. Eine höhere Leistung besitzen Hornlautsprecher, da das Horn den Strahlungswiderstand erhöht.

W5.6 Messungen im leeren Gehäuse

Messung 1:

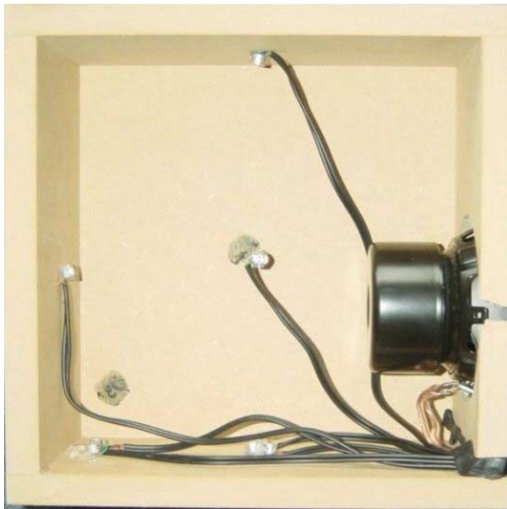


Abbildung 5.22

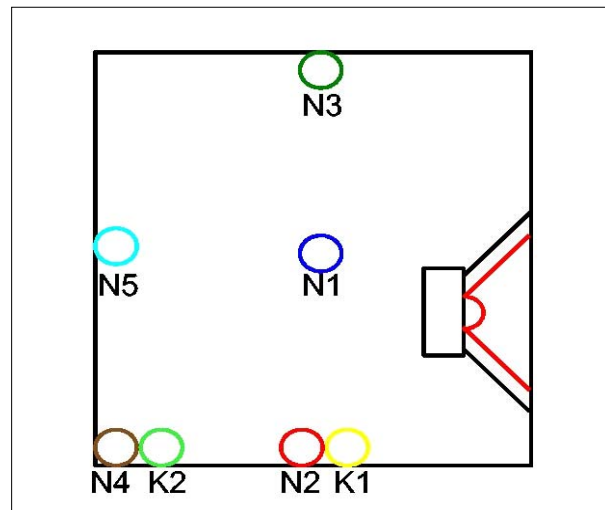


Abbildung 5.23

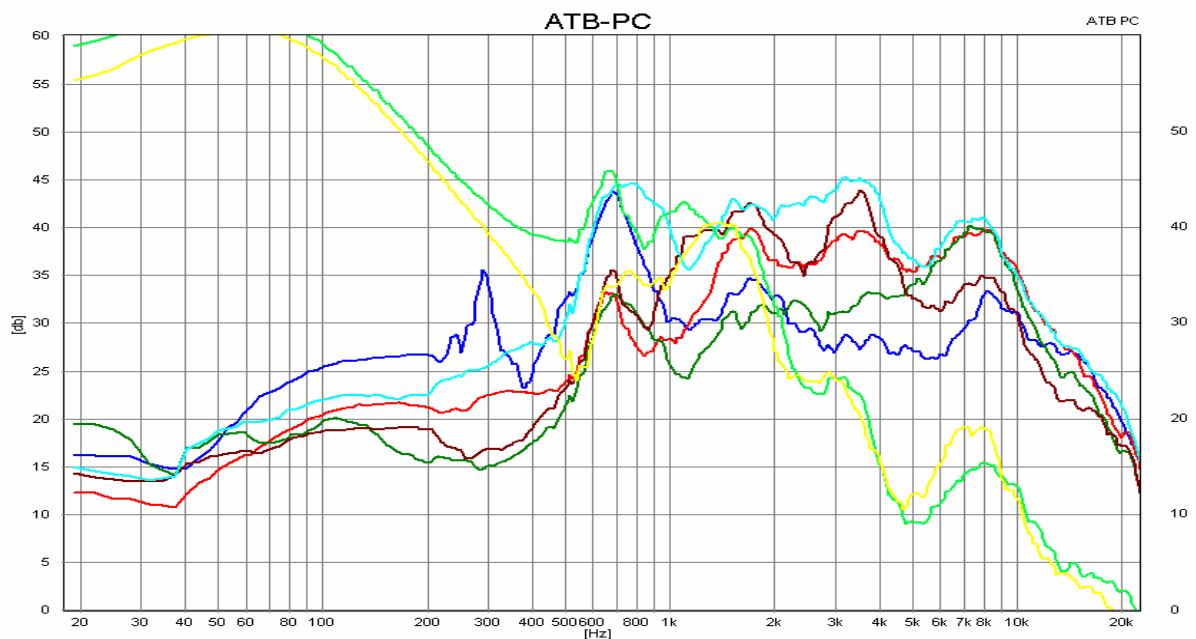


Abbildung 5.24

Wie in Abbildung 5.22 zu erkennen ist, wurde die erste Messung im geschlossenen Gehäuse durchgeführt. Wie vorher berechnet, zeigen alle Mikrofone bei 680Hz einen ausgeprägten Anstieg, die stehende Welle. Der Schnelleufnehmer **N5** liegt ungünstigerweise der Schallquelle genau gegenüber und bekommt durch seine Richtwirkung somit einen sehr hohen Energieanteil ab. **N1** zeigt die maximale Schnelle in der Mitte. **N2**, **N3** und **N4** zeigen die durch den ständigen Druckwechsel entstehende Geschwindigkeit, die nahezu in allen Ecken bei dieser Frequenz identisch ist. Auch kann man die durch **K2** aufgezeigte Summe der axialen und vertikalen Welle, Druckmaximum in der Ecke, erkennen.

Messung 2:

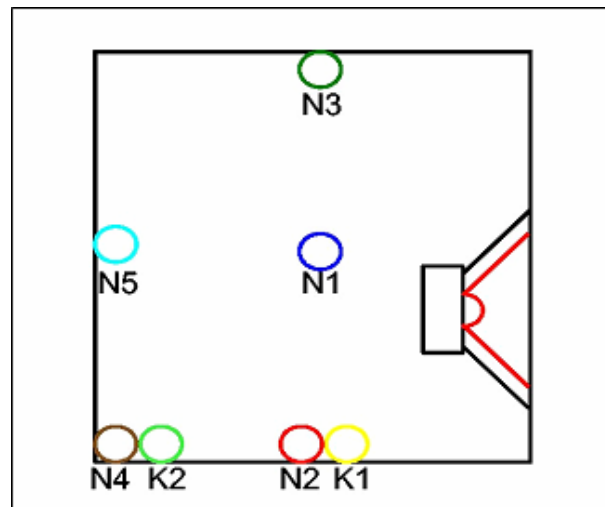
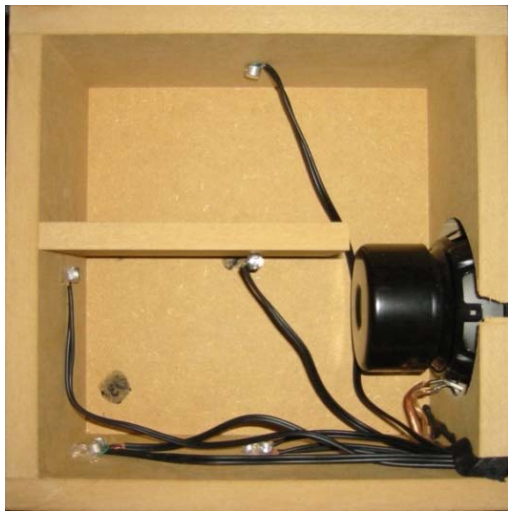


Abbildung 5.25

Abbildung 5.26

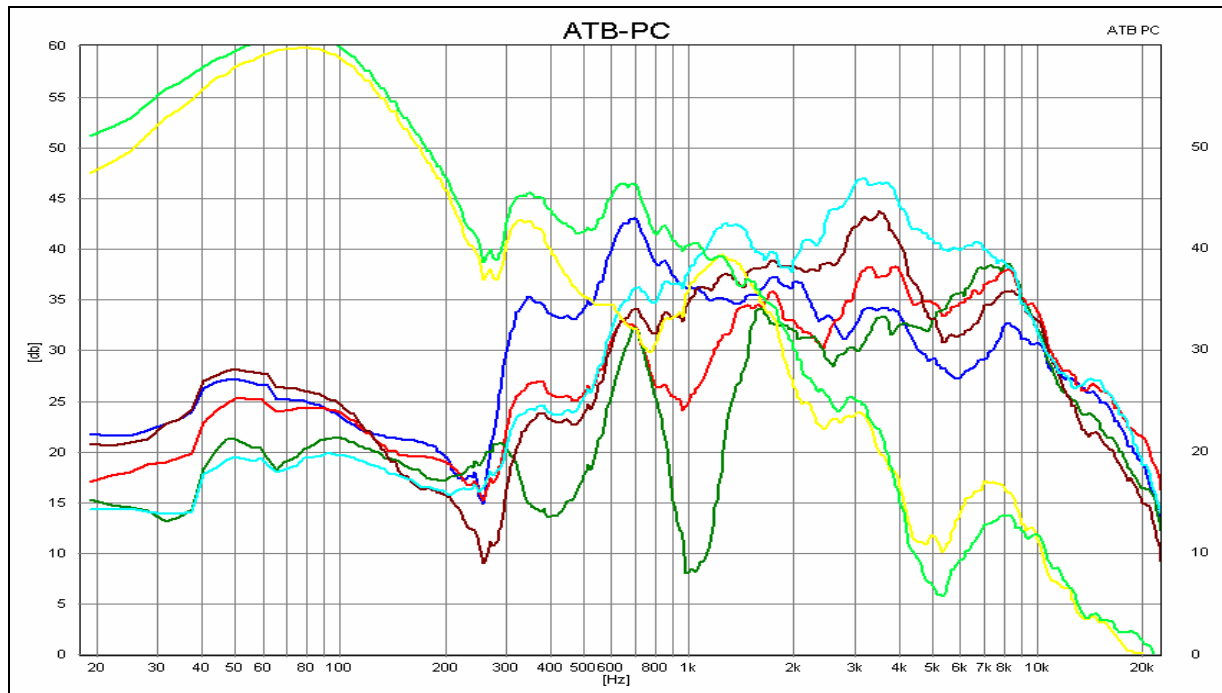


Abbildung 5.27

In der Messung 2 soll der Einfluss eines rechtwinkligen Brettes untersucht werden. Wie in Abbildung 5.27 zu erkennen ist, bildet sich trotz des Brettes die stehende Welle mit 680Hz. Zusätzlich bildet sich nun noch eine zweite stehende Welle mit 340Hz! Diese ist zwar nicht so ausgeprägt wie die Erste, aber dennoch gut zu erkennen. N1 zeigt auch hier wieder das zu erwartende Schnellemaximum in der Raummitte.

Messung 3:



Abbildung 5.28

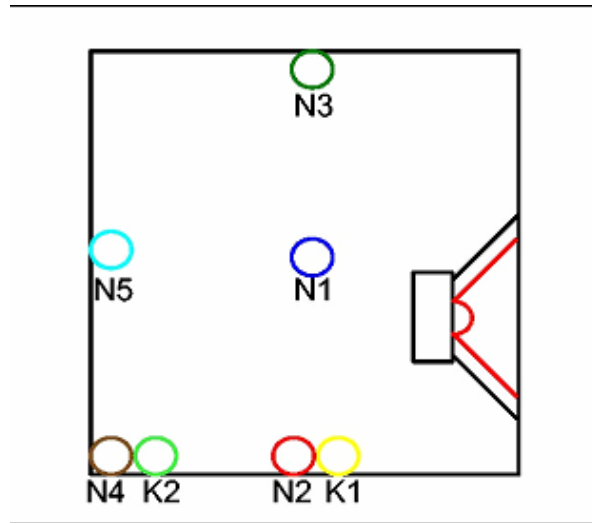


Abbildung 5.29

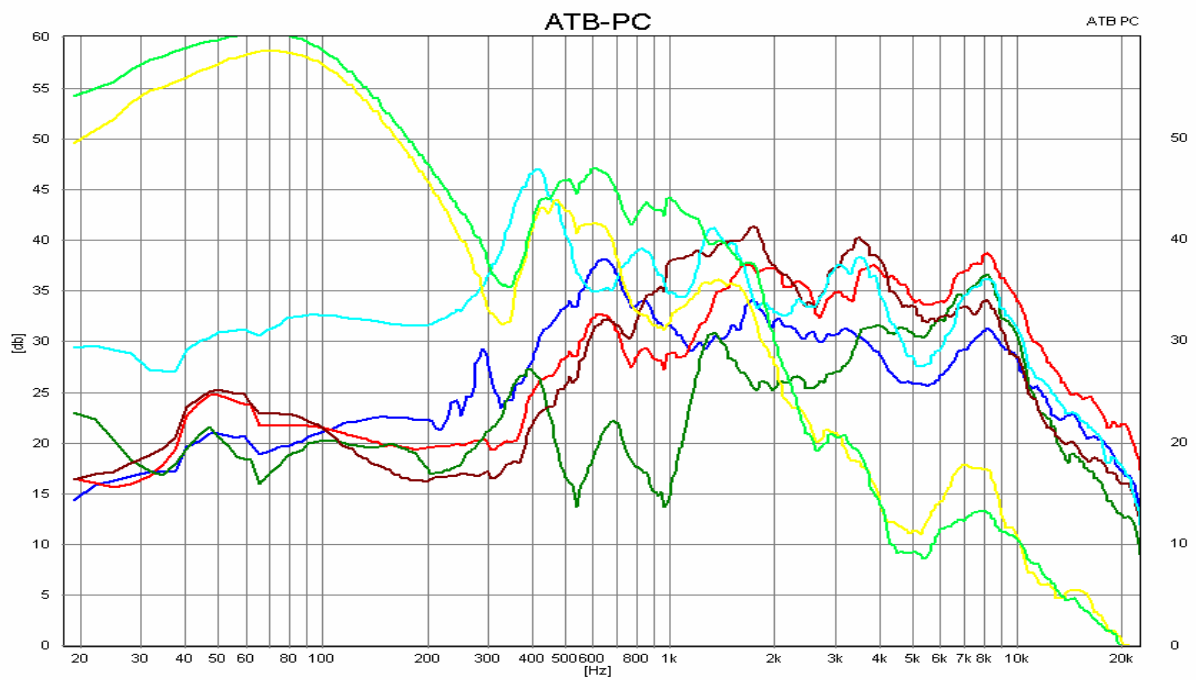


Abbildung 5.30

Die letzte Messung zeigt den Einfluss eines schrägen Brettes. Dieses Brett teilt das Gehäuse unsymmetrisch auf. Somit bilden sich nun oben und unten zwei unterschiedlich massereiche Volumina. Die zwei unterschiedlichen Massen sind nur sehr schwer in eine Resonanz zu bringen. Auf der Abbildung 5.30 erkennt man nur noch einen Rest der Resonanz, die sich aber nun sehr weit verteilt.

W6. Beschleunigungsaufnehmer

Mit dem Beschleunigungsaufnehmer werden die Schwingungen von Lautsprechergehäusen, Autoblechen oder Maschinenteilen gemessen. Die Beschleunigungsaufnehmer messen nur die Schwingung des Materials und nicht den Luftschall. Bei der Messung wird die Schwingung auf das Gehäuse des Aufnehmers übertragen. Im Gehäuse befindet sich eine Elektret Folie, deren Massenträgheit der Gehäuseschwingung entgegenwirkt. So wird eine der Schwingung entsprechende Spannung erzeugt.

W6.1 Messung

Die Aufnehmer sind nicht geeicht, die gezeigten Amplituden sind keine absoluten Größen. Der messbare Frequenzbereich ist 30Hz – 3kHz. Der Schwingungsaufnehmer zeigt die Frequenzen der Schwingungen und durch den Vergleich der Amplituden lassen sich Schwingungen gezielt unterdrücken.

W6.2 Montage

Die Aufnehmer werden mit doppelt klebendem Teppichband auf das zu testende Material aufgeklebt.

W6.3 Anschluss

Die Beschleunigungsaufnehmer werden an den Mikrofoneingang der Soundkarte angeschlossen.

Hierbei wird die Empfindlichkeit durch die Aktivierung von Mic.-boost oder Mikrofonverstärker in der Systemsteuerung erhöht.

W7. Design

Entwurf Kompaktlautsprecher
von Dipl. Des. Waldemar Namyslo

Herausstechendes Merkmal bei diesem Entwurf ist die Materialtrennung sowie der dadurch entstandene Fokus auf den X –Jet Hochtöner und den Tief/ Mitteltöner.

Die, durch die spezifische Bauweise entstandene Abstufung zwischen Hoch- und Tief-/Mitteltöner wird kaschiert. Dadurch, dass die Hoch-/Tief-/Mitteltöner in dem gleichen Material eingearbeitet sind, wird der Bezug zueinander verstärkt. Die Frontblenden, in den die Lautsprecher eingearbeitet sind, sind austauschbar und können somit jeder Box einen individuellen Charakter verleihen.



W8. Frequenzweiche

W8.1 Die Funktion einer Frequenzweiche (Passiv)

Die Frequenzweiche wird in Lautsprecherkombinationen mit mehr als einem Chassis benötigt. Sie hat die Aufgabe die Tonfrequenzen in verschiedene Bereiche aufzuteilen. Ziel ist es jedem Chassis den Frequenzbereich zuzuteilen, in dem es optimal arbeitet, bzw. für den es konstruiert ist.

So kann ein Hochtöner kein Tieftonsignal verarbeiten bzw. es kann ihn sogar zerstören. Ein Tieftöner kann aufgrund seiner Masse kein schnell schwingendes Hochtonsignal abstrahlen. Diese zugeteilten Bereiche nennt man Wege, kommt also ein Hochtöner und ein Tieftöner zum Einsatz wird eine 2-Wege Frequenzweiche benötigt. Der erste Weg leitet die hohen Frequenzen zum Hochtöner und lässt die tiefen Frequenzen nicht passieren, diesen nennt man Hochpass. Der zweite Weg leitet die tiefen Frequenzen zum Tieftöner und lässt die hohen Frequenzen nicht passieren, diesen nennt man Tiefpass. Wird noch ein Mitteltöner benötigt muss eine 3-Wege Frequenzweiche aufgebaut werden, der zusätzliche Weg leitet die mittleren Frequenzen zum Mitteltöner. Dieser Weg wird Bandpass genannt er sperrt sehr hohe und sehr tiefe Frequenzen und lässt nur den mittleren Frequenzbereich passieren.

Es gibt jedoch auch Lautsprecherkonstruktionen, die einen Hochtöner und 2 Tieftöner beinhalten. Sollen beide Tieftöner die gleiche Frequenz wiedergeben, so wird ebenfalls eine 2-Wege Frequenzweiche benötigt, diese Kombination nennt man auch 2-Wege Lautsprecher. Hier draus zu erkennen ist, dass sich die Anzahl der Wege nur auf die zuzuteilenden Frequenzbereiche bezieht und nicht auf die Anzahl der Chassis.

Die Frequenzweiche kommt zwischen Verstärker und Lautsprecher zum Einsatz, und besteht aus Bauteilen wie Widerständen, Kondensatoren und Spulen.

Im besten Fall soll nur das Frequenzspektrum aufgeteilt werden, ohne es zu verschlechtern. Allgemein kann gesagt werden, so wenig Bauteile wie möglich und so viele wie nötig. Der Frequenzweiche sollte die nötige Zeit gewidmet werden, da sie das Klangerlebnis besonders prägt. Allerdings kann eine Frequenzweiche den Lautsprecherchassis nur den Weg weisen. Auch die mit den hochwertigsten Bauteilen bestückte Frequenzweiche ist nicht in der Lage einem Chassis einen Frequenzgang zu entlocken, den es nicht wiedergeben kann. Darum müssen die Thiele-Small-Parameter und die Frequenzgänge der Chassis vor der Konstruktion einer Frequenzweiche ermittelt bzw. vorhanden sein.

W8.2 Bauteile für eine Frequenzweiche

Widerstände

Widerstände arbeiten sehr linear das heißt eine Frequenzänderung hat keinen merklichen Einfluss auf den Widerstandswert. Ein Widerstand setzt den im Leiter fließenden Strom wie der Name schon sagt einen elektrischen Widerstand entgegen.

Der Widerstandswert legt die Intensität der Abschwächung des Stromflusses fest. Der Widerstand kann den zurückgehaltenen Strom jedoch nicht verbrauchen sondern nur in Wärme umsetzen, denn Energie kann nicht verbraucht sondern nur umgewandelt werden. Wichtig bei dem Einsatz von Widerständen ist deshalb die notwendige Leistung zu berücksichtigen, um eine übermäßige Erhitzung zu vermeiden. Die Größeneinheit von Widerständen wird in Ohm [Ω] gemessen, das Formelzeichen ist R. Sie werden benötigt, um die einzelnen Chassis in Ihrer Lautstärke zu beeinflussen und anzupassen. Dieses kann durch Reihenschaltung (Abbildung 8.1) zum Chassis geschehen oder durch den Aufbau eines Spannungsteilers (Abbildung 8.2). Ein Reihenwiderstand sollte nur bis zu einer Anpassung von ca. 5dB eingesetzt werden da der sonst der Gesamtwiderstand der Schaltung zu stark steigt.

Ab 5dB ist ein Spannungsteiler am sinnvollsten, da hier der Gesamtwiderstand annähernd gleich bleibt. Im Anhang befindet sich eine Tabelle der Widerstandswerte für eine Dämpfung von 1dB bis 20dB.

