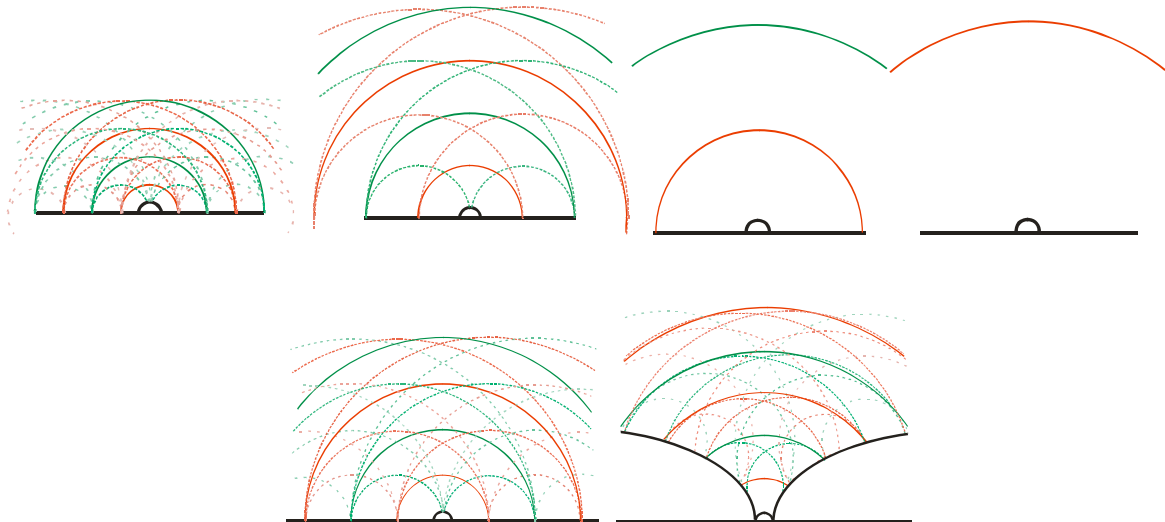


# Vergleich der Schallabstrahlung von Schallwand und Waveguide

Die Stichworte sind:

Primärschallquelle, Sekundärschallquelle, Baffel Step, zeitrichtig.



Autor:

Dipl-Ing. Leo Kirchner

## Inhaltsverzeichnis:

1. Die Phantom- oder Sekundärschallquelle.....	3
2. Der Baffel Step.....	4
3. Nachweis der Sekundärschallquelle.....	5
4. Das zeitliche Verhalten der Schallwelle auf der Schallwand.....	8
5. Die verzögerte Reflexion von der Schallwand.....	10
6. Vergleich von Schallwand und Waveguide.....	11
7. Das Abstrahlverhalten vom Waveguide.....	12
8. Das Wasserfalldiagramm des Waveguides.....	13
9. Dynamic-Measurement.....	13

