

Quasikoax Prototyp

Inhalt

Motivation	2
Theoretische Überlegungen	2
Praktische Untersuchung (2-Wege)	4
Prototyp 1	4
Prototyp 4	7
Prototyp 6	9
Prototyp 7	13
Praktische Untersuchung (3- Wege).....	15
Prototyp 8	15
Prototyp 9	17
Fazit	20
Referenzen	21

Motivation

Das vertikale Abstrahlverhalten ist bei konventionellen Mehrwegern mit übereinander angeordneten Treibern unstetig und asymmetrisch. Dieses Problem soll durch eine Pseudokoaxial-Anordnung gelöst werden. Dafür werden im Folgenden verschiedene Anordnungen untersucht. Sie haben alle gemeinsam, dass mehrere Mitteltöner um einen Hochtöner angeordnet werden.

Ziel ist ein Lautsprecher für Hifi-Anwendung.

Theoretische Überlegungen

Simulationen haben ergeben, dass ein Waveguide oder Horn zwingend notwendig ist, um die bündelnden Mitteltöner an den ansonsten breit abstrahlenden Hochtöner anzupassen. Die Bündelung des Hochtöners muss also im Bereich der Trennfrequenz stark verengt werden.

Das Problem ist, dass der Abstand der Mitteltöner eine sehr starke und mit der Frequenz steigende Bündelung erzeugt. Ein Waveguide benötigt aber eine gewisse Breite, um an diese Bündelung anzukoppeln. Das hat zur Folge, dass sich der Abstand zwischen den Mitteltönern erhöht, was deren Bündelung noch verstärkt. Ein Waveguide ist also für diesen Zweck nicht geeignet. Es hat sich herausgestellt, dass nur ein stark bündelndes Horn ein passendes Verhältnis zwischen eigener Bündelung und Abstand der Mitteltöner besitzt.

Weiterhin hat die Trennfrequenz extrem großen Einfluss auf das Gesamtabstrahlverhalten. Es wurde in dieser Hinsicht viel experimentiert. Es soll hier aber nicht jede Kombination dokumentiert werden, sondern stets die beste gefundene.

Bereits in der Simulation stellte sich heraus, dass die naheliegendste Anordnung, nämlich die rotationssymmetrische, ungünstig in Bezug auf Nebenkeulen ist. Die folgenden Darstellungen zeigen, dass die Reduktion auf eine Dimension (Seitenansicht) zur Folge hat, dass die Treiberzentren zu den Rändern hin einen geringeren Abstand aufweisen als in der Mitte. Dadurch werden Nebenkeulen schon bei relativ niedrigen Frequenzen erzeugt. Als Vorteil kann jedoch gesehen werden, dass die Nebenkeulen in alle Richtungen identisch sind.

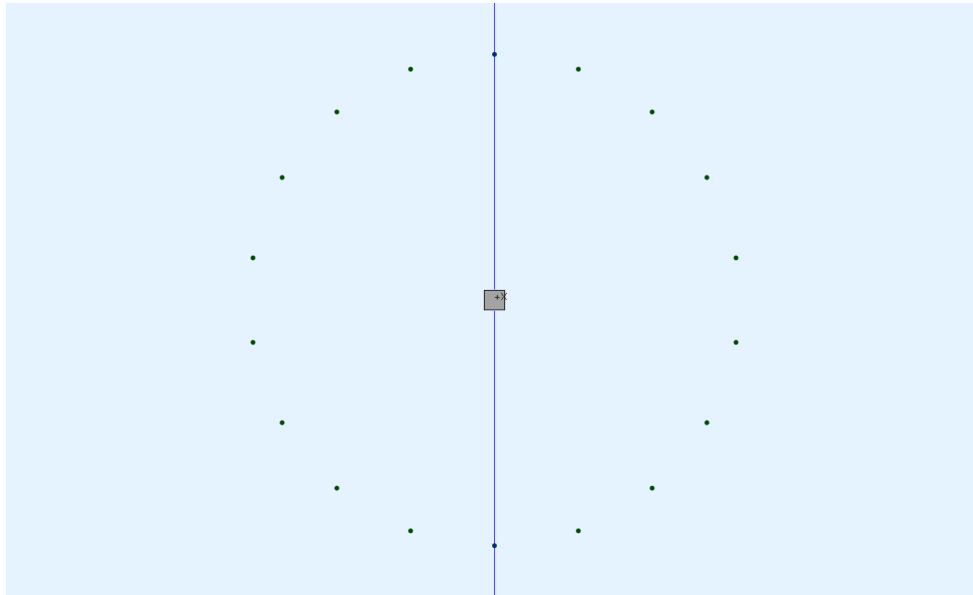


Abbildung 1: Rotationssymmetrische Anordnung der Treiberzentren (Frontansicht)

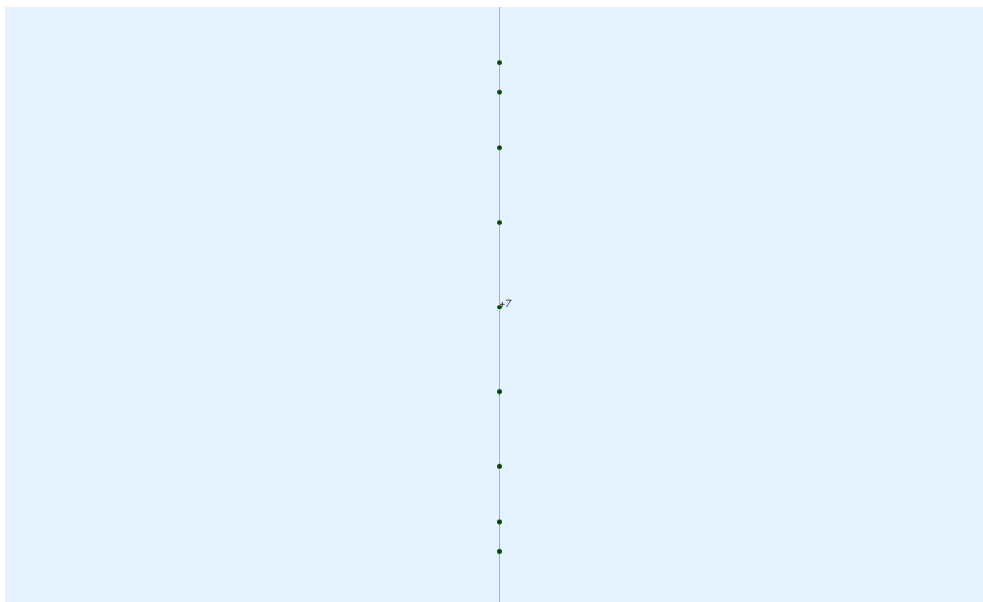


Abbildung 2: Rotationssymmetrische Anordnung der Treiberzentren (Seitenansicht)

Da die starken ersten Reflexionen im Raum von den Seitenwänden und Boden/Decke eintreffen und somit durch das horizontale und vertikale Abstrahlverhalten entstehen, wurde die rotationssymmetrische Anordnung der Mitteltöner nicht weiter untersucht. Im Folgenden wird eine Anordnung präsentiert, die die Nebenkeulen zumindest in diesen beiden Dimensionen im Frequenzbereich stark nach oben verlagert.

Praktische Untersuchung (2-Wege)

Prototyp 1

Zunächst kam ein Horn mit dem Abstrahlwinkel $75^\circ \times 45^\circ$ zum Einsatz. Es handelt sich um ein Limmer 022. Die Mitteltöner besitzen einen Durchmesser von 10 cm und sind so nah wie möglich am Horn platziert.

