

Quasikoax 1 Dokumentation



Inhalt

Motivation	3
Anforderungen	3
Entwicklung	4
Vorgehensweise	4
Konzept.....	4
Anordnung der Treiber.....	4
Trennfrequenzen.....	6
Schallführung.....	7
Weitere Eigenschaften	7
Ergebnisse der Simulation.....	8
Fertigung	12
Treiber	12
Konstruktion.....	12
Messungen	19
Amplituden- und Phasengang	19
Nichtlineare Verzerrungen	20
Zerfallsspektrum.....	21
Abstrahlverhalten.....	21
Weitere Bilder	23
Technische Daten	25
Referenzen	26

Motivation

Ziel der Entwicklung ist ein freistehender Lautsprecher, der ein horizontal breites und vertikal enges Abstrahlverhalten aufweist. Seitliche Reflexionen sollen also bewusst erhalten bleiben, um die Räumlichkeit, Einhüllung und Klangfarbe nicht negativ zu beeinträchtigen. Um trotzdem eine möglichst gute Abbildung und Lokalisation zu erreichen, soll der Lautsprecher vertikal stark bündeln. Dies blendet Reflexionen an Boden und Decke aus.

Weiterhin war das Ziel, den Einsatz von tiefen Schallführungen und damit Hornmoden im Übertragungsbereich möglichst zu vermeiden. Der Lautsprecher sollte eine bestimmte Maximalgröße nicht überschreiten.

Anforderungen

Ziel der Entwicklung war ein Lautsprecher mit folgenden Eigenschaften.

Akustische Anforderungen:

1. Anbindung an ein Subwoofersystem, das bei ca. 100 Hz getrennt wird
2. Freistehende Aufstellung (kein Wandeinbau)
3. Horizontal eher breites Abstrahlverhalten, um Räumlichkeit und Einhüllung zu gewährleisten
4. Vertikal enges Abstrahlverhalten, um Boden- und Deckenreflexion zu verringern und auf größere Distanzen ein gutes Verhältnis aus Direkt- und Diffusschall zu erzeugen
5. Akustisches Zentrum frequenzunabhängig in einem Punkt
6. Hoher unverzerrter Maximalpegel

Anforderungen an die Gehäusegröße:

1. Maximale Tiefe von 40 cm
2. Maximale Breite von 40 cm
3. Die Höhe ist nur durch die Raummaße beschränkt

Die Maximalkosten für das Projekt waren nicht derart begrenzt, dass die akustischen Eigenschaften stark eingeschränkt werden mussten.

Der Lautsprecher sollte komplett aktiv angesteuert werden. Das hat gerade bei Mehrwegern enorme Vorteile bezüglich der Entzerrung und Filterfunktionen. Es sollen linearphasige FIR Filter zum Einsatz kommen.

Entwicklung

Vorgehensweise

Die Entwicklung des Lautsprechers kann in folgende Schritte eingeteilt werden:

1. Konzept erstellen und per BEM evaluieren
2. Passende Treiber messen und auswählen
3. Modell auf konkrete Treiberwahl anpassen und iterativ per BEM optimieren
4. (vereinfachte) Prototypen aufbauen und messen
5. Ggf. Korrekturen vornehmen

Dieses Vorgehen hat den Vorteil, dass ein Großteil der Optimierung bereits am Rechner durchgeführt wird und somit die Zahl der Prototypen gering gehalten wird. Das verringert die Kosten für das Projekt und stellt sicher, dass möglichst früh eine optimale Schallwandgeometrie gefunden wird.

Konzept

Das horizontale und vertikale Abstrahlverhalten eines Lautsprechers lassen sich in der Regel unabhängig voneinander betrachten. Das vereinfacht das Problem und es können beide Dimensionen in gewissen Grenzen getrennt voneinander optimiert werden. Dies ist bei diesem Lautsprecher geschehen.

Anordnung der Treiber

Als Konzept fiel die Wahl auf einen 3-Weger mit optimierter Anordnung von Mitteltönern um einen einzelnen Hochtöner herum. Die Interferenzen zwischen den Treibern eines Weges sorgen für eine Verengung des horizontalen und vertikalen Abstrahlverhaltens. Gleichzeitig sind die Abstände der Treiber innerhalb eines Weges so gewählt, dass Nebenkeulen erst oberhalb ihres Übertragungsbereichs auftreten. Durch die Überlappung der Zweige über die Trennfrequenzen hinaus wird das Abstrahlverhalten konstant gehalten.

Die Abstände der Treiber innerhalb eines Weges sind bei diesem Konzept besonders wichtig. Dieser Abstand sollte möglichst gering ausfallen, um Nebenkeulen außerhalb des Nutzbandes zu verschieben. Nebenkeulen treten auf, wenn die Wellenlänge im Bereich des Abstands zwischen zwei Treiberzentren liegt.

Nach diversen Optimierungen haben sich folgende Membrandurchmesser, Abstände und Ausdehnung der Gesamtanordnung als guter Kompromiss herausgestellt.

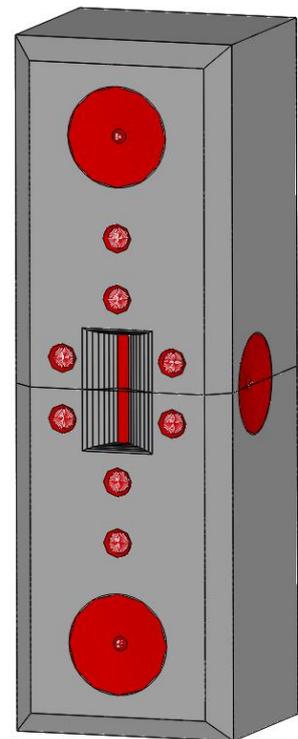


Abbildung 1: 3D-Modell des Lautsprechers

	Membrangröße (cm)	Ausdehnung horizontal (cm)	Ausdehnung vertikal (cm)	Abstände horizontal (cm)	Abstände vertikal (cm)
4 x Tieftöner	17	31	70	15	35
8 x Mitteltöner	5	15,7	42	5,2	8,4
1 x Hochtöner	14,5 (Länge)	10 (Waveguide)	17 (Waveguide)	-	-

Die seitlichen Tief- und Mitteltöner strahlen dabei nur den halben Schallpegel ab, das heißt sie sind mit 0,5 gewichtet. Das ergibt in der Vertikalen für jede Zeile eine Summe von 1. In der Horizontalen dagegen ist die mittlere Spalte viermal so stark gewichtet wie die beiden äußeren. Das trägt zu der breiten horizontalen Abstrahlung bei.

