

# Untersuchung von Subwoofersystemen

---

Von  
Nils Öllerer, 2013

## Inhalt

Motivation .....	3
Simulationen .....	3
Anordnung in den Ecken .....	3
Anordnung auf $\frac{1}{4}$ der Wand .....	4
Anordnung auf $\frac{1}{4}$ der Länge .....	5
Double Bass Array .....	6
Single Bass Array.....	7
Praktische Untersuchung .....	10
Versuchsordnung .....	10
Leerer Raum .....	10
Absorber an der Rückwand .....	12
Parametrischer Equalizer .....	14
Druckkammereffekt .....	18
Fazit .....	20

## Motivation

Ziel ist die Suche nach einem geeigneten Basssystem für ein Heimkino, das folgende Anforderungen erfüllen soll.

1. Übertragungsfunktion möglichst unabhängig von Sitzposition
2. Ausschaltung aller Raummoden
3. Möglichst unsichtbar integrierbar
4. Lokalisation möglichst aus Richtung der Leinwand
5. Hoher Maximalpegel
6. Gute Planbarkeit

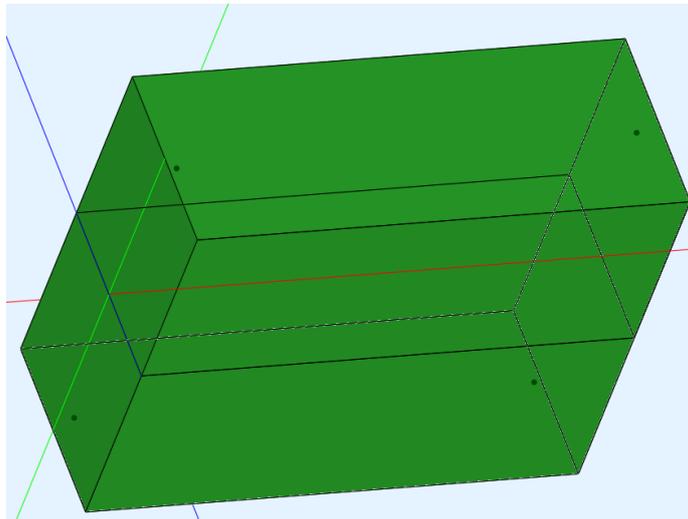
Die Punkte 1.-4. werden vorrangig durch die Platzierung und Anzahl der Subwoofer sowie durch etwaige Absorber bestimmt. Der Maximalpegel kann davon unabhängig betrachtet werden. Es ist immer möglich, durch eine höhere Anzahl von Tieftönern oder größere Membranen und Maximalauslenkung einen höheren Maximalpegel zu erreichen.

## Simulationen

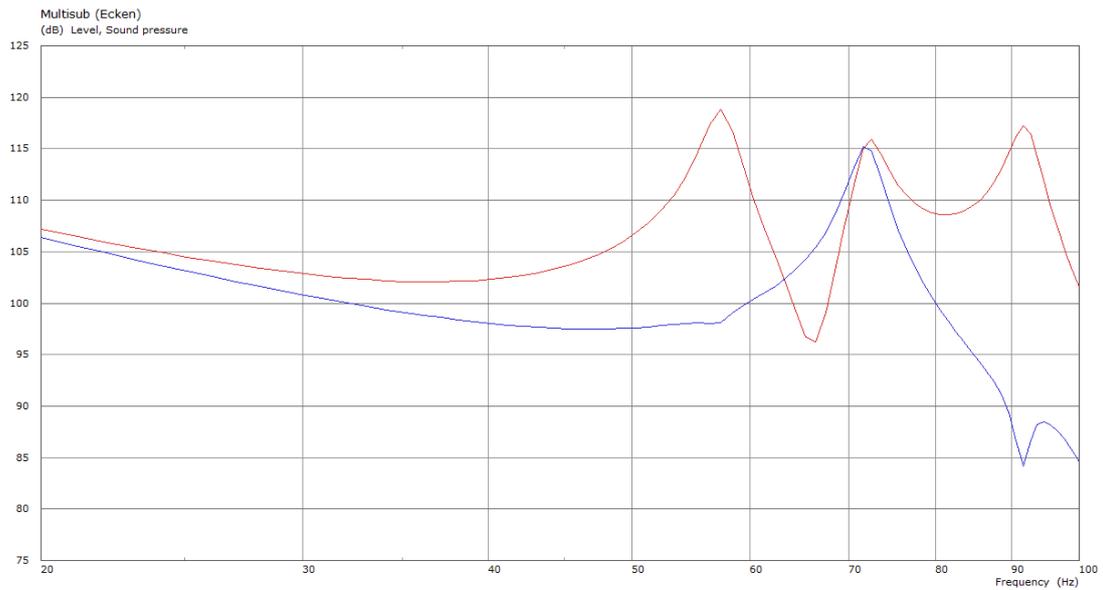
Zunächst sollen einige Subwoofieranordnungen in der Simulation untersucht werden. Die Simulationen wurden mit ABEC durchgeführt. Der Raum hat die Maße 6 x 4,8 x 2,2 m. Die Messpositionen waren 3 und 4,5 m von der vorderen Wand entfernt.

### Anordnung in den Ecken

Bei dieser Anordnung werden die Subwoofer in den Ecken untergebracht. Um die Vertikalmoden nicht anzuregen, werden sie zusätzlich auf  $\frac{1}{2}$  der Raumhöhe platziert. Bei der Simulation kamen 4 Subwoofer zum Einsatz.

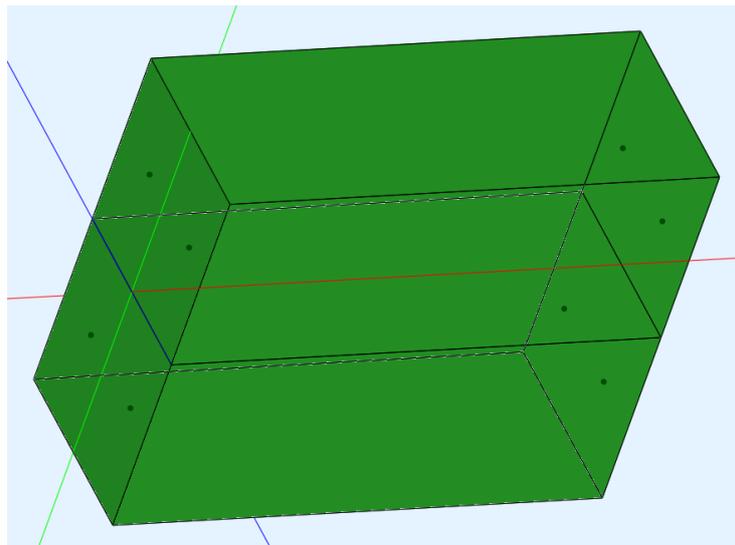


Der Amplitudengang ist im Bereich der Raummoden 1. Ordnung relativ linear. Darüber treten die Moden jedoch deutlich in Erscheinung. Zudem ist der Amplitudengang in diesem Bereich stark positionsabhängig.

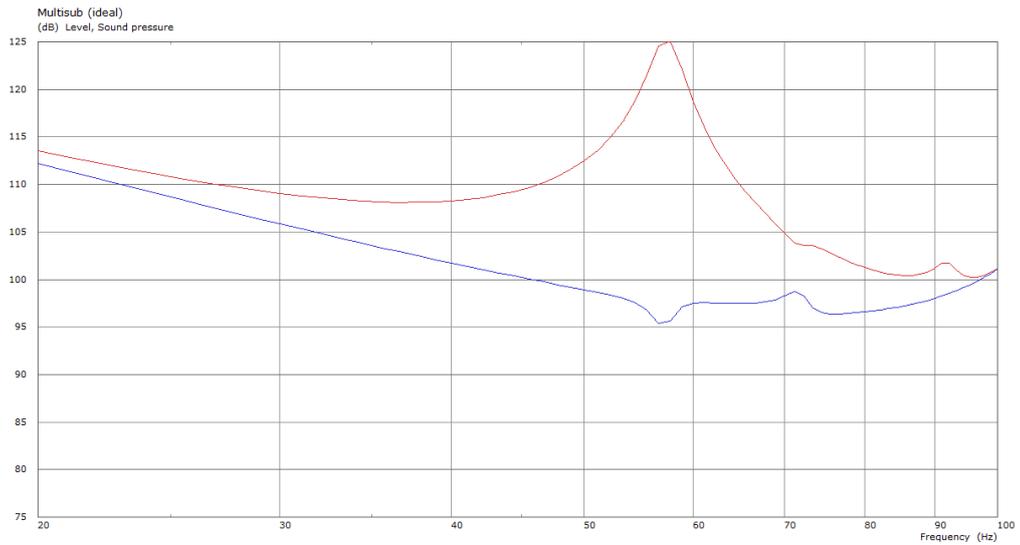


### Anordnung auf $\frac{1}{4}$ der Wand

Bei dieser Anordnung werden die Subwoofer direkt an der Wand auf  $\frac{1}{4}$  bzw.  $\frac{3}{4}$  der Raumbreite und -höhe platziert. Bei dieser Simulation kamen 8 Subwoofer zum Einsatz.

