

## Photo Story OK<sup>2</sup>

Die Geschichte beschreibt die Entwicklung eines Selbstbaulautsprechers, der OK<sup>2</sup>.  
Die neue Technologie der OK<sup>2</sup> besitzt kein bekannter Fertiglautsprecher.

### Das Team



Michael Borowski,  
unser Techniker



Jürgen Pack,  
der Mann mit den  
feinen Ohren



Dipl.-Ing. Leo Kirchner  
der Autor

Messsystem: ATB

Lautsprecher: Visaton, Monacor

Weichenteile: Intertechnik

Eine Entwicklung des

Analog.on Studios

Wilhelm-Bode-Str. 38

D-38106 Braunschweig

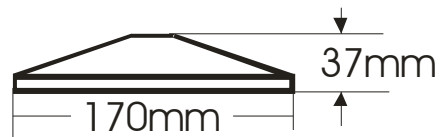
Telefon: +49531 46412

1.	Der Hochtonbereich	
W1	Wissen: Vergleich der Schallabstrahlung von Schallwand und Waveguide	3
1.1	Der Waveguide	3
1.2	Die Hochtonkalotte	3
1.3	Das Abstrahlverhalten vom Waveguide	4
1.4	Die Anpassung des Waveguides	5
1.5	Dynamic-Measurement	6
1.6	Die Montage von Waveguide und Kalotte	7
2.	Der Mittel-Tieftonbereich	8
2.1	Der Mittel -Tiefton Lautsprecher	8
2.2	Die Thiele-Small Parameter	8
2.3	Die Gehäuseberechnung	9
2.4	Messtechnische Gehäuseabstimmung	11
2.5	Unterdrückung von stehenden Wellen	13
3.	Die Weiche	14
3.1	Hochpass	14
3.2	Tiefpass	17
3.3	Das akustische Zentrum	20
3.4	Der zeitrichtige Lautsprecher	25
4.	Der Lautsprecher V-Monitor	27
4.1	Der Weichenplan	28
4.2	Der Bauplan	29
5.	Die einzigartige Technologie	30
5.1	Abstrahlverhalten	30
5.2	Die Lautsprecheranordnung	31
5.3	Der eingebaute Subwoofer	32
5.4	Der hintere Hochtöner	33
6.	Der Lautsprecher Analog.on OK <sup>2</sup>	34
6.1	Der Frequenzgang	34
6.2	Der Frequenzgang im Raum	35
6.3	Der Weichenplan	36
6.4	Der Bauplan	37
W1	Vergleich der Schallabstrahlung von Schallwand und Waveguide	39
W1.1	Die Phantom- oder Sekundärschallquelle	39
W1.2	Der Baffel Step	40
W1.3	Nachweis der Sekundärschallquelle	41
W1.4	Das zeitliche Verhalten der Schallwelle auf der Schallwand	44
W1.5	Die verzögerte Reflexion von der Schallwand	46
W1.6	Vergleich von Schallwand und Waveguide	47

## 1. Der Hochtonbereich

**W1 Wissen:** Vergleich der Schallabstrahlung von Schallwand und Waveguide

### 1.1 Der Waveguide



Ausführung;  
Kunststoff Gehäuse  
mit eingelassenen Gewinden  
zur Befestigung des Hochtöners

Bild 1.1 Waveguide WG-300  
Die Form entspricht dem Kugelwellenhorn

Bild 1.2 Ausführung

### 1.2 Die Hochtonkalotte



Technische Daten:

25mm Gewebe-Kalotte  
Magnetisch abgeschirmt  
Nennbelastbarkeit 100 / 50W  
Musikbelastbarkeit 150 / 80W  
Impedanz 8Ω  
Frequenzgang 1000Hz – 20000Hz  
Schalldruckpegel 90dB (1W/1m)  
Resonanzfrequenz 1700Hz  
Magnetische Induktion 1,3T

Bild 1.3 Hochton-Lautsprecher Visaton SC 10 N

### 1.3 Das Abstrahlverhalten vom Waveguide

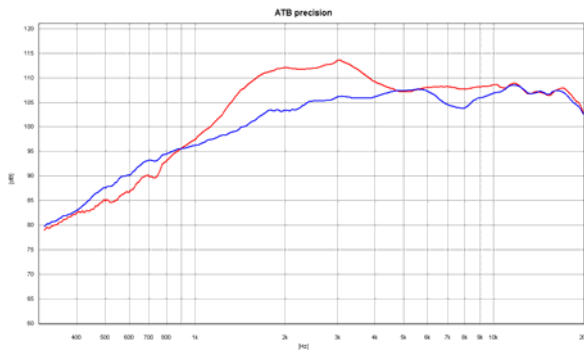


Bild 1.4 Vergleich der Frequenzgänge  
Die blaue Kurve zeigt den Frequenzgang der Kalotte und die rote den des Waveguides auf der Achse gemessen. Für die tieferen Frequenzen wird der Schalldruck durch den Strahlungswiderstand des Waveguides erhöht.

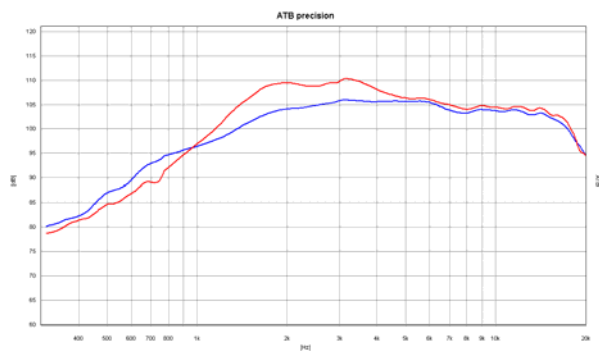


Bild 1.5 Schallleistung  
Die blaue Kurve zeigt die Schallleistung über die Frequenz der Kalotte und die rote die des Waveguides.

Zur Messung der vom Lautsprecher abgestrahlten Leistung wird das Schallfeld gemessen. Hierbei werden viele Messungen gemittelt, deren Mikrofon Positionen sich auf einer Halbkugel befinden. Oberhalb von 5kHz zeigen Waveguide und Kalotte die fast identische Leistung, da die Membranfläche gleich ist. Für tiefere Frequenzen steigt bei dem Waveguide, rote Kurve, die Schallleistung an. Hier wird durch den Strahlungswiderstand die Leistung verstärkt. Dies entspricht einer Vergrößerung der Membranfläche.

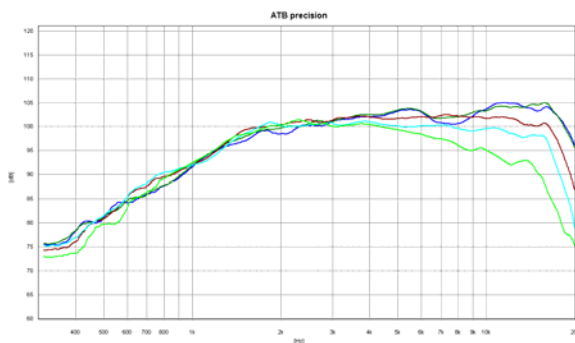


Bild 1.5 Abstrahlverhalten Kalotte  
Blau=0°, dunkelgrün=15°, rot=30°, hellblau =45°, hellgrün= 60°.  
Mit größerem Winkel fällt die Kurve zu höheren Frequenzen ab. Hierdurch wird der Klang von der Sitzposition abhängig. Mit größerem Winkel besteht ein Höhenabfall.

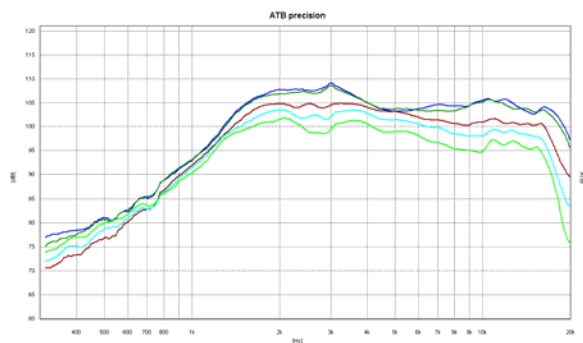


Bild 1.6 Abstrahlverhalten Waveguide  
Blau=0°, dunkelgrün=15°, rot=30°, hellblau =45°, hellgrün= 60°.  
Mit größerem Winkel wird der Schalldruck geringer, die Charakteristik der Kurve bleibt. Dies zeigt, dass der Klang für verschiedene Sitzpositionen gleich bleibt.

## 1.4 Die Anpassung des Waveguides

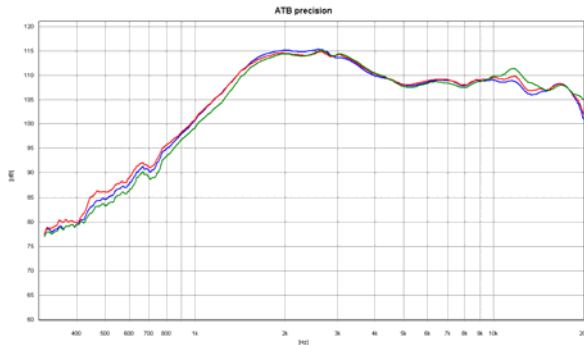


Bild 1.7 Die verschiedenen Längen  
Die grüne Kurve zeigt den Frequenzgang des originalen Waveguides, die blaue den um 1mm zu viel gekürzten Waveguide. Die rote Kurve ist am ausgeglichensten. Der Waveguide ist um 5mm gekürzt.

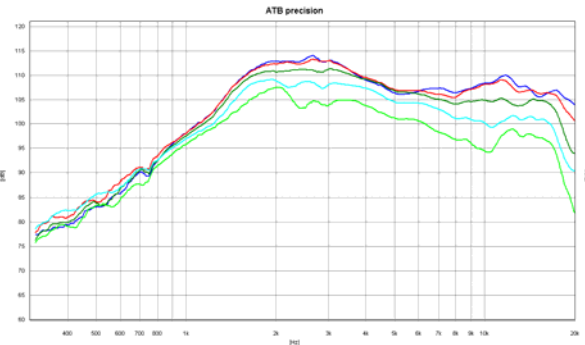


Bild 1.8 Abstrahlverhalten bei Original  
Blau=0°, dunkelgrün=15°, rot=30°, hellblau =45°, hellgrün= 60°.  
Bei dem zu langen original Waveguide ist das Abstrahlverhalten unausgeglich.

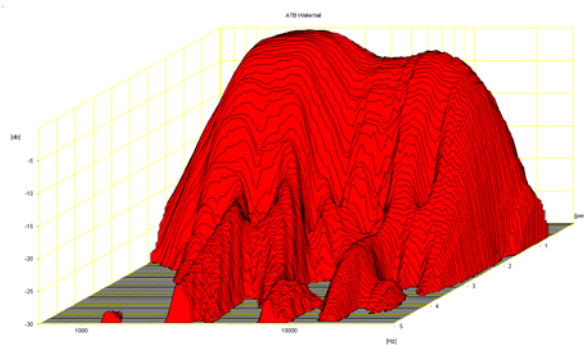


Bild 1.9 Zeitverhalten bei Original  
Die Wasserfall Messung (Zerfallspektrum) zeigt die Eigenschaften vom Waveguide am besten. Der originale Waveguide besitzt im Hochtonbereich eine zweite Resonanz.

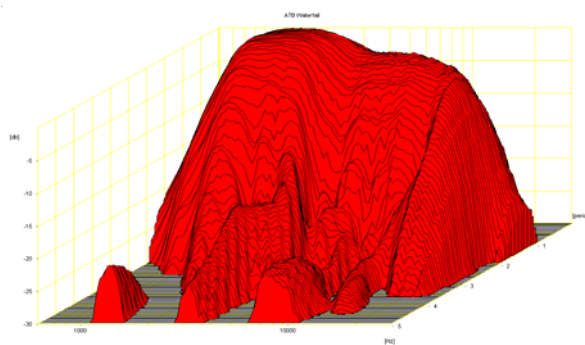


Bild 1.10 Zeitverhalten zu kurz  
Bei dem 1mm zu kurzen Waveguide sind die Resonanzen stärker ausgeprägt.

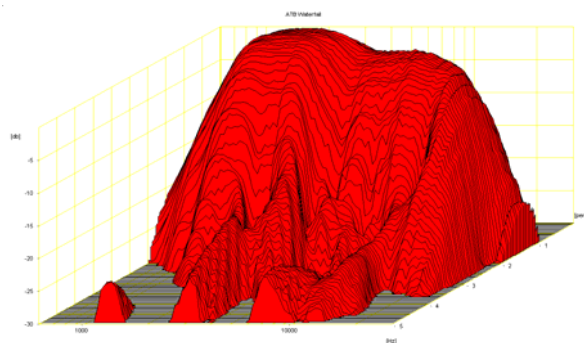


Bild 1.11 Zeitverhalten bei richtiger Länge  
Der um 5mm gekürzte Waveguide zeigt das ausgeglichene Zeitverhalten.

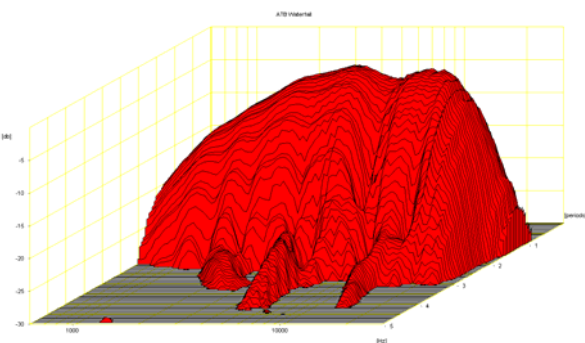


Bild 1.12 Zeitverhalten Kalotte  
Das Zeitverhalten der Kalotte zeigt zwei Einbrüche.

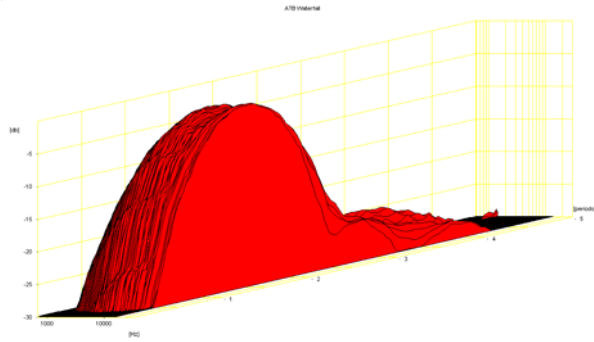


Bild 1.13 Die 1. Auslöschung bei Kalotte  
Der Einbruch entsteht durch die Reflexion  
von der Schallwand.

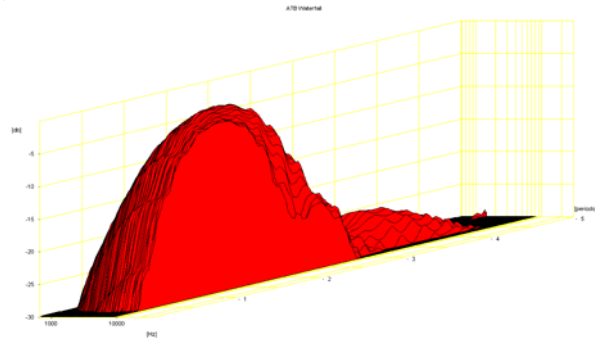


Bild 1.14 Die 2. Auslöschung bei Kalotte  
Der Einbruch für hohe Frequenzen  
entsteht durch die nicht so optimale  
Konstruktion des Hornansatzes der Kalotte.

## 1.5 Dynamic-Measurement

Bei der Dynamic-Measurement Messung wird der Lautsprecher mit einer halben Sinusschwingung angeregt. So wird das Impulsverhalten getestet, da der Lautsprecher im uneingeschwingenen Zustand gemessen wird.

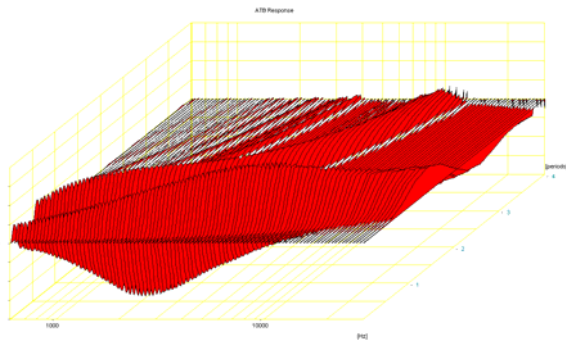


Bild 1.15 Impulsverhalten des Waveguide

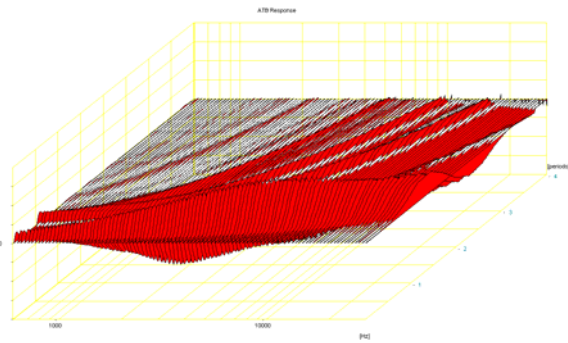


Bild 1.16 Impulsverhalten Kalotte

Durch den höheren Strahlungswiderstand des Waveguides wird die Resonanz der Kalotte sichtbar. Dies zeigt sich im linken Bild durch das stärkere Durchschwingen sowie durch das nach hinten laufende Gebirge. Mit einem Saugkreis in der Weiche wird die Resonanz unterdrückt.

## 1.6 Die Montage von Waveguide und Kalotte



Bild 17 Der Waveguide wird gekürzt  
Das Bild zeigt den originalen und um 5mm gekürzten Waveguide. Dies kann mit der Feile durchgeführt werden.



Bild 1.18 Der Waveguide und Kalotte  
Der Waveguide wird mit der Kalotte verschraubt. Hierfür müssen in die Frontplatte der Kalotte Halblöcher gefräst werden.

Das Kürzen und Fräsen wird am besten mit speziellen Werkzeugen durchgeführt.

## 2. Der Mittel-Tieftonbereich

### 2.1 Der Mittel -Tiefton Lautsprecher



Technische Daten:

Größe:	17cm (6,5“)
Nennbelastbarkeit:	50W
Musikbelastbarkeit:	80W
Impedanz:	4Ω
Mittlerer Schalldruckpegel:	87dB1W/1m
Schalldruckpegel:	87dB1W/1m
Maximaler Hub:	20mm
Linearer Hub:	+4,2mm
Schwingspulendurchmesser:	25mm
Gewicht:	0,95kg

Bild 2.1 Der W170S/4

Der W170S wurde wegen seiner musikalischen Eigenschaften gewählt. Das Klangbild ist sehr natürlich ohne das Aufgesetzte der modernen Chassis. Durch die leichte, beschichtete Papiermembran ist er sehr schnell und detailreich. Der Lautsprecher wird seit 16 Jahren in einer Regalbox eingesetzt. Die Box verwendet das Gehäuse der Visaton Alto I. Der Hochtöner ist eine Audax Kalotte.

### 2.2 Die Thiele-Small Parameter

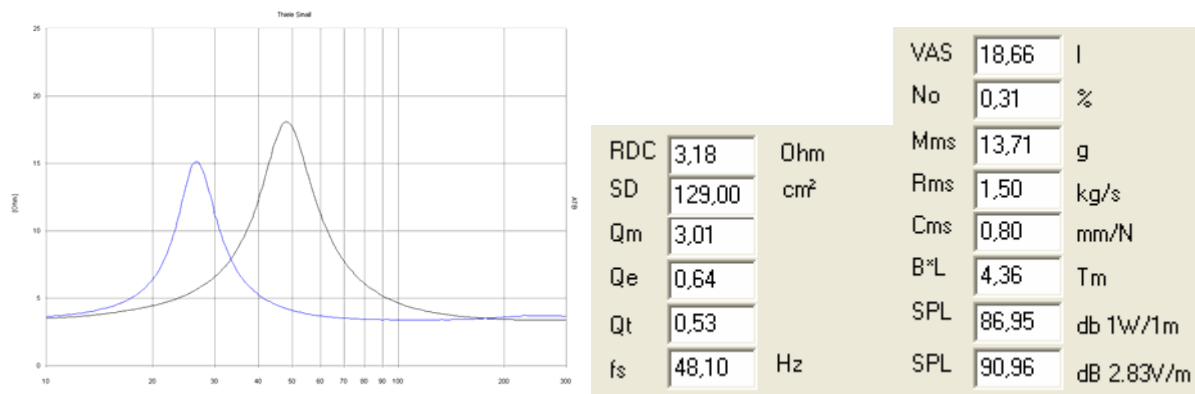


Bild 2.2 Die Thiele-Small Parameter vom W170S/4

Ein  $Q_t$  von 0,53 lässt den Lautsprecher entsprechend der üblichen Vorstellungen nicht als vorteilhaft erscheinen. Dieser hohe Wert entsteht durch die geringe bewegte Masse sowie die höhere Resonanzfrequenz. Beide Werte lassen aber auf eine sehr gute Impulswiedergabe schließen. Deshalb lohnt sich die Suche nach einer Gehäusekonstruktion, die die übliche Bassreflex Abstimmung nicht verlangt. Ein geschlossenes Gehäuse erfordert ein Volumen von 34l. Dieses ist für einen wohnraumtauglichen Lautsprecher zu groß. Die folgenden Berechnungen zeigen die Schwierigkeiten bei der Bassabstimmung.

## 2.3 Die Gehäuseberechnung

Driver name	W170S/4	Net box volume (Vb) l	59,001
Box type	Bass reflex	Port diameter (Dp) cm	5,731
Number of equal driver	1,0	Port length (Lv) cm	6,982
Resonance frequency (fs) Hz	48,0	Port resonance frequency (fp) Hz	34,168
Equivalent volume (Vas) l	18,66	-3 dB frequency (f3) Hz	29,712
Total Q (Qt)	0,563	Reference SPL dB	87,03
Mechanical Q (Qm)	2,01	Efficiency bandwidth produkt (EBP)	76,835
Electrical Q (Qe)	0,64	Alpha (fcb/fs) <sup>2</sup> -1 (a)	0,316
DC resistance (Re) Ohms	3,3	Ratio fp/fs (h)	0,712
Serial resistance (Rs) Ohms	0,3		
MONACOR MBR		SUGGESTED BOX (inclusive Vb-)	
Effective cone area (Sd) cm <sup>2</sup>	129,0	Internal width cm	31,319
Port area (Ap) cm <sup>2</sup>	25,8	Internal height cm	48,936
Leakage-Q (Ql)	7,0	Internal depth cm	39,149
Leakage volume (Vb-) l	0,0	Box volume (VbG) in l	60,001

Bild 2.3 Berechnung des Bassreflex Gehäuses

Das entsprechend der Rechnung optimale Bassreflexgehäuse hat ein Volumen von 60l. Dieses Gehäuse ist aber für einen 17cm Lautsprecher, der in einem 2-Wege System den Mitteltonbereich übertragen soll, nicht geeignet. Dem Lautsprecher fehlt die Federkraft der Luft, die für eine impulsrichtige Wiedergabe der Mitten notwendig ist.