Diese beiden Schaltungen werden in der Praxis nur im Hoch- und Mitteltonbereich angewendet, da Widerstände im Tieftonbereich eine zu hohe Leistung umsetzen müssten. Dieses kommt aber nur in den seltensten Fällen vor und dann sollte die geplante Chassisbestückung nochmals überdacht werden.

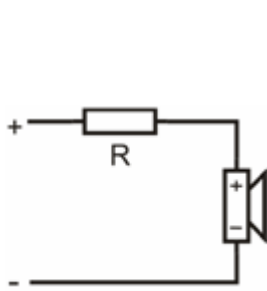


Abbildung 8.1

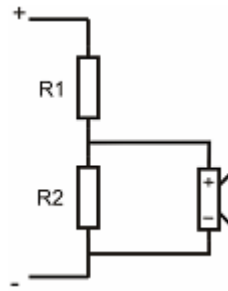


Abbildung 8.2

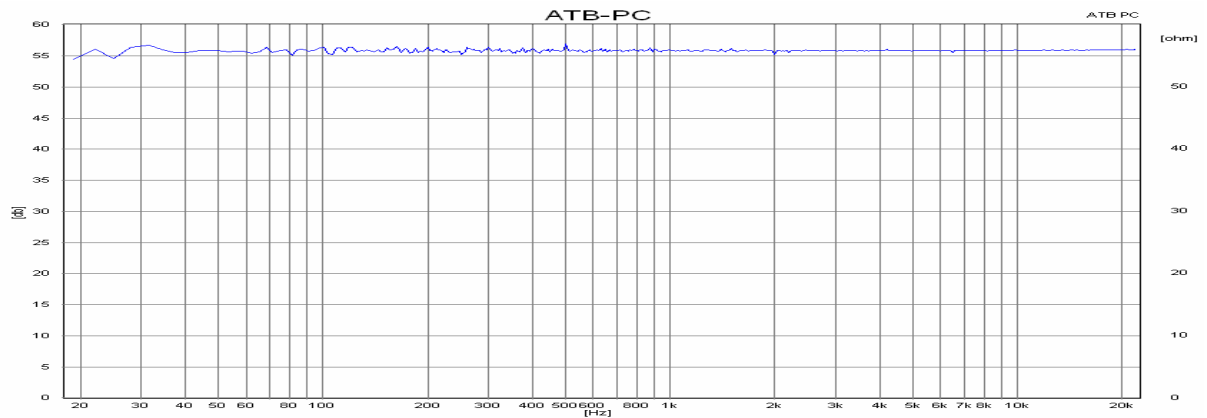


Abbildung 8.3

Die blaue Kennlinie (Abbildung 8.3) zeigt den Widerstandsverlauf eines 56Ω Widerstandes über eine Frequenz von 20Hz bis 20kHz.



Abbildung 8.4

Abbildung 8.4 zeigt den Messaufbau (Schalterstellung Impedanz).

Kondensatoren

Kondensatoren arbeiten nicht linear. Das heißt, eine Frequenzänderung hat einen Einfluss auf den Widerstandwert des Kondensators. Die Funktion eines Kondensators ist nicht so einfach wie die eines Widerstandes. Der Kondensator besteht aus drei Platten, die äußeren sind elektrisch leitfähig, an ihnen befinden sich die Anschlüsse. Die mittlere Platte besteht aus einer Isolierfolie, dem Dielektrikum, das nicht elektrisch leitfähig ist. Es besteht aus Kunststoff, Papier und anderen Materialien. Ziel ist es Ladungsträger auf den gegenüberliegenden Platten unterzubringen, ohne dass ein Strom fließt. Legt man eine Gleichspannung an den Kondensator an, werden Elektronen auf eine Seite der Platten gedrückt, während sie auf der gegenüberliegenden Seite durch die Spannungsquelle abgesaugt werden bis die Platten vollständig geladen sind (Potenzialaufbau). Dieser Vorgang benötigt eine gewisse Zeitdauer. Die Zeit ist zum einen von der Größe der Kapazität sowie von dem Ladestrom abhängig. Nur während des Ladungsvorgangs verhält sich der Kondensator elektrisch leitend, danach stellt er eine Unterbrechung dar.

Ein Musiksignal besteht aus einer Wechsellspannung das bedeutet durch den ständigen Polaritätswechsel finden permanent Lade- und Entladevorgänge statt. Schafft es der Kondensator sich schnell genug zu laden stellt er eine Unterbrechung bzw. einen hohen Widerstand dar. Da mit steigender Frequenz die Dauer der Lade- und Entladevorgänge immer geringer wird, kann sich der Kondensator nicht mehr vollständig aufladen und lässt das Musiksignal ungehindert durch.

Der Widerstandswert eines Kondensators ist für tiefe Frequenzen hoch und für hohe Frequenzen niedrig. Deshalb ist es möglich mit einem Kondensator tiefe und hohe Frequenzen voneinander zu trennen.

Bei Kondensatoren sind zwei Dinge zu beachten:

Die Spannungsfestigkeit muss ausreichend sein. Mit steigender Spannungsfestigkeit nimmt auch die Bauteilgröße zu, da die isolierende Zwischenschicht immer dicker werden muss.

Aufgrund der durchaus hohen Ströme ist der Verlustfaktor zu beachten. Der Verlustfaktor drückt eine nicht optimale Isolierung der zwei Platten voneinander aus hierdurch entsteht ein Ohmscher Widerstand der Wärme erzeugt.

Die Größeneinheit von Kondensatoren wird in Farad [F] gemessen das Formelzeichen ist C. Kondensatoren für den Lautsprecherbau liegen im μF Bereich [$1\mu\text{F} = 1 \times 10^{-6}\text{F}$].

Je größer der Wert des Kondensators je früher sinkt sein Widerstand.

Um dieses zu verdeutlichen, befinden sich 2 Kennlinien in Abbildung 8.5 auf der nächsten Seite.

Die rote Kennlinie zeigt den Widerstandsverlauf eines Kondensators mit $22\mu\text{F}$, die blaue den eines Kondensators mit $8.2\mu\text{F}$ über eine Frequenz von 20Hz bis 20kHz.

Die Kondensatoren wurden parallel zu einen 56Ω Widerstand angeschlossen.

Der Widerstand ist notwendig um die Übersteuerung durch zu hohe Eingangsspannung zu vermeiden, da bei niedrigen Frequenzen der Widerstand der Kondensatoren größer 50Ω wird.

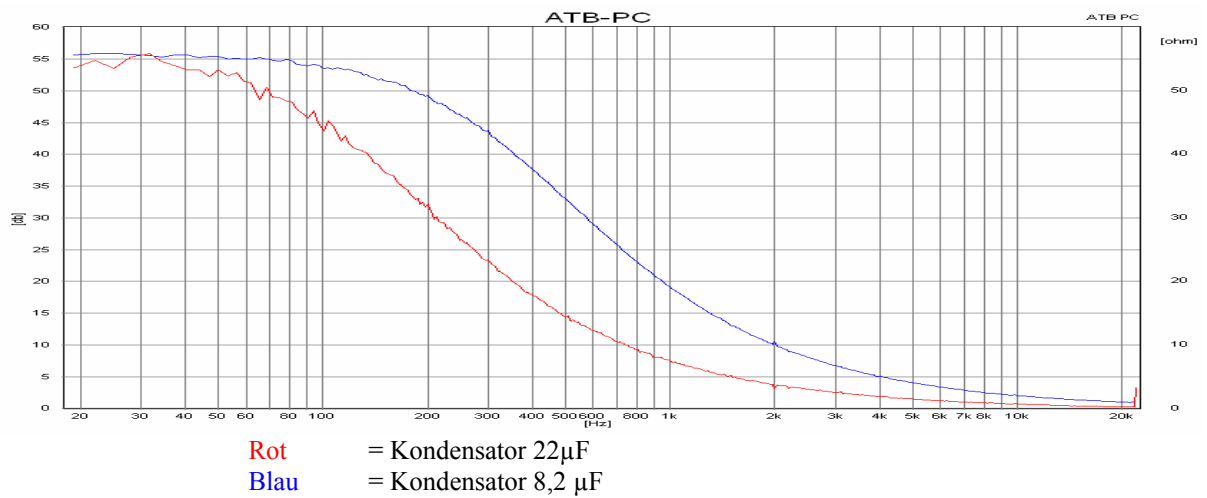


Abbildung 8.5

In den Kennlinien ist zu sehen, dass der Widerstandswert der Kondensatoren mit steigender Frequenz sinkt. Auf der senkrechten Achse rechts lässt sich der Widerstandswert ablesen, die Frequenz auf der waagerechten Achse unten.



Abbildung 8.6

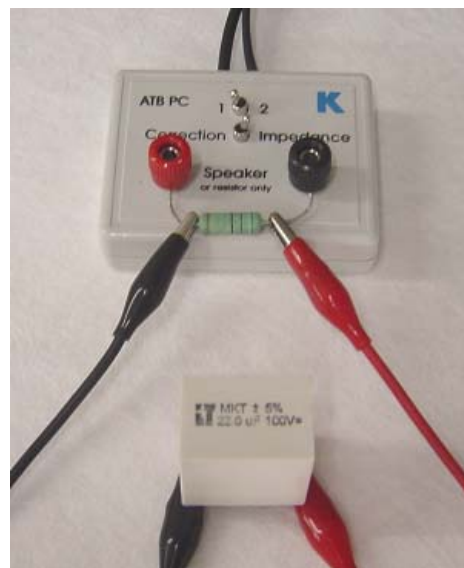


Abbildung 8.7

Abbildung 8.6 zeigt den Messaufbau (Schalterstellung Impedanz) mit 8.2µF, die Abbildung 8.7 den Messaufbau (Schalterstellung Impedanz) mit 22µF.

Spulen

Spulen verhalten sich genau entgegengesetzt wie Kondensatoren. Auch bei Spulen ist die Funktionsweise etwas komplizierter, eine Spule besteht aus einem langen aufgewickelten isolierten Draht. Legt man eine Gleichspannung an die Spule an, baut sie ein Magnetfeld mit Nord und Südpol auf vergleichbar mit einem Elektromagneten.

Wird eine Wechselspannung bzw. ein Musiksignal angelegt, wechselt die Polarität und das aufgebaute Magnetfeld ständig. Durch den ständigen Polaritätswechsel des Magnetfeldes wird eine Spannung in der Spule induziert, die der angelegten Spannung entgegenwirkt. Die Gegenwirkung wird mit steigender Frequenz immer stärker. Der Widerstandswert einer Spule ist für tiefe Frequenzen niedrig und für hohe Frequenzen hoch.

Aus diesem Grund bieten Sie ebenfalls die Möglichkeit tiefe und hohe Frequenzen voneinander zu trennen. Die Größeneinheit von Spulen wird in Henry [H] gemessen.

Spulen für den Lautsprecherbau liegen im mH Bereich [$1\text{mH} = 1 \times 10^{-3}\text{H}$].

Je größer der Wert der Spule ist, je früher steigt ihr Widerstand.

Um dieses zu verdeutlichen befinden sich 2 Kennlinien in Abbildung 8.8. die rote Kennlinie zeigt den Widerstandsverlauf einer Spule mit 2,2mH, die blaue den einer Spule mit 1,8mH über eine Frequenz von 20Hz bis 20kHz.

Die Spulen wurden ebenfalls parallel zu einen 56Ω Widerstand angeschlossen.

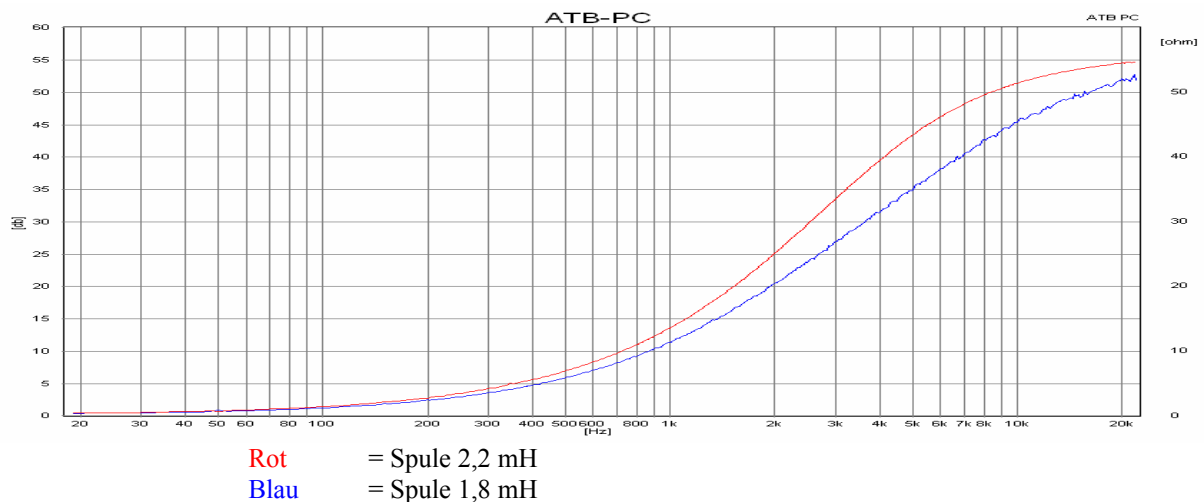


Abbildung 8.8

In den Kennlinien ist zu sehen, dass der Widerstandswert der Spulen mit steigender Frequenz steigt. Auf der senkrechten Achse rechts lässt sich der Widerstandswert ablesen, die Frequenz auf der wagerechten Achse unten.

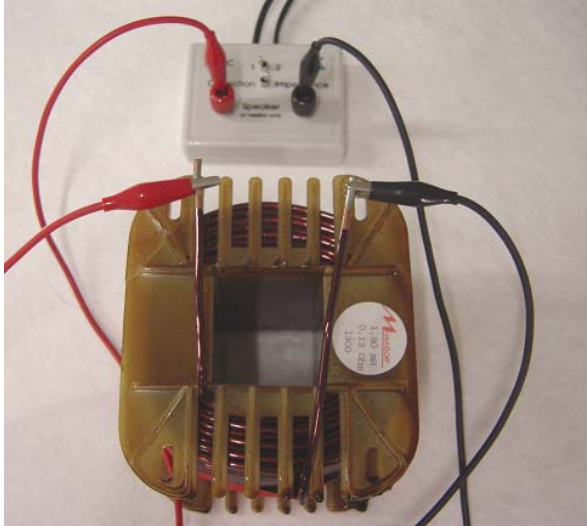


Abbildung 8.9

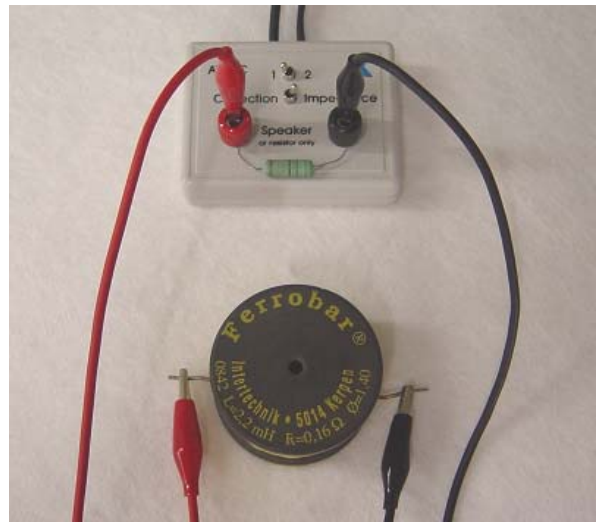


Abbildung 8.10

Abbildung 8.9 zeigt den Messaufbau (Schalterstellung Impedanz) mit 1,8mH
Abbildung 8.10 zeigt den Messaufbau (Schalterstellung Impedanz) mit 2,2mH

W8.2 Frequenzweichen 1. und 2. Ordnung

Um es nicht zu kompliziert zu machen, werden im folgenden Kapitel nur Frequenzweichen erster (6dB) und zweiter (12dB) Ordnung nach Butterworth betrachtet.

Frequenzweiche 1. Ordnung

Eine Frequenzweiche 1. Ordnung kommt mit nur einem Bauteil in jedem Zweig aus. Sie zeigt das günstigste Phasenverhalten. Abbildung 8.13 auf der übernächsten Seite zeigt die Schaltung und die Berechnung der Bauteile.

Die Flankensteilheit beträgt 6dB pro Oktave, das bedeutet bei jeder Frequenzverdoppelung verändert sich die Spannung am Lautsprecher um 6dB.

Die Trennfrequenz oder auch Grenzfrequenz des Passes genannt, liegt da, wo die Spannung um 3dB gefallen ist, oder in Zahlen ausgedrückt auf 70,7% des Eingangssignals (Abbildung 8.11). Abbildung 8.12 zeigt das Durchlassverhalten eines 6 dB Hoch – und Tiefpasses.

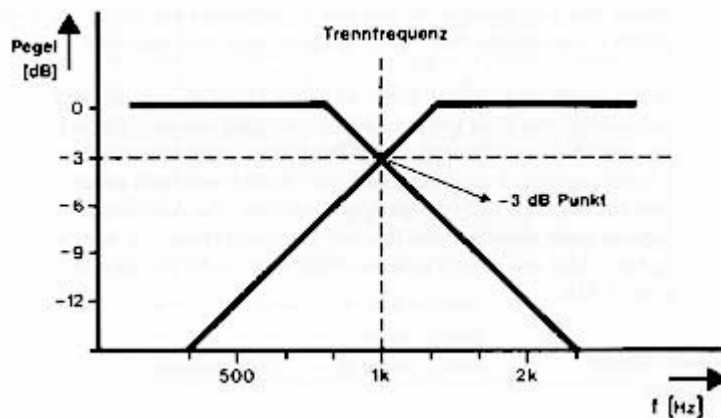


Abbildung 8.11

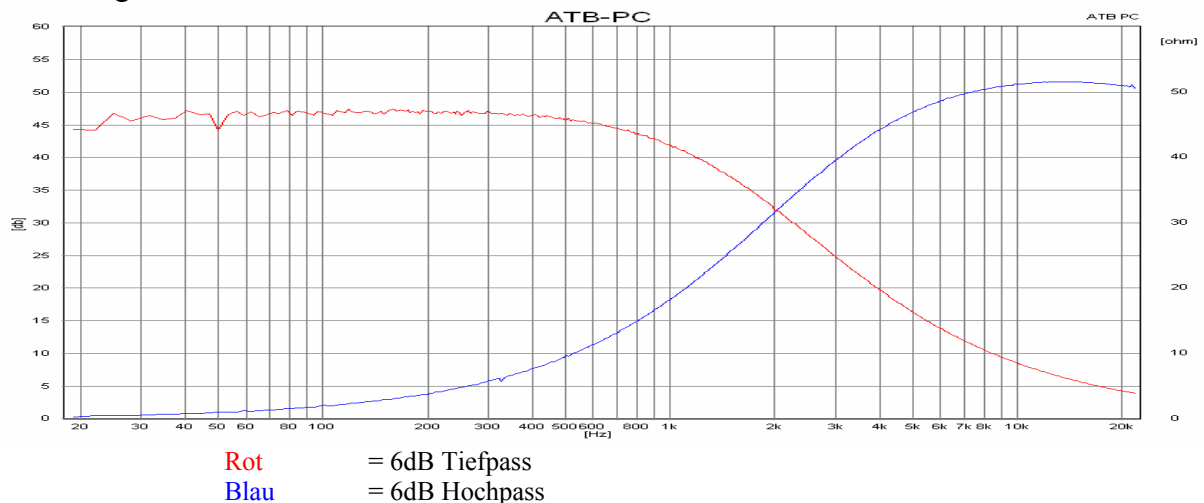


Abbildung 8.12

Es wird nur der Anteil der Spannung zum Chassis durchgelassen, der sich unterhalb der Kennlinien befindet.

Der Bereich unter der roten Kennlinie (Tiefpass) wird mit steigender Frequenz immer kleiner, das bedeutet, dem Tieftonchassis wird mit steigender Frequenz weniger Spannung zugeführt, es wird also bei hohen Frequenzen leiser.

Der Bereich unter der blauen Kennlinie (Hochpass) wird mit sinkender Frequenz kleiner. Das bedeutet, dem Hochtonchassis wird mit sinkender Frequenz weniger Spannung zugeführt, es wird also bei hohen tiefen Frequenzen leiser.

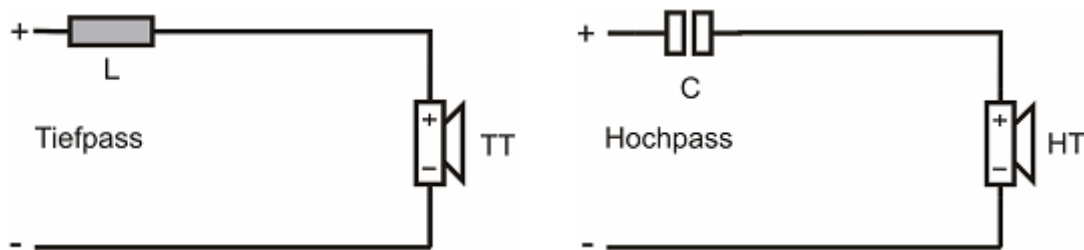


Abbildung 8.13

Berechnung:

Benötigte Werte:

- L = Induktivität (Spule)
- C = Kapazität (Kondensator)
- Z = Scheinwiderstand
- π = Kreiszahl Pi (3.14)
- f_G = Grenzfrequenz

Formeln:
$$L = \frac{Z}{2 \cdot \pi \cdot f_G} \qquad C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot Z \cdot f_G}$$

Im Anhang befindet sich eine Tabelle mit den zu verwendenden Bauteilen für Trennfrequenzen von 50Hz bis 20kHz.