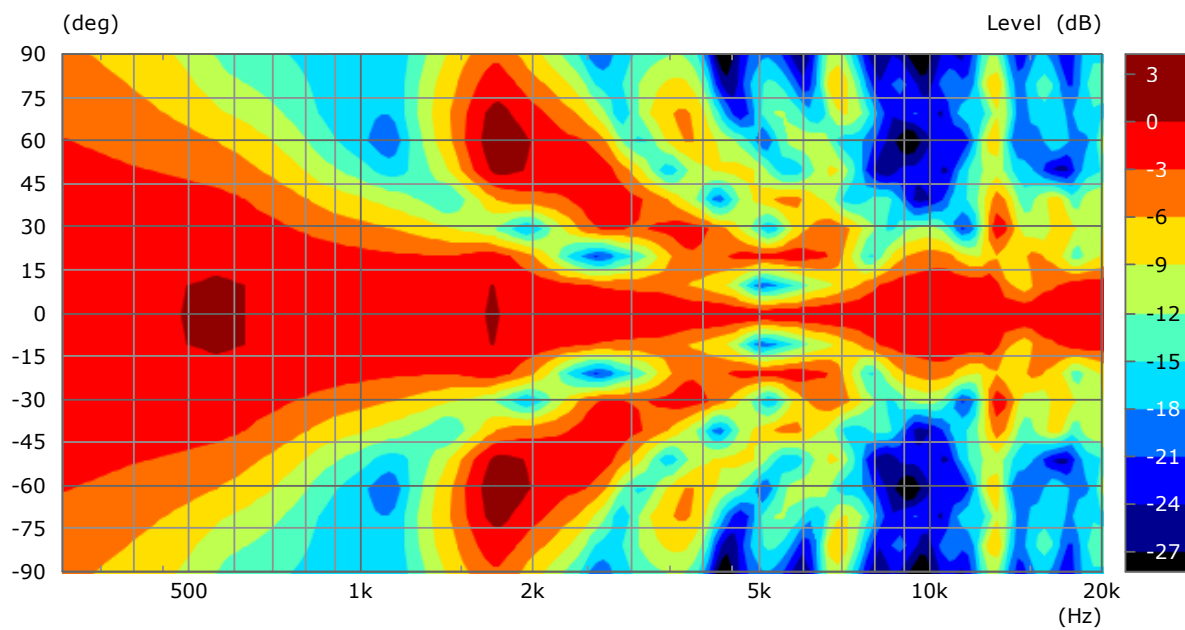


Abbildung 3: Abstrahlverhalten Mitteltöner horizontal

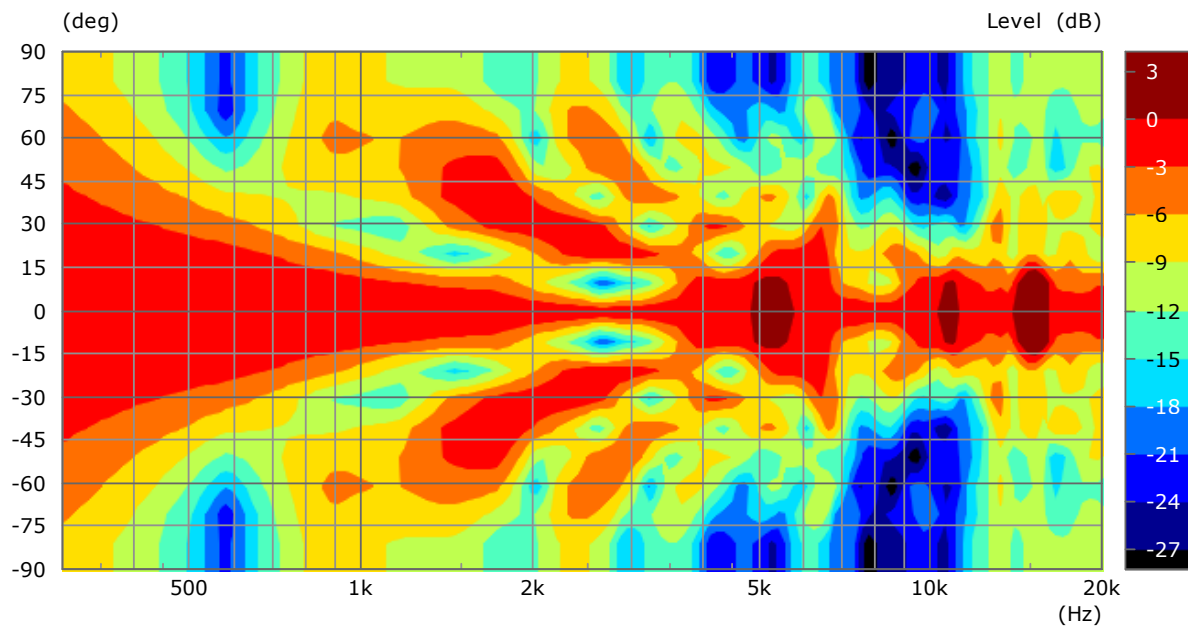


Abbildung 4: Abstrahlverhalten Mitteltöner vertikal

Aus den Messungen der Mitteltöner wird ersichtlich, wie stark diese bereits bei 1 kHz bündeln. Es werden also hohe Anforderungen an die Bündelung des Horns gestellt.

Das Abstrahlverhalten der Treiberzentren der Mitteltöner beträgt horizontal 20 cm. Das erzeugt die erwarteten Nebenkeulen bei ca. 1,7 kHz.

Vertikal beträgt der Abstand 30 cm, was Nebenkeulen ab 1,2 kHz produziert.

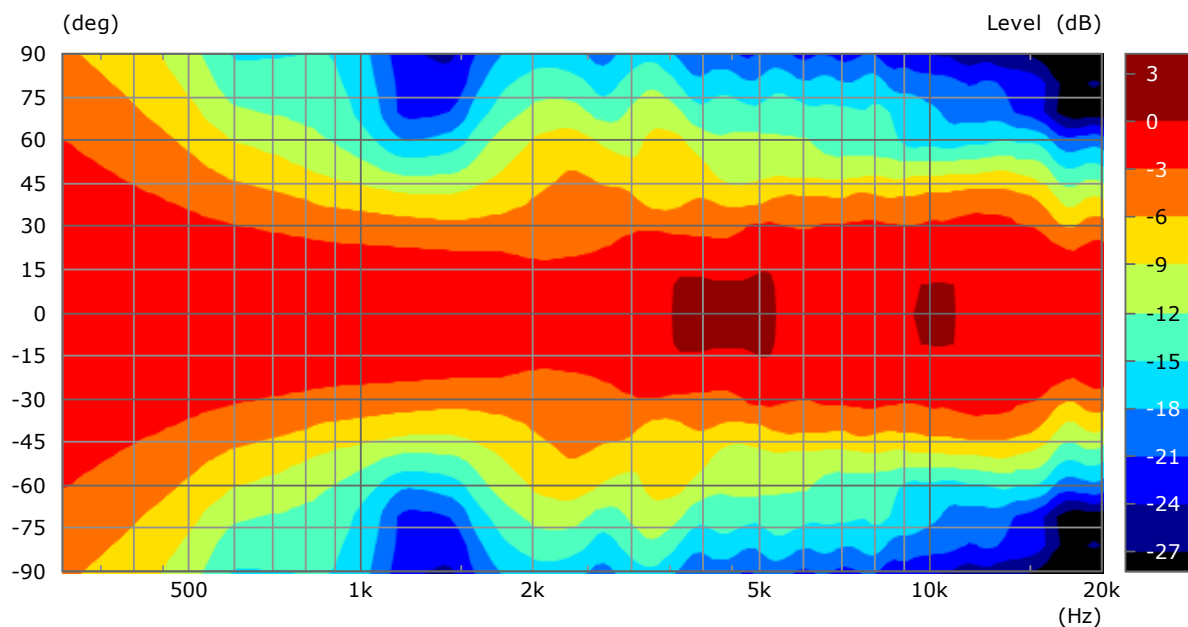


Abbildung 5: Abstrahlverhalten horizontal mit Trennung bei 1,2 kHz

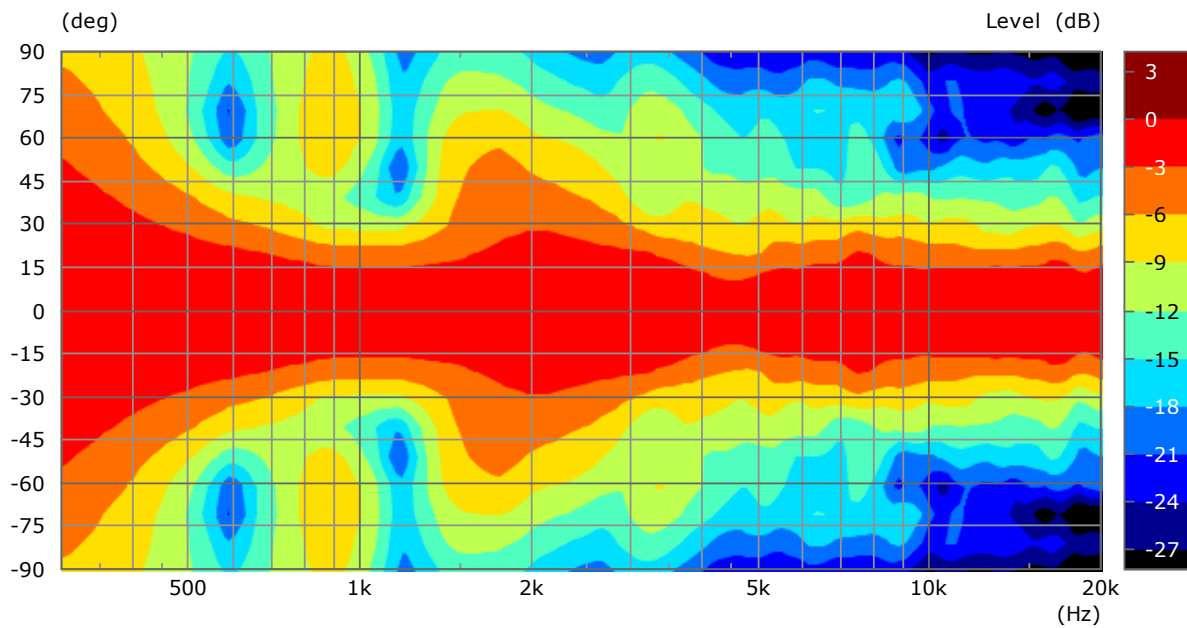


Abbildung 6: Abstrahlverhalten vertikal mit Trennung bei 1,2 kHz

Das horizontale Abstrahlverhalten kann durch die Wahl der Trennfrequenz schon relativ gut angepasst werden. Der Abstand der Mitteltöner zueinander ist allerdings noch etwas zu groß.

