

Aries M Dokumentation



1. Motivation	3
2. Anforderungen	3
3. Entwicklung	4
3.1. Vorgehensweise	4
3.2. Konzept.....	4
3.2.1. Vertikal	4
3.2.2. Horizontal	7
3.2.3. Weitere Eigenschaften	7
3.3. Ergebnisse.....	8
4. Prototyp.....	10
4.1. Treiber	10
4.2. Konstruktion	11
4.3. Messungen	14
4.3.1. Amplituden- und Phasengang	15
4.3.2. Nichtlineare Verzerrungen	16
4.3.3. Zerfallsspektrum.....	17
4.3.4. Abstrahlverhalten.....	18
5. Endprodukt	21
6. Technische Daten	22
7. Referenzen	23

1. Motivation

Dedizierte Heimkinos werden heutzutage immer öfter mit einer so genannten Baffle Wall aufgebaut. Das heißt, dass die Frontlautsprecher und die Subwoofer in eine geschlossene Wand eingelassen bzw. integriert werden.

Das hat besondere Anforderungen zur Folge. Zum einen soll eine Baffle Wall mit einer möglichst geringen Tiefe auskommen und zum anderen finden sich für die Lautsprecher Halbraumbedingungen vor. Da Letzteres zur Folge hat, dass die Formung des Abstrahlverhaltes durch Abschattung und Gehäusediffraktion wegfällt, muss hier bei der Entwicklung eines Einbaulautsprechers besonderes Augenmerk gelegt werden.

2. Anforderungen

Ziel der Entwicklung war ein Einbaulautsprecher mit folgenden Eigenschaften.

Akustische Anforderungen:

1. Anbindung an ein Subwoofersystem, das bei ca. 90 Hz getrennt wird
2. Möglichst konstantes Abstrahlverhalten in allen Dimensionen
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. Hoher Maximalpegel (110 dB in 1 m Abstand mit maximal 3 % THD)

Anforderungen an die Gehäusegröße:

1. Maximale Tiefe von 20 cm
2. Maximale Breite von 30 cm (wegen der Einwinkelung des linken/rechten Lautsprechers)
3. Die Höhe ist nur durch die Raummaße beschränkt

Der Lautsprecher sollte komplett aktiv angesteuert werden. Das hat gerade bei Mehrwegern enorme Vorteile bezüglich der Entzerrung und Filterfunktionen. Ob IIR- oder FIR Filter zum Einsatz kommen, war von vornerein nicht festgelegt.

3. Entwicklung

3.1. 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. Prototyp 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.

3.2. Konzept

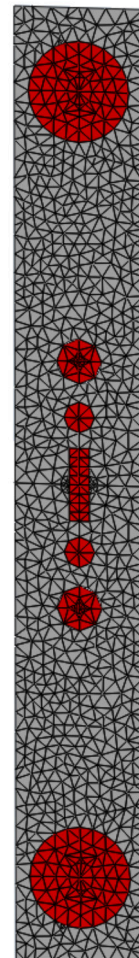
Das horizontale und vertikale Abstrahlverhalten eines Lautsprechers lassen sich in der Regel unabhängig voneinander betrachten. Das vereinfacht das Problem und es können für beide Dimensionen völlig unterschiedliche Konzepte angewendet werden wie bei diesem Lautsprecher geschehen.

3.2.1. Vertikal

Als Konzept fiel die Wahl auf einen 4-Weger mit vertikal symmetrischer Anordnungen von Treiberpärchen um einen einzelnen Hochtöner herum. Die Interferenzen zwischen den Treibern eines Pärchens sowie dessen Abstand sorgen für eine Verengung des vertikalen Abstrahlverhalten. Durch die Überlagerung der Zweige über die Trennfrequenzen hinaus wird das Abstrahlverhalten konstant gehalten.

An den Hochtöner werden bei diesem Konzept besondere Anforderungen gestellt, da dieser keinen Partner besitzt, mit dem per Interferenz eine Verengung erzeugt werden kann. Der Hochtöner muss die notwendige Bündelung also durch seine Membrangeometrie oder einen Hornvorsatz erzeugen. Da ein Horn den Abstand der benachbarten Mitteltöner zu groß werden ließe und diverse andere Nachteile entstünden, fiel die Wahl auf einen Linienstrahler. Zur Auswahl standen diverse Magnetostaten, AMTs und Plane Wave Former aus dem PA-Bereich. Wegen des hohen Maximalpegels und der Resonanzfreiheit war ein AMT die erste Wahl.

Die Durchmesser der Treiber sind bei diesem Konzept besonders wichtig, da sie den minimalen Abstand der Treiber zueinander bestimmen. Dieser Abstand sollte möglichst gering ausfallen, um Nebenkeulen im Frequenzbereich im optimalen Fall über die Trennfrequenz hinaus zu verschieben. Diese treten auf, wenn die Wellenlänge in den Bereich des Abstands zwischen zwei Treiberzentren kommt. Nach diversen Optimierungen, die zunächst an einem einfachen Modell durchgeführt wurden, haben sich folgende Membrandurchmesser und Abstände



als guter Kompromiss herausgestellt.

	Membrangröße (cm)	Abstand der Treiberzentren (cm)
Tieftöner	20	130
Mitteltöner	10	44
Mittelhochtöner	5	24
Hochtöner	13 (Länge)	-

Abbildung 1: Optimale Membrangrößen und Abstände unter Berücksichtigung realer Treiber

Zunächst wurden linearphasige Subtraktionsfilter nach Horbach und Keele [1] eingesetzt. Dieses Filter ist speziell für Lautsprecher mit symmetrisch angeordneten Treiberpärchen entwickelt worden mit dem Ziel, ein möglichst konstantes vertikales Abstrahlverhalten zu erzeugen.

Im weiteren Verlauf der Optimierungen haben sich die Vorteile dieses Filters als zu gering herausgestellt, die vergleichsweise hohe Anzahl an notwendigen Taps dagegen als schwerwiegender Nachteil für den einzusetzenden DSP. Daher fiel die Wahl auf Linkwitz-Riley-Filter mit 24 dB/Okt (4. Ordnung). Die großen Überlappungsbereiche sind bewusst so gewählt, weil sie für eine Verstetigung des Abstrahlverhaltens sorgen. Es wurden Filter mit linearer Phase simuliert, um eine gegenseitige Beeinflussung der benachbarten Trennungen zu umgehen. Die Phasendrehungen der Treiber wurde bewusst nicht simuliert, da diese später ohnehin entzerrt werden sollten.

Weiterhin sollte der Übergang zum Hochtöner möglichst ohne Aufweitung auskommen, wodurch das Bändchen eine bestimmte Mindestlänge aufweisen musste. Das hat aber wiederum zur Folge, dass der obere Hochton stärker richtet.

Als optimale Trennfrequenzen stellten sich folgende heraus.

	Hochpass (Hz)	Tiefpass (Hz)	Oktaven
Tieftöner	90	250	1,5
Mitteltöner	250	700	1,5
Mittelhochtöner	700	1.700	1,3
Hochtöner	1.700	-	3,6

Abbildung 2: Bandbreiten der Zweige

Der Hochtöner muss die größte Bandbreite wiedergeben. Sein Hochpass ist allerdings nicht so niedrig gewählt, dass die in Frage kommenden realen Treiber Probleme verursachen würden.