## 1. Die Phantom- oder Sekundärschallquelle.

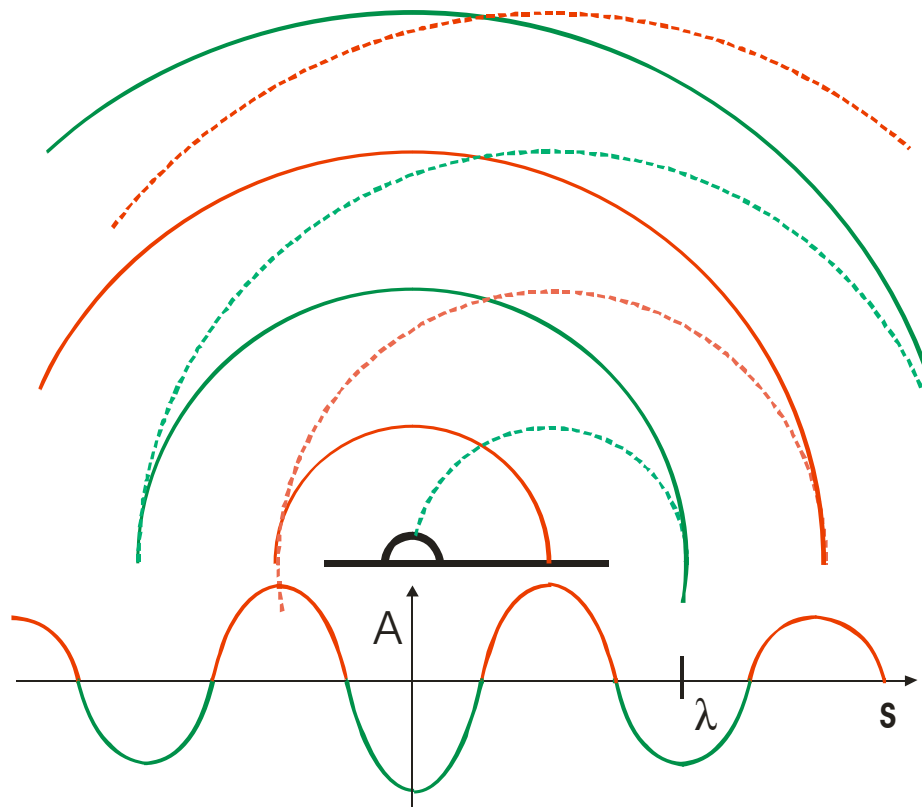


Bild 1.1 Schallfeld

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.

## 2. Der Baffel Step

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

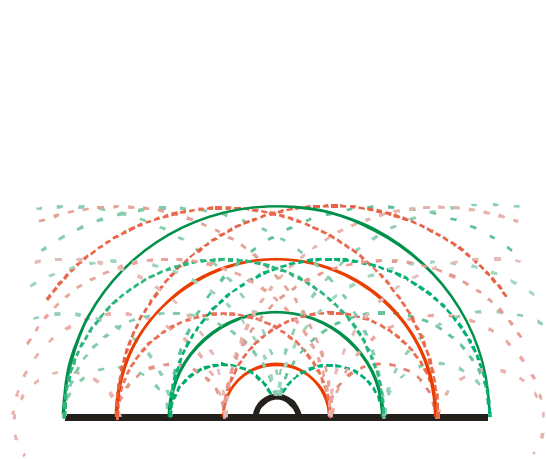


Bild 2.1  $\lambda > D$

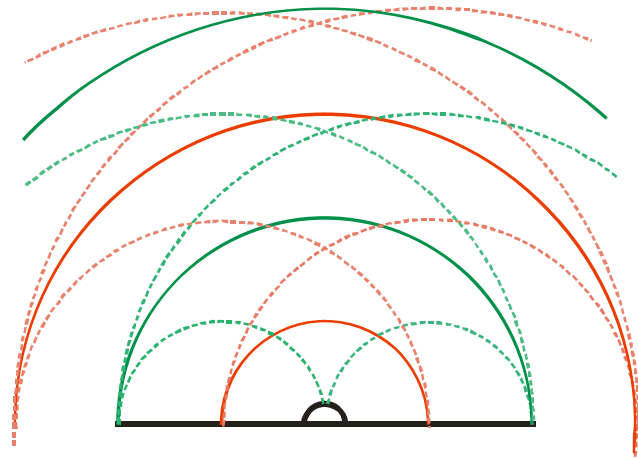


Bild 2.2  $\lambda = \frac{1}{2} D$



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 ausgeglichensten 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.