Vertikal dagegen ist eine starke Aufweitung bei ca. 1,8 kHz erkennbar. Diese ist auch mit anderen Trennfrequenzen nicht zu verbessern. Wenn die Trennfrequenz höher liegt, werden zunehmend die Nebenkeulen der Mitteltöner sichtbar.

Prototyp 4

Bei der nächsten Evolution wurden die Mitteltöner so angebracht, dass sich die Abstände zwischen den Treiberzentren verringern. Da die horizontale und vertikale Dimension getrennt voneinander betrachtet werden können, zählen die jeweils auf der orthogonalen Kante liegenden Mitteltöner zum Abstand dazu. Somit halbiert sich effektiv der Abstand der Treiberzentren.

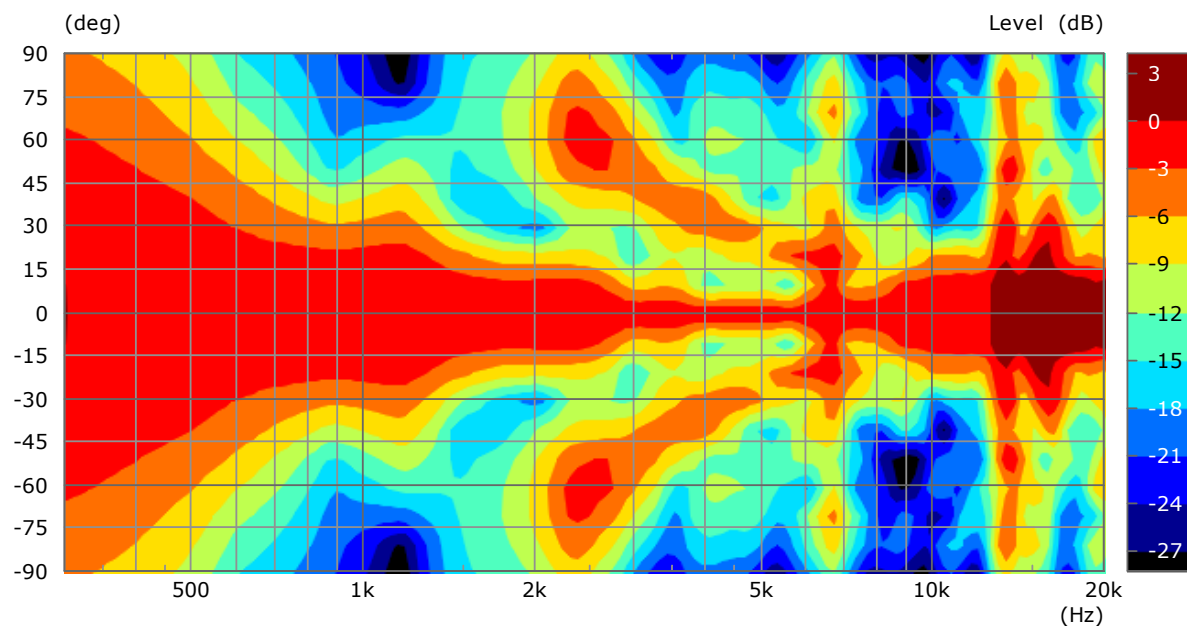


Abbildung 7: Abstrahlverhalten Mitteltöner vertikal

Das vertikale Abstrahlverhalten der Mitteltöner zeigt, wie sich die Nebenkeulen von 1,2 kHz auf 2,4 kHz verschoben haben.

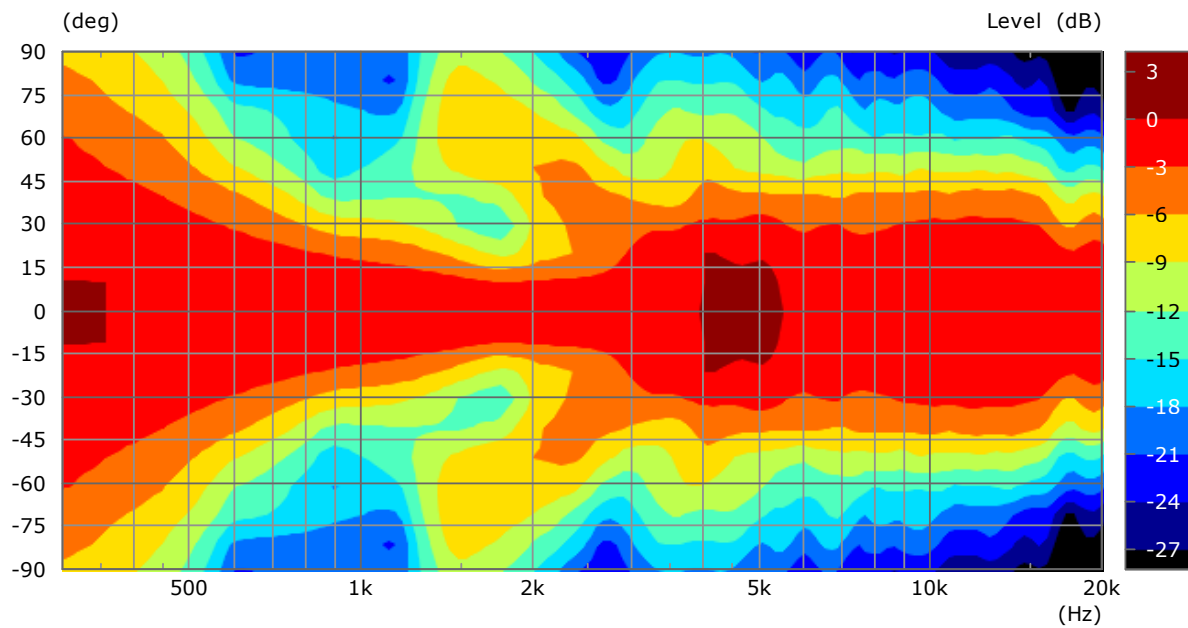


Abbildung 8: Abstrahlverhalten horizontal mit Trennung bei 2 kHz

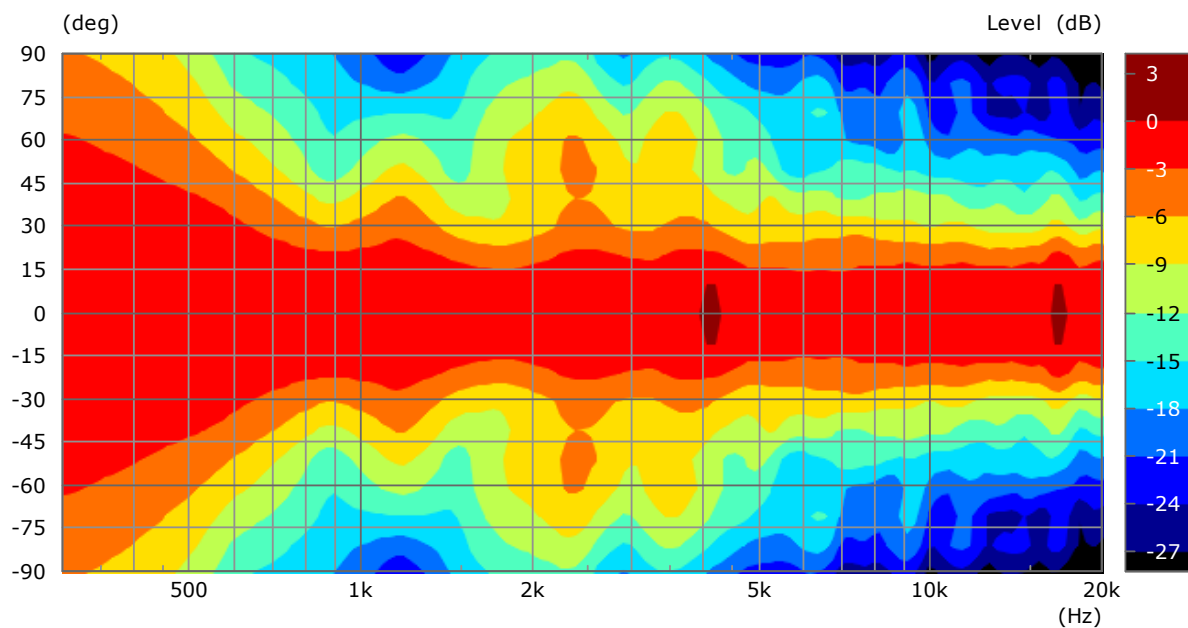


Abbildung 9: Abstrahlverhalten vertikal mit Trennung bei 2 kHz

Damit lässt sich das vertikale Gesamtabstrahlverhalten schon relativ gut verstetigen. Horizontal ist die Trennfrequenz allerdings zu hoch, so dass die Bündelung von Mittel- und Hochtöner nicht mehr zueinander passen.