Eine Beispielberechnung befindet sich im Kapitel „Die Frequenzweiche der Nugget, Stationen der Entwicklung“.

Frequenzweiche 2. Ordnung

Eine Frequenzweiche 2. Ordnung benötigt 2 Bauteile in jedem Zweig. Die nächste Seite zeigt die Schaltung und die Berechnung.

Die Flankensteilheit beträgt 12dB pro Oktave, das bedeutet bei jeder Frequenzverdoppelung verändert sich die Spannung am Lautsprecher um 12dB. Die Grenzfrequenz liegt da, wo die Spannung um 3dB gefallen ist, oder in Zahlen ausgedrückt bei 70,7 % des Eingangssignals.

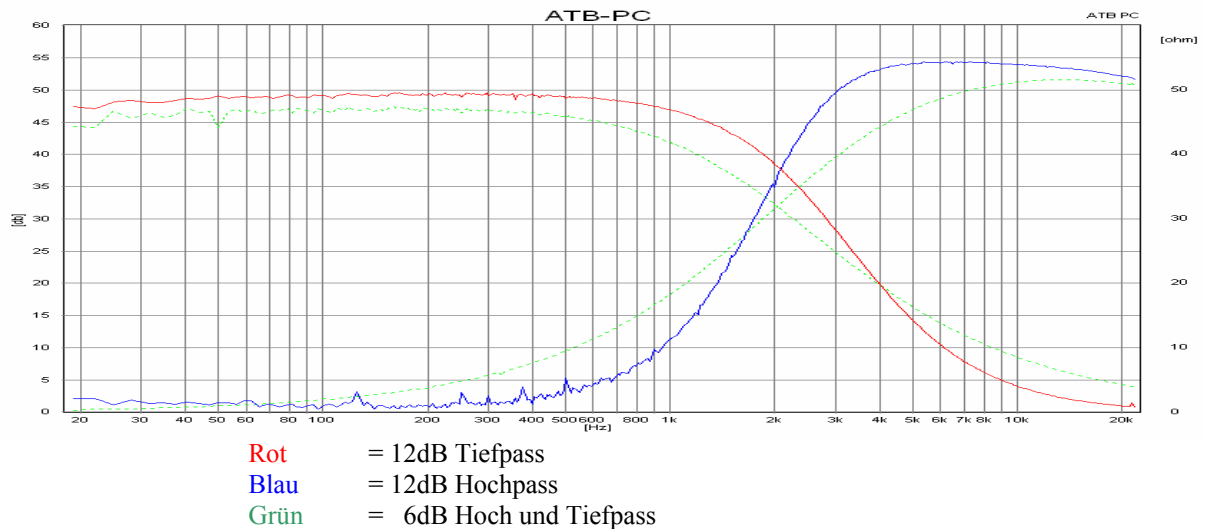


Abbildung 8.14

Abbildung 8.14 zeigt das Durchlassverhalten eines 12dB Hoch – und Tiefpass. Auch hier wird nur der Anteil der Spannung zum Chassis durchgelassen, der sich unterhalb der Kennlinien befindet, vergleichbar mit der Funktion einer 6dB Weiche, die zur besseren Verständlichkeit hier noch mal in grün dargestellt wird.

Wie den Kennlinien zu entnehmen, verläuft die Abschwächung der Spannung bei der 12dB Weiche wesentlich steiler.

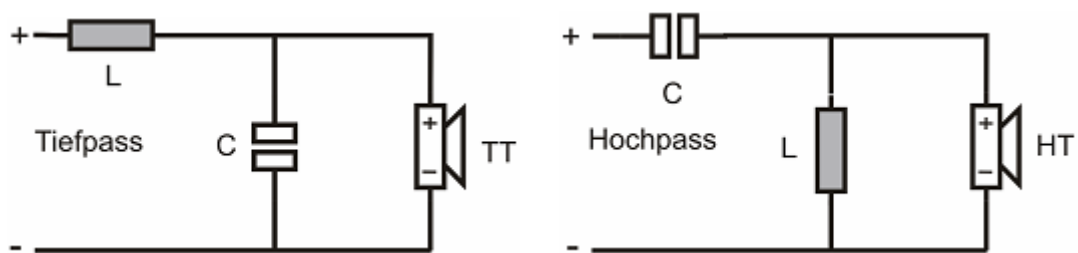


Abbildung 8.15

Berechnung:

Benötigte Werte:

- L = Induktivität (Spule)
- C = Kapazität (Kondensator)
- Z = Scheinwiderstand
- π = Kreiszahl Pi (3.14)
- f_G = Grenzfrequenz

Formeln:
$$L = \frac{\sqrt{2} \cdot Z}{2 \cdot \pi \cdot f_G} \quad C = \frac{\sqrt{2}}{4 \cdot \pi \cdot f_G \cdot Z}$$

Im Anhang befindet sich eine Tabelle mit den zu verwendenden Bauteilen für Trennfrequenzen von 50Hz bis 20kHz.

Sperrkreis, Saugkreis und Impedanzkorrektur

Sperrkreis

Ziel ist es mit der Schaltung Frequenzgangüberhöhungen zu glätten, indem selektiv mit dem Filter der betreffende Bereich gesperrt wird. Allerdings steigt somit auch die Gesamtimpedanz der Schaltung. Bei diesem Eingriff ist der Verlauf der Flanke nicht so steil wie bei einem Saugkreis.

Funktion:

Der Sperrkreis besteht aus einer Parallelschaltung von Spule, Kondensator und Widerstand in Reihe zum Chassis Abbildung 8.17 auf der übernächsten Seite.

In Kapitel W8.2 Bauteile von Frequenzweichen ist die Funktion der einzelnen Bauteile beschrieben worden. Der Kondensator stellt dem Stromfluss bei tiefen Frequenzen einen hohen Widerstand da, der Strom sucht sich also den Weg über die Spule, die bei tiefen Frequenzen einen kleinen Widerstand hat. Bei hohen Frequenzen funktioniert dieses genau entgegengesetzt, nun hat die Spule einen hohen Widerstand und der Strom sucht sich den Weg über den Kondensator, der nun einen kleinen Widerstand hat. Der Bereich, in dem der Kondensator den vom Betrag her gleichen Widerstandswert wie die Spule besitzt, nennt man Resonanzfrequenz.

Hier heben sich beide Widerstandswerte auf. Der Schwingkreis hat im Resonanzfall einen Widerstand, der gegen 0 Ohm geht. Aus diesem Grund ist ein Parallelwiderstand notwendig um den Schwingkreis zu begrenzen.

Zwischen diesen Bereichen kann nun bei der gewünschten Frequenz eingegriffen werden, die Intensität des Eingriffes legt der Widerstand R fest.

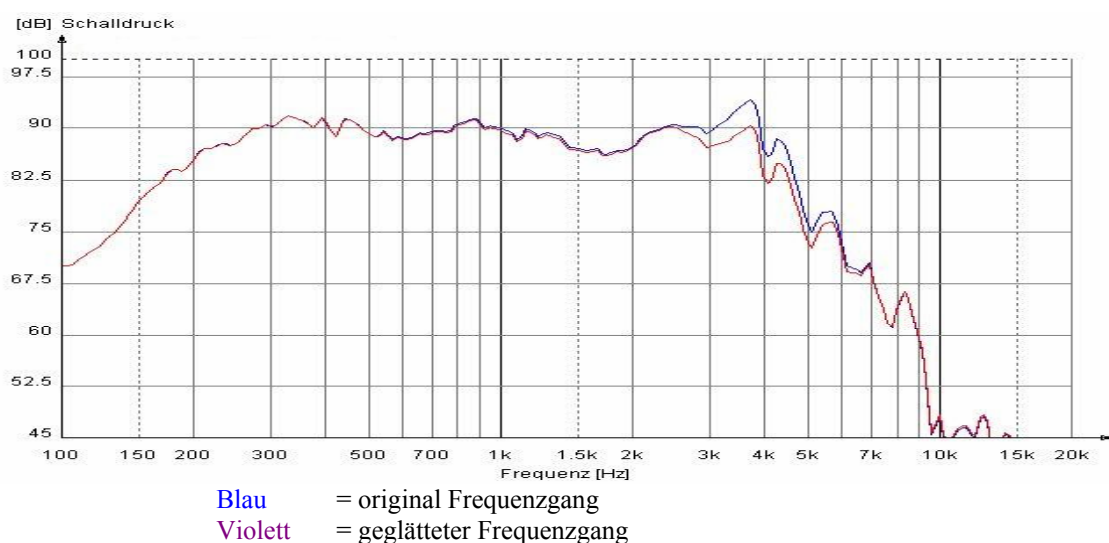


Abbildung 8.16

Abbildung 8.16 zeigt die Wirkungsweise des Sperrkreises. Die blaue Kennlinie zeigt den original Frequenzgang, der bei ca. 3,7kHz eine Überhöhung besitzt. Durch den Einsatz des Sperrkreises wird diese Überhöhung geglättet, den Verlauf zeigt die rote Kennlinie.

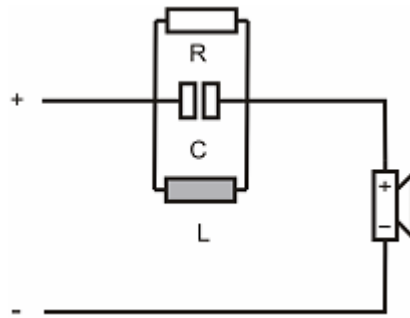


Abbildung 8.17

Berechnung:

Benötigte Werte:

L = Induktivität (Spule)

C = Kapazität (Kondensator)

R = Widerstand

Z = Scheinwiderstand des Chassis (in der Regel 8 bzw. 40Ω)

f_r = Resonanzfrequenz (mittlerer Frequenzbereich der Überhöhung Bsp. Abbildung 8.16 ca. 3,7kHz)

f_1 = oberer Grenze der Überhöhung

f_2 = untere Grenze der Überhöhung

B = Bandbreite der Frequenzüberhöhung (hohe Frequenz – niedrige Frequenz)
(Bsp. Abbildung 8.16 ca. 1000Hz)

Formeln:

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot Z \cdot f_2} \quad L = \frac{Z}{2 \cdot \pi \cdot f_1} \quad B = f_1 - f_2 \quad R = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C \cdot B} \quad f_r = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$$

Die Berechnung gelingt meist nur in Annäherung und muss, ausgehend von den berechneten Werten, angepasst werden.

Saugkreis

Saugkreise sind besonders zur Kompensation von Membranresonanzen im oberen Mitteltonbereich geeignet. Da sie den elektrischen Strom nach Masse ableiten, ist ihre Bauteilqualität unkritischer zu sehen als bei Sperrkreisen. Der Saugkreis hat grundsätzlich gesehen die gleiche Funktion wie der Sperrkreis, allerdings ist der Eingriff steilflankiger und verkleinert die Gesamtimpedanz der Schaltung siehe auch Impedanzkorrektur.

Der Einsatz eines Saugkreises macht es möglich, auch ganz auf die Impedanzkorrektur zu verzichten, da er im günstigsten Fall dessen Aufgabe gleich miterledigt. Was allerdings nicht immer zufriedenstellend gelingt. In diesem Fall kann noch eine Impedanzkorrektur parallel zum Saugkreis geschaltet werden.

Der Saugkreis besteht aus einer Reihenschaltung von Spule, Kondensator und Widerstand der parallel zum Chassis liegt Abbildung 8.18 auf der nächsten Seite. Der Bereich, in dem der Kondensator den vom Betrag her gleichen Widerstandswert wie die Spule besitzt, nennt man Resonanzfrequenz.

Hier heben sich beide Widerstandswerte auf. Der Saugkreis hat im Resonanzfall einen Widerstand, der gegen 0 Ohm geht. Aus diesem Grund ist ein Reihenwiderstand notwendig um den Schwingkreis zu begrenzen.

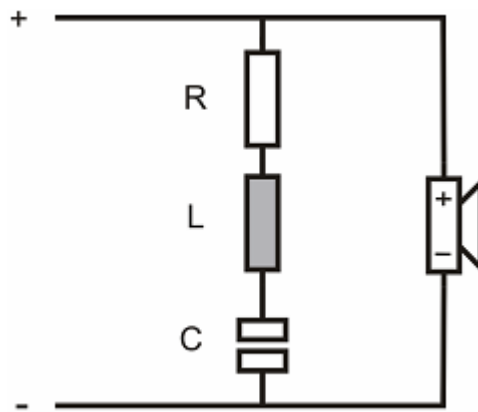


Abbildung 8.18

Berechnung:

Benötigte Werte:

L = Induktivität (Spule)

C = Kapazität (Kondensator)

R = Widerstand

Z = Scheinwiderstand des Chassis (in der Regel 8 bzw. 4 Ohm)

f_r = Resonanzfrequenz (mittlerer Frequenzbereich der Überhöhung)

f_1 = oberer Grenze der Überhöhung

f_2 = untere Grenze der Überhöhung

B = Bandbreite der Frequenzüberhöhung (hohe Frequenz – niedrige Frequenz)

Formeln:

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot Z \cdot f_2} \quad L = \frac{Z}{2 \cdot \pi \cdot f_1} \quad B = f_1 - f_2 \quad R = \frac{B}{2 \cdot \pi \cdot f_r^2 \cdot C} \quad f_r = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$$

Die Berechnung gelingt meist nur in Annäherung und muss, ausgehend von den berechneten Werten, angepasst werden.

Achtung: Der Saugkreis soll wie angesprochen nur die Membranresonanzen im oberen Mitteltonbereich kompensieren. Daher ist die Bandbreite B nicht so leicht aus dem gemessenen Frequenzgang zu ermitteln. Ein Saugkreis funktioniert aber nur richtig, wenn die zur Berechnung herangezogene Bandbreite B auch der Bandbreite des mechanischen Resonanzbereichs der Membrane gleicht. Diese ist aber, wenn überhaupt nur sehr schwer zu ermitteln. Die Bandbreite B ist allerdings wichtig für die Berechnung des Widerstandes R, in der Praxis wird hier eine Abstimmung nach gehör durchgeführt.

Für eine erste Näherung an den Reihenwiderstand R hat sich ein Widerstandswert von 4,7 Ohm bei einem 8 Ohm Chassis und 2,2 Ohm für ein 4 Ohm Chassis bewährt (13cm Chassisdurchmesser). Eine Beispielberechnung befindet sich im *Kapitel W8.6 Die Frequenzweiche der Nugget (Entwicklung)*.

Impedanzkorrektur

Eine Frequenzweiche funktioniert nur dann korrekt, wenn die Anschlussimpedanz der Frequenzweiche dem Wert entspricht der bei der Berechnung zugrunde gelegt wurde in den meisten Fällen liegt dieser Wert bei 4 Ohm bzw. 8 Ohm.

Die Impedanz eines Lautsprecherchassis steigt aber aufgrund seiner Schwingspuleninduktivität zu hohen Frequenzen an. Die Impedanzkorrekturschaltung gleicht

den Impedanzanstieg aus und besteht aus der Reihenschaltung eines Kondensators und einem Widerstand parallel zum Chassis, Abbildung und Berechnung der Schaltung (Abbildung 16.5) auf der nächsten Seite.

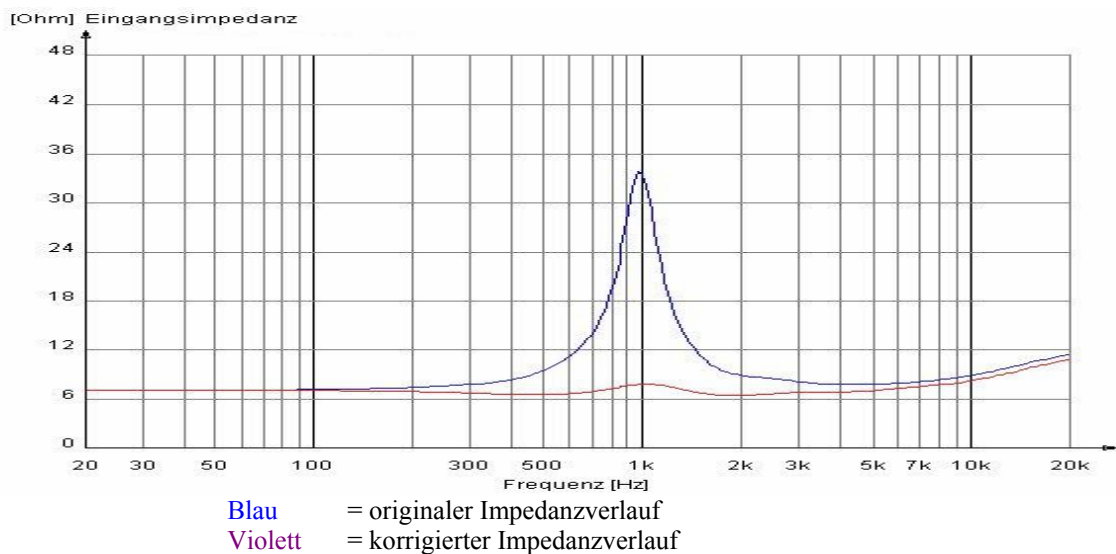


Abbildung 8.19

Abbildung 8.19 zeigt die Wirkungsweise der Impedanzkorrektur. Die blaue Kennlinie zeigt den originalen Impedanzverlauf, der bei ca. 1kHz eine Überhöhung besitzt. Durch den Einsatz der Impedanzkorrektur wird diese Überhöhung geglättet, den Verlauf zeigt die rote Kennlinie.

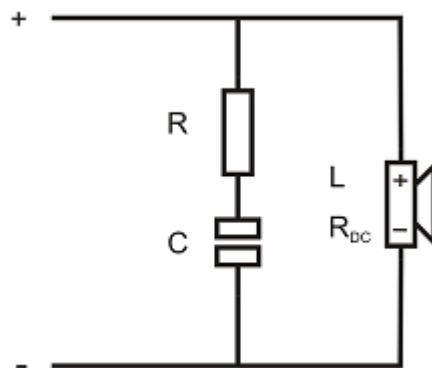


Abbildung 8.20

Berechnung:

Benötigte Werte:

L = Induktivität des Chassis (Herstellerangabe)

C = Kapazität (Kondensator)

R_{DC} = Gleichstromwiderstand des Chassis (Herstellerangabe)

R = Widerstand

Formeln: $R = R_{DC} + R_{DC} \cdot 0,5$ $C = \frac{L}{R^2}$

Die Berechnung gelingt meist nur in Annäherung und muss, ausgehend von den berechneten Werten, angepasst werden.

W8.3 Laufzeit, akustische Phase

Ein Lautsprecherchassis ist ein schwingendes System, das aus Federn und Massen besteht. Dieses System wird permanent beschleunigt und abgebremst. Da ein Tieftöner eine andere Masse besitzt wie ein Hochtöner sind auch ihre Laufzeiten unterschiedlich, das äußert sich darin, dass die von den beiden Lautsprecherchassis abgestrahlten Töne nicht gleichzeitig am menschlichen Ohr ankommen. Dieses führt in der Regel zu einem unsaubereren Klangbild und im schlimmsten Fall können sich sogar Frequenzen auslöschen. Anders ausgedrückt die Lautsprecherchassis laufen nicht in Phase zu einander.

Die Phase kann durch Umpolen des Hochtöners bzw. durch die Berücksichtigung der Phasenlage bei der Gehäusekonstruktion wesentlich verbessert werden.

Abbildung 8.21 zeigt den Frequenzgang und die Phasenlage des Hoch- und Tieftöners der Nugget. Zur Veranschaulichung wurde der Hochtöner einmal richtig und einmal falsch gepolt.