### 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.

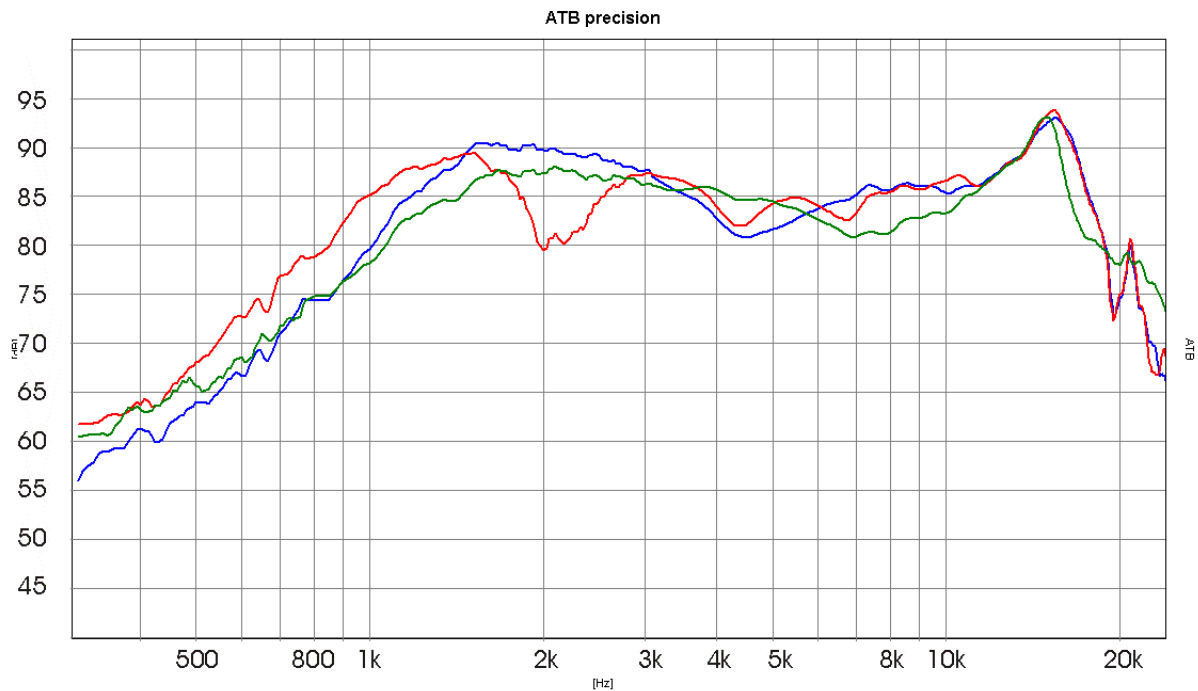


Bild 3.4 Frequenzgänge der Schallwände auf Achse gemessen  
 Grün D = 8cm, blau D = 13cm, rot D = 27cm

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.

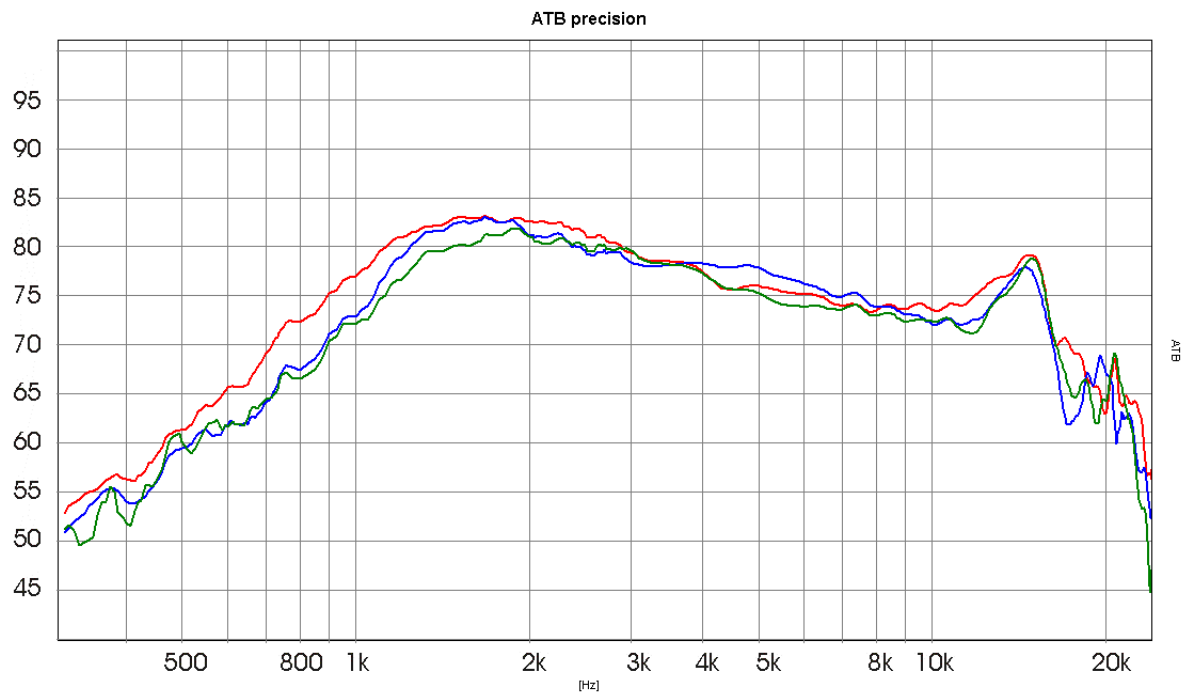


Bild 3.5 Frequenzgänge der Schallwände unter 45° gemessen  
 Grün D = 8cm, blau D = 13cm, rot D = 27cm

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.