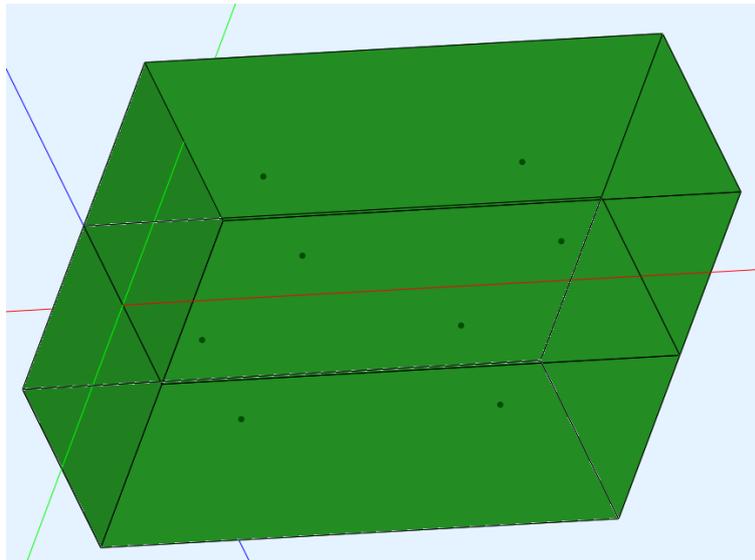


Der Amplitudengang ist im Bereich der Raummoden 1. Ordnung relativ linear. Darüber tritt die Längsmode 2. Ordnung jedoch deutlich in Erscheinung. Zudem ist der Amplitudengang in diesem Bereich stark positionsabhängig

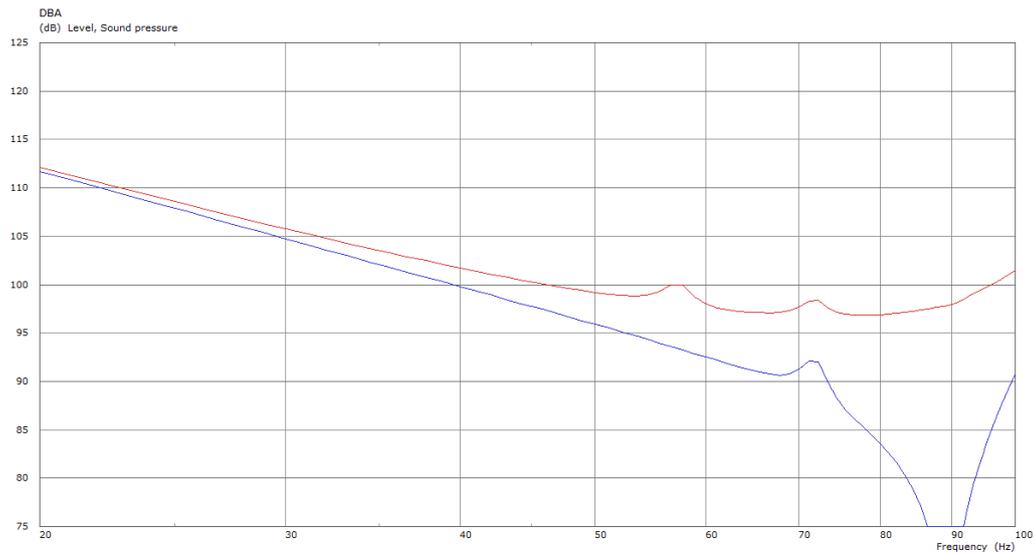


### Anordnung auf $\frac{1}{4}$ der Länge

Als weitere Optimierung wurden die Subwoofer zusätzlich auf  $\frac{1}{4}$  bzw.  $\frac{3}{4}$  der Raumlänge positioniert.

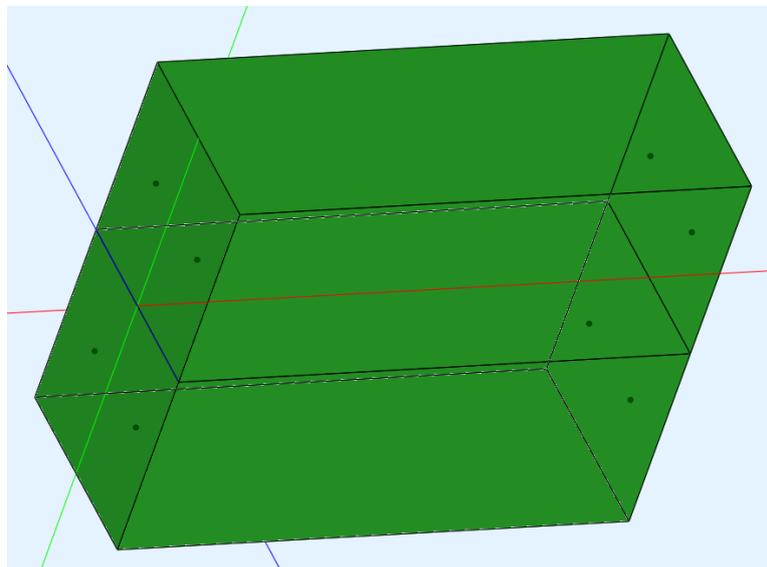


Der Amplitudengang ist jetzt auch im Bereich der 2. Längsmode deutlich linearer und ist auch nicht mehr so positionsabhängig. Praktikabel ist diese Anordnung allerdings nicht, da sich die Subwoofer in einem Heimkino innerhalb des Sichtbereiches befinden.

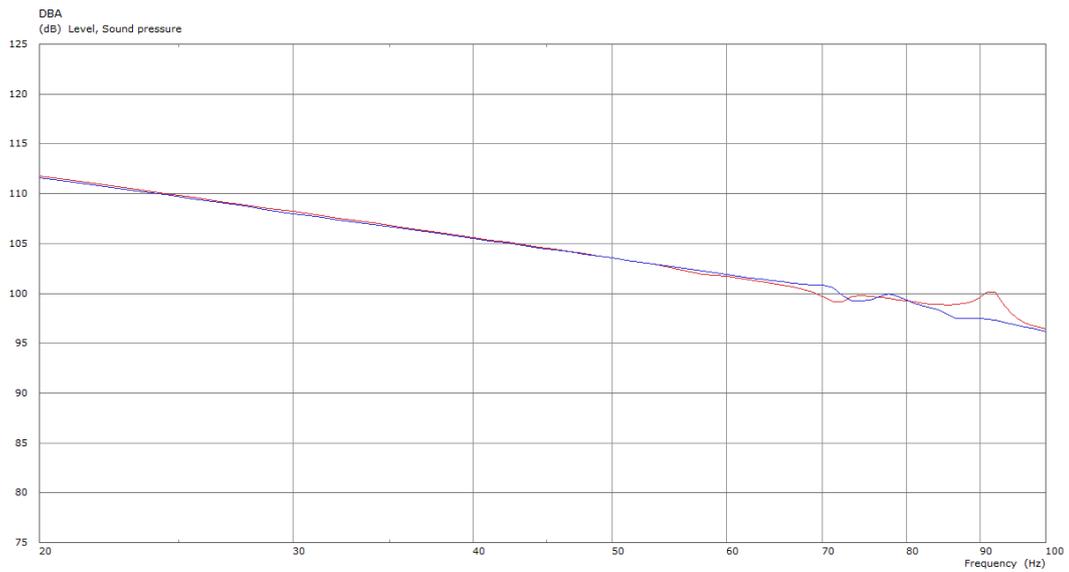


### Double Bass Array

Bei dieser Anordnung werden jeweils 4 Subwoofer direkt an der Wand auf  $\frac{1}{4}$  bzw.  $\frac{3}{4}$  der Raumbreite und -höhe platziert. Dadurch werden die Horizontal- und Vertikalmoden bis zu einer gewissen Frequenz nicht angeregt. Die Subwoofer an der Rückwand werden invertiert und mit einem zeitverzögerten Signal versorgt. Die Zeitverzögerung ist so eingestellt wie der Schall des vorderen Tieftongitters benötigt, um die Rückwand zu erreichen. Dadurch entsteht eine aktive Auslöschung. Bei dieser Simulation kamen 8 Subwoofer zum Einsatz.

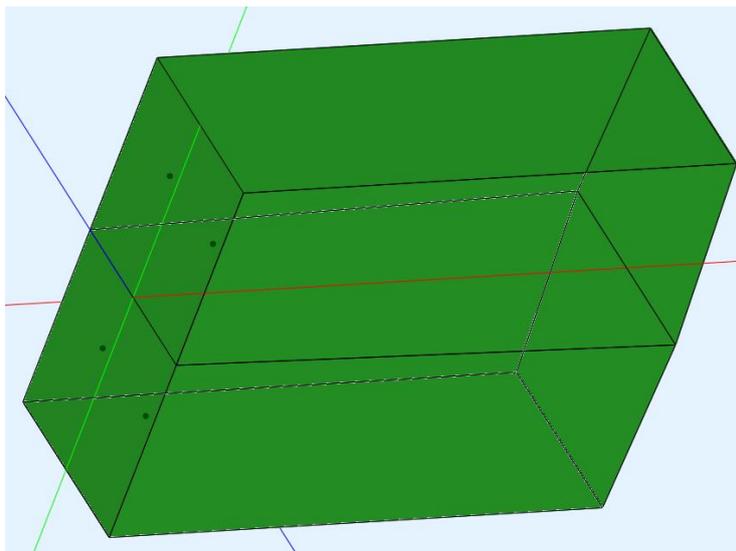


Das DBA ist extrem linear und positionsunabhängig. Praktische Erfahrungen haben bereits gezeigt, dass dieses System in quaderförmigen Räumen sehr gut funktionieren kann. Mehr Informationen gibt es bei [Wikipedia](https://de.wikipedia.org/wiki/Double_Bass_Array).