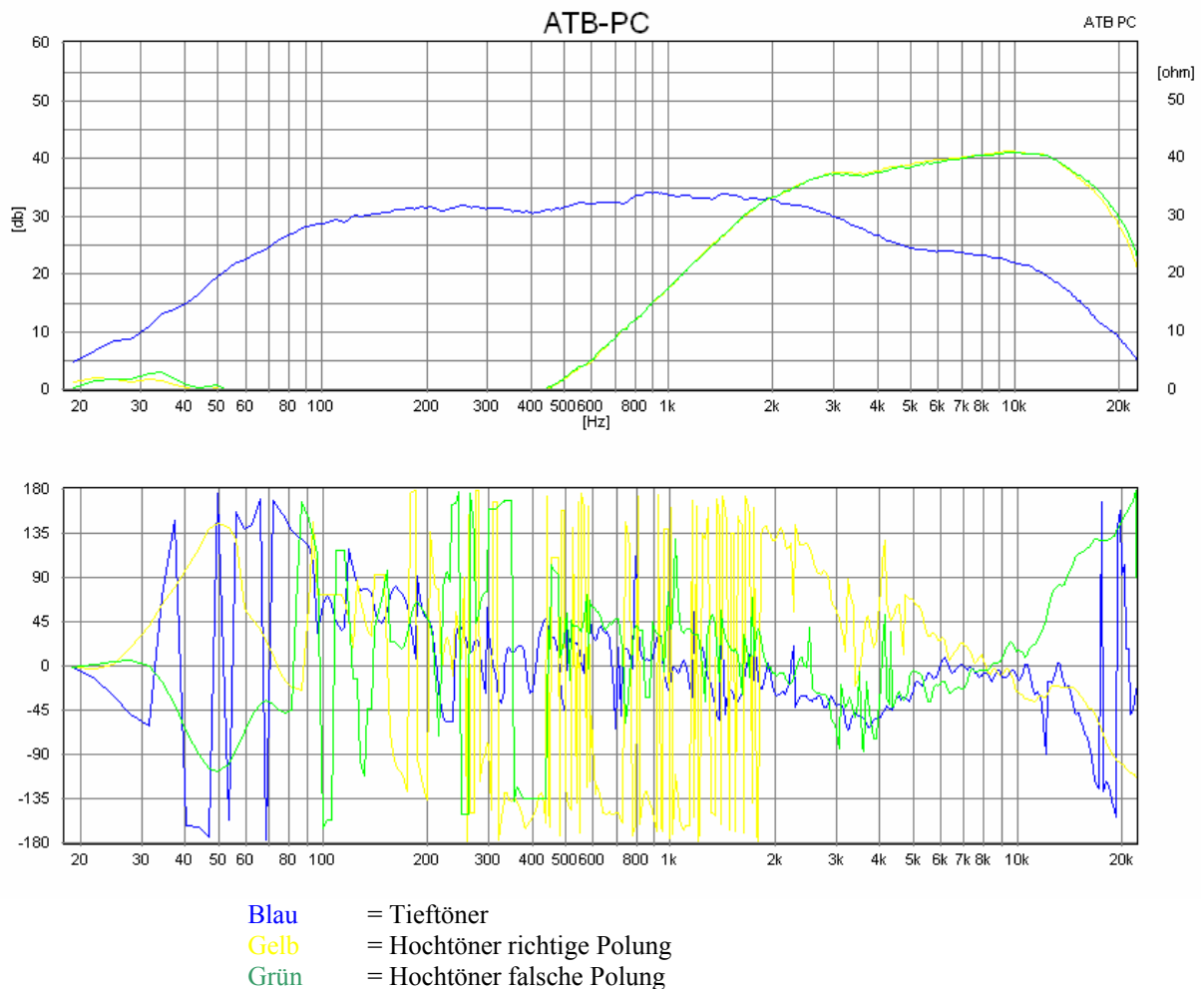


Abbildung 8.21

Sehr gut zu erkennen ist, dass die gelbe Kennlinie im unteren Diagramm nicht in Phase mit dem Tieftöner (blaue Kennlinie im unteren Diagramm) liegt.

Wichtig: Das Messsystem ist nur bei einem messbaren Signal in der Lage die Phasenlage zu bestimmen. Wenn kein Signal gemessen wird, liegt auch keine definierte Phasenlage vor, die dann angezeigte Phasenlage ist nicht brauchbar. Als Beispiel kann die gelbe Kennlinie im unteren Diagramm in dem Bereich 0 Hz bis 2 kHz gesehen werden.

Durch Umpolung des Hochtöners wird ein wesentlich besseres Resultat erzielt (grüne Kennlinie im unteren Diagramm). Eine weitere wichtige Erkenntnis lässt sich aus dem Diagramm ablesen. Der Frequenzgang des Hochtöners ändert sich durch das Umpolen nicht. Das bedeutet, dass ein linear verlaufender Frequenzgang eines Lautsprechers noch kein Garant für einen guten Klang. Denn nur Chassiskombinationen, die in Phase spielen, bieten ein Maximum an Klarheit, Echtheit und Durchhörbarkeit. Dies spiegelt sich in der Wiedergabe kleinster Nuancen wieder. Da das abgestrahlte Frequenzspektrum von Hoch- und Tieftöner zur gleichen Zeit wahrgenommen wird.

W8.4 Elektrische Phase

Während sich die akustische Phase auf die reine Laufzeit der abgegebenen Töne bezieht und mittels Messmikrofon aufgenommen wird, handelt es sich bei der elektrischen Phase um rein elektrisch messbare Werte.

Frequenzabhängige Bauteile haben einen frequenzabhängigen Widerstand, die Impedanz. Die Impedanz besteht aus Amplitude und Phase.

Einfacher gesagt, beim Anlegen einer Spannung fließt nur beim Widerstand zeitgleich auch ein Strom. Bei Spule und Kondensator ist hier eine zeitliche Differenz.

Abbildung 8.22 zeigt den Impedanz- und Phasenverlauf von Widerstand, Kondensator und Spule.

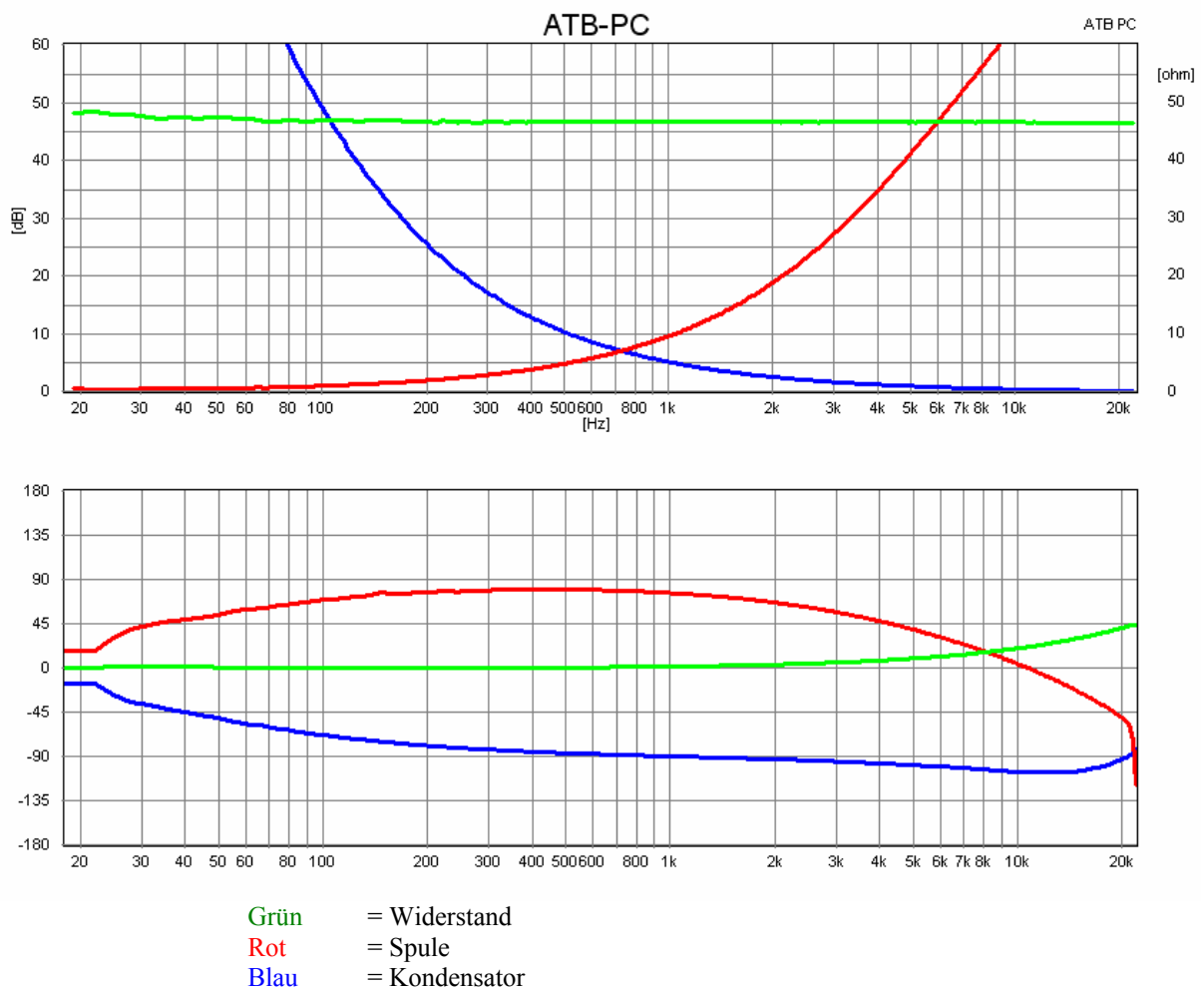


Abbildung 8.22

Zu erkennen ist, dass der Widerstand wie im Kapitel W8.2 erklärt, frequenzunabhängig ist. Es gibt also keine zeitliche Verzögerung zwischen Spannung und Stromfluss. Die Abbildung 8.22 zeigt die Impedanzmessung, den frequenzabhängigen Widerstand, von Kondensator und Spule. Bei der Messung wird die Spannung über den Bauteilen gemessen. Daher bezieht sich der Phasenwinkel auf die Spannung. Die rote Kennlinie der Spule zeigt die nahezu schulmäßigen $+90^\circ$ (Grad) Phasenverschiebung. Die Spannung eilt dem Strom vor. Dies kann auch als der Strom eilt der Spannung nach betrachtet werden. Auch der Verlauf des Kondensators blaue Kennlinie zeigt die -90° (Grad) Phasenverschiebung, jedoch ist die Spannung hier nacheilend oder der Strom voreilend.

Bei der Messung wird nur der mittlere Frequenzbereich richtig gezeigt. Für die niedrigen und hohen Frequenzen ist entweder durch den geringen Widerstand der Bauteile die gemessene Spannung zu klein oder der Widerstand der Bauteile ist so hoch, dass der Messbereich überschritten wird.

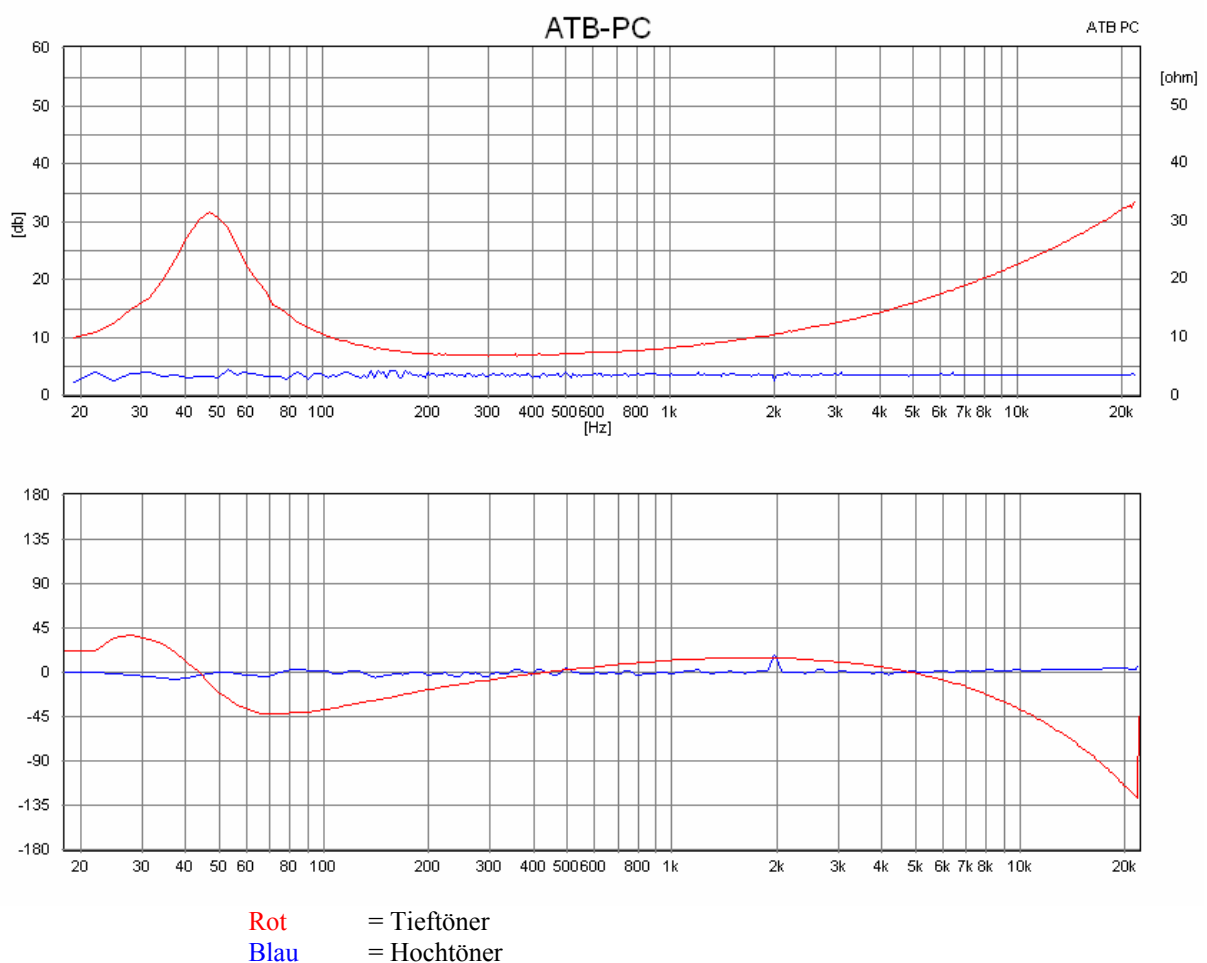


Abbildung 8.23

Abbildung 8.23 zeigt den Impedanz- und Phasenverlauf von Hoch und Tieftöner. Wie die blaue Kennlinie zeigt, verhält sich der Hochtöner sehr frequenzunabhängig, das ist allerdings nicht immer so. Die rote Kennlinie zeigt den von einem Tieftöner zu erwartenden Impedanz- und Phasenverlauf. Dort wo die Impedanzhöhung im oberen Diagramm zu sehen ist, befindet sich im unteren Diagramm ein Phasensprung diese Stelle ist die Resonanzfrequenz des Tieftöners, sie liegt bei ca. 45Hz.

Um die Impedanzhöhung ab ca.: 2kHz auszugleichen kann eine Impedanzkorrekturschaltung eingesetzt werden, siehe Kapitel W8.2.

W8.5 Dynamic-Measurement

In den vorherigen Kapiteln wurden der Frequenzgang und die Phase betrachtet.

Um das zeitliche Verhalten einer Übertragungsstrecke zu zeigen, wurde für die Forschung das Dynamic-Measurement Programm entwickelt. Das Programm läuft auf dem ATB precision Messsystem. Die Soundkarten haben nicht die zeitliche Auflösung für die Messung.

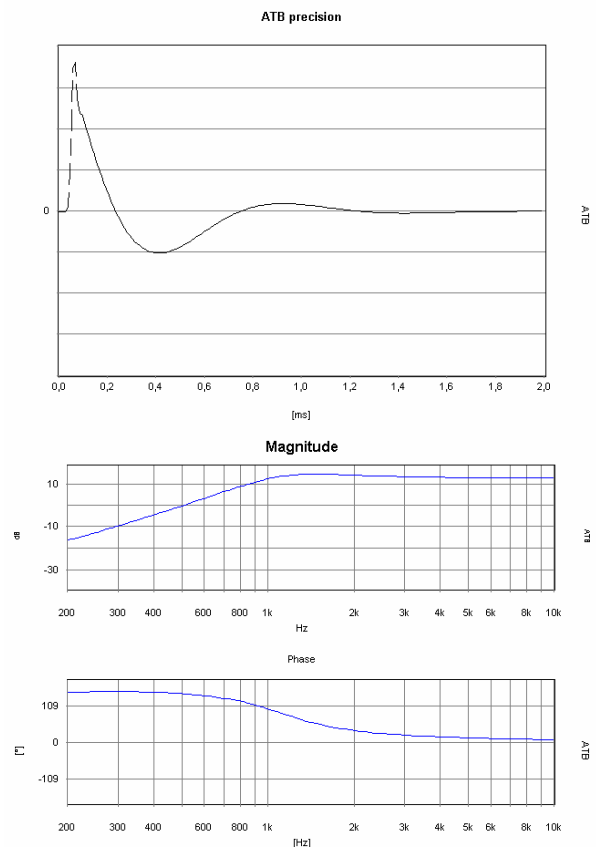
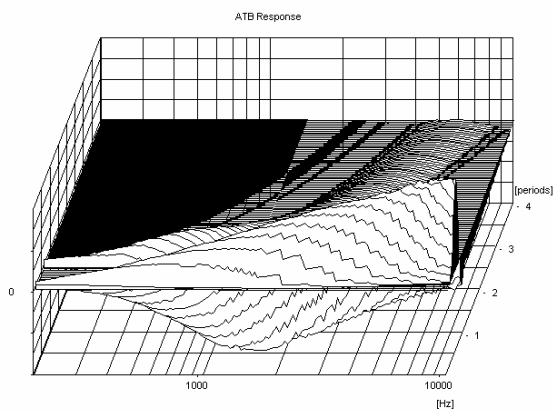
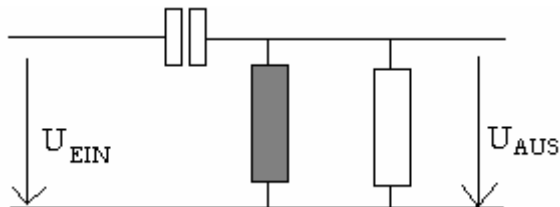
Das zeitliche Verhalten zeigt sich am Besten in der Sprungantwort. Die Sprungantwort zeigt die Amplitude und Phase eindeutig. In der normalen Sprungantwort sind aber keine Frequenzen zu erkennen. Deshalb wird im Dynamic-Measurement Programm durch eine 3D Darstellung die Sprungantwort mit Frequenzen gezeigt. Die Darstellung besteht aus der y-Achse für die Amplitude, der x-Achse für die Frequenzen und der z-Achse für die Zeit. Weitere Informationen sind unter

www.dynamic-measurement.de

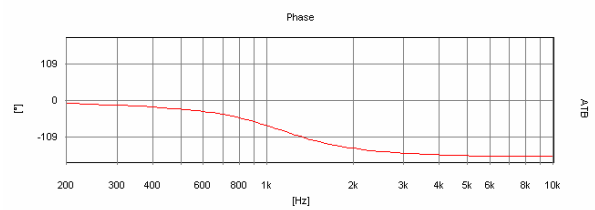
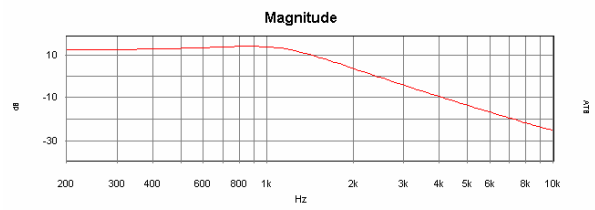
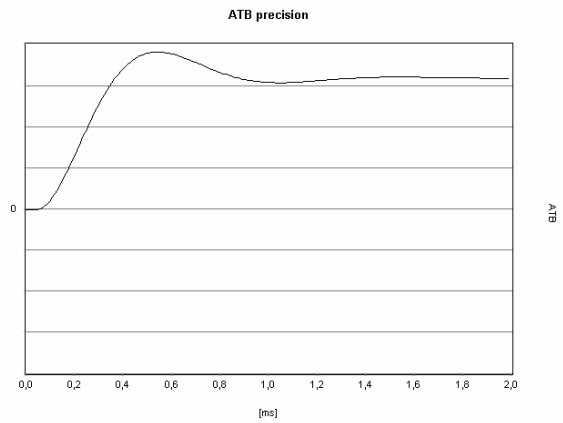
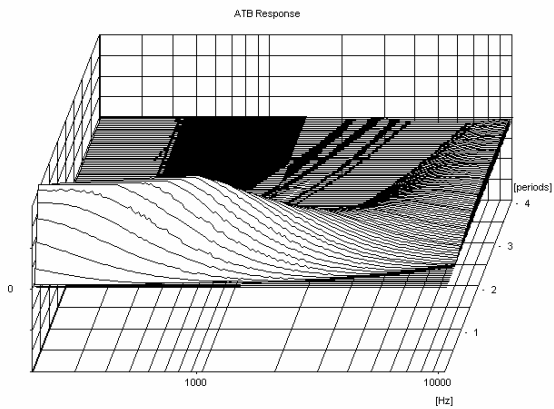
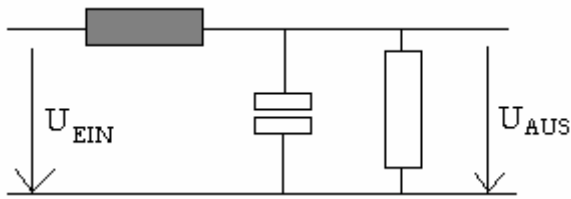
zu erhalten.

Mit dem Programm werden der Frequenzgang, die Phase, die Sprungantwort und die Dynamic-Measurement Darstellung der vorher beschriebenen Schaltungen gezeigt.