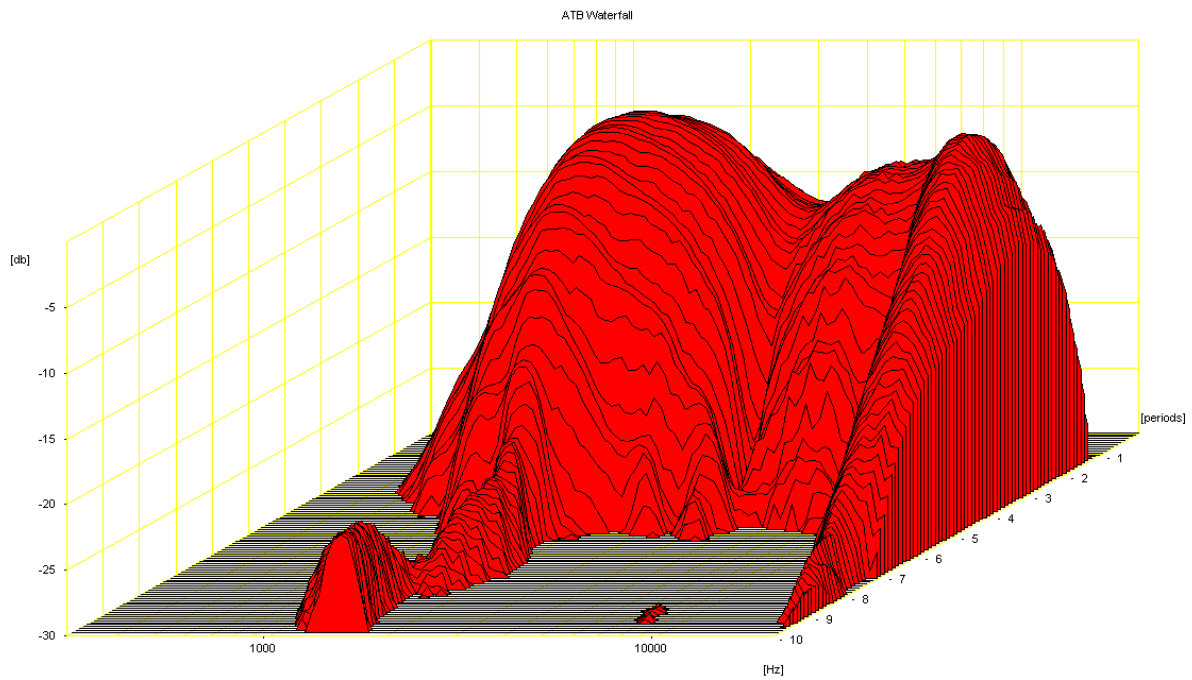


Bild 3.6 Wasserfalldiagramm

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.