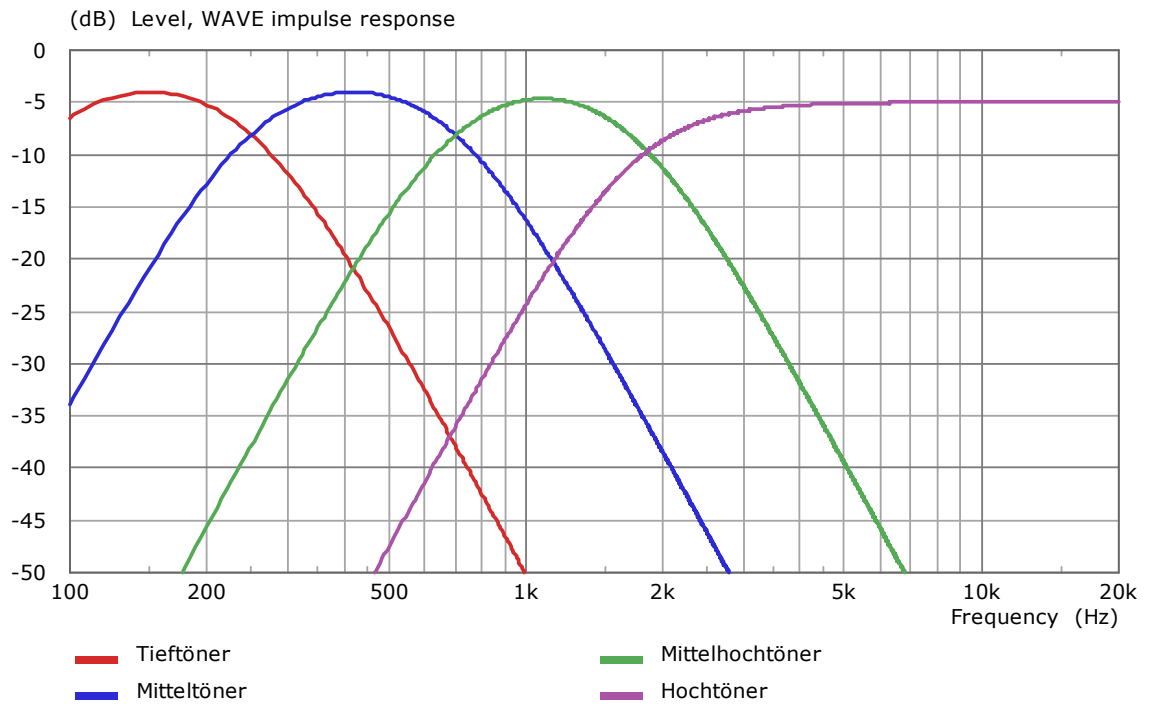


Abbildung 3: Akustische Übertragungsfunktionen der einzelnen Wege

3.2.2. Horizontal

Während das vertikale Abstrahlverhalten durch Interferenz, Abstände und Membrangröße erzeugt wird, sollte das horizontale durch eine Schallführung realisiert werden. Zunächst wurde eine einfache Schallführung ausschließlich für den Hochtöner per BEM simuliert und optimiert.

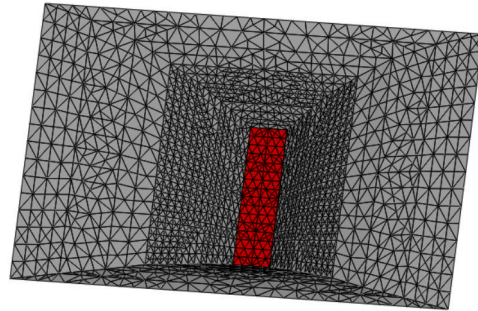


Abbildung 4: Einfaches Modell der Schallführung

Sobald die optimale Kontur für die einfache Schallführung ermittelt war, wurde ein möglichst naturgetreues 3D-Modell für den gesamten Lautsprecher erstellt und mit Hilfe des BEM-Simulators iterativ optimiert. Mitteltöner, Mittelhochtöner und Hochtöner befinden sich in derselben Schallführung. Das sorgt dafür, dass das horizontale Abstrahlverhalten frei von Sprungstellen ist und sehr stetig verläuft. Da die Schallführung wegen ihrer begrenzten Breite erst ab ca. 800 Hz zu bündeln beginnt, wurden die Tieftöner außerhalb platziert.

Die Schallführung wurde so optimiert, dass der Abstrahlwinkel bei -6 dB ca. 100° beträgt. Durch den Wandeinbau und das Wegfallen von Gehäusediffraktionen, beginnt die Bündelung erst im oberen Mittelton. Darunter funktioniert der Lautsprecher quasi als Halbraumstrahler. Die maximale Gesamtbreite von 30 cm war hierbei der limitierende Faktor.

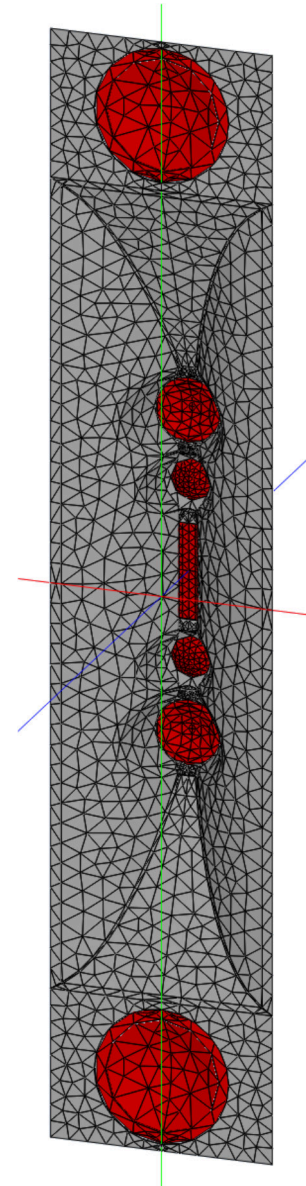


Abbildung 5: Komplexes Modell

3.2.3. Weitere Eigenschaften

Das Konzept mit vier Wegen plus Subwoofer erfüllt automatisch die restlichen akustischen Anforderungen. Da bis auf den Hochtöner jeder Treiber gedoppelt ist, steigt der Maximalpegel um 6 dB im Vergleich zu einem einzelnen Treiber pro Zweig. Das senkt gleichzeitig die nichtlinearen Verzerrungen. Der Hochtöner erfüllt diese Anforderungen durch seine sehr große Membranfläche.

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

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

3.3. Ergebnisse

Das horizontale Abstrahlverhalten geht ab ca. 1,5 kHz in ein nahezu konstantes Verhalten über.

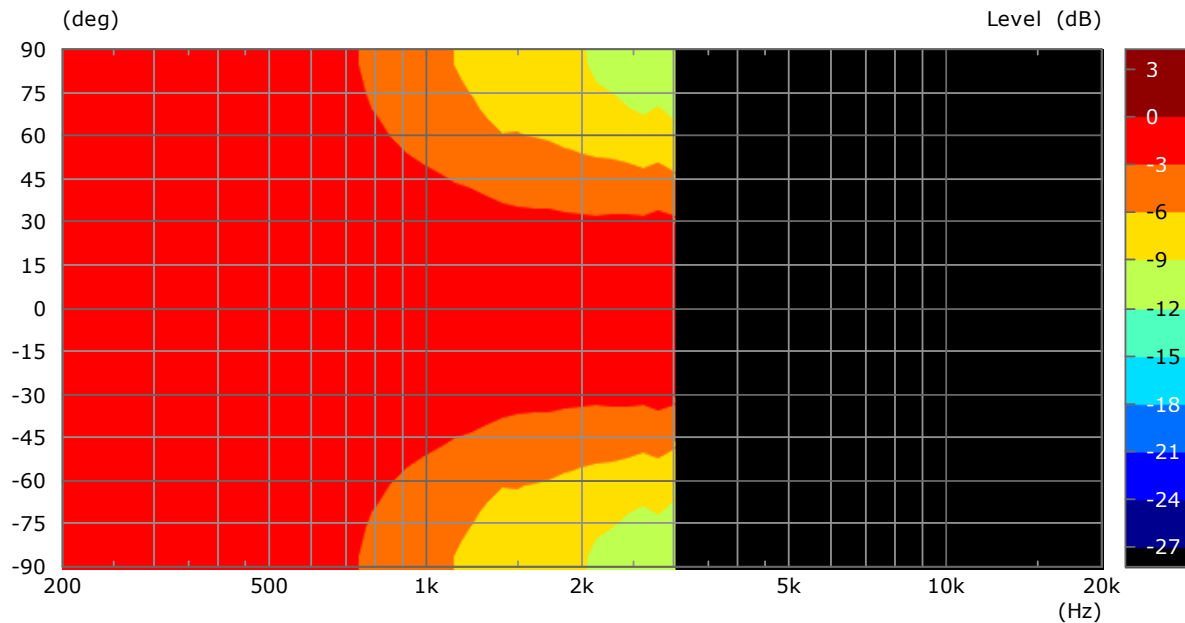


Abbildung 6: Horizontales Abstrahlverhalten der Simulation

Das vertikale Abstrahlverhalten wurde auf 50 - 60° optimiert und durch eine geschickte Wahl der Trennfrequenzen möglichst konstant geformt. Bereits ab 200 Hz erreicht die Bündelung ihren Sollwert. Leichte Nebenkeulen bleiben bei ca. 1,5 kHz.