### Single Bass Array

Beim Single Bass Array (SBA) wurden die Subwoofer direkt an einer Wand auf  $\frac{1}{4}$  bzw.  $\frac{3}{4}$  der Raumbreite und -höhe platziert. Es wurden 4 Subwoofer simuliert.



Der Amplitudengang ist zunächst durch die Längsmoden komplett zerklüftet und positionsabhängig. Das ändert sich jedoch, wenn die Rückwand als Absorber ausgeführt wird.

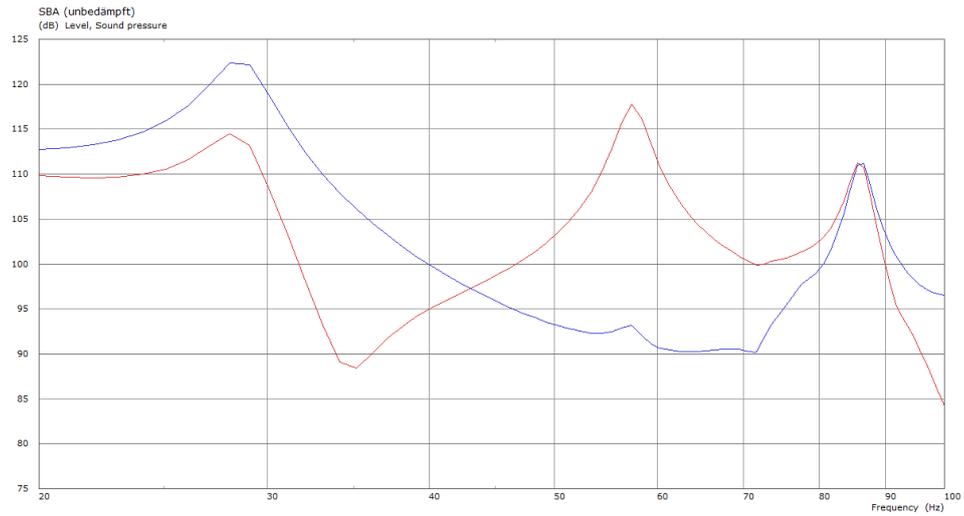


Abbildung 1: SBA ohne Absorber

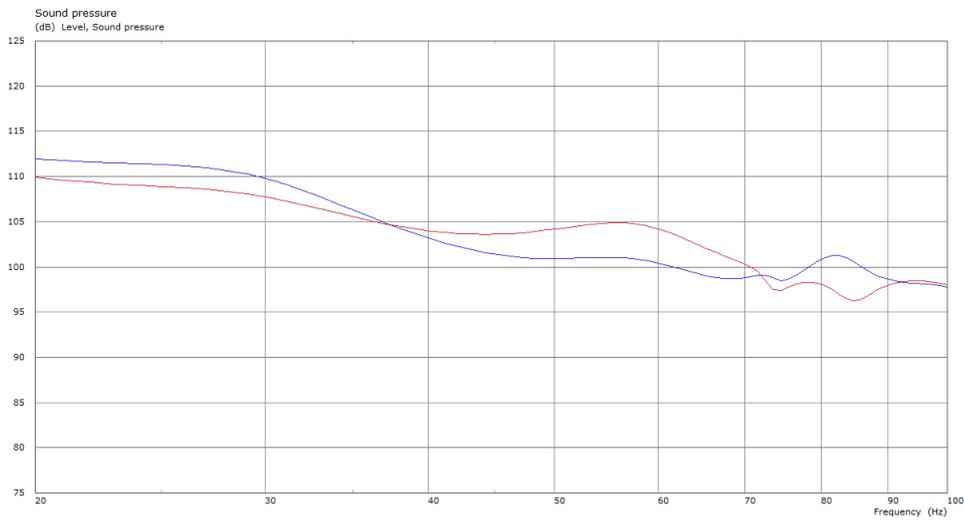


Abbildung 2: SBA mit 50% absorbierender Rückwand

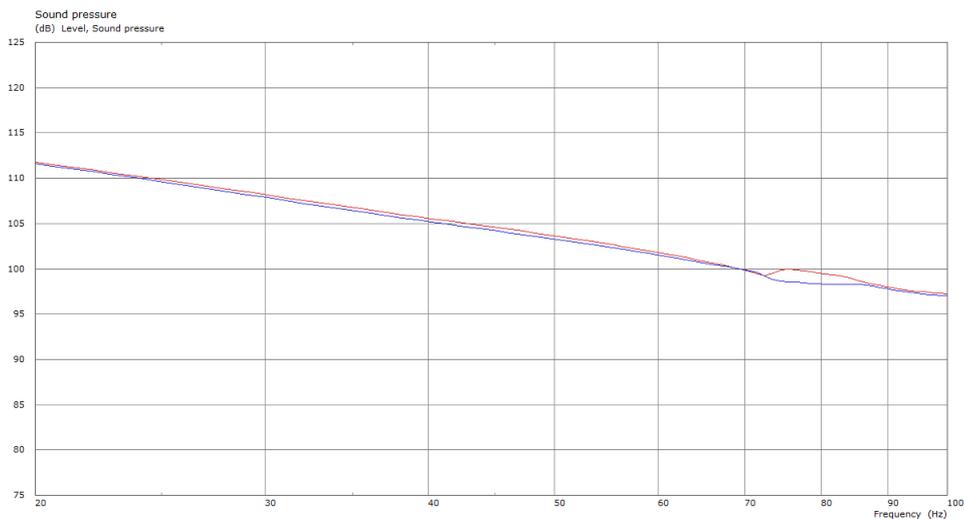


Abbildung 3: SBA mit 100% absorbierender Rückwand

Mit einem idealen Absorber ist das SBA komplett linear und positionsunabhängig. Außerdem ist es doppelt so effizient wie die anderen Anordnungen, da die Hälfte der Treiber ausreicht, um denselben Schalldruckpegel zu erzeugen.

## Praktische Untersuchung

Für die praktische Untersuchung wurde das Single Bass Array (SBA) gewählt. Bei diesem werden genauso wie bei einem Double Bass Array (DBA) die Subwoofer so an der Wand platziert, dass sich eine ebene Welle bildet. Damit lässt es sich problemlos hinter einer akustisch transparenten Leinwand integrieren. Im Gegensatz zu einem DBA benötigt es allerdings nur halb so viele Treiber und Endstufen, so dass die Kosten reduziert werden. Sowohl SBA als auch DBA sind gut planbar, da die Positionen der Subwoofer von vornerein feststehen.

## Versuchsanordnung

Der Versuchsraum hat die Maße 6 x 4,8 x 2,2 m (L x B x H). Die Längsmoden liegen damit bei 28, 57 und 86 Hz. Die Wände dieses Raumes bestehen aus Kalksandstein. Boden und Decke bestehen aus Beton.

Es wurden zwei Subwoofer mit Bassreflexgehäusen an einer Wand platziert (im Folgenden: vordere Wand). Die Position der Tieftöner wurde auf  $\frac{1}{2}$  der Raumhöhe und  $\frac{1}{4}$  bzw.  $\frac{3}{4}$  der Raumbreite festgelegt. Dadurch bildet sich bis ca. 70 Hz eine ebene Welle. Somit wird unterhalb dieser Grenze der Einfluss der Quer- und Horizontalmoden ausgeschaltet.

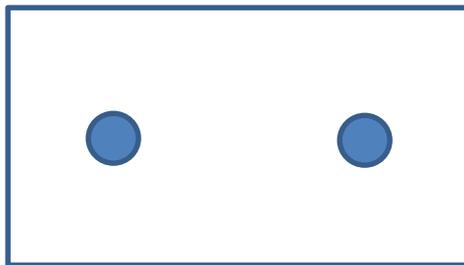


Abbildung 4: Anordnung der Subwoofer an der vorderen Wand

## Leerer Raum

Es wurden jeweils Messungen bei 2, 3 und 4 m Entfernung zur vorderen Wand durchgeführt. Im Bereich von 4m wird sich später eine Sitzreihe des Kinos befinden. Daher ist diese Messung für die praktische Betrachtung besonders interessant.

Horizontal und vertikal war das Mikrofon mittig angeordnet. Solange die ebene Welle gebildet werden kann, gibt es innerhalb einer Sitzreihe kaum Schwankungen. Daher beschränkt sich die Untersuchung zunächst ausschließlich auf die Längsrichtung.