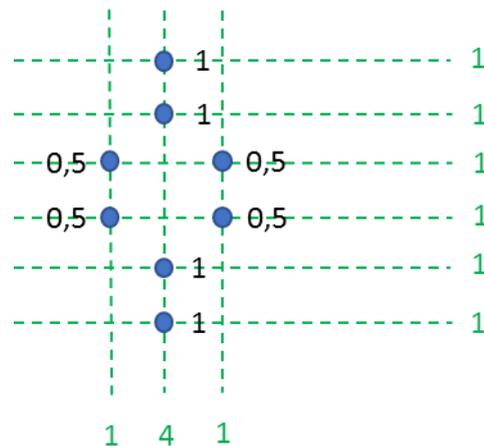


Abbildung 2: Gewichtung der einzelnen Mitteltöner

Die Gesamtgröße der Treiberanordnung eines Weges bestimmt die Stärke ihrer Richtwirkung. Deshalb sind sowohl die Tief- als auch die Mitteltöneranordnung deutlich höher als breit. Die seitlichen Tieftöner sind ein Kompromiss, der zugunsten der Gehäusebreite eingegangen wurde. Sie erzeugen allerdings im Überlappungsbereich mit den vorderen Tieftönern eine signifikante Richtwirkung in der hinteren und vorderen Hemisphäre. Da sie eine andere Verzögerung benötigen als die frontseitig montierten Tieftöner, wird ein zusätzlicher DSP-Kanal benötigt.

Obwohl die Anordnungen vertikal einem Linienstrahler nahekommen, sind sie zu kurz, um in ihren Frequenzbereichen eine Zylinderwelle am Hörplatz zu erzeugen. Das bedeutet auch, dass immer im Fernfeld abgehört wird und der Schalldruckpegel mit 6 dB pro Entfernungsverdopplung abnimmt. Der Nachteil eines entfernungsabhängigen Amplitudengangs, der Linienstrahlern inhärent ist, ist somit nicht vorhanden.

Der Lautsprecher besitzt folgende Maße:

- **Breite: 31 cm**
- **Höhe: 100 cm**
- **Tiefe: 28 cm**

Damit ist er für die Stärke der Richtwirkung und deren unterer Grenzfrequenz relativ kompakt. Es wurden per BEM diverse andere oder verwandte Konzepte simuliert. So z.B. auch die Erweiterung der vertikalen Richtwirkung zu tiefen Frequenzen durch eine größere Ausdehnung der Tieftöneranordnung. Das brachte aber gemessen an dem zusätzlichen Aufwand keine große Verbesserung. Ein Grund ist, dass das deutlich breitere horizontale Abstrahlverhalten dominant in das Bündelungsmaß eingeht und somit Änderungen am engen vertikalen kaum Auswirkungen zeigen.

Schallführung

Während das vertikale Abstrahlverhalten im Hochtön durch die große Ausdehnung des Hochtöners erzeugt wird, musste das horizontale durch eine Schallführung realisiert werden, um es möglichst konstant und nicht zu breit zu gestalten. Zunächst wurde eine einfache Schallführung ausschließlich für den Hochtöner per BEM simuliert und optimiert.

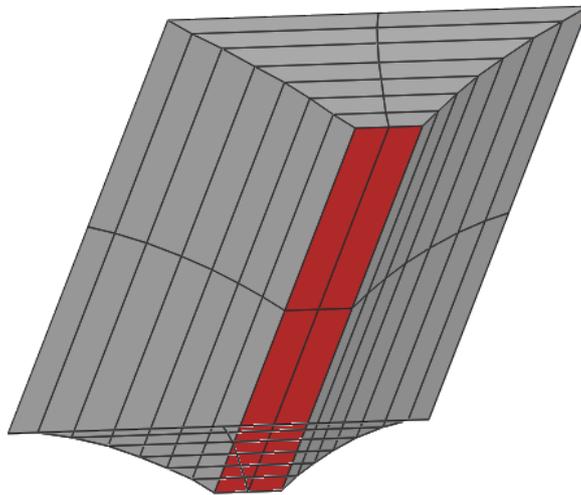


Abbildung 4: Einfaches Modell der Schallführung

Sobald die optimale Kontur für die einfache Schallführung ermittelt war, wurde sie in das komplexe 3D-Modell für den gesamten Lautsprecher eingebettet und mit Hilfe des BEM-Simulators iterativ optimiert. Die Schallführung wurde so optimiert, dass der Abstrahlwinkel bei -6 dB ca. 120° beträgt.

Weitere Eigenschaften

Das Konzept mit vier Wegen plus Subwoofer erfüllt automatisch die restlichen akustischen Anforderungen. Da bis auf den Hochtöner in jedem Weg mehrere Treiber vorhanden sind, steigt der Maximalpegel im Vergleich zu einem einzelnen Treiber. Das senkt gleichzeitig die nichtlinearen Verzerrungen. Der Hochtöner erfüllt dies bereits durch seine sehr große Membranfläche.

Da die Zweige nur in begrenzten Frequenzbändern eingesetzt werden, werden außerdem die besonders schädlichen Intermodulationsverzerrungen deutlich reduziert.

Schlussendlich erzeugt die quasikoaxiale Anordnung der Treiber eine frequenzneutrale Lokalisation aus Richtung des Hochtöners. Der Lautsprecher ist damit ähnlich einem Koaxialsystem aufgebaut.

Ergebnisse der Simulation

Das horizontale Abstrahlverhalten geht ab ca. 500 Hz in ein nahezu konstantes Verhalten über. Leichte Nebenkeulen treten in der hinteren Hemisphäre bei ca. 700 – 900 Hz auf. Dass die Richtwirkung trotzdem dort noch so hoch ist, ist der Überlappung zwischen den Tiefmitteltönern und den seitlichen Tieftönern zu verdanken.