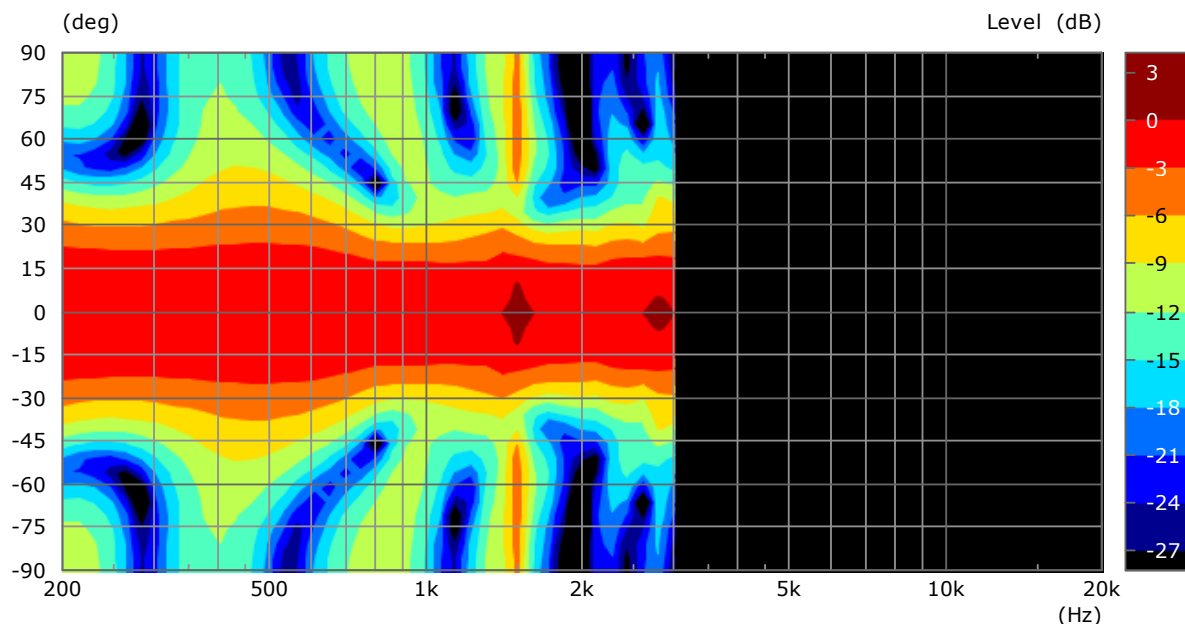


Abbildung 7: Vertikales Abstrahlverhalten der Simulation

Das diagonale Abstrahlverhalten stellt eine Mischung aus dem horizontalen und vertikalen dar. Die Nebenkeule bei 1,5 kHz ist kaum noch präsent, so dass sie später im Raum bezüglich des Diffusschalls praktisch keine Rolle spielen wird.

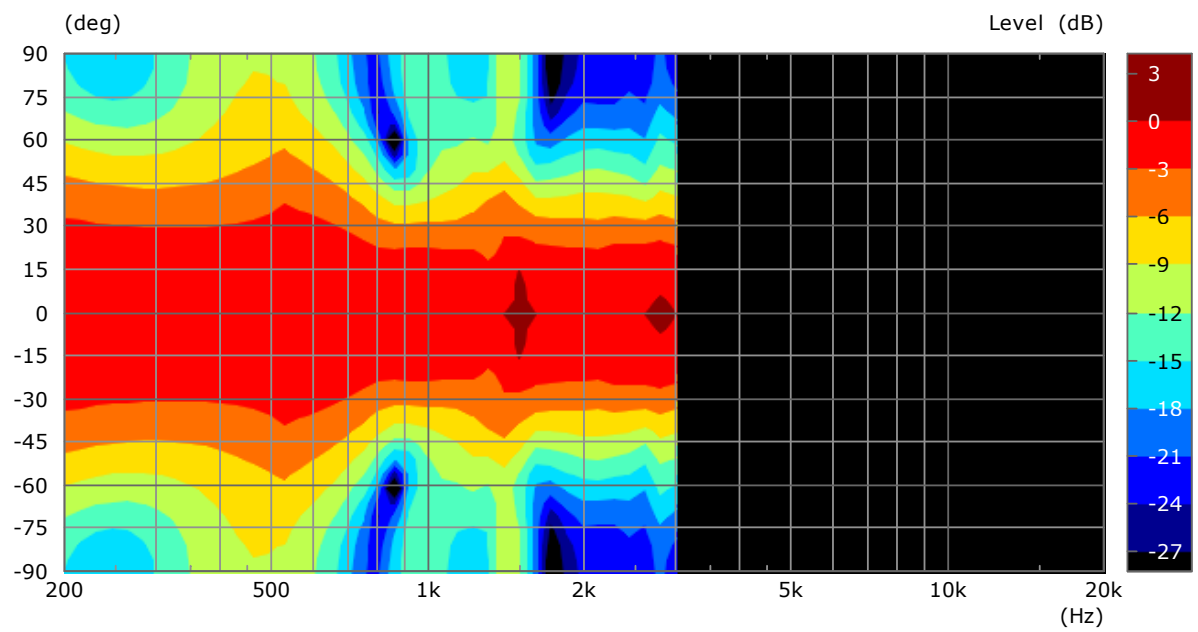


Abbildung 8: Diagonales Abstrahlverhalten der Simulation

Zusätzlich wurde der Bereich bis 10 kHz simuliert, der hier nicht abgebildet ist.

4. Prototyp

4.1. Treiber

Für den Prototypen wurden folgende Treiber ausgewählt, die wegen ihrer Maße größtenteils schon vor der rechnergestützten Optimierung festgelegt und geometrisch vermessen wurden, um eine möglichst genaue Simulation zu gewährleisten.

- Tieftöner: [B&C 8PS21](#)
- Mitteltöner: [B&C 4NDF34](#)
- Mittelhochtöner: [Morel MDM 55](#)
- Hochtöner: [Beyma TPL-150](#)



Bei den Tief- und Mitteltönern waren vor allem ein hoher Kennschalldruck, niedrige nichtlineare Verzerrungen und eine hohe Belastbarkeit Kriterien für die Auswahl, da im oberen Bassbereich und Grundton generell ein höherer Pegel im Programmmaterial vorhanden ist als im Mittel- und Hochton. Die Treiber von B&C waren bekannt bzw. wurden separat gemessen. Beide wurden in geschlossenen Gehäusen verbaut.

Der Mittelhochtöner dagegen musste besonders klein ausfallen, um den Abstand zu dem Hochtöner zu verringern. Hier fiel die Wahl auf die Morel MDM 55, die bezüglich ihrer geringen Schallwandmaße kaum Konkurrenz auf dem Markt besitzt. Weiterhin besitzt diese Kalotte gute akustische Eigenschaften wie sehr niedrige nichtlineare Verzerrungen.

Als Hochtöner wurde der Beyma TPL-150 ausgewählt, der als AMT für den PA-Bereich zu einem sehr hohen unverzerrten Schalldruck in der Lage ist und einen hohen Kennschalldruck besitzt. Die Dämpfung der Rückkammer sowie die Abdichtung wurde im späteren Verlauf zusätzlich der Entwicklung optimiert.

4.2. Konstruktion

Die Schallführung 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. In die Rückseite wurden in dem Zuge passende Fassungen für die Treiber eingelassen. Die Schallführung wurde komplett aus einem PUR-Kunststoffblock gefräst. Das hat den positiven Nebeneffekt, dass das massive Teil keine Probleme mit Resonanzen im Übertragungsbereich besitzt.