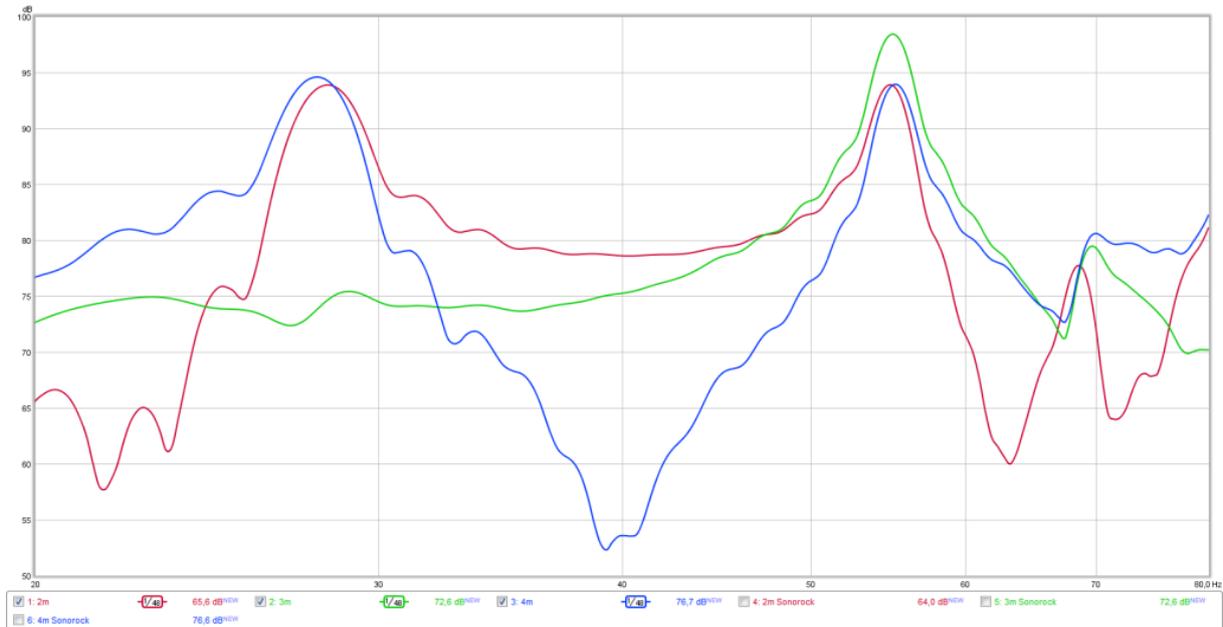


Abbildung 5: Amplitudengänge im leeren Raum

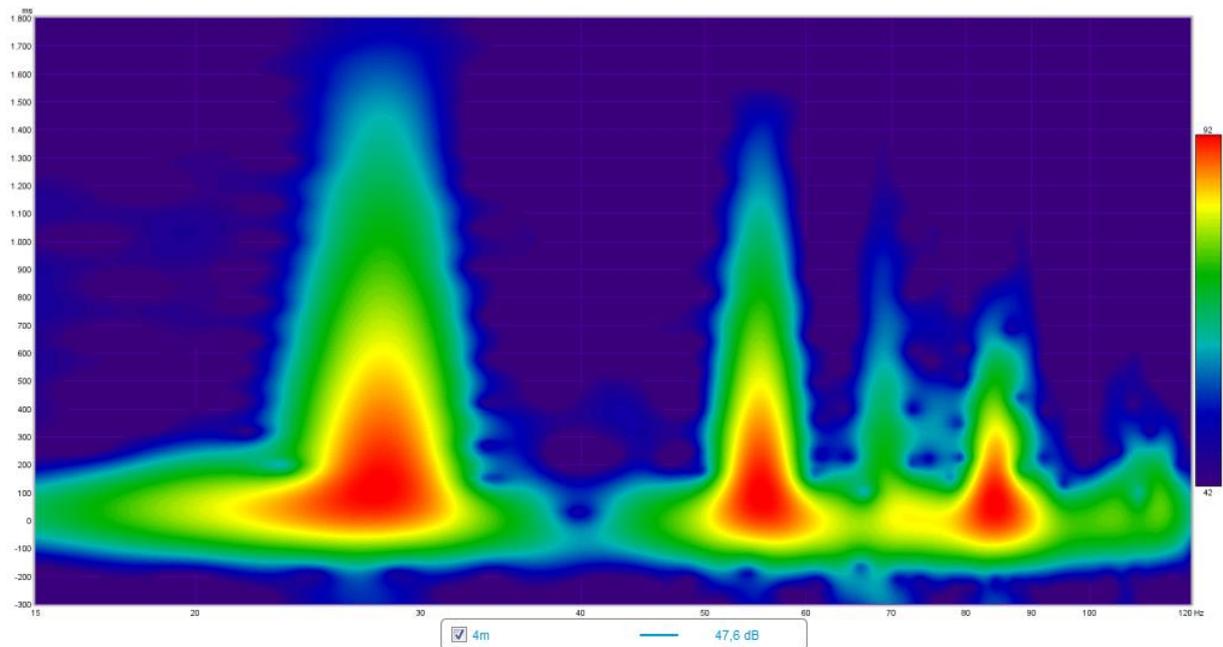


Abbildung 6: Spektrogramm bei 4 m Entfernung zur vorderen Wand

Es ist gut zu erkennen, dass unterhalb von 70 Hz nur die Längsmoden übriggeblieben sind. Die Bildung der ebenen Welle funktioniert also wie vorhergesagt. Das Muster der Moden im Amplitudengang ist vor allem bei 4 m extrem ausgeprägt. Die Mode 1. Ordnung zeigt bei 3 m, also genau der Raummitte, keine Überhöhung. Das deckt sich soweit mit der Theorie.

Der Amplitudengang der drei Messpunkte schwankt um ca. +/- 25 dB. Der Ausgleich per Equalizer ist damit ausgeschlossen. Weiterhin entspricht eine so stark ortsabhängige Übertragungsfunktion nicht mal ansatzweise dem Ziel. Der nächste Schritt war also, die Längsmoden zu bedämpfen.

## Absorber an der Rückwand

Als nächster Schritt wurde an der Rückwand poröser Absorber mit 55 cm Dicke angebracht. Der Absorber bedeckte dabei 90% der Wand. Als Material kam Steinwolle (Rockwool Sonorock) zum Einsatz, da dieses mit einem längenbezogenen Strömungswiderstand von  $6.000 \text{ Pa} \cdot \text{m}/\text{s}^2$  ideal als massiver Tieftonabsorber geeignet ist.