Prototyp 6

Für das vorgehende Problem im horizontalen Abstrahlverhalten wurde keine Lösung gefunden, weshalb im Folgenden auf ein symmetrisches Horn (Limmer 126) zurückgegriffen wurde. Dieses besitzt einen Abstrahlwinkel von $40^\circ \times 40^\circ$. Das horizontale und vertikale Abstrahlverhalten sind also identisch.

Weiterhin wurde die Anordnung der Mitteltöner weiter optimiert. Durch die versetzte Anordnung, verringert sich der Abstand der Treiberzentren weiter und verringert sich damit auf ein Drittel des ursprünglichen. Die folgenden schematischen Darstellungen zeigen, wie die Treiberzentren aus Sicht einer Dimension dieselben Abstände besitzen.

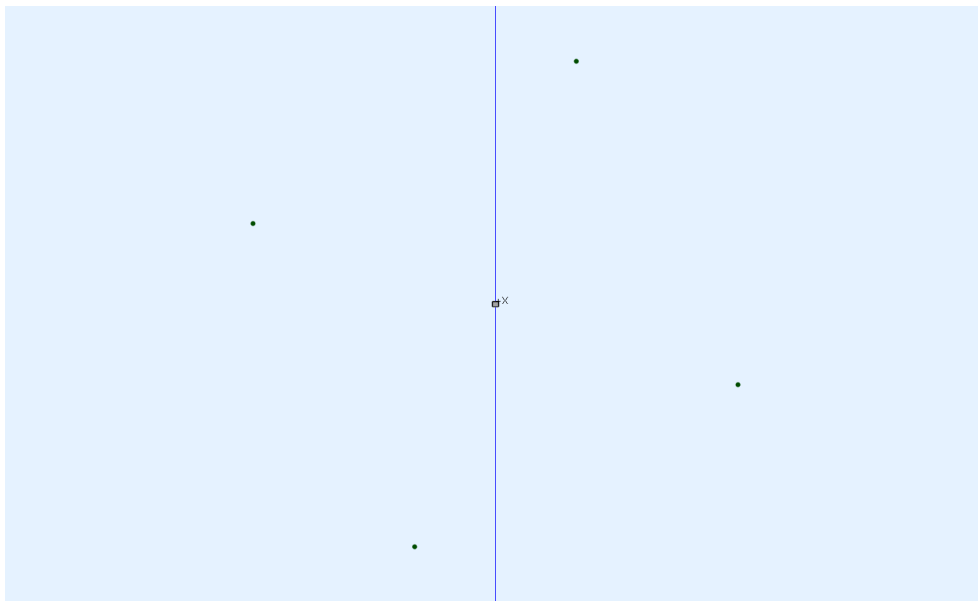


Abbildung 10: Frontansicht der Treiberzentren

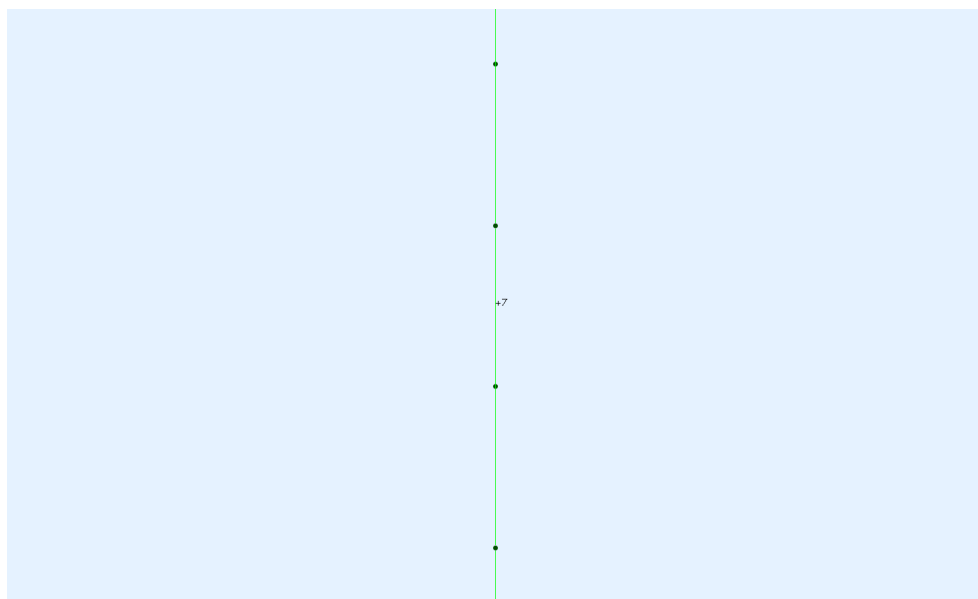


Abbildung 11: Seitenansicht der Treiberzentren

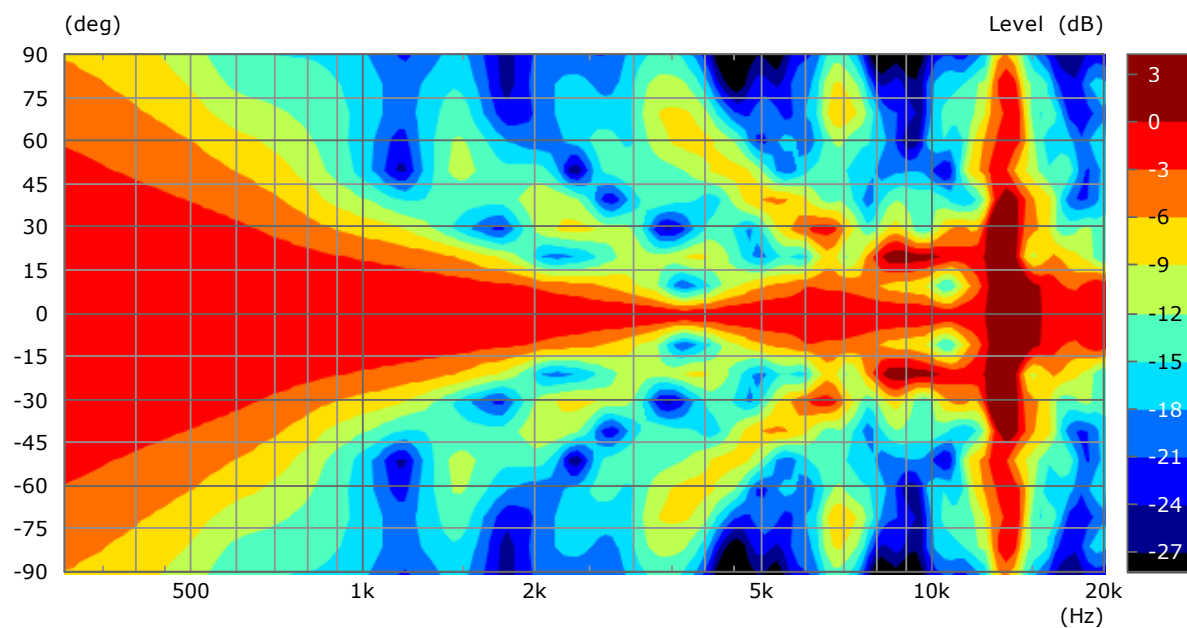
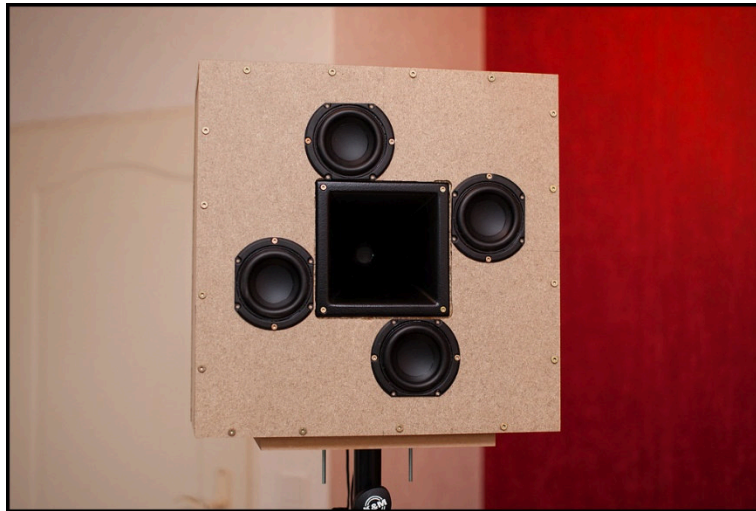


Abbildung 12: Abstrahlverhalten Mitteltöner horizontal/vertikal

Die Nebenkeulen sind nun auf über 3 kHz verlagert und im Pegel geringer ausgeprägt. Dasselbe würde erreicht werden, wenn jeweils zwei Treiber pro Hornseite platziert würden. Es ist allerdings ganz entscheidend, dass der Abstand der Treiberzentren zwischen allen benachbarten Treibern einer Dimension identisch ist. Das wäre mit den 10-cm-Treibern so nicht machbar. Sie müssten etwas kleiner ausfallen.