## 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.

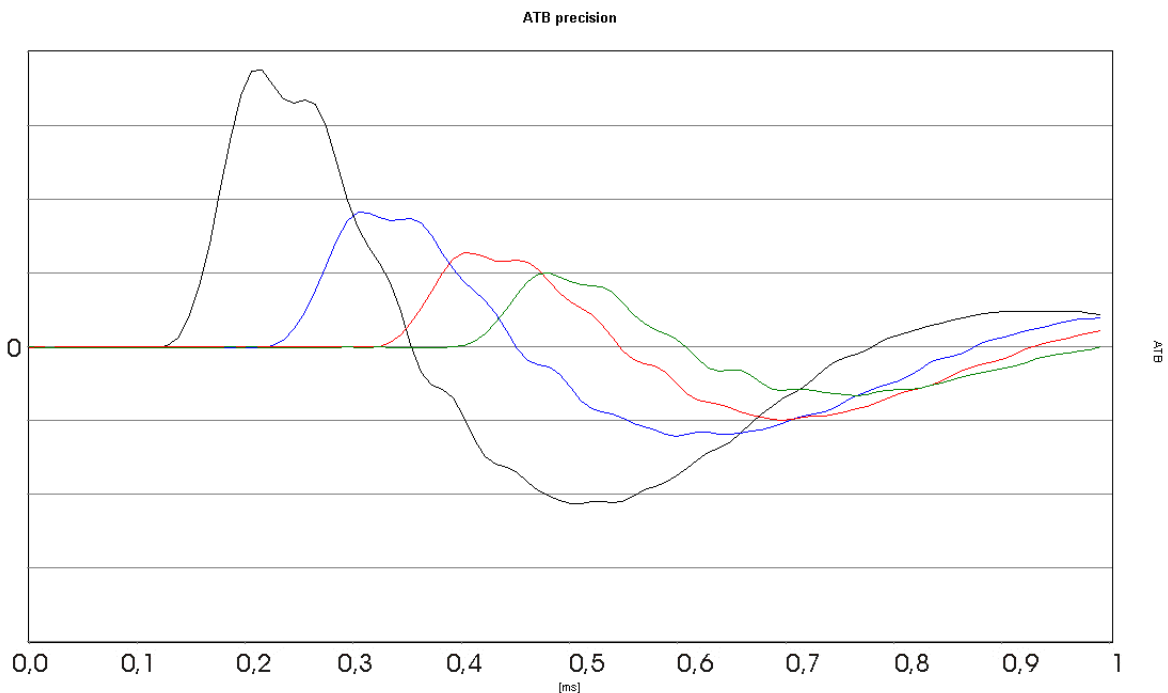


Bild 4.1 Sprungantwortmessungen auf der Schallwand

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.



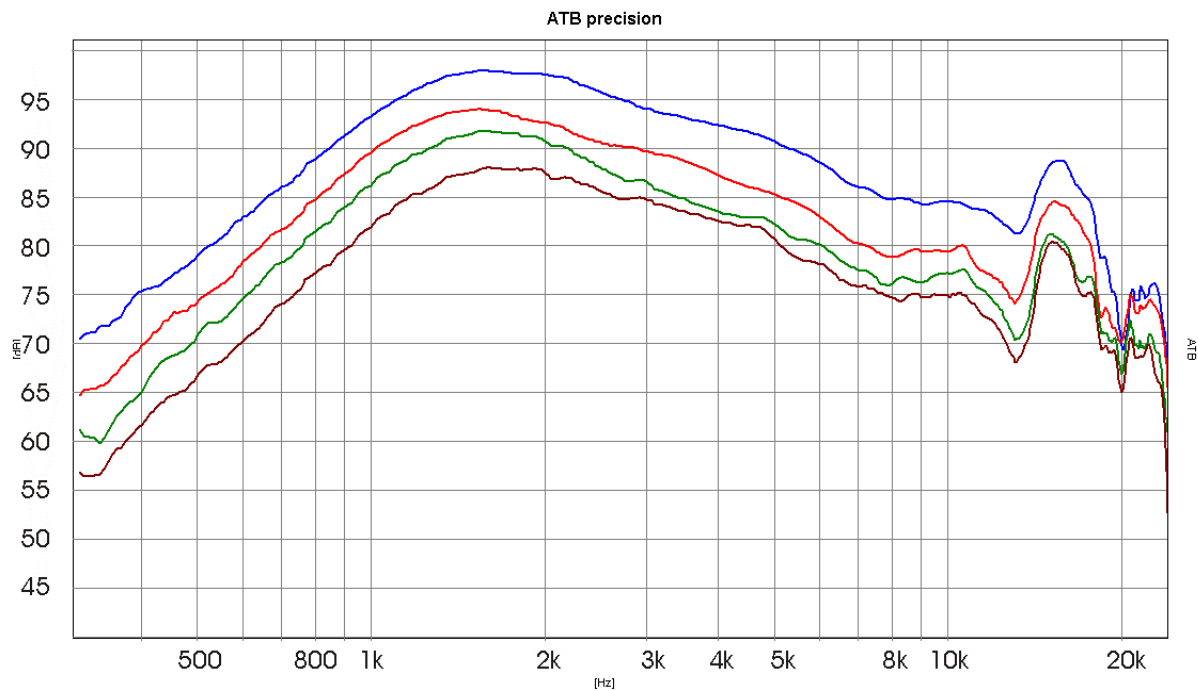


Bild 4.2 Frequenzgänge in verschiedenen Abständen auf der Schallwand gemessen  
 Abstand vom Mittelpunkt: blau = 4,5cm, rot = 7,5cm, grün = 10,5cm, braun = 13,5cm

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.