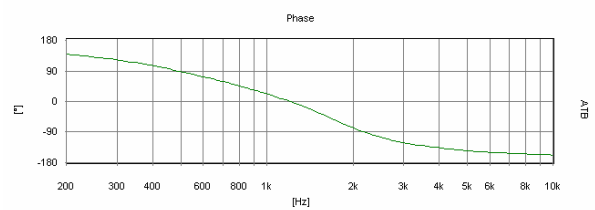
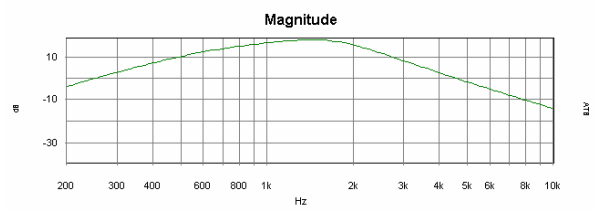
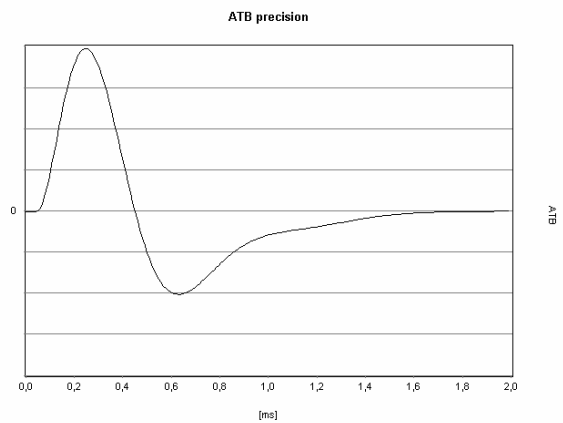
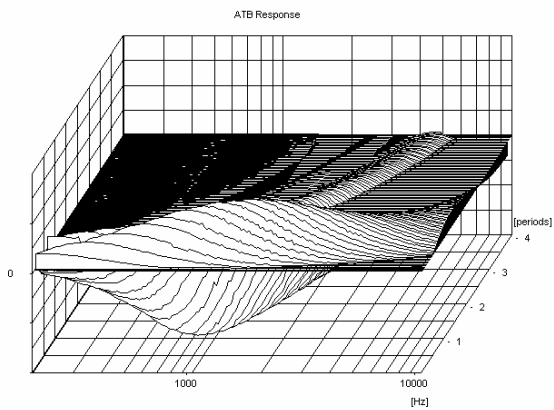
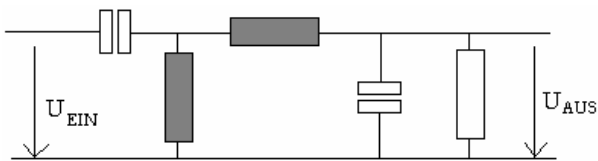
12 dB / Oktave Hochpass



12 dB / Oktave Tiefpass



12dB / Oktave Bandpass



Das Dynamic-Measurement Programm ist auch für akustische Messungen von großer Bedeutung, besonders bei der Entwicklung zeitrichtiger Lautsprecher.

W8.6 Die Frequenzweiche der Nugget (Entwicklung)

Der Lautsprecher wurde gemäß der Gehäuseberechnung aufgebaut, die Chassis wurden mit langen Kabeln im Gehäuse montiert. Ziel ist es eine Frequenzweiche 1. Ordnung zu konstruieren, um den besten Phasenverlauf zu realisieren. Die Position des Hochtöners im Gehäuse wurde im Vorfeld bei der Gehäusekonstruktion mittels „Rosa Rauschen“ ermittelt. Alle Messungen wurden mit 2,83 Volt (1 Watt) durchgeführt, der Abstand des Messmikrofons betrug 1 Meter. Abbildung 8.24. Der absolute dB Wert stimmt nicht, da die Mikrofonempfindlichkeit nicht eingestellt wurde.

Als Messort wurde eine alte Garage verwendet, um zu zeigen, dass kein besonderer Messraum benötigt wird, um Messungen mit ATB PC Pro durchzuführen. Den Messaufbau zeigt Abbildung 8.25.

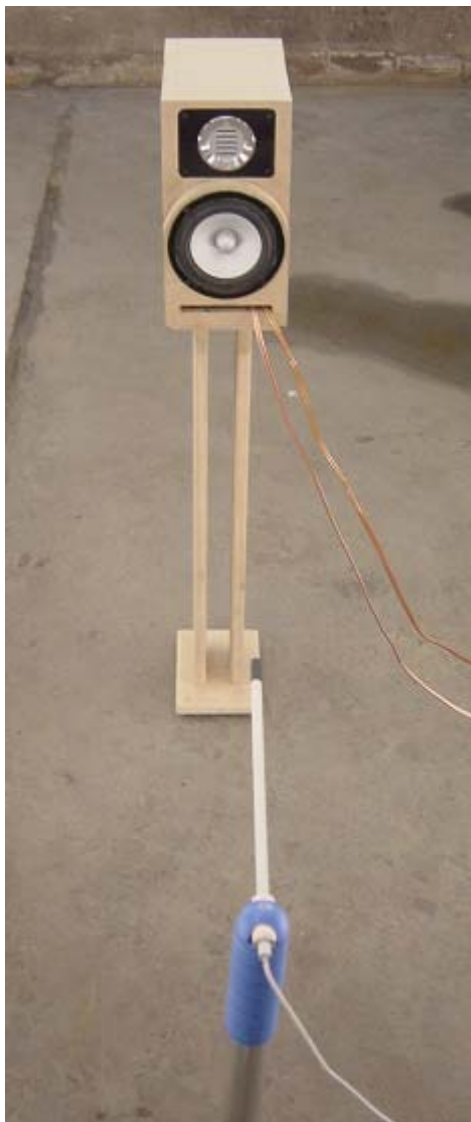


Abbildung 8.24



Abbildung 8.25

Abbildung 8.26 zeigt den Frequenzgang und die Phase des Hochtöners. Das Chassis wurde ohne Frequenzweichenbauteile angeschlossen.

Achtung: Bei Nachahmung dieser Messung ist zum Schutz des Hochtönerchassis mit der kleinstmöglichen Lautstärke zu beginnen!!!

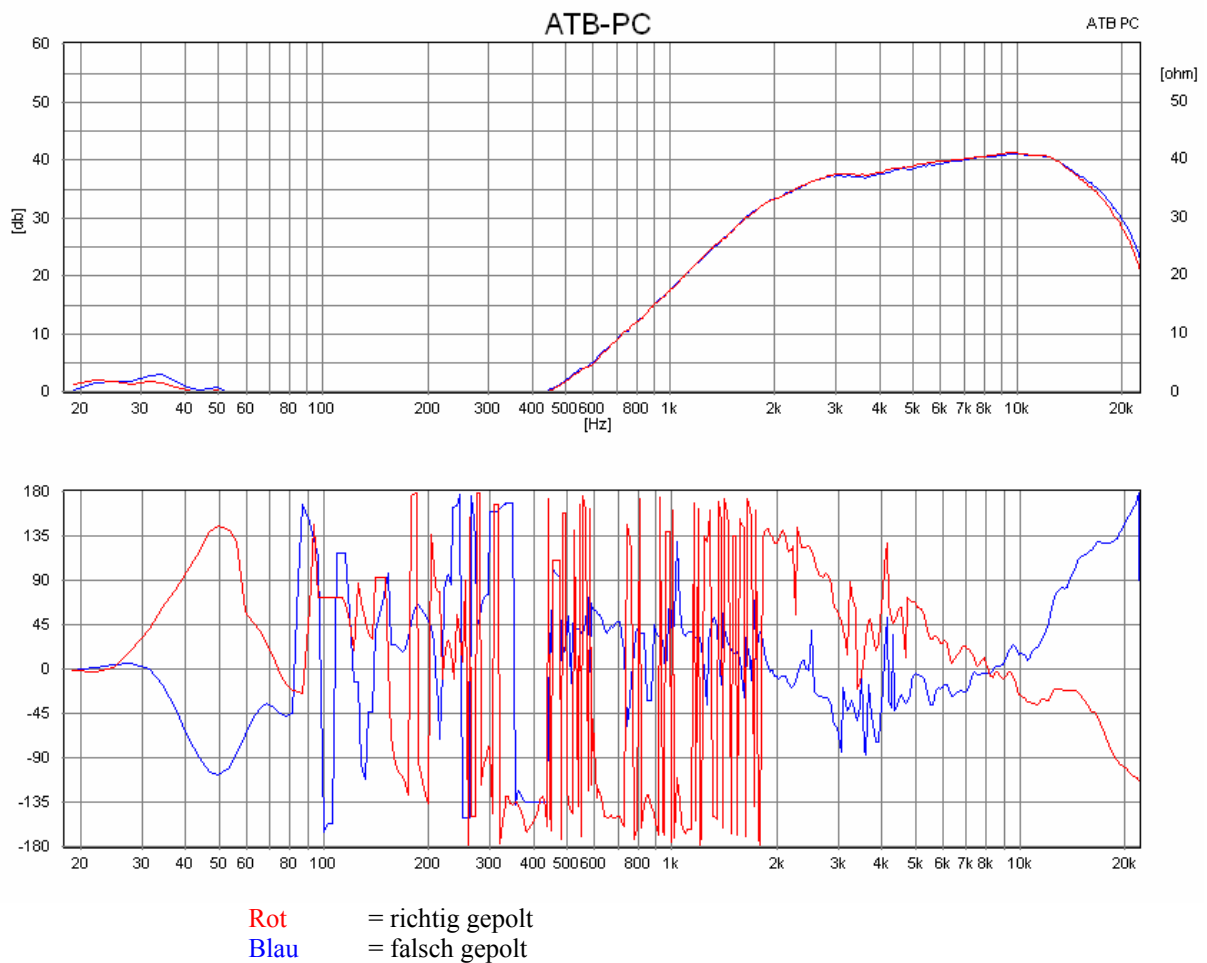


Abbildung 8.26

Fazit: Diese Messung zeigt die durch die Verpolung entstandene Phasendifferenz von 180° . Ab 5kHz ist die Abweichung durch die nicht ausreichende zeitliche Auflösung der Soundkarte bestimmt. Die Sprünge unterhalb 500Hz entstehen durch die zu kleine Amplitude des Lautsprechers. Die Sprünge der roten Kurve unterhalb 2kHz entstehen durch den Phasenwinkel um 180° .

Abbildung 8.27 zeigt den Frequenzgang und die Phase des Tieftöners. Das Chassis wurde ohne Frequenzweichenbauteile angeschlossen.

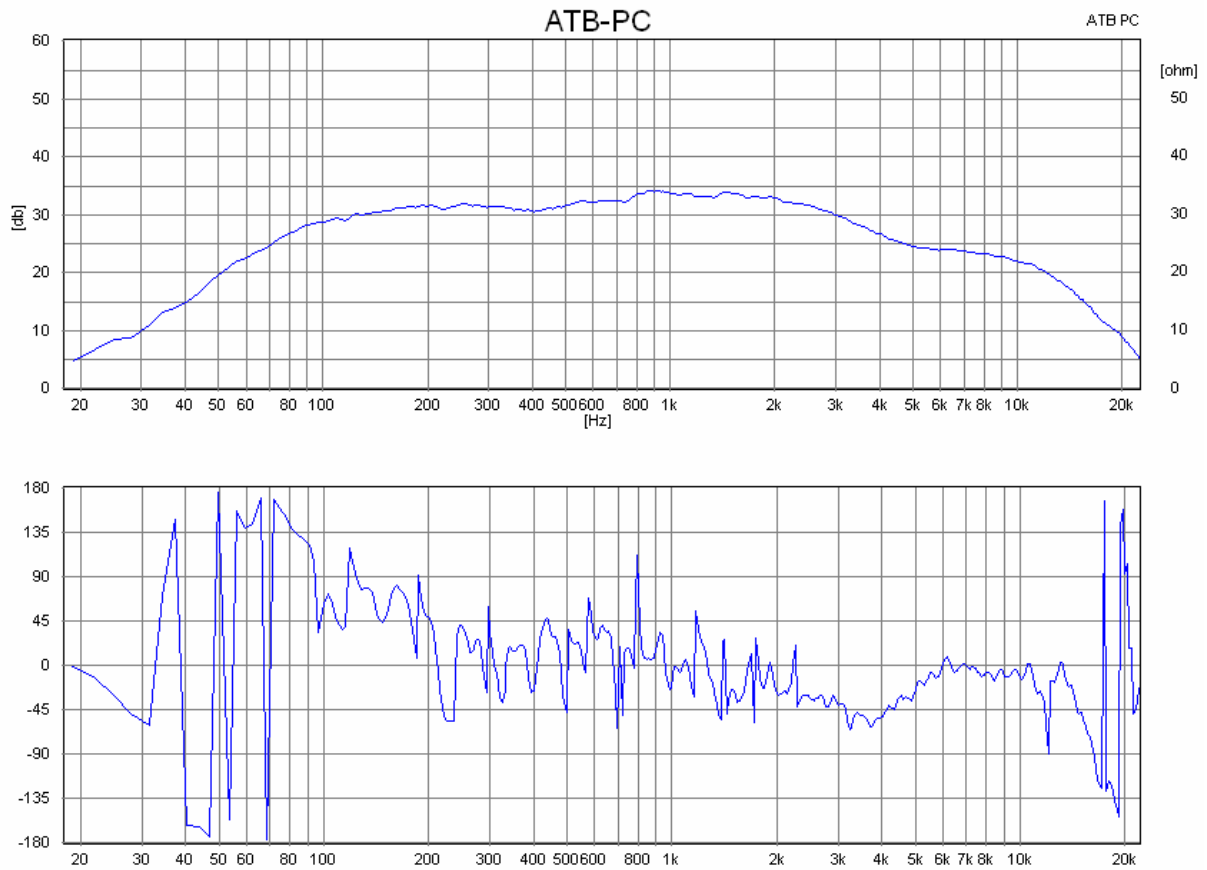
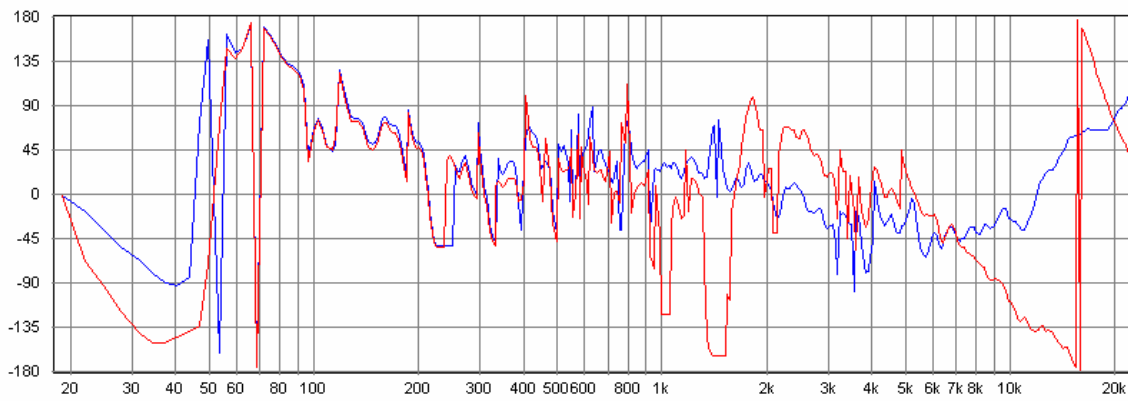
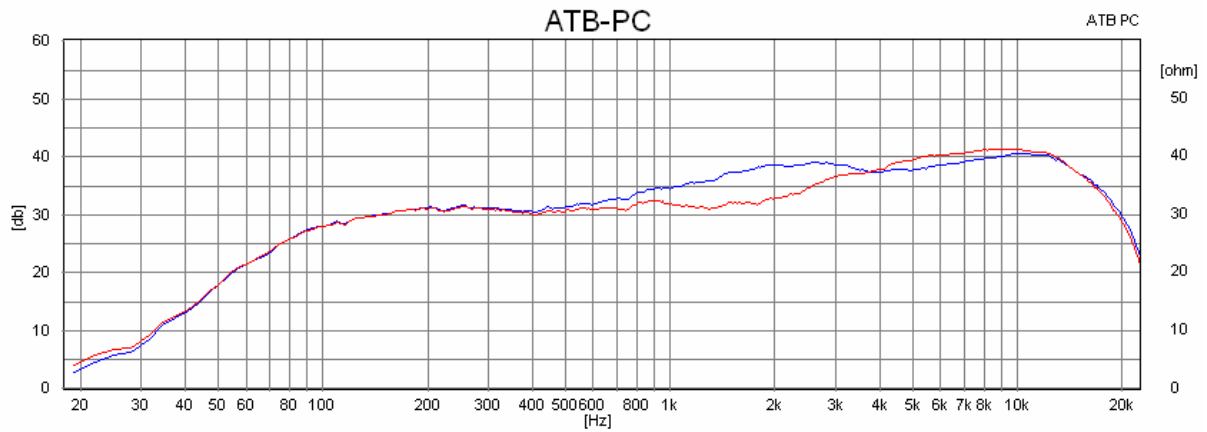


Abbildung 8.27

Fazit: Diese Messung zeigt, dass der Tieftöner einen sehr linearen Phasengang besitzt und richtig gepolt eingesetzt wird.

Abbildung 8.28 zeigt den Frequenzgang und die Phase des Hoch- und Tieftöners, beide Chassis wurden parallel und ohne Frequenzweichenbauteile angeschlossen.



Rot = Hochtöner richtig gepolt ohne Frequenzweichenbauteile
Blau = Hochtöner falsch gepolt ohne Frequenzweichenbauteile

Abbildung 8.28

Fazit: Die richtige Polung der Lautsprecherchassis ist gefunden. Der Tieftöner wird richtig gepolt, der Hochtöner falsch. Dies zeigt der Frequenzgang, aber entschieden deutlicher der Sprung in der Phase.

Abbildung 8.29 zeigt überlappend die einzeln gemessenen Frequenzgänge von Hoch- und Tieftöner.

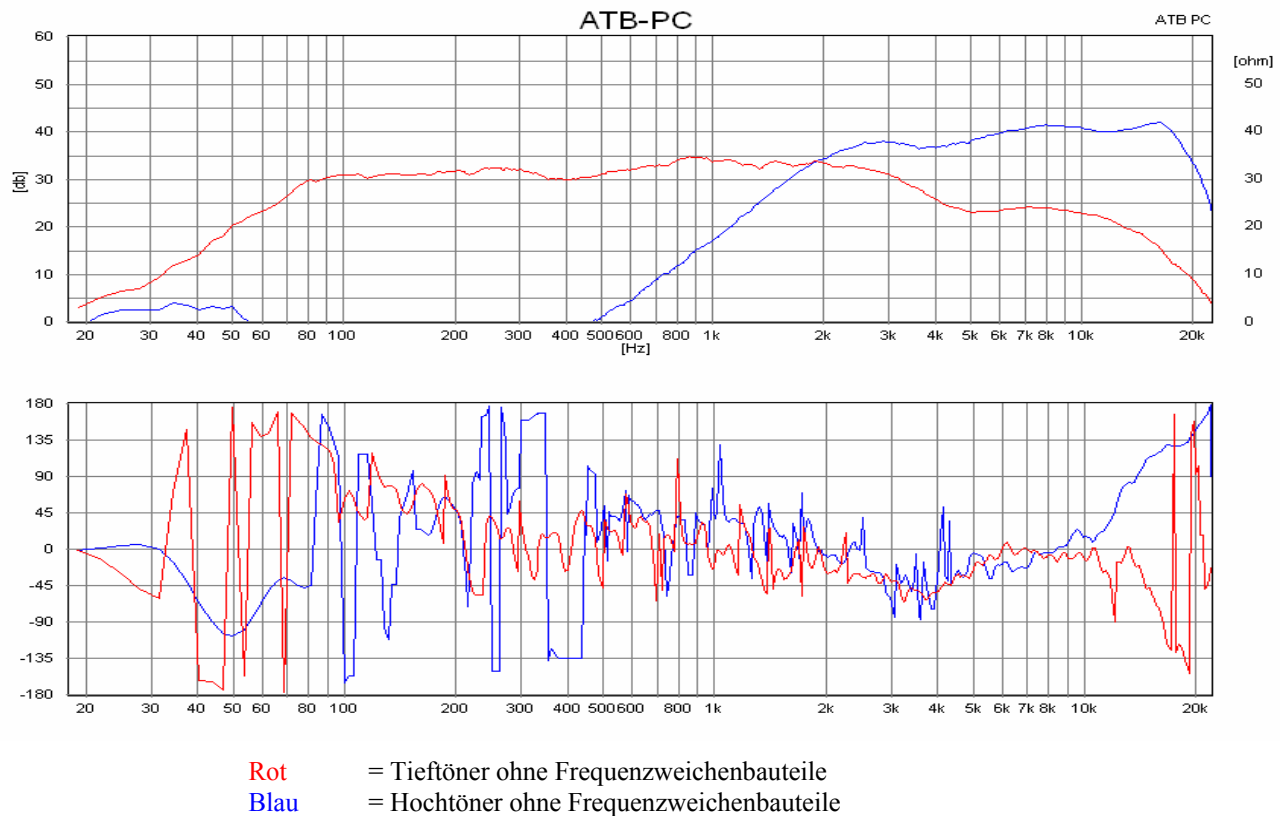


Abbildung 8.29

Fazit: Aus der Kennlinie geht hervor, dass für den Hochtöner bei ca. 2,3kHz die Trennfrequenz liegen sollte, für den Tieftöner scheint eine Trennfrequenz von ca. 2,2kHz sinnvoll zu sein. Da sich die Durchlassspannungen der Pässe im Übergangsbereich addieren, kann und sollte hier eine Lücke gelassen werden, in diesem Fall beträgt die Lücke 100Hz. Ob dieser Bereich ausreichend ist, wird sich im weiteren Verlauf zeigen.

Berechnung

Von den Chassis sind folgende Werte bekannt:

Hochtöner	Tieftöner
f_r = 2kHz	= 45Hz
R_{DC} = 4,5Ω	= 6,4Ω
Z = 6Ω	= 8Ω

Tiefpass für Tieftöner:

$$\text{Spule: } L = \frac{Z}{2 \cdot \pi \cdot f_G} = \frac{8}{2 \cdot \pi \cdot 2200 \text{ Hz}} = 0,58 \text{ mH}$$

Gewählt wurden 0,56mH.