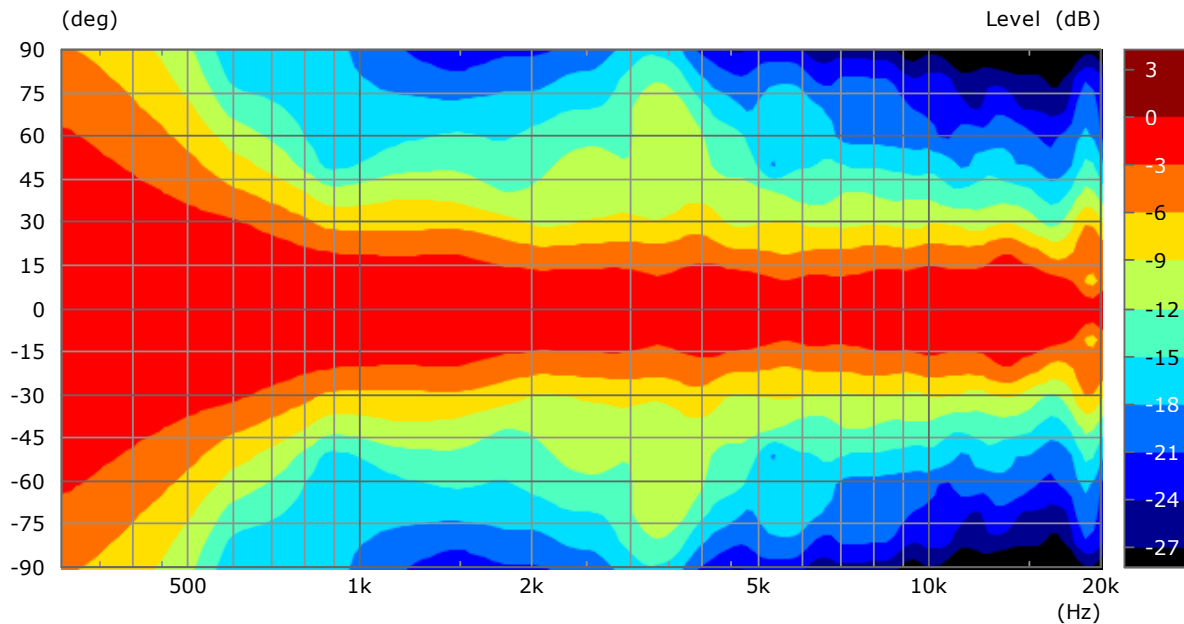


Abbildung 13: Abstrahlverhalten mit Trennfrequenz bei 1,8 kHz horizontal/vertikal

Weiterhin wurde der Übergang mit FIR-Filtern optimiert. Durch eine flache Trennung bei 1,8 kHz und zusätzliche Brickwall-Filter, die die Nebenkeulen abschneiden und den Hochtöner nach unten begrenzen, konnte bis zur -9-dB-Isobare ein sehr stetiges Abstrahlverhalten realisiert werden.

Ab ca. 45° ist das Abstrahlverhalten jedoch weniger frequenzneutral, was durch die insgesamt sehr starke Bündelung aber kaum ins Gewicht fällt. Die Reflexionen, die dadurch entstehen, sind im Pegel sehr stark abgeschwächt und dürften praktisch vernachlässigbar sein.

Es sei angemerkt, dass der geringe Abstand der Treiberzentren diagonal nicht zu halten ist, weswegen hier das Abstrahlverhalten weniger stetig sein dürfte. Das wird aber, wie bereits geschrieben, absichtlich in Kauf genommen.

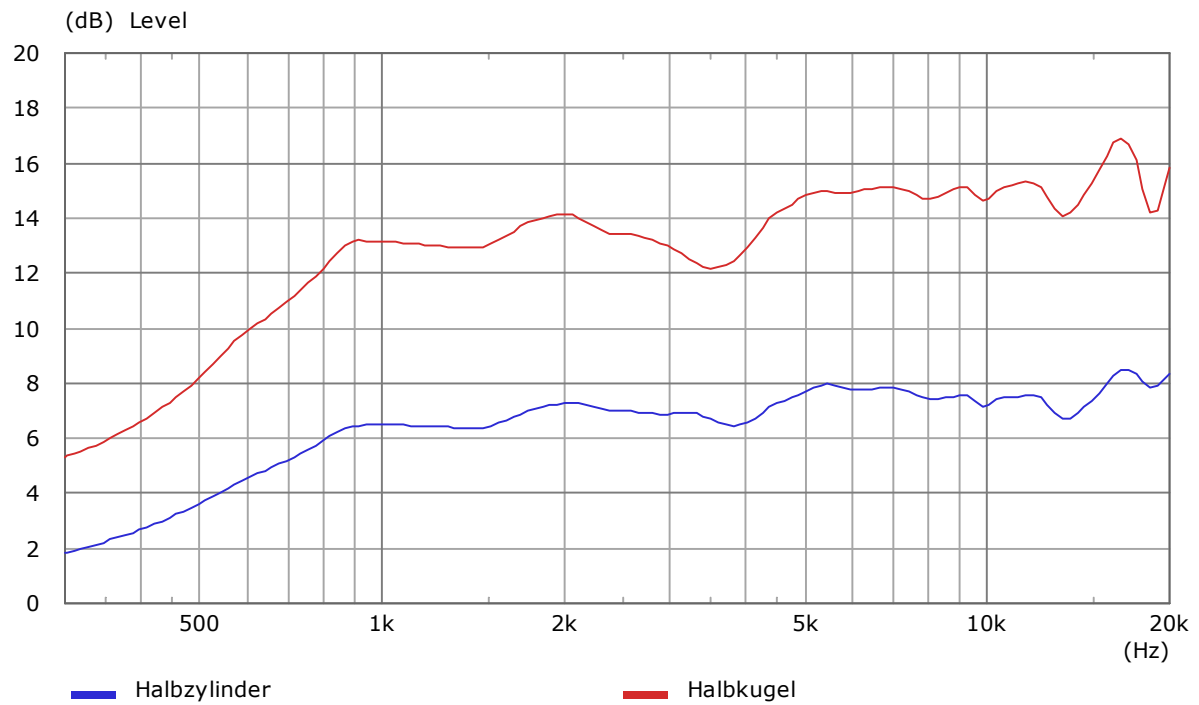


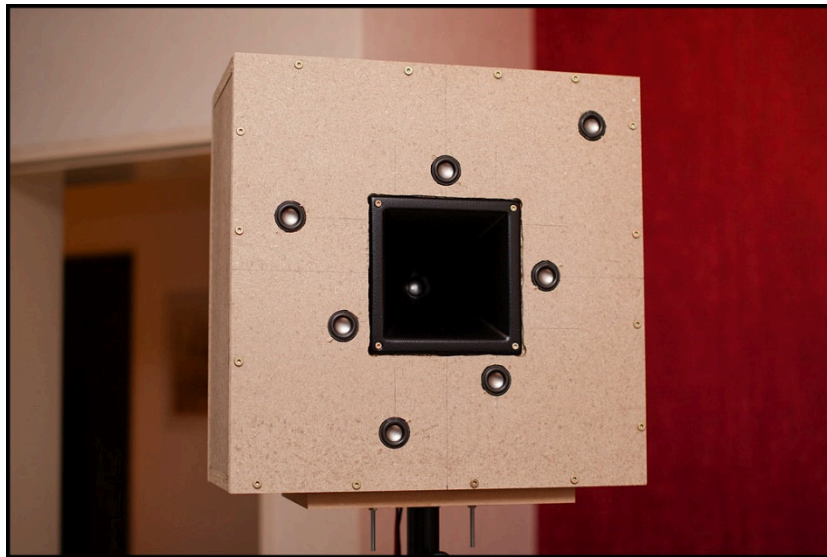
Abbildung 14: Bündelungsmaß

Das Bündelungsmaß bezogen auf einen Halbzylinder (also $\pm 90^\circ$) ist leicht ansteigend und bei 3 kHz minimal niedriger. Das ist dem breiteren Abstrahlen des Horns unter größeren Winkeln geschuldet. Das Problem verstärkt sich, wenn das Bündelungsmaß winkelgewichtet [1] für eine Halbkugel berechnet wird. Dazu sei aber gesagt, dass diese Daten für die meisten Lautsprecher gar nicht vorliegen und somit eine Bewertung mit Vorsicht vorgenommen werden sollte.

Prototyp 7

Die Anordnung der Mitteltöner wurde bezüglich der Nebenkeulen weiter verbessert. Auch hier wurde eine Anordnung gewählt, die horizontal und vertikal jeweils eine Linie aus Einzeltreibern darstellt. Simulationen haben gezeigt, dass sich diese Anordnung durch Spiegelung problemlos verdoppeln lässt.