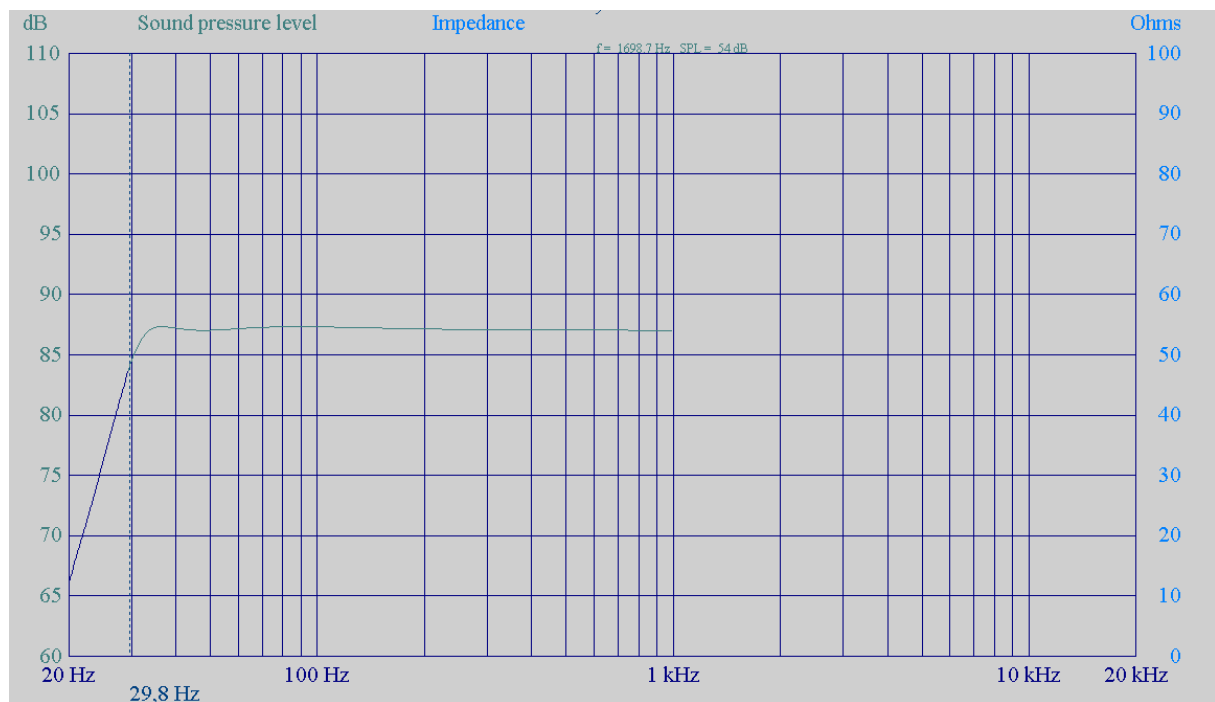


Bild 2.4 Der Frequenzgang im 60l Gehäuse

Wird der Lautsprecher in einem 3-Wege System als Bass eingesetzt, liegt die Grenzfrequenz bei 30Hz. Dies ist ein sehr guter Wert, trotzdem wird für ein 60l Gehäuse ein größerer Lautsprecher gewählt, der höhere Schalldrücke erzeugen kann.

Driver name	W170S/4	Net box volume (Vb) l	18,0
Box type	Bass reflex	Port diameter (Dp) cm	4,787
Number of equal driver	1,0	Port length (Lv) cm	22,034
Resonance frequency (fs) Hz	43,0	Port resonance frequency (fp) Hz	34,168
Equivalent volume (Vas) l	13,56	-3 dB frequency (f3) Hz	49,957
Total Q (Qt)	0,353	Reference SPL dB	87,03
Mechanical Q (Qm)	3,01	Efficiency bandwidth produkt (EBP)	76,835
Electrical Q (Qe)	0,64	Alpha (fcb/fs) <sup>2</sup> -1 (a)	1,037
DC resistance (Re) Ohms	3,2	Ratio fp/fs (h)	0,712
Serial resistance (Rs) Ohms	0,3		
MONACOR MBR		SUGGESTED BOX (inclusive Vb-)	
Effective cone area (Sd) cm <sup>2</sup>	129,0	Internal width cm	21,347
Port area (Ap) cm <sup>2</sup>	18,0	Internal height cm	33,355
Leakage-Q (Ql)	7,0	Internal depth cm	26,684
Leakage volume (Vb-) l	0,0	Box volume (VbG) in l	19,0

Bild 2.5 Berechnung für ein 18l Gehäuse

Für den 17cm Lautsprecher erscheint ein 18l Gehäuse praxisgerecht. Für das Gehäuse wird die Länge des Bassreflex Rohres berechnet. Die 18l sind ausreichend, da das Vorbild, die Alto I, ein Gehäusevolumen von 13l besitzt. Durch die entsprechende Bedämpfung des Gehäuses besitzt die Alto I keine störende Betonung des Tieftonbereichs.

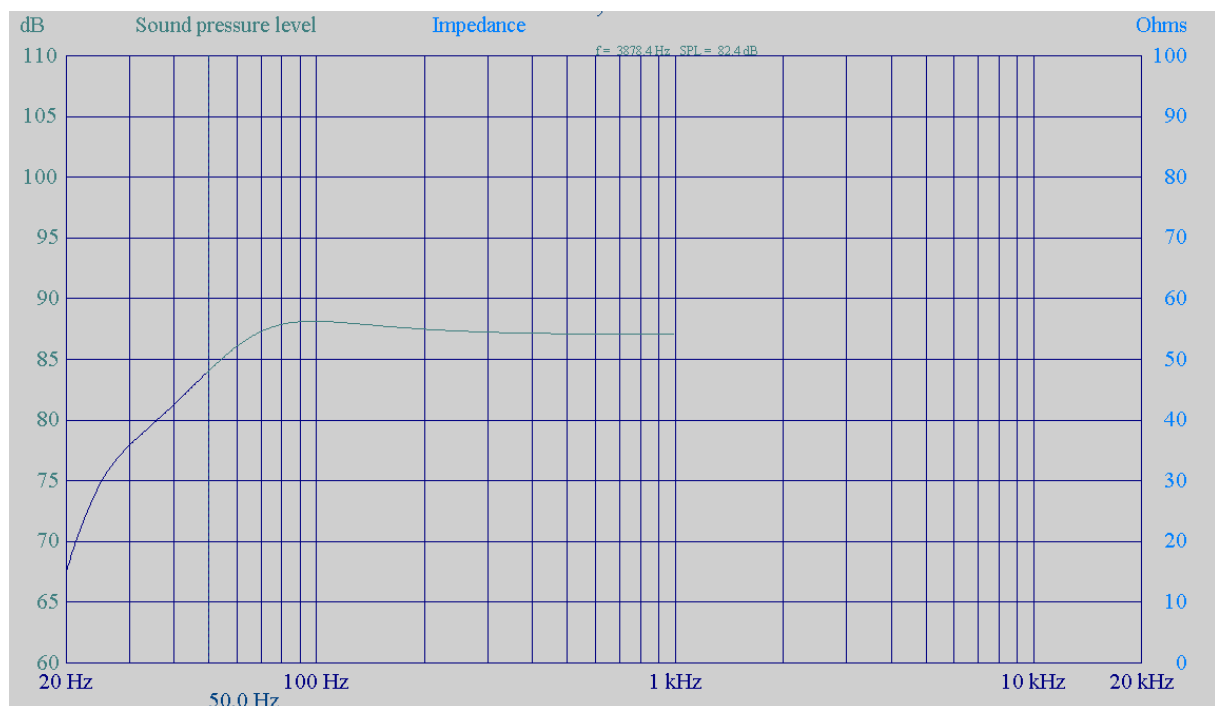
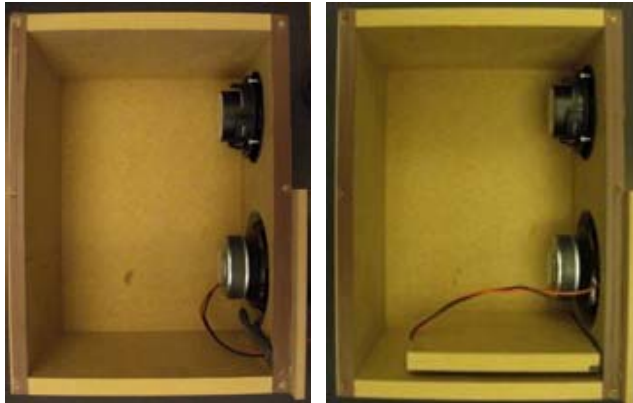


Bild 2.6 Der Frequenzgang im 18l Gehäuse

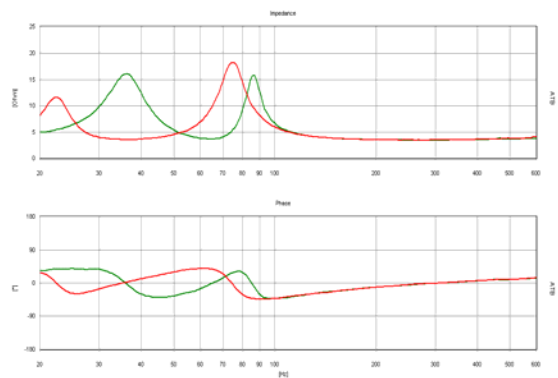
Im unbedämpften 18l Gehäuse zeigt der Frequenzgang eine Überhöhung von 1,2dB bei 90Hz. Diese leichte Überhöhung ist durch die Gehäuse Bedämpfung zu bedämpfen.

Da die Rechnungen nicht befriedigend ausfielen, soll messtechnisch eine für den Tieftöner optimale Gehäusekonstruktion gesucht werden.

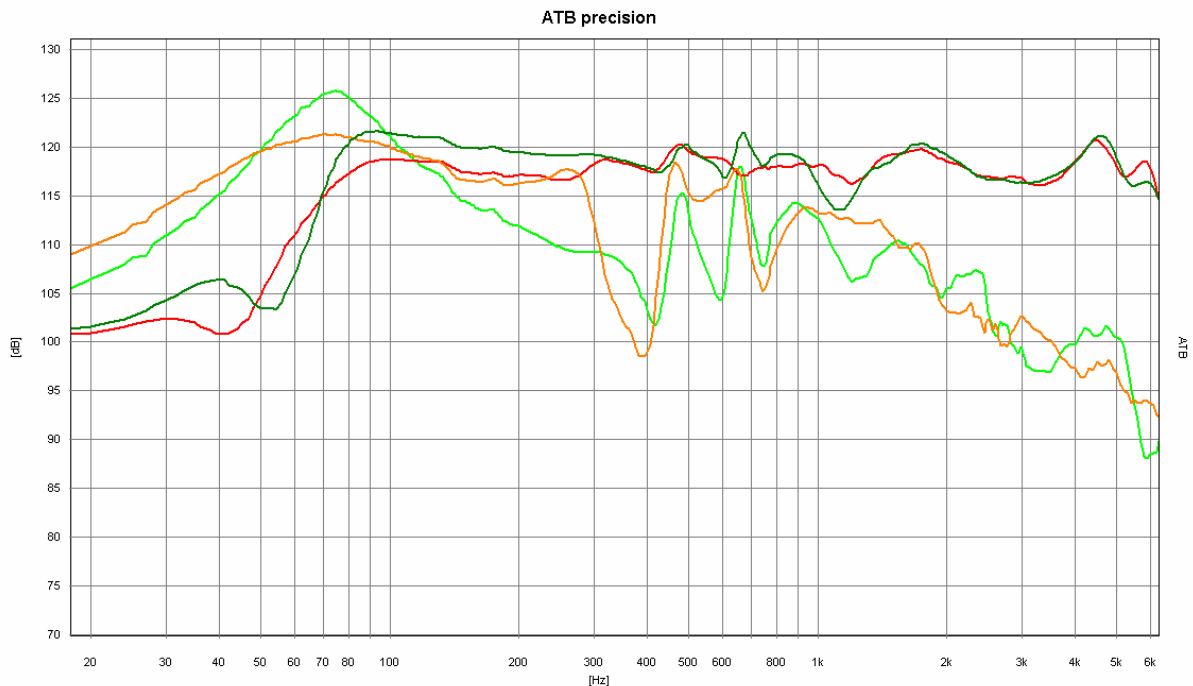
## 2.4 Messtechnische Gehäuseabstimmung



**Bild 2.7 Bassreflexgehäuse**  
Die Bilder zeigen die Gehäuse mit dem Bass-Reflexkanal von 3cm und 22cm Länge. Die Box mit dem 22cm langen Kanal entspricht der berechneten Abstimmung.



**Bild 2.8 Impedanzmessungen**  
Die Impedanzkurven zeigen die Abstimmungen. Die grüne Kurve zeigt die hohe Abstimmung mit 70Hz und die rote die berechnete mit 35Hz.



**Bild 2.9 Die Frequenzgänge von Bass und Bassreflexöffnung im Nahfeld gemessen**  
Die grüne Kurve ist der zu tiefen Frequenzen ansteigende Frequenzgang des Tieftöners. Da auch die hellgrüne Kurve der Öffnung sehr stark ausgeprägt ist, besteht eine Überhöhung im Tieftonbereich. Die rote Kurve zeigt die berechnete Abstimmung. Diese ist in der Praxis viel zu tief. Der Tieftonbereich fällt zu früh ab und kann nicht durch den schwachen Schalldruck der Bassreflexöffnung, orange Kurve, ergänzt werden.



Bild 2.10 Ausführungen des Bassreflexkanals.

Da die berechnete Bassabstimmung nicht günstig ist, werden andere Abstimmungen ausprobiert. Die linke entspricht der TQWT. Bei den beiden anderen wird durch die Schrägstellung des Brettes ein ausgeglichener Schalldruck an der Öffnung erreicht.

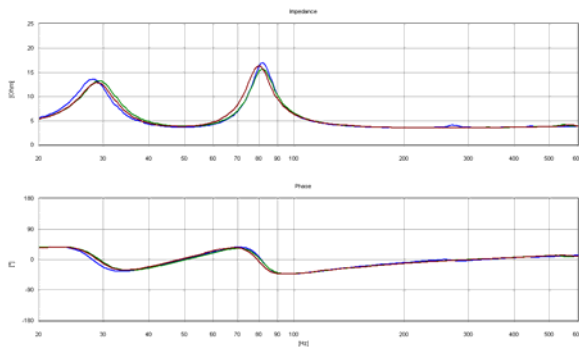


Bild 2.11 Impedanzmessungen  
Die Impedanzkurven zeigen nur geringe Unterschiede. Alle Abstimmungen sind möglich.

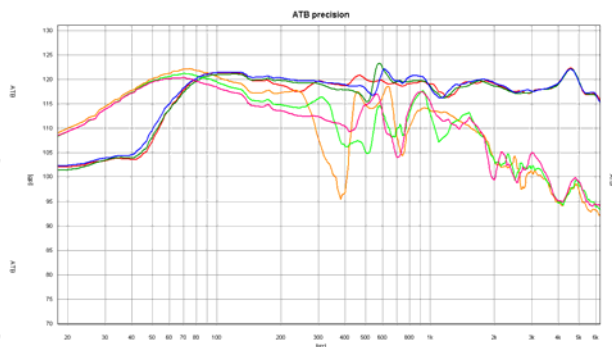


Bild 2.12 Frequenzgänge  
Bei den Frequenzgängen fallen die rote, der Frequenzgang der TQWT, und orange Kurve, die Öffnung der TQWT, auf. Diese Abstimmung ist ungünstig.



Bild 2.13 gewähltes Gehäuse  
Der dreieckige Ausschnitt des Brettes vermindert Strömungsgeräusche

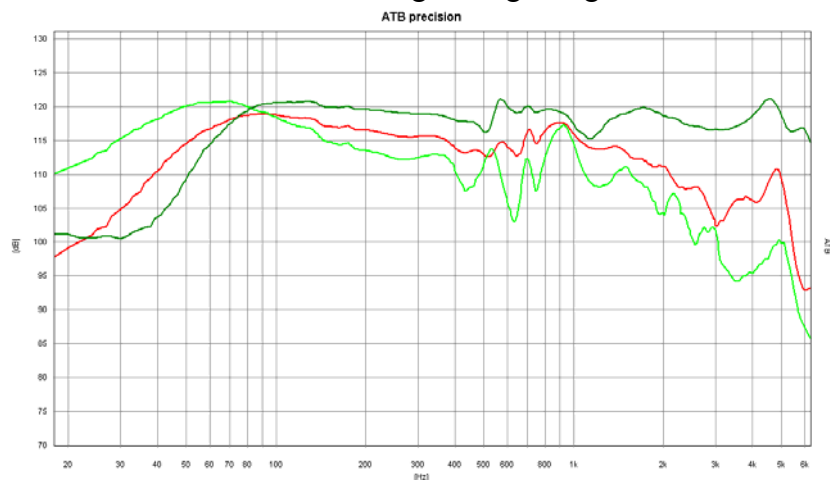
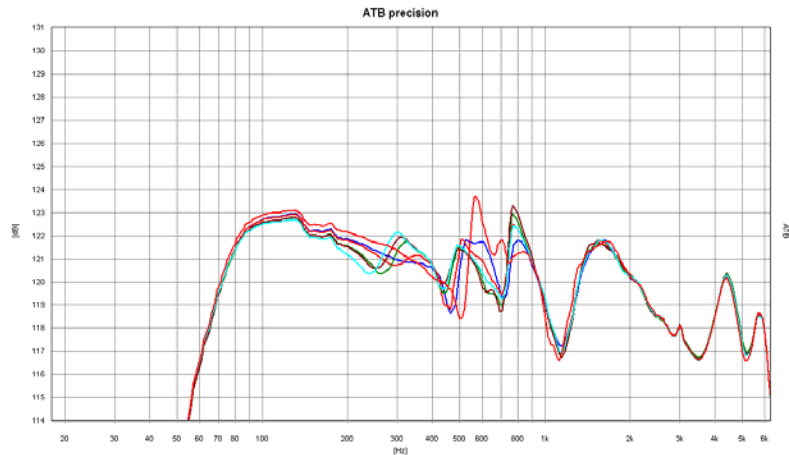


Bild 2.14 Frequenzgänge der gewählten Abstimmung  
Das Bild zeigt die Überlagerung von Tieftöner, grün, und Bassöffnung, hellgrün, zum Frequenzgang, rot.

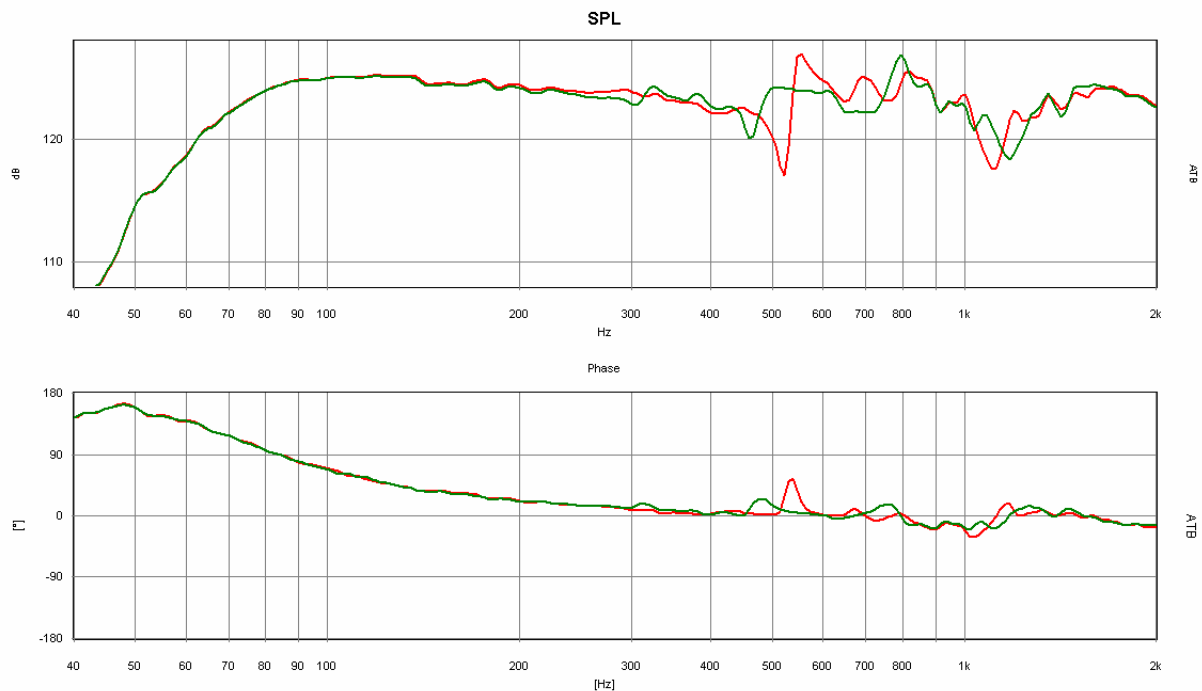
## 2.5 Unterdrückung von stehenden Wellen



**Bild 2.15 Brett**  
Um die stehenden Wellen im Gehäuse zu unterdrücken, wird das Brett eingesetzt



**Bild 2.16 Messung zum Ermitteln des optimalen Brettes**  
Die Frequenzgangkurve in Bild 2.13 zeigt bei 500Hz einen starken Schlenker. Dieser entsteht durch eine stehende Welle im Gehäuse, rote Kurve im oberen Bild. Die Messung zeigt Bretter mit unterschiedlicher Länge und Lage. Im Bereich um 250Hz werden auch neue Resonanzen aufgebaut, wenn Länge und Lage nicht stimmen.



**Bild 2.17 Akustische SPL und Phasen Messung**  
In dem Bild ist der Frequenz- und Phasengang des Lautsprechers gezeigt. Die rote Kurve zeigt den Frequenzgang im Nahfeld gemessen ohne Brett zur Unterdrückung der stehenden Welle. Der Schlenker bei 500Hz ist sehr deutlich zu sehen. Zu diesem Schlenker, da er durch eine Resonanz entsteht, gehört auch der Sprung in der Phase. Durch das Brett, grüne Kurve, wird die Resonanz unterdrückt. Dies führt zu einer klareren Klangwiedergabe.