## 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.

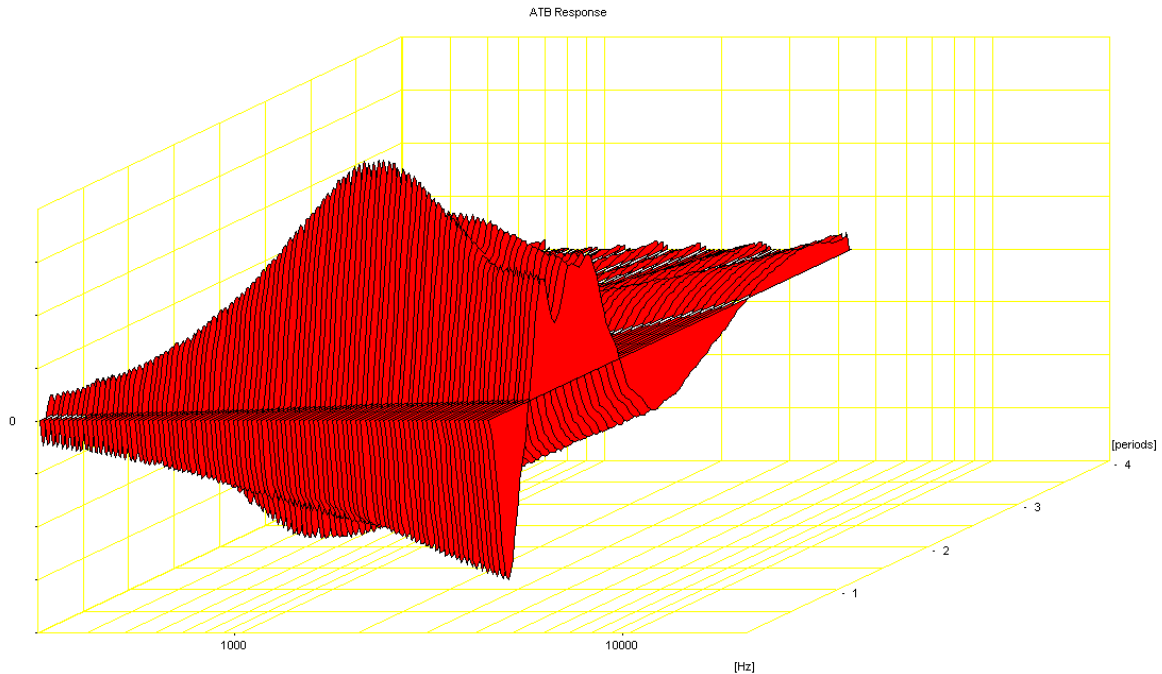


Bild 5.1 Dynamic-Measurement Messung bei der Schallwand  $D = 8$

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.

## 6. Vergleich von Schallwand und Waveguide

Die Schallausbreitung von Schallwand und Waveguide wird folgend verglichen.

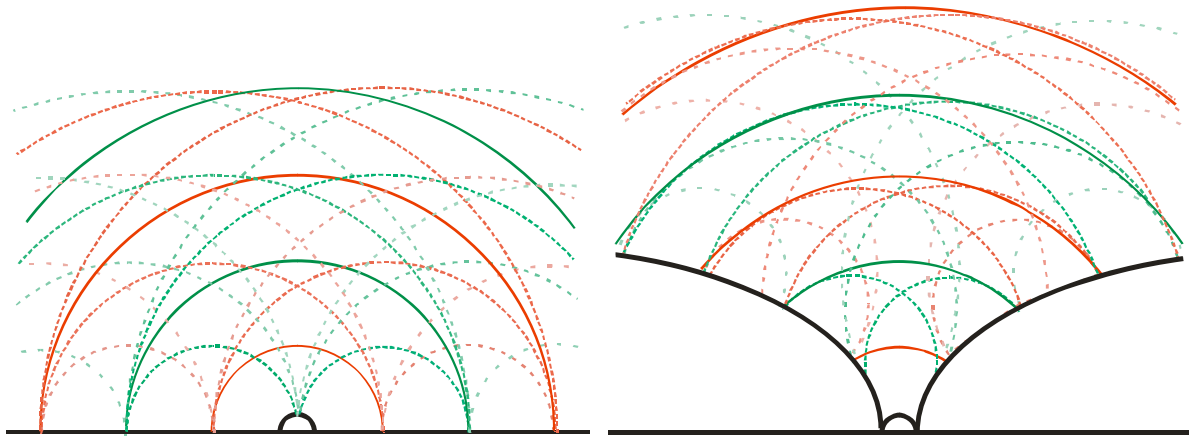


Bild 6.1 Schallfeld der Schallwand

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 Sekundärenschall.

