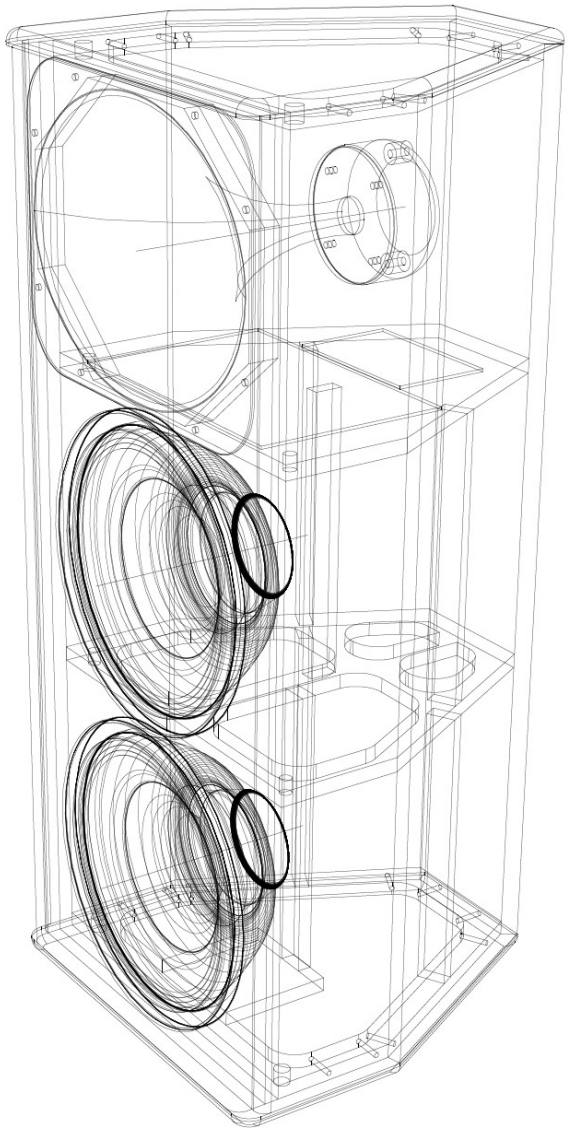
Dokumentation zum Projekt „PAF212"
von www.pa-forum.de

Entwicklung eines 2x12"/1,4" Direktstrahler-Topteils



Fabian Reimann, Semiramisstraße 1, 13089 Berlin

1. Auflage April 2008, Berlin/ Halle
Alle Rechte vorbehalten.

fon 1: +49 30 47 30 94 51
fon 2: +49 179 361 82 87

email: reimann@hr-systems.biz
www.hr-systems.biz

Inhaltsverzeichnis

1.	**Einleitung**	**3**
2.	**Aufgabenstellung**	**4**
3.	**Vorgehensweise**	**5**
	3.1 Das Prototypengehäuse	**5**
4.	**Messungen und Selektion**	**9**
	4.1 Messbedingungen und -technik	**9**
	4.2 Vergleichsmessungen der Hochtontreiber und -hörner	**10**
	4.2.1 Phase I – erste Orientierung	**11**
	4.2.2 Phase II – erweitertes Testfeld	**14**
	4.2.3 Kritik und Ergebnisse	**29**
	4.3 Vergleichsmessungen der Tiefmitteltöner	**29**
	4.3.1 Phase I - Abstrahlungen	**31**
	4.3.2 Phase II – vollständige Vermessung	**34**
	4.3.3 Kritik und Ergebnisse	**42**
5.	**Frequenzweichenentwicklung**	**43**
	5.1 Erste Version	**43**
	5.2 Zweite Version mit passivem Allpassfilter	**51**
	5.2.1 Abstrahlungen	**58**
	5.3 Kritik und Ergebnisse	**61**
6.	**Fazit**	**62**
7.	**Spender- und Dankesliste**	**63**
8.	**Links**	**64**
9.	**Literaturverzeichnis**	**65**

Anhang

a.	**dreidimensionale Visualisierungen**	**66**
b.	**Zuschnitt**	**70**
c.	**Aufbauhinweise**	**71**
d.	**Kurzdatenblatt PAF212**	**74**

1. Einleitung

Internetforen finden sich in der aktuellen Medien- und Informationswelt wie Sand am Meer. Für beinahe jedes Spezialinteresse bietet die virtuelle Landschaft eine passende Nische – so tauschen sich Veterinäre über künstliche Hüftgelenke für den Hund, Politikwissenschaftler über die Wiederwahl Silvio Berlusconis und Lautsprecherentwickler über die Zerfallsspektren bestimmter Membranmaterialien aus.

Diese vermeintliche Überspezialisierung schafft für den Außenstehenden teilweise ein befremdliches Bild, dem er amüsiert-zurückhaltend mit hochgezogener Augenbraue schon nach kurzer Zeit den Rücken wendet.
Bestärkt wird diese Reaktion häufig durch Begleiterscheinungen dieses Zusammentreffens der Spezialisten bzw. jener, die sich dafür halten. Ausgiebige Diskussionen in der Sache werden dort durch den Schutz der Anonymität schnell persönlich und mit bemerkenswerter Intensität geführt, da Folgen für das reale Sozialleben selten zu befürchten sind.

Beinahe schon erstaunlich scheint es da, wenn es innerhalb eines solchen Diskussionsforums tatsächlich geschafft wird, die üblichen sozialen Schmähungen und fachlich unterlegten Sticheleien für einen Moment auszuschalten und ein gemeinsames Projekt in Angriff zu nehmen.
Erstaunlich deshalb, weil grade in den professionellen und semiprofessionellen Audioforen trotz des oftmals alltäglichen Zugriffs der Nutzer auf diese Plattformen explizite Gruppenbildungen und -bindungen eher selten zu sein scheinen.

Sinn und Zweck der vorliegenden Dokumentation soll es daher sein, das im Zeitraum von Mitte Juli 2007 bis Ende April 2008 auf der Internetplattform www.paforum.de im Unterforum „Selbstbau" erarbeitete Projekt aufzuarbeiten und zusammenzufassen.

Dazu sollen Überlegungen zur Zielvorgabe des Projektes angestellt werden sowie die messtechnische Vorgehensweise zur schlussendlichen Auswahl der Komponenten genau geschildert werden. Ein wesentlicher Teil soll sich darüber hinaus mit der Entwicklung der passiven Filterschaltung beschäftigen.
Abschließend wird die Dokumentation neben einer allgemeinen Bewertung bzw. Problematisierung der Ergebnisse auch einen Vergleich mit ihren Zielstellungen beinhalten.
Zudem soll sie vollständige Gehäusebaupläne und -visualisierungen enthalten, die den Nachbau ermöglichen.

2. Aufgabenstellung

Ziel des Projektes sollte die Entwicklung eines Beschallungslautsprechers gehobener Qualität mit breitem Anwendungsspektrum und zeitgemäßen Ausstattungsmerkmalen sein. Hierfür sollte ein öffentlich zugänglicher Plan erstellt werden, der es den Forumsmitgliedern ermöglichen sollte, den Lautsprecher nach Abschluss der Entwicklung nachzubauen und für eigene (Beschallungs-)Zwecke zu verwenden.
Unter dieser Zielstellung zeichnete sich ein recht breites Aufgabenfeld ab, deren Anteile sich im Idealfall gleichmäßig auf eine gewisse Anzahl von sich freiwillig Beteiligenden verteilen sollten, die sich ihren Ressourcen entsprechend einbringen, um das gesteckte Ziel zu erreichen.
Dazu gehören in diesem Zusammenhang nicht nur die Beratungs- und Bewertungsarbeit durch „fernmündliche" Beteiligung im Forum selbst, sondern auch das Stiften der benötigten Testmaterialien.

Zu Beginn des Projektes wurde, auf Grundlage vorangegangener Diskussionen, zunächst die Größenordnung des Lautsprechers festgelegt.
Dieser sollte mit zwei 12"-Tiefmitteltönern und einem leistungsfähigen Hochtöner bestückt werden. Für den unteren Frequenzbereich war somit eine Vorentscheidung, die Membrangröße betreffend, gefallen. Im Gegensatz dazu sollte für den Hochtonbereich noch eine Wahl für ein konkretes Modell zu treffen sein.
Da der Lautsprecher für Beschallungszwecke entwickelt werden sollte, standen darüber hinaus folgende Punkte auf der Vorgabenliste:

- hohe Empfindlichkeit und hoher maximaler Schalldruck
- geringes Gewicht und kompaktes Gehäuse
- zeitgemäße Bestückung
- Nachbausicherheit durch langfristig verfügbare Komponenten
- Abstrahlung mit nominellen 60° horizontal/ 40° vertikal
- hohe Reichweite durch Zeilenanordnung der Tiefmitteltöner
- Einsetzbarkeit von zwei Stück nebeneinander für gesteigerten Pegel und breitere Abdeckung der zu beschallenden Fläche

Einsetzbar sollte die Box in folgenden Größenordnungen sein, die häufiges Arbeitsgebiet für professionelle Beschaller sind:

- einzeln: Sidefill auf kleinen Bühnen; DJ-Monitoring
- einzeln mit Subunterstützung: FOH-Anwendung bis 500 Personen, Sidefill auf mittleren Bühnen
- paarweise mit Subunterstützung: FOH-Anwendung für 750-1000 Personen, Sidefill auf großen Bühnen

Letztere Angaben sind stark relativ zu sehen. Sie beziehen sich lediglich auf die subjektiven, generalisierten Erfahrungen des Autors und können, je nach praktischer Anforderung an die Umgebung, die Personenzahl und an das zu übertragende Musikmaterial wesentlich abweichen.

3. Vorgehensweise

Unter diesen Zielvorgaben war es zunächst nötig, sich einen Überblick über die aktuell am Markt befindlichen Tiefmitteltonchassis, Hochtontreiber und -hörner zu verschaffen.
Diese wurden anfangs nicht nach vorher aufgelisteten Kriterien selektiert, sondern in einem mehr oder weniger „kreativen Prozess" durch die Forumsmitglieder vorgeschlagen. Bevorzugt wurden dabei Chassis genannt, die entweder aus den eigenen Erfahrungen heraus für tauglich befunden wurden, oder die bekanntermaßen in angesehenen Industrieprodukten verwendet werden. Teilweise wurden hierzu Datenblattangaben der jeweiligen Hersteller herangezogen.
Schnell wurde jedoch klar, dass diese Prospekte allein keine ausreichende Basis für eine Vergleichbarkeit darstellen, so dass eine messtechnische Untersuchung der jeweiligen Objekte unter

- tatsächlich vergleichbaren und
- auf das spezielle Erkenntnisinteresse hin ausgerichteten Bedingungen,

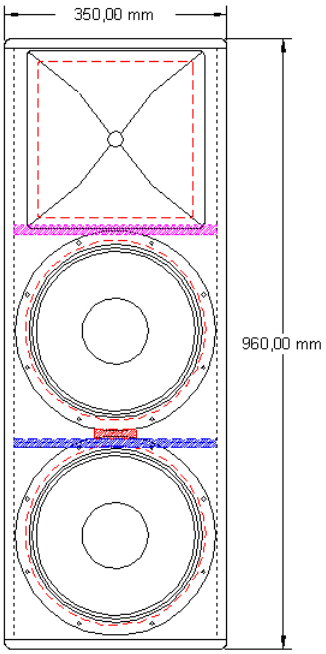
der nächste logische Schritt zu sein schien.

Am Ende soll dabei eine ausreichend große Datenmenge zur Verfügung stehen, die nach objektiven Kriterien eine relative Pro-/ Contra-Abwägung für jedes einzelne Testobjekt ermöglichen soll.
Der Nebeneffekt dieser rein objektiven Betrachtung ist, dass durch zentrales zur Verfügung stellen der gesammelten Daten im Forum die nötige Bewertungsarbeit auch gemeinsam vorgenommen werden kann.

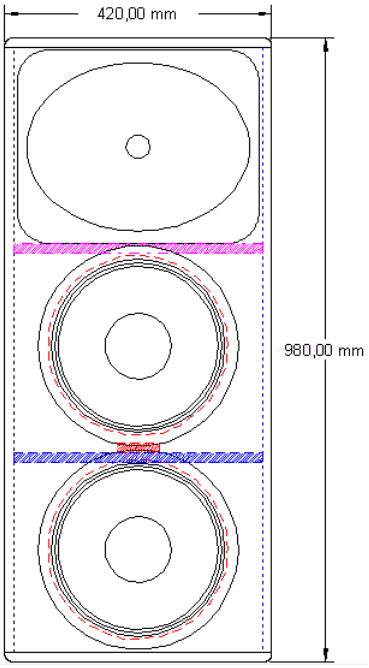
3.1 Das Prototypengehäuse

Bei der Entwicklung eines Lautsprechers kommt man im Allgemeinen um den frühzeitigen Bau eines Prototypengehäuses nicht herum.
Zumindest für den Vergleich der Tiefmitteltonchassis wäre ein Vergleich ohne ein Testgehäuse schlicht unmöglich, weil sich die Membranen sonst dem akustischen Kurzschluss gegenüber gesehen hätten und im unteren Mittel- und im Grundton nicht belastbar gewesen wären. Für die Hochtontreiber der anvisierten Zielgruppe wäre ein solcher Test aber mit vergleichsweise geringen Einschränkungen noch möglich gewesen.
Das Prototypengehäuse dient aber darüber hinaus auch zur Festlegung der akustischen Zentren der einzelnen Lautsprecher, was in einem späteren Teil dieser Dokumentation noch einmal näher zur Sprache kommen soll.

Im konkreten Fall wurden vom Autor zunächst zwei Vorschläge für ein solches Gehäuse unterbreitet, die sich maßgeblich durch die Wahl des Hochtonhorns und damit wesentlich in ihrer Gehäusebreite und -höhe unterschieden.



- Prototyp #1
- 2x12"-Tiefmitteltöner
- 1x HK-Horn (Hersteller: AdamHall, Modell LHBRC60HK) mit 1"-Hals
- 1x 1"-Treiber
- schmale Silhouette, kompakte Bauform (Außenmaße vorne = 360 x 960mm)



- Prototyp #2
- 2x12"-Tiefmitteltöner
- 1x Horn 18Sound XT1464 mit 1,4"-Hals
- 1x 1,4"-Treiber
- recht breites Gehäuse (Außenmaße vorne = 420 x 980mm)

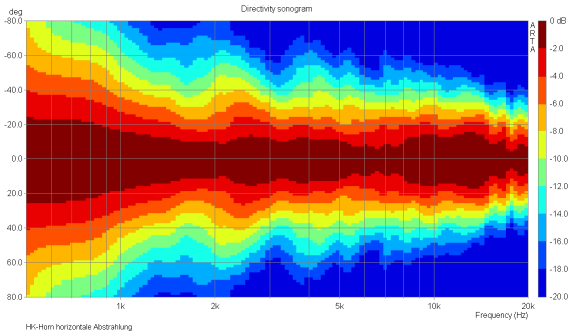
In der Folge wurden diese Vorschläge diskutiert, wobei sich die Erwägungen nicht nur auf Gehäusedesign und Transportaspekte beschränkten, sondern auch die technischen Eigenschaften der verschiedenen Hochtonhörner berücksichtigten, da ja schließlich durch diese die groben Formen für die Gehäuse vorgegeben wurden.
So wurde angemerkt, dass das HK-Horn gegenüber dem Modell von 18Sound eine bis an die obere Hörgrenze reichende, konstante Abstrahlung bietet, im Gegensatz dazu aber mit einer gewissen Welligkeit neben der Achse reagiert, was beim 18Sound-Horn nicht zu beobachten sei. Dort verlaufen die Isobaren recht gleichmäßig; die leichte Einengung in der Abstrahlung zu den höchsten Frequenzen hin sei für den Betrieb von mehreren Topteilen im „Cluster" nebeneinander eher als vorteilhaft zu betrachten.
Für den ersten Gehäuseentwurf wurde darüber hinaus gesagt, dass dieser aufgrund eines ungünstigen Verhältnisses von Breite zu Höhe mit großer Wahrscheinlichkeit in der Praxis relativ „kippelig" wäre. Der vermeintliche praktische Vorteil des geringeren

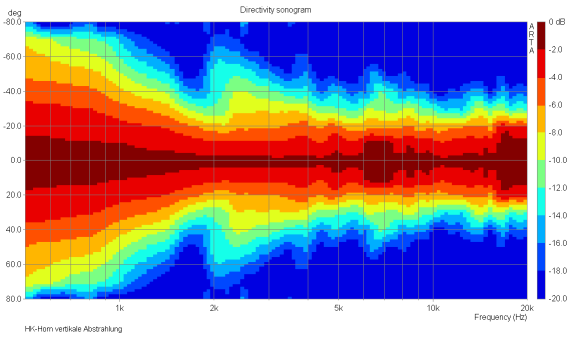
Transportvolumen würde sich somit, im Vergleich mit dem zweiten Entwurf, in eine größtenteils negative Eigenschaft umkehren.