### 3. Die Weiche

#### 3.1 Hochpass

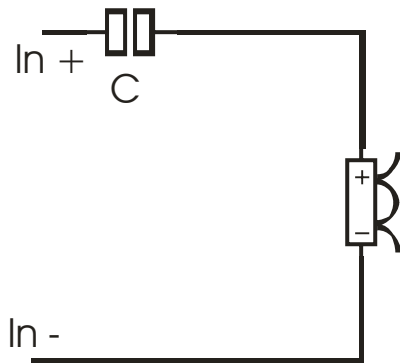


Bild 3.1 Hochpass  
Der Hochpass 1. Grades besteht aus der Serienschaltung des Kondensators C und Hochtöner

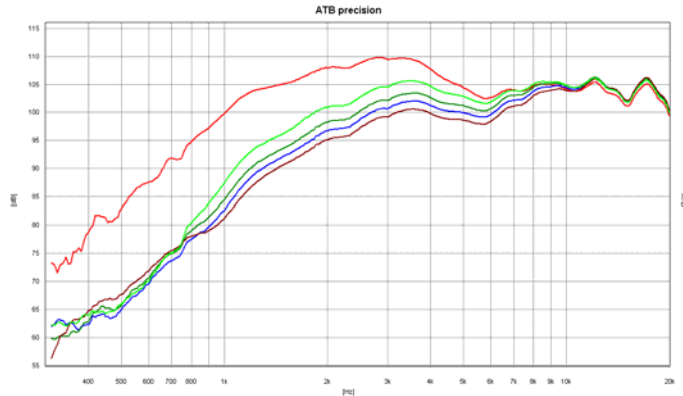


Bild 3,2 Frequenzgänge Hochpass 6dB/Oktave  
Die rote Kurve zeigt den Frequenzgang des Hochtöners ohne Weiche.  
Bei den anderen Kurven hat C folgende Werte:  
Braun=2,2 $\mu$ F, blau=2,7 $\mu$ F, grün=3,3 $\mu$ F, hellgrün=4,7 $\mu$ F

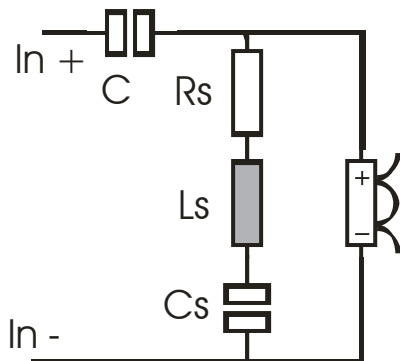


Bild 3.3 Hochpass  
Der Saugkreis besteht aus der Güten  
Serienschaltung von  $R_s$ ,  $L_s$  und  $C_s$ .  $R_s$  bestimmt die Güte.

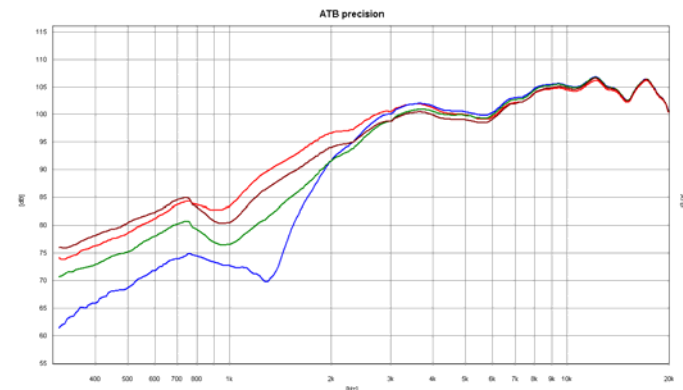


Bild 3.4 Frequenzgänge mit Saugkreis  
Das Bild zeigt die Frequenzgänge für verschiedene des Saugkreises. Die blaue Kurve zeigt die kleinste Güte  $R_s=0$ . Bei grün ist  $R_s=4,7\Omega$ , braun  $R_s=18\Omega$  und bei rot ist  $R_s=\infty$ , der Saugkreis ist nicht angeschlossen.

Bei den Messungen werden verschiedene Dimensionierungen gezeigt. Die eigentlichen Werte werden bei der Kombination mit dem Tiefpass für den Tieftöner ermittelt.

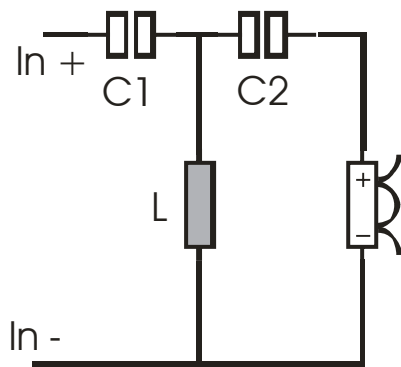


Bild 3.5 Hochpass  
Das Bild zeigt einen Hochpass 3. Ordnung, der standardmäßig für vergleichbare Hochtöner eingesetzt wird.

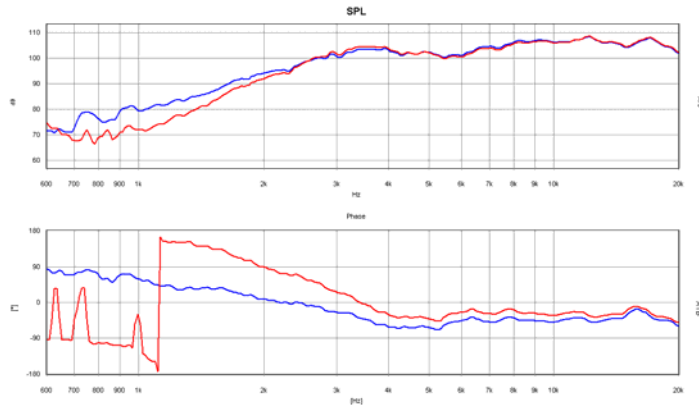


Bild 3.6 SPL und akustischer Phasenfrequenzgang  
Das Bild zeigt den Waveguide mit der 6dB/Oktave Weiche, blau, und der 18dB/Oktave Weiche, rot. Bei der 18dB/Oktave Weiche verhindert die Phasendrehung von 270° einen zeitrichtigen Lautsprecher.

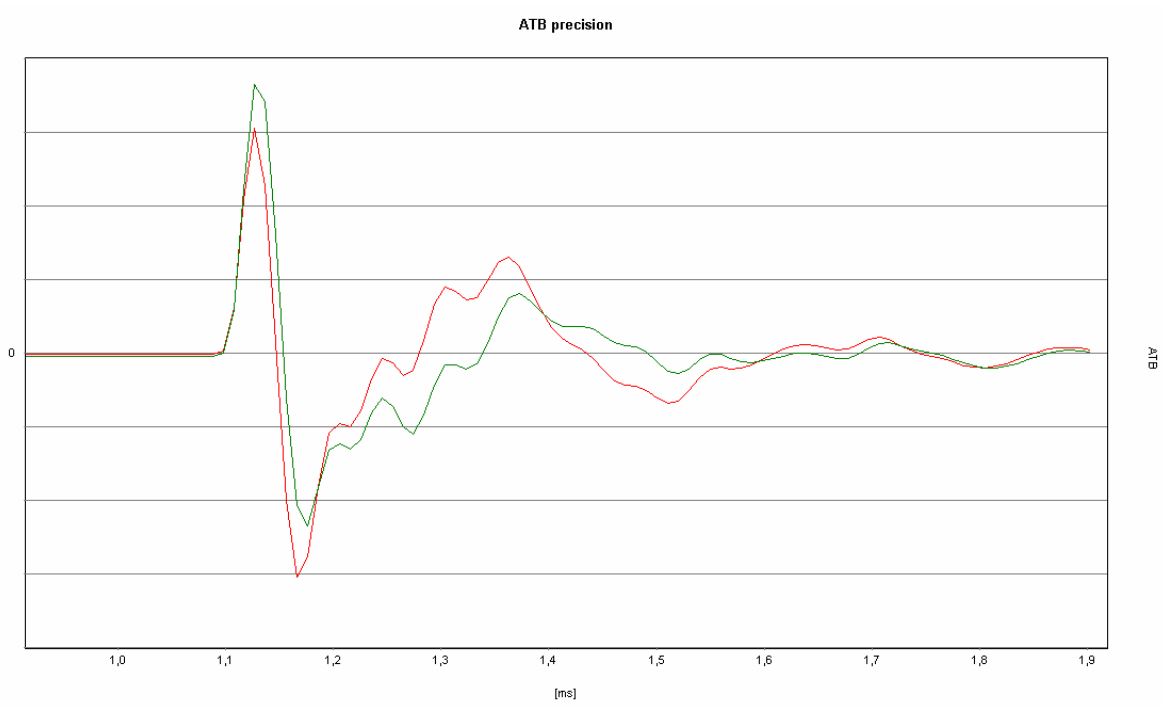


Bild 3.7 Sprungantwort  
Die Sprungantwort zeigt das zeitliche Verhalten eines Lautsprechers. Die grüne Kurve zeigt den Waveguide Hochtöner mit der 6dB/Oktave + Saugkreis Weiche, die rote Kurve den Hochtöner mit der 18dB/Oktave Weiche. Die grüne Kurve hat am Anfang eine höhere Amplitude. Dies bedeutet, dass der Hochtöner besser einschwingt, schneller ist. Beim Überschwingen zeigt die grüne Kurve eine kleinere Amplitude. Auch beim Ausschwingen ist die Amplitude entschieden kleiner. Dies bedeutet, dass der Lautsprecher besser bedämpft ist. Das Impulsverhalten eines Lautsprechers mit der 18dB/Oktave, rote Kurve, ist für einen impulsrichtigen Lautsprecher nicht geeignet.

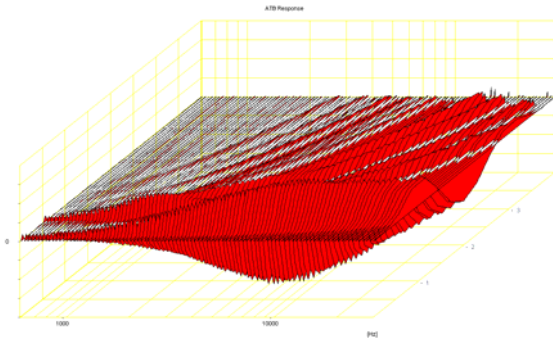


Bild 3.8 Dynamic-Measurement 6dB/Oktave

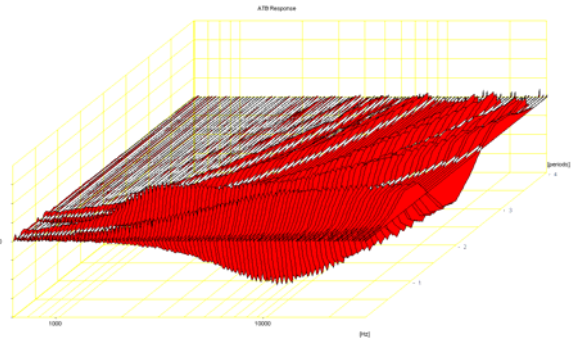


Bild 3.9 Dynamic-Measurement 18dB/Oktave

Die Dynamic-Measurement Messung zeigt eine Sprungantwort mit Frequenzachse. So wird die Sprungantwort besser interpretierbar. Das in der Sprungantwort erscheinende stärkere Ausschwingen wird durch die 3D Darstellung interpretierbar. Deutlich ist das höhere Gebirge bei 2kHz in Bild 3.9 zu sehen. Dies bedeutet, dass die Resonanz des Hochtöners schlechter bedämpft wird.

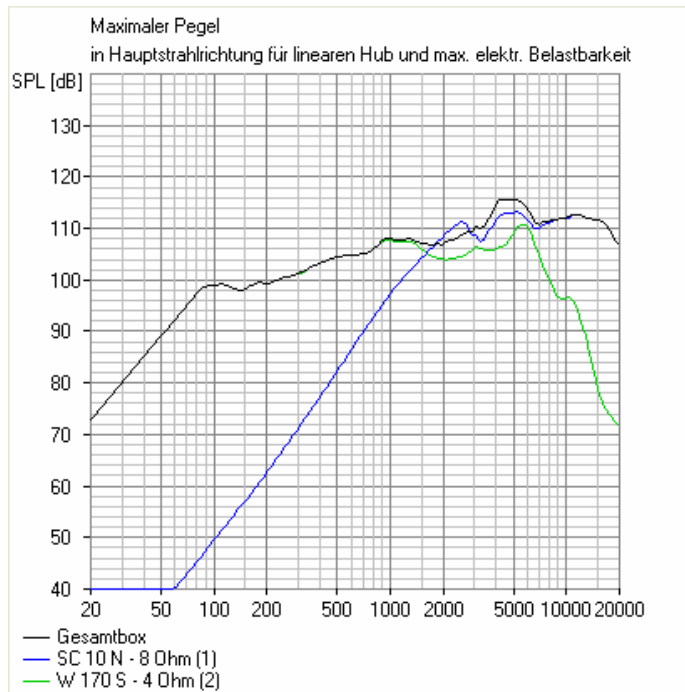


Bild 3.10 Der maximale Pegel

Bei der Entwicklung von Frequenzweichen muss die Belastbarkeit der Lautsprecher von der entwickelten Weiche angesteuert berechnet werden. Die Berechnungen für die 6dB/Oktave Weiche zeigen, dass die Weiche ein optimales Leistungsverhalten besitzt.

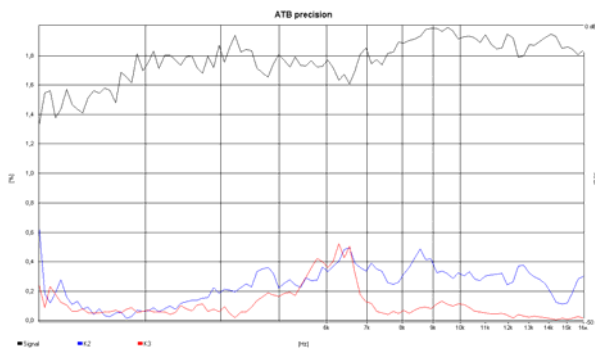


Bild 3.11 Klirrfaktor bei 90dB/1m  
Bei normaler Abhörlautstärke sind keine Verzerrungen zu hören.

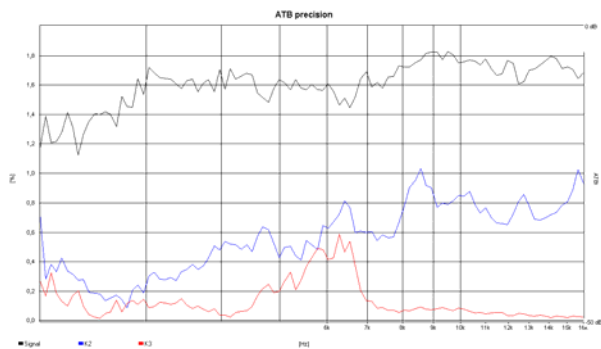


Bild 3.12 Klirrfaktor bei 96dB/1m  
Bei sehr hoher Lautstärke liegen die Verzerrungen unter 1%, ein sehr guter Wert.

### 3.2 Tiefpass

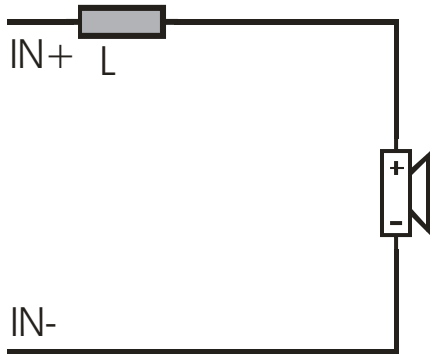


Bild 3.13 Tiefpass  
Der Schaltplan zeigt den Tiefpass 1. Ordnung, 6dB/Oktave.

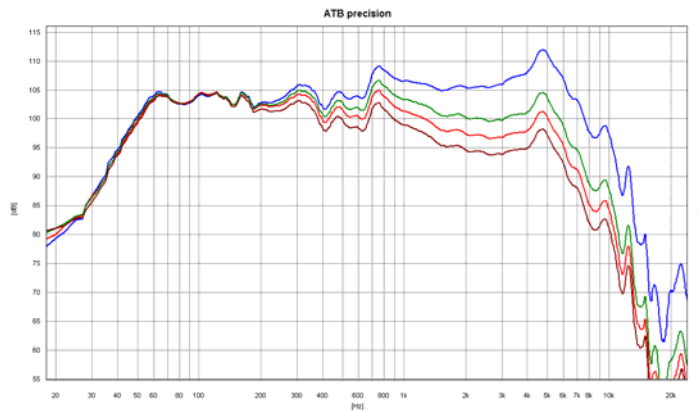


Bild 3.14 Frequenzgänge für L  
Die Frequenzgänge in Abhängigkeit von der Induktivität L. Ohne L ist blau, L=0,47mH grün, L=0,82mH rot, L=1,2mH braun. Hierbei kommt es auf einen geraden Verlauf unterhalb 1kHz an. Gewählt wird L=0,82mH.

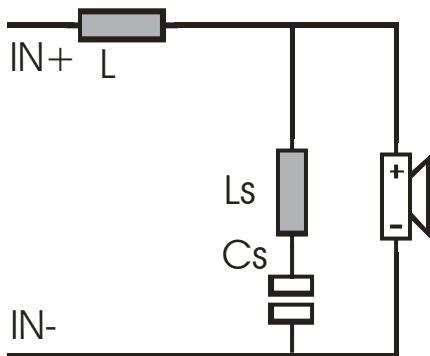


Bild 3.15 Tiefpass  
Der Schaltplan zeigt den parallel zum Tieftöner geschalteten Saugkreis zur Unterdrückung der Membranresonanz

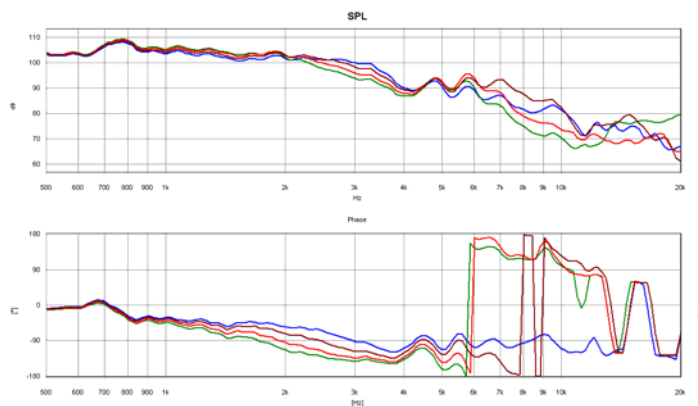


Bild 3.16 Frequenzgänge vom Saugkreis ohne R  
Bei der Weichenentwicklung muss mit dem Frequenzgang auch die Phase gemessen werden. Diese ist für die Kombination entscheidender als irgendeine kleine Unregelmäßigkeit im Frequenzgang.  
Ein Saugkreis besitzt bei gleicher Resonanzfrequenz entsprechend der Werte für  $L_s$  und  $C_s$  verschiedene Güten. Von der grünen zur blauen Kurve erhöht sich die Güte.

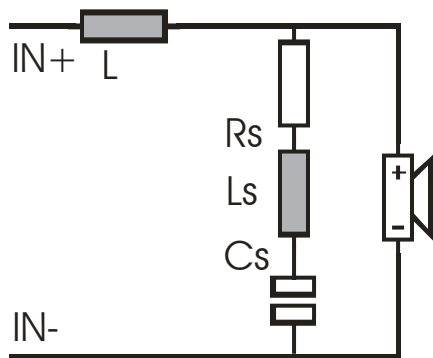


Bild 3.17 Tiefpass  
Die Güte des Saugkreises wird auch durch  $R_s$  bestimmt.

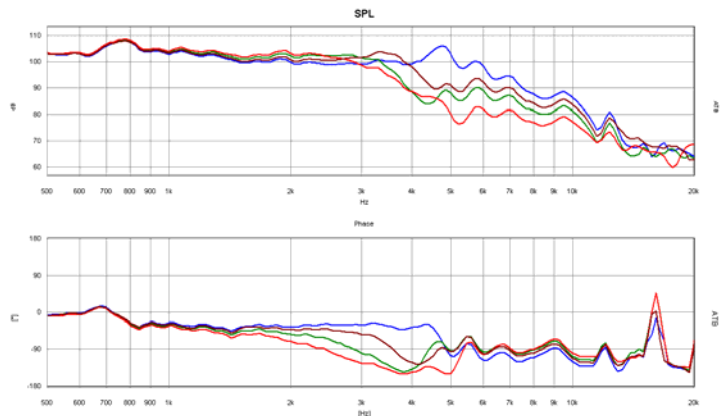


Bild 3.18 Frequenzgänge in Abhängigkeit von  $R_s$   
Die Kurven zeigen, wie der Widerstand  $R_s$  im Saugkreis den Frequenzgang bestimmt. Für die Messung ist  $L_s=0,22\text{mH}$  und  $C_s=5,6\mu\text{F}$ . Ohne Saugkreis blau,  $R_s=0$  rot,  $R_s=1\Omega$  grün,  $R_s=4,7\Omega$  braun. Wegen der geringeren Phasendrehung wird  $R_s=1\Omega$  gewählt.

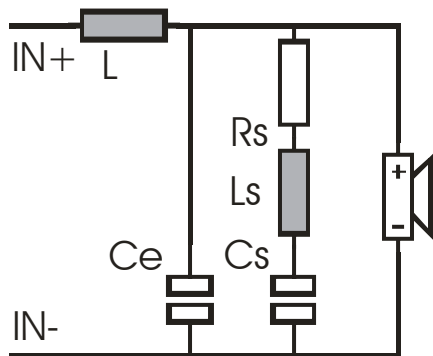


Bild 3.19 Tiefpass  
Durch den Kondensator  $C_e$  entsteht eine 12dB/Oktave Weiche. Dies aber nur zum Test von  $C_e$ .

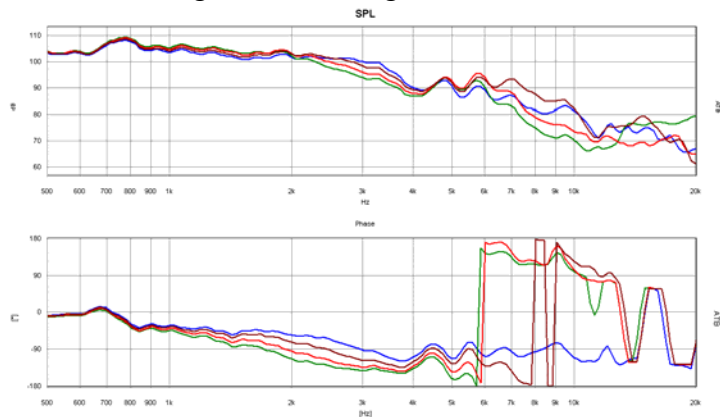


Bild 3.20 Frequenzgänge in Abhängigkeit von  $C_e$   
Der Kondensator  $C_e$  soll eine größere Unterdrückung der hohen Frequenzen bewirken. Dies trifft aber nur bei  $C_e=15\mu\text{F}$  grün und  $C_e=10\mu\text{F}$  rot zu.

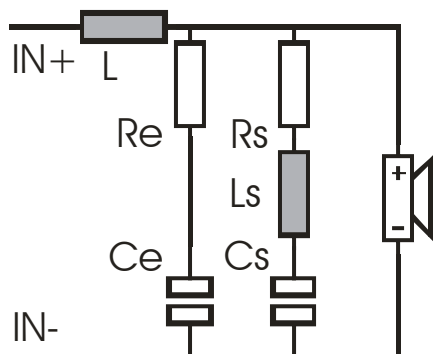


Bild 3.21 Tiefpass  
Mit  $R_e$  entsteht eine 6dB/Oktave Weiche mit Equalizer.