Der Abstand zwischen den Treiberzentren beträgt horizontal und vertikal nur noch 6,2 cm, so dass in insgesamt sieben Stück verbaut werden konnten. Für den Prototyp kamen 1“-Breitbänder zum Einsatz. Der Abstand wurde bewusst größer ausgelegt als der minimal mögliche, so dass auch 2“-Treiber noch genug Platz hätten.



Die Nebenkeulen der Mitteltöner konnten somit auf über 5 kHz verschoben werden.

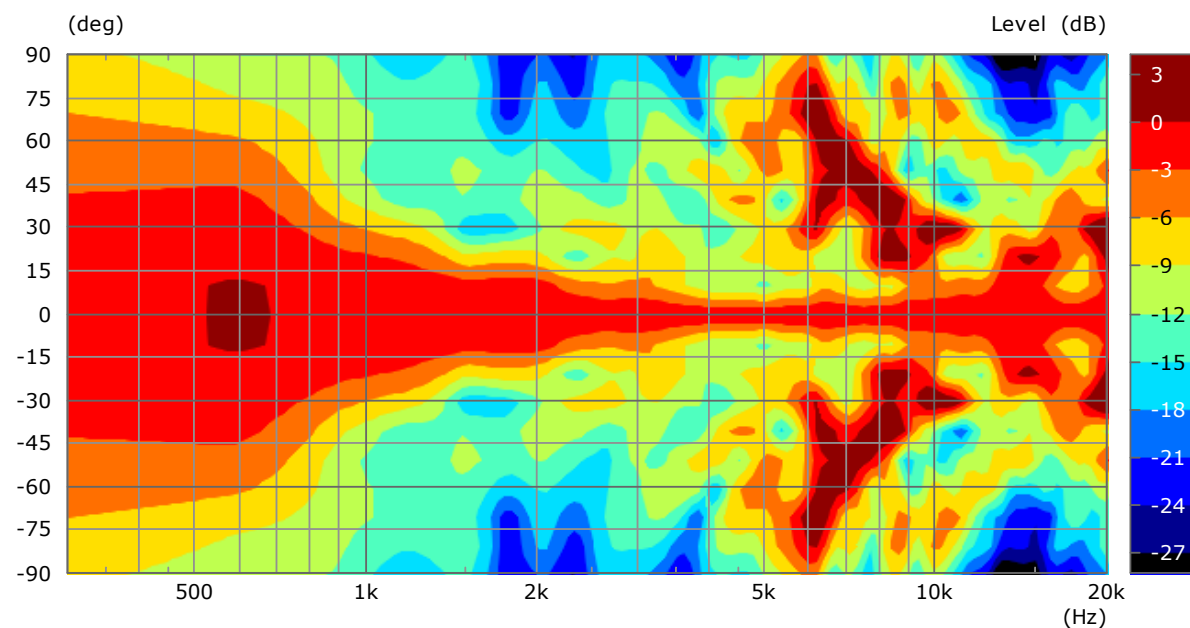


Abbildung 15: Abstrahlverhalten Mitteltöner horizontal/vertikal

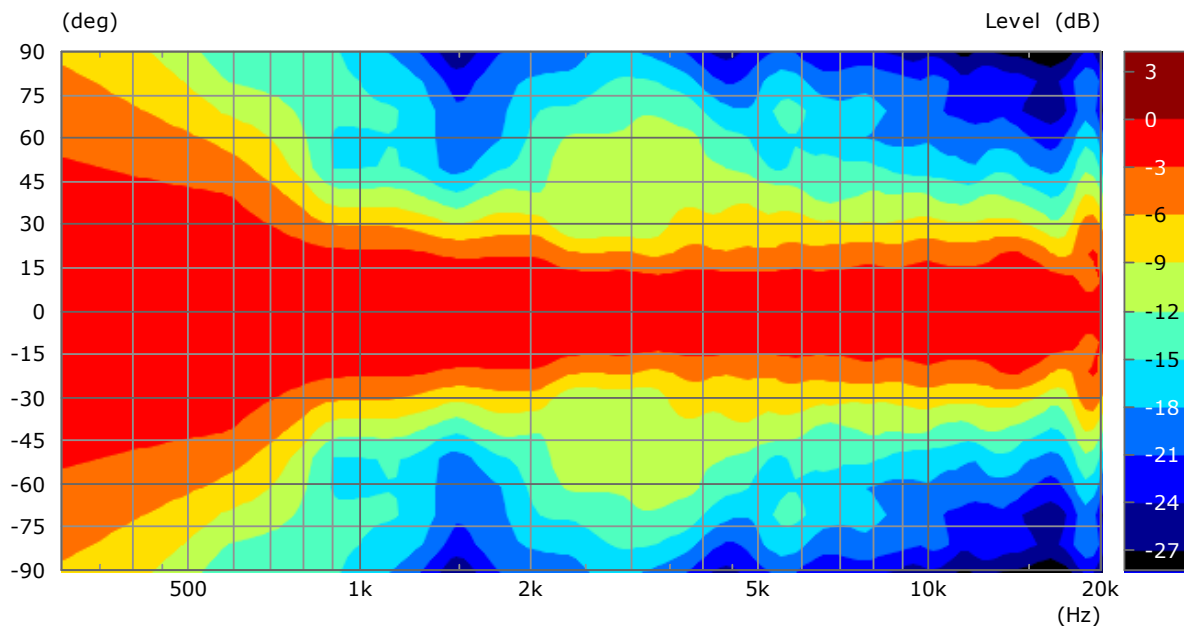


Abbildung 16: Abstrahlverhalten mit Trennfrequenz bei 1,8 kHz horizontal/vertikal

Durch Austarieren der beiden Zweige via FIR-Filter konnte das Bündelungsmaß weiter verstetigt werden. Die breitbandige Aufweitung unter größeren Winkeln bei 3 kHz ließ sich allerdings auch durch intelligente Filterkonfiguration nicht verbessern.

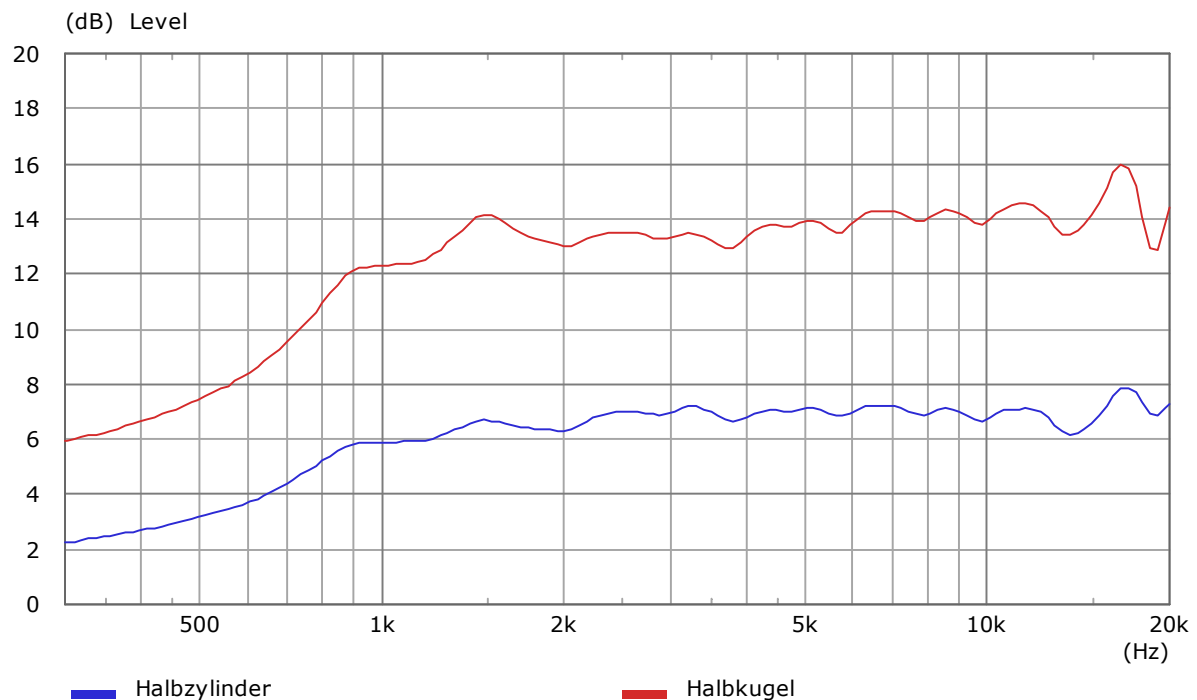


Abbildung 17: Bündelungsmaß

Weiterhin geht das bessere Bündelungsmaß im Bereich von 3 kHz zu Lasten der -6- und -9-Isobaren. Es ist also fraglich, ob diese Optimierung klangliche Vorteile bietet.