Abbildung 7: Poröser Absorber an der Rückwand

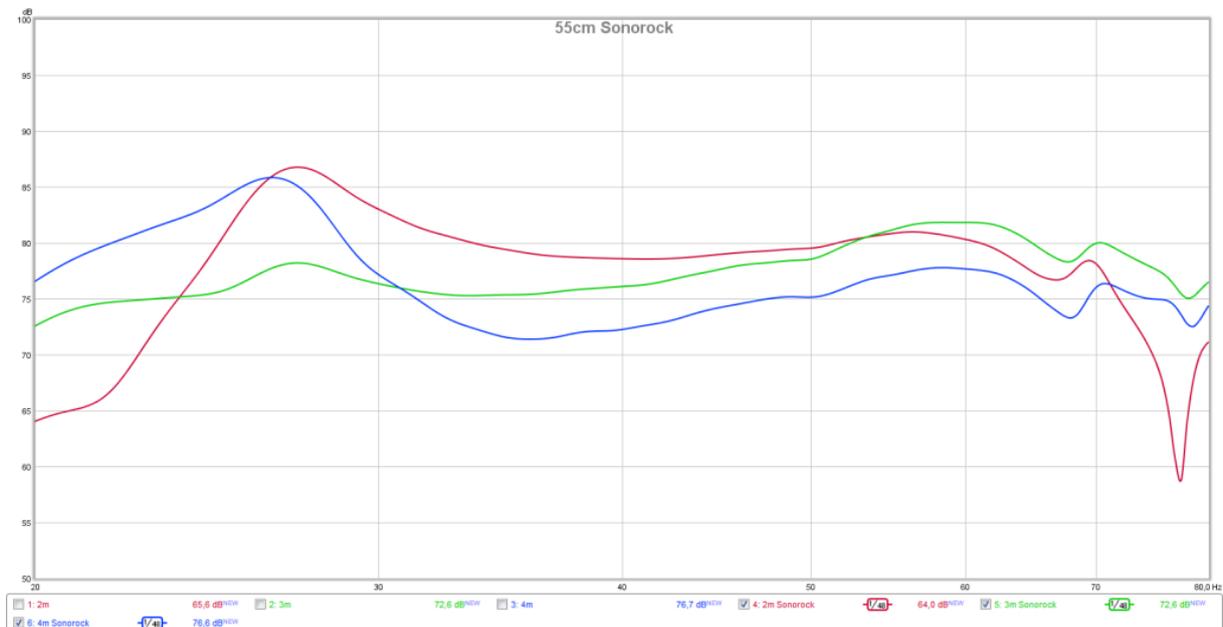


Abbildung 8: Amplitudengänge bei bedämpfter Rückwand

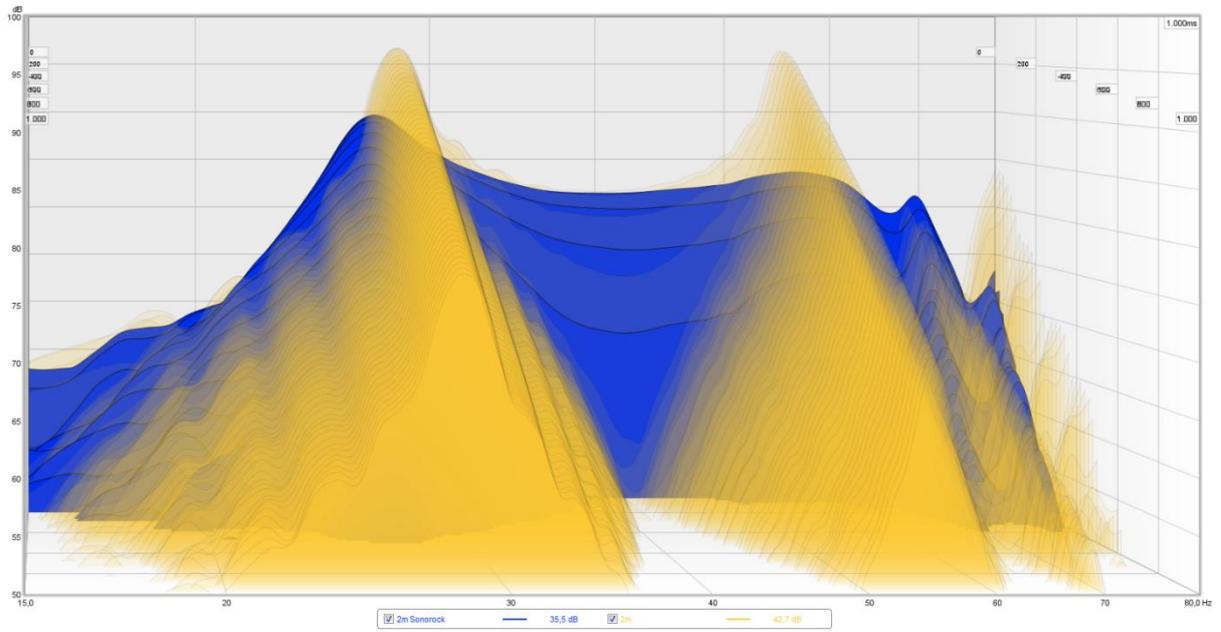


Abbildung 9: Abklingspektrum 2 m

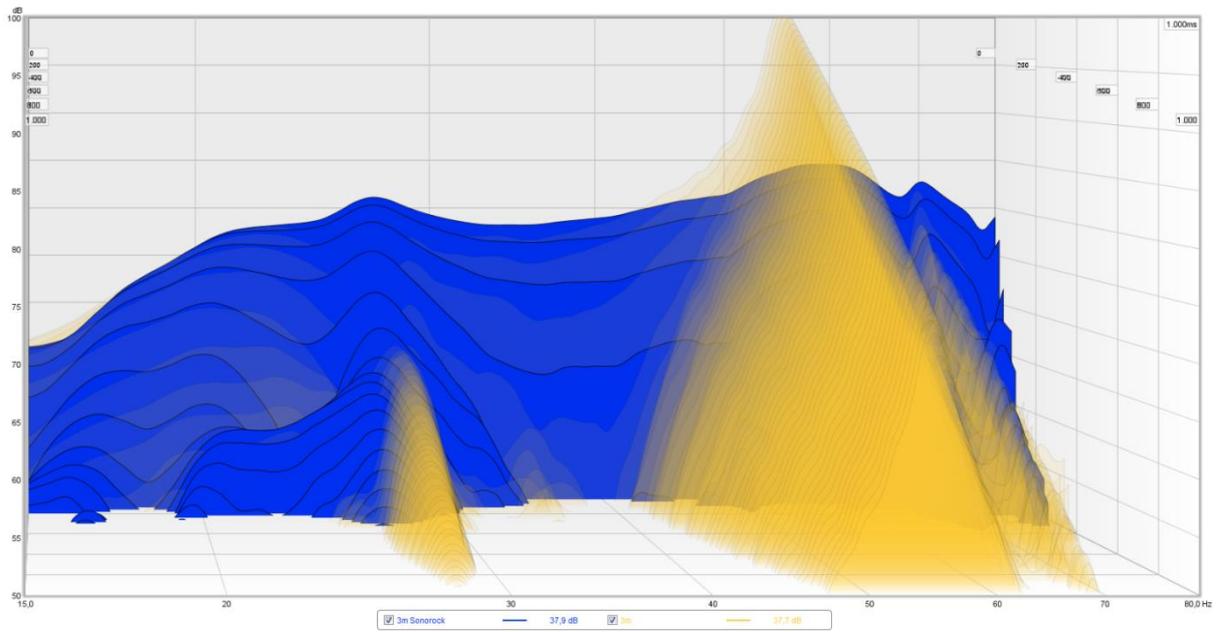


Abbildung 10: Abklingspektrum 3 m

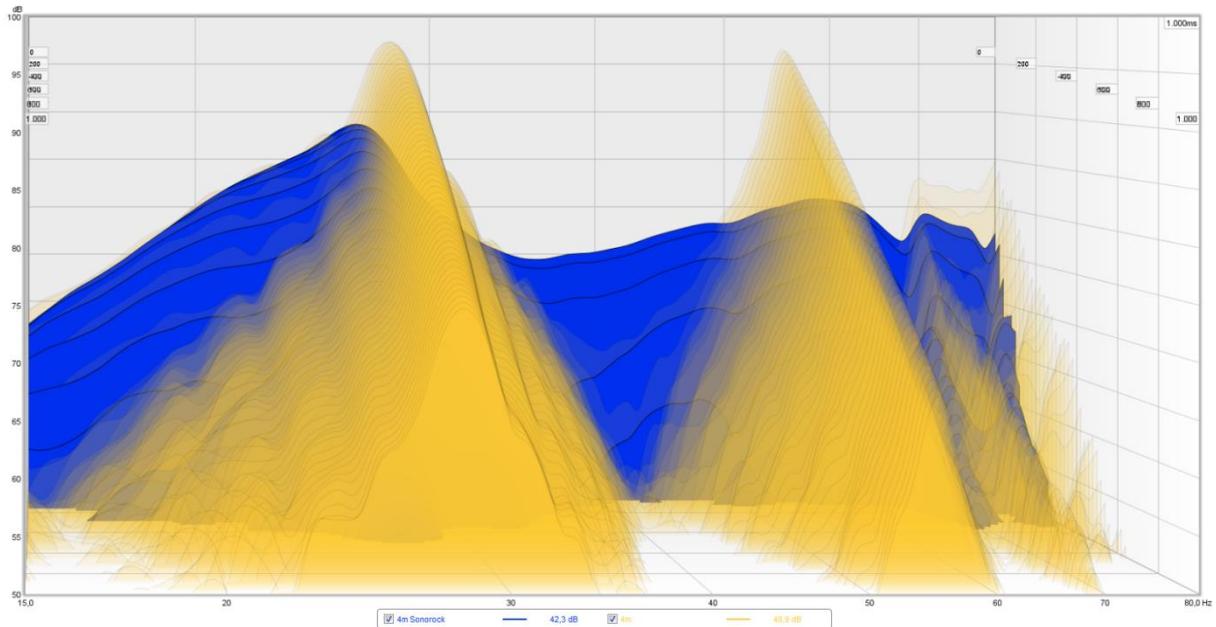


Abbildung 11: Abklingspektrum 4 m

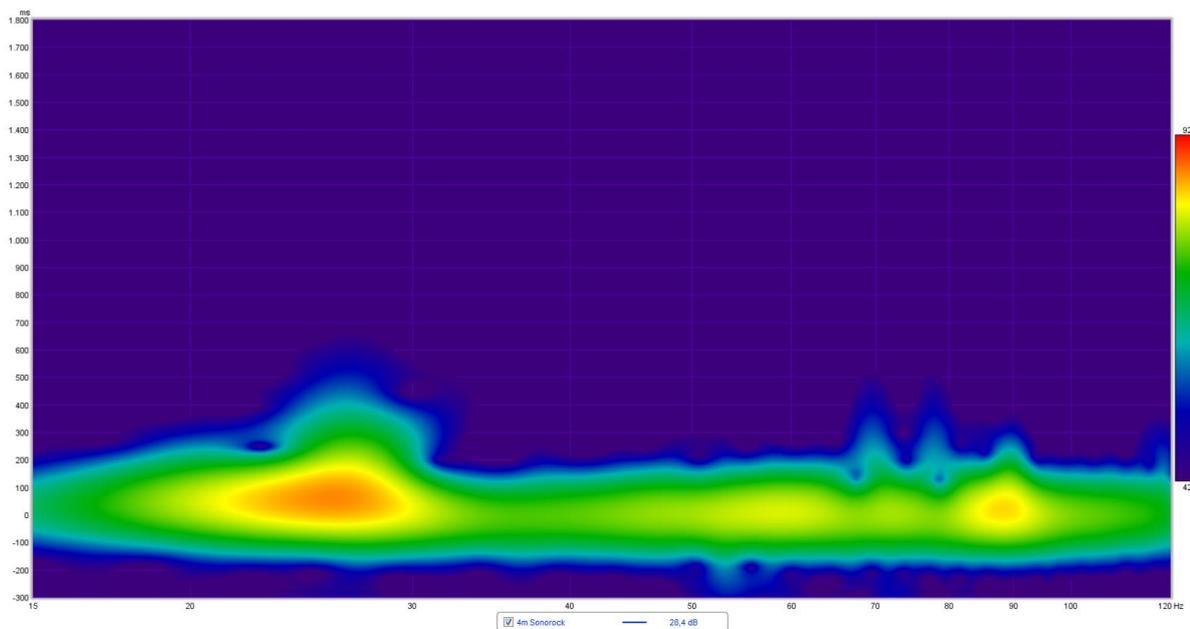


Abbildung 12: Spektrogramm bei 4 m mit bedämpfter Rückwand

Die 55 cm Steinwolle bedämpfen die Längsmoden 2. und 3. Ordnung fast komplett. Die Längsmode 1. Ordnung ist zwar noch vorhanden, allerdings schon sehr stark bedämpft. Das Abklingen ist auf ca.  $\frac{1}{4}$  der Zeit reduziert.

Die Amplitudengänge der drei Messpunkte schwanken maximal nur noch um ca.  $\pm 7$  dB. Das ist zu den  $\pm 25$  dB schon eine enorme Verbesserung.