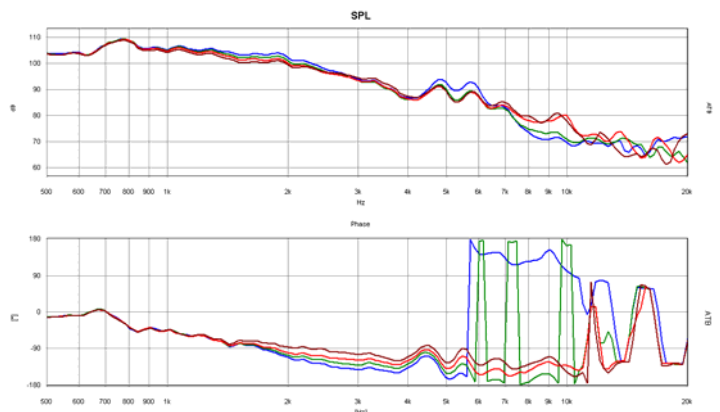
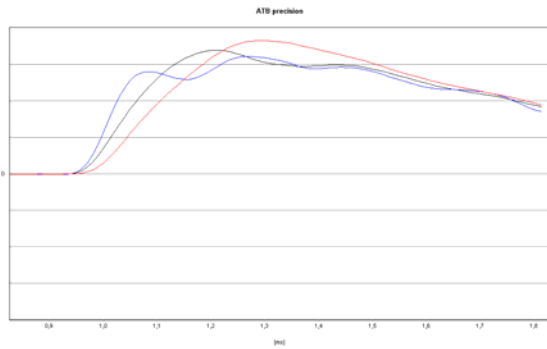
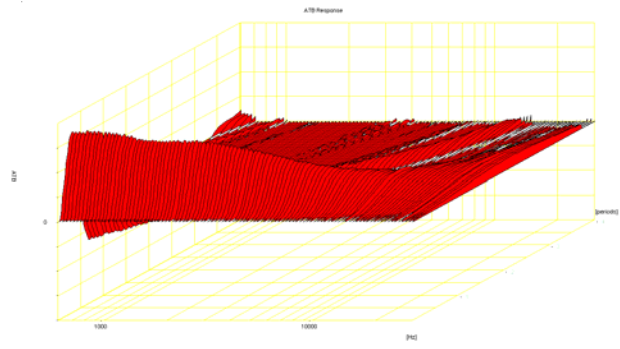


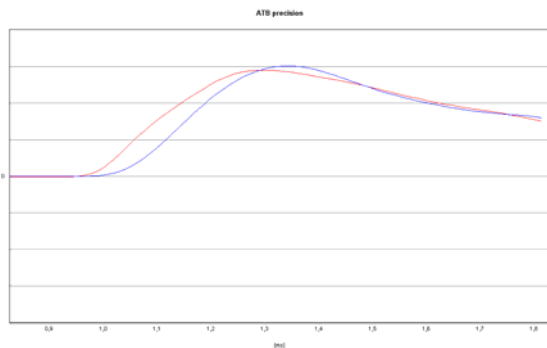
Bild 3.22 Frequenzgänge in Abhängigkeit von  $R_e$   
 $R_e=0$  blau,  $R_e=1\Omega$  grün,  $R_e=2,2\Omega$  rot,  $R_e=4,7\Omega$  braun. Gewählt wird  $R_e=2,2\Omega$ .



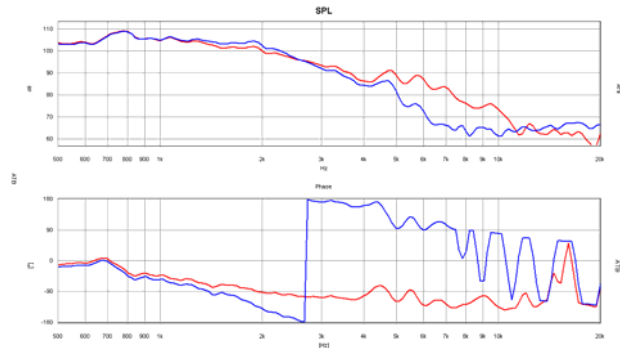
**Bild 3.23 Sprungantwort**  
Die rote Kurve zeigt die Sprungantwort des entwickelten Tiefpasses. Blau zeigt den Tiefpass ohne Saugkreis und Equalizer. Bei Schwarz fehlt der Equalizer.



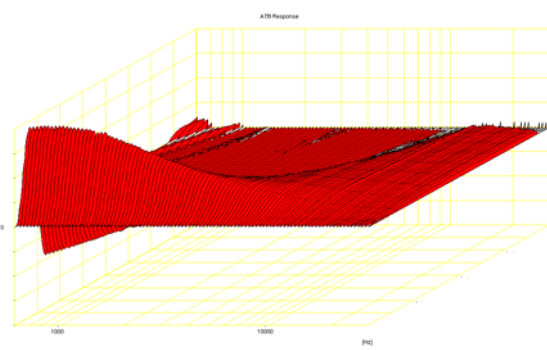
**Bild 3.24 Dynamic-Measurement**  
Die Messung zeigt den Tieftöner ohne Saugkreis und Equalizer. Der nach hinten laufende Gebirgszug der Membranresonanz ist gut zu sehen.



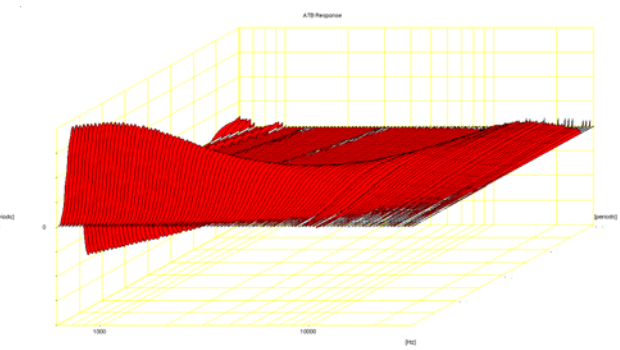
**Bild 3.25 Sprungantwort**  
Der Vergleich der Sprungantwort von entwickelter, rot, und 18dB/Oktave Weiche, blau, zeigt die kürzere Verzögerung der entwickelten Weiche



**Bild 3.26 SPL und Phase**  
Die 18dB/Oktave besitzt eine schärfere Trennung. Durch die starke Phasendrehung 270° ist die Weiche für einen zeitrichtigen Lautsprecher nicht geeignet.



**Bild 3.27 Dynamic-Measurement**  
Die Messung zeigt das gute Zeitverhalten des entwickelten Tiefpasses. Auch von den Resonanzen der Lautsprechermembran ist nichts zu sehen.



**Bild 3.28 Dynamic-Measurement**  
Die Messung der 18dB/Oktave Weiche zeigt eine Verzögerung der hohen Töne. Dies verhindert bei der Kombination mit dem Hochtöner die zeitrichtige Wiedergabe.

### 3.3 Das akustische Zentrum

Ohne Weiche

Zum zeitrichtigen Aufbau einer Lautsprecherbox müssen die Phasenlagen der Chassis an die Weiche angeschlossen, übereinanderliegen. Hierbei ist das Akustische Zentrum, oder der Schallentstehungsort (SEO), entscheidend.

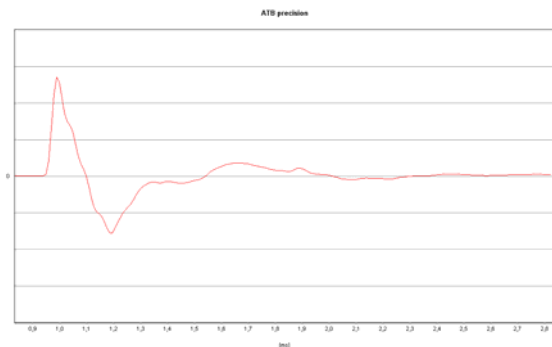


Bild 3.29 Sprungantwort vom SC10N  
Das Bild zeigt die Sprungantwort zum Messen des Abstandes von Mikrofon und Lautsprecher. Die Messung entspricht der Messung der Impulsantwort zur Abstandsbestimmung.

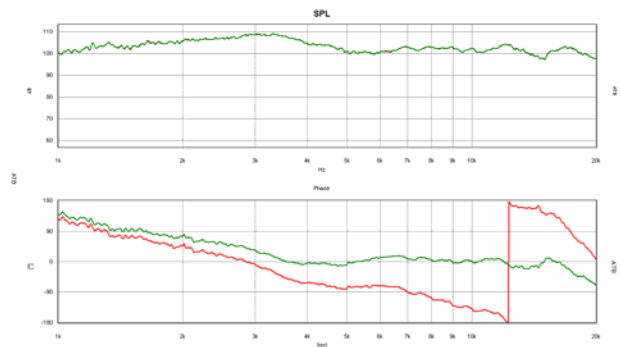


Bild 3.30 Akustische Phase  
Phasenmessung entsprechend dem mit der Sprungantwort gemessenen Abstandes, 30,7cm, rote Kurve. Die grüne Kurve zeigt den Abstand zum Ort der Schallentstehung, 32,5cm.

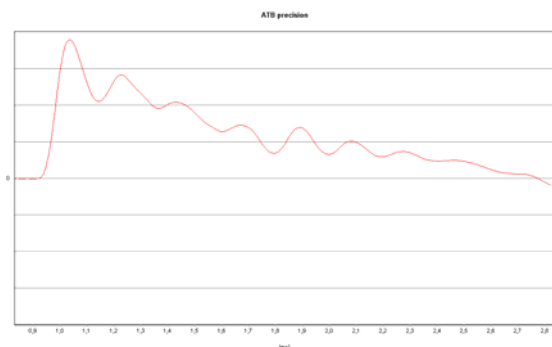


Bild 3.31 Sprungantwort vom W170S  
Das Bild zeigt die Sprungantwort zum Messen des Abstandes von Mikrofon und Lautsprecher.

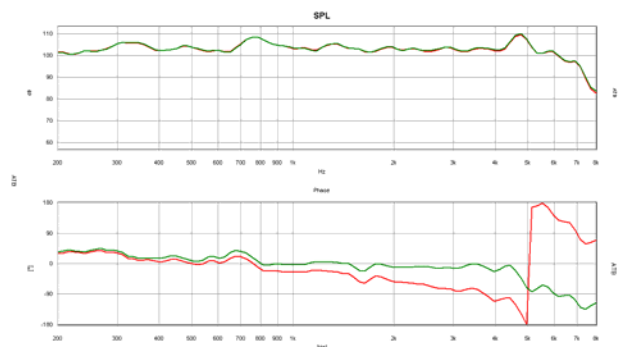


Bild 3.32 Akustische Phase.  
Die rote Kurve zeigt die Phase entsprechend dem mit der Sprungantwort gemessenen Abstand, 39cm. Die grüne ist auf den Ort der Schallentstehung bezogen, 41,5cm.

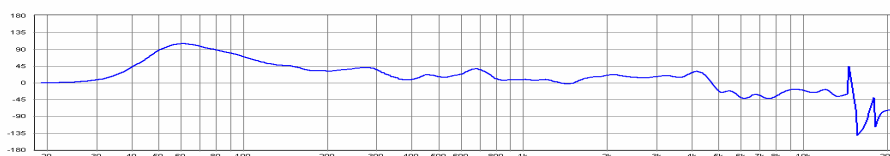


Bild 3.33 Akustische Phase vom W170S  
Das Bild zeigt die akustische Phase vom W170S mit dem ATB PC Pro gemessen. Das Messprogramm berechnet durch die Korrelation von Messsignal und gemessenem Signal die Phase. Hierbei wird das Messergebnis vom Abstand unabhängig. Dies bedeutet, dass alle Anwender das gleiche Ergebnis bekommen und so die akustischen Phasenmessungen vergleichbar werden. Die Messung entspricht der mit dem korrigierten Abstand gemessenen Phase in Bild 3.32, grüne Kurve.



Bild 3.34 Messaufbau

Das Bild zeigt den Messaufbau für die akustischen Messungen von zwei Lautsprechern. Die Mikrofonposition befindet sich zwischen dem Hochtöner und Mittel-Tieftöner. Die Erfahrung hat gezeigt, dass bei dieser Position das Hörergebnis und die Messung übereinstimmen. Die Position vor dem Hochtöner gibt eine schönere Kurve, zeigt aber nicht den in den Raum abgestrahlten Schall.

### Ohne Weiche

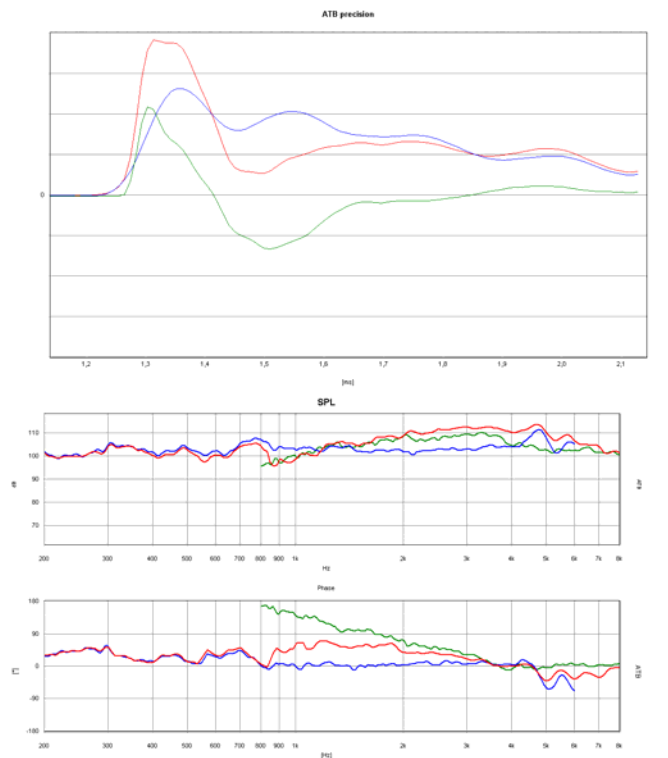
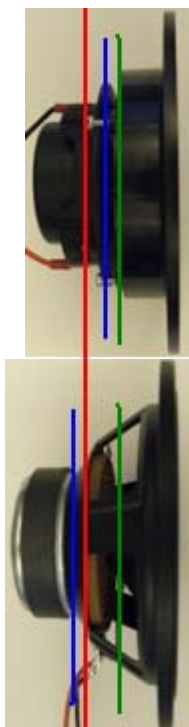


Bild 3.35 Anordnung

Die Striche zeigen die entscheidende Ebene: Blau=Schwingspule, grün=Abstand entsprechend Impuls, rot= Schallentstehungsort (SEO)

Bild 3.36 Sprungantwort, SPL und Phase

Kurvenfarben: Grün=Hochtöner, blau=Mittel-Tieftöner, rot=Summe. Die Sprungantwort zeigt, dass bei richtiger Phase die Abstände nicht gleich sind.

## Mit Weiche

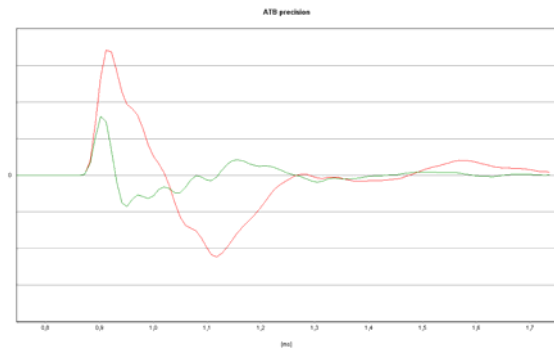


Bild 3.37 Sprungantwort Hochtöner  
Die Sprungantworten zeigen mit und ohne Weiche den gleichen Abstand

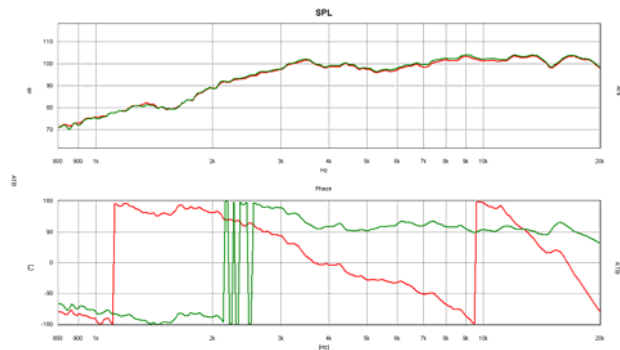


Bild 3.38 SPL und Phase  
Die Differenz des Abstandes entsprechend Sprungantwort und mit Korrektur Entsprechend der Phase beträgt 2,8cm.

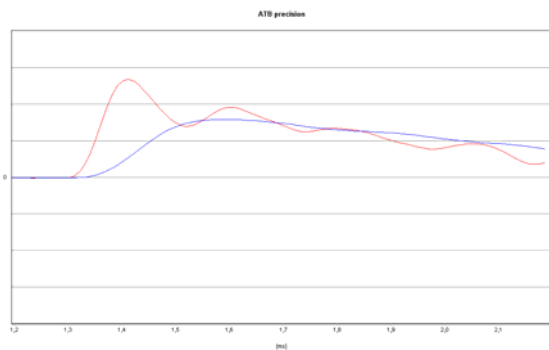


Bild 3.39 Sprungantwort Mittel-Tieftöner  
Bei dem Tiefpass ist eine leichte zeitliche Differenz durch die Weiche zu sehen.

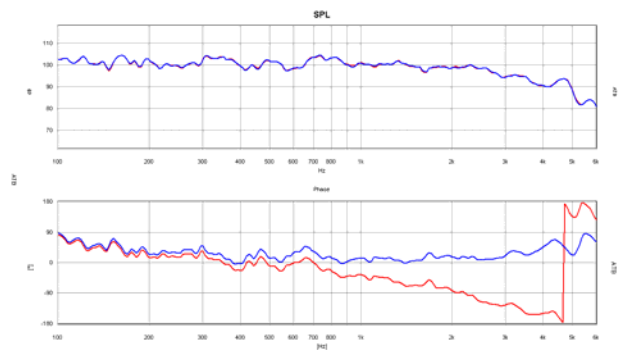


Bild 3.40 SPL und Phase  
Die Differenz beim Abstand zwischen Sprungmessung und korrigierter Phase beträgt 4,5cm.

## Die Lautsprecherkombination

Die beiden Lautsprecher werden mit gleicher Polung angeschlossen. Damit die Phasen zusammenpassen, wird der Hochtöner nach vorn versetzt. Die Strecke besteht aus der halben Wellenlänge der Übergangsfrequenz. Sie ergibt sich entsprechend folgender Formel:

$$340\text{m/sec} \times \text{sec} / (2500 \times 2) = 0,068\text{m} = 6,8\text{cm}$$

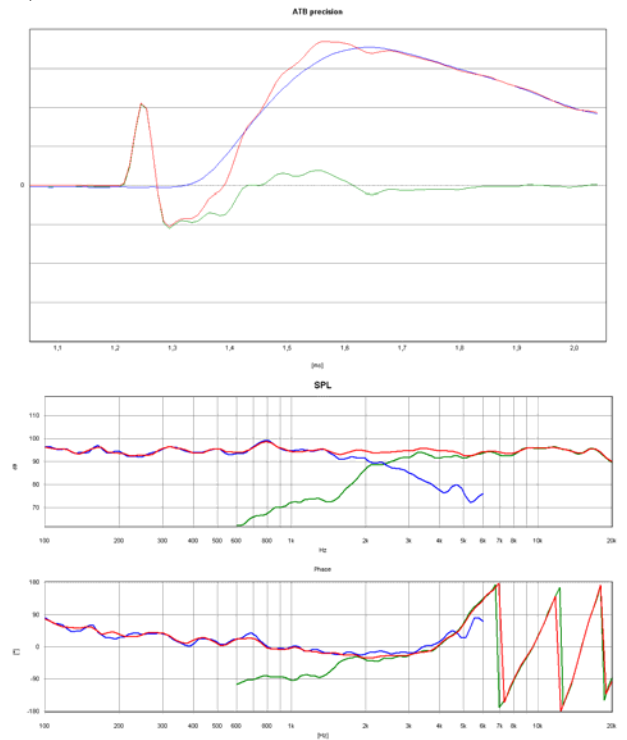
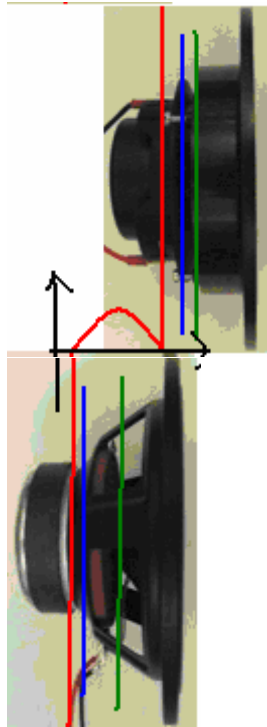


Bild 3.41 Anordnung  
Bei dieser Anordnung befindet sich der Hochtöner weit vorn. So sind fast alle Boxen mit Hochtönerkalotten aufgebaut.

Bild 3.42 SPL und Phase  
Die Sprungantwort zeigt, dass das Signal des Hochtöners weit vor dem Signal des Mittel-Tieftöners liegt. So überlagern sich die beiden Signale ohne sich zu behindern. Die Phase ist sehr stark vorlaufend. Der Lautsprecher ist nicht zeitrichtig.

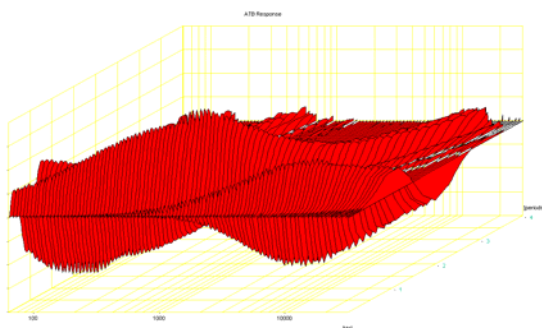


Bild 3.43 Dynamic-Measurement  
Das Bild zeigt, zu welcher Zeit das Signal mit einer bestimmten Frequenz entsteht. Vorne wird das Hochtonsignal und dahinter das des Mittel-Tieftöners gezeigt. Beide Signale sind zeitlich getrennt.

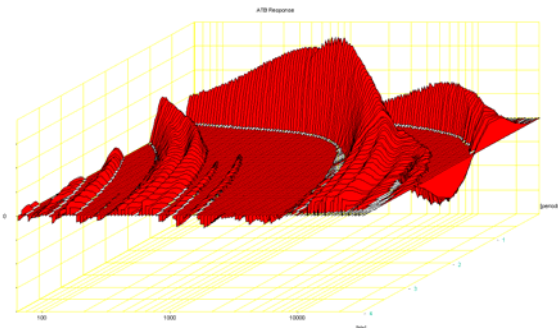


Bild 3.44 Dynamic-Measurement  
Die Rückansicht zeigt das Ausschwingverhalten. Hier sind die zerstückelten Signale sehr schön zu sehen. Bei dieser Lautsprecheranordnung führt der Hochtönerbereich ein Eigenleben.

## Phasenmessung bei MLS Messsystemen

Diese einfache Lautsprecherkombination ist ein gutes Beispiel für die Phasenmessung bei den MLS Messsystemen. Der Abstand wird bei diesen Messungen mit der Impulsantwort festgelegt.