Praktische Untersuchung (3- Wege)

Prototyp 8

Da ein tief gebautes Horn Nachteile in Form von Resonanzen mit sich bringt, wurde im Folgenden versucht, das Konzept auf ein kleineres Horn anzuwenden. Dafür musste die Trennfrequenz zu dem Hochtöner erhöht werden. Um die Bündelung weiterhin relativ konstant zu halten, wurde ein weiterer Mittelhochtonzweig eingefügt, der die nun entstandene Lücke zwischen Mittel- und Hochtöner schließt. Weiterhin strahlt das verwendete Horn etwas breiter ab als bei den vorherigen Prototypen.



Für die Trennung wurden nach der minimalphasigen Linearisierung der Einzelzweige Horbach-Keele-Filter [2] angewendet. Ihr Verlauf ist speziell auf die Abstände der Treiberpärchen untereinander, zu ihren Nachbarzweigen und dem gewünschten Abstrahlwinkel abgestimmt. Die Filter lassen sich nur durch linearphasige FIR-Filter abbilden.

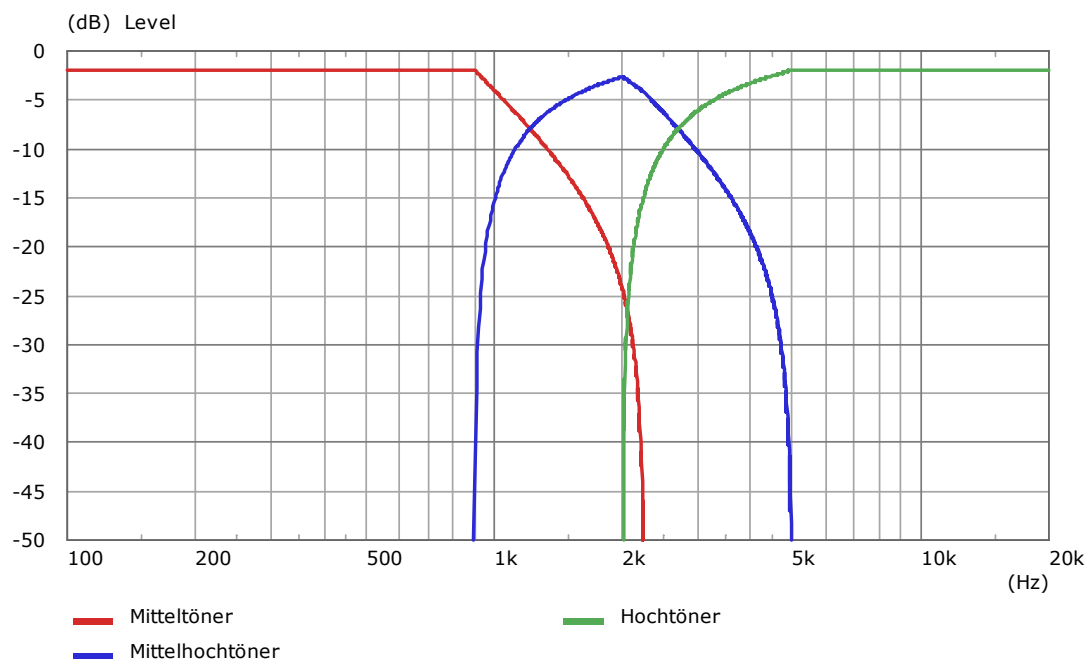


Abbildung 18: Filter der Frequenzweiche

Das Abstrahlverhalten lässt sich bereits ohne zusätzliche Korrekturen relativ konstant halten. Es ist allerdings etwas welliger als bei den vorherigen Prototypen. Dies lässt sich durch Austarieren der einzelnen Zweige aber noch verbessern. Der Abstrahlwinkel (-6 dB) beträgt ca. 50°.

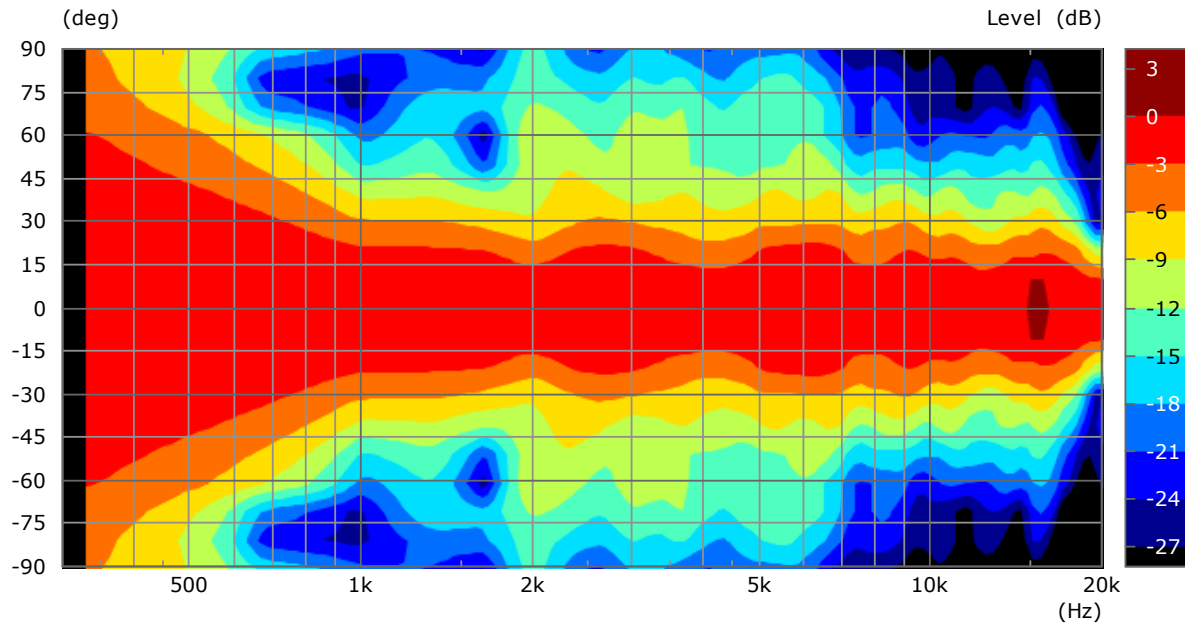


Abbildung 19: Abstrahlverhalten mit Hirschhorn-Keel-Filtern

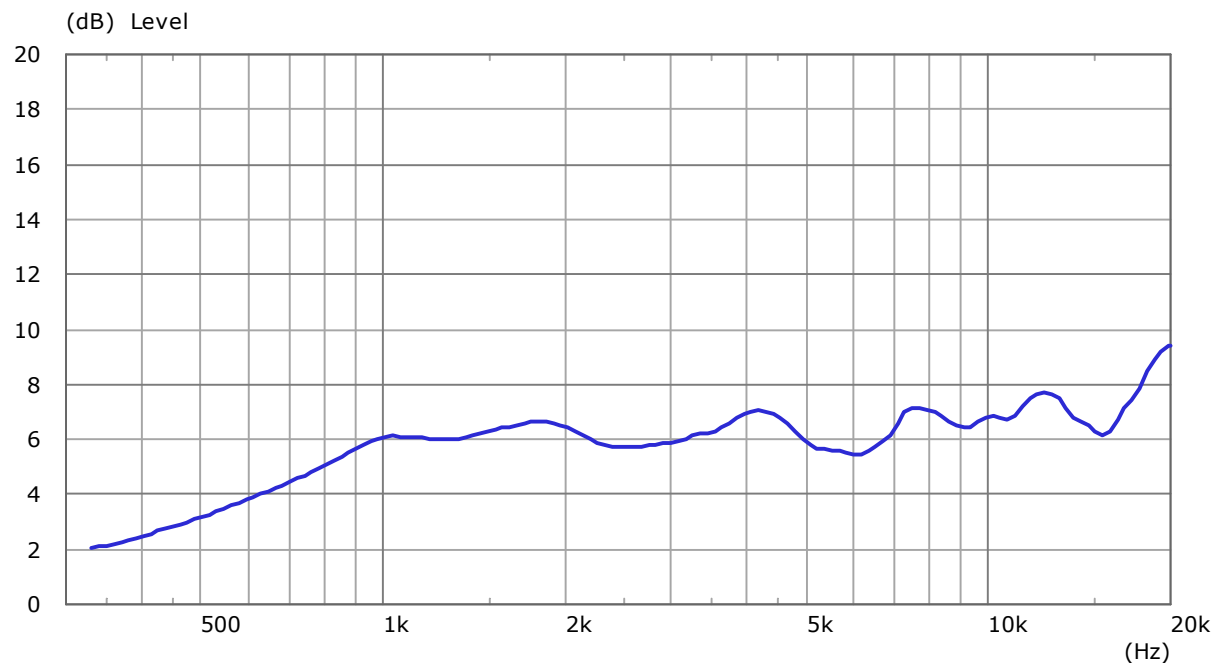


Abbildung 20: Bündelungsmaß (Halbzylinderbezogen)

Generell lässt sich dieses Konzept zu tiefen Frequenzen hin beliebig erweitern und damit auch die konstante Bündelung. Die Breite des Lautsprechers wird allerdings über diese drei Wege hinaus inakzeptabel groß. Der Prototyp war bereits 50 cm breit.