- Horn des Prototypen #1; HK-Horn mit 60° x 40° Abstrahlung





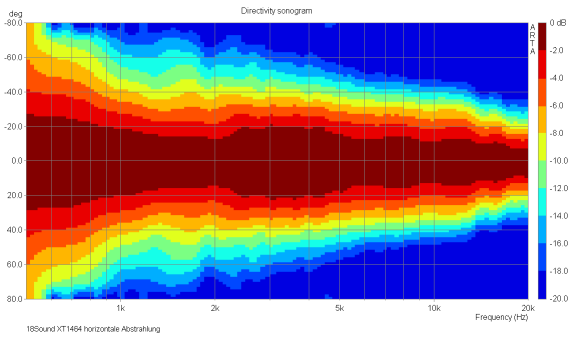


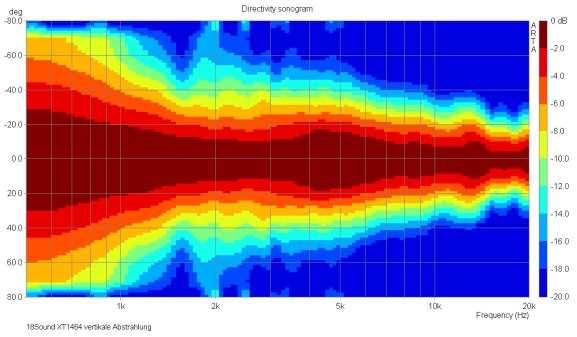


- Horn des Prototypen #2; 18Sound XT1464 mit 60° x 50° Abstrahlung









Eine Entscheidung in dieser Sache wäre aber durch Betrachtung der Einbaumaße und des Abstrahlverhaltens allein nicht zu rechtfertigen. Vielmehr müssten zu diesem Zweck die zu Beginn von Abschnitt 3. in Aussicht gestellten, objektiven Tests an einer ausreichend großen Menge von Hochtontreibern durchgeführt werden, um auch der akustischen Relevanz bei der Wahl eines bestimmten Horns (und damit verbunden, auch der Gehäusegestaltung) ein entsprechendes Gewicht zu verleihen.

4. Messungen und Selektion

Wie im vorherigen Abschnitt schon angesprochen, sollte die Vorauswahl der einzelnen Lautsprecher durch objektive und möglichst detailierte Messreihen abgesichert werden.
Zu diesem Zweck ist der Einsatz spezifischer Messtechnik unerlässlich.

Mit Hilfe der ARTA-Programmfamilie stand eine professionellen Software zur Verfügung, die umfangreiche und hochauflösende Messungen auf der akustischen wie auch auf der elektrischen Ebene ermöglichte.
Alle nachfolgenden Messungen wurden also mit ARTA (bzw. STEPS, LIMP) in der zum Zeitpunkt des Erscheinens dieser Dokumentation aktuellen Version 1.4 vorgenommen sowie grafisch ausgewertet.

Die ARTA-Software („Audio Real Time Analysis") ist in der Lage, mit einer Vielzahl von Audiointerfaces zu kommunizieren. Diese sind heutzutage in ihrer Qualität den alten, teils mit eigener Hardware ausgestatteten Messsystemen mindestens ebenbürtig, wenn nicht teilweise sogar überlegen. Das Fehlen von expliziter Hardware macht es jedoch nötig, für Dokumentationszwecke eine Liste mit dem für die Messungen verwendeten Zubehör zu erstellen, da nur so ein Urteil über die Qualität der einzelnen Bestandteile der Messkette möglich ist.
Dies soll im nächsten Abschnitt fortgesetzt werden.

4.1 Messbedingungen und -technik

Messraum:

- nicht-reflexionsarmer Raum mit Abmessungen 5m x 6m x 15m, für quasi-reflexionsfreie Messungen bis 140Hz
- für Messungen <140Hz freie Rasenfläche mit Radius >10m
- Messungen und Analysen im reflexionsarmen Messraum der TU-Berlin (FB Technische Akustik - 1000m³; untere Grenzfrequenz 63Hz) auf Anfrage möglich

Software:

- ARTA (STEPS, LIMP), Version 1.4

Hardware:

- Edirol UA-25 (24Bit/ 96kHz), später ersetzt durch:
- RME Fireface 400 (24Bit /192kHz; SNR = 113dB(A); THD+N = <98 dB)
- IBM Thinkpad Z61m (Intel Core Duo- Prozessor)

Mikrofone:

- Microtech Gefell MV201 (DIN EN 60 651 Klasse 1 eichfähig)
- Microtech Gefell MK201 (max. SPL 160dB; DIN EN 60 651 Klasse 1 eichfähig)

- Microtech Gefell MK221 (max. SPL 146dB; DIN EN 60 651 Klasse 1 eichfähig)
- Microtech Gefell MK202 (max. SPL 158dB; DIN EN 60 651 Klasse 1 eichfähig)
- Microtech Gefell NK65 (Nasenkonus für 1/2"-Kapseln)
- Haun MBNM 550el (max. SPL 126dB, kalibrierter Frequenzgang)

Zubehör/ Sonstiges:

- Brüel & Kjær 4230 (Pegelkalibrator mit 94dB @ 1KHz; DIN EN 60 651 Klasse 2 eichfähig)
- Präzisionsimpulsschallpegelmesser 00 023 (DIN EN 60 651 Klasse 1 eichfähig)
- Multimeter Digitek DT-960 2R (True-RMS)
- Leistungsverstärker dB-technologies MPA530 (2x275 Watt @ 4 Ohm, brückbar)
- Leistungsverstärker Crest Audio CA9 (2x 900W @ 4Ohm, brückbar)
- Drehteller (max. 2,5° Auflösung) mit Stativaufnahme
- diverse Hilfseinrichtungen zur Messung horizontaler bzw. vertikaler Abstrahlung
- sonstiges Zubehör: Mikrofonstativ, Ultraschall-Abstandsmessgerät, Frequenzweichenbauteile

4.2 Vergleichsmessungen der Hochtontreiber und -hörner

Um die in Abschnitt 3. erwähnte Entscheidungsfindung für ein Hochtonhorn und damit für den Bau eines Prototypengehäuses für weiterführende Untersuchungen von 12"-Tiefmitteltönern zu beschleunigen, wurde ein Vergleich von Hochtontreibern vorgenommen.
Welche Punkte sind nun für so einen Vergleich von Bedeutung?
Für einen Hochtontreiber im PA-Bereich stehen augenscheinlich Eigenschaften wie:

1. hoher Wirkungsgrad und hohe Dynamikfähigkeit
2. geringstmögliche Verzerrungen im relevanten Arbeitsbereich
3. geringstmögliche Partialschwingungen bzw. Ausschwingverzögerungen
4. glatter Amplitudenverlauf ohne größere Rückwirkungen konstruktiver Fehler
5. tiefe untere Grenzfrequenz
6. geringes Gewicht sowie
7. weitere, eher betriebswirtschaftliche Gründe,

im Vordergrund.
Besonderes Augenmerk wollte der Autor dabei auf die „klangentscheidenden" Verzerrungen legen, die erfahrungsgemäß bei der Beurteilung von Lautsprechern viel zu selten berücksichtigt werden. Erfreulicherweise bietet ARTA mit einer speziellen Funktion, die sich an die Arbeit von Angelo Farina (vgl. Farina 2000) anlehnt, die Möglichkeit, Verzerrungen mittels Anregung durch ein Gleitsinussignal sehr schnell und mit hoher Präzision zu erfassen (vgl. Mateljan 2007: S. 66-68).

Generell gilt für alle folgenden Messungen, dass sie keinen Anspruch auf absolute Genauigkeit oder Vollständigkeit erheben, sondern lediglich das spezielle Interesse des Autors widerspiegeln sollen.
Eventuell anderslautende Herstellerangaben bleiben davon ausdrücklich unberührt.

Der weitere Ablauf des Vergleichstests für die Hochtontreiber lässt sich nun in zwei zeitlich getrennte Phasen unterteilen.

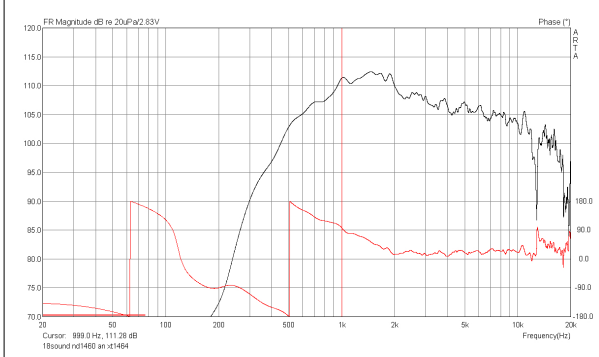
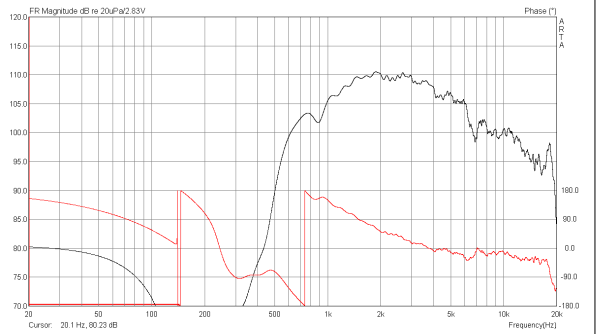
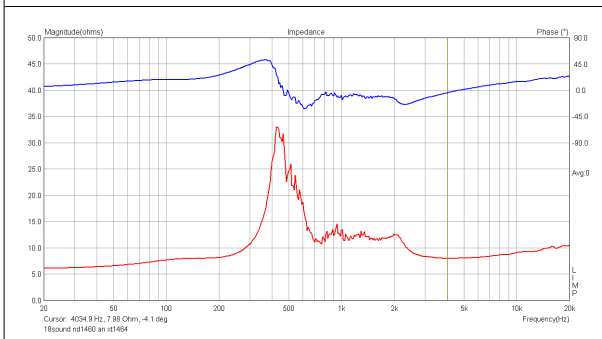
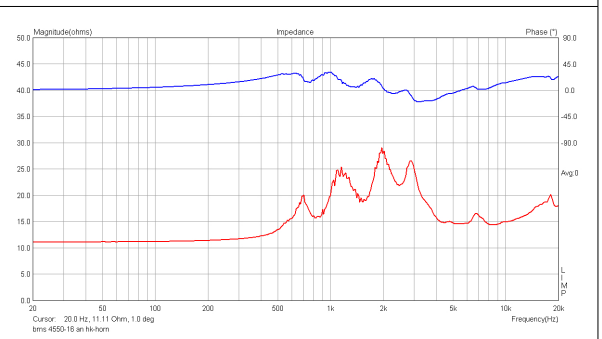
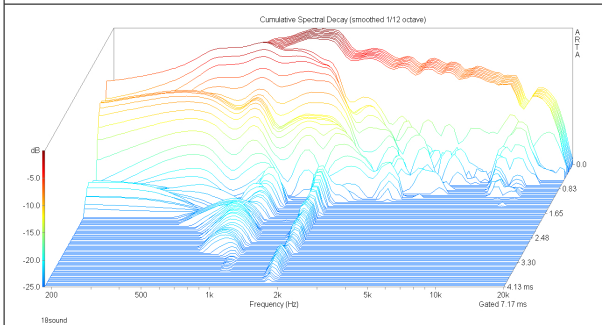
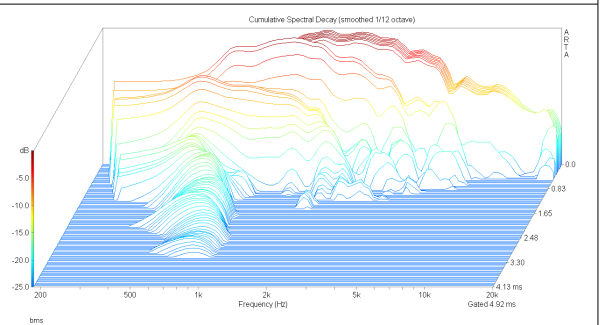
4.2.1 Phase I – erste Orientierung

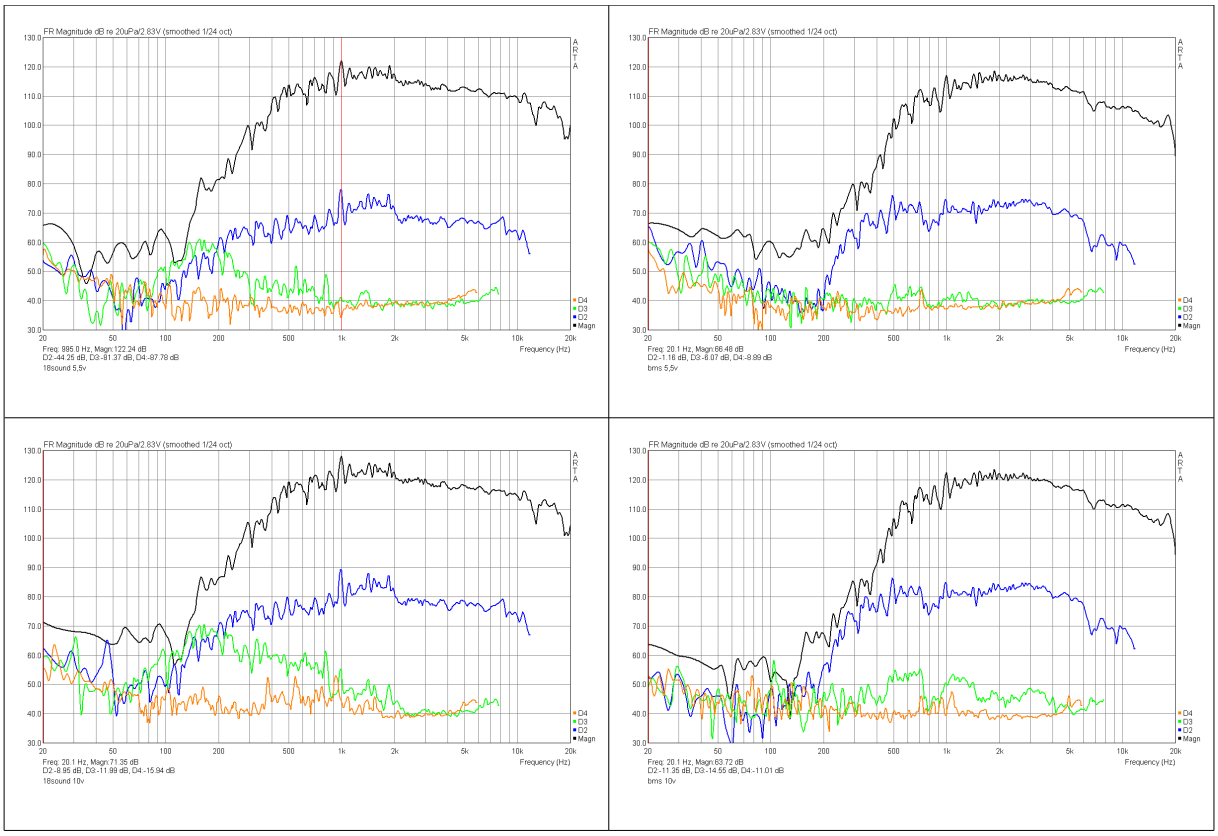
Diese erste Phase lässt sich kennzeichnen durch einen noch wenig systematischen Zugang, suboptimale messtechnische Ausrüstung sowie durch eine auf lediglich zwei Stück begrenzte Menge an zur Verfügung stehenden Testobjekten.
Dass in diesem ersten Teil lediglich zwei Prüflinge gemessen wurden, lag daran, dass diese konkreten Modelle zu diesem Zeitpunkt in der Diskussion im Forum einige Fürsprecher hatten – darüber hinaus handelte es sich dabei schlicht um die einzigen, tatsächlich zu diesem Zeitpunkt vorliegenden Modelle.
Vermessen wurden ein Treiber vom Typ BMS 4550, welcher mit seinem 1"-Flansch auf das HK-Horn arbeiten sollte.
Beim zweiten Testobjekt handelte es sich um einen 18Sound ND1460, der auf das dazugehörige 18Sound XT1464-Horn geschraubt wurde.

Für den Messaufbau wurde wie folgt verfahren:
Die Treiber wurden an die Hörner montiert und mitsamt diesen auf einem ca. 1,5m hohen Stativ positioniert.
Zur Vermeidung grober Kantenbeugungseffekte an den Außenseiten der Hörner wurden diese großzügig mit einem faserigen Polyesterdämpfungsmaterail umwickelt.
In genau 1m Abstand zur Mundfläche der Hörner wurde das Messmikrofon, in diesem Fall ein Haun MBNM 550el (vgl. auch Abschnitt 8), positioniert.
Um die erste Bodenreflexion möglichst abzuschwächen, wurde zwischen den Testobjekten und dem Mikrofon eine doppelte Lage aus 10cm Noppenschaumstoff auf den Boden gelegt.
Als Interface und gleichzeitig als Vorverstärker für das Mikrofon diente eine Edirol UA-25 USB-Soundkarte. Das gesamte System wurde mittels eines Digitek-Multimeters und eines B&K-Schallpegelkalibrators gemäß des ARTA-Handbuchs (vgl. Mateljan 2007: 6-15) aufgebaut und auf absolute Pegel eingestellt.
Zur Beurteilung des Amplitudenfrequenzgangs und der harmonischen Klirrkomponenten wurden alle Testobjekte mit Sinus-Sweeps angeregt (Sequenzlänge 64k; Abtastrate 48kHz).

Nun zur den Messungen:
Es werden jeweils die Kurven von 18Sound- bzw. BMS-Treiber, getrennt durch eine Spalte, gegenübergestellt.
Dabei werden gezeigt:

- Frequenz- und Phasengang mit Bezug auf das „akustische Zentrum“
- elektrische Impedanz und Phase
- kumulatives Zerfallsspektrum
- Klirrmessungen nach der Farina-Methode bei ~115dB und ~120dB SPL

18Sound ND1460 @ XT1464	BMS 4550 @ HK-Horn
	
	
	



Besonders auffällig ist, dass zwischen der ersten ungeglätteten, aber gefensterten Amplitudenkurve und der ungefensterten Grundwelle bei der Darstellung der Klirrmessungen nach Farina eine verstärkte Welligkeit, vor allem im Bereich unterhalb von 2 kHz, zu beobachten ist.
Dies begründet sich in der automatisierten Auswertungsform durch ARTA (vgl. Mateljan 2007: S. 66-68), so dass sich hier alle Reflexionen der Messumgebung niederschlagen.
Aus diesem Grund war die Bedämpfung der Fläche zwischen Testlautsprechern und Mikrofon mit Noppenschaum besonders wichtig; bei „normalen" Messungen von Impulsantworten würden diese Reflexionen selbstredend ausgefenstert werden.
Da sich die Welligkeiten jedoch, verglichen mit den gefensterten Kurven, in einem Toleranzschlauch von ~4dB bewegen, sind diese Effekte für den angestrebten relativen Vergleich noch hinnehmbar.
Weitaus problematischer schien bei der Auswertung der Ergebnisse hingegen, dass das verwendete Messmikrofon MBNM 550el aufgrund seiner konstruktiven Auslegung (vgl. Weber 2006: S. 15) für Messungen der im PA-Bereich vorkommenden, sehr hohen Schalldrücke nicht ausreichend sei. Darüber hinaus wurde ebenso für den betreffenden Mic-Eingang des Edirol-Interfaces festgestellt, dass bei gemessenen Schalldrücken von ~120dB SPL die absolute Grenze, also knapp vor Einsetzen des eingebauten Limiters, erreicht war. Dieser Bias ist nur unscharf einzugrenzen und verursacht daher gewisse Interpretationsprobleme.
Zudem wurde bemerkt, dass die Vergleichsmaßstäbe nicht ausreichend genau festgelegt wurden; so verfügte der 18Sound-Treiber über eine 3"-Spule mit 8Ohm Nennimpedanz, das BMS-Modell hingegen „nur" über eine 1,75"-Spule mit 16Ohm. Diese Unterschiede wurden im Vorfeld unzureichend betrachtet und erschwerten die

relative Interpretation der Ergebnisse.

4.2.2 Phase II – erweitertes Testfeld

Da der Ablauf der ersten Messungen, geschildert im vorangegangenen Abschnitt, augenscheinlich einige Unzulänglichkeiten enthielt, wurde nach einer „Denkpause" eine zweite Messreihe in Angriff genommen.
Dabei sollten auch die Testobjekte des vorherigen Versuchs abermals berücksichtigt werden. Zudem wurde durch die zwischenzeitliche Anschaffung von neuer Mikrofonie (hierzu siehe auch Abschnitt 4.1) und geeigneter Vorverstärker einer der wesentlichen Kritikpunkte aus Abschnitt 4.2.1 aufgenommen.

Das Testfeld wurde in diesem Versuchsteil wesentlich erweitert; insgesamt standen acht Hochtontreiber zur Verfügung. Darunter fanden sich auch die bisher in der Forumsdiskussion favorisierten Modelle.

Im Folgenden wird nun also eine Messreihe dokumentiert, deren Ziel es war, eine qualitative Entscheidungshilfe bei der Selektion eines Hochtontreibers aus einem vergleichsweise breiten Feld von zur Verfügung stehenden Lautsprechern zu geben. Der schlussendlich zu wählende Lautsprecher sollte dabei in der Lage sein, möglichst hohe Pegel bei gleichzeitig möglichst geringer Ausprägung harmonischer Klirrkomponenten abzugeben, um in einer späteren Kombination mit zwei 12"-Tiefmitteltönern einen Beschallungslautsprecher hoher Qualität zu ergeben.
Zuvor genannte Kriterien (vgl. Abschnitt 4.2) sollen natürlich ebenso Berücksichtigung finden.

Bei den Messungen wurde folgendermaßen vorgegangen:

- alle Treiber mit 1,4"-Mund wurden am 18sound XT1464-Horn (380 x 285 x 257mm) gemessen
- alle Treiber mit 1"-Mund wurden am HK-Horn (280 x 280 x 240mm) gemessen
- Messabstand vom Hornmund zum Mikrofon war immer genau 1m
- Bedämpfung der Hornkanten durch Umwicklung mit Polyesterdämpfungsmaterial (vgl. Abschnitt 4.2.1)
- Auslegung von Noppenschaumstoff zur Bedämpfung der ersten Bodenreflexion (vgl. Abschnitt 4.2.1)
- zur Beurteilung des Amplitudenfrequenzgangs und der dazugehörigen harmonischen Klirrkomponenten wurden alle Testobjekte mit Sinus-Sweeps angeregt (Sequenzlänge 64k; Abtastrate 48kHz)
- alle Treiber wurden, um eine eventuelle Beschädigung durch hohe Leistungen bzw. übermäßigen Membranhub zu vermeiden, mit einem seriellen 15µF-Folienkondensator beschaltet

Ausnahmen bei der Beschaltung werden in der folgenden Übersichtstabelle angezeigt, die zudem die Testobjekte an sich beschreiben soll.

Bezeichung	Nominelle Impedanz (in Ω)	Spulen-Ø (in Zoll)	Mund-Ø (in Zoll)	Beschaltung (in µF)
18-Sound ND1460	8	3	1,4	15
BMS 4549	16	1,75	1	15
BMS 4550	16	1,75	1	15
BMS 4552	16	1,75	1	15
BMS 4554	16	1,75	1,4	15
BMS 4594-HT	16	1,75	1,4	2,2
BMS 4594-MT	16	3,5	1,4	15
BMS 4594 Gesamt	16	3,5 bzw. 1,75	1,4	spezielle 2-Weg-Weiche (Eigen-entwicklung)
B&C DE700	8	3	1,4	15
RCF N350	8	1,75	1	15

Für den Messaufbau wurde wie folgt verfahren:
Der PSI 00 023 wurde mit dem Mikrofonvorverstärker MV201 und Kapsel MK221 verbunden und mit Hilfe des B&K-Kalibrators, der bei 1kHz 93,7dB Schalldruck bei Anschluss einer 1/2"-Kapsel abgibt, auf absolute Pegel eingestellt.

Der Wechselspannungsausgang des PSI 00 023 wurde über ein unsymmetrisches Kabel an den linken Line-In des Edirol-Interfaces angeschlossen.
Ausgehend von einem Startwert von 2,83V Klemmenspannung wurde dabei die dem Lautsprecher zugeführte Leistung schrittweise erhöht; mit jeder Erhöhung erfolgte jeweils eine erneute Aufzeichnung durch die ARTA-Software.

Diese Stufen lagen bei:

1.) 2,83V
2.) 5,5V
3.) 8V
4.) 10V
5.) 14V
6.) 18,5V

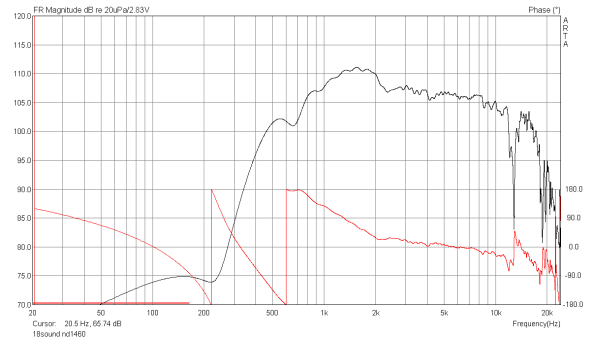
Diese Werte erscheinen mehr oder weniger willkürlich gewählt, da sich der Verstärkungsfaktor offensichtlich nicht linear steigert.
Tatsächlich entsprechen diese Werte lediglich den Skalierungen am Master-Potentiometer des verwendeten USB-Interfaces, so dass am Ende der Signalkette (0dB Gain am Endverstärker) die beschriebenen Klemmenspannungen zur Verfügung standen.

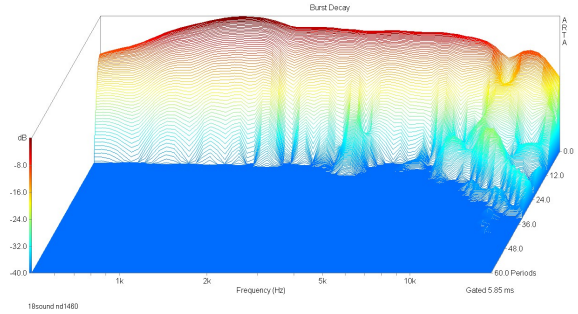
Sie haben also einen rein praktischen Ursprung, da so die Bedienbarkeit erleichert und die Wiederholgenauigkeit erhöht wurde.
Da diese Vorgehensweise für alle gemessenen Lautsprecher gleichermaßen angewendet wurde, ist dieser Punkt insgesamt als unproblematisch einzustufen.

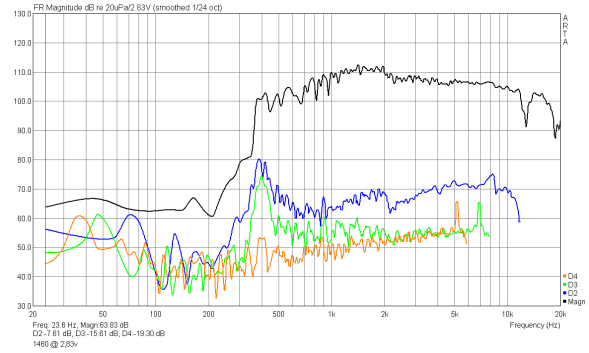
Nun zu den Messungen:
Es werden jeweils die Kurven einzelner Treiber in einer eigenen Tabelle gezeigt, die Reihenfolge entspricht dabei der oben gezeigten Auflistung.
Dabei sollen gezeigt werden:

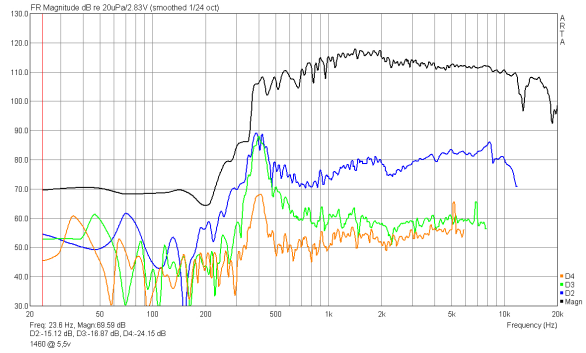
- Frequenz- und Phasengang mit Bezug auf das akustische Zentrum, ungeglättet
- periodenbasiertes Zerfallsspektrum („burst decay")
- Klirrmessung von 2,83V bis 18,5V Klemmenspannung

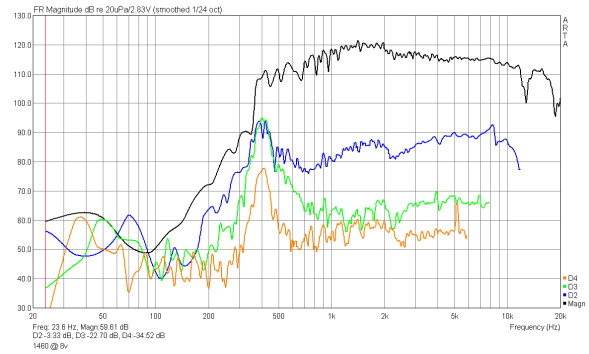
18Sound ND1460 @ XT1464

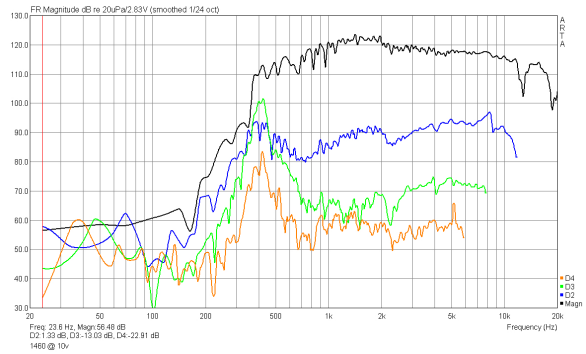


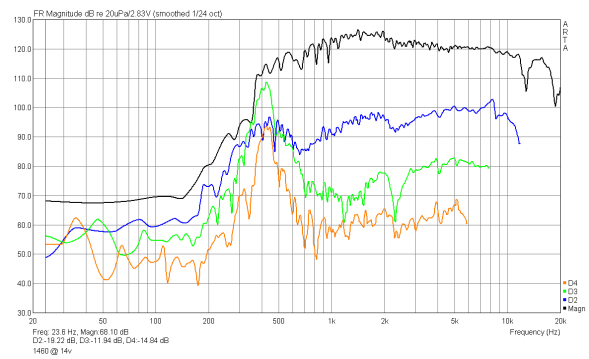


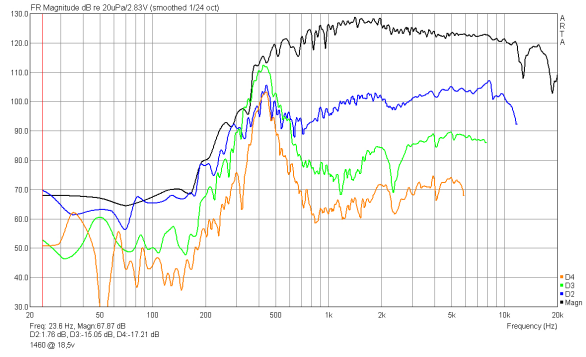




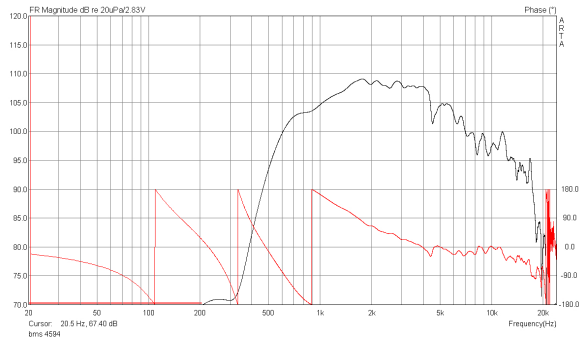


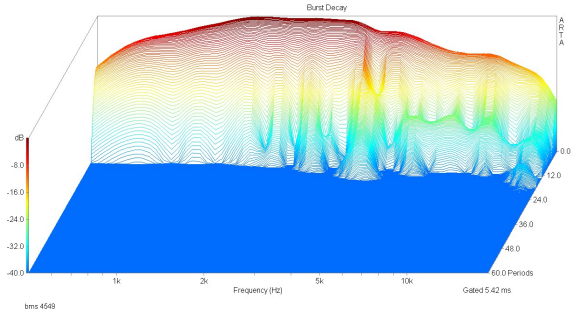


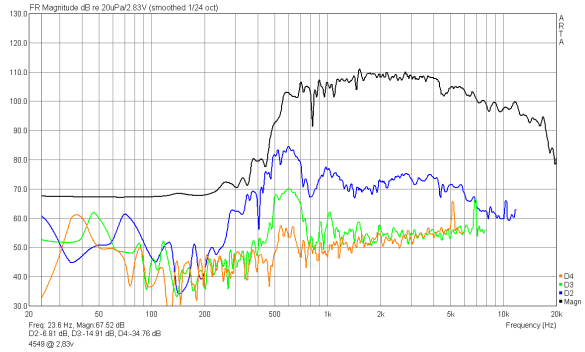


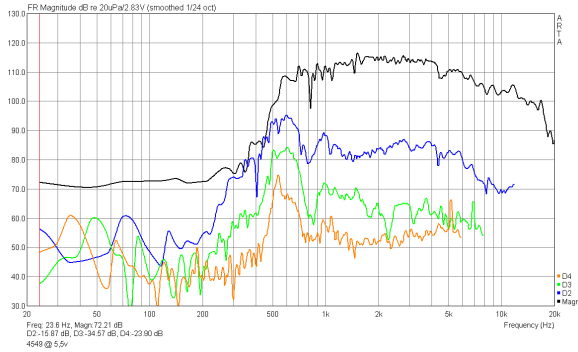


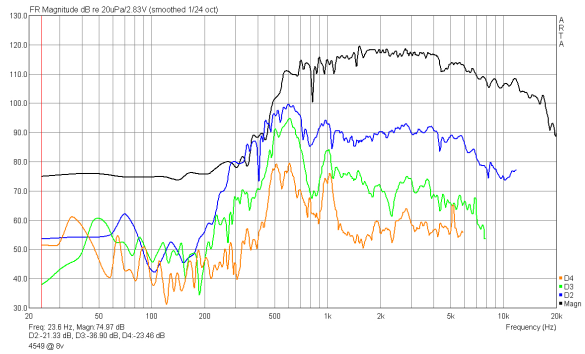
BMS 4549 @ HK-Horn

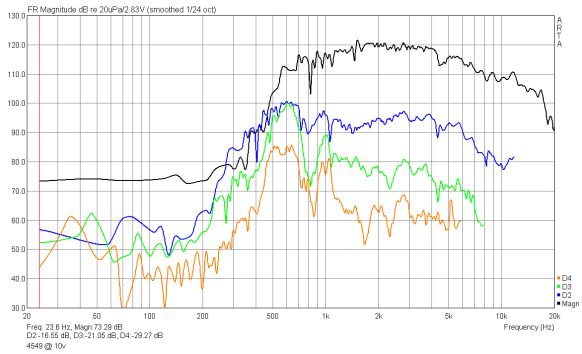


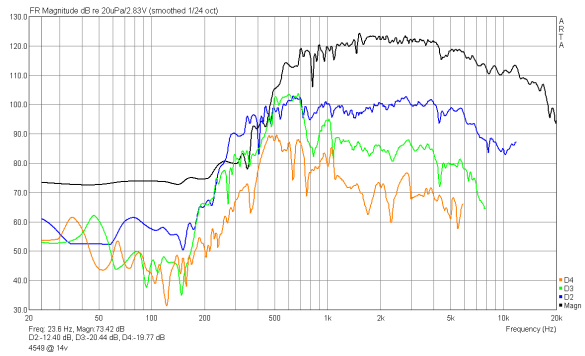


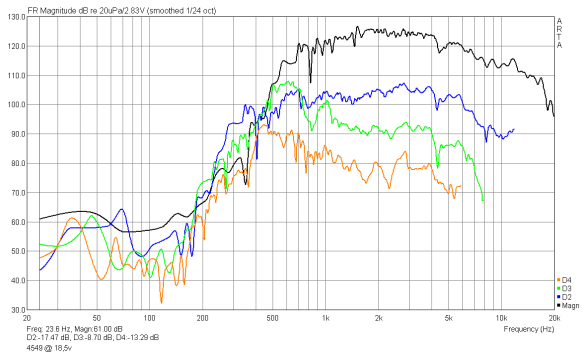




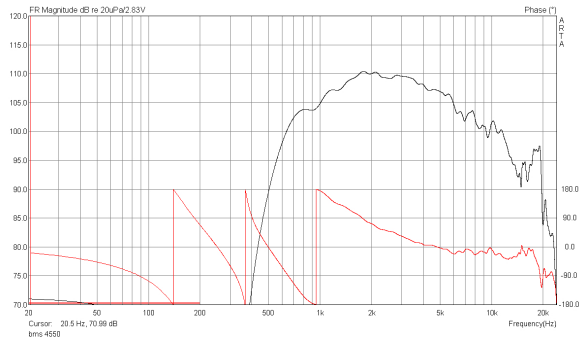


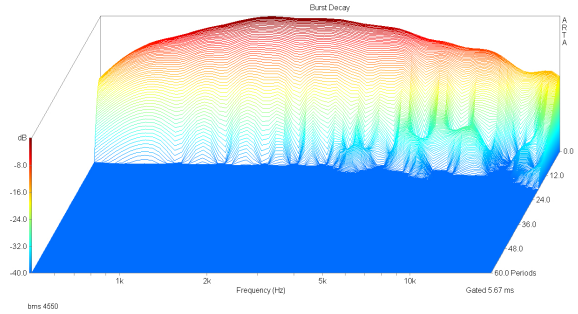


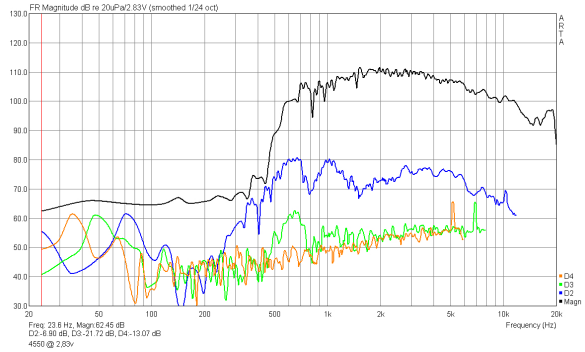


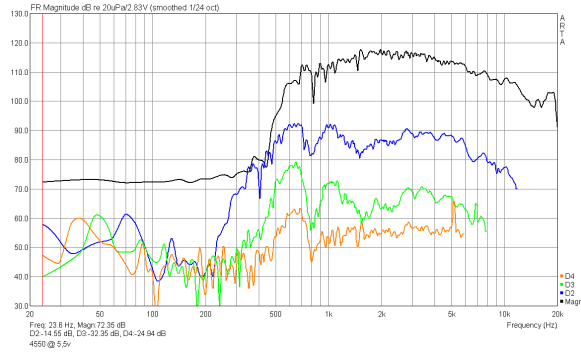


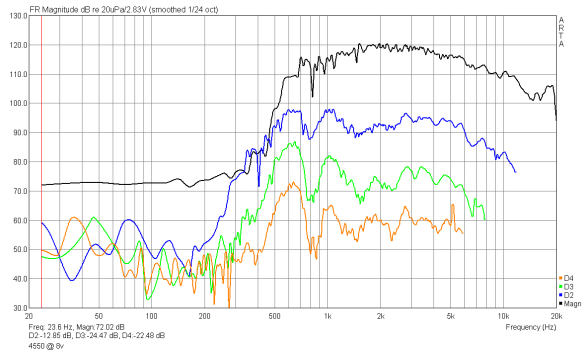
BMS 4550 @ HK-Horn

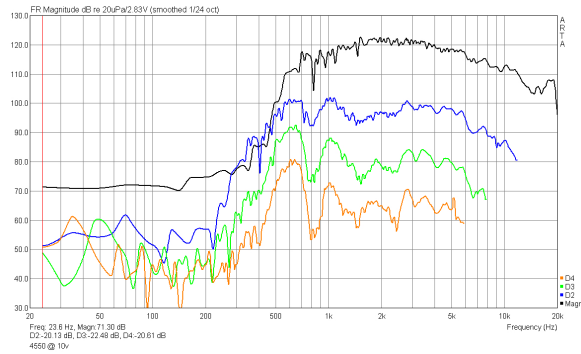


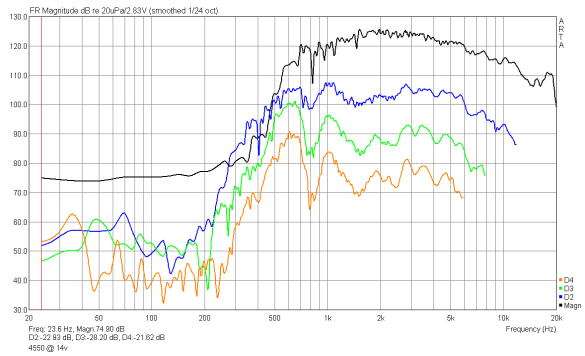


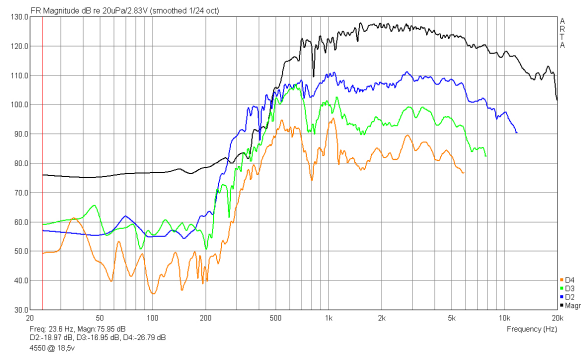




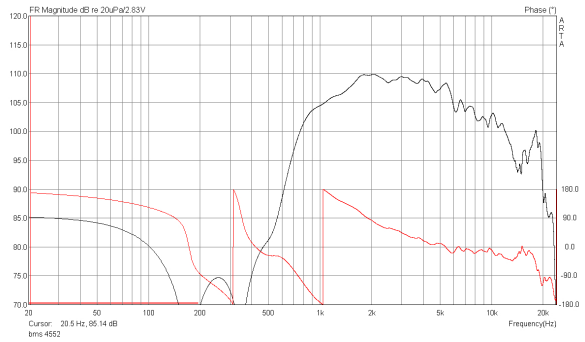


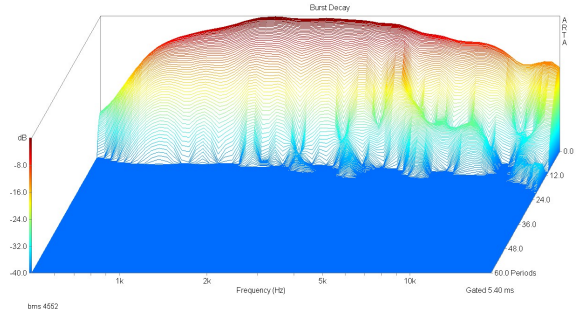


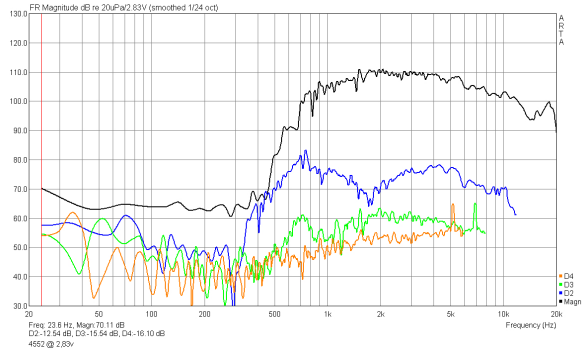


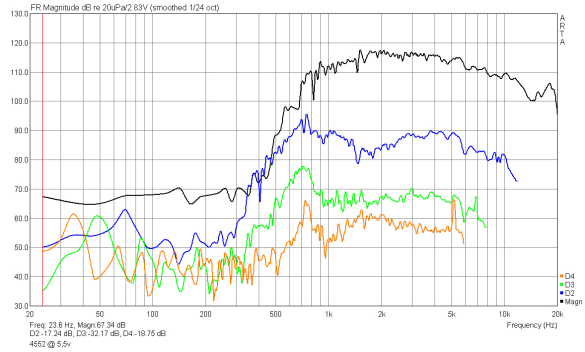


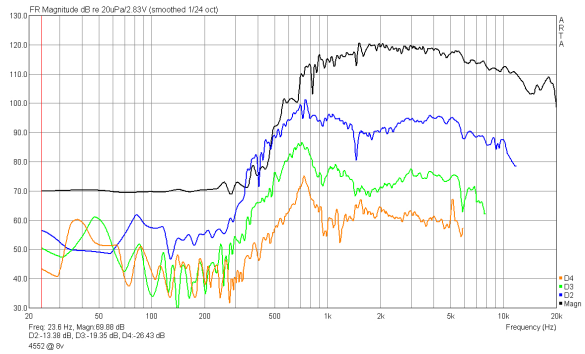
BMS 4552 @ HK-Horn

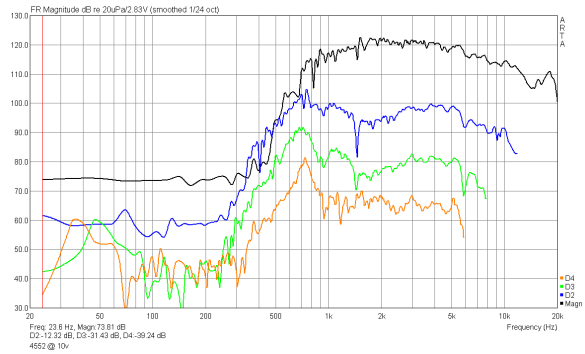


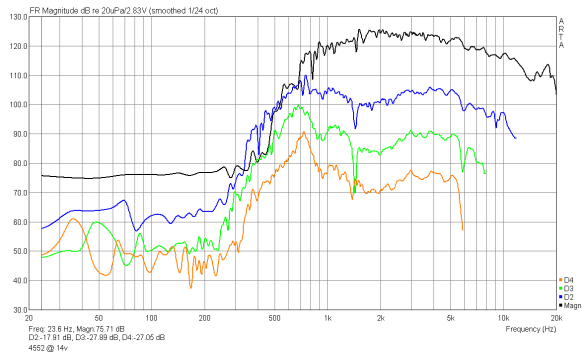


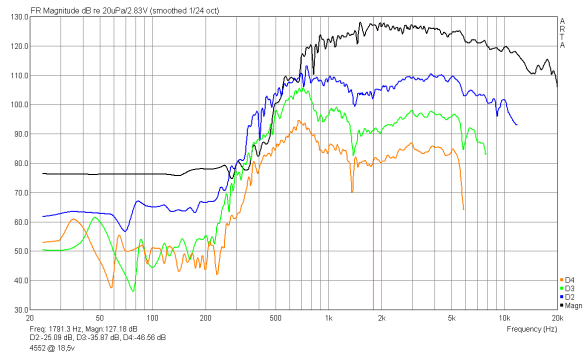




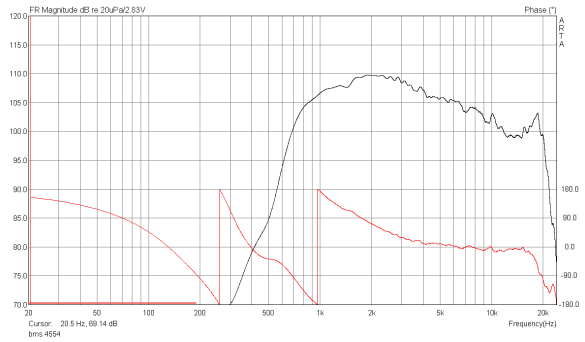


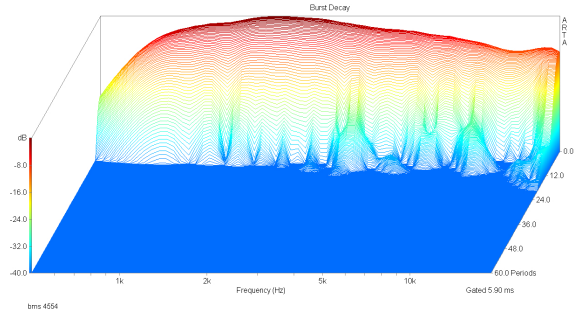


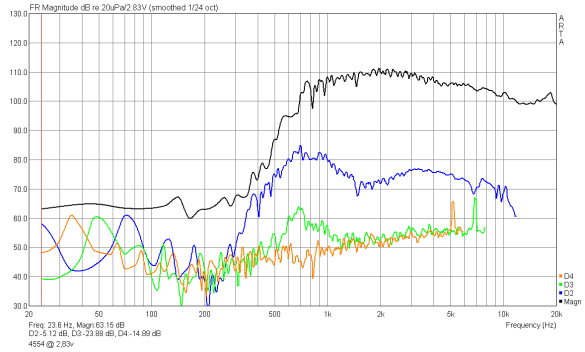


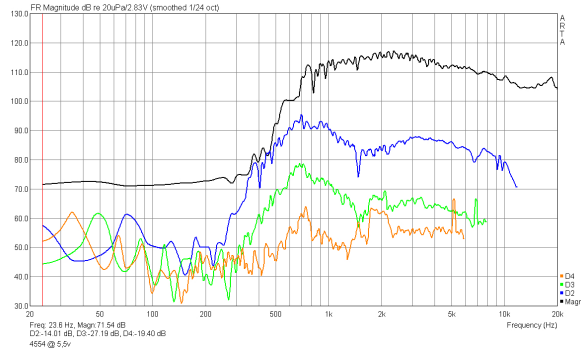


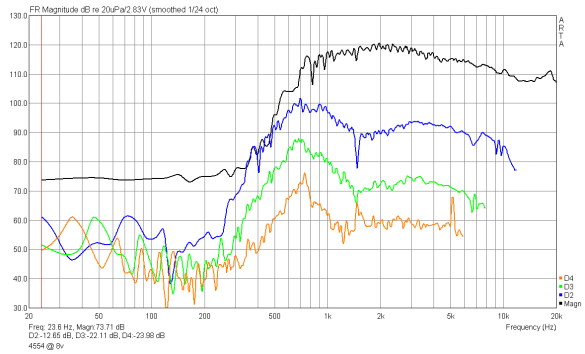
BMS 4554 @ XT1464

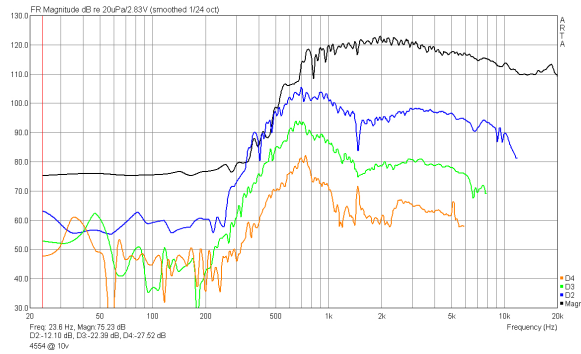


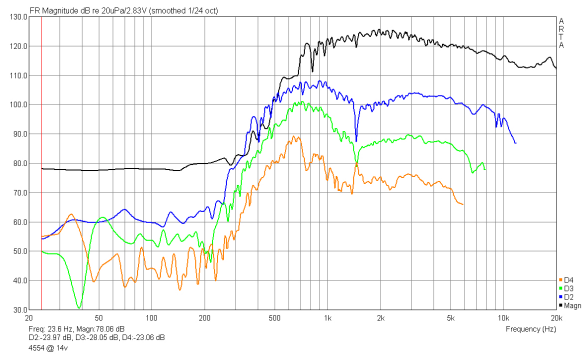


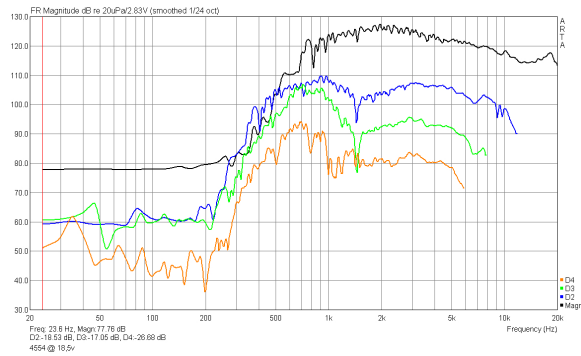




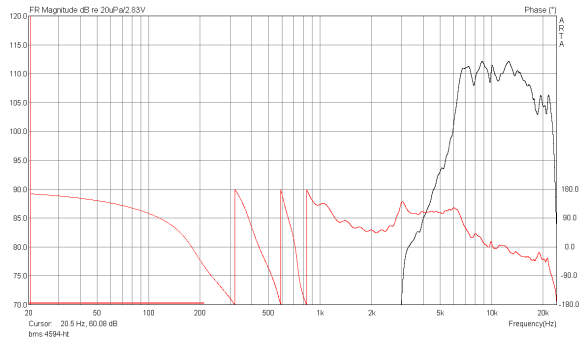


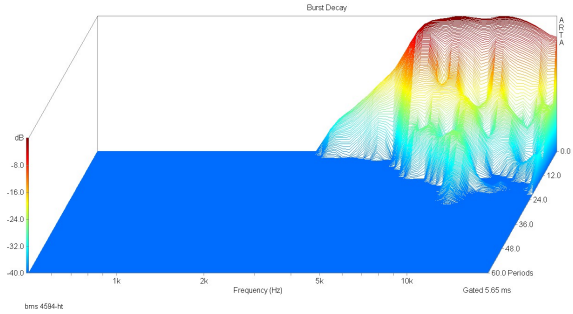


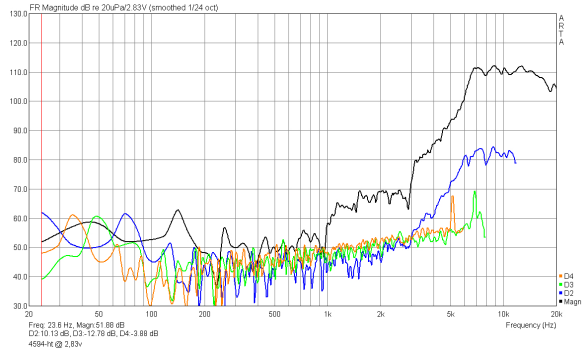


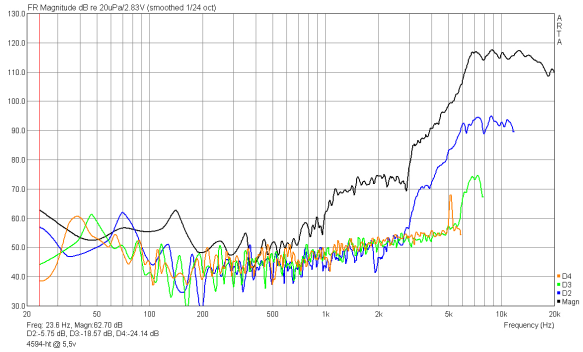


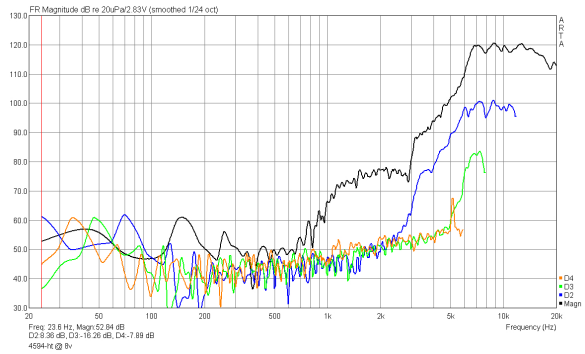
BMS 4594-Hochtöner @ XT1464

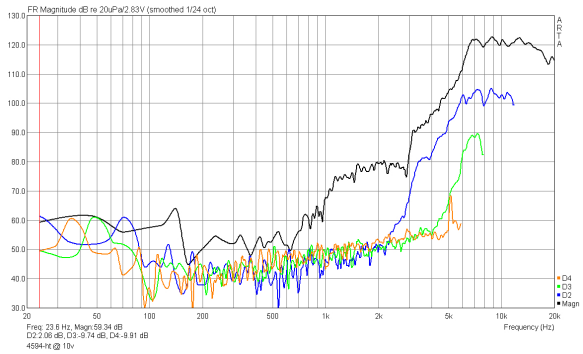


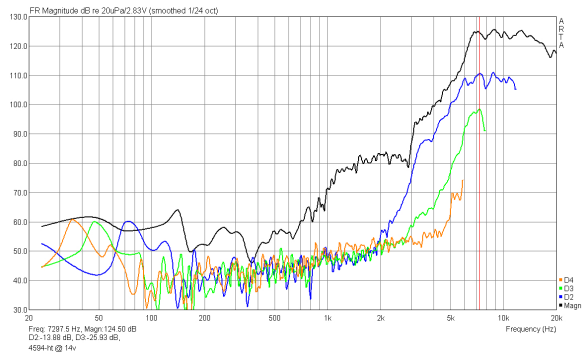


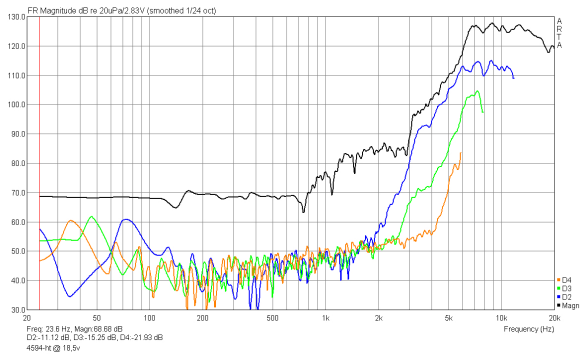




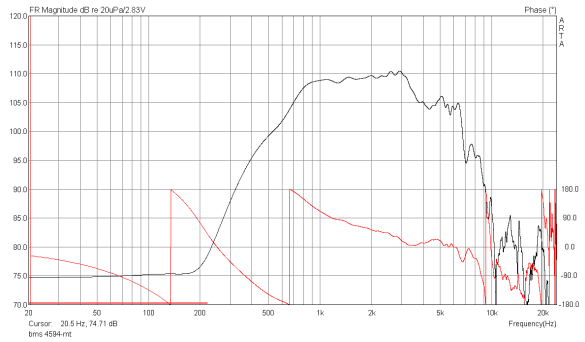


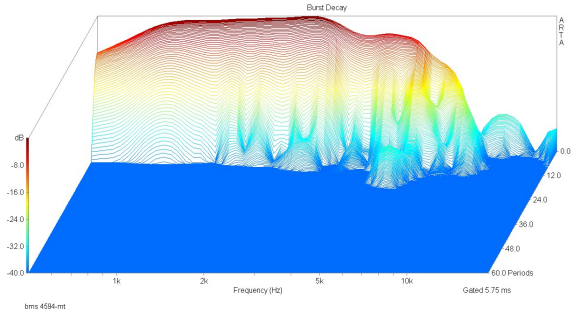


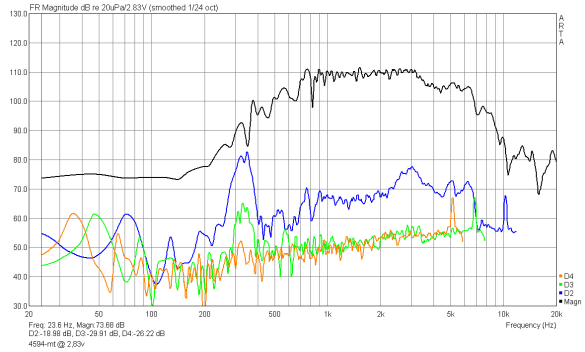


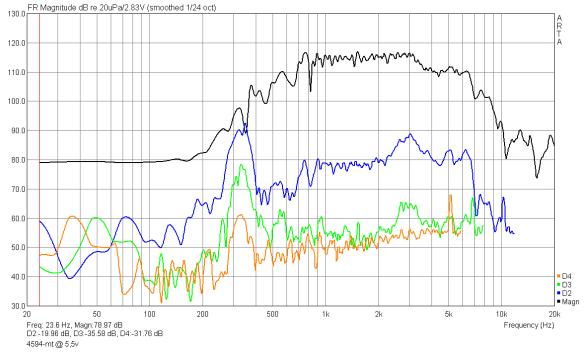


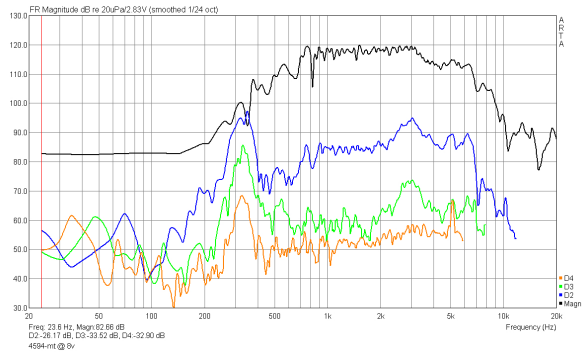
BMS 4594-Mitteltöner @ XT1464

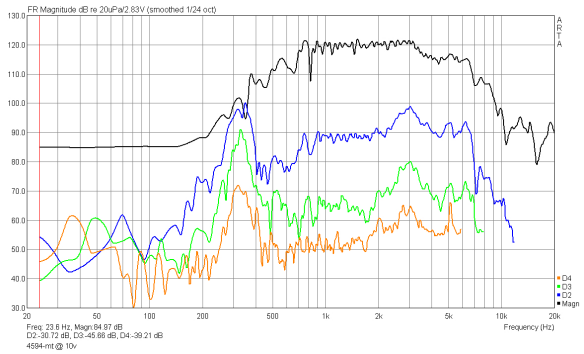


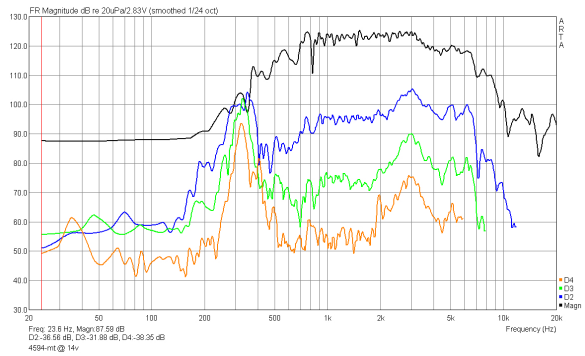


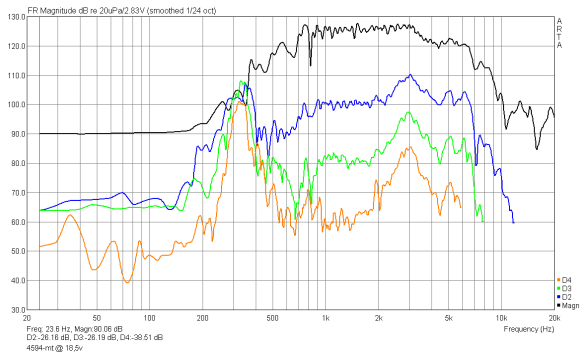




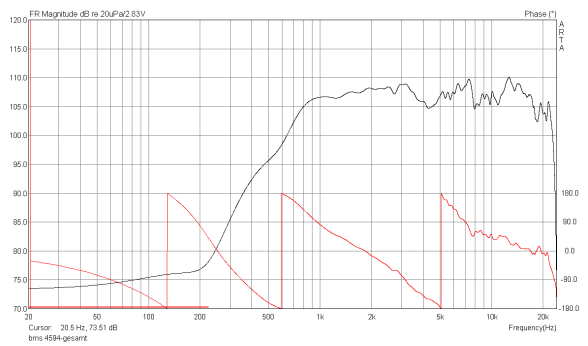


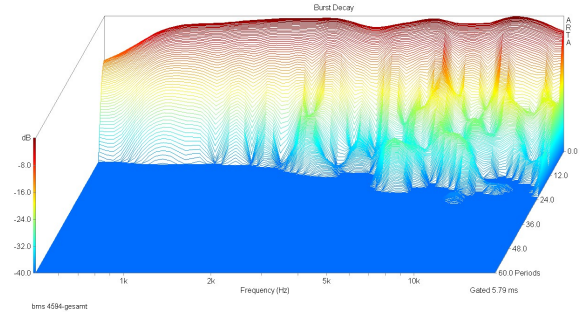


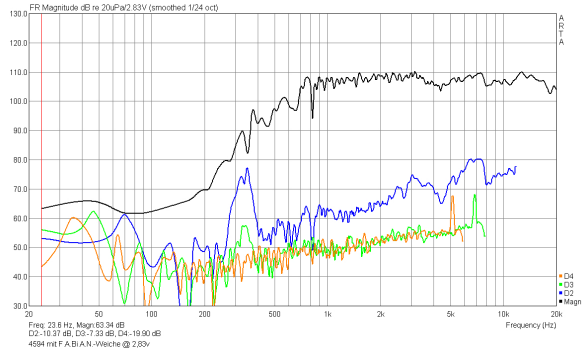


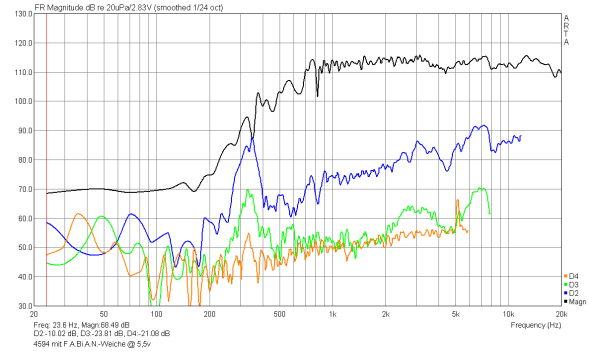


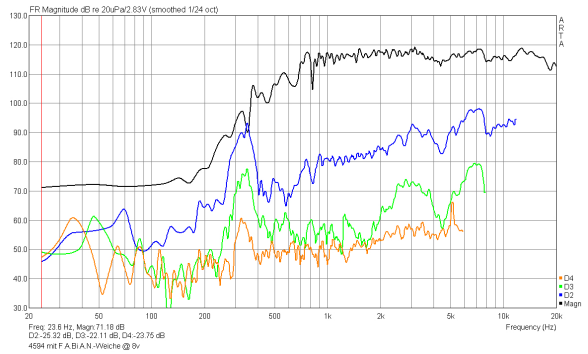
BMS 4594 mit 2-Wege-Frequenzweiche @ XT1464

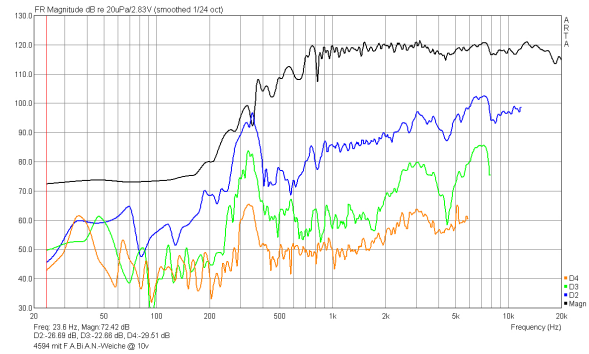


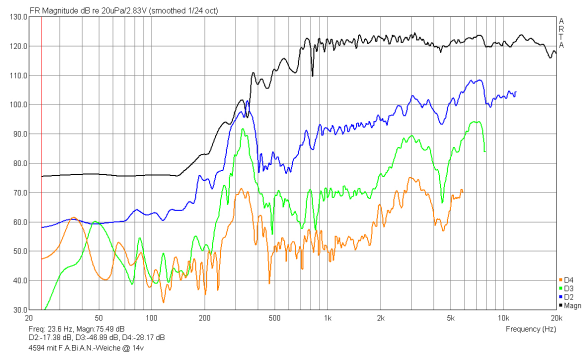


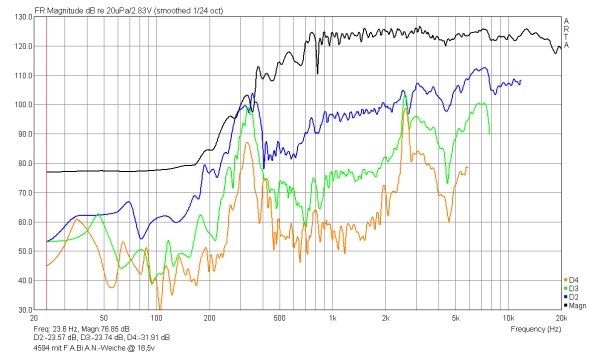




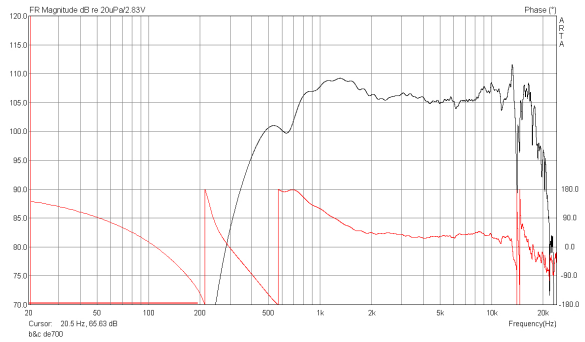


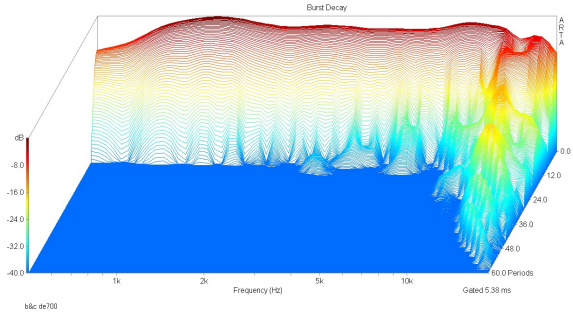


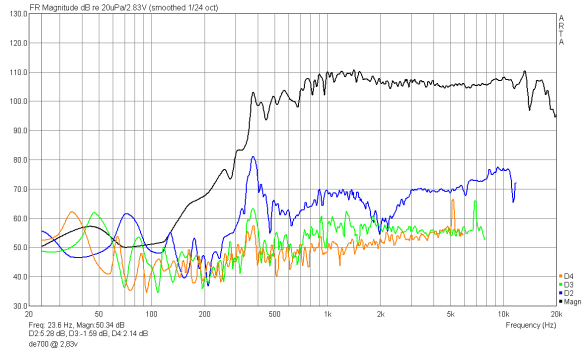


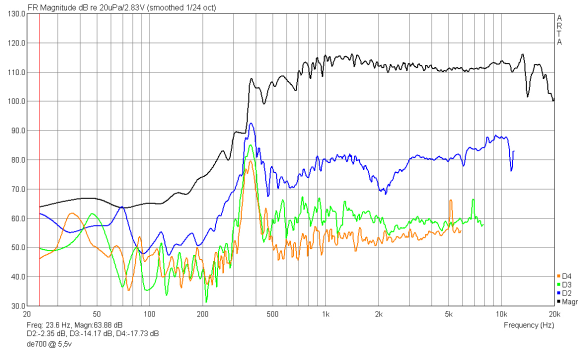


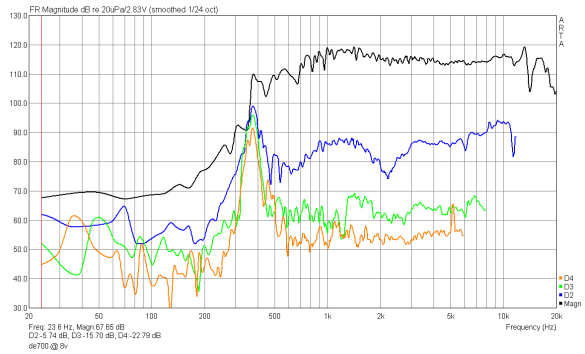
B&C DE700 @ XT1464

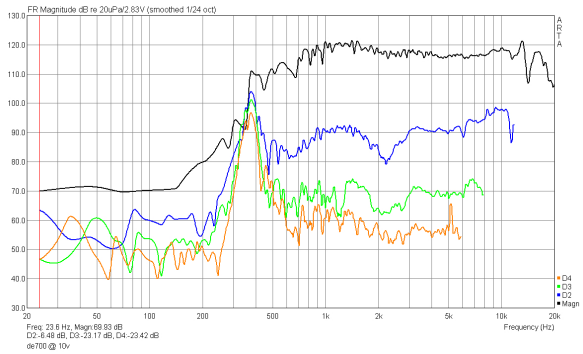


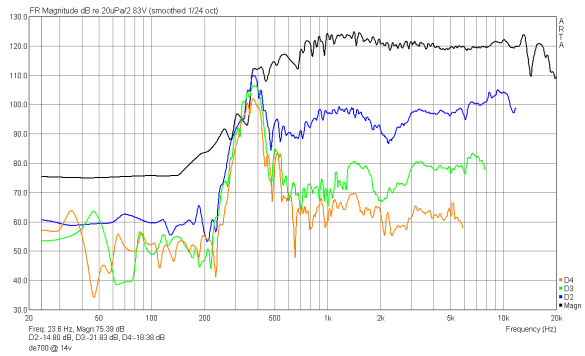


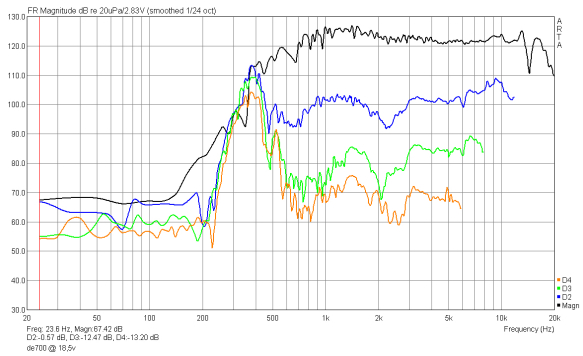




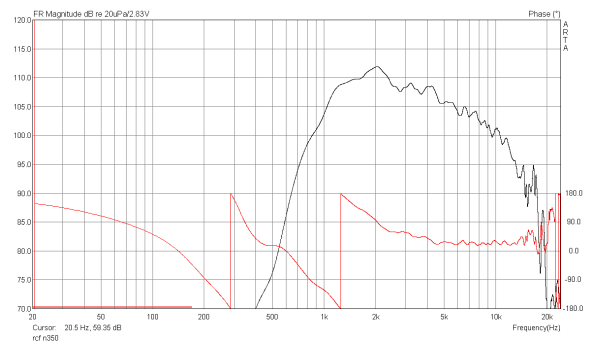


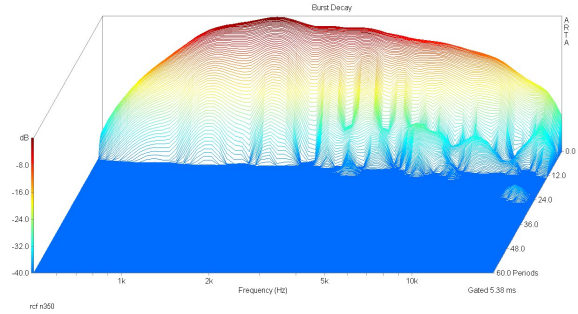


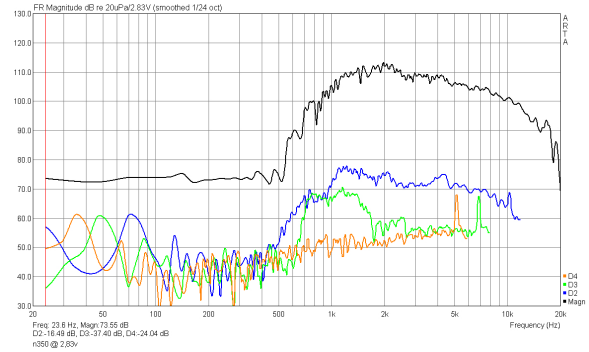


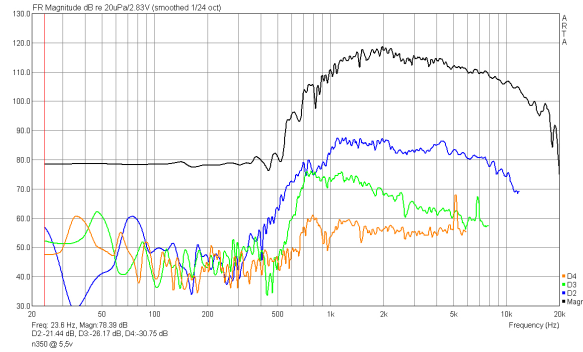


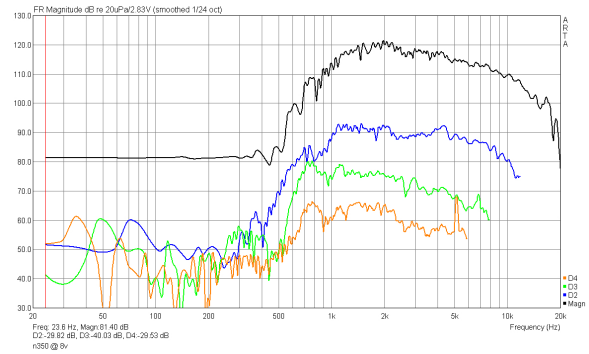
RCF N350 @ HK-Horn

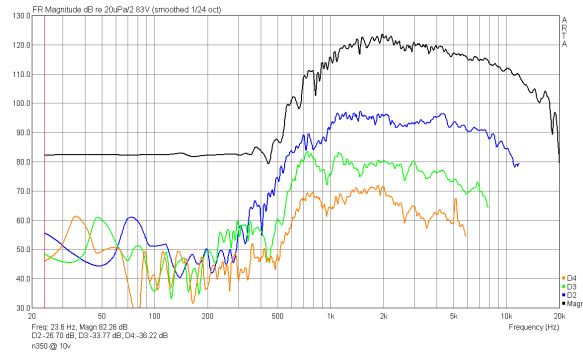


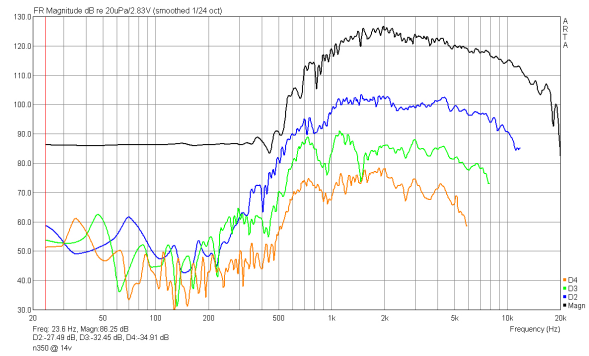


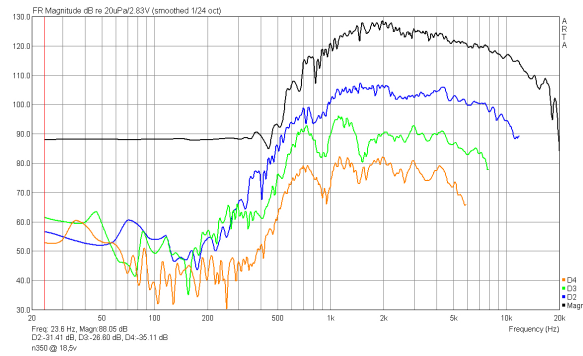












Zur Auswertung der Messungen:

Alle vermessenen Treibermodelle zeigen einen für Beschallungszwecke ausreichend ausgedehnten Frequenzverlauf. Am oberen Ende des Übertragungsbereiches finden sich bei allen Testobjekten mehr oder weniger stark ausgeprägte Membranresonanzen, die sich einerseits durch Anhebungen und/ oder Senken im Frequenzgang, andererseits durch korrespondierende Phasenverschiebungen abzeichnen. Die Ausschwingverzögerungen, die in diesem Fall mit der Anzeige von Perioden bei einer bestimmten Frequenz operieren, quantifizieren die „Fehler" in diesem Bereich besonders anschaulich.
Relativ günstige Werte werden dabei von den BMS-Modellen mit 1"-Ausgang erzielt. Von hinten wird das Feld vom B&C DE700 angeführt, der ca. 60 Perioden am oberen Übertragungsende nachschwingt.
Die Verzerrungen betrachtend, können vor allem die Treibermodelle mit 1,4"-Mund und relativ großer Schwingeinheit überzeugen. Zu den Klirrmessungen selbst sollen jedoch einleitend noch einige Interpretationshilfen gegeben werden.

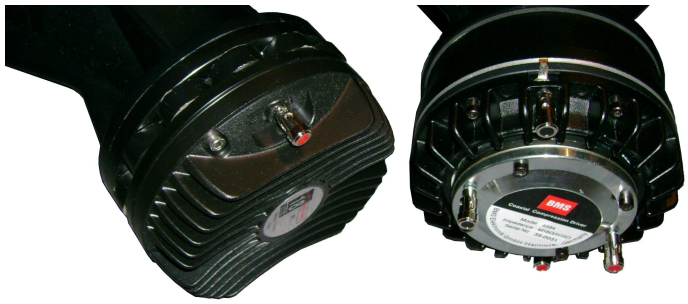
Dargestellt wird dabei der Pegelunterschied zwischen der Grundwelle (schwarze Kurve) und den Klirranteilen (unerwünschte Oberwellen; je nach Zusammensetzung hier mit blau, grün und orange). Nach verbreiteter Lehrmeinung sind die Komponenten zweiter Ordnung klanglich als eher harmlos einzustufen; allenfalls sorgen sie für einen „warmen" Klangeindruck. Im Gegensatz dazu stehen die Komponenten dritter Ordnung, die sich durch „scharfen"/ „unangenehmen" Klang bemerkbar machen.
Die Angabe für die Klirrfaktoren erfolgt i.d.R. in %. Daher folgt hier eine kurze Auflistung von bereits umgerechneten Dämpfungswerten:

- 1db = 89%
- 5db = 56%
-10db = 31%
-15db = 18%
-20db = 10%
-25db = 5,5%
-30db = 3%
-35db = 1,8%
-40db = 1%
-45db = 0,56%
-50db = 0,32%

Als Beispiel soll die Messung des RCF N350 auf der letzten Stufe (vgl. S. 26) betrachtet werden.
Bei ~1,1kHz zeigt dort die Grundwelle einen Pegel von ca. 123dB SPL an. Die Komponenten zweiter und dritter Ordnung liegen jeweils darunter. Abzulesen sind dort in etwa K2 = -18,5dB und K3 = -27dB.
Die Gesamtverzerrungen liegen in diesem Bereich also schon recht hoch und mit einem Wert von >3% des kritischen K3 in einem nicht mehr akzeptablen Bereich. Besonders interessant wird die Entwicklung der Gesamtverzerrungen immer dann, wenn sich der relative Abstand zur Grundwelle bei erhöhter Leistungszufuhr zunehmend verringert, da dies z.B. auf Kompressionseffekte mechanischer oder

elektrotechnischer Art hindeuten könnte.

Durch die Diskussion angeregt, wurde besonderes Augenmerk auf den Vergleich von 18Sound ND1460 und BMS 4594 gelegt. Bei letzterem gibt es eine Besonderheit zu beobachten: der Treiber ist, anders als die Konkurrenzmodelle, koaxial aufgebaut. Ein Mitteltöner mit 3,5"-VC und ein Hochtöner mit 1,75"-VC arbeiten hier auf eine gemeinsame Schallführung. Jedoch ist für den sinnvollen Betrieb eine Frequenzweiche erforderlich, die den einzelnen Lautsprechern den Übertragungsbereich zuweist, für den sie konstruktiv geeignet sind und sie an den Rändern dazu entsprechend bedämpft, was insbesondere der Belastbarkeit und den Verzerrungen zu Gute kommt.
In diesem Fall wurde eine eigene Frequenzweichenschaltung entwickelt, bei der die Wege zusammen eine gute Summenfunktion bilden (vgl. Messungen weiter oben).



Nun zum Vergleich der Messwerte von 18Sound und BMS:
Beide Modelle bieten mit ca. 110dB/ 2,83V/1m eine hohe Empfindlichkeit, wobei hier die ungleichen Schwingspulen-impedanzen bei den Messungen nicht berücksichtigt wurden.
Korrigiert um die bei den unterschiedlichen Impedanzen aufgenommene Leistung (16Ohm zu 8Ohm), wäre der BMS 3dB lauter, da er nur die halbe Leistung des 18Sound aufnimmt.
Zudem zeigt letzterer den deutlich breitbandigeren Frequenzverlauf, was der Kombination mit angedachter 2x12"-Tiefmitteltoneinheit dank tieferer, unterer Grenzfrequenz nochmals zu Gute käme.
Das Ausschwingverhalten betreffend zeigt der 18Sound-Treiber mit Titanmembran die für metallische Werkstoffe typische, heftige Resonanz am oberen Übertragungsende, die in etwa 30 Perioden bei 14-15kHz beträgt.
Im Gegensatz dazu fällt die obere Resonanz des Hochtöners im BMS-Koax etwas günstiger aus, zeigt sie doch nur knapp 20 Perioden des Nachschwingens.

Dafür sind weitere, verzögerte Ausschwingvorgänge, die schon bei 6-7kHz beginnen, zu beobachten. Dies korreliert mit der Einsatzfrequenz des 1"-Hochtöners in der Koaxialanordnung und deutet somit auf ein insgesamt problematisches Verhalten dieses Treibers hin. Wahrscheinlich ist der Grund dafür in der speziellen Schallführung innerhalb des Koax zu suchen, denn vergleichbare Treiber (wie z.B. BMS 4552, siehe S. 19) zeigen kein derartig breitbandiges Nachschwingen.
Der BMS-Mitteltöner in der Koaxialanordnung gibt hingegen kaum Anlass zur Kritik.

Betrachtet man nun die Verzerrungsmessungen, so fällt beim 18Sound ND1460 zunächst die hohe Klirrneigung auf seiner Resonanzfrequenz bei ca. 700Hz auf, wo bei höherem Pegel sogar die Grundwelle überschritten wird.
Dies ist für den praktischen Einsatz aber nicht relevant, weil diese Stelle weit außerhalb des vorgesehenen Übertragungsbereiches liegt und über eine Frequenzweiche ausreichend bedämpft würde.

Der Verlauf der Kurven zeigt darüber hinaus keine Auffälligkeiten und folgt zudem der Pegelsteigerung der Grundwelle recht linear.

Nun zum BMS 4594:
Dessen Resonanzfrequenz des Mitteltöners liegt hier bei ca. 350Hz, was ebenso unproblematisch ist wie die zuvor beschriebene Stelle des 18Sound-Modells.
Der Treiber zeigt bei geringer Eingangsleistung nur sehr geringe Verzerrungen, die an der Grenze des in diesem Versuchsaufbau Messbaren liegen.
Das Niveau verschiebt sich allerdings bei Pegelanhebung. Besonders fallen dabei das insgesamt stark erhöhte Verzerrungsniveau des Hochtöners (oberhalb von 6kHz) sowie der Bereich zwischen 2-4kHz auf. In letzterem ist zu beobachten, dass sich der Klirr im Verhältnis zur Anhebung der Grundwelle nicht-linear entwickelt. Auffällig ist eine starke Ausprägung des „unangenehmen" K3 in diesem Bereich, was als besonders kritisch zu bewerten ist, da das menschliche Ohr bei diesen Frequenzen das größte „Lautheitsempfinden" aufweist (vgl. Sengpiel 1994).

4.2.3 Kritik und Ergebnisse

Es bleibt durch den Vergleich mit der zweiten Messreihe zu vermuten, dass während der ersten Messreihe ein Filter im Signalweg war (z.B. ein serieller Kondensator), was im Nachhinein aber ärgerlicherweise nicht mehr nachzuvollziehen ist.
Anders ist aber nicht zu erklären, warum beispielsweise die bei 700Hz liegende Grundresonanz des 18Sound ND1460 in der ersten Messreihe so gut wie gar nicht, in der zweiten jedoch sehr deutlich angeregt wurde.

Darüber hinaus wurde in der Forumsdiskussion kritisiert, die Orientierung der einzelnen Stufen der Klirrmessungen anhand der Klemmenspannung wäre nicht zielführend, lediglich die Konzentration auf die maximal erreichbaren Schalldrücke wäre in diesem Zusammenhang von Interesse. Erschwerend käme hinzu, dass die unterschiedlichen Nominalimpedanzen der Testobjekte hierbei nicht berücksichtigt wurden und somit Treiber mit 8Ohm Anschlusswert effektiv höher belastet wurden als die Treiber mit höheren Impedanzen.
Der systematische Fehler hierbei muss anerkannt werden. Nichtsdestotrotz ist es auch im Nachhinein noch möglich, einzelne Modelle anhand der Schalldrücke bei einer bestimmten Frequenz objektiv miteinander zu vergleichen.

Auf der Grundlage der in diesem Abschnitt gesammelten Daten entschied man sich nach längeren Diskussionen im Forum für die Wahl des 18Sound ND1460-Treibers, der nicht nur durch gute Messwerte, sondern auch durch geringes Gewicht und relativ günstigen Preis zu überzeugen wusste.
Damit war der Weg für das erste Prototypengehäue geebnet, welches der gewählten Hochtonbestückung entsprechend nach dem Entwurf #2 (vgl. Abschnitt 3.1) angefertigt wurde.

4.3 Vergleichsmessungen der Tiefmitteltöner

Wie zuvor erwähnt, konnte nach der Selektion eines Hochtontreibers auch ein

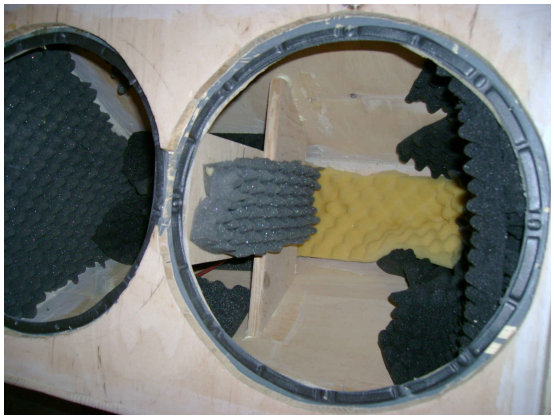
Gehäuse zur Verfügung gestellt werden, welches die Vermessung von mehreren, potentionellen 12"-Tiefmitteltönern ermöglichen sollte.
Das Gehäuse wurde aus leichtem Massivholz mit ~15mm Wandstärke, im Bereich der Schallwand mit ~30mm Stärke, aufgebaut. Ausnahmen bildeten Deckel- und Bodenteile, die aus mehrschichtigem Multiplex in ebenso 15mm Stärke bestanden.
Die 12"er wurden durch Ausfräsungen um 15mm eingelassen, so dass ihre Fronten in einer Flucht mit der äußeren Schallwandoberfläche lagen.
Das Volumen für die „Tieftonabteilung" wurde durch ein Trennbrett nach oben hin abgeteilt, so dass dort ca. 73l verblieben. In der Kammer wurde, um stehenden Wellen und Schallaustritt durch die Membranen selbst vorzubeugen, mit Noppeschaumstoffen gearbeitet. Entsprechend der zu erwartenden Wellenlängen, die es zu bedämpfen galt, wurde eine besonders dicke Lage an der Boden- und Trennbrettinnenseite befestigt.

Bilder des Gehäuses – hier im noch unbedämpften Zustand...





...und hier mit Dämpfungsmaßnahmen in der Tieftonkammer. Das Hochtonabteil blieb unbedämpft.




In Folge dessen konnten die Testmaterialien für diesen Teil des Vergleichs gesichtet werden. Die zur Verfügung stehende Menge waren mit lediglich drei Paar insgesamt

leider kein repräsentativer Spiegel des Marktes, aber in Ermangelung weiterer „Spender" musste man sich in diesem Fall damit abfinden.

Übersicht über die Testchassis:

Bezeichnung	Nominelle Impedanz (in Ω)	Spulen-Ø (in Zoll)	Membran-fläche in cm²	Magnet-material
18Sound 12ND710	8	3	531	Neodym
B&C 12NDL76	8	3	522	Neodym
Eminence Kappa12	8	3	519,5	Ferrit

Die Modelle liegen alle in einer ähnlichen Liga; mittlere Gesamtgüte, Schwingeinheiten zwischen 40 und 50g Gewicht und Spulen mit 3"-Durchmesser. Weitere technische Differenzen sollen im Folgenden noch erörtert werden.

Verarbeitungsunterschiede zeigen sich vor allem zum Chassis von Eminence, das mit einfachem Blechkorb und Ferritmagnet ausgestattet ist und dem darüber hinaus, neben einer Polkernbohrung, zusätzliche Belüftungsmaßnahmen fehlen. Die beiden Konkurrenzmodelle verfügen jedoch über derartige Konstruktionsmerkmale und sind zudem mit leichten Druckgusskörben sowie Neodymantrieben ausgestattet.

4.3.1 Phase I - Abstrahlungen

Primäres Erkenntnisinteresse der ersten Versuche mit den Tiefmitteltönern war in diesem ersten Schritt, herauszufinden, ob diese eine unterschiedliche Abstrahlung an den Tag legen würden – oder nicht.



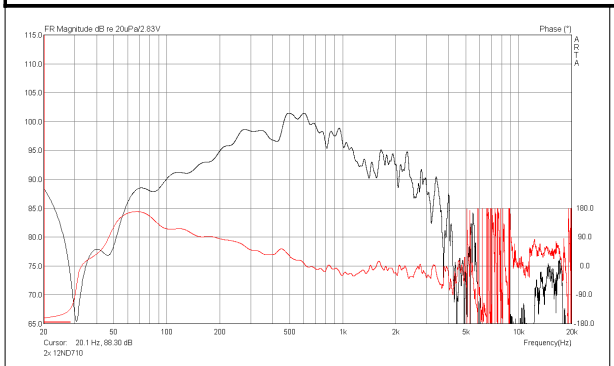
Zu diesem Zweck wurden die Chassis in das Prototypengehäue gesetzt und mit Holzschrauben befestigt.
Um die Abstrahlung in der horizontalen Ebene zu erfassen, musste die gesamte Box lediglich auf einen Drehteller gestellt werden; das Mikrofon des ARTA-Messsystems lag auf der 0°-Achse zum Abstellort in 4m Entfernung auf dem Boden.
Gemessen wurde auf einer Wiese mit leicht unebenem Boden.
Für die Messung der vertikalen Abstrahlung musste die Box quer auf den Drehteller gelegt werden, was sich durch die Gewichtsverteilung innerhalb des Gehäuses als recht instabile Angelegenheit herausstellte, aber durch den Einsatz mehrerer Spanngurte gelöst werden konnte.

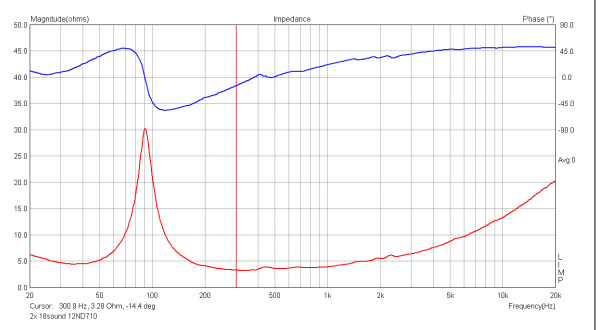
Da sich die Abstrahlungsmessungen immer nur auf die Pegelveränderungen von der 0°-Achse aus betrachtet beziehen, war hierfür keine Kalibrierung des Messsystems auf absolute Pegel nötig.
Großen Einfluss hat hingegen eine eventuelle „nichtzentrische Positionierung" (vgl. Weber 2007: S. 1) des Messobjektes, was für den Fall des großen 2x12"-Gehäuses aus praktischen Gründen gegeben war, jedoch durch nachträgliche Korrektur jeder einzelnen Winkelmessung aufgearbeitet werden konnte.
Der tatsächlich „korrekte" Rotationspunkt (im Sinne des „akustischen Zentrums") muss dabei nicht zwangsläufig auf Schallwandebene zu suchen sein. Vielmehr wird dieser von der relativen Länge des Gehäuses, den Schallwandabmessungen und dem Durchmesser des Tieftonchassis beeinflusst und wird somit an einem Punkt vor dem eigentlichen Gehäuse zu suchen sein (vgl. Vanderkooy 2006).

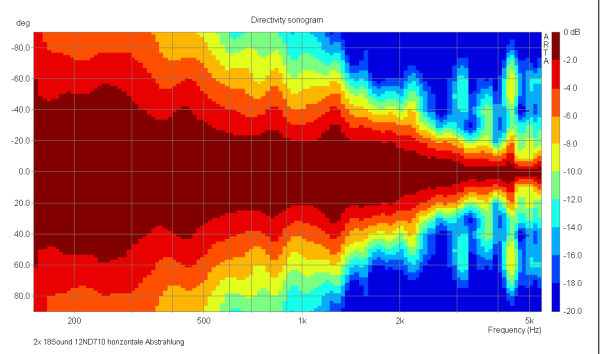
Die Messergebnisse dieser ersten Testphase werden im nun Folgenden tabellarisch präsentiert; gezeigt werden dabei:

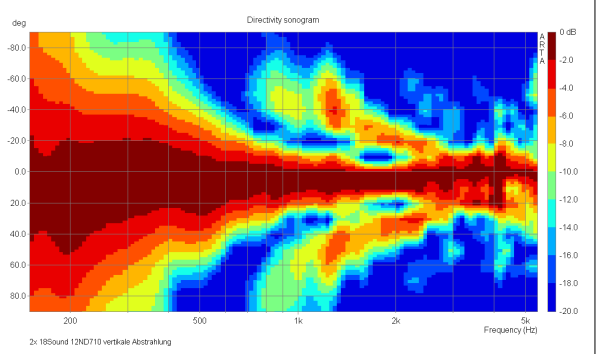
- Frequenz- und Phasengang mit Bezug auf das „akustische Zentrum"
- elektrische Impedanz und Phase
- Abstrahlung horizontal
- Abstrahlung vertikal

2x 18Sound 12ND710

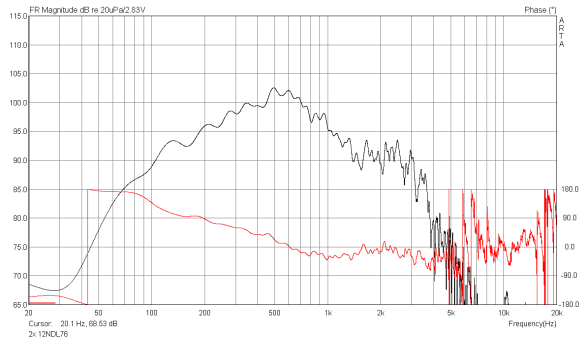


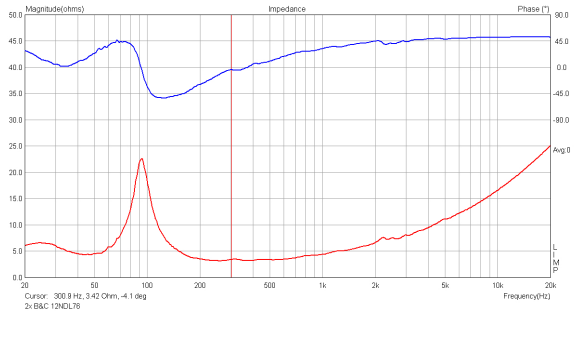


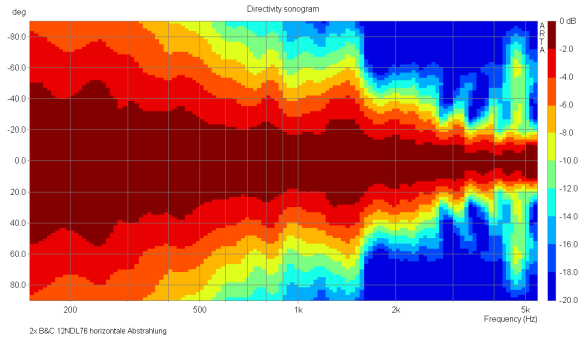


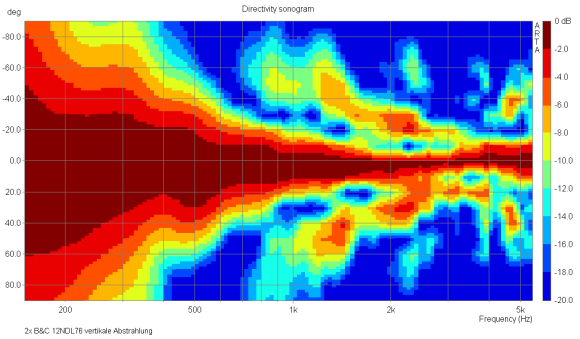


2x B&C 12NDL76

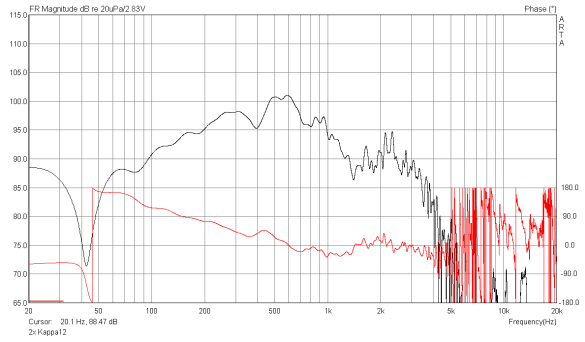


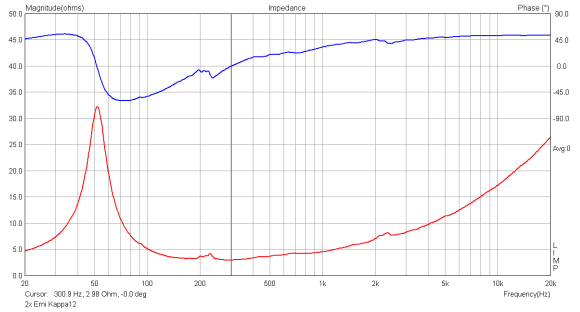


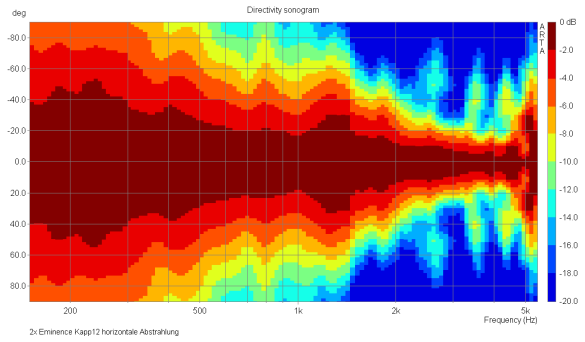


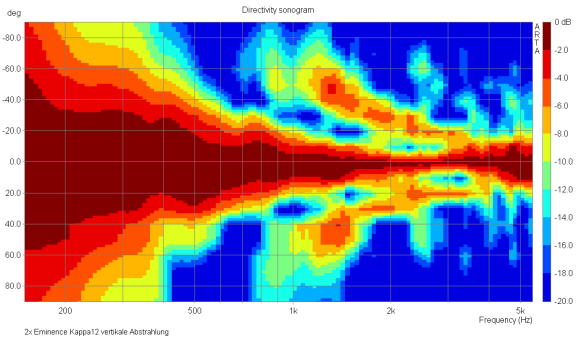


2x Eminence Kappa12









Zur Bewertung der Messungen:

Die horizontale Abstrahlung betrachtend, fallen zwischen den drei Testpaaren kaum Unterschiede auf. Die -6dB-Linie zu Grunde legend, sind jeweils etwa 100° bei 1kHz und 75° bei 2kHz abzulesen. Nach unten hin weitet sich der Abstrahlwinkel erwartungsgemäß auf.
Für die vertikale Abstrahlung sind ebenso kaum Abweichungen unter den Chassis festzustellen. Im Schnitt sind 40° bei 1kHz und extrem enge 20° bei 2kHz abzulesen. Darüberhinaus kommt es zur Ausbildung von Nebenkeulen zwischen 1,5 bis 4kHz, was durch den Betrieb von zwei Schallquellen im selben Frequenzbereich mit entsprechendem, mechanischen Versatz als unvermeidlich zu bezeichnen ist.

Als weiterer, bemerkenswerter Punkt scheint der starke Abfall >500-600Hz bei den Frequenzgangmessungen, der in dieser Form unerwartet ausfiel.
Wahrscheinlich ist die Ursache dafür in der Groundplane-Positionierung des Mikrofons auf einer Wiese zu suchen. Der Untergrund ist hier nicht mehr ausreichend schallhart und absorbiert den einfallenden Schall mit zunehmender Frequenz. Zudem war der Untergrund „natur"-gemäß nicht völlig eben, so dass für das Mikrofon auch ein veränderter Frequenzgang unter Winkel in Frage kommt.
Im Prinzip sind diese Effekte für die Messung einer (rein relativ bewerteten) Abstrahlung uninteressant, wenn sie auch in ihrer Intensität unerwartet waren.

Bei den gemessenen Impedanzen fällt teilweise eine zwar recht gut bedämpfte, aber sichtbare Resonanz unterhalb der hohen Spitze der Einbauresonanz auf. Vermutlich geht diese auf Gehäuseundichtigkeiten zurück.
Auch dieser Punkt ist für die Messung der Abstrahlungen eher nebensächlich, da der Bereich unterhalb von 150Hz nicht mehr erfasst wurde.

Insgesamt ist festzuhalten, dass die Abstrahlung ganz offensichtlich nicht durch Feinheiten in der herstellerspezifischen Membrangestaltung, sondern vielmehr von den geometrischen Größenordnungen (Länge und Breite der Strahlerfläche, zunehmende Bündelung mit steigender Frequenz...) abzuhängen scheint.
Dafür sprechen die hier gemessenen, wirklich sehr ähnlichen aussehenden Isobarenverläufe.

4.3.2 Phase II – vollständige Vermessung

Im folgenden Teil soll die Fortsetzung der messtechnischen Untersuchung der im vorherigen Abschnitt erwähnten 12"-Tiefmitteltöner beschrieben werden.
Zunächst soll dafür eine genaue Schilderung des Messaufbaus erfolgen.

Das Testgehäuse wurde von innen mit Weißleim an einigen „verdächtigen" Stellen nachbehandelt sowie das Dichtband zu den Chassis hin erneuert, da bei den im vorherigen Abschnitt gemessenen Impedanzen unterhalb der Resonanzfrequenz einige Störungen zu beobachten waren (die Kurven sollten im Idealfall in Richtung des unteren Frequenzbereiches auf den Wert des Gleichstromwiderstandwertes hin auslaufen).
Vorher wurden alle Chassis bei ~3,5-4mm Amplitude für genau 10h eingespielt; es

folgten jeweils Abkühlungsphasen von min. 24h Dauer bis zu den Messungen.

Diese wurden im Kellerraum eines größeren Clubs mit (schallhartem) Betonfussboden durchgeführt, der ob seiner Größe allgemein recht günstige Messbedingungen bot, was sich u.A. darin äußerte, dass das Zeitfenster auf bis zu 16ms ausgedehnt werden konnte, ohne relevante Reflexionsanteile die Messung verfälschen zu lassen.
Für die Messung der Frequenz- und Phasengänge wurden die Chassis mit einem Sinus-Sweep mit einer Sequenzlänge von 256k angeregt. Die Abtastrate lag bei 48kHz.
Bei den Klirrmessungen wurde die Samplerate des Messsystems zu Gunsten einer höheren Auflösung im Tieftonbereich auf 16kHz reduziert, was die Dauer einer solchen Messung deutlich erhöhte und die obere Grenzfrequenz gemäß des Nyquist-Shannon-Abtasttheorems auf 8kHz begrenzte.

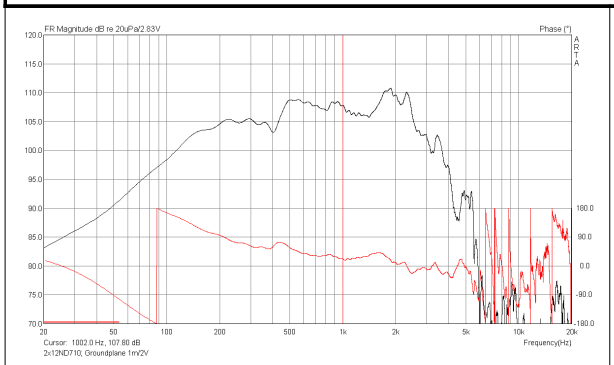
Da für die Messungen der 12"-Tiefmitteltöner vor allem auch der untere Frequenzbereich von Interesse sein sollte, wurde die Testbox mit der langen Seite auf den Boden gelegt, so dass beide Chassis den selben Abstand zu diesem hatten. Das Mikrofon, in diesem Fall ein MV201 mit daran montierter MK221, wurde in 1m Entfernung genau zwischen den Lautsprechern auf den Boden gelegt.
Zu beachten ist, dass diese Aufstellung durch Spiegelung an schallharten Oberflächen im Vergleich zu einer Vollraummessung den Pegel theoretisch um +6dB anhebt (vgl. D'Appolito 2005: S. 169 ff.).

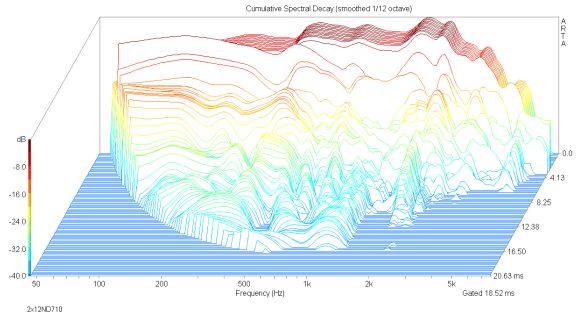
Die sonstigen Gerätschaften entsprechen den bereits beschriebenen Messaufbauten, jedoch wurde diesmal eine andere Endstufe (Palmer LX3000, 2x 920W @ 4Ohm) verwendet, um die 12"er mit möglichst ausreichendem Headroom bis an ihre Leistungsgrenzen aussteuern zu können.
Die Testchassis wurden ohne Filter und in paralleler Verschaltung angesteuert, so dass man es mit einem nominellen 4Ohm-System zu tun hatte.

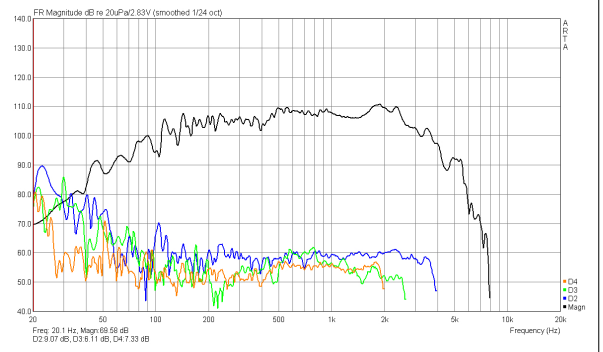
Nun zu den Messungen; gezeigt werden dabei in tabellarischer Form:

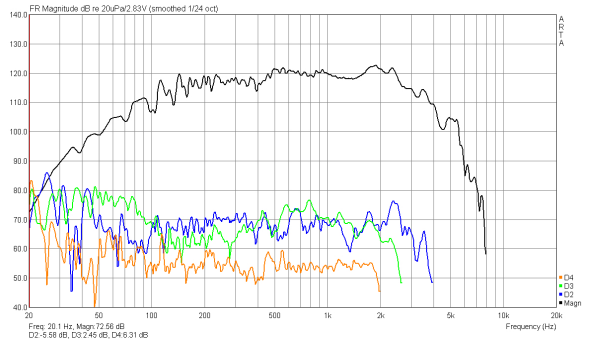
- Amplitudenverlauf @ 1m/2V und akustische Phase mit Bezug auf das akustische Zentrum
- kumulatives Zerfallsspektrum
- Klirrmessungen bis ~130dB SPL

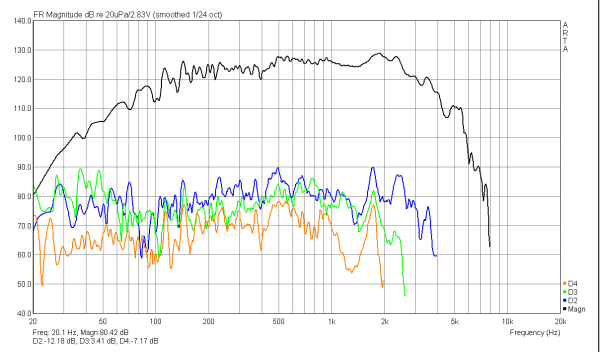
2x 18Sound 12ND710

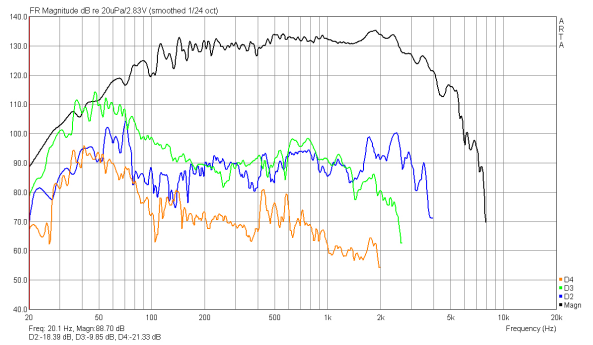




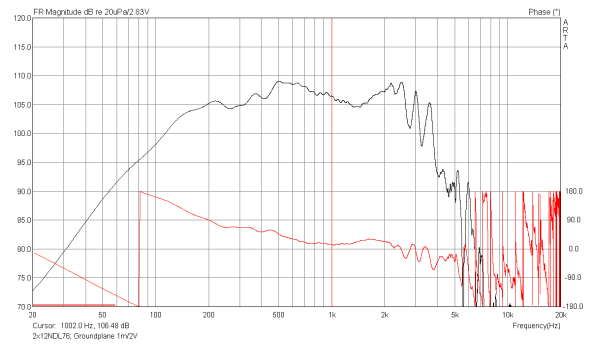


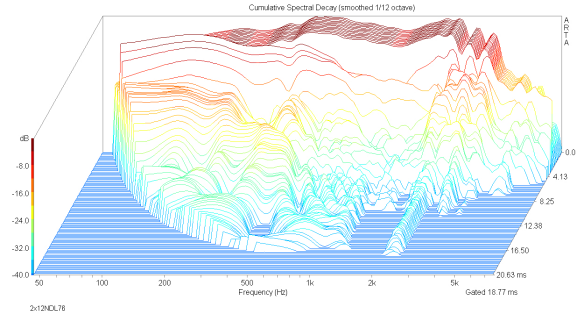


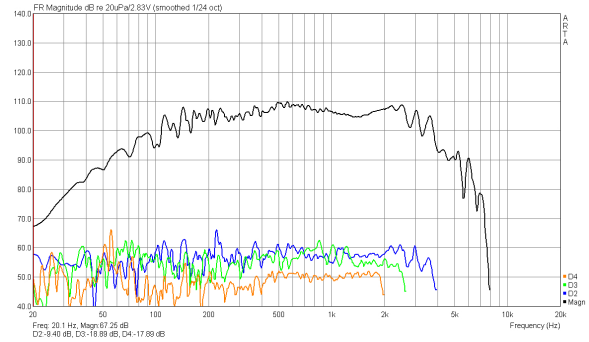


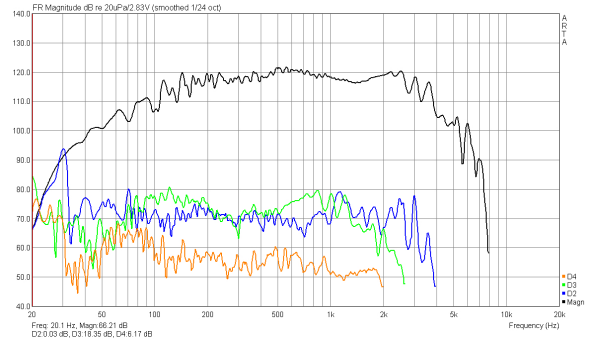


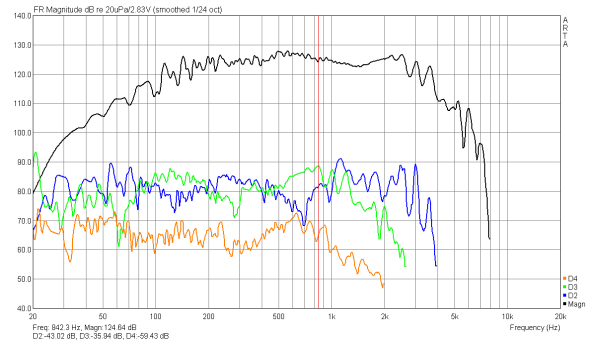
2x B&C 12NDL76

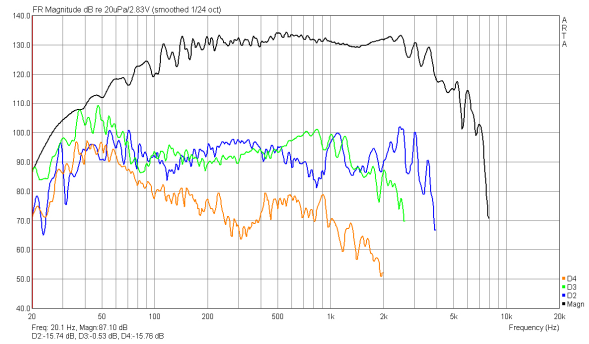




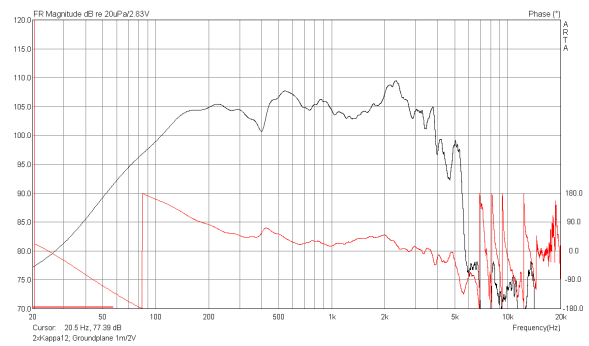


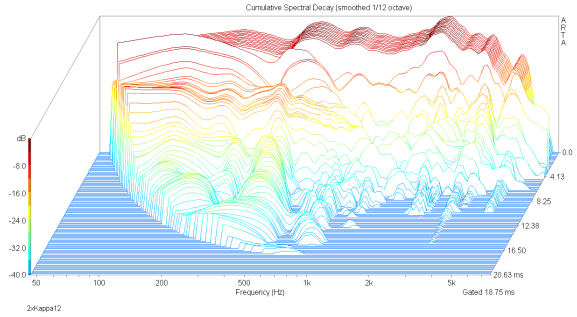


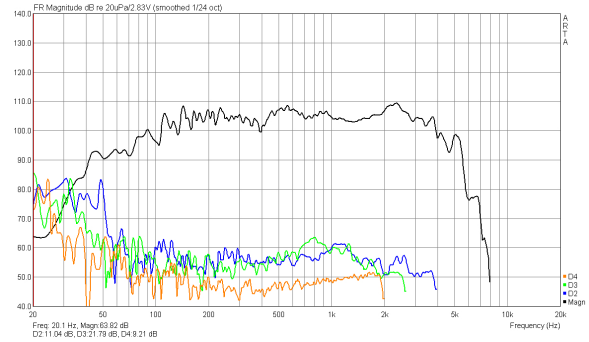


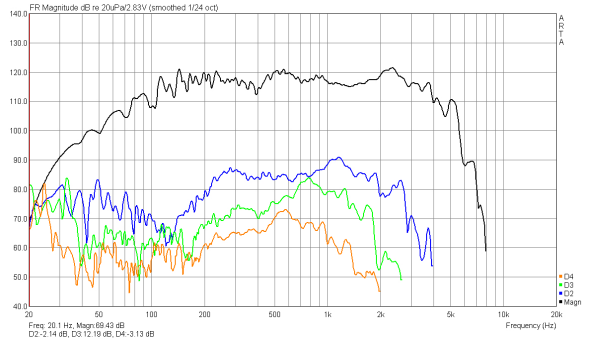