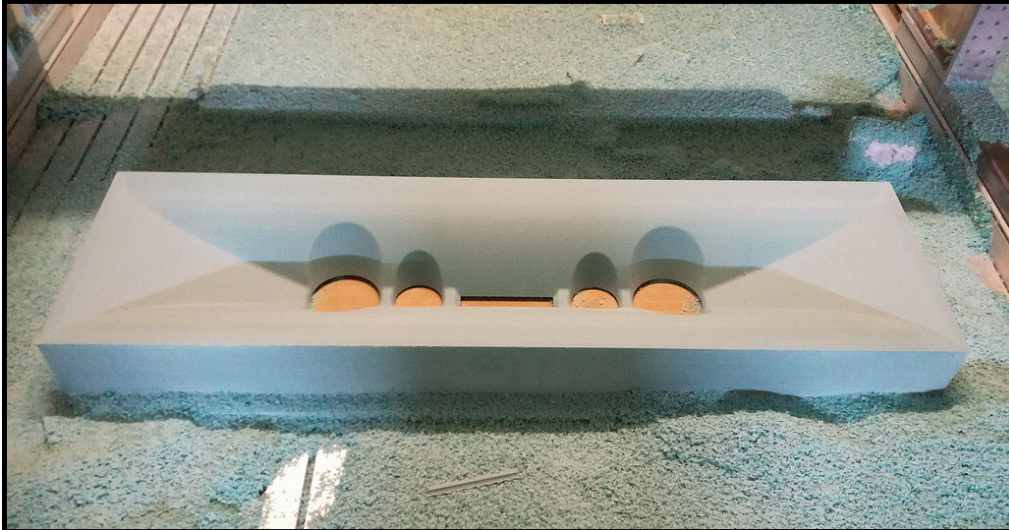


Abbildung 9: Schallführung auf der CNC-Fräse

Die Rückseite der Schallführung wurde speziell für die eingesetzten Treiber entworfen. Das Dichtband sorgt dafür, dass eine luftdichte Passung gegeben ist. Die metrischen Gewindebuchsen für die Schrauben wurden direkt in die Schallführung integriert.



Abbildung 10: Rückseite der Schallführung



Da der AMT eine zu breite horizontale schallabstrahlende Fläche besitzt und damit der Hochton zu stark bündelt, wurde der Mund der Schallführung speziell optimiert und verkleinert. Damit diese Verjüngung stetig vonstattengeht und Hohlraumresonanzen abgeschwächt werden, wurden Stege in die Front des AMT eingelassen, die einen per BEM optimierten Winkel besitzen. Die Frontplatte des AMT ist mehrere Millimeter dick, so dass genug Höhe vorhanden war, um die Membran nicht zu



berühren. Das Schutzgitter musste entfernt werden.

Die Treiber wurden mit einem definierten Drehmoment befestigt. Sowohl die Tieftöner- als auch beide Mitteltönerpaare wurden parallel verschaltet. Die Impedanz sinkt somit auf moderate 4Ω . Die Kabel wurden mit Kabelbinder fixiert.

Für die Adern des Multicore-Kabels wurde in der Schallführung eine Aussparung vorgesehen. In dieser wurden die Adern mit Heißkleber fixiert und die ganze Front mit Dichtband versehen.

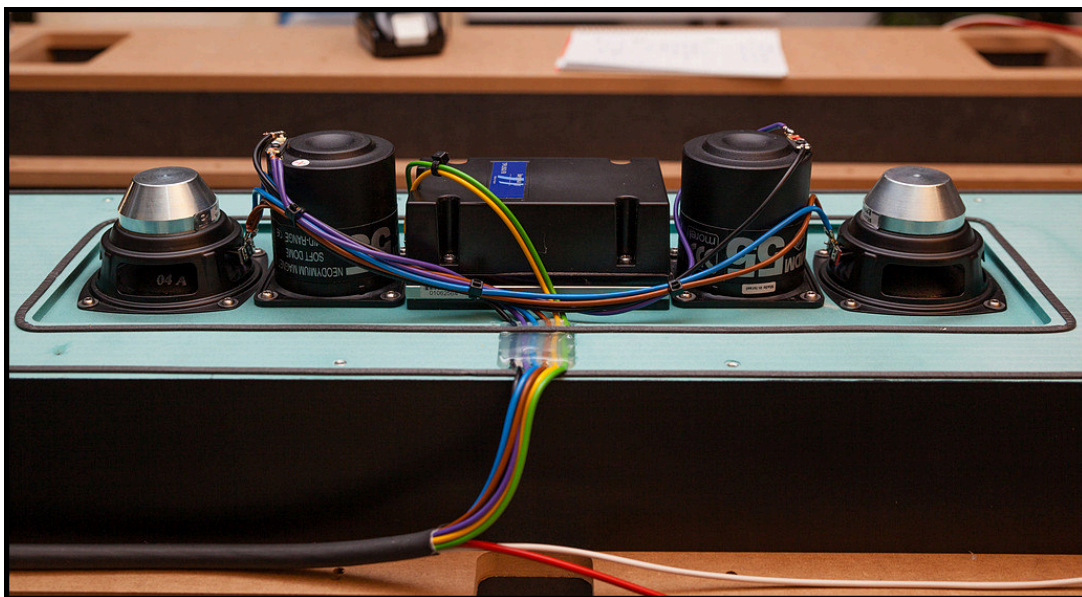


Abbildung 11: Verkabelung der Mittelhoctoneinheit

Das Multicore-Kabel endet an einem 8-poligen speakOn-Stecker. Da es sich um ein 4-Wege-System handelt, werden alle Kontakte benötigt.

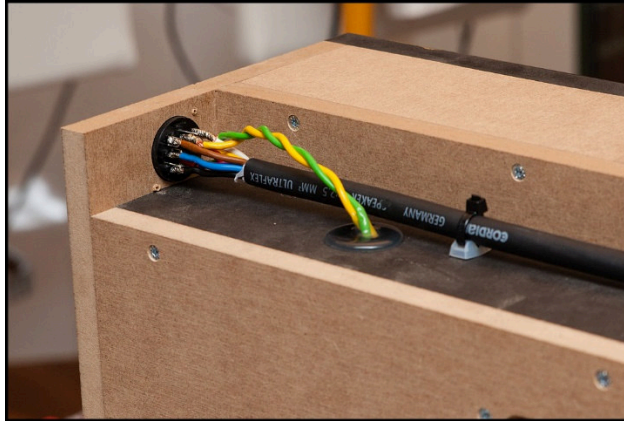


Abbildung 12: 8-polige speakOn-Buchse

Die Gehäuse von Tief- und Mitteltöner wurden mit Iso Bond gefüllt, so dass Resonanzen ausreichend bedämpft sind.

4.3. Messungen

Da der Lautsprecher später in eine Baffle Wall integriert wird, mussten für die Messungen Halbraumbedingungen geschaffen werden. Dafür wurde der Lautsprecher eingegraben und die schallharte Fläche mit Brettern erweitert.



Abbildung 13: Lautsprecher wird eingegraben



Abbildung 14: Messaufbau für Winkelmessungen

4.3.1. Amplituden- und Phasengang

Zunächst wurden die einzelnen Wege ohne Filter und mit derselben Klemmenspannung (2,8 V) gemessen. Im nächsten Schritt wurden die Zweige einzeln per IIR-Filter auf die Zielfunktion entzerrt und die Trennfrequenzen gesetzt. Dabei wurden fallende Flanken der Treiber ausgenutzt.