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.

In den folgenden Messungen werden die Unterschiede zwischen Schallwand und Waveguide auch messtechnisch gezeigt.

## 7. Das Abstrahlverhalten vom Waveguide

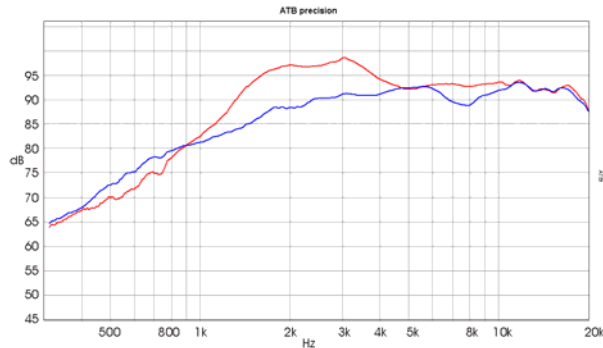


Bild 7.1 Vergleich der Frequenzgänge  
Die blaue Kurve zeigt den Frequenzgang der Kalotte und die rote den des Waveguides auf der Achse gemessen. Für die tieferen Frequenzen wird der Schalldruck durch den Strahlungswiderstand des Waveguides erhöht.

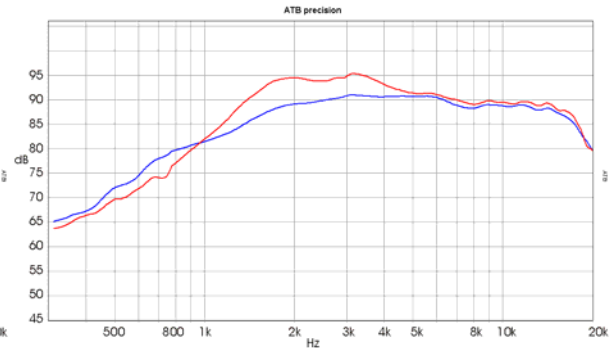


Bild 7.2 Schallleistung  
Die blaue Kurve zeigt die Schallleistung über die Frequenz der Kalotte und die rote die des Waveguides.

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.

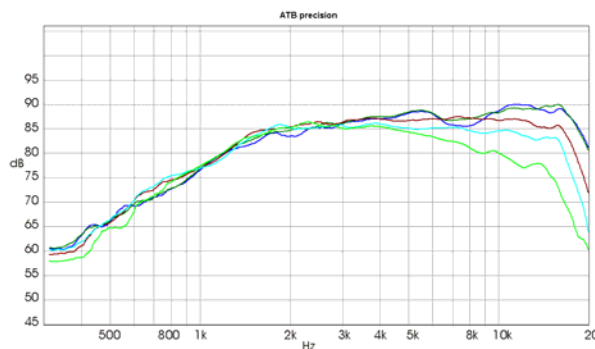


Bild 7.3 Abstrahlverhalten Kalotte  
Blau=0°, dunkelgrün=15°, rot=30°, hellblau =45°, hellgrün= 60°.  
Mit größerem Winkel fällt die Kurve zu höheren Frequenzen ab. Hierdurch wird der Klang von der Sitzposition abhängig. Mit größerem Winkel besteht ein Höhenabfall.

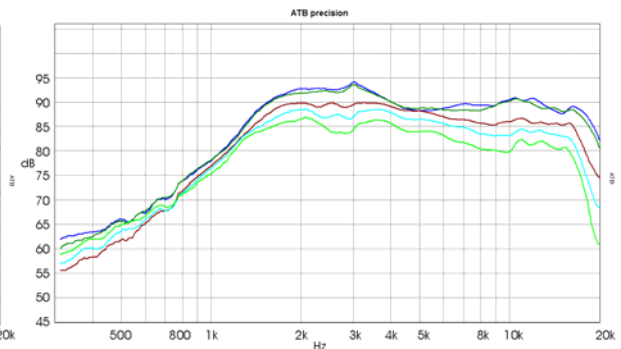


Bild 7.4 Abstrahlverhalten Waveguide  
Blau=0°, dunkelgrün=15°, rot=30°, hellblau =45°, hellgrün= 60°.  
Mit größerem Winkel wird der Schalldruck geringer, die Charakteristik der Kurve bleibt. Dies zeigt, dass der Klang für verschiedene Sitzpositionen gleich bleibt.