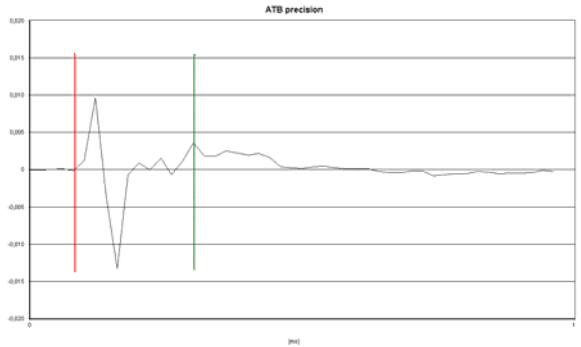


Bild 3.45 Impulsantwort

Das Fenster für die Auswertung der Messung muss bei der roten Linie beginnen. Für die richtige Auswertung der Phase muss das Zeitfenster bei der grünen Linie beginnen. Dies ist aber nicht möglich.

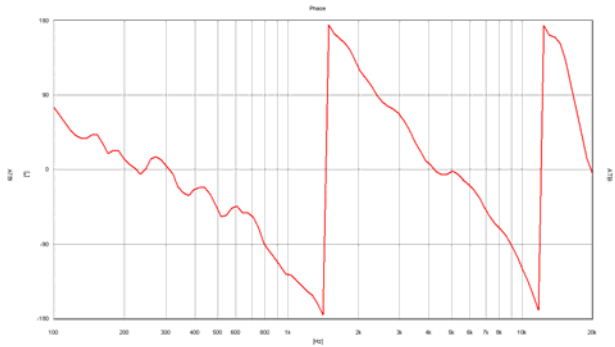


Bild 3.46 Akustische Phase

Die akustische Phase des Lautsprechers. Da die für die Auswertung richtige Entfernung nicht eingestellt werden kann, ist die Messung ohne Aussage.

### 3.4 Der zeitrichtige Lautsprecher

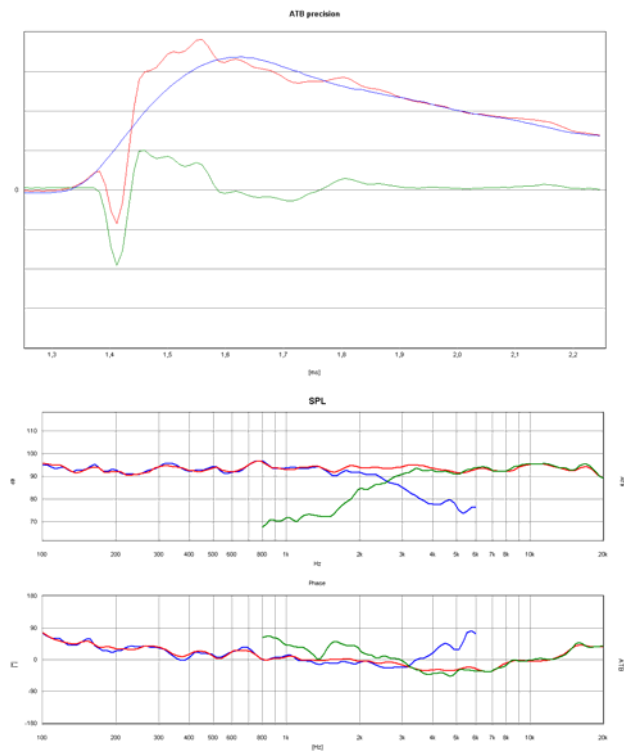
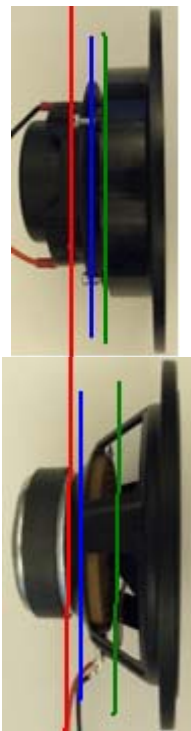


Bild 3.47 Anordnung  
Die Striche zeigen die entscheidende Ebene: Blau=Schwingspule, grün=Abstand entsprechend Impuls, rot= Schallentstehungsort (SEO)

Bild 3.48 SPL und Phase  
Kurvenfarben: Grün=Hochtöner, blau=Mittel-Tieftöner, rot=Summe.  
Die Sprungantwort zeigt die gute Überlagerung der Einzelsignale. Der Hochtöner ist verpolt. Die Phasen liegen im Übergangsbereich eng zusammen.

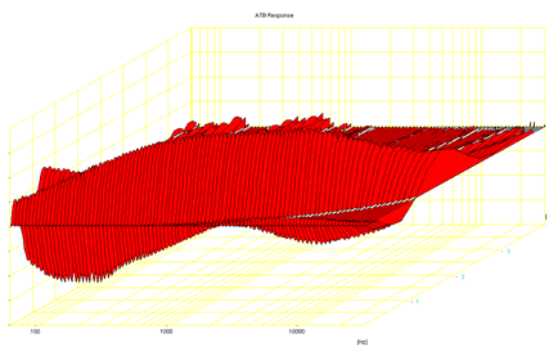


Bild 3.49 Dynamic-Measurement  
Bei dem zeitrichtigen Lautsprecher wird ein weitgehend gleichmäßiges Gebirge für alle Frequenzen gezeigt. Die Töne werden zur gleichen Zeit erzeugt und gehört.

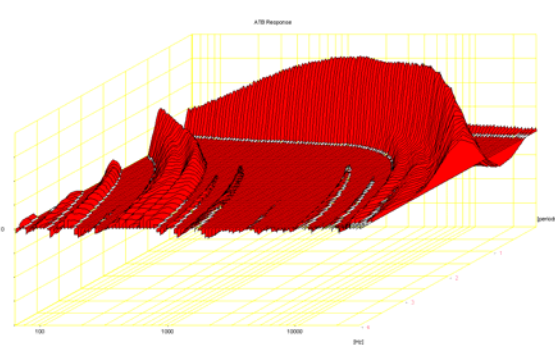


Bild 3.50 Dynamic-Measurement  
Auch die Rückansicht der Messung zeigt exakte Wiedergabe. Das nach hinten verlaufende Gebirge im Tieftonbereich ist der Schall der Bassreflexöffnung.

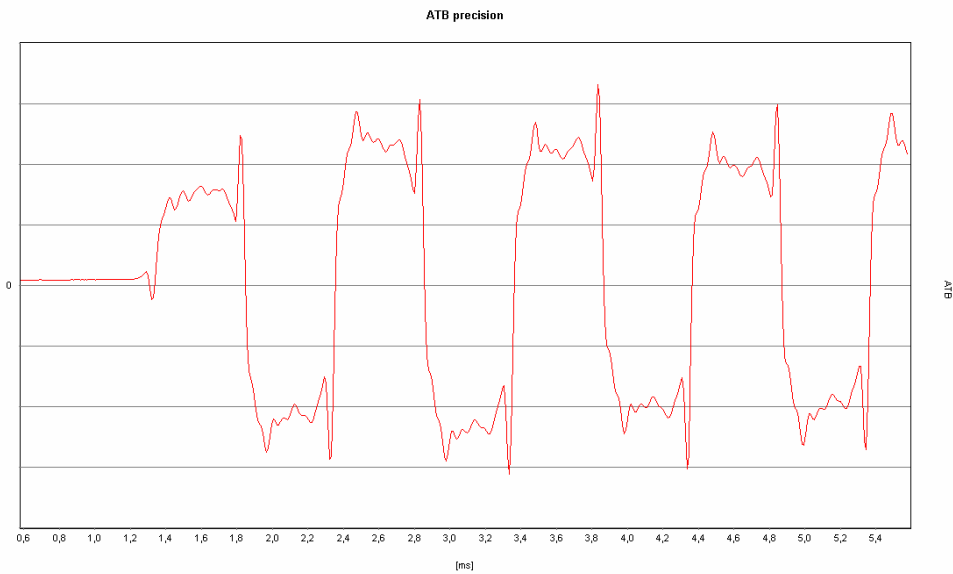


Bild 3.51 Rechteckverhalten bei der Frequenz 1kHz  
 So wie es sich für einen zeitrichtigen Lautsprecher gehört, besitzt der entwickelte Lautsprecher auch ein gutes Rechteckverhalten.



Bild 3.52 Analog.on "Richtig"  
 Der Lautsprecher Analogon "Richtig" ist der Lautsprecher mit dem als absolut betrachteten Zeitverhalten. Im Gegensatz zu dem beschriebenen Lautsprecher zeigt die Dynamic-Messung 3D Messung, von vorne betrachtet, nur ein über den gesamten Frequenzbereich gleichmäßiges Gebirge. Bei der Richtig sind die Lautsprecher gleich gepolt. Beide Lautsprecher klingen ähnlich. Der leichte Vorteil der Richtig bezüglich der räumlichen Auflösung kann auch an dem 5mal teureren Tief-Mitteltöner liegen. Der Tief-Mitteltöner befindet sich auch in den teuersten High End und Studio Lautsprechern.

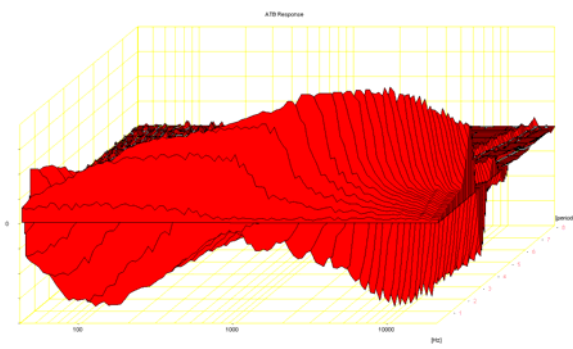


Bild 3.53 Dynamic-Messung

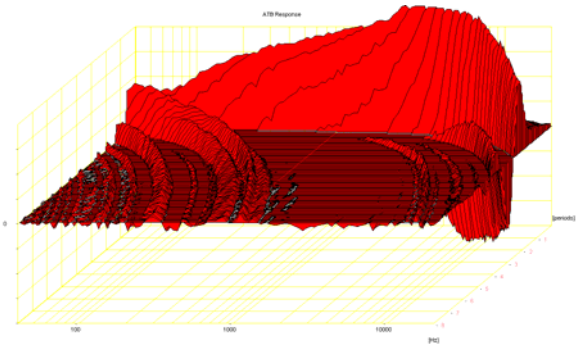


Bild 3.54 Dynamic-Messung

## 4. Der Lautsprecher V-Monitor



Technische Daten:

Technik: 2-Wege Bassreflex, zeitrichtig

Bestückung Hochtון: 25mm Textilkalotte mit Waveguide

Bestückung Tiefton: 17cm (6,5“) mit beschichteter Papiermembran

Belastbarkeit: 50WSinus, 80WMusik

Impedanz: 4Ω

Frequenzbereich: 50Hz – 20kHz

Wirkungsgrad: 87dB 1W/1m

Abmessungen: H=41cm, B=23cm, T=32cm

Bild 4.1 V-Monitor

## 4.1 Der Weichenplan

Visaton W170S/4, SC10N,  
Monacor WG-300,

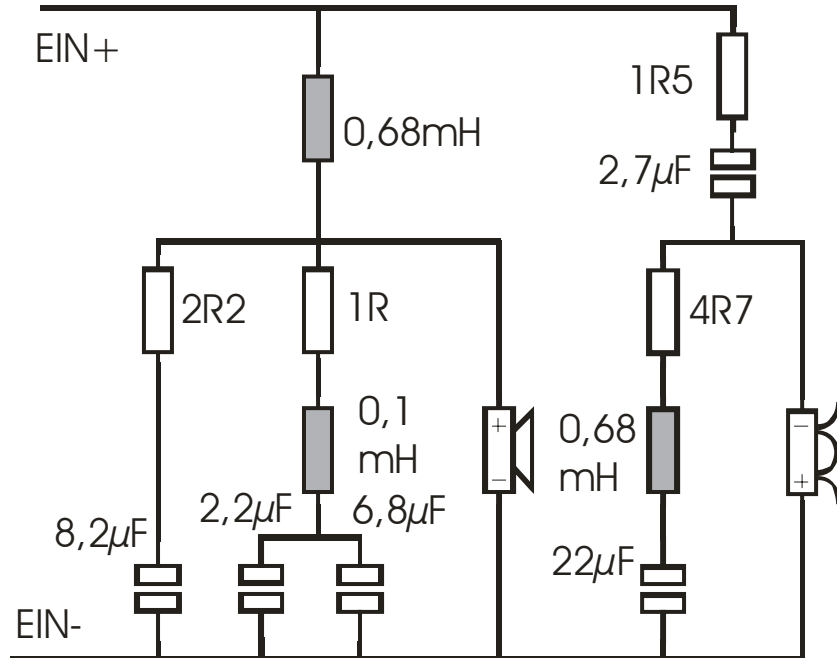


Bild 4.2 Der Weichenplan vom V-Monitor

Durch den stetigen Wechsel von Hören und Messen ist die Weiche entwickelt worden. Die Testhörer sind die Kunden des Analog.on Studios. Unsere Kunden haben so hohe Ansprüche an die Klangwiedergabe, dass sie mit dem Angebot der HiFi Geschäfte nicht zufrieden sind. Die wirklich guten Lautsprecher sind für sie unbezahlbar. Über 3 Monate ist an der Weiche gefeilt worden

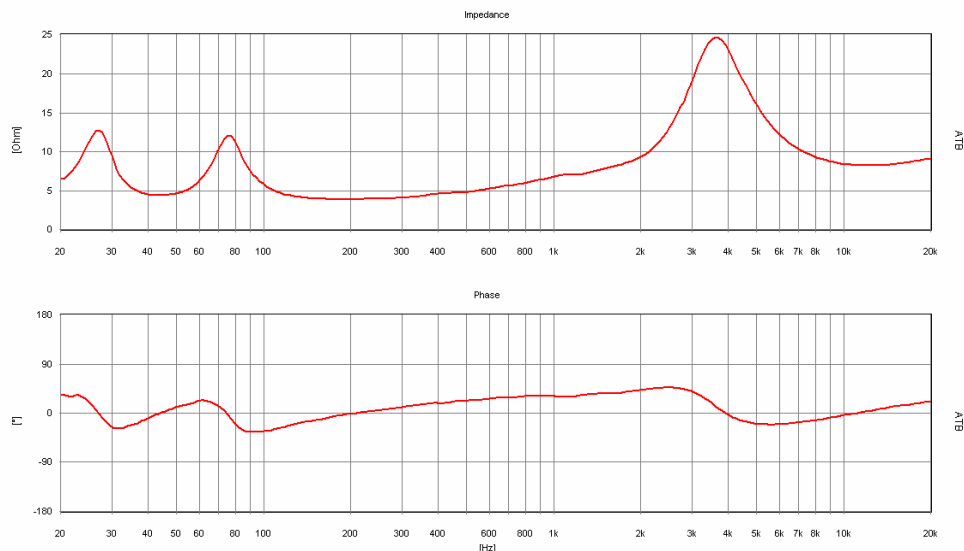


Bild 4.3 Impedanz und Phase

Durch die gutmütige Impedanz- und Phasencharakteristik ist der Lautsprecher auch für einfache Verstärker geeignet.

## 4.2 Der Bauplan

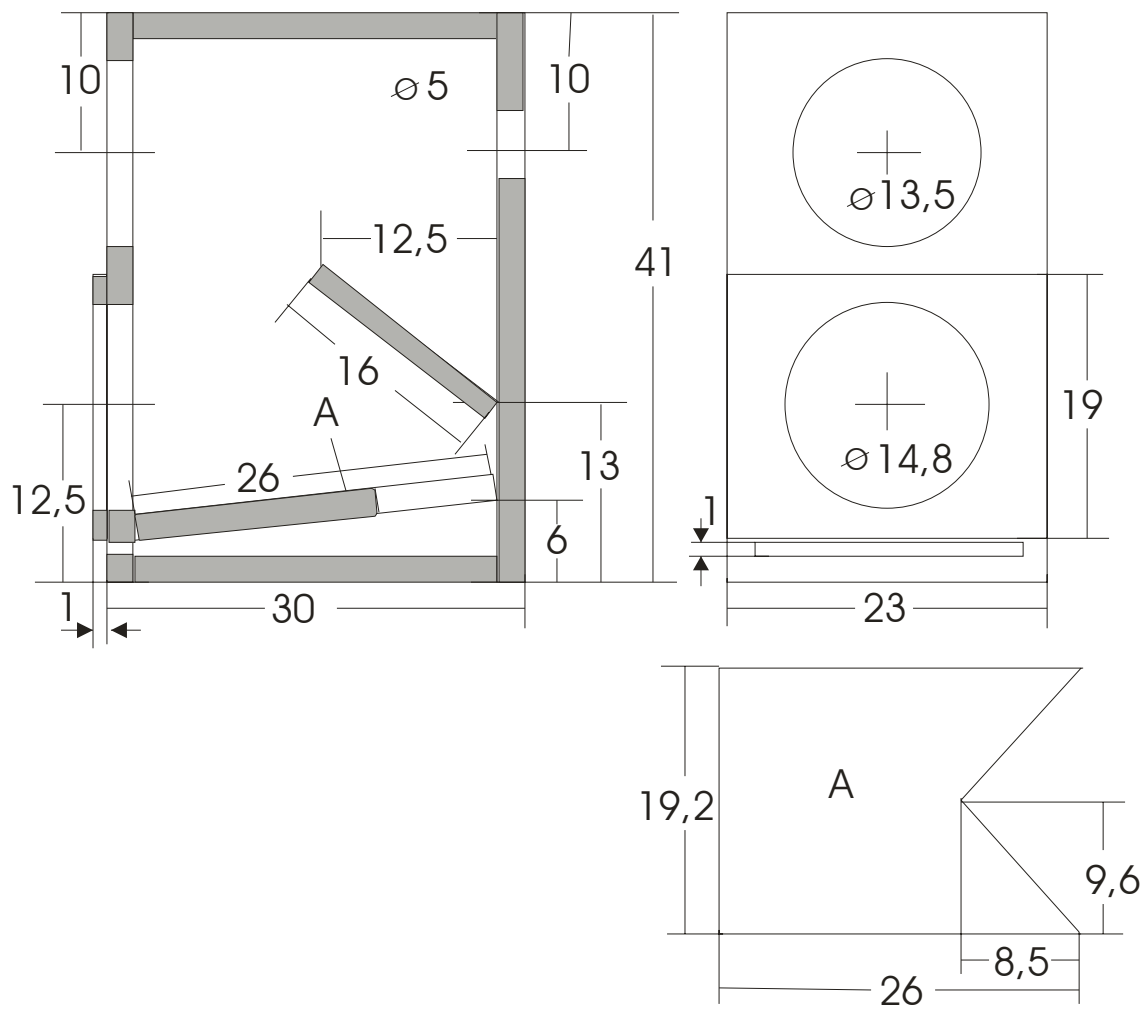


Bild 4.4 Bauplan für das Gehäuse

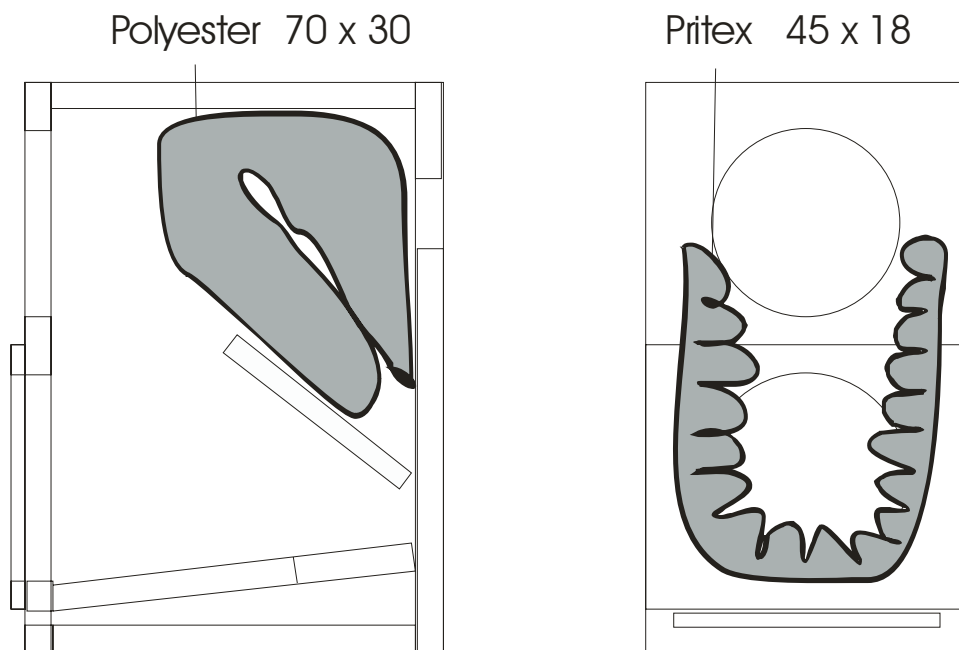


Bild 4.5 Bedämpfungsplan

## 5. Die einzigartige Technologie

### 5.1 Abstrahlverhalten

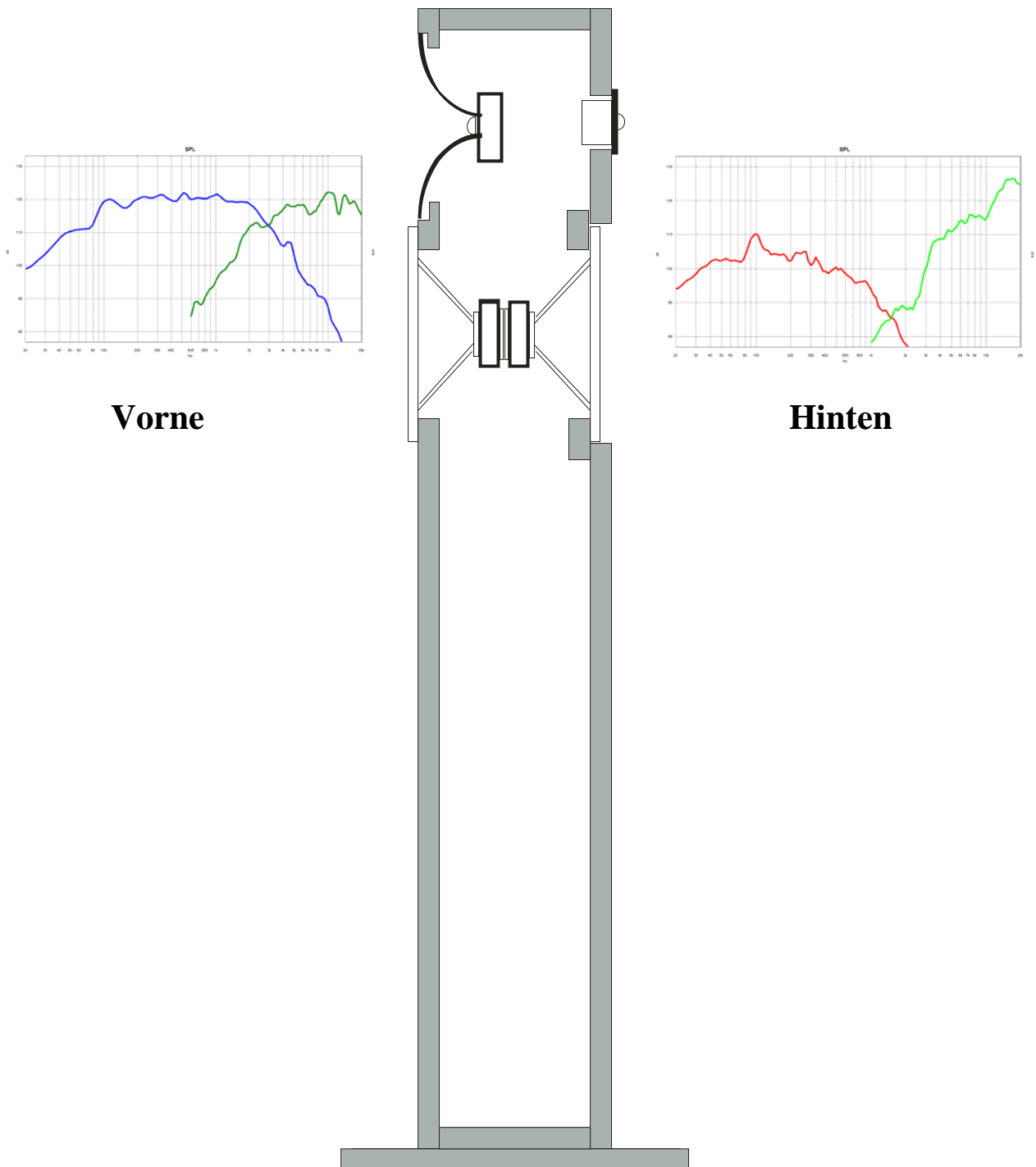
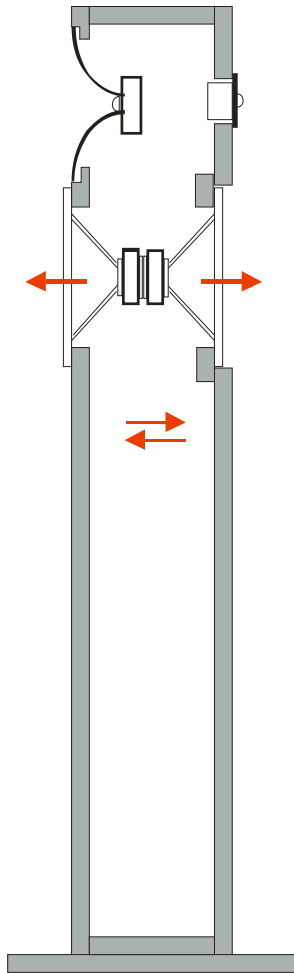
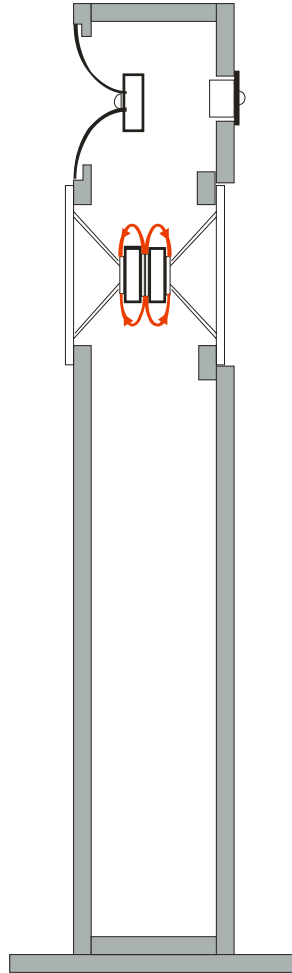