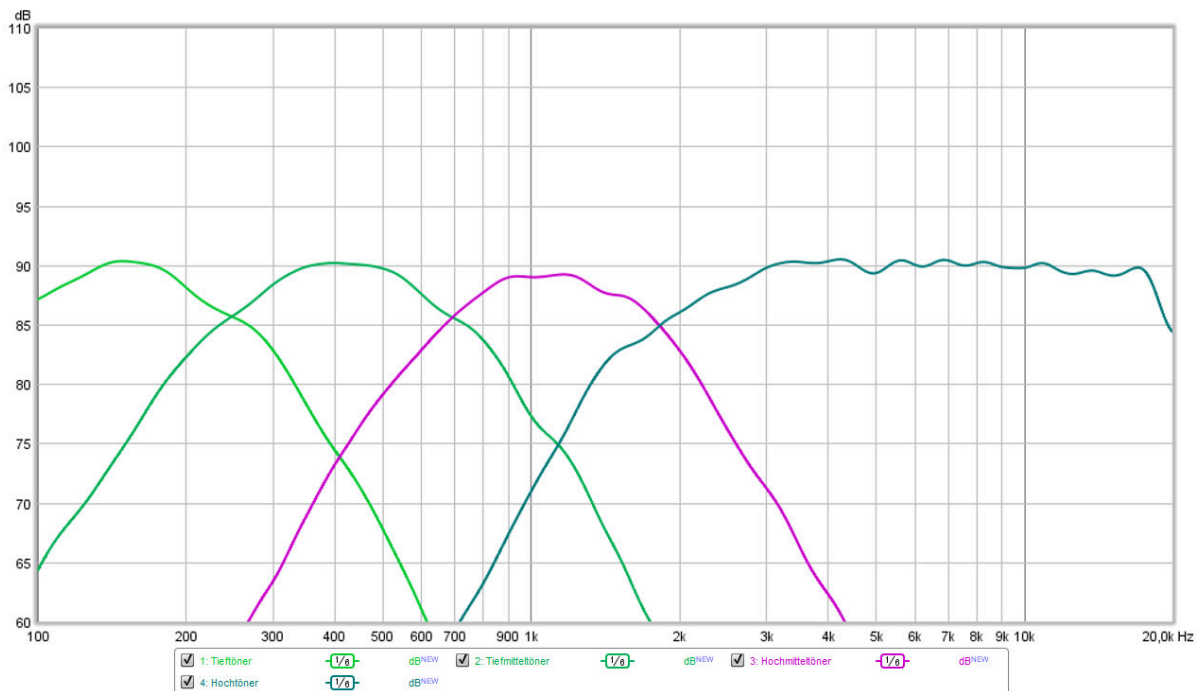


Abbildung 15: Amplitudengänge der einzelnen Wege mit Entzerrung und Filterfunktionen

Da sich die Trennfrequenz sehr dicht beieinander befinden und sich somit gegenseitig im Phasengang beeinflussen, wurden FIR-Filter generiert, die die Phasenverzerrungen kompensieren. Dadurch wird eine *rein konstruktive* Addition aller Zweige auf Achse gewährleistet, was durch die großen Überlappungsbereiche besonders wichtig ist.

Weiterhin besitzt der gesamte Lautsprecher einen konstanten Phasengang und damit auch eine konstante Gruppenlaufzeit, die der Summe der Verzögerungen der FIR-Filter und des DSPs entspricht. Da per FIR nur die Phase entzerrt wird und nicht der Amplitudengang, reichen bereits 1024 Taps bei einer Abtastrate von 48 kHz aus, was die Zeitverzögerung des Filters mit ca. 11 ms relativ niedrig hält.