Hochpass für Hochtöner:

Wichtig: Aus der blauen Kennlinie in Abbildung 8.29 ist zu sehen, dass der Hochtöner im Mittel 4dB lauter ist als der Tieftöner, dieses wird durch einen Vorwiderstand ausgeglichen. Der Vorwiderstand muss vor der Berechnung des Kondensators ermittelt werden. Sein Wert wird quadratisch zur Impedanz des Hochtöners addiert, um auf ein richtiges Ergebnis zu kommen. Dieses ist wichtig, da zur Berechnung des Kondensators die exakte Impedanz des Hochtonzweiges benötigt wird.

Ermittlung des Vorwiderstandes:

Da die Impedanz Z aus der quadratischen Addition von Wirkwiderstand R_{DC} und Blindwiderstand X_L des Hochtöners besteht, muss zunächst der Wert X_L errechnet werden, da er nicht angegeben ist.

Bekannt sind jedoch der Wirkwiderstand R_{DC} und die Gesamtimpedanz Z , hiermit lässt sich X_L wie folgt berechnen:

$$X_L = \sqrt{Z^2 - R_{DC}^2} = \sqrt{6\Omega^2 - 4,5\Omega^2} = 3,97\Omega$$

Nun wird noch das Verhältnis der Dämpfung benötigt, um den Vorwiderstand zu ermitteln. Hierzu muss der logarithmische Wert von 4dB in einen dekadischen Wert umgerechnet werden:

$$V_{UD-} = 10^{\left(\frac{V_{U\text{Log}}}{20}\right)} = 10^{\left(\frac{4}{20}\right)} = 1,585$$

Das errechnete Verhältnis von 1,585 ist mit dem Verhältnis aus dem Vorwiderstand und R_{DC} des Hochtöners in Verhältnis zu setzen:

$$R_V = \frac{R_{DC}}{V_{UD-}} = \frac{4,5\Omega}{1,585} = 2,84\Omega \quad \text{Gewählt wurden } 2,8\Omega \text{ aus } 2x \text{ parallel } 5,6\Omega.$$

Die 2,8 Ohm müssen nun mit X_L und R_{DC} zu einem neuen Z zusammengeführt werden:

$$Z = \sqrt{(R_{DC} + R_V)^2 + X_L^2} = \sqrt{(4,5\Omega + 2,8\Omega)^2 + 3,97\Omega^2} = 8,3\Omega$$

Es wäre auch möglich gewesen, einen Spannungsteiler einzusetzen, was die etwas komplizierte Rechnung überflüssig gemacht hätte. Allerdings haben wir so den Gesamtwiderstand der Schaltung auf 8 Ohm angehoben, was bei einem Hochtöner mit 6 Ohm Impedanz schon sinnvoll ist.

Mit dem Neuberechnetem Z können wir den Kondensator berechnen:

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot Z \cdot f_G} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 8,3\Omega \cdot 2300 \text{ Hz}} = 8,3\mu\text{F} \quad \text{Gewählt wurden } 8,2\mu\text{F}.$$

Die Berechnung ist eine gute Annäherung, sollte sich jedoch im weiteren Verlauf herausstellen, dass die berechneten Werte nicht ganz passen, können sie noch verändert werden.

Abbildung 8.30 zeigt den Einfluss des Kondensators auf den Hochtöner.

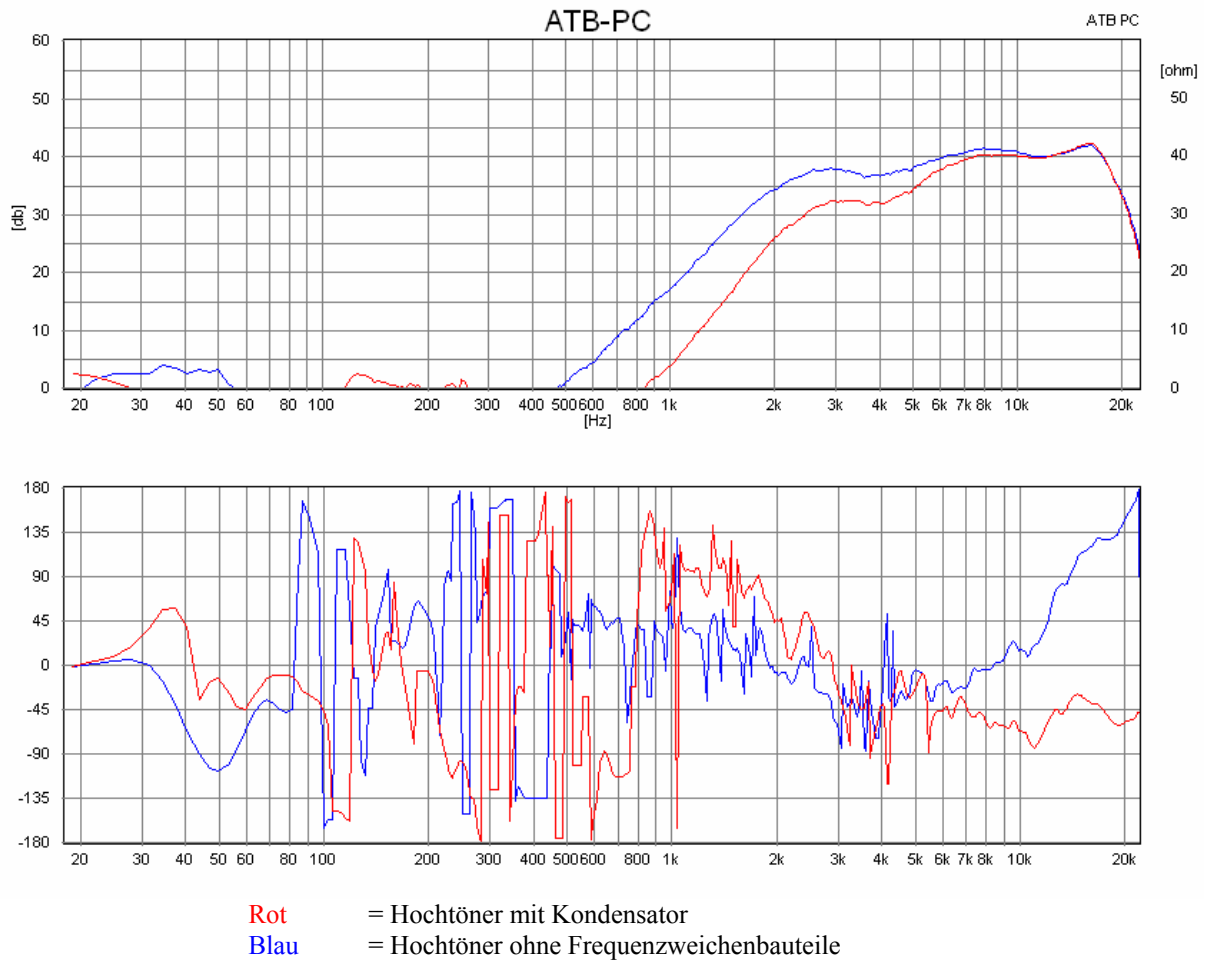


Abbildung 8.30

Fazit: Im oberen Diagramm ist zu erkennen, dass der Kondensator das niederfrequente Spektrum dämpft. Das untere Diagramm zeigt den Einfluss des Kondensators auf die Phasenlage. Ab ca. 900Hz fängt der Kondensator an zu wirken und dreht die Phase des Hochtöners anfänglich nahezu um 90° .

Abbildung 8.31 zeigt den Einfluss der Spule auf den Tieftöner.

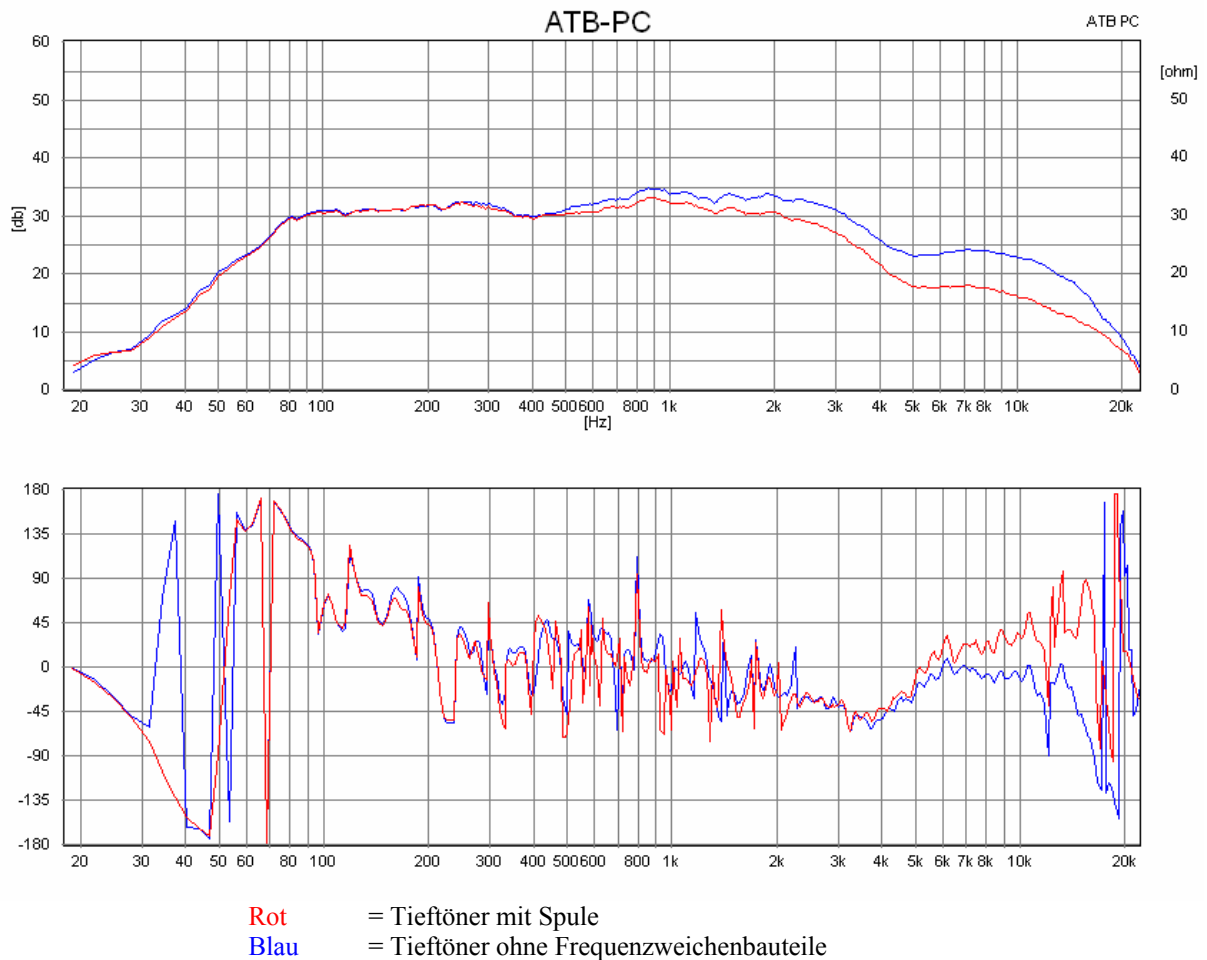


Abbildung 8.31

Fazit: Im oberen Diagramm ist zu erkennen, dass die Spule das hochfrequente Spektrum dämpft. Das untere Diagramm zeigt den Einfluss der Spule auf die Phasenlage. Hier beeinflusst die Spule nicht so stark den Phasengang, da das Chassis ebenfalls eine Spule besitzt und sich die Phase ja schon gedreht hat. Eine Spule in Reihe zu einer Spule dreht die Phase nicht merklich weiter.

Abbildung 8.32 zeigt den Frequenzgang und die Phasenlage des Lautsprechers mit der bis hierhin entwickelten Frequenzweiche. Der dazugehörige Schaltplan Abbildung 8.33 und der Messaufbau Abbildung 8.34 werden auf der nächsten Seite gezeigt.

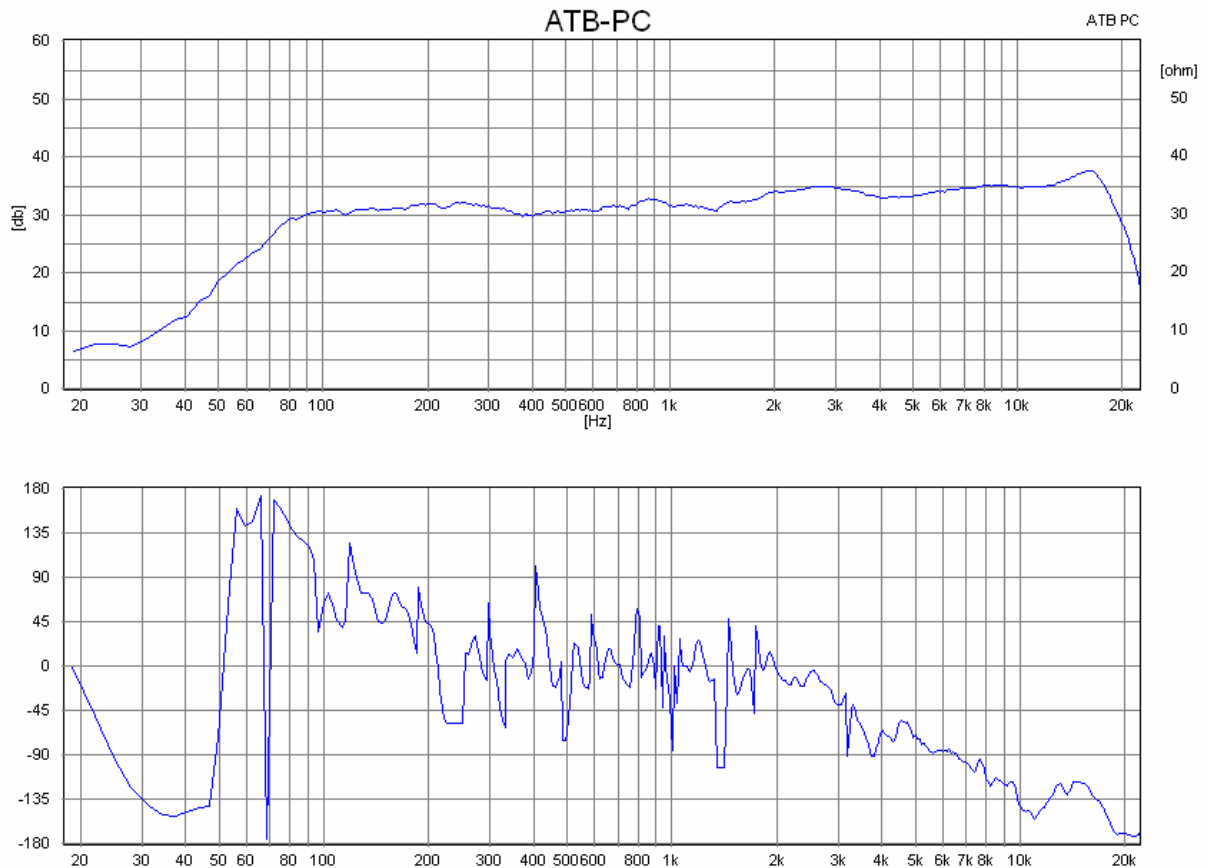


Abbildung 8.32

Fazit: Das obere Diagramm zeigt einen schon sehr guten Frequenzgang, die Phase im unteren Diagramm ist auch sehr gelungen. Der Hörtest brachte jedoch hervor, dass es im Mitteltonbereich Klangverfärbungen gab die nicht in das Gesamtbild passten.

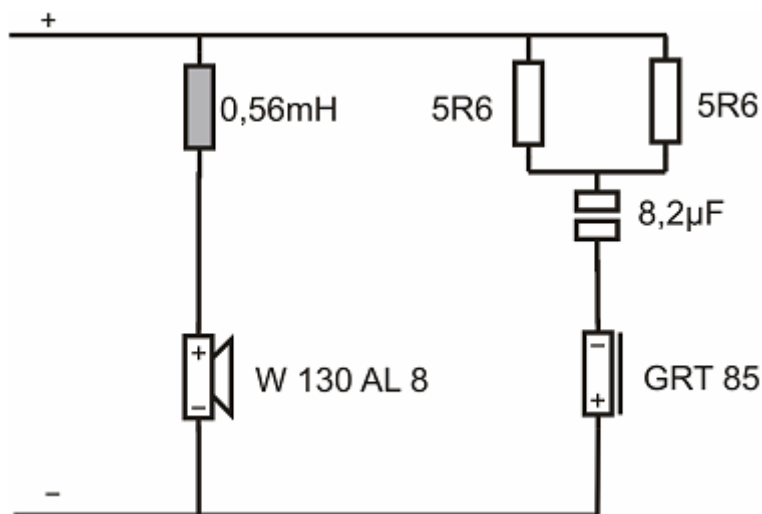


Abbildung 8.33



Abbildung 8.34

Um zu ergründen, woher die unerwünschten Klangverfärbungen im Mitteltonbereich kamen, wurden die Einzelmessungen des Hochtöners mit Kondensator und die des Tieftöners mit Spule in ein Diagramm gelegt (Abbildung 8.35).

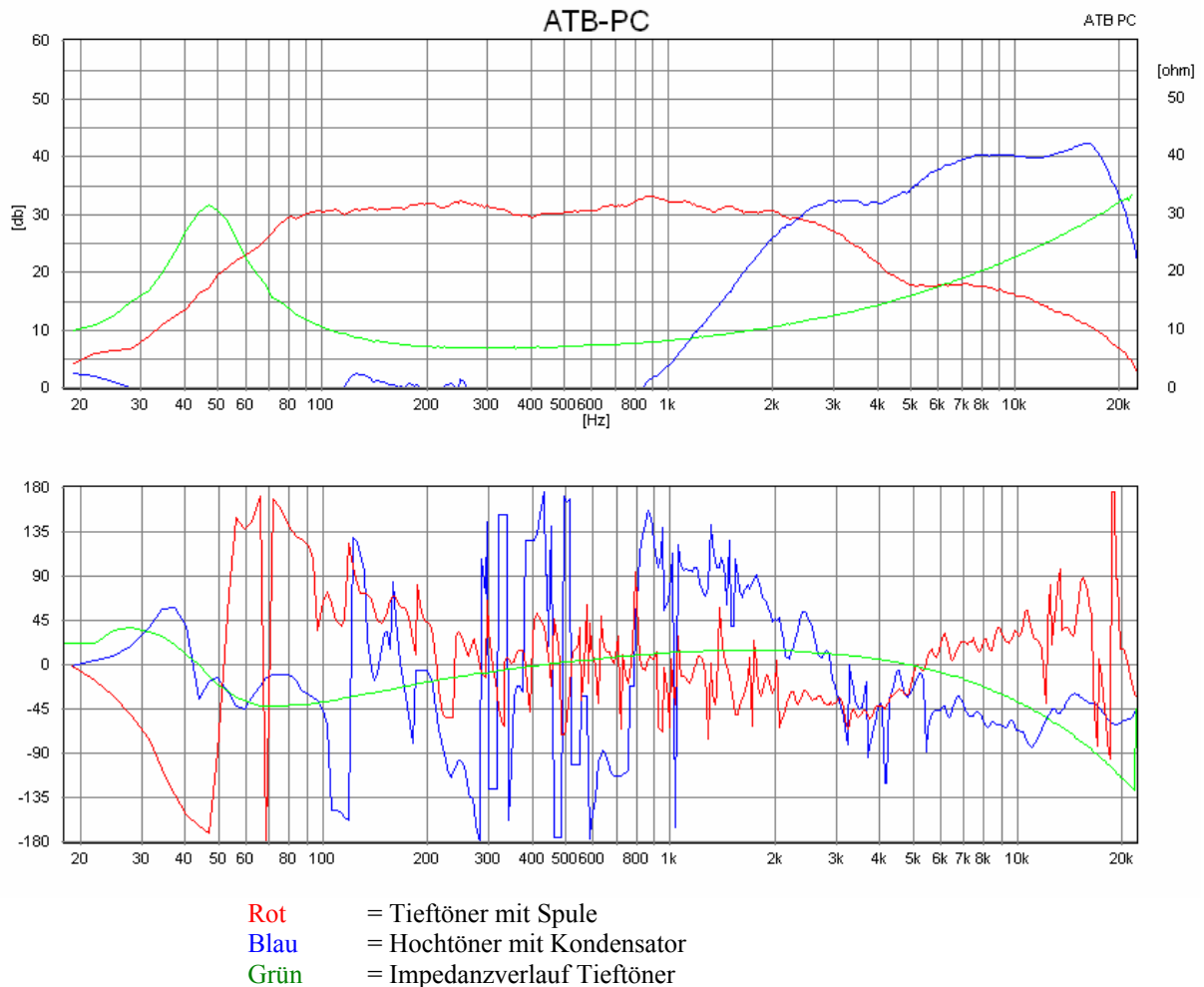


Abbildung 8.35

Fazit: Der linke Buckel des Hochtöners (**blaue** Kennlinie im oberen Diagramm) im Bereich von ca. 1,95kHz bis 3,5kHz wirkt sich störend auf das Gesamtklangbild aus. Die Überhöhung ab ca. 5kHz wird durch den Vorwiderstand gedämpft.

Ebenfalls besitzt der Tieftöner einen Buckel mit dem Mittelpunkt bei ca. 6,2kHz, die Impedanzkurve grün zeigt, dass der Tieftöner hier auch zufälligerweise das Mittel seiner Maximalimpedanz aufweist. Um die angesprochenen Frequenzbuckel zu glätten, werden 2 Saugkreise eingesetzt.