Bild 5.1 Der Lautsprecher OK<sup>2</sup> und seine Abstrahlcharakteristik  
Der Vorgänger Analog.on OK wird seit 12 Jahren hundertfach verkauft. Es gibt keine unzufriedenen Kunden, da die neutrale Klangwiedergabe als dem Original sehr nahe empfunden wird. Auch Verstärker-, Spikes- und Kabel Diskussionen gibt es bei OK Kunden kaum. Die Kunden schwören auch noch nach 12 Jahren auf ihren Lautsprecher. Die OK<sup>2</sup> ist eine Neuentwicklung, die Konzept und Gehäuse der OK übernimmt.

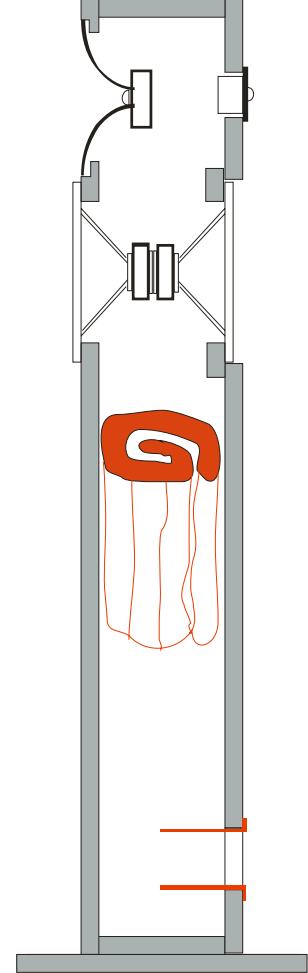
## 5.2 Die Lautsprecheranordnung



**Bild 5.2 Kräfte**  
Die gegenüberliegenden Tief-  
töner geben entgegengesetzte  
Kräfte auf das Gehäuse ab. Die  
Kräfte heben sich auf und das  
Gehäuse steht still.

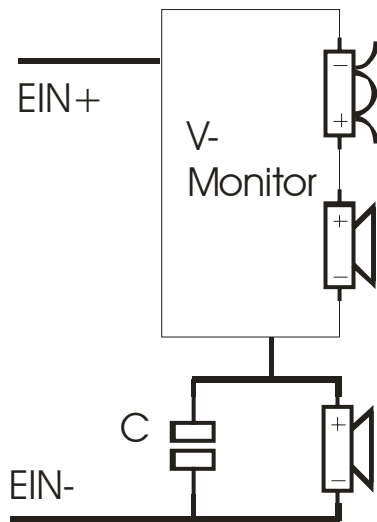


**Bild 5.3 Magnete**  
Die Magnete liegen eng zu-  
sammen und verstärken sich.  
Sie besitzen auch ein geringeres  
Streufeld.

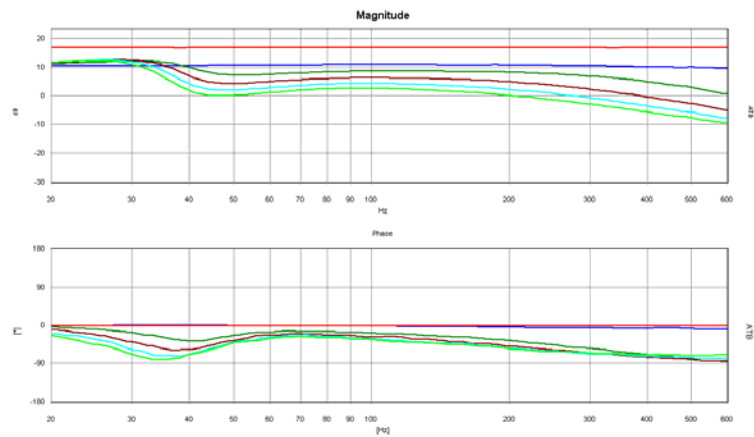


**Bild 5.4 Variovent**  
In der Mitte der Box  
befindet sich ein Fließ-  
widerstand, Variovent.  
Dieser verdoppelt das  
effektive Gehäuse

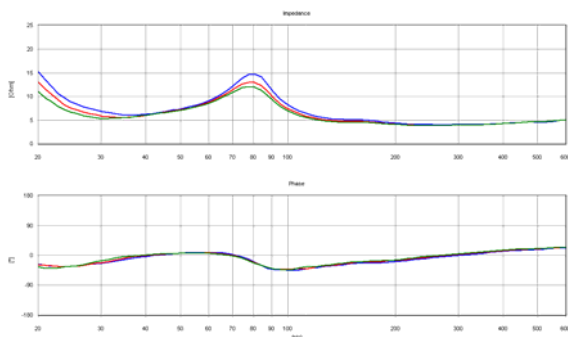
### 5.3 Der eingebaute Subwoofer



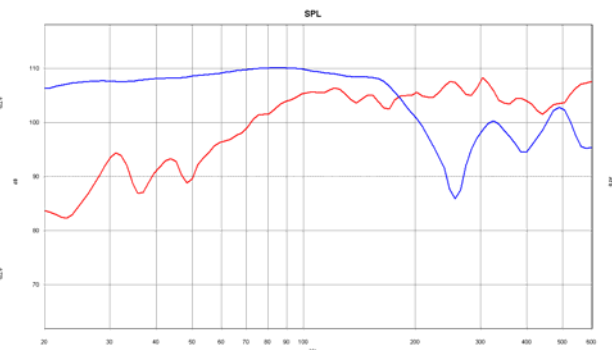
**Bild 5.5** Serielle Weiche  
Der hintere Bass wird durch eine serielle Weiche vom Mittel-Hochtonbereich getrennt. Diese Weiche besitzt die geringste Phasendrehung.



**Bild 5.6** Spannung über dem Subwoofer  
Die rote Kurve zeigt die Ausgangsspannung des Verstärkers. Die anderen Kurven zeigen die Spannung über dem Subwoofer. Ohne Weiche, blaue Kurve, wird die Spannung halbiert. Beide Lautsprecher bekommen das gleiche Signal. Die anderen Kurven zeigen verschiedene Werte für den Kondensator C.



**Bild 5.7** Impedanz mit Phase  
Die Impedanzkurven zeigen verschiedene Werte für C. Mit C kann eine Abstimmung durchgeführt werden.



**Bild 5.8** SPL im Nahfeld  
Die Summenkurve im Nahfeld zwischen den Tieftönern hat die Charakteristik von einem Lautsprecher, dessen Tieftonbereich auch in ungünstigen Räumen nicht lästig wird. Die blaue Kurve zeigt den Schalldruck des Bass-reflex Rohres, das den Tieftonbereich ausgeglichen verstärkt.

## 5.4 Der hintere Hochtöner



Technische Daten:

10mm Polycarbonat-Kalotte	
Magnetisch abgeschirmt	
Nennbelastbarkeit	60W
Musikbelastbarkeit	100W
Impedanz	8Ω
Frequenzgang	1500Hz –22000Hz
Schalldruckpegel	90dB (1W/1m)
Resonanzfrequenz	2500Hz
Magnetische Induktion	0,7T

Bild 5.9 Der Super-Hochtöner SC5

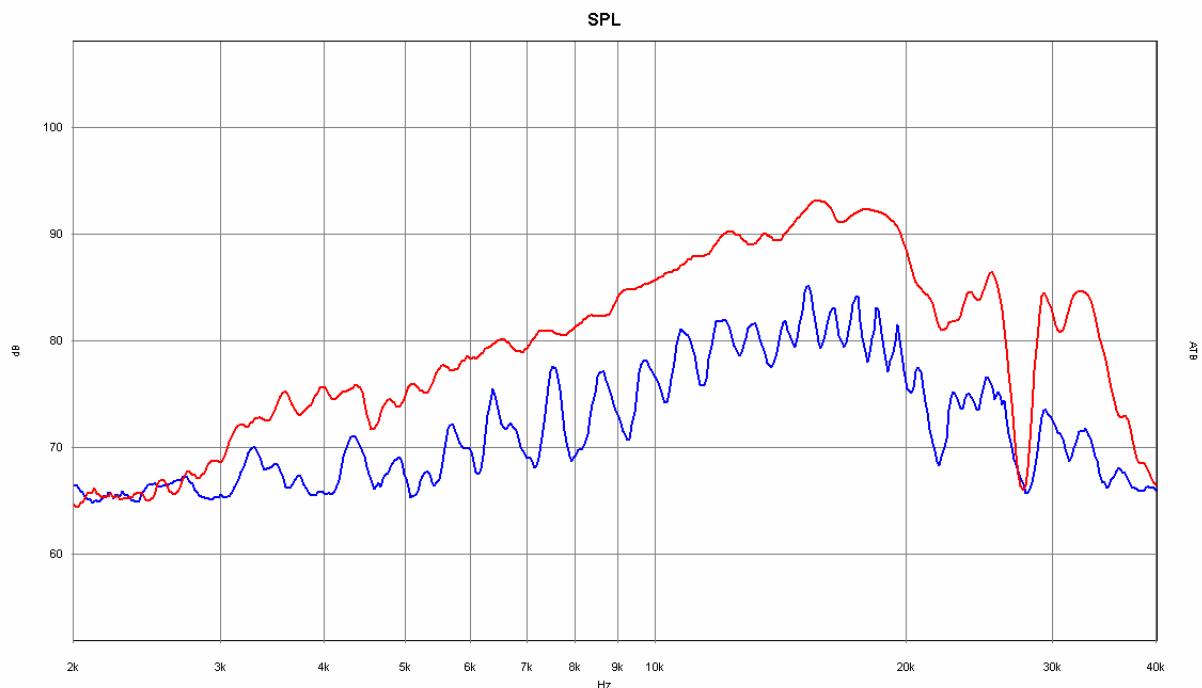


Bild 5.10 SPL vom SC5 mit Weiche

Die rote Kurve zeigt den Frequenzgang des SC5. Mit der oberen Grenzfrequenz von 35kHz gehört er zu den Super-Hochtönern für DVD Audio. Die blaue Kurve zeigt die Reflexionen von einer verputzten Wand. Die hintere Hochtöner erhöht die Hochtönen-Energie im Raum. Obwohl er nicht direkt zu hören ist, löst sich das Klangbild vom Lautsprecher. Die Instrumente werden frei im Raum abgebildet und besitzen eine eindeutige, räumliche Zuordnung.

Der Hochtöner wird über eine 6db/Oktave Weiche angeschlossen. Durch die geringe Phasendrehung werden Interferenzen mit dem Hochtöner vorne vermindert.



Bild 5.11 Messmikrofon MC1

Für die SPL Messung bis 40kHz eignet sich das dem ATB PC Messsystem beiliegende Mikrofon MC1.

## 6. Der Lautsprecher Analog.on OK<sup>2</sup>



Technische Daten:

Technik: 2 ½-Wege Bassreflex, zeitrichtig

Bestückung:

Hochton 25mm Textilkalotte mit Waveguide

Super-Hochton 10mm Polycarbonat

Mittel-Tiefton 17cm (6,5“) mit beschichteter Papiermembran

Tiefton: 17cm (6,5“) mit beschichteter Papiermembran

Belastbarkeit: 100W Sinus, 200W Musik

Impedanz: 6Ω

Frequenzbereich: 30Hz – 22kHz

Wirkungsgrad: 87dB 1W/1m

Abmessungen: H=102cm, B=20,5cm, T=17cm  
mit Sockel: B=30,5cm, T=27cm

Bild 6.1 Der Lautsprecher OK<sup>2</sup> von Front- und Rückseite

### 6.1 Der Frequenzgang

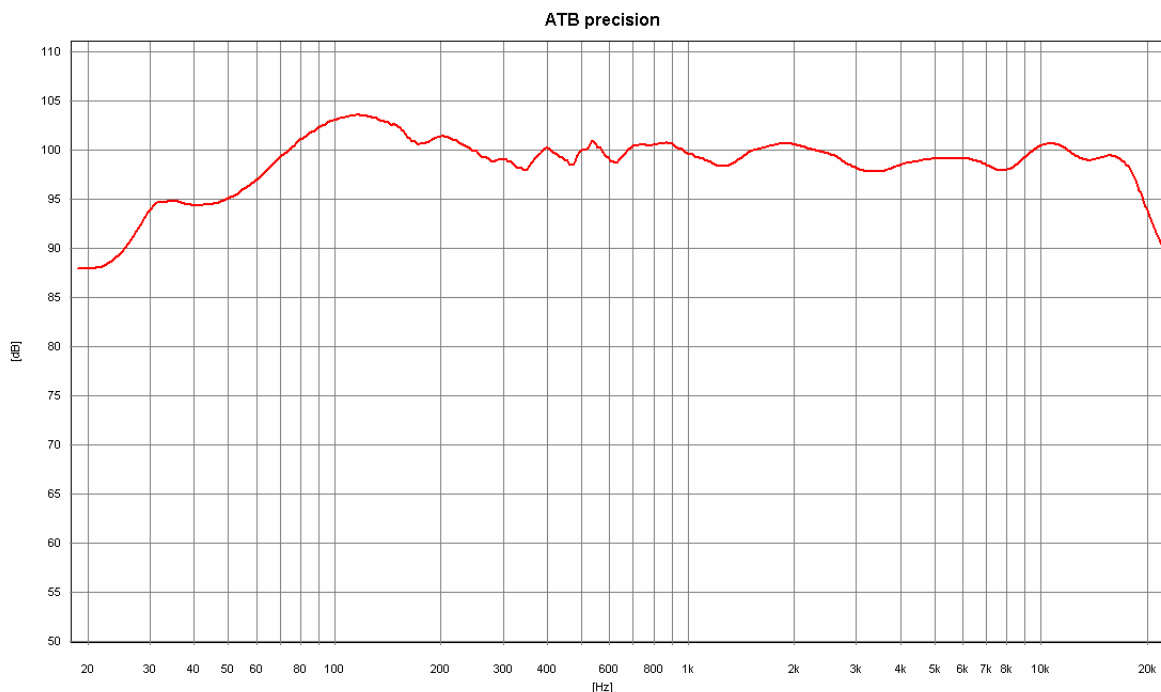


Bild 6.2 SPL der OK<sup>2</sup> unter Laborbedingungen gemessen

## 6.2 Der Frequenzgang im Raum

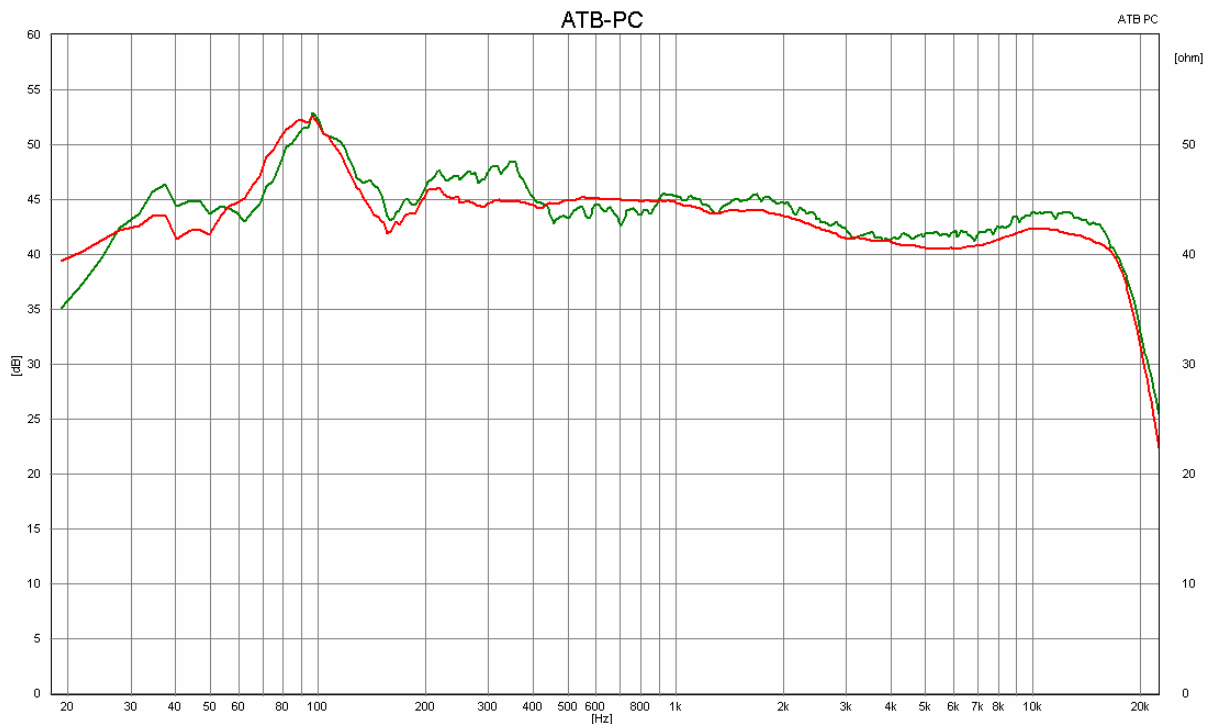


Bild 6.3 SPL der OK<sup>2</sup> im Raum gemessen mit dem ATB PC Messsystem

Die Lautsprecher Position in unserem Hörraum ist 22cm zur Rückwand und 95cm zur Seitenwand. Die grüne Kurve zeigt den Frequenzgang am Hörplatz. Bei der roten Kurve wurden die Messungen im Bereich des Sitzplatzes gemittelt, um die Raumcharakteristik zu sehen. Entsprechend dieser Messung sollte, wenn überhaupt, der Equalizer eingestellt werden. Die OK<sup>2</sup> überträgt den gesamten, hörbaren Frequenzbereich sehr gleichmäßig.