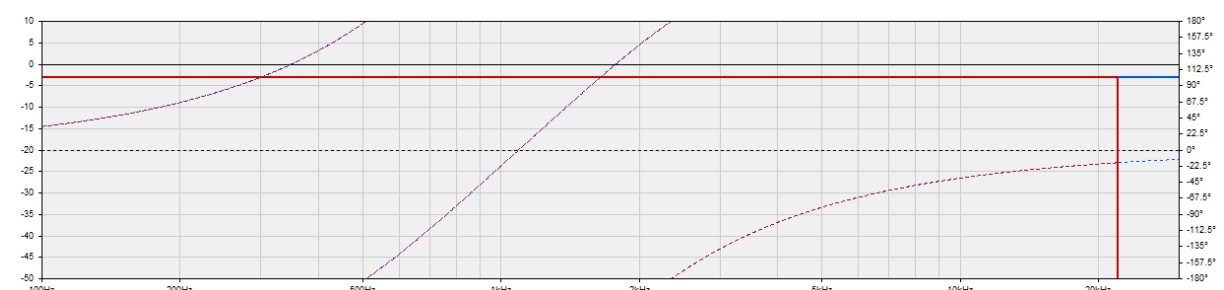


Abbildung 16: FIR-Filter zur Entzerrung des Phasengangs für den Hochmittöner

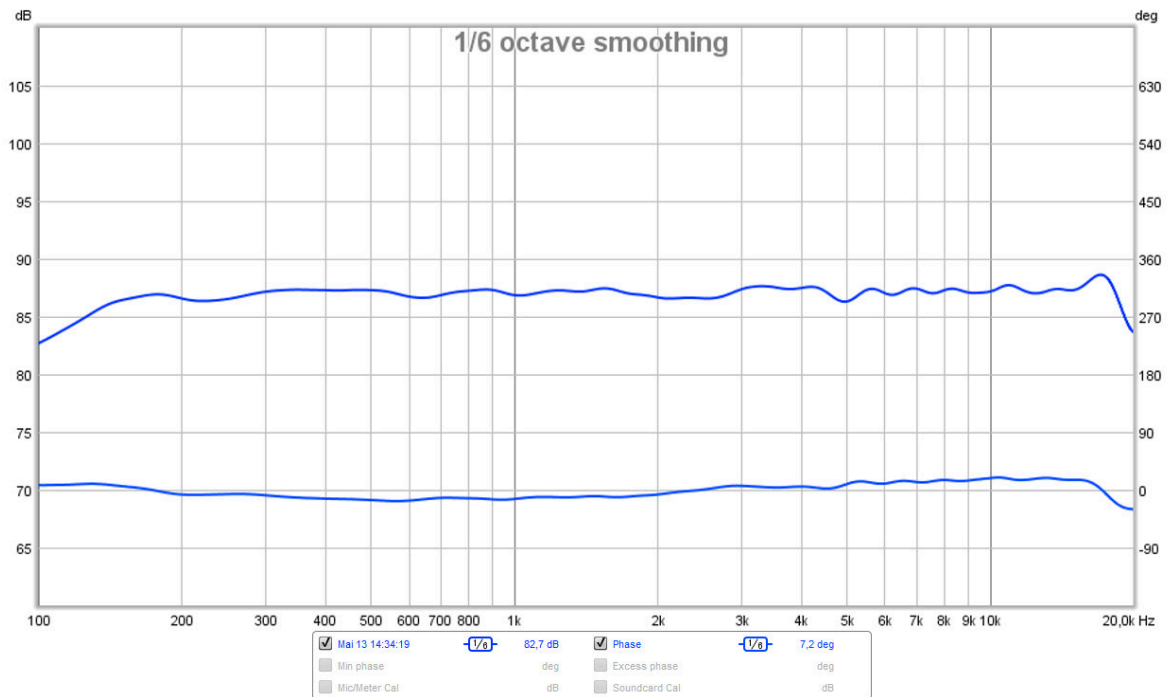


Abbildung 17: Amplituden- und Phasengang für den kompletten Lautsprecher

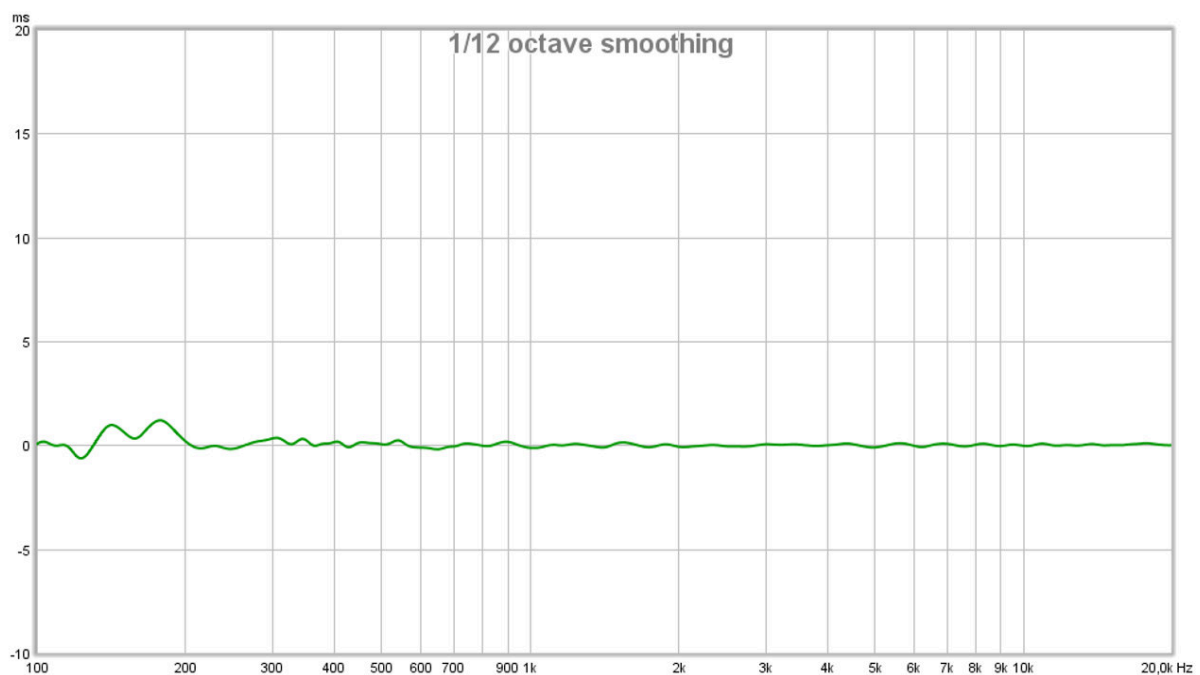


Abbildung 18: Gruppenlaufzeitverzerrungen abzüglich der Laufzeit des FIR-Filters und des DSPs

4.3.2. Nichtlineare Verzerrungen

Die nichtlinearen Verzerrungen bleiben bei 100 dB nahezu im gesamten Bereich weit unter 1 %. Der kritische Mittelton fällt mit weniger als 0,2 % sogar äußerst niedrig aus. Selbst bei 110 dB bleibt der Mittelton weit unter 1 %. Im Grund- und Hochton steigt K2 auf ca. 2 %, was immer noch ein sehr guter Wert ist.

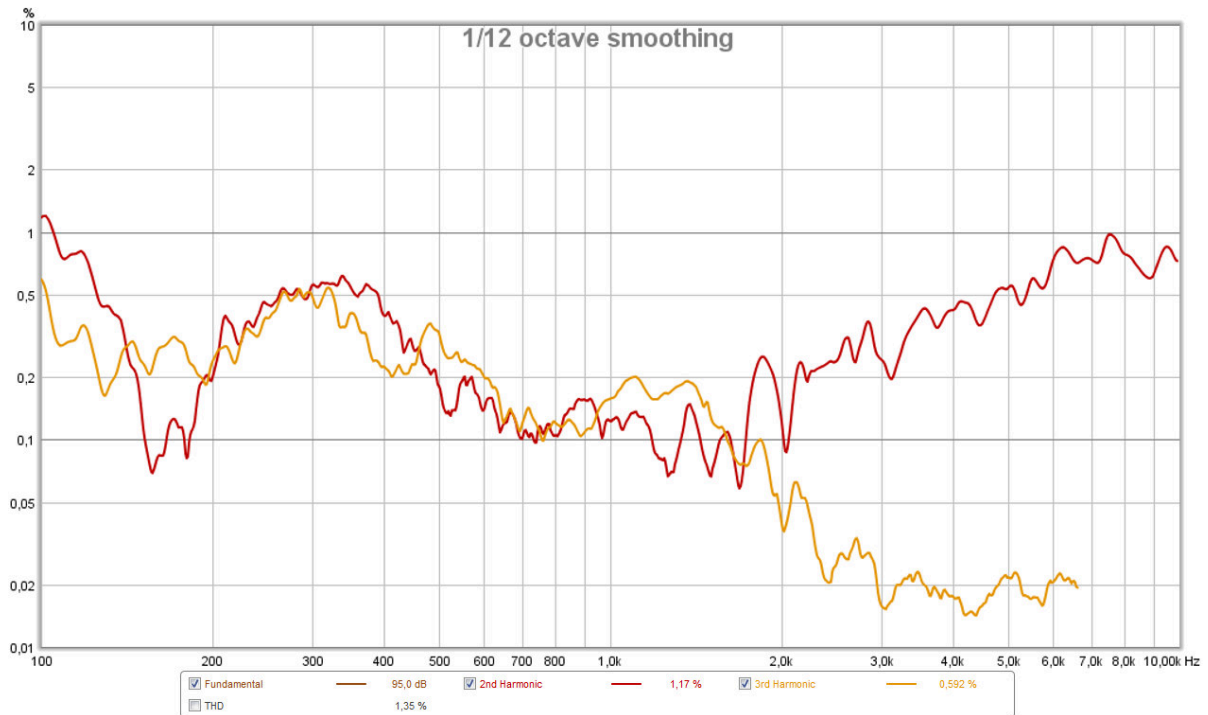


Abbildung 19: Nichtlineare Verzerrungen bei 100 dB

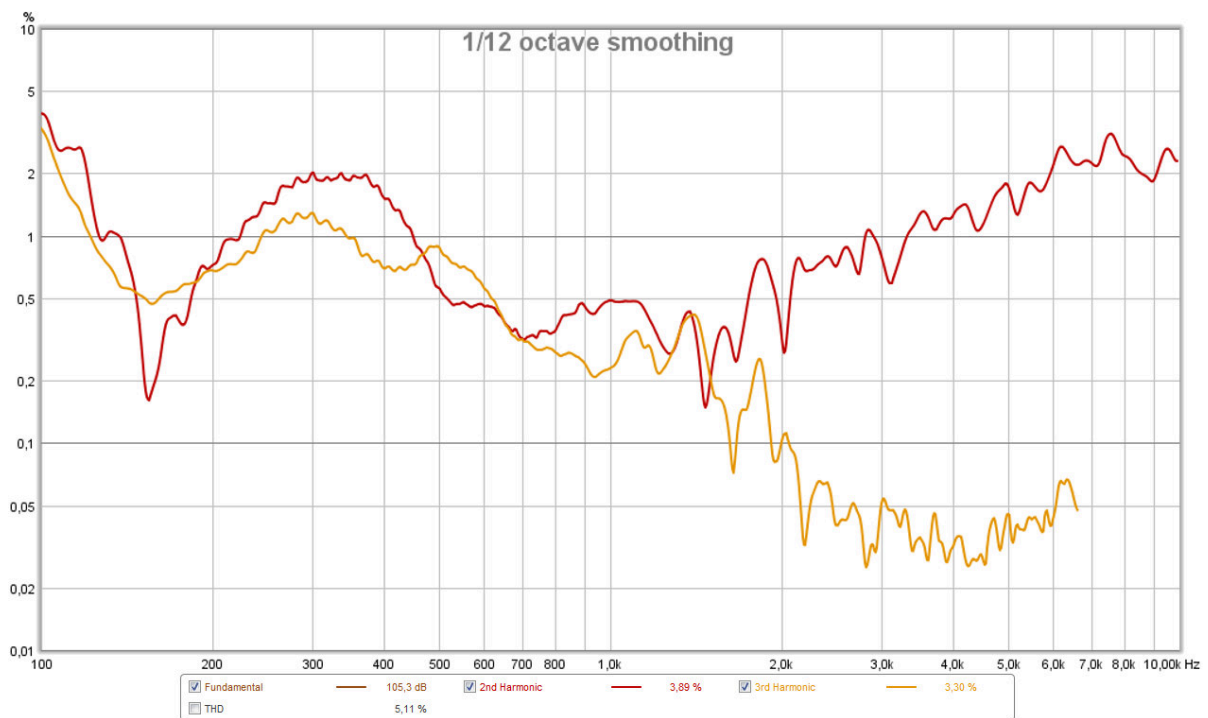


Abbildung 20: Nichtlineare Verzerrungen bei 110 dB

4.3.3. Zerfallsspektrum

Das Zerfallsspektrum zeigt keinerlei Resonanzen im Übertragungsbereich. Es sind allerdings schwache Reflexionen der Messanordnung sichtbar.