Berechnung Saugkreis Hochtöner:

Kondensator:

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot Z \cdot f_2} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 6\Omega \cdot 1950 \text{ Hz}} = 13,6 \mu\text{F}$$

Gewählt wurden 13,3μF aus je einem 10μF und einem 3,3μF parallel.

Die Spule:

$$L = \frac{Z}{2 \cdot \pi \cdot f_1} = \frac{6\Omega}{2 \cdot \pi \cdot 3500 \text{ Hz}} = 0,27 \text{ mH}$$

Gewählt wurden 0,27mH.

Der Widerstand R ist hier nicht erforderlich, da hier der ohmsche Widerstand der Bauteile genügt. Und der vorgeschaltete Kondensator in Verbindung mit dem Vorwiderstand begrenzend wirken.

Berechnung Saugkreis Tieftöner:

Für die Berechnung des Saugkreises werden die Grenzen der Impedanzüberhöhung verwendet. $f_1 = 20\text{kHz}$ und $f_2 = 1,9\text{kHz}$

Kondensator:

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot Z \cdot f_2} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 8\Omega \cdot 20000\text{Hz}} = 1\mu\text{F}$$

Gewählt wurde $1\mu\text{F}$.

Spule:

$$L = \frac{Z}{2 \cdot \pi \cdot f_1} = \frac{8\Omega}{2 \cdot \pi \cdot 1900\text{Hz}} = 0,67\text{mH}$$

Gewählt wurde $0,68\text{mH}$.

Als Widerstand wurde der Praxiswert $4,7\Omega$ gewählt.

Abbildung 8.36 zeigt den Einfluss des Saugkreises auf das Frequenzspektrum und die Phasenlage des Hochtöners. Der dazugehörige Schaltplan (Abbildung 8.37) und der Messaufbau (Abbildung 8.38) werden auf der nächsten Seite gezeigt.

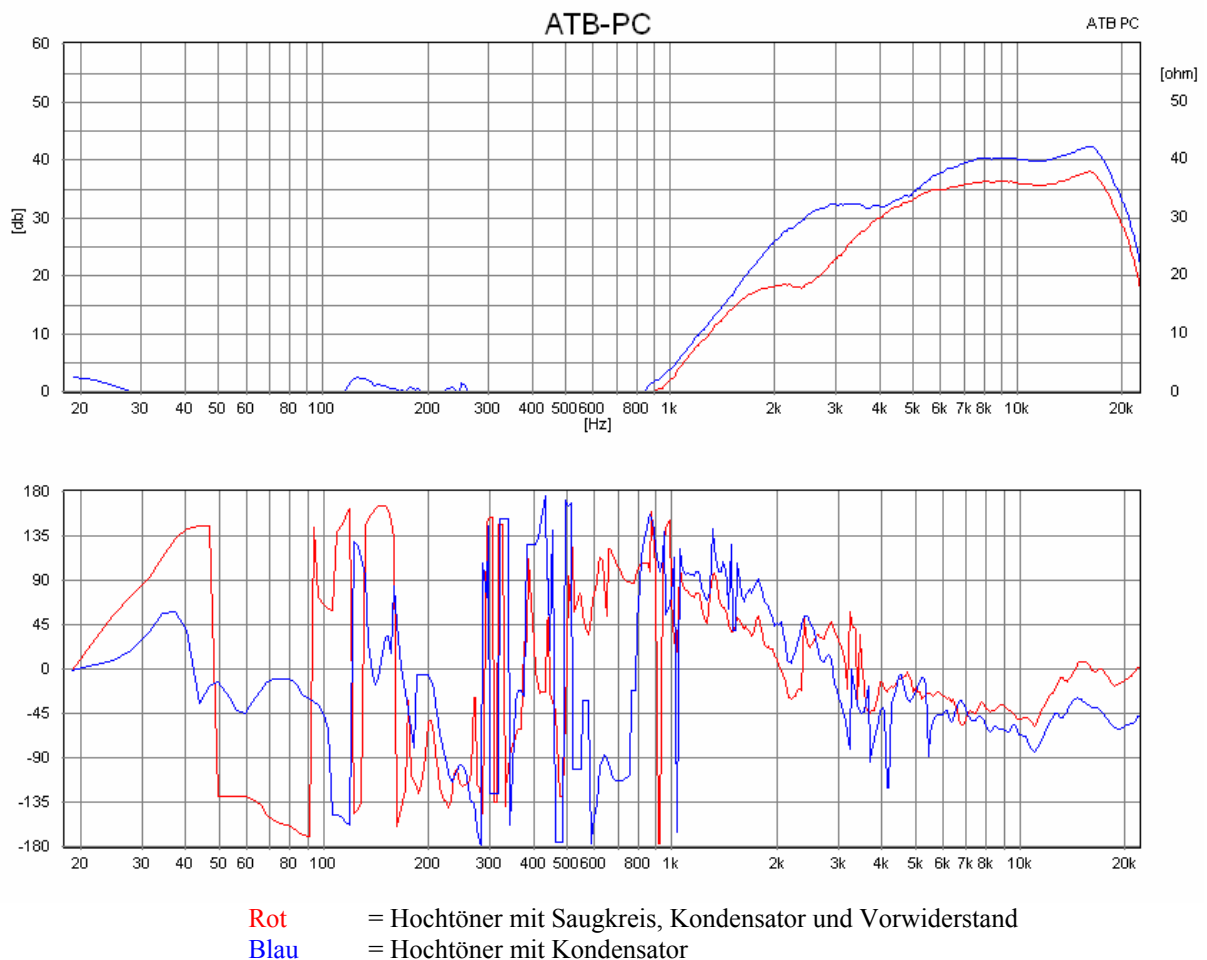


Abbildung 8.36

Fazit: Aus dem oberen Diagramm geht hervor, dass der Eingriff den Buckel zwischen 1,95kHz und 3,5kHz nach unten verschoben hat, bzw. er wurde abgesaugt. Der Buckel bei ca. 2kHz ist in seiner Intensität so schwach, dass er keinen störenden Einfluss auf den Klangeindruck hat.

Des Weiteren hat sich die Phasenlage positiv verändert, nahe an der 0°-Linie.

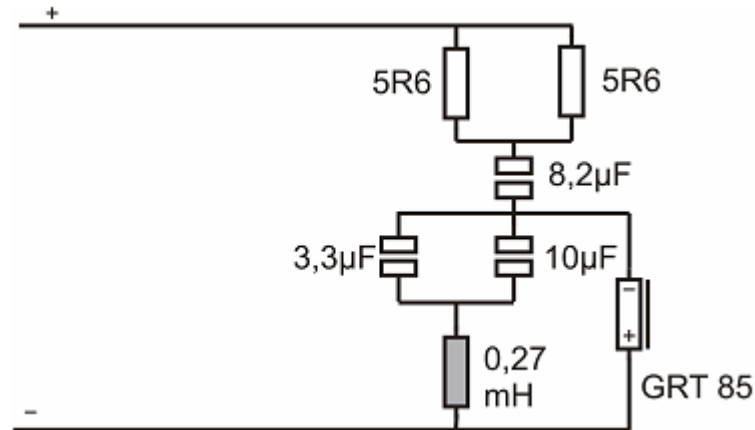


Abbildung 8.37

Abbildung 8.38 zeigt den Einfluss des Saugkreises auf das Frequenzspektrum und die Phasenlage des Tieftöners. Der dazugehörige Schaltplan (Abbildung 8.40) und der Messaufbau (Abbildung 8.41) werden auf der nächsten Seite gezeigt.

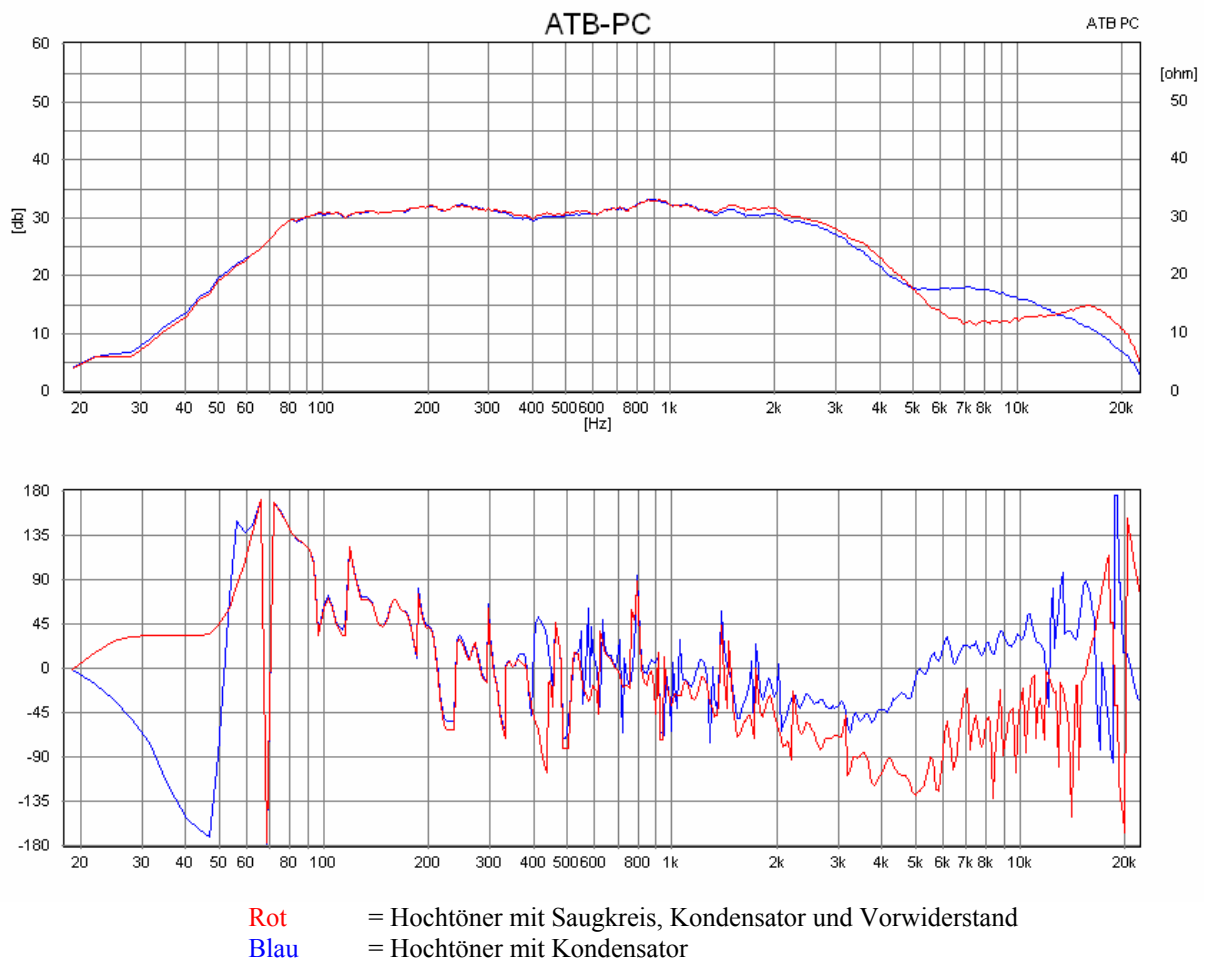


Abbildung 8.38

Fazit: Aus dem oberen Diagramm geht hervor das der Eingriff den Buckel bei ca. 6,2kHz nach unten verschoben hat, bzw. er wurde abgesaugt. Die restliche Überhöhung ab 7kHz ist in ihrer Intensität so schwach, dass sie keinen störenden Einfluss auf den Klangeindruck hat. Des Weiteren hat sich auch hier die Phasenlage positiv verändert.

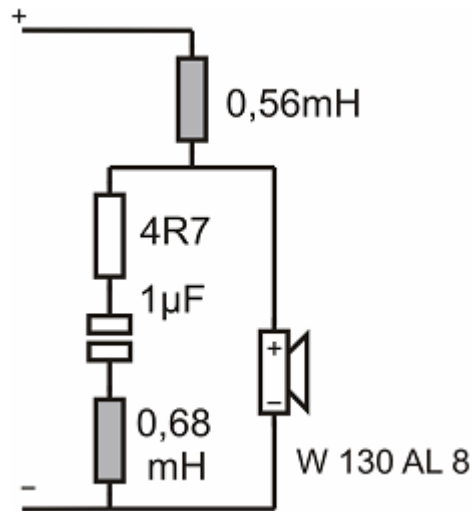


Abbildung 8.49

Abbildung 8.40 zeigt das Frequenzspektrum und die Phasenlage des kompletten Lautsprechers mit der endgültigen Frequenzweiche. Der dazugehörige Schaltplan (Abbildung 8.41) wird auf der nächsten Seite gezeigt.

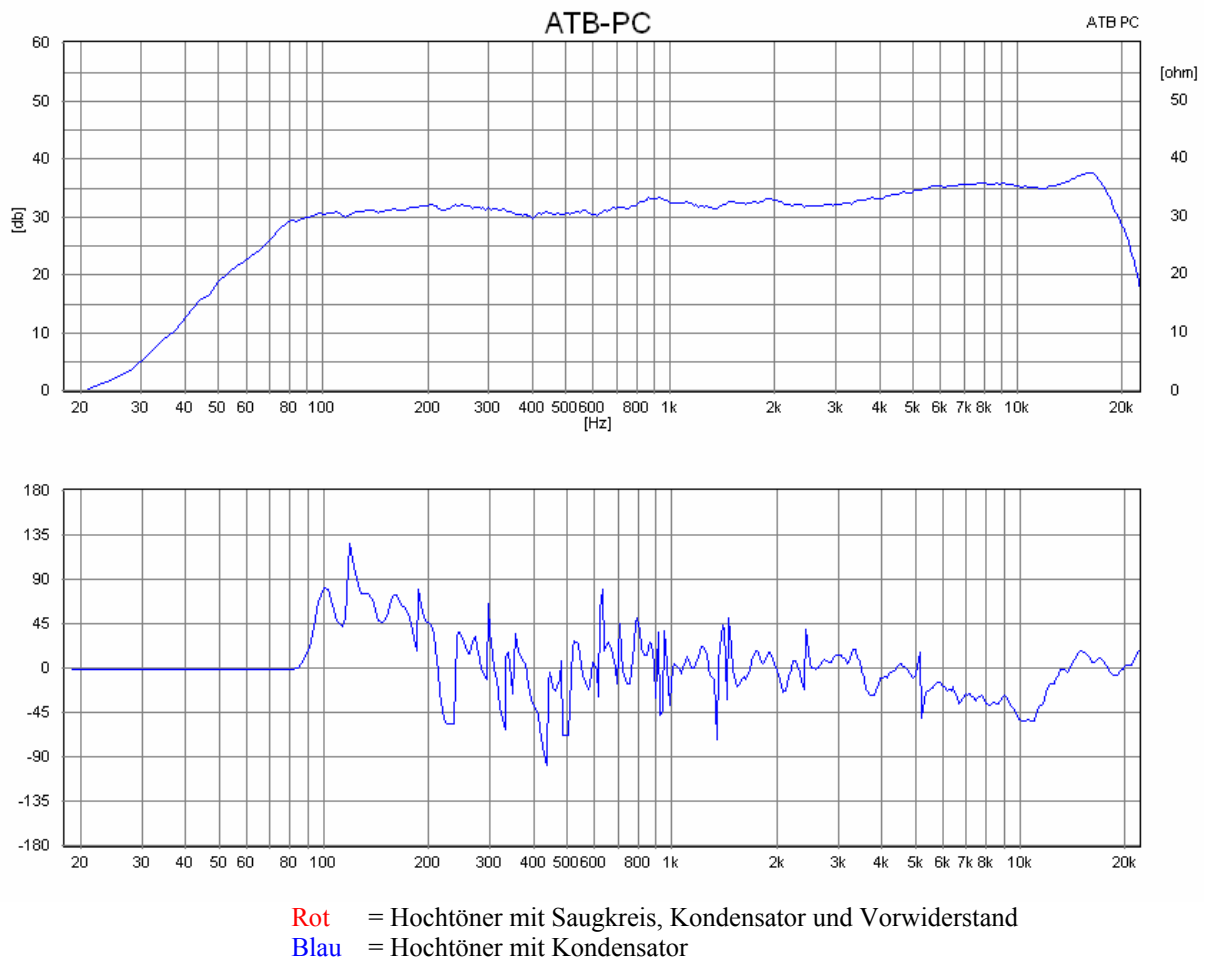


Abbildung 8.40

Fazit: Die blauen Kennlinien zeigen den linearen Frequenzgang (oben) und eine perfekte Phasenlage (unten). Das Ziel einen phasenrichtigen Lautsprecher mit linearem Frequenzgang zu entwickeln ist gelungen.

Anmerkung: Personen, die die Meinung vertreten, dass die Phasenlage nur messtechnisch nachzuweisen ist und keinen Einfluss auf das Klangerlebnis hat, sind herzlich eingeladen, um den Lautsprecher Probe zu hören.

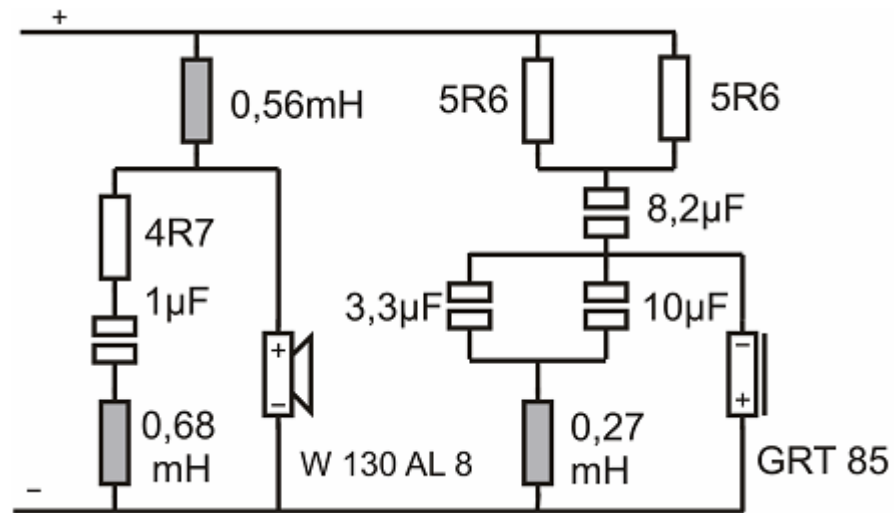


Abbildung 8,41

Abbildung 8.42 zeigt den Impedanzverlauf des fertigen Lautsprechers.

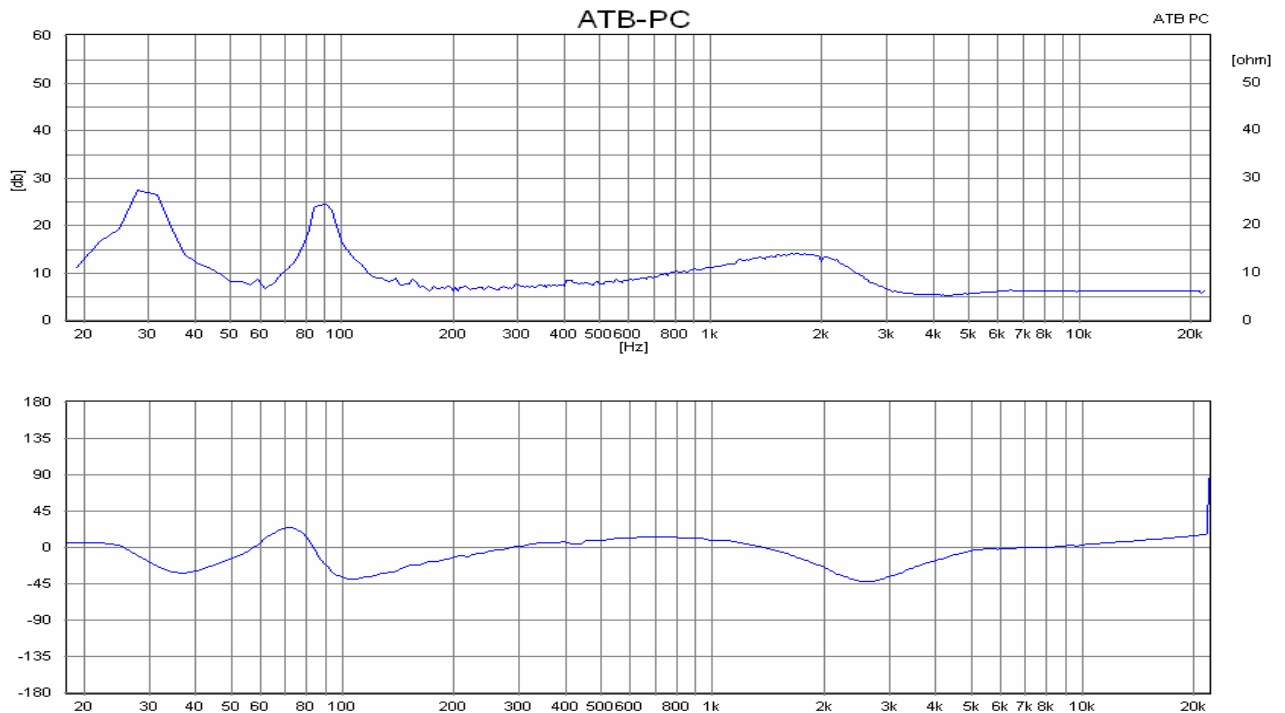


Abbildung 8.42

Fazit: Die Impedanz erhöhungen bei 30Hz und 90Hz im oberen Diagramm sind auf die Bassreflexöffnung zurückzuführen. Der weitere Verlauf der Impedanzkurve ist als Last für einen Verstärker als unkritisch anzusehen.