## Parametrischer Equalizer

Als letzter Schritt wurde versucht, den Amplitudengang bei 4 m Entfernung zur vorderen Wand mit einem Equalizer zu begradigen. Raummoden können als minimalphasiges Phänomen betrachtet

werden. Daher kann ein minimalphasiges Filter auch das Abklingen der Mode reduzieren oder sogar ausgleichen, wenn Frequenz, Güte und Amplitude genau genug konfiguriert werden.

Die folgenden Messungen sind mit geschlossenen Subwoofern entstanden. Daher sind die Diagramme nur bedingt mit den obigen vergleichbar. Aus diesem Grund folgen die Auswertungen jeweils ohne und mit Equalizer.

In dem parametrischen Equalizer wurden drei Filter konfiguriert.

1. 27 Hz zur Absenkung der 1. Längsmode
2. 36 Hz zur Anhebung der Senke zwischen der 1. Und 2. Längsmode
3. 86 Hz zur Absenkung der 2. Längsmode

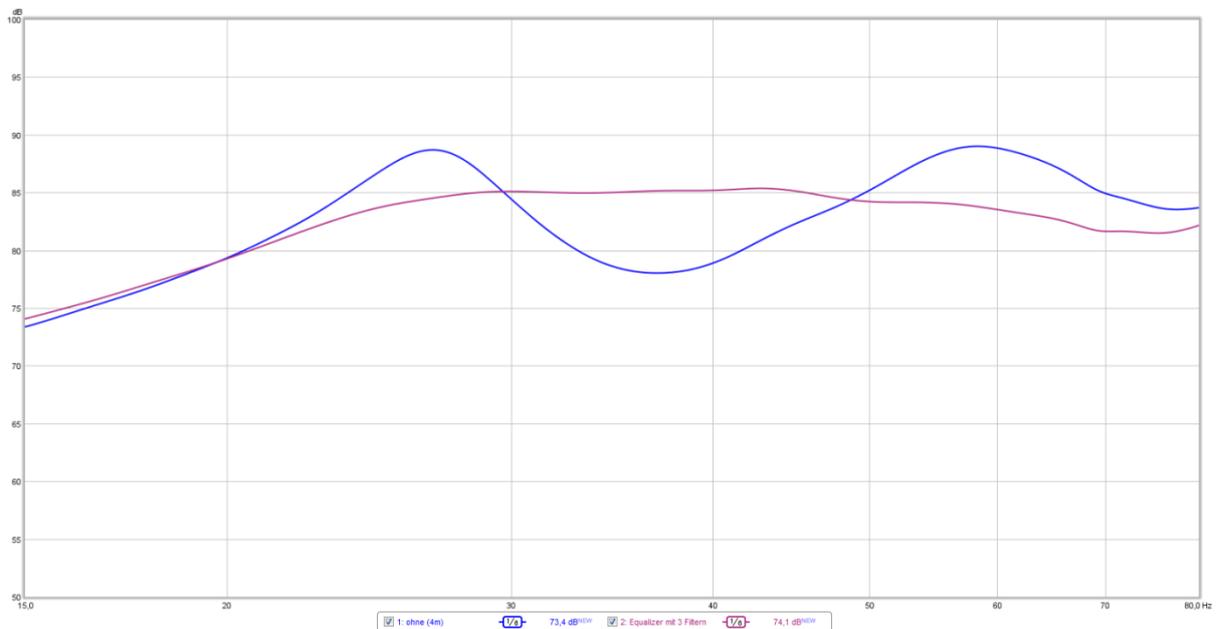


Abbildung 13: Amplitudengänge ohne/mit Equalizer

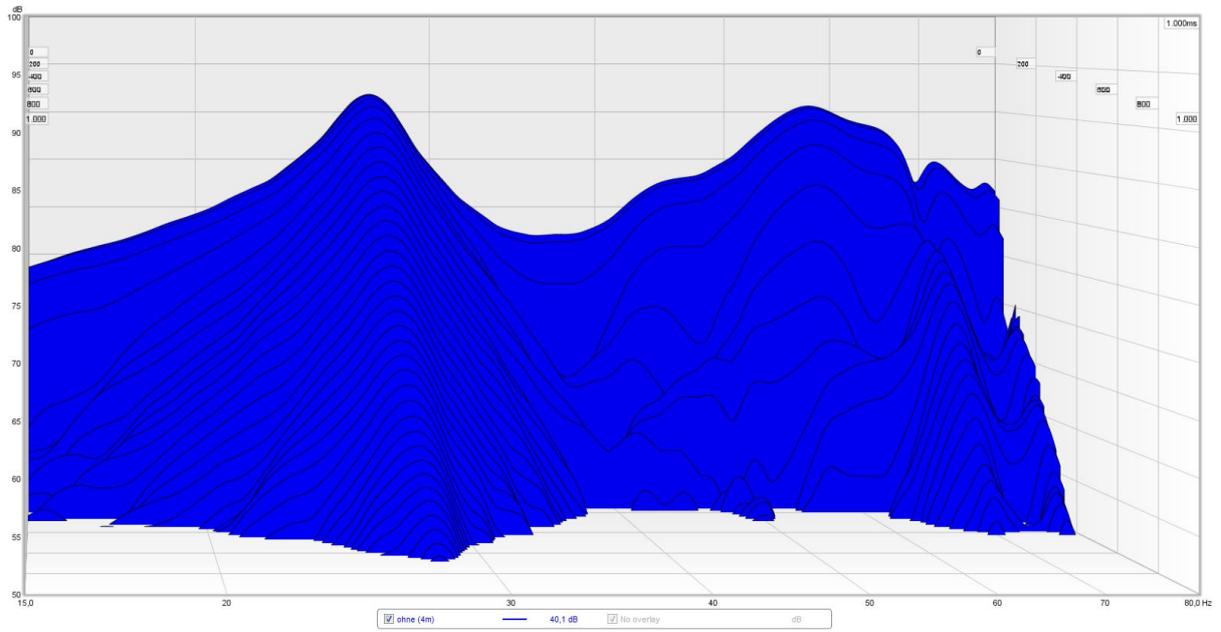


Abbildung 14: Abklingspektrum ohne Equalizer

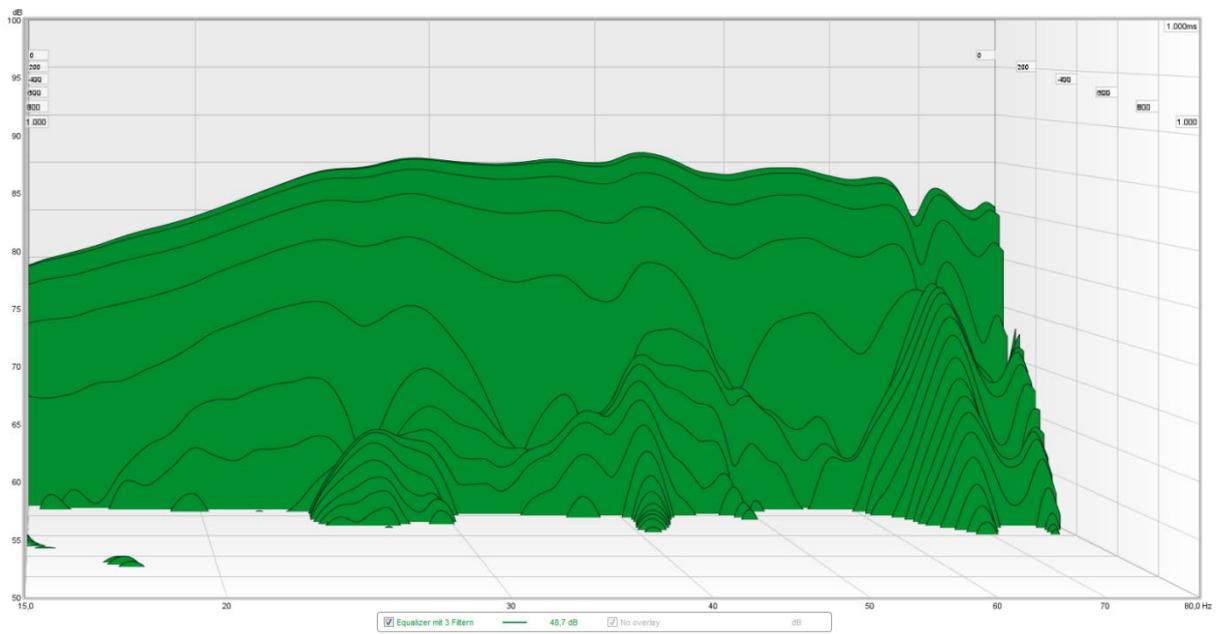


Abbildung 15: Abklingspektrum mit Equalizer

Und hier noch einmal auf die maximale Amplitude pro Frequenz normierte Abklingspektrum, das nur das Zeitverhalten zeigt.