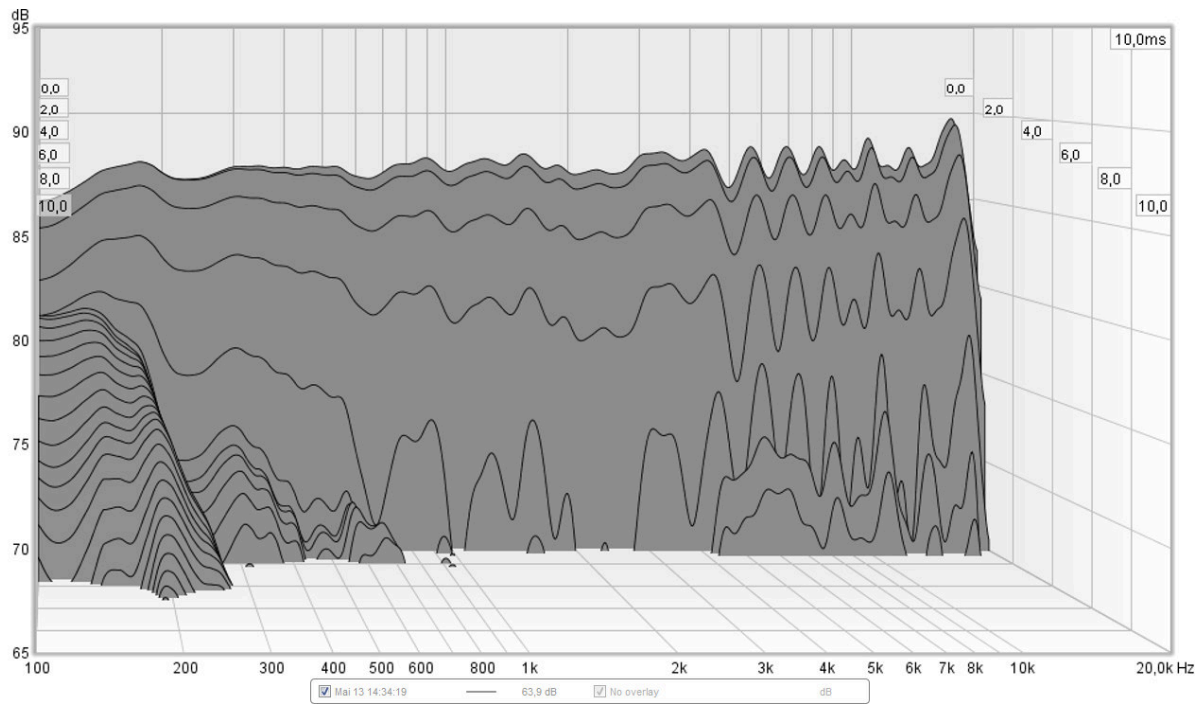


Abbildung 21: Zerfallsspektrum

4.3.4. Abstrahlverhalten

Beim horizontalen Abstrahlverhalten zeigen sich keine negativen Überraschungen. Der Hochtön über 10 kHz ist dagegen besser als erwartet. Da der Hochtöner im Gegensatz zu der Simulation kein perfektes Verhalten aufweist, war eine Simulation nur eingeschränkt möglich.

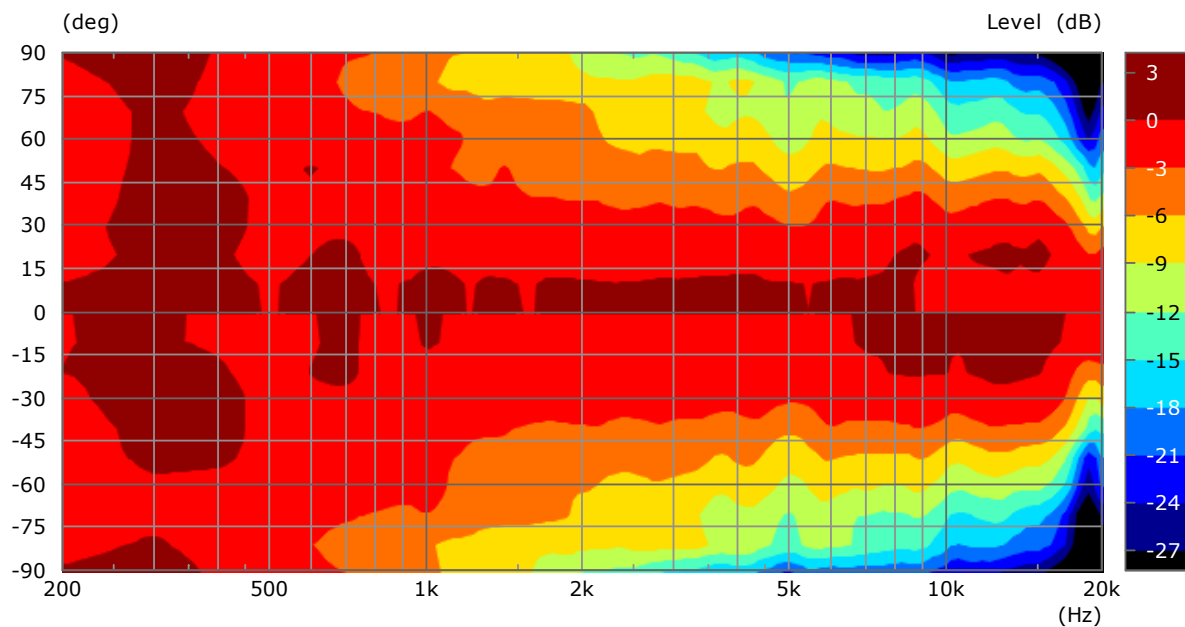


Abbildung 22: Horizontales Abstrahlverhalten des Prototyps (Glättung: 1/6 Oktave)

Auch das vertikale Abstrahlverhalten verhält sich sehr ähnlich wie in der Simulation, verläuft jedoch etwas stetiger. Die Nebenkeulen bei 1,5 kHz fallen im Pegel etwas geringer aus, was positiv hervorzuheben ist.

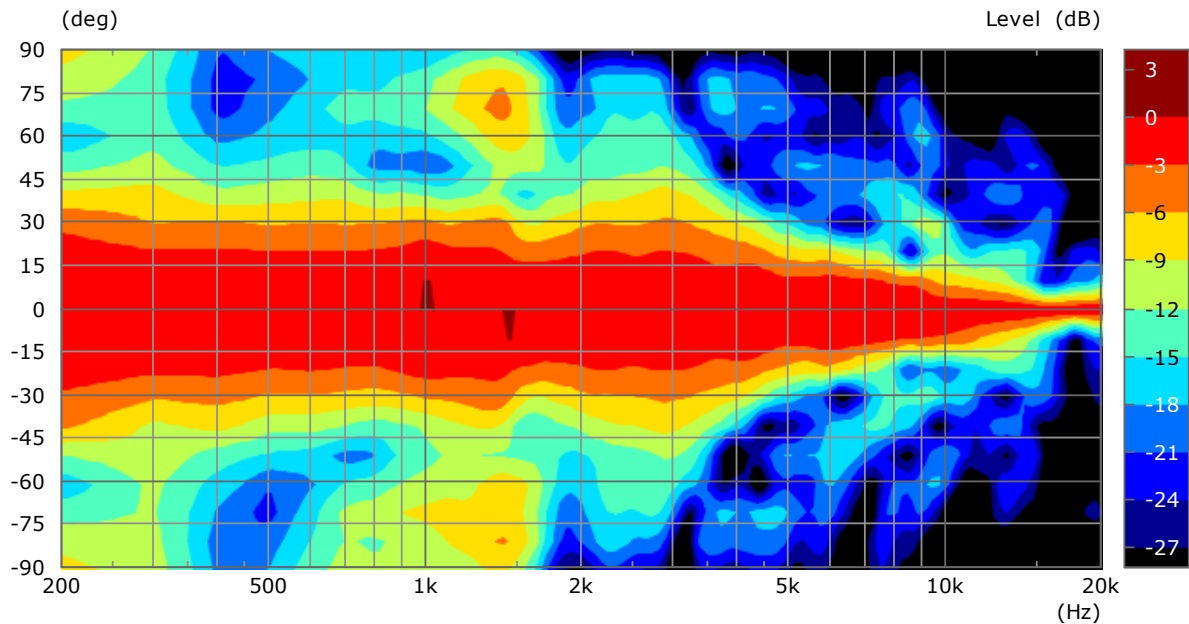


Abbildung 23 Vertikales Abstrahlverhalten des Prototyps (Glättung: 1/6 Oktave)

Um das Energieverhalten konsolidiert zu betrachten, wurde das Bündelungsmaß [2] für den horizontalen und vertikalen Halbzylinder errechnet. Hierbei geht jeder Winkel gleich gewichtet in die Summe aller gemessenen Schalldruckpegel ein und letztere wird auf 0° bezogen. Das Bündelungsmaß stellt somit eine Kurve dar, die das normierte Sonogramm auf eine einzelne Kurve reduziert.