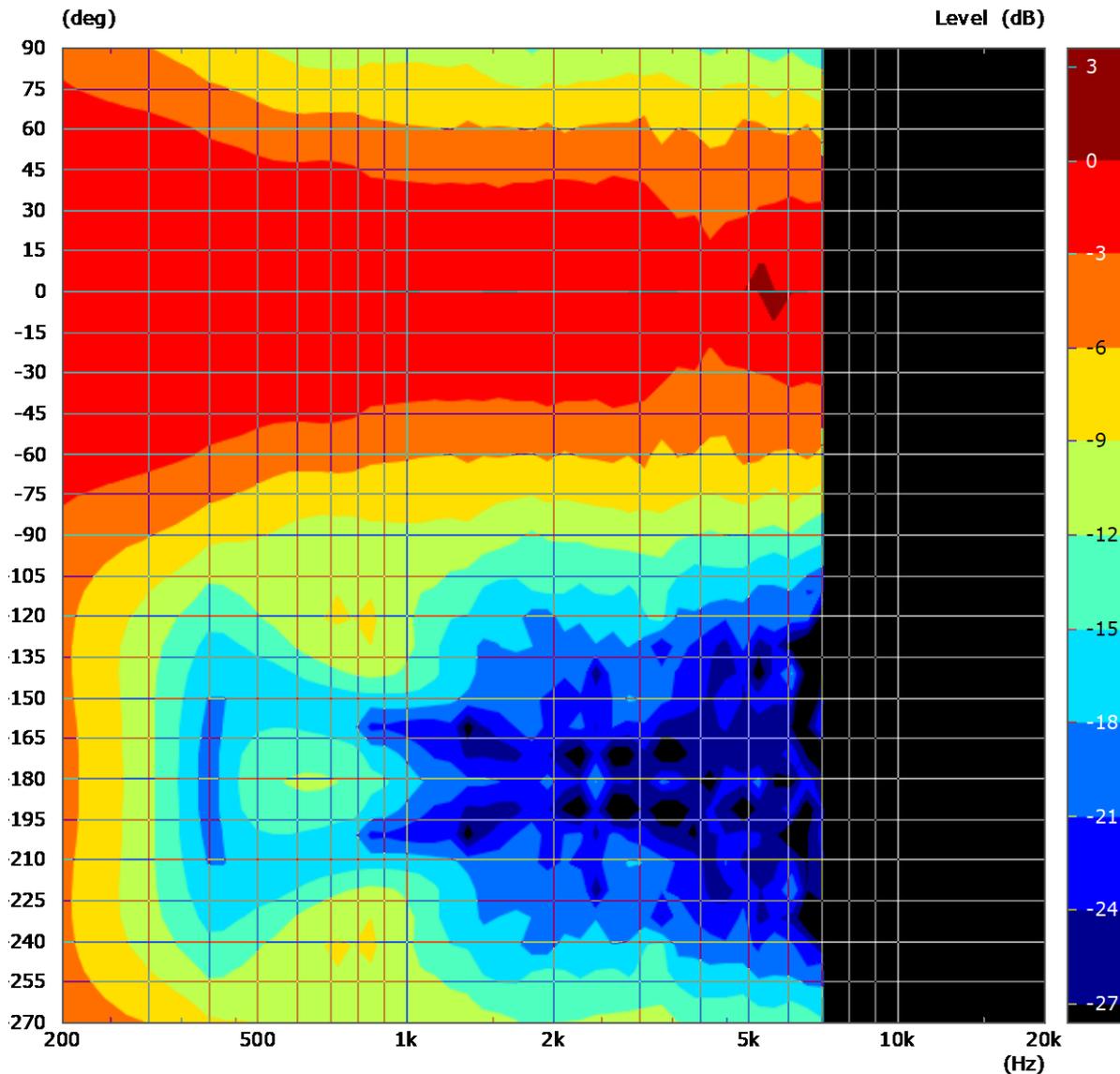


Abbildung 5: Horizontales Abstrahlverhalten der Simulation

Das vertikale Abstrahlverhalten wurde auf ca. 30° optimiert und durch eine geschickte Wahl der Trennfrequenzen möglichst konstant geformt. Ab ca. 900 Hz erreicht die Bündelung ihren Sollwert und steigt ab ca. 6 kHz an. Bei 4 kHz ist eine leichte Aufweitung vorhanden. Nebenkeulen sind ausreichend abgeschwächt.

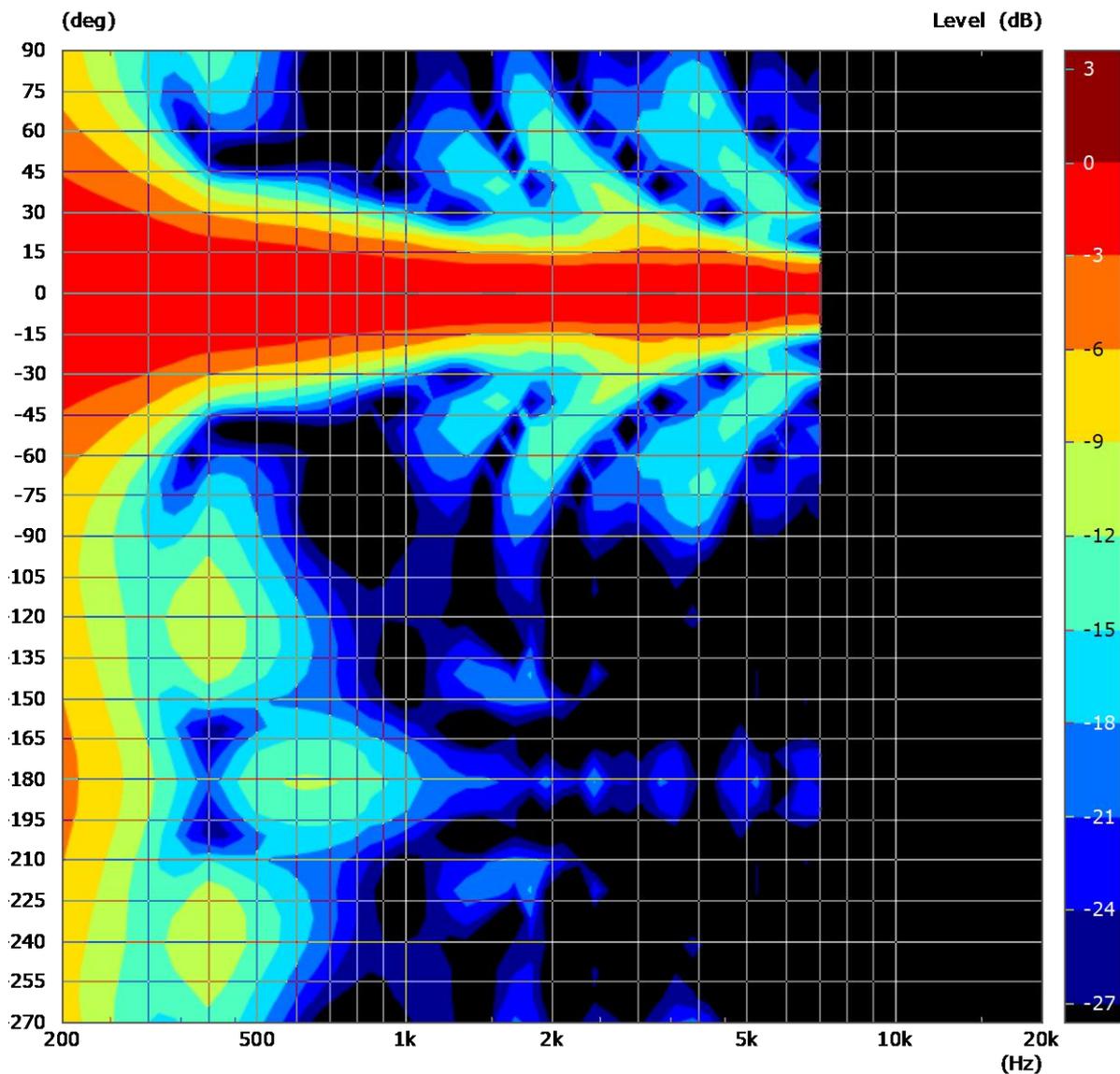


Abbildung 6: Vertikales Abstrahlverhalten der Simulation

Dass Nebenkeulen horizontal und vertikal stark abgeschwächt sind, bedeutet nicht, dass dies auch vertikal der Fall sein muss. Gerade bei rechteckig angeordneten Treibern, verhält es sich diagonal meist nicht mehr so gutmütig. Durch Optimierungen ist es allerdings gelungen, auch in diesen Richtungen die Nebenkeulen auf ca. -10 dB zu reduzieren.

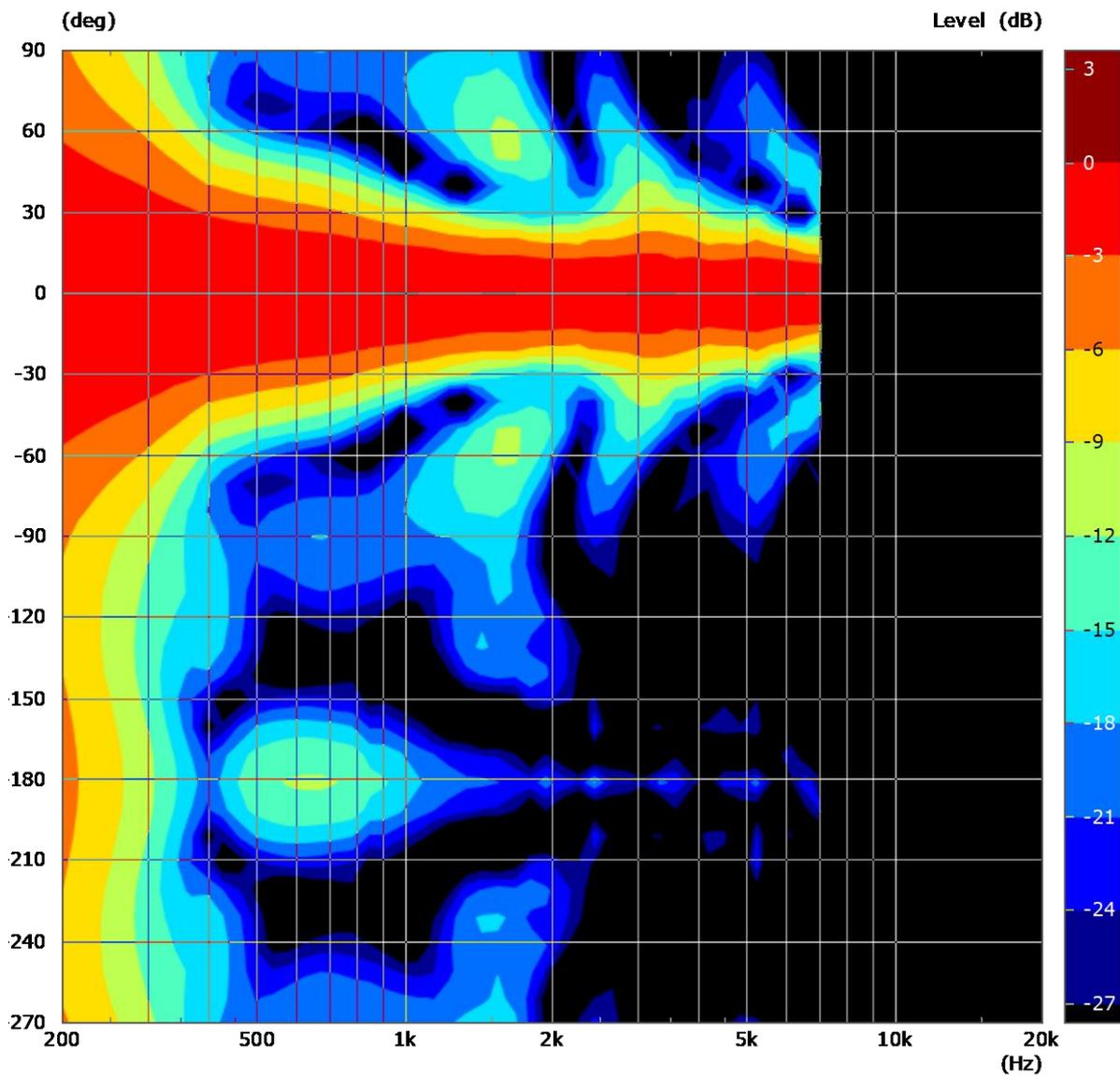


Abbildung 7: Diagonales Abstrahlverhalten

Das kugelbezogene Bündelungsmaß, das aus dem horizontalen und vertikalen Abstrahlverhalten errechnet wurde [2], ist ab 900 Hz nahezu konstant und steigt nur minimal an. Selbst ab ca. 500 Hz ist es noch relativ hoch, was die starke Richtwirkung widerspiegelt.

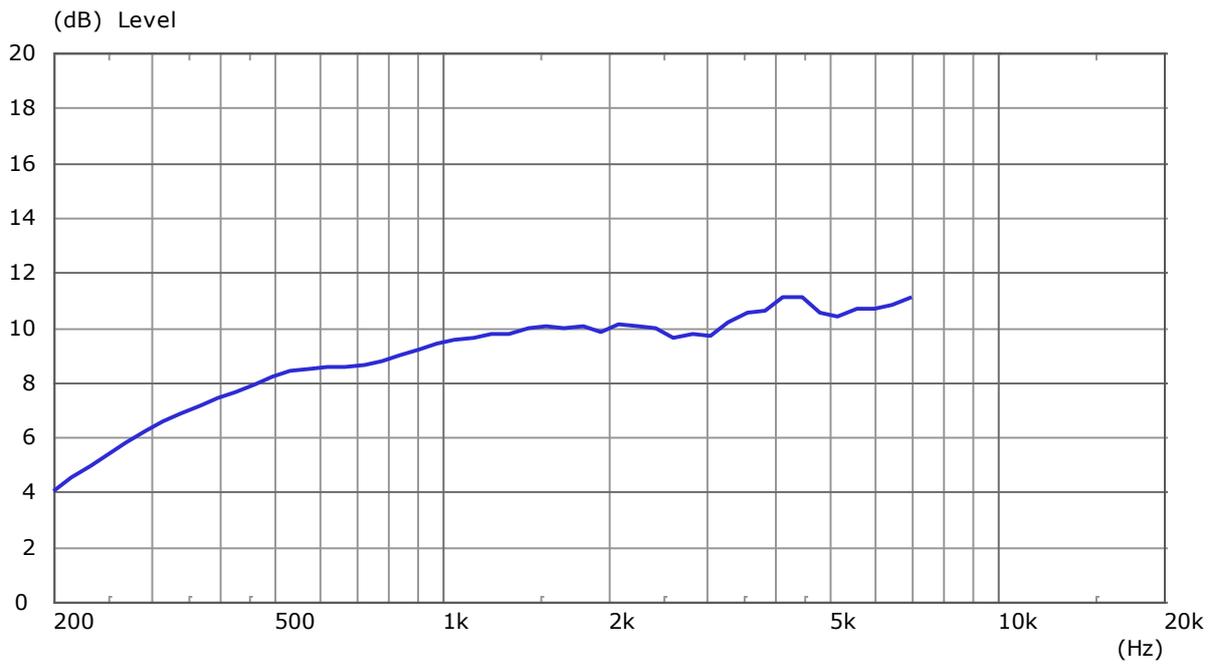


Abbildung 8: Kugelbezogenes Bündelungsmaß

Fertigung

Treiber

Für das Endprodukt wurden folgende Treiber ausgewählt, die wegen ihrer Maße größtenteils schon während der rechnergestützten Optimierung festgelegt wurden. Insgesamt wurden knapp 20 verschiedene Modelle vermessen und bewertet.

- Tieftöner: SB Acoustics SB17NRXC35-8
- Mitteltöner: Aurasound NSW2-326-8AT
- Hochtöner: Dayton AMTPRO-4



Bei den Tiefmitteltönern waren vor allem niedrige nichtlineare Verzerrungen und ein gutes Ausschwingverhalten Kriterien für die Auswahl. Der SB17NRXC35-8 besitzt diese Eigenschaften.

Der Mitteltöner musste besonders klein ausfallen, um den geringen Abstand zu dem Hochtöner zu gewährleisten. Das engte die Auswahl stark ein und übrig blieben praktisch nur 2“-Breitbänder. Es fiel die Wahl auf den Aurasound NSW2-326-8AT, der einen sehr kleinen Einbaurand besitzt und einfach von hinten in einer massiven Schallwand montiert werden kann. Auf jeden dieser Treiber wurde eine bedämpfte Rückkammer montiert. Der niedrige Kennschalldruck des einzelnen Treibers wird durch die große Anzahl ausgeglichen.

Als Hochtöner wurde der Dayton AMTPRO-4 ausgewählt, der für einen AMT ein sehr gutes Preis-Leistungs-Verhältnis und zudem die für das Konzept passende Länge und Breite aufweist. Der AMT wird in einem eigenen Volumen verbaut, da er keine Rückkammer besitzt.

Konstruktion

Das Gehäuse wurde in 3D-CAD entwickelt und speziell auf die gewählten Treiber hin konstruiert, so dass eine bündige Montage ohne Lücken oder vorstehende Teile möglich ist.

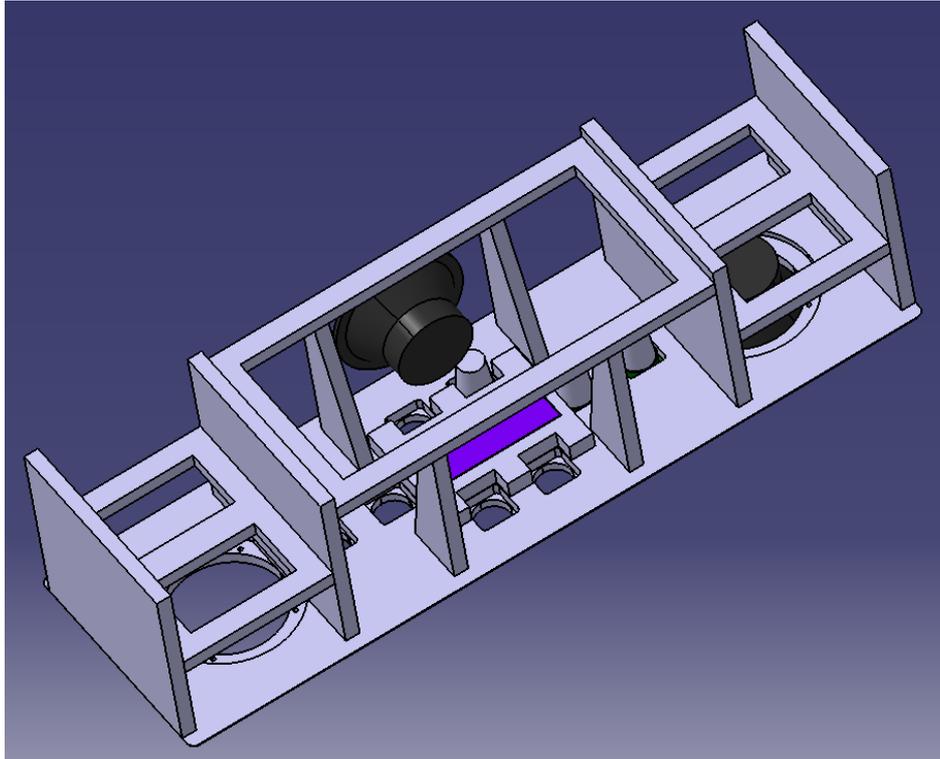


Abbildung 9: Innenaufbau des Lautsprechers

Die Front wurde komplett aus einem Kunststoffblock CNC-gefräst. Das hat den positiven Nebeneffekt, dass das massive Teil keine Probleme mit Resonanzen im Übertragungsbereich besitzt. Zusätzlich wurden mehrere Versteifungen im Gehäuse vorgesehen.

Anschließend wurden die Fronten mattschwarz lackiert. Das soll optisch einen Kontrast zu dem hellen Gehäuse aus Ahorn-Multiplex erzeugen.



Abbildung 10: Vorderseite der Front



Abbildung 11: Rückseite der Front

Da es sich bei den Aurasound NSW2-326-8AT um eine offene Treiberkonstruktion handelt, wurde nach einer geeigneten Rückkammer gesucht. Als passend und ausreichend stabil haben sich bruchfeste Schnapsgläser aus Kunststoff erwiesen. Diese wurden mit Iso Bond gefüllt und auf die Rückseite der Mitteltöner geklebt. Als positiver Nebeneffekt ist die Resonanz, die durch die rückwärtige Öffnung des Treibers entsteht, wirksam bedämpft.

Die seitlichen Mitteltöner sind mit 0,5 gewichtet, das heißt, sie müssen nur halb so viel Schallpegel erzeugen, wie die vertikal mittig angeordneten. Da im Gegensatz zu den seitlichen Tieftönern keine zusätzliche Verzögerung notwendig war, ließ sich die Gewichtung durch eine zusätzliche Reihenschaltung realisieren.

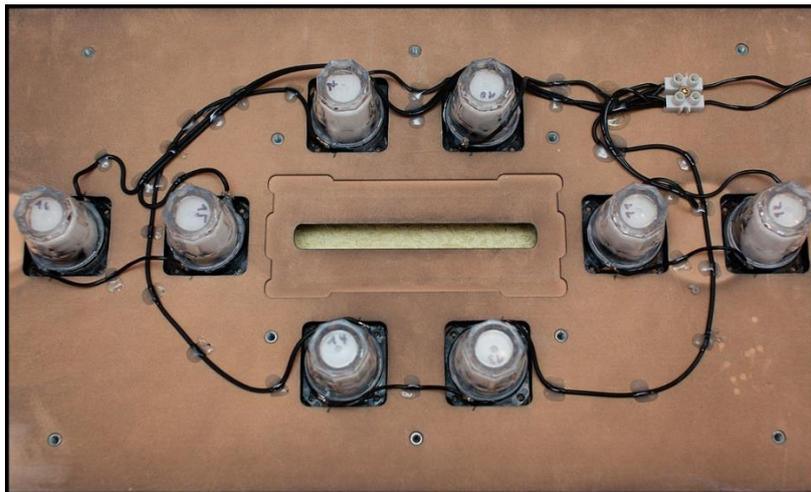


Abbildung 12: Eingebaute Mitteltöner

Alle Kabel wurden im Gehäuse mit Heißkleber befestigt, so dass sie nicht in Schwingungen geraten und Störgeräusche erzeugen können.



Abbildung 13: Angeschlossene Front

Da der Hochtöner mit 38 mm eine zu breit abstrahlende Fläche besitzt, wurde die Schallführung so entworfen, dass sie einen Teil dieser Fläche von den Seiten her abdeckt. Nur so ließ sich das gewünschte horizontale Abstrahlverhalten im Hochton erzielen.

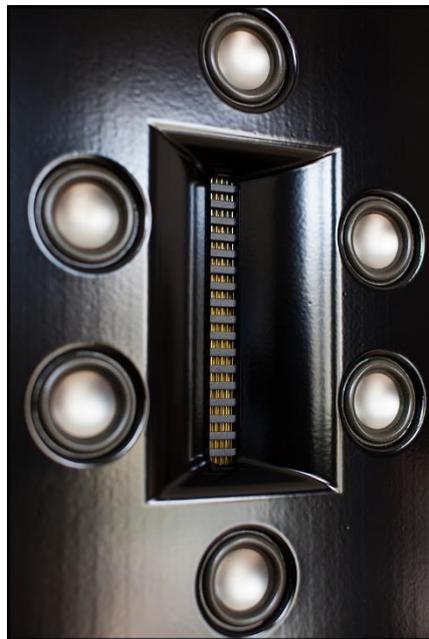


Abbildung 14: Schallführung

Das Gehäuse wurde aus Multiplex mit Ahorn-Edelfurnier ausgeführt. Die Seitenwände wurden auf Gehrung verleimt und die Kanten rundgefräst, damit sie später gegen Stöße weniger empfindlich sind. Anschließend wurde das Gehäuse zweimal geschliffen und mit seidenmattem Parkettlack lackiert.



Abbildung 15: Verleimung des Gehäuses



Abbildung 16: Verrundete Kanten

Da Mittel- und Hochtöner von hinten in die Front eingelassen wurden und keine Schrauben sichtbar sein sollten, wurde die Front von hinten an das Gehäuse geschraubt. Das hatte zur Folge, dass die Rückwand abnehmbar gestaltet werden musste.

Die 8-polige speakOn-Buchse ist fest mit dem Gehäuse verbunden und wird durch eine Öffnung in der Rückwand zugänglich.



Abbildung 17: Rückwand mit speakOn-Buchse

Das Innere des Gehäuses wurde komplett mit Iso Bond WLG 045 gefüllt, um stehende Wellen zu bedämpfen.



Abbildung 18: Füllung mit Iso Bond WLG 045

Messungen

Um den Lautsprecher in einer möglichst reflexionsfreien Umgebung zu messen, wurde er im Garten auf ein Stativ gestellt. Die erste Reflexion vom Boden trifft ca. 7 ms nach dem Direktschall am Mikrofon ein. Das erlaubt eine großzügige Fensterung beim Auswerten der Impulsantwort.



Abbildung 19: Messung im Garten

Amplituden- und Phasengang

Sowohl der Amplituden- als auch der Phasengang wurden linear entzerrt. Eine Anpassung an den Hörraum wird zusätzlich vorgenommen, bei der jedoch nur den Bass und Grundton entzerrt wird.

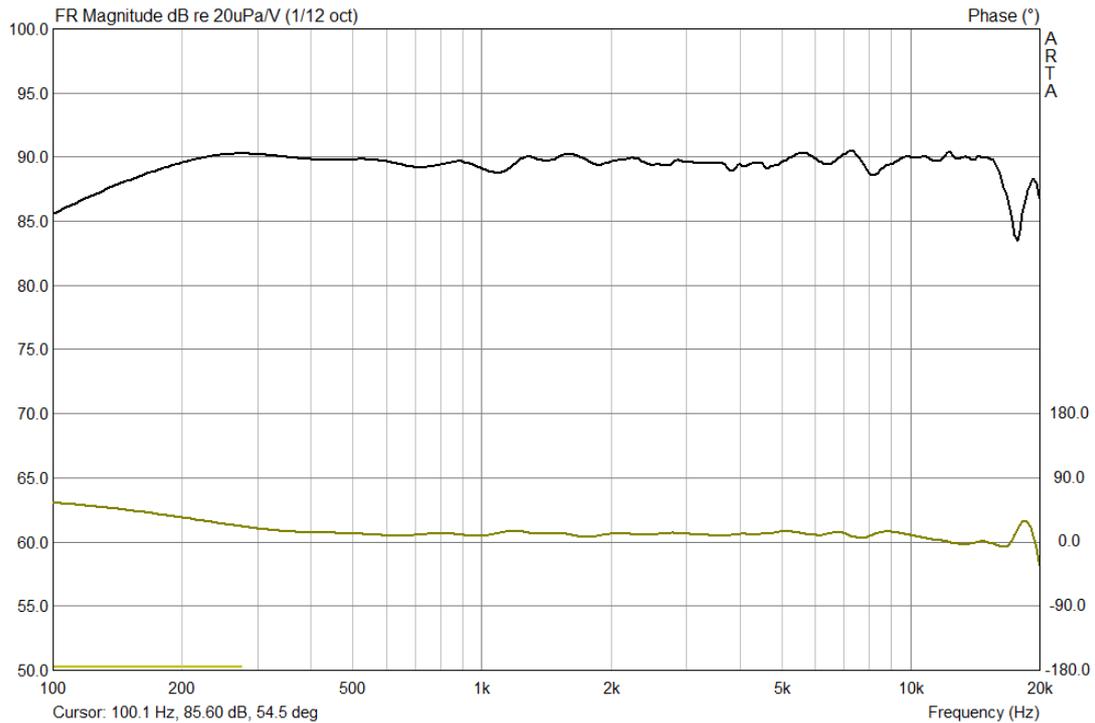


Abbildung 20: Komplexer Frequenzgang

Nichtlineare Verzerrungen

Die nichtlinearen Verzerrungen sind insgesamt gering und unterhalb der Hörschwelle. Im Mittelton ist K3 etwas erhöht, was dem Mitteltöner geschuldet ist. Dies wurde im Vorfeld aus Kostengründen und wegen der besseren Einbaubarkeit der Treiber in Kauf genommen.

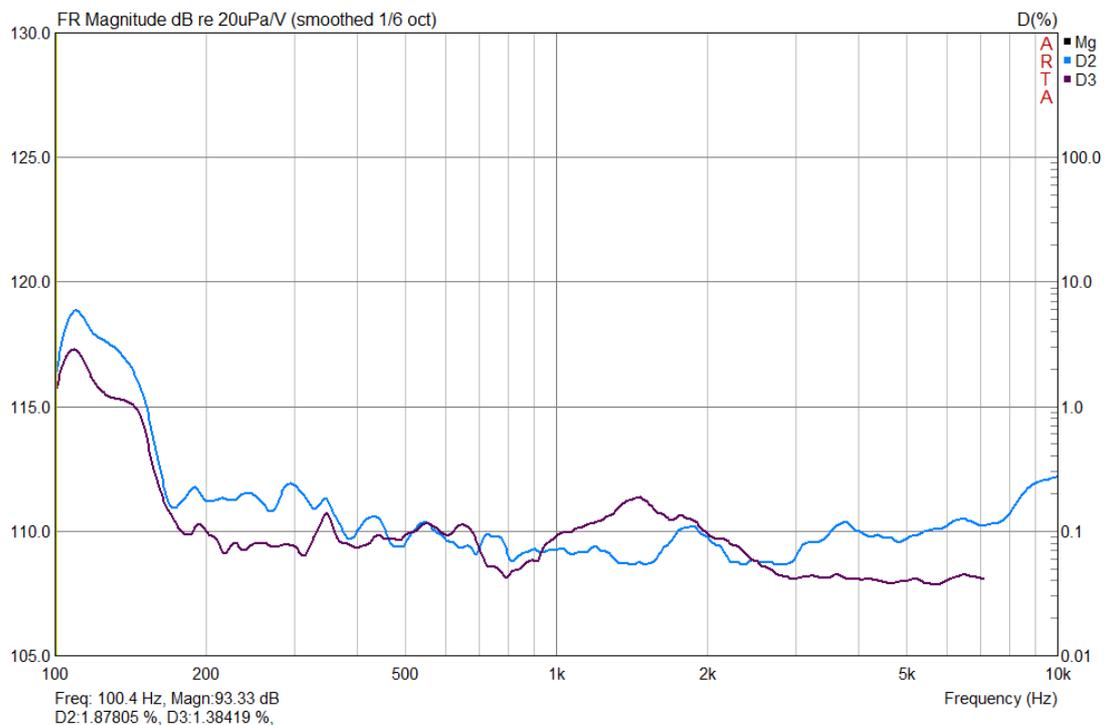


Abbildung 21: Nichtlineare Verzerrungen bei 100 dB

Zerfallsspektrum

Insgesamt ist das Zerfallsspektrum unauffällig. Es sind noch abgeschwächte Resonanzen des Hochtöners sichtbar, die in den unhörbaren Bereich fallen sollten.

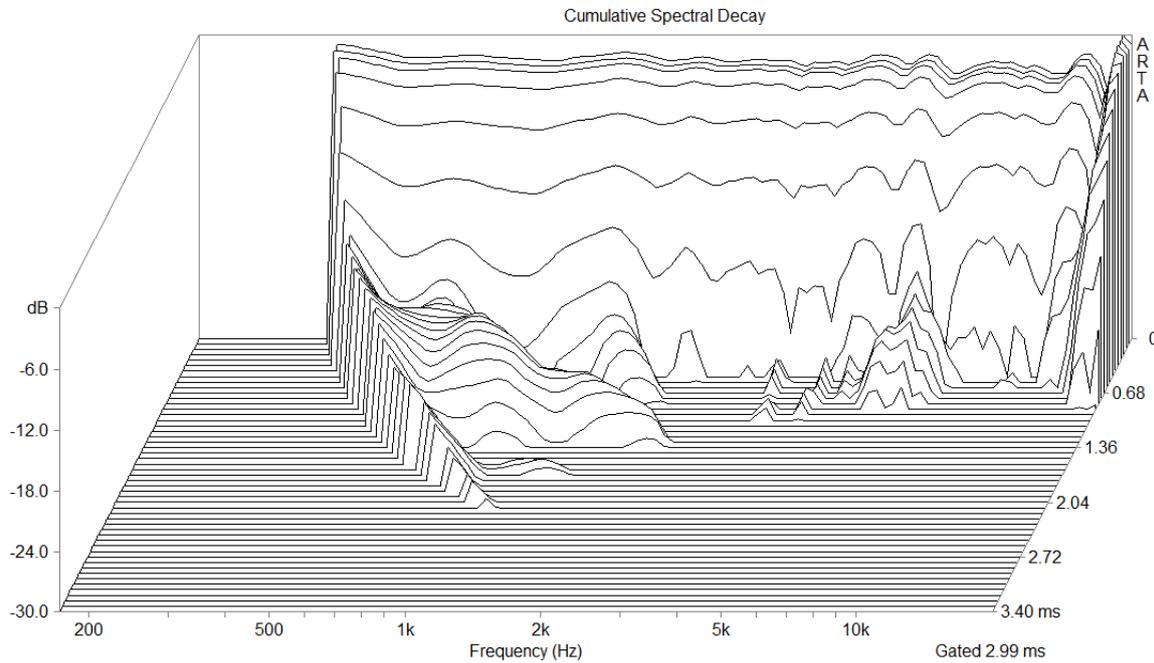


Abbildung 22: Zerfallsspektrum

Abstrahlverhalten

Das horizontale Abstrahlverhalten weicht nur geringfügig von dem simulierten ab. Es hängt stark von den Filterfunktionen und der Entzerrung der einzelnen Zweige ab, so dass hier viel Zeit für die Abstimmung investiert werden musste. Der anvisierte Abstrahlwinkel von 120° (-6 dB) wird über einen großen Frequenzbereich eingehalten.

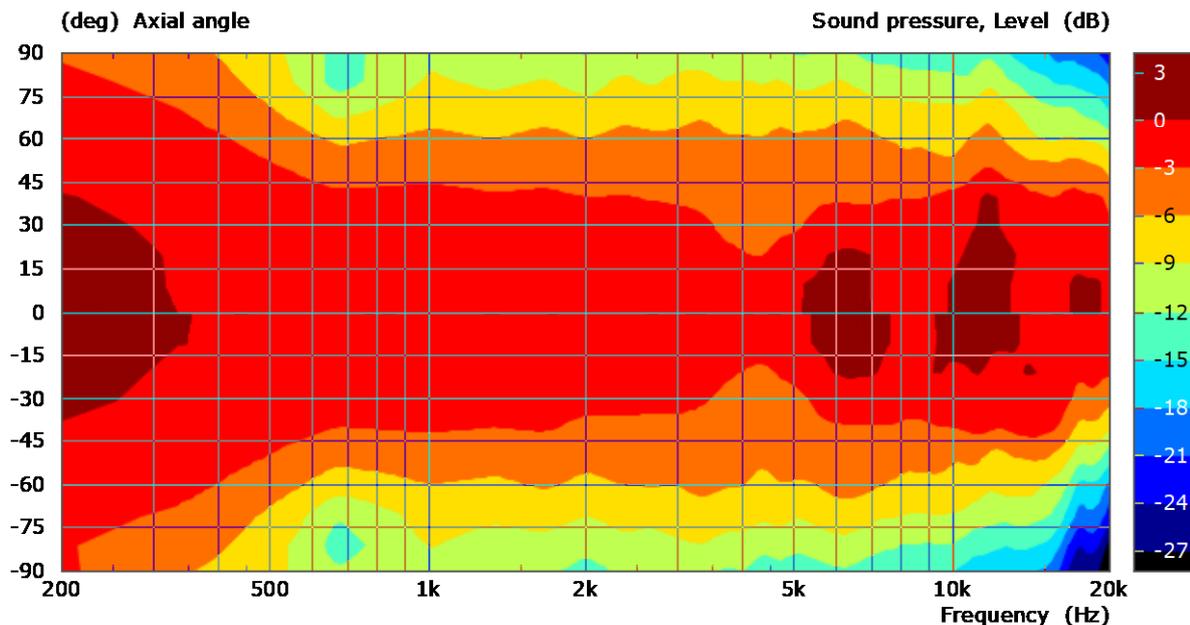


Abbildung 23: Horizontales Abstrahlverhalten

Vertikal gibt es keine Überraschungen. Das Abstrahlverhalten stimmt mit dem simulierten weitestgehend überein. Signifikante Nebenkeulen sind nicht vorhanden.

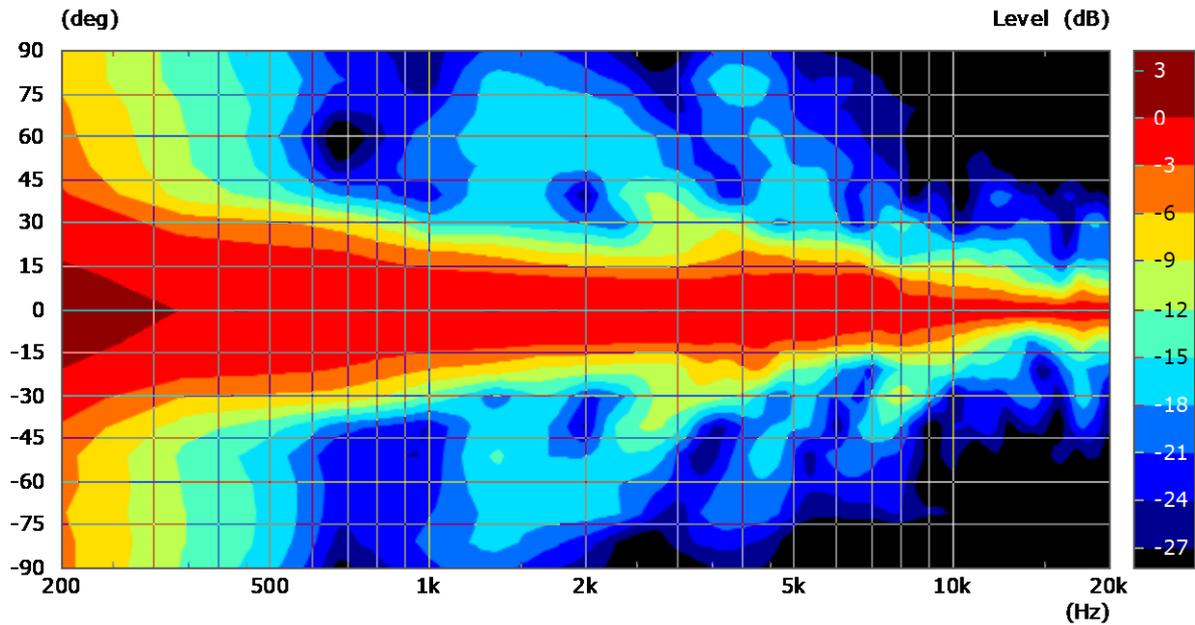


Abbildung 24: Vertikales Abstrahlverhalten

Das halbkugelbezogene Bündelungsmaß, das aus dem horizontalen und vertikalen Abstrahlverhalten errechnet wurde, ist zwischen 600 Hz und 12 kHz nahezu konstant und schwankt gerade mal um $\pm 0,6$ dB.

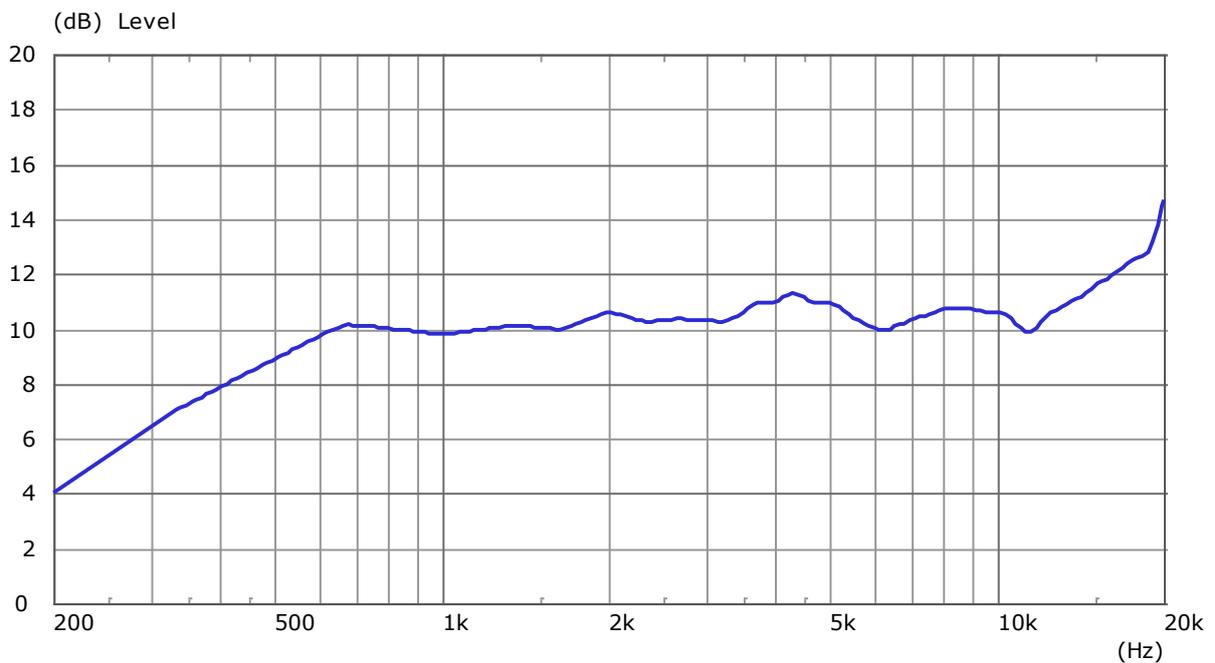
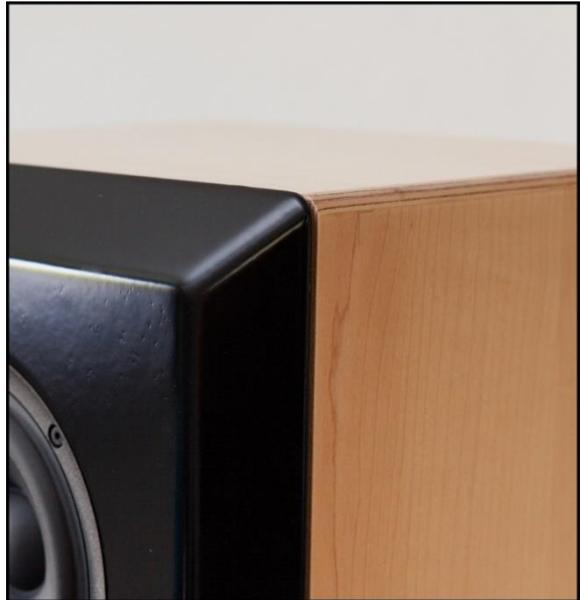


Abbildung 25: Halbkugelbezogenes Bündelungsmaß

Weitere Bilder





Technische Daten

Freifeldübertragungsmaß:	100 Hz – 18 kHz, $\pm 1,5$ dB
Abstrahlwinkel horizontal:	120° @ 600 Hz – 10 kHz
Abstrahlwinkel vertikal:	35° @ 1 – 8 kHz
Klirrfaktor:	< 0,3 % (200 Hz – 10 kHz) in 1 m, 100 dB SPL
Tiefmitteltöner:	4 x 170 mm Konuslautsprecher
Mitteltöner:	8 x 50 mm Kalotte
Hochtöner:	1 x 145 mm AMT
Trennfrequenzen:	100 Hz (24 dB/Okt) 600 Hz (Horbach-Keele) 2400 Hz (24 dB/Okt)
Endstufen:	4 x 125 W RMS @ 4 Ω
Abmessungen:	1000 x 310 x 280 mm (H x B x T)

Referenzen

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