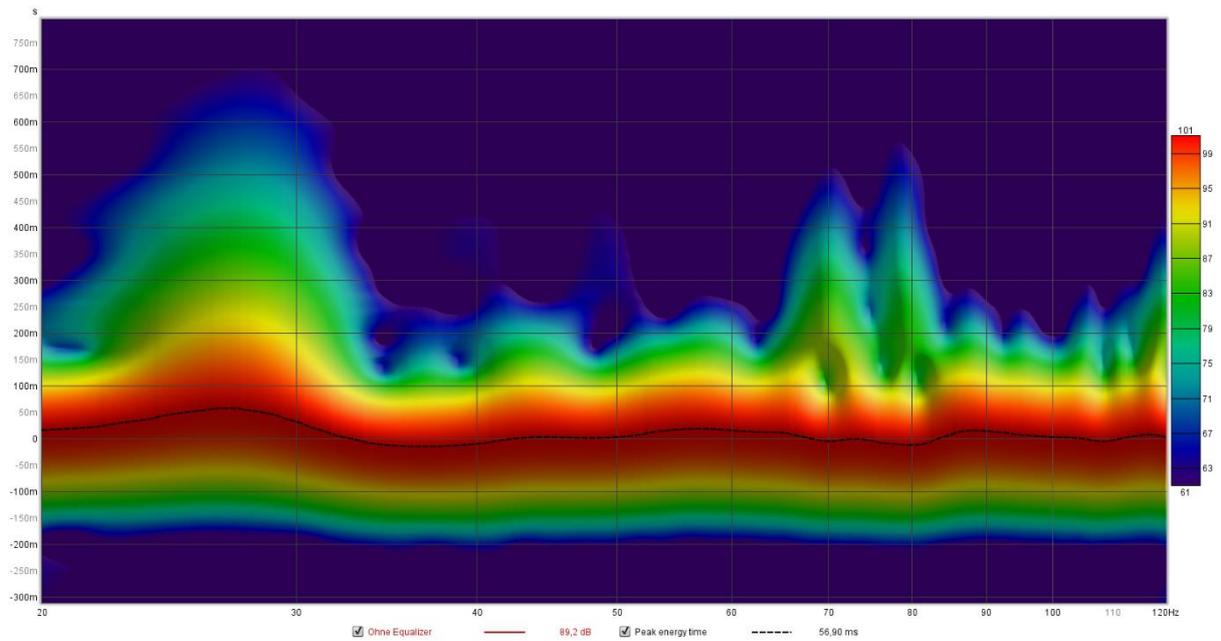


Abbildung 16: Spektrogramm ohne Equalizer

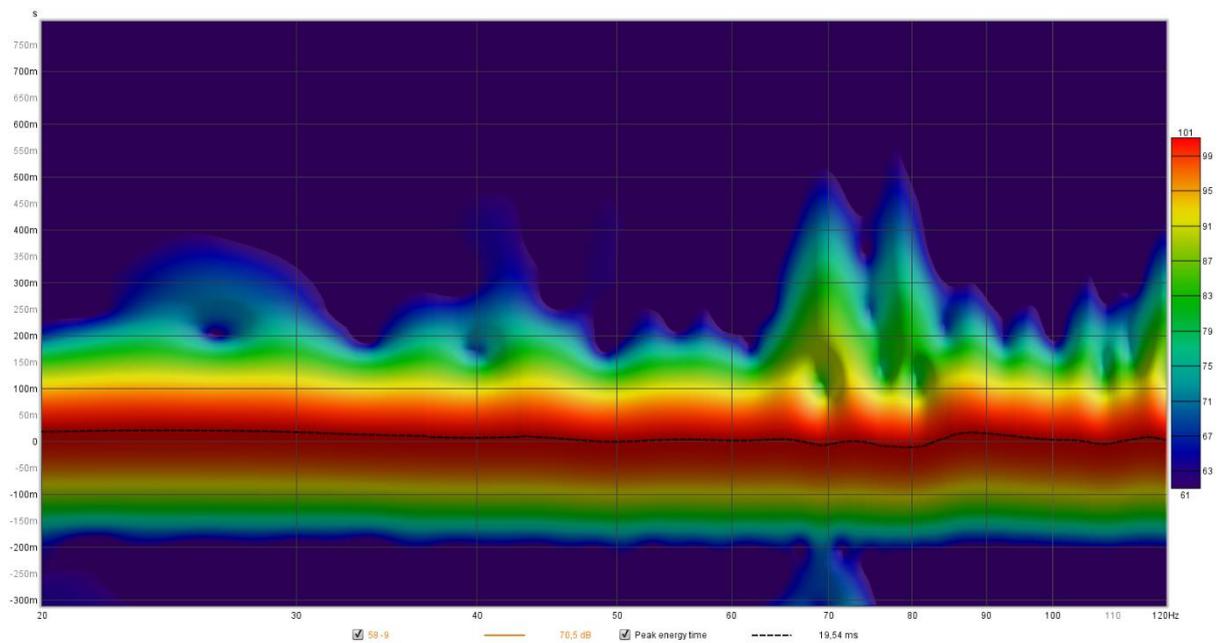


Abbildung 17: Spektrogramm mit Equalizer

Das Ergebnis kann sich sehen lassen. Sowohl die Schwankungen im Amplitudengang als auch das Abklingen der 1. Längsmode sind praktisch verschwunden. Dass die 1. Längsmode tatsächlich minimalphasigen Charakter besitzt, lässt sich auch an den stark linearisierten Gruppenlaufzeitverzerrungen gut erkennen.

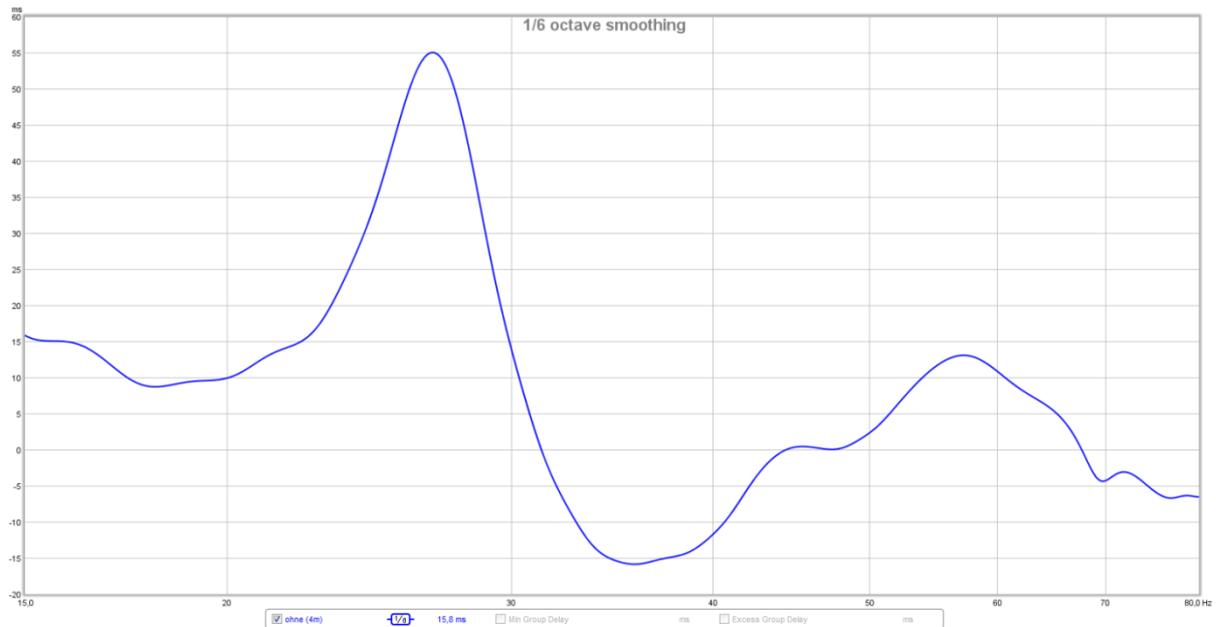


Abbildung 18: Gruppenlaufzeitverzerrungen ohne Equalizer

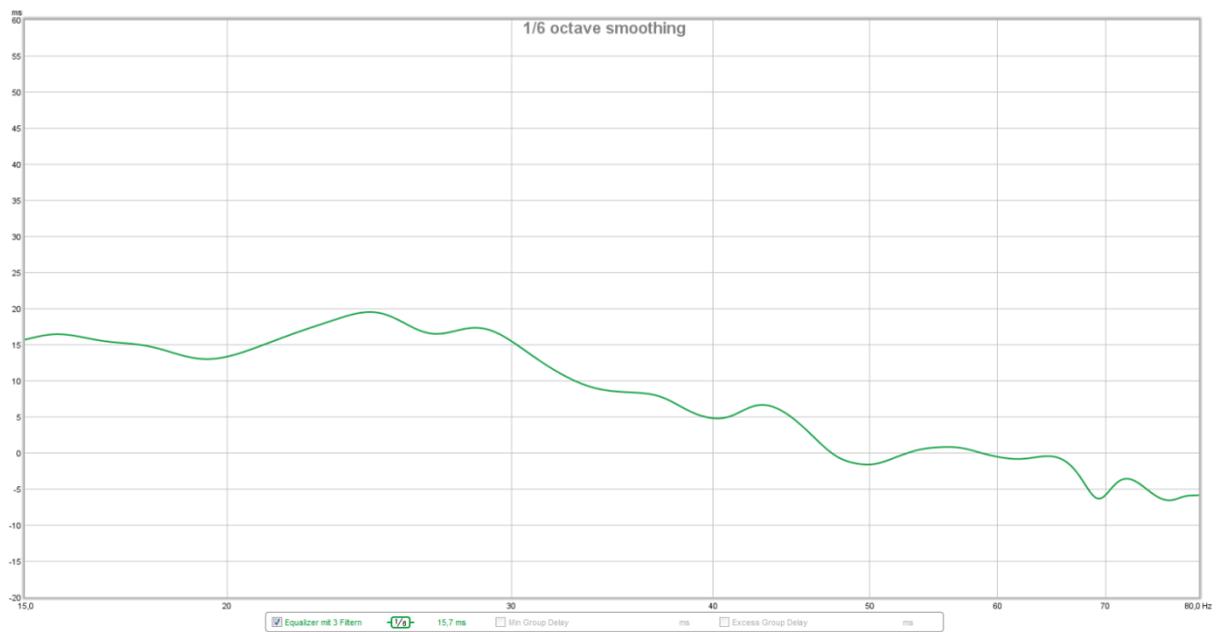


Abbildung 19: Gruppenlaufzeitverzerrungen mit Equalizer

Damit ist ein Großteil der Ziele dieser Untersuchung erreicht. Es bleibt noch der Maximalpegel zu betrachten.

## Druckkammereffekt

Zur Dimensionierung der Subwoofer, sind folgende Parameter von Bedeutung.

1. Gewünschte untere Grenzfrequenz
2. Gewünschter Maximalpegel bei der unteren Grenzfrequenz
3. Ausprägung des Druckkammereffekts

Die Punkte 1. und 2. Sind sehr individuell, daher wird in diesem Dokument nicht weiter darauf eingegangen. Der Druckkammereffekt ist ausschließlich abhängig vom Raum. Im Folgenden wurde er in dem Testraum gemessen.

Um den Druckkammereffekt näherungsweise zu bestimmen wurde das SBA an drei verschiedenen Positionen in Längsrichtung gemessen. Für die Differenzbildung wurde der geschlossene Subwoofer zusätzlich im Nahfeld gemessen.

Zusätzlich wurde ein DBA mit einem und zwei Treibern pro Gitter gemessen, um herauszufinden, ob das zweite (invertierte, zeitverzögerte) Tieftongitter den Druckkammereffekt beeinflusst.

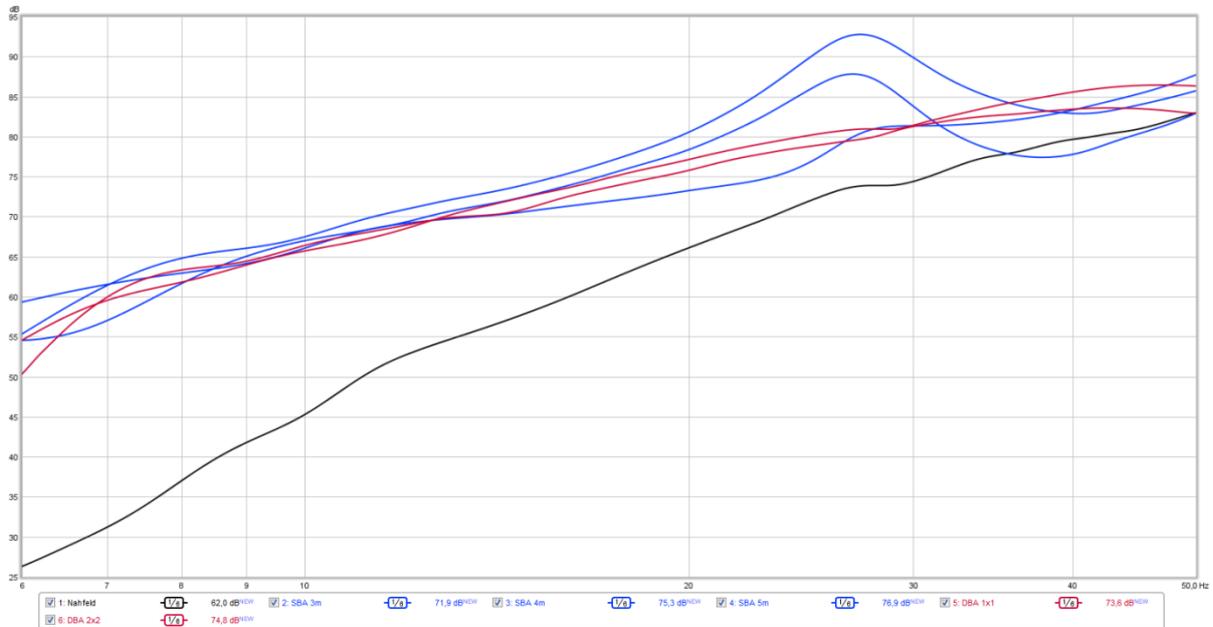


Abbildung 20: Amplitudengänge Nahfeld/Raum

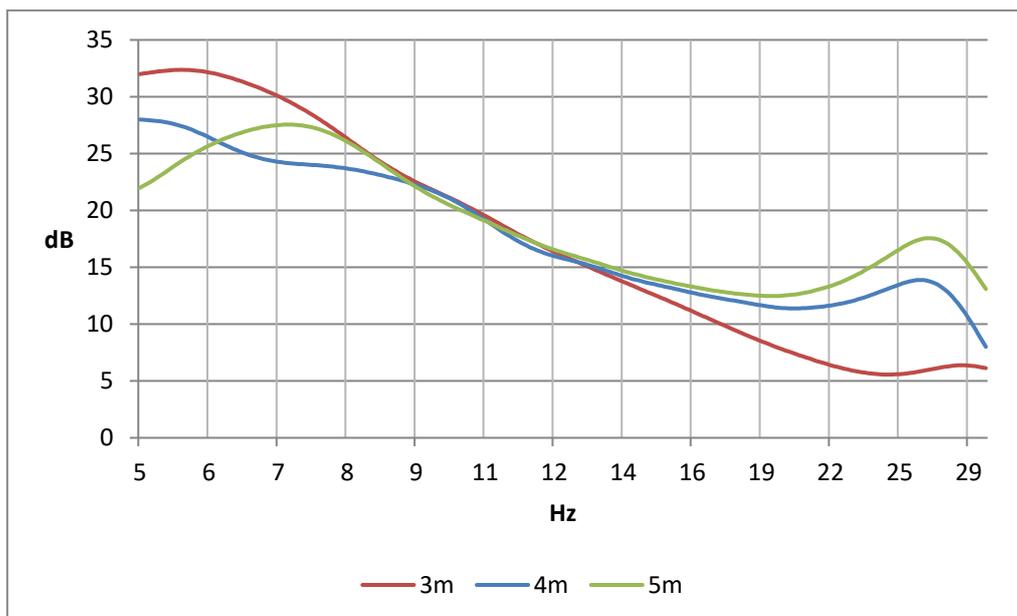


Abbildung 21: Differenz zur Nahfeldmessung an verschiedenen Messpositionen

Die Differenz zwischen der Nahfeldmessung und den verschiedenen Messpositionen des SBAs zeigt zunächst den unterschiedlichen Einfluss der 1. Längsmode bei 28 Hz. Darunter zeigt sich eine relativ einheitliche Steigung von ca. 12 dB/Okt hin zu niedrigen Frequenzen. Das entspricht gut der Theorie und erleichtert die Dimensionierung der Subwoofer während der Planungsphase.

Wie man sieht, gleicht sich in diesem Testaufbau der Abfall des geschlossenen Gehäuses über einen weiten Bereich mit den Raummoden und dem Anstieg des Druckkammereffekts aus, so dass die untere Eckfrequenz bei knapp 20 Hz liegt. Dies war reiner Zufall, da die geschlossenen Testsubwoofer nicht explizit für diesen Raum entwickelt wurden.

Interessant ist die Tatsache, dass auch beim DBA der Druckkammereffekt komplett erhalten bleibt. Der Verlauf unterhalb der 1. Längsmode ist nahezu identisch zum SBA.

## Fazit

Diese Untersuchung zeigt, dass ein SBA mit bedämpfter Rückwand hervorragend funktionieren kann. Es ist eine einfach zu konstruierende Lösung, mit der der Raumeinfluss weitestgehend ausgeblendet wird. Je nach Dicke des rückwärtigen Absorbers kann zusätzlich ein parametrischer Equalizer den Einfluss der Längsmoden komplett eliminieren.

Sofern nur eine Sitzreihe geplant ist, steht das SBA in Sachen Linearität und Abklingen dem DBA in Nichts nach. Es ist sogar doppelt so effizient, da es mit nur einem Tieftongitter auskommt. Weiterhin kommt der rückwärtige Absorber auch den anderen Lautsprechern zugute. Auf der anderen Seite benötigt dieser Absorber mehr Platz als ein zusätzliches Tieftongitter, ist allerdings auch ungleich preiswerter.

Solange nur eine Sitzreihe benötigt wird und sich diese in der Längsmitte des Raumes befindet, kann der rückwärtige Absorber sogar komplett weggelassen werden. Denn an dieser Position hat die 1. Längsmode keine Auswirkung, nur die 2. Längsmode klingt lange ab. Letztere kann jedoch mit einem parametrischen Equalizer ausgeglichen werden.

Es wurde gezeigt, wie stark ausgeprägt der Druckkammereffekt in einem massiv gebauten Raum ist. Das erleichtert die Auslegung des Maximalpegels und der gewünschten Übertragungsfunktion. Z.B. kann mit Hilfe des Druckkammereffekts eine Entzerrung bis weit in den Infraschallbereich relativ moderat ausfallen. Sind ausreichend Membranfläche und Auslenkung vorhanden, so können auch die von Dolby spezifizierten 3 Hz im LFE-Kanal mit dem Referenzpegel von 115 dB wiedergegeben werden. Die Kenntnis über den spezifischen Druckkammereffekt ist gleichzeitig auch ein Mittel, den finanziellen Aufwand zu ermitteln und schlussendlich zu reduzieren.