### 6.3 Der Weichenplan

Visaton 2 x W170S/4, SC10N,  
Monacor WG-300, 10mm Hochtonkalotte

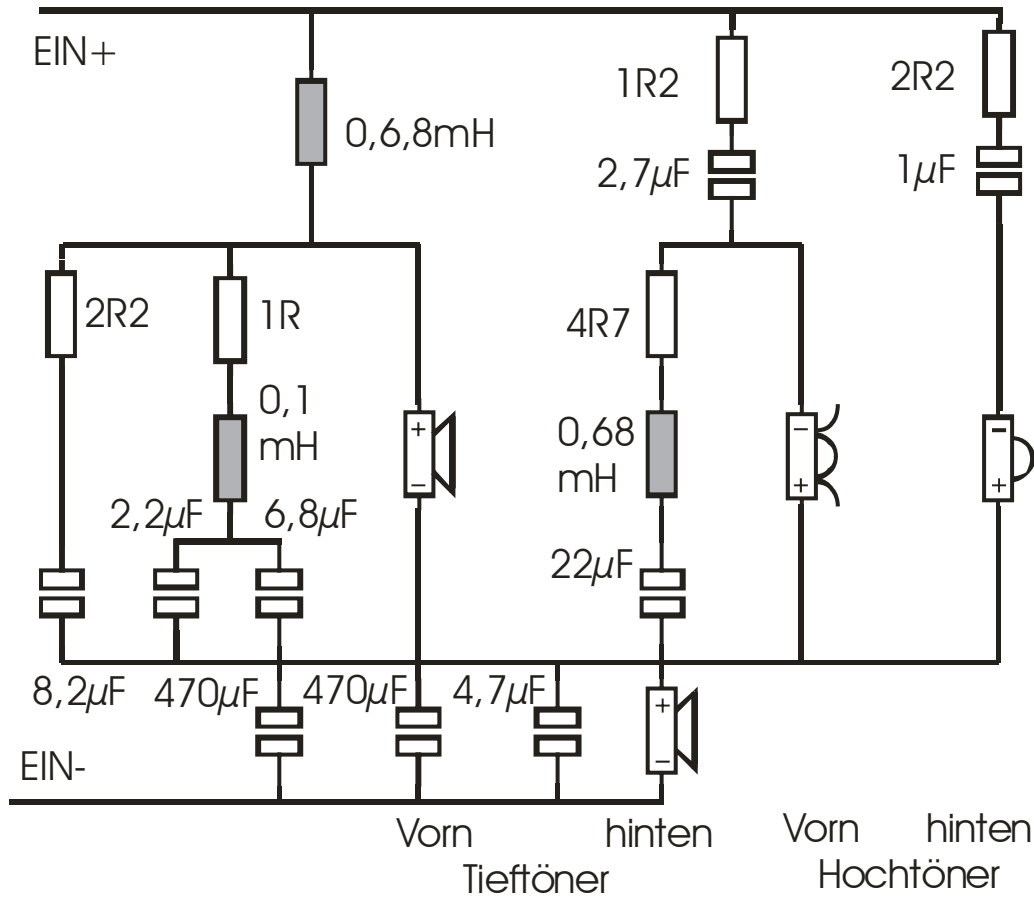


Bild 6.4 Die Frequenzweiche der OK<sup>2</sup>

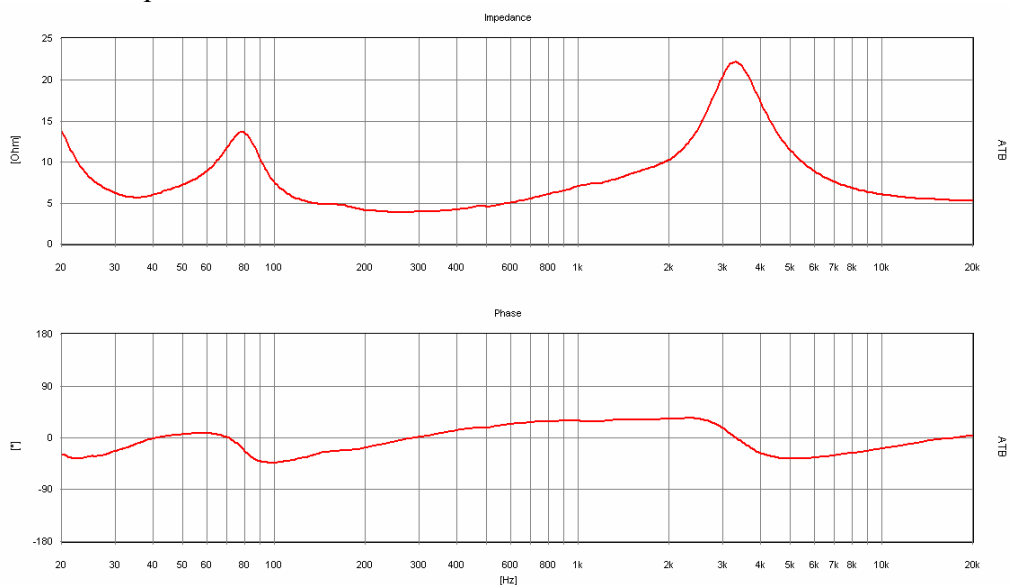


Bild 6.5 Impedanz mit Phase der OK<sup>2</sup>

Die Impedanz zeigt einen 6Ωlautsprecher, der auch bei dem Betrieb mit Surround Receiver keine klanglichen Einbußen erwarten lässt.

6.4 Der Bauplan

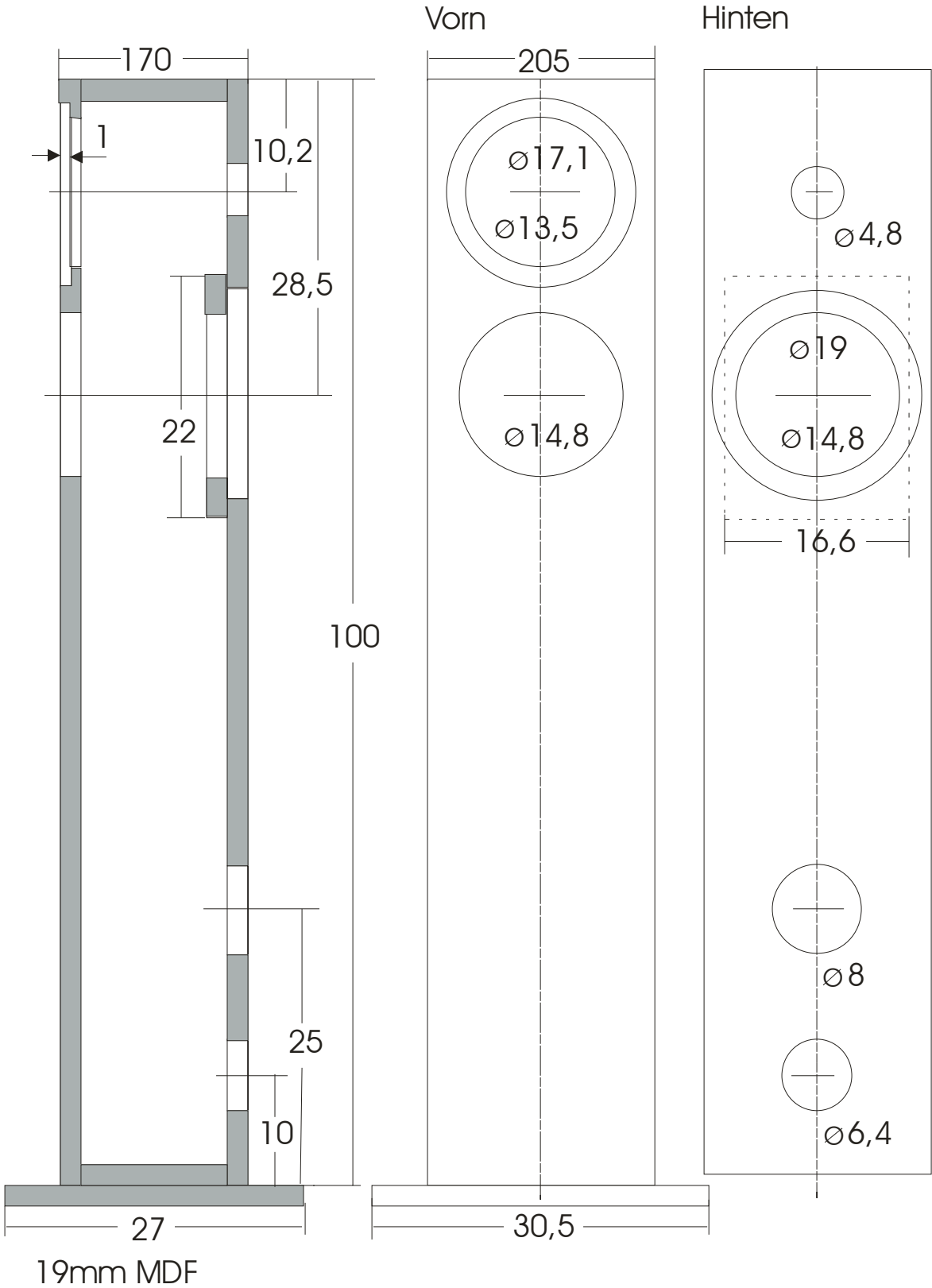


Bild 6.6 Der Bauplan der OK<sup>2</sup>

## Der Bedämpfungsplan

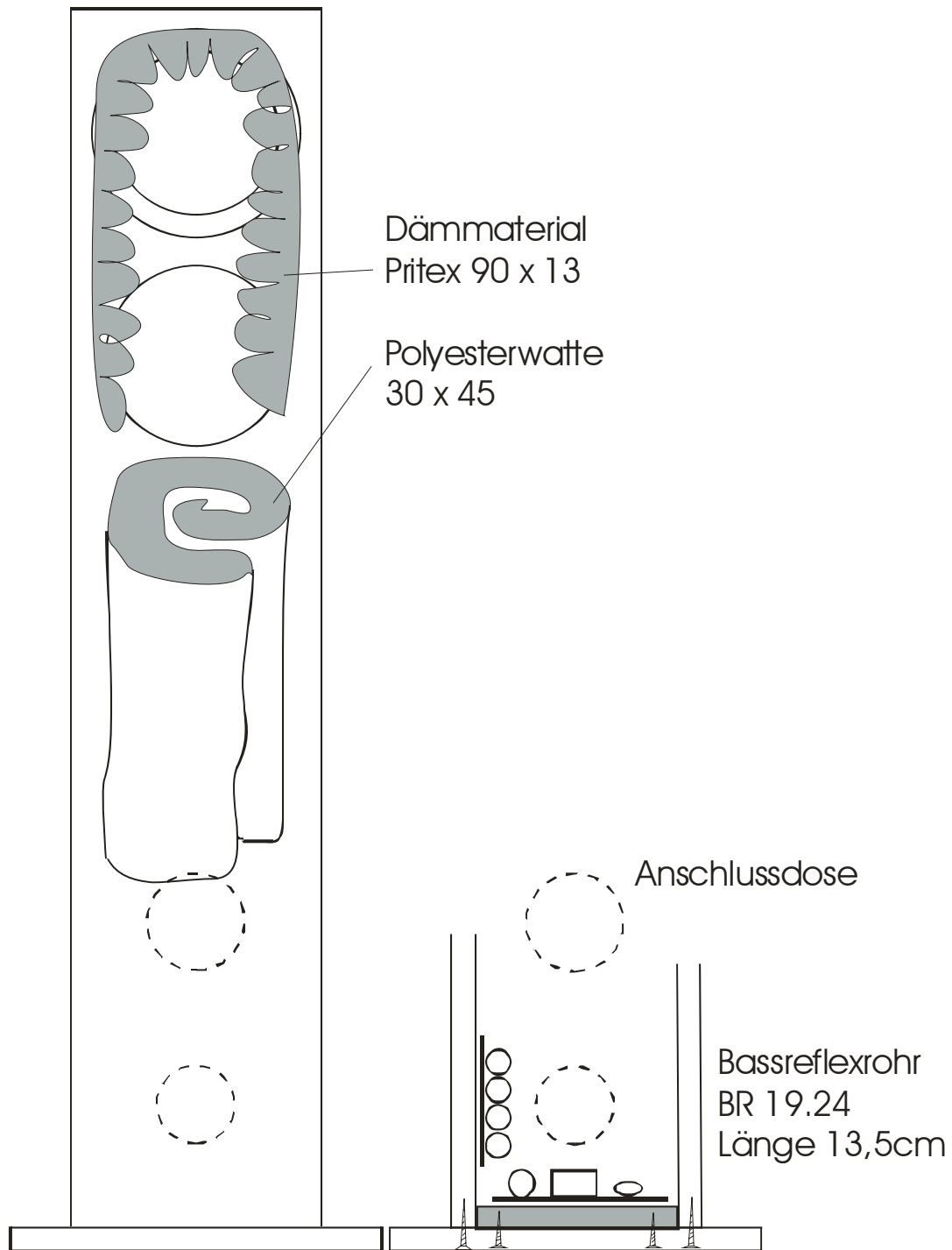


Bild 6.7 Bedämpfungsplan der OK<sup>2</sup>

# W1 Vergleich der Schallabstrahlung von Schallwand und Waveguide

## W1.1 Die Phantom- oder Sekundärschallquelle.

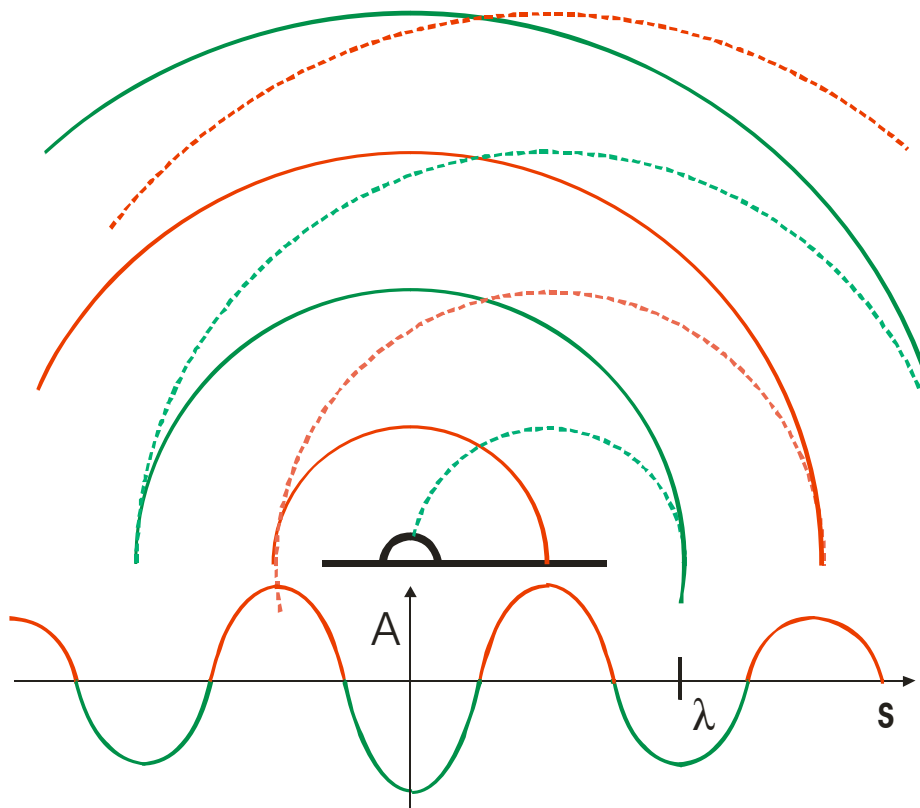


Bild 1.1 Schallfeld

Das Bild zeigt das Schallfeld eines rundabstrahlenden Kalottenlautsprechers auf einer Schallwand. Die kreisrunden Linien zeigen das Schallfeld als Momentaufnahme des eingeschwungenen Zustands. Die roten Linien zeigen einen Überdruck oder die positive Amplitude und die grünen Linien den Unterdruck oder die negative Amplitude des Schallfelds. Die durchgezogenen Linien zeigen die primäre und die gestrichelten Linien die sekundäre Schallquelle. Im unteren Bereich wird das Oszillogramm der Sinusschwingung gezeigt, auf der y-Achse die Amplitude und auf der x-Achse die Zeit. Mit der Schallgeschwindigkeit,  $c=340\text{m/sec}$ , wird die Länge einer Sinusschwingung in der Luft, die Wellenlänge  $\lambda$ , berechnet. Diese ist von der Frequenz  $f$  abhängig. Entsprechend ist

$$\lambda = c \cdot f = (340\text{m/sec}) / ( f / \text{sec}) = 340\text{m} / f$$

Die Wellenlänge  $\lambda$  ist die entscheidende Größe bei der Betrachtung der Schallausbreitung in Gehäusen, Räumen und auf Schallwänden.

Zur Erklärung der Phantom- oder Sekundärschallquelle ist die Schallwand so konstruiert, dass die Sekundärschallwelle nur auf der rechten Seite entsteht. Hier trifft die primäre Schallwelle auf die Schallwand und wird reflektiert. Hierbei entsteht eine neue, die sekundäre, Schallquelle. Diese besitzt eine kleinere Amplitude, so dass bei der Überlagerung der beiden Schallwellen ein Anteil des primären Schalls erhalten bleibt. Auf der linken Seite der Schallwand entsteht keine sekundäre Schallwelle.

## W1.2 Der Baffel Step

Die folgenden Bilder zeigen das Verhalten des Schalls für verschiedene Frequenzen bei einer Schallwand.

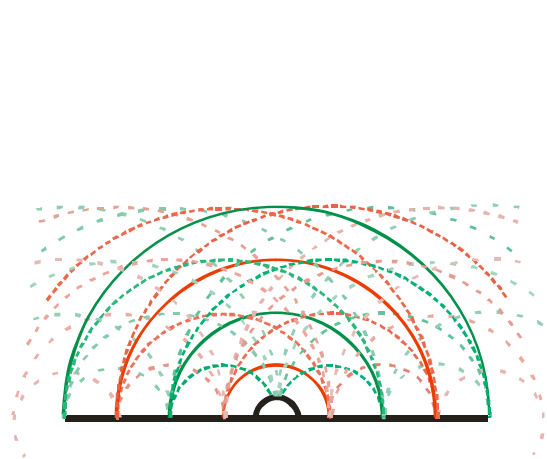


Bild 2.1  $\lambda < D$

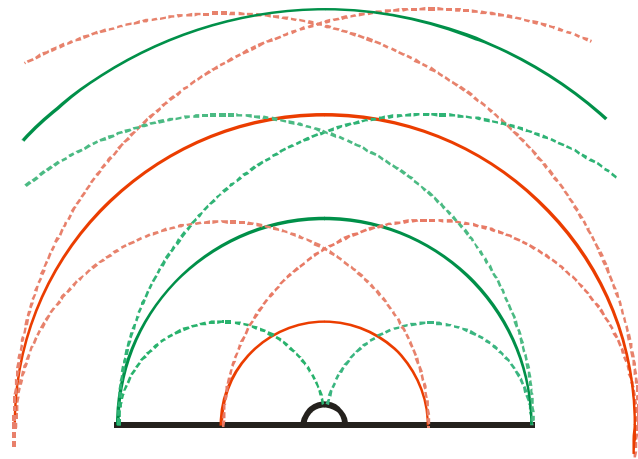


Bild 2.2  $\lambda = \frac{1}{2} D$

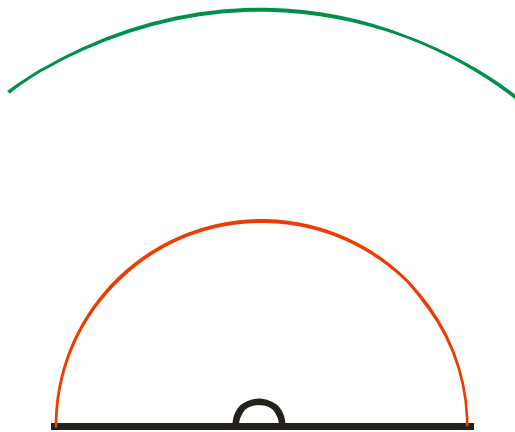


Bild 2.3  $\lambda = D$

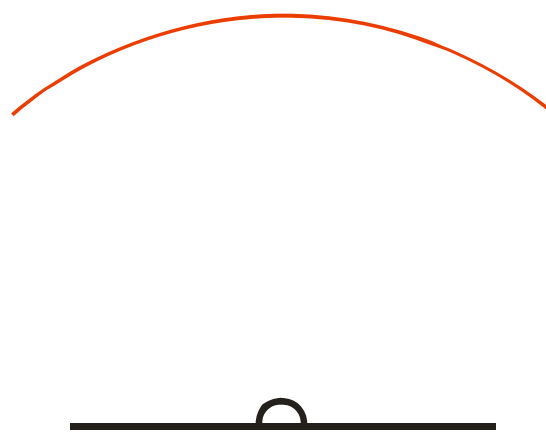


Bild 2.4  $\lambda > D$

Bei Bild 2.1 ist die Wellenlänge  $\lambda < D$ ,  $D$  = Schallwandabmessung.

Die Überlagerung der primären mit den sekundären Schallquellen ergeben auf der Achse des Lautsprechers betrachtet eine gleichmäßige Überlagerung. Der Schalldruck wird verringert, aber in einem breiten Frequenzbereich gleichmäßig. Diese Anordnung bringt den ausgeglichtesten Frequenzbereich bei der Messung mit der Normschallwand.

Bei Bild 2.2 ist  $\lambda = \frac{1}{2} D$ .

Hier überlagert sich die primäre Schallquelle mit 2 sekundären Schallquellen. Hier zeigt sich der stärkste Einfluss der Schallwand und es entsteht für diese Frequenz bei der Schalldruckmessung auf der Achse ein großer Einbruch im Frequenzgang.

Bei Bild 2.3 ist  $\lambda = D$ .

Für diesen Frequenzbereich treten keine sekundären Schallquellen auf. Auf der Achse gemessen wird der Schalldruckverlauf erhöht.

Bei Bild 2.4 ist  $\lambda > D$ .

Bei dieser tiefen Frequenz geht die Schallabstrahlung von dem Halbraum,  $2\pi$ , in den Vollraum,  $4\pi$ , über. Es tritt der Baffel Step auf. Der Schalldruckverlauf fällt für tiefere Frequenzen um 6dB ab.

### W1.3 Nachweis der Sekundärschallquelle.

Die Bilder von Kapitel 2 zeigen die Theorie. Hier wird die Theorie mit der Messtechnik bewiesen. Bei Bild 2.2 mit  $\lambda = \frac{1}{2} D$  ist die stärkste Auslöschung von primärer und sekundärer Schallquelle zu erwarten. Der Schalldruckverlauf zeigt für dieses  $\lambda$  bei der Frequenz  $f$ ,  $f = 1 / \lambda$ , den stärksten Einbruch.

Damit der Beweis nicht aus einem Messfehler besteht, wird die Messung an drei Schallwänden durchgeführt. Für die Messung werden runde Schallwände benutzt, da diese nach allen Seiten die gleiche geometrische Anordnung besitzen.



Bild 3.1 Schallwand mit  $D = 8$    Bild 3.2 Schallwand mit  $D = 13$    Bild 3.3 Schallwand mit  $D = 27$



Bild 3.4 Messaufbau

Bild 3.4 zeigt den Messaufbau. Der Lautsprecher wird an einer Stange montiert, so dass keine beeinflussende Schallwand in der Nähe ist.

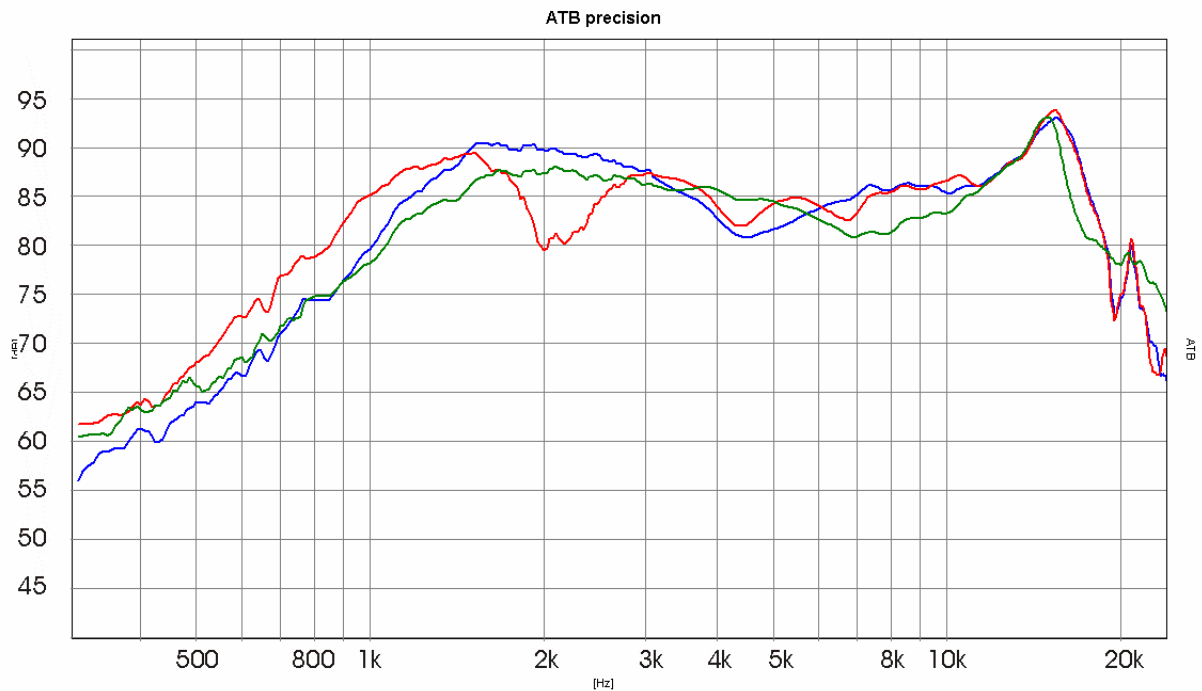


Bild 3.4 Frequenzgänge der Schallwände auf Achse gemessen  
 Grün D = 8cm, blau D = 13cm, rot D = 27cm

Das Bild 3.4 zeigt die Einbrüche im Frequenzgang bei  $f = c / (D/2 + \Delta E)$ ,  $\Delta E$  = Entfernungsdifferenz zwischen primärer und sekundärer Schallquelle. Die Rechnung ergibt folgende Frequenzen: D = 8cm  $f = 8416$  Hz, D = 13cm  $f = 4533$  Hz und D = 27cm  $f = 2428$  Hz. Die Rechnung und die Messung zeigen eine Übereinstimmung. Auch eine Überhöhung im Schalldruckverlauf ist bei der großen Schallwand zu sehen, ca. 6dB bei 1kHz.

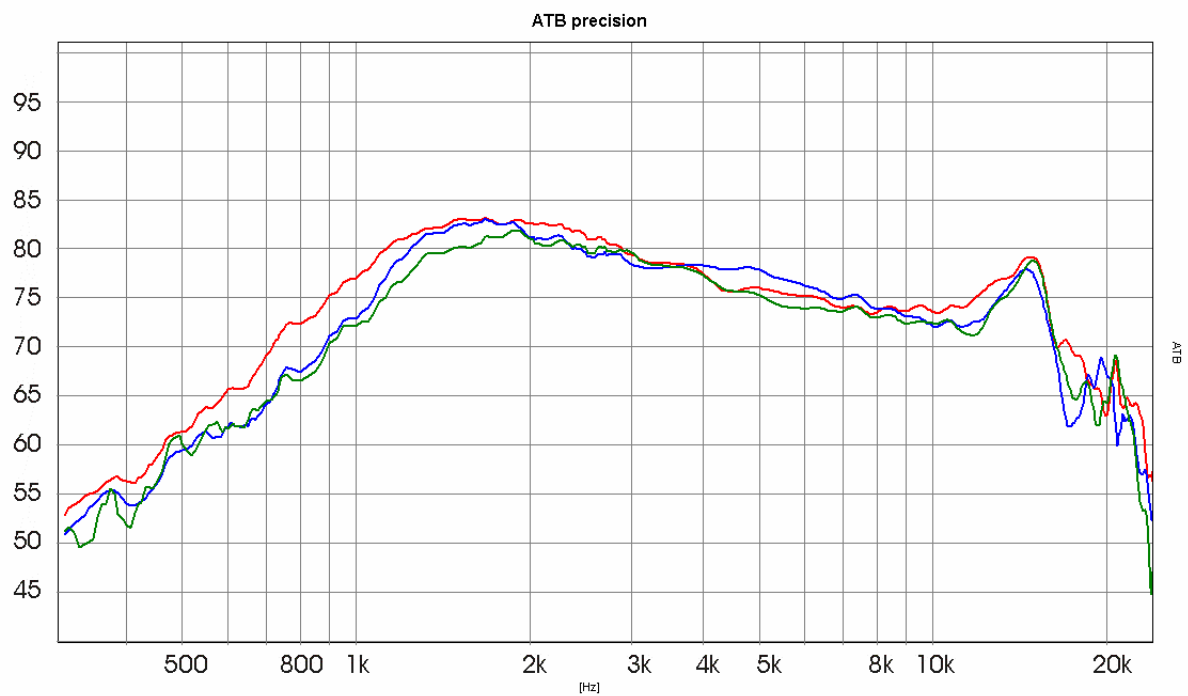


Bild 3.5 Frequenzgänge der Schallwände unter 45° gemessen  
 Grün D = 8cm, blau D = 13cm, rot D = 27cm

Das Bild zeigt, dass auch die Richtwirkung eine Funktion der Schallwand ist.

Entsprechend der Theorie entsteht der Einbruch im Frequenzgang durch die Überlagerung der primären und der sekundären Schallquelle. Da die sekundäre Schallquelle von der Schallwand reflektiert wird, ist sie gegenüber der primären zeitlich verzögert. Die Verzögerung zeigt die Messung des Wasserfalldiagramms.

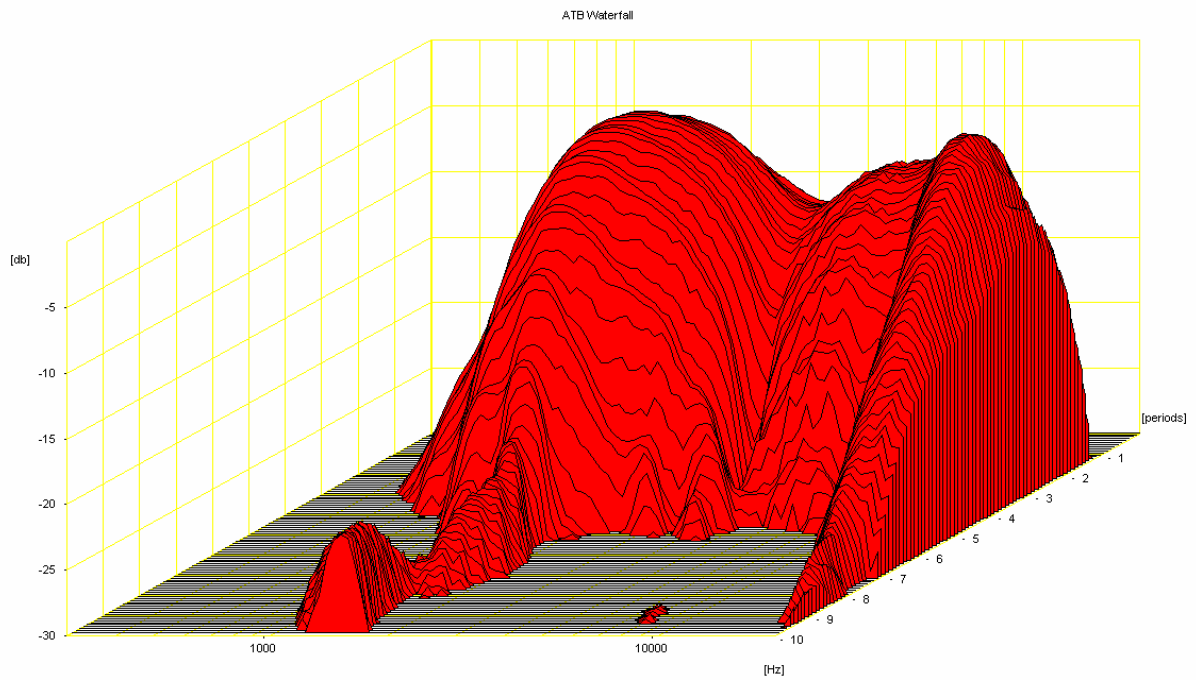


Bild 3.6 Wasserfalldiagramm

In Bild 3.6 ist der Einbruch im Gebirge bei 5kHz schön zu sehen. Der vordere Teil des Gebirges zeigt den Frequenzgang ohne die sekundäre Schallwelle. Erst im hinteren Teil erzeugt die sekundäre Schallwelle den Einbruch.

## W1.4 Das zeitliche Verhalten der Schallwelle auf der Schallwand

Mit der Methode des Grenzflächenmikrofons kann der auf die Schallwand treffende Schall gemessen werden. Um das zeitliche Verhalten zu zeigen wird die Sprungantwort gemessen.

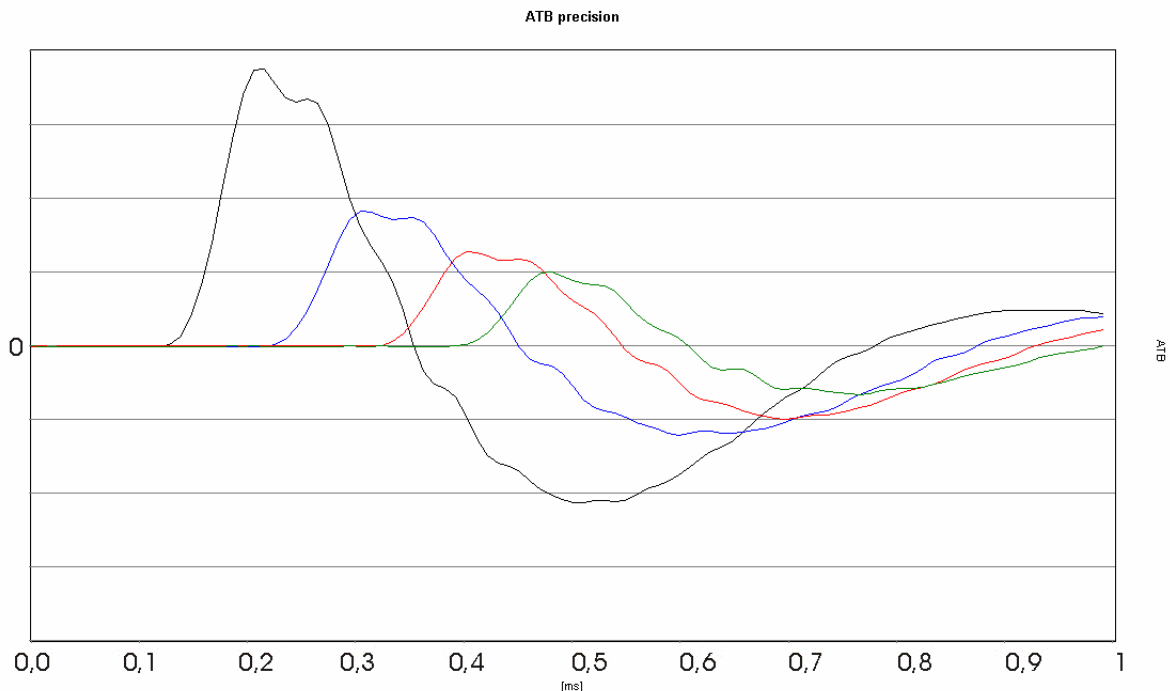


Bild 4.1 Sprungantwortmessungen auf der Schallwand

Abstand vom Mittelpunkt: schwarz = 4,5cm, blau = 7,5cm, rot = 10,5cm, grün = 13,5cm

In Bild 4.1 werden 4 Sprungantwortmessungen auf der Schallwand gezeigt. Diese wurden in den Abständen 4,5cm, 7,5cm, 10,5cm und 13,5cm vom Mittelpunkt des Lautsprechers durchgeführt. Deutlich ist die Verzögerung durch den größeren Abstand, die Laufzeit des Schalls, zu sehen. Die Amplitude wird mit wachsendem Abstand kleiner, wobei die Form der Sprungantwort identisch bleibt. Entsprechend der Theorie der Kantenreflexion ist zu erwarten, dass diese in der Sprungantwort zu sehen sein müsste. Da aber nichts zu sehen ist, kann die Kantenreflexion nicht den angenommenen Einfluss besitzen.

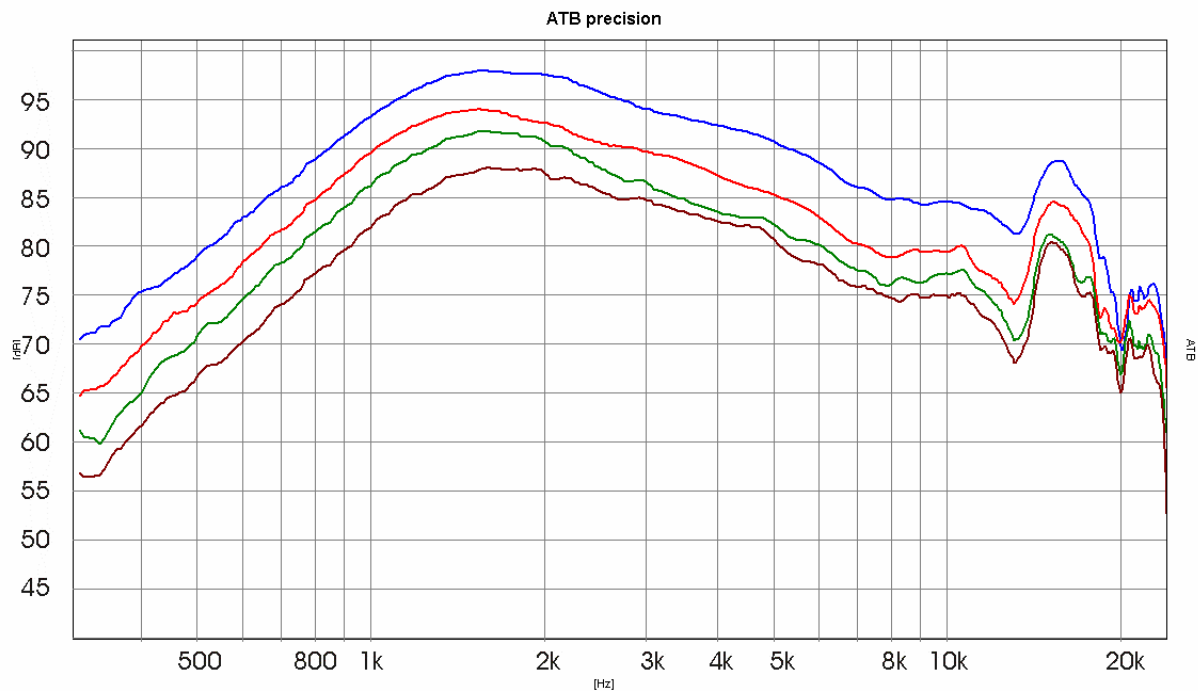


Bild 4.2 Frequenzgänge in verschiedenen Abständen auf der Schallwand gemessen  
 Abstand vom Mittelpunkt: blau = 4,5cm, rot = 7,5cm, grün = 10,5cm, braun = 13,5cm

Das Bild 4.2 zeigt die Frequenzgänge der Grenzflächenmessung in verschiedenen Abständen. Durch den größeren Abstand werden die Amplituden kleiner. Der Verlauf der Kurven bleibt weitgehendst erhalten. Auch an der Kante ist nichts Auffälliges zu sehen. Dies zeigt, dass die Kantenreflexion ein Modell ist, das eine angenäherte Berechnung der Schallwandeinflüsse ermöglicht. Das Modell der Kantenreflexion entspricht aber nicht den physikalischen Eigenschaften der Schallwand. Auch die Beugung der Schallwelle and der Gehäusekante hat nicht den angenommenen Einfluss. Das Verrunden oder Abschrägen der Kanten zeigt seine Wirkung in der Änderung der für den Schall wirksamen Schallwandgröße.

## W1.5 Die verzögerte Reflexion von der Schallwand

Eine große Schallwand zeigt den ausgeglichensten Frequenzgang. Dies sagt aber nichts über die richtige Schallabstrahlung und damit über den Klang aus.

Mit dem Dynamic Measurement Programm kann die verzögerte Reflexion gezeigt werden.

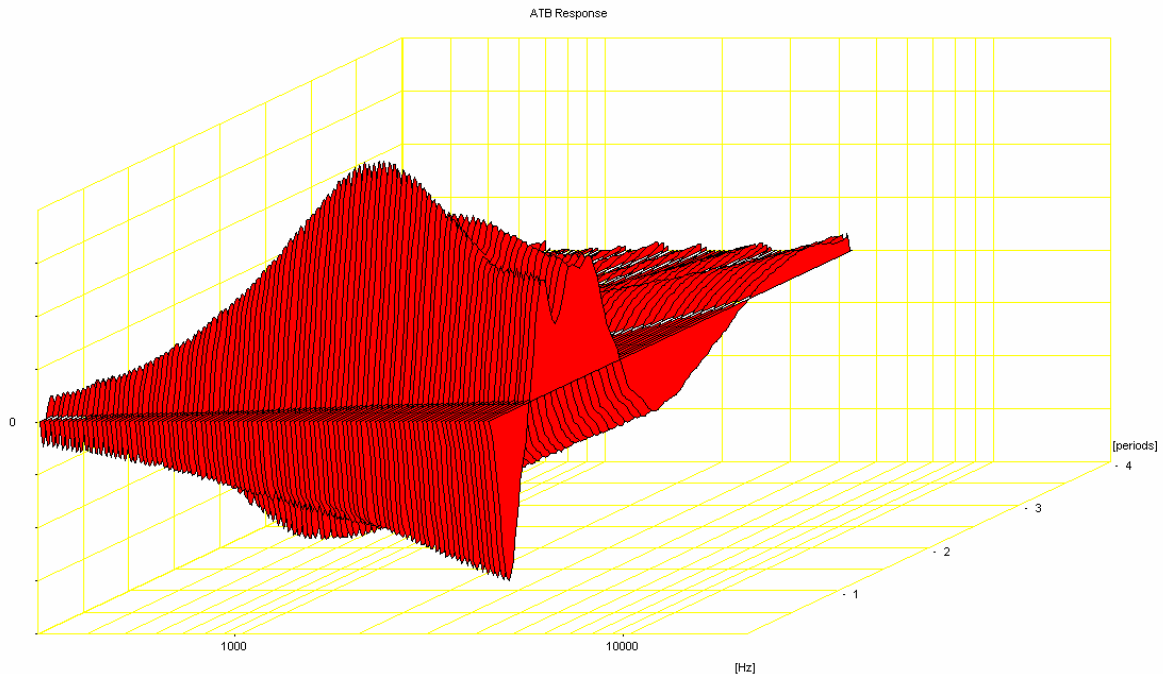


Bild 5.1 Dynamic-Measurement Messung bei der Schallwand  $D = 8$

Das Bild 5.1 zeigt das invertierte Impulsverhalten des Lautsprechers auf der Schallwand mit  $D = 8$ , Vorne ist der erste invertierte Impuls zu sehen, danach das Gebirge des Überschwingens. Zu höheren Frequenzen hin entsteht in dem Gebirge ein Einbruch. Dieser wird von der verzögerten Reflexion der Schallwand erzeugt.

Für die Beurteilung des Klanges eines rundstrahlenden Lautsprechers auf einer großen Schallwand muss der Hörtest herangezogen werden. Hier zeigt sich, dass Lautsprecher mit einer großen Schallwand keine gute räumliche Wiedergabe besitzen. Der Klang scheint aus einer Kiste zu kommen. Deswegen werden moderne Lautsprecher nicht nur aus optischen Gründen schmal gebaut. Die Erklärung für die wenig räumliche Wiedergabe der Lautsprecher ist, dass die Reflexionen bei großen Schallwänden so stark verzögert abstrahlen, dass das Ohr sie als zusätzliche Schallquelle hört. Dies verhindert, dass der Lautsprecher bei der Stereowiedergabe als Schallquelle nicht wahrgenommen wird.

Die verzögerten Reflexionen können durch schallabsorbierende Beschichtung der Schallwand vermieden werden. Eine andere Lösung ist die Verwendung von schallrichtenden Lautsprechern. Hier bewährt sich der Konus Hochtöner. Die beste Lösung besteht in einem Waveguide Hochtöner. Durch die spezielle Richtwirkung des Waveguides werden die Schallwandreflexionen weitgehend vermieden.

## W1.6 Vergleich von Schallwand und Waveguide

Die Schallausbreitung von Schallwand und Waveguide wird folgend verglichen.

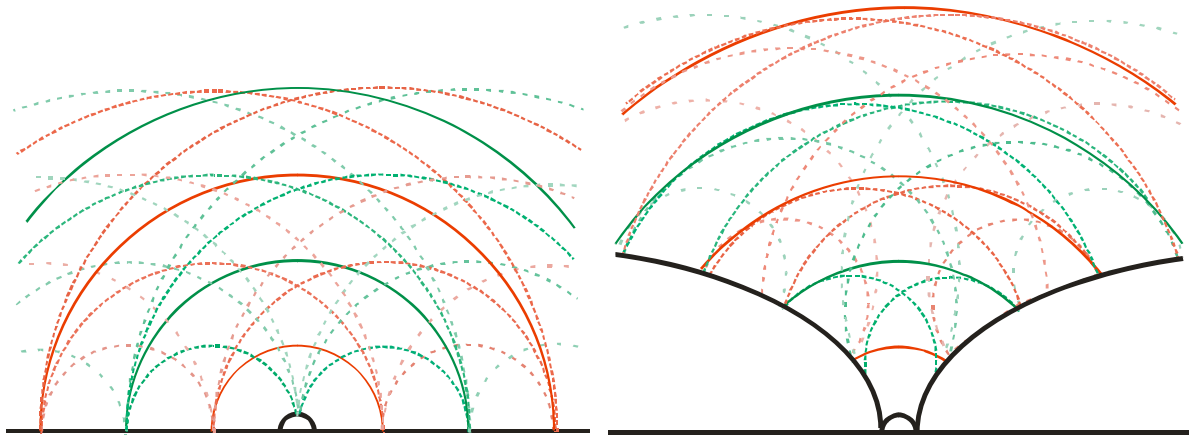


Bild 6.1 Schallfeld der Schallwand

Bild 6.2 Schallfeld des Waveguides

Die roten Linien zeigen die positive und die grünen Linien die negative Amplitude. Die durchgezogenen Linien zeigen die primäre und die gestrichelten Linien die sekundären Schallquellen.

Das Bild 6.1 zeigt das Schallfeld der Schallwand mit den Interferenzen von Primären- und Sekundärschall.

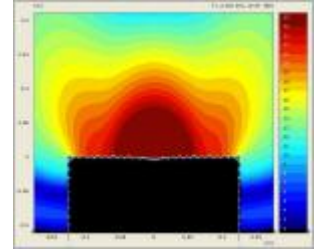
Das Bild 6.2 des Schallfeldes vom Waveguide zeigt, dass bei entsprechender Funktion der Form des Waveguides die primäre und die sekundären Schallwellen eine Wellenfront bilden. Hierdurch entsteht der höhere Schalldruck für die gezeigte Frequenz. Dies zeigt sich auch über einen größeren Frequenzbereich.

Im Kapitel 1 werden die Unterschiede zwischen Schallwand und Waveguide auch messtechnisch gezeigt.

Das oben beschriebene Verhalten zeigt auch die Computersimulation der Firma Selmoni speakers aus der Schweiz.

## Simulation

Die Simulation veranschaulicht, dass ein Hochtöner ohne Waveguide in einer üblichen Schallwand eine ungleichmässige Schallverteilung aufweist. Felder gleichen Schalldruckes bilden drei Keulen. Die mittige Keule ist auf die Hörposition gerichtet, die beiden äusseren Keulen breiten sich auf die Seiten des Hörraumes aus und stören dadurch den Klangeindruck.



Ein Hochtöner mit Waveguide weist gemäss Simulation eine deutlich gleichmässiger Schallverteilung auf.