Vertikal ist diese Einschränkung meist nicht gegeben, so dass dort weitere Treiberpärchen platziert werden können. Bereits ein zusätzlicher Tieftonzweig senkt die hohe Bündelung auf ca. 200 Hz. Mit insgesamt vier Zweigen wird demnach ein sehr großer Frequenzbereich abgedeckt.

Prototyp 9

Im Folgenden wurde ein eigenes Horn per BEM-Simulation entworfen und mittels 3D-Drucker gefertigt.



Abbildung 21: 3D-gedrucktes Horn

Das Abstrahlverhalten über 15 kHz konnte damit noch etwas verbessert werden.

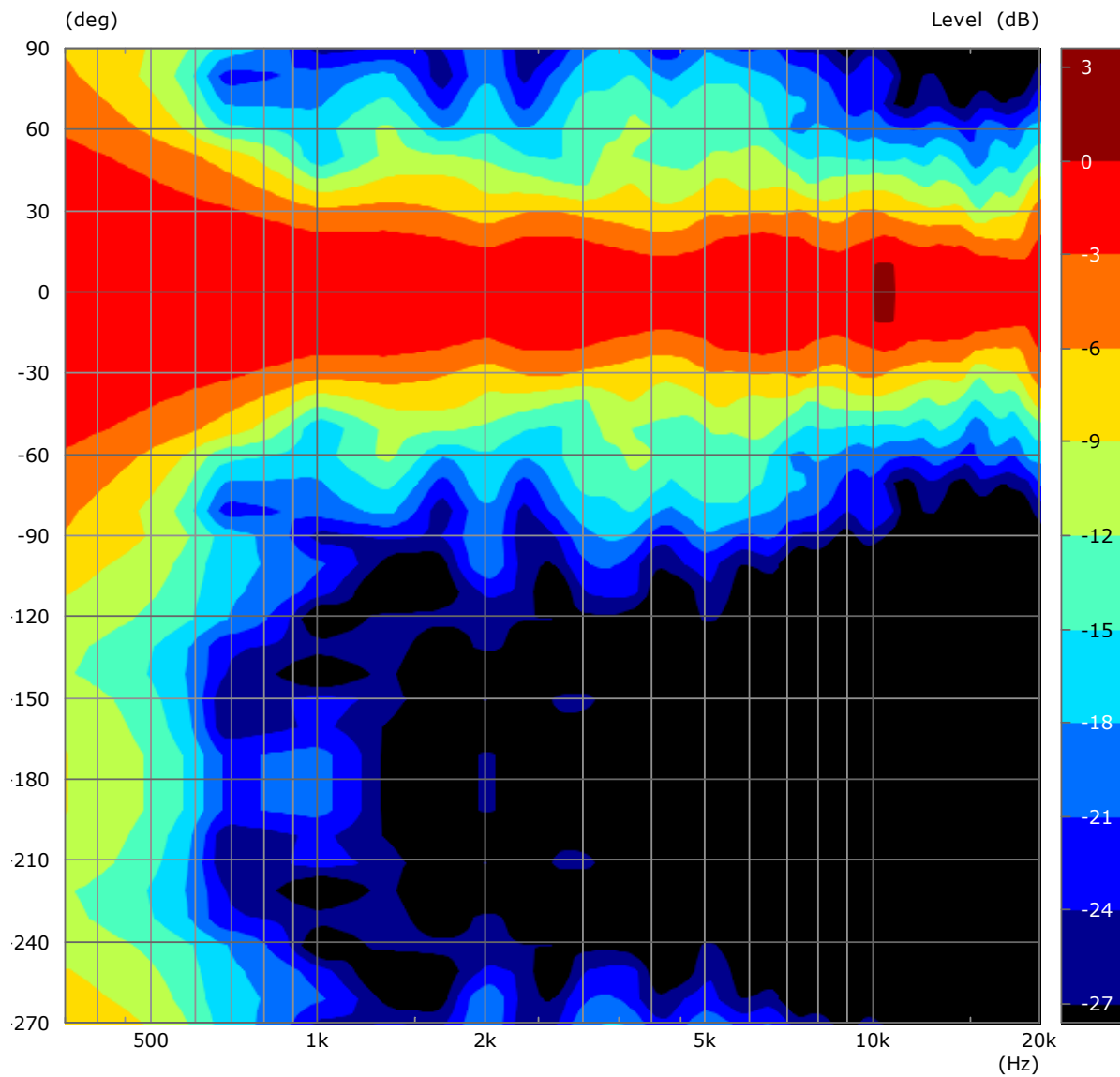
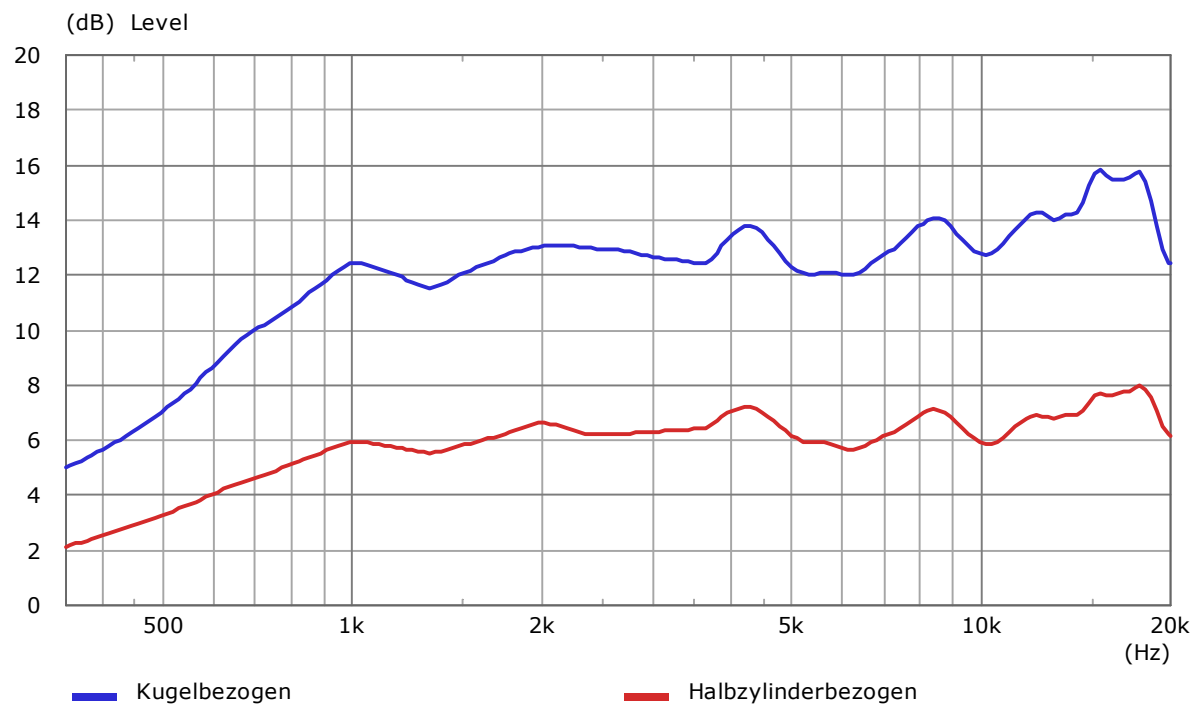


Abbildung 22: Abstrahlverhalten mit gedrucktem Horn

Auch das Bündelungsmaß zeigt diese Verbesserung. Bezogen auf die Vollkugel ergibt sich ein sehr hohes Bündelungsmaß, das im Schnitt ab 1 kHz 13 dB erreicht. Die Unstetigkeiten werden durch die vollkugelbezogene Berechnung verstärkt. Umso wichtiger ist ein stetiges Abstrahlverhalten in beiden Ebenen.



Fazit

Es wurde gezeigt, dass das Abstrahlverhalten einer coaxialen Anordnung von Mitteltönern mit einem Horn in der Mitte einen sehr stetigen Verlauf besitzen kann. Die gegenläufigen Anforderungen einer Mitteltonanordnung mit geringem Durchmesser und der starken Bündelung des Hochtöners im Übernahmebereich sind nur schwer vereinbar. Jedoch ist dies mit einem stark bündelnden und symmetrischen Horn möglich.

Klanglich zeichnet sich die hohe Richtwirkung in beide Dimensionen durch eine enorme Ausblendung des Hörraumes aus. Selbst aus 3 m Entfernung schien das Klanggeschehen nur 1 m vom Zuhörer entfernt zu sein. Dieses Konzept ist also gut geeignet, um in gering bedämpften Räumen und großen Hörabständen eine stabile Lokalisation zu erzeugen.

Referenzen

1. [J.G. Tylka, *On the Calculation of Full and Partial Directivity Indices*](#)
2. Ulrich Horbach and D.B. Keele, Application of Linear-Phase Digital Crossover Filters to Pair-Wise Symmetric Multi-Way Loudspeakers [Part 2](#), [Part 2](#)