Es wäre zwar möglich gewesen, die bei 1,8kHz zu glätten, allerdings hätte dieses nur eine kosmetische Wirkung und würde den erzielten Frequenzgang beeinträchtigen.

Zusammenfassend werden in Abbildung 8.43 die Frequenzgänge der einzelnen Entwicklungsstufen des Hochpasses dargestellt.

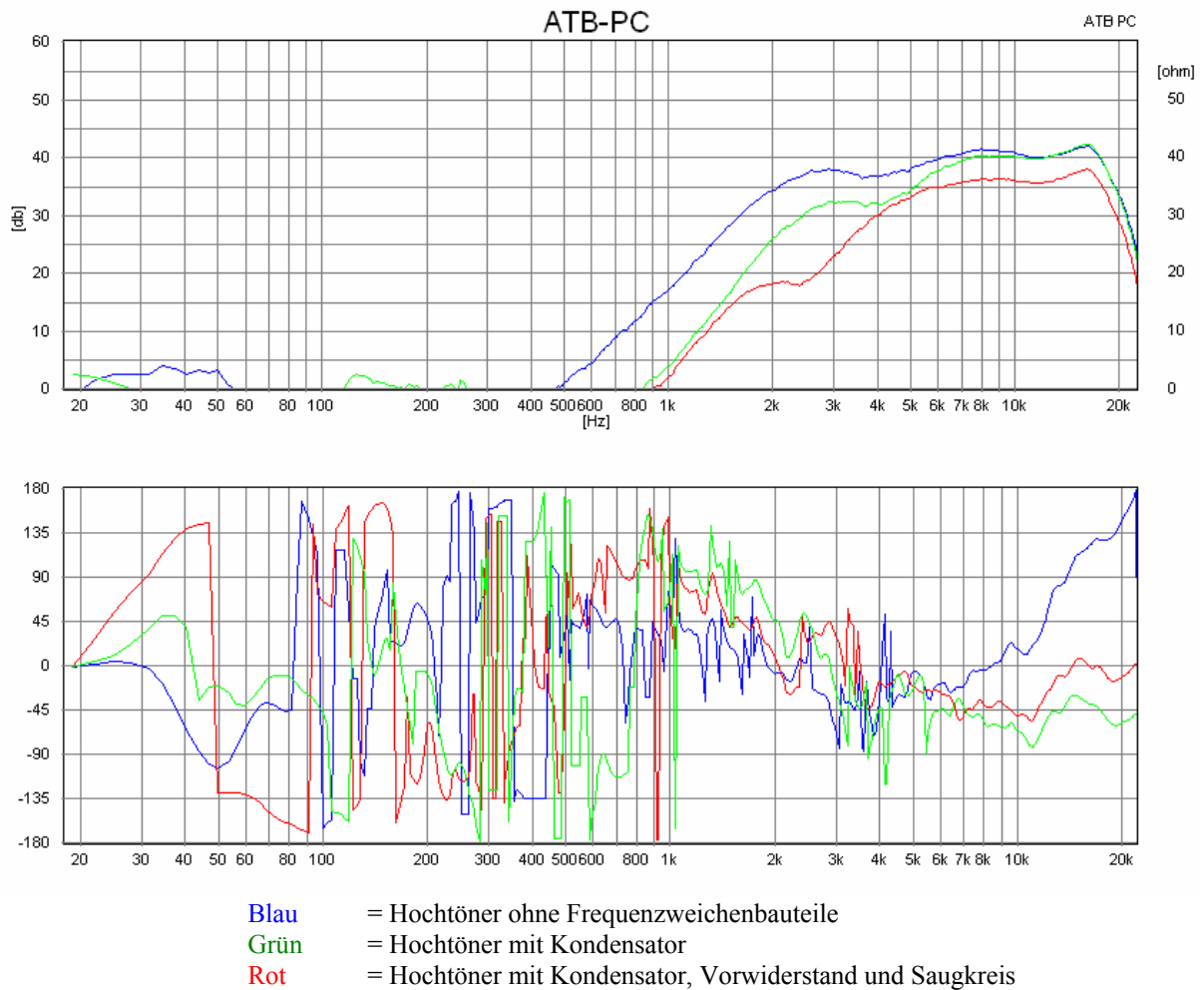


Abbildung 8.43

Fazit: Der Einfluss der Frequenzweiche auf das Frequenzspektrum des Hochtöners ist gut zu erkennen, wichtig in diesem Zusammenhang ist auch, dass die Phasenlage nach Fertigstellung der Frequenzweiche fast wieder auf der ursprünglichen Position liegt.

Zusammenfassend werden in Abbildung 8.44 Frequenzgänge der einzelnen Entwicklungsstufen des Tiefpasses dargestellt.

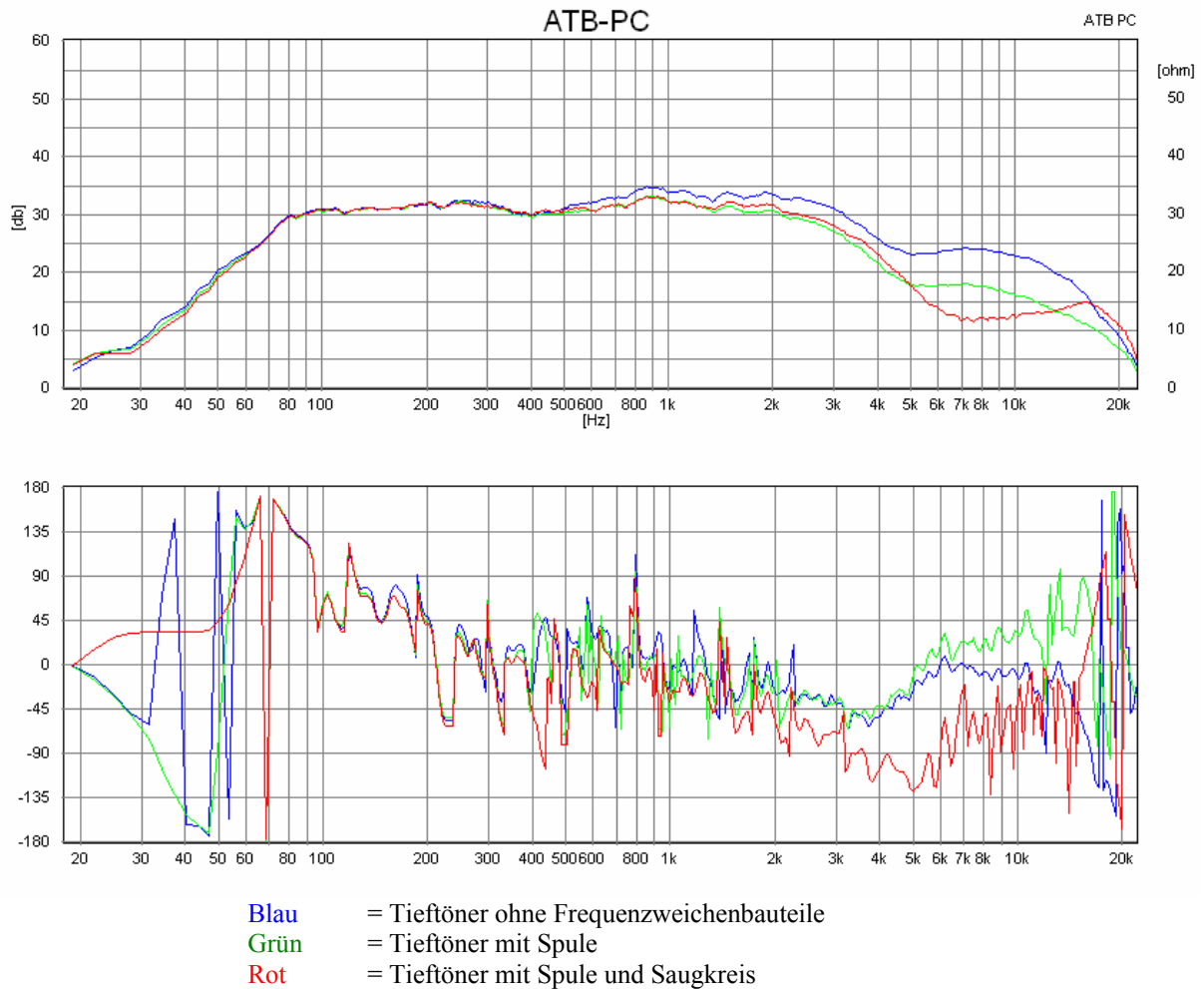


Abbildung 8.44

Fazit: Auch hier hat die Frequenzweiche merklichen Einfluss auf das Frequenzspektrum des Tieftöners, die Phasenlage änderte sich in den einzelnen Entwicklungsstufen kaum. Wie die Gesamtphasenlage in Abbildung 8.46 wirkt sich die leichte Drehung bei 5kHz nicht störend aus.

Abschließend wird in Abbildung 8.45 Frequenzgang und die Phasenlage der Nugget mit einem Lautsprecher eines renommierten Herstellers verglichen.

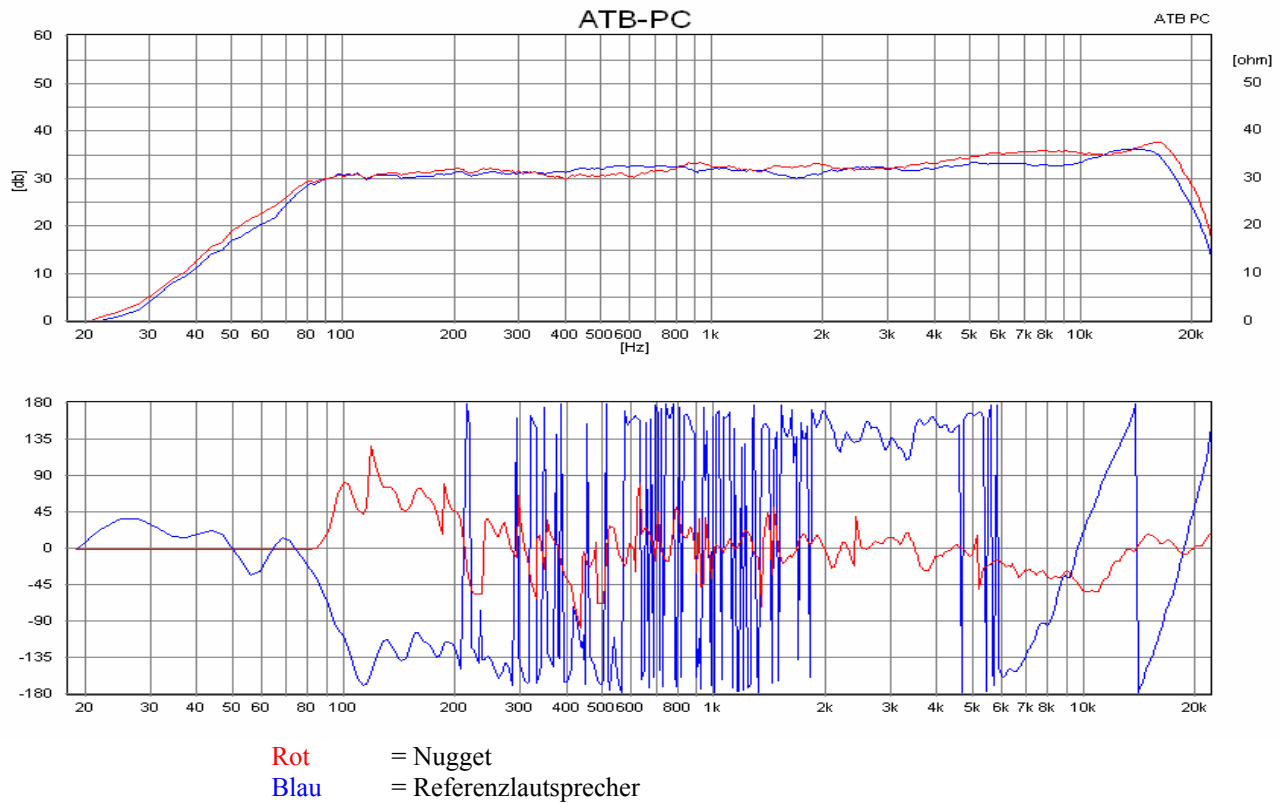


Abbildung 8.45

Fazit: Deutlich zu erkennen ist, dass andere Hersteller auch lineare Frequenzgänge realisieren können, jedoch der akustischen Phase keine Beachtung schenken.

W8.7 Anhang

Widerstandstabelle zum Spannungsteiler
Schaltplan unter Kapitel W8.2, Abbildung 8.2
Alle Angaben in Ohm

Dämpfung in dB	R1	R2	4 Ohm Chassis	8 Ohm Chassis	16 Ohm Chassis
- 1	R1		0,4	0,9	1,7
	R2		33	66	131
- 2	R1		0,8	1,5	3,3
	R2		15	33	62
- 3	R1		1,2	2,2	4,7
	R2		10	22	39
- 4	R1		1,5	3	5,9
	R2		6,8	13,7	2,7
- 5	R1		1,8	3,5	7
	R2		5,1	10,3	20,6
- 6	R1		2	4	8
	R2		4	8	16,1
- 7	R1		2,2	4,4	8,9
	R2		3,2	6,5	12,9
- 8	R1		2,4	4,8	9,6
	R2		2,7	5,3	10,6
- 9	R1		2,6	5,2	10,3
	R2		2,2	4,4	8,8
- 10	R1		2,7	5,5	10,9
	R2		1,9	3,7	7,4
- 11	R1		2,9	5,8	11,5
	R2		1,6	3,1	6,3
- 12	R1		3	6	12
	R2		1,3	2,7	5,4
- 13	R1		3,1	6,2	12,4
	R2		1,2	2,3	4,6
- 14	R1		3,2	6,4	12,8
	R2		1	2	4
- 15	R1		3,3	6,6	13,2
	R2		0,9	1,7	3,5
- 16	R1		3,4	6,7	13,5
	R2		0,8	1,5	3
- 17	R1		3,4	6,9	13,7
	R2		0,7	1,3	2,6
- 18	R1		3,5	7	14
	R2		0,6	1,2	2,3
- 19	R1		3,6	7,1	14,2
	R2		0,5	1	2
- 20	R1		3,6	7,2	14,4
	R2		0,4	0,9	1,8

Tabelle der Bauteile für Butterworth-Filter 1.Ordnung
für 4 Ohm und 8 Ohm Lautsprecher
Flankensteilheit : 6dB pro Oktave

Frequenz in Hz	Z = 4Ω		Z = 8Ω	
	L in mH	C in μF	L in mH	C in μF
50	12,7	800	25,5	400
100	6,4	400	12,7	200
150	4,2	260	8,5	133
200	3,2	200	6,4	100
250	2,5	160	5,1	80
300	2,1	133	4,2	66
400	1,6	100	3,2	50
500	1,3	80	2,5	40
600	1,1	66	2,1	33
700	0,9	57	1,8	29
800	0,8	50	1,6	25
900	0,7	44	1,4	22
1000	0,6	40	1,3	20
1200	0,5	33	1,1	17
1500	0,4	27	0,8	13
2000	0,3	20	0,6	10
2500	0,25	16	0,5	8
3000	0,2	13	0,4	6,6
3500	0,18	11	0,36	5,7
4000	0,15	10	0,3	5
4500	0,14	8,7	0,28	4,4
5000	0,12	8	0,25	4
6000	0,1	6,7	0,21	3,3
7000	0,1	5,7	0,2	2,7
8000	0,08	5	0,16	2,6
9000	0,07	4,4	0,14	2,2
10000	0,06	4	0,12	2
12000	0,05	3,3	0,1	1,7
15000	0,04	2,7	0,08	1,3
20000	0,03	2	0,06	1

Tabelle der Bauteile für Butterworth-Filter 2.Ordnung
für 4 Ohm und 8 Ohm Lautsprecher
Flankensteilheit : 12dB pro Oktave

Frequenz in Hz	Z = 4Ω		Z = 8Ω	
	L in mH	C in μF	L in mH	C in μF
50	18	560	36	280
100	9	280	18	140
150	6	190	12	93
200	4,5	140	9	70
250	3,6	110	7,2	56
300	3	90	6	46
400	2,2	70	4,5	35
500	1,8	56	3,6	28
600	1,5	47	3	23
700	1,3	40	2,6	20
800	1,1	35	2,2	18
900	1,0	31	2	16
1000	0,9	28	1,8	14
1200	0,7	23	1,5	12
1500	0,6	19	1,2	9,3
2000	0,4	14	0,9	7
2500	0,36	11	0,7	5,6
3000	0,3	9,3	0,6	4,6
3500	0,25	8	0,5	4
4000	0,22	7	0,45	3,5
4500	0,2	6,2	0,4	3,1
5000	0,16	5,6	0,36	2,8
6000	0,15	4,7	0,3	2,3
7000	0,12	4	0,25	2
8000	0,11	3,5	0,22	1,8
9000	0,1	3,1	0,2	1,6
10000	0,09	2,8	0,18	1,4
12000	0,07	2,3	0,16	1,2
15000	0,06	1,9	0,12	0,9
20000	0,04	1,4	0,08	0,7

Inhaltsverzeichnis

1. Die Analog.on Nugget.....	1
1.1 Die Bauteile.....	1
2. Das Team.....	2
3. Das Messsystem ATB PC Pro.....	3
Wissen W1. Grundlagen der akustischen Messtechnik	3
4. Die Chassis.....	5
Wissen: W2. Auswahl der Chassis.....	5
5. Das Gehäuse.....	6
5.1 Thiele-Small.....	6
Credit: ATB_TS_Tool.zip Thiele-Small Rechner	6
Wissen: W3. Thiele-Small Parameter	6
5.2 Der Phasenausgleich	9
Wissen: W4. Die Phase	9
5.3 Die stehenden Wellen.....	11
Wissen: W5. Grundlagen der Akustik.....	11
5.4 Die Bassreflexabstimmung	14
5.5 Resonanzarmes Gehäuse	15
Wissen: W6. Beschleunigungsaufnehmer.....	15
5.6 Die Gehäusekonstruktion	16
Wissen: W7. Design.....	16
6. Die Weiche.....	17
Wissen: W8. Frequenzweiche	17
6.1 Weichenentwicklung.....	17
6.2 Weichenplan.....	18
6.3 Platinenlayout und Bestückung.....	18
7. Das Dämmmaterial.....	19
8. Zusammenbau	20
8.1 Vorbereitung der Lautsprecher.....	20
8.2 Gehäuse vorbereiten.....	20
8.3 Befestigen des Dämmmaterials.....	20
8.4 Montage der Weiche	21
8.5 Einbau der Lautsprecher.....	21
8.6 Testmessung.....	21
9. Der Hörtest.....	22
9.1 Vergleich mit eigenen Entwicklungen	22
9.2 Vergleich mit Referenzbox	22
9.3 Test bezüglich Verstärker.....	23
9.4. Im Wohnraum	23
Wissen.....	24
W1. Grundlagen der akustischen Messtechnik	24
W1.1 Messungen im Raum	24
W1.2 Zeitfenster.....	25
W1.3 Die ATB PC Messung für mittlere und hohe Frequenzen	26
W1.4 Die Nahfeldmessung	26
W1.5 Die Grenzflächenmessung.....	27
W2. Auswahl der Chassis.....	28
W2.1 Die ideale Schallquelle.....	28
W2.2 Das Zweiwegkonzept	30
W2.3 Der Air Motion Transformer.....	30

W2.4 Der Tiefmitteltöner	32
W3. Thiele-Small-Parameter	34
W3.1 Die Freiluftresonanzfrequenz f_s	34
W3.2 Die effektive Membranfläche S_d	34
W3.3 Die dynamische Masse M_{ms}	34
W3.4 Das Äquivalentvolumen V_{as}	35
W3.5 Die Compliance der Aufhängung C_{ms}	35
W3.6 Die mechanische Güte Q_{ms}	35
W3.7 Die elektrische Güte Q_{es}	35
W3.8 Die Gesamtgüte Q_{ts}	36
W3.9 Gehäusevarianten	38
W3.10 Berechnung der Gehäusegröße.....	40
W4. Die Phase	41
W4.1 Grundlagen	41
W4.2 Die Phase beim Lautsprecher	43
W4.3 Darstellung der Phase	44
W4.4 Elektrische Phasenmessung.....	45
W4.5 Akustische Phasenmessung.....	45
W5. Grundlagen der Akustik	47
W5.1 Grundbegriffe	47
W5.2 Die stehende Welle.....	49
W5.3 Schall im Gehäuse	52
W5.4 Mikrofone	63
W5.5 Schallausbreitung	65
W5.6 Messungen im leeren Gehäuse	67
W6. Beschleunigungsaufnehmer.....	70
W6.1 Messung.....	70
W6.2 Montage.....	70
W6.3 Anschluss.....	70
W7. Design.....	71
W8. Frequenzweiche.....	72
W8.1 Die Funktion einer Frequenzweiche (Passiv).....	72
W8.2 Bauteile für eine Frequenzweiche	72
W8.2 Frequenzweichen 1. und 2. Ordnung.....	78
W8.3 Laufzeit, akustische Phase.....	85
W8.4 Elektrische Phase.....	86
W8.5 Dynamic-Measurement	88
W8.6 Die Frequenzweiche der Nugget (Entwicklung).....	90
W8.7 Anhang	107