## 8. Das Wasserfalldiagramm des Waveguides

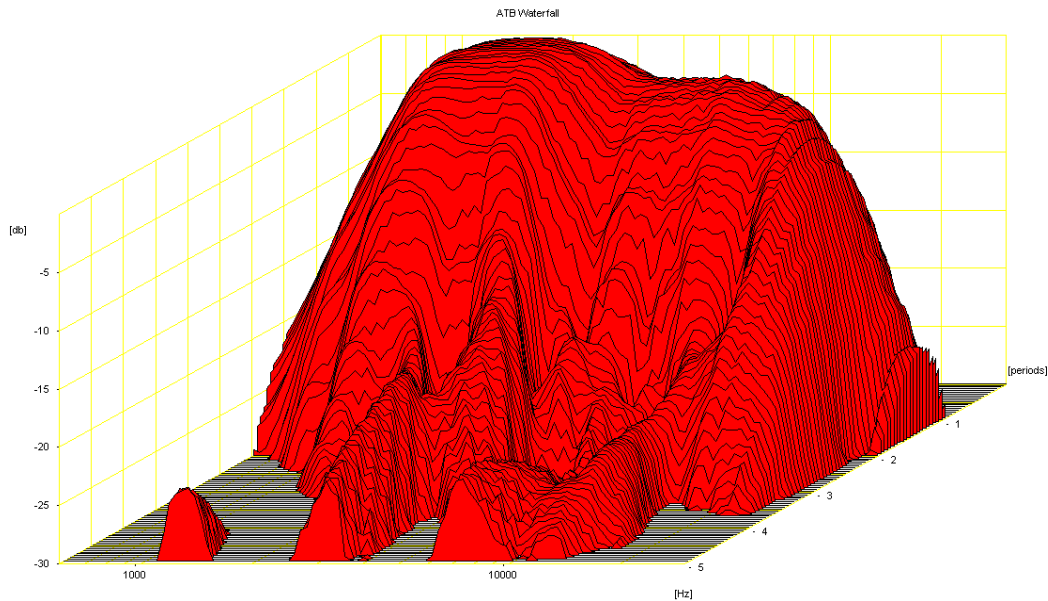


Bild 8.1 Wasserfalldiagramm

Das Bild 8.1 zeigt das gute zeitliche Verhalten des Waveguide Hochtöners

## 9. Dynamic-Measurement

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

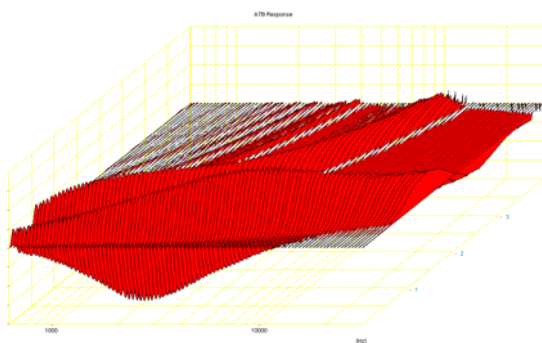


Bild 9.1 Impulsverhalten des Waveguide

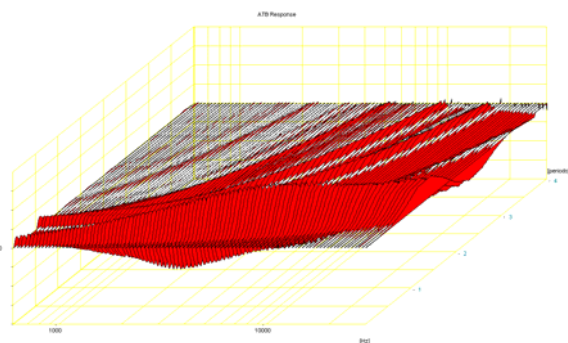


Bild 9.2 Impulsverhalten Kalotte

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. Die Resonanz wird elektrisch mit einem Saugkreis in der Weiche unterdrückt.