Das vertikale Bündelungsmaß zeigt die Nebenkeulen bei 1,5 kHz mit einem Einbruch von 1,5 dB. Ansonsten zeigt es den bündelungsbedingten Anstieg durch den AMT ab ca. 4 kHz.

Das horizontale Bündelungsmaß verläuft zwischen 2 kHz mit einer Welligkeit von ca. +/- 0,5 dB und steigt erst ab ca. 16 kHz an.

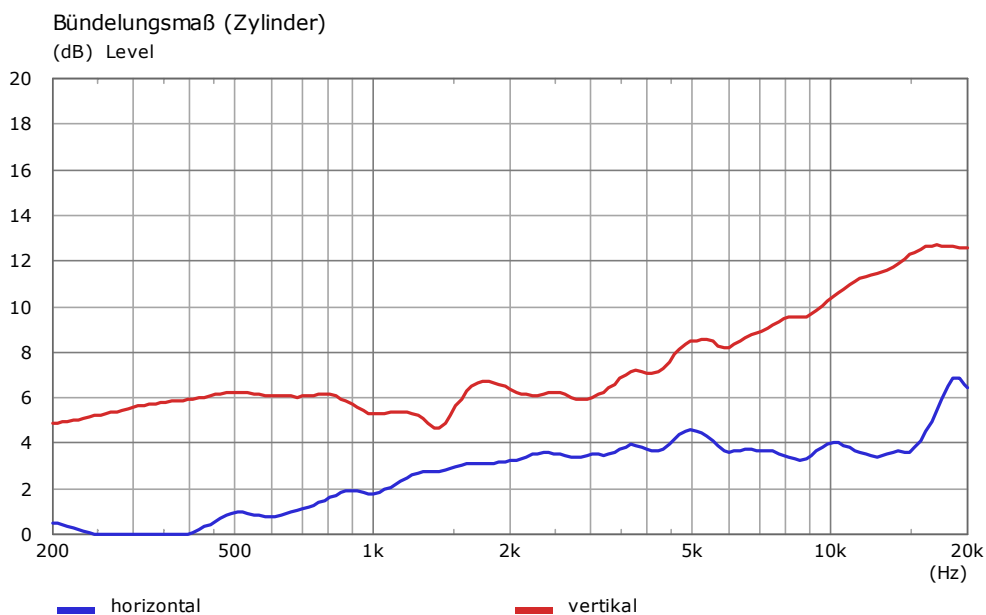


Abbildung 24: Zylinderbezogenes Bündelungsmaß

Zusätzlich wurde das halbkugelbezogene Bündelungsmaß [2] aus den horizontalen und vertikalen Winkelmessungen errechnet. Es stellt eine Approximation dar, bei der die einzelnen Winkel so gewichtet werden, dass die zu betrachtende Fläche eine Halbkugel darstellt. Das heißt, dass größere Winkel stärker in die Summe aller Schalldruckpegel eingehen als kleinere. Auch hierbei wird die Summe aller Schalldruckpegel auf den Schalldruckpegel bei 0° bezogen.

Das halbkugelbezogene Bündelungsmaß steigt stetig an und ist praktisch frei von Sprungstellen. Der Anstieg ab ca. 1,5 kHz hat seine Ursache in der horizontalen Bündelung, die erst dort einsetzt. Der zusätzliche Anstieg ab ca. 5 kHz wird durch die vertikale Bündelung des Hochtöners erzeugt. Die vertikale Nebenkeule bei 1,5 kHz ist kaum sichtbar. Sie beeinflusst den Gesamtenergiefrequenzgang also praktisch nicht.

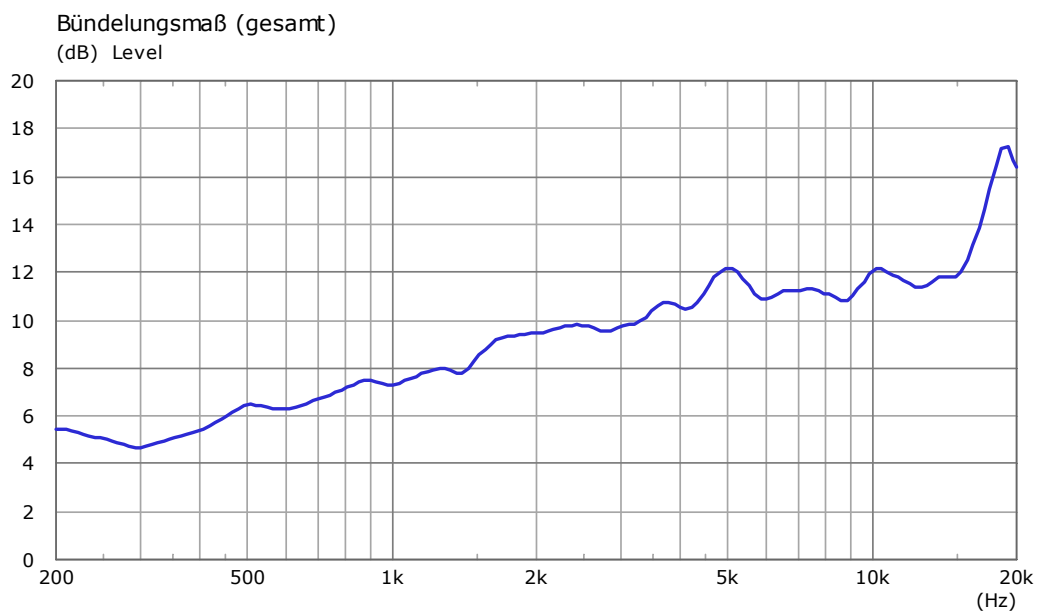


Abbildung 25: Halbkugelbezogenes Bündelungsmaß

5. Endprodukt

Der Prototyp erfüllte messtechnisch die Erwartungen und übertraf sie teilweise. Das ist unter anderem der zeitintensiven Optimierung per BEM-Simulation zu verdanken. Es wurden keine weiteren Änderungen an dem Konzept vorgenommen, so dass sechs weitere Exemplare gebaut und installiert wurden.

Die Schallführung wurde mattschwarz gefärbt, um hinter der akustisch transparenten Leinwand möglichst wenig Lichtreflexionen zu verursachen.



Abbildung 26: Drei fertige Exemplare der Aries M

6. Technische Daten

Freifeldübertragungsmaß:	130 – 19.000 Hz ($\pm 1,5$ dB)
Abstrahlwinkel horizontal:	100 ° (> 2 kHz)
Abstrahlwinkel vertikal:	60° (200 – 3000 Hz)
Klirrfaktor:	< 0,2 % bei 1 kHz und 100 dB
Verzögerung:	11,4 ms (DSP + FIR-Filter)
Akustisches Zentrum:	halbe Höhe/Breite, frequenzneutral
Tieftöner:	2 x 200 mm
Mitteltöner:	2 x 100 mm
Mittelhochtüner:	2 x 50 mm
Hochtöner:	130 mm Länge
Trennfrequenzen:	250, 700, 1700
	linearphasige FIR-Filter mit 24 dB/Okt
Schallführung:	CNC-gefräst aus PUR
	BEM-optimierte Kontur
Aufstellungsart:	Wandeinbau
Abmessungen:	158 x 30 x 20 cm (H x B x T)
Gewicht:	42 kg

7. 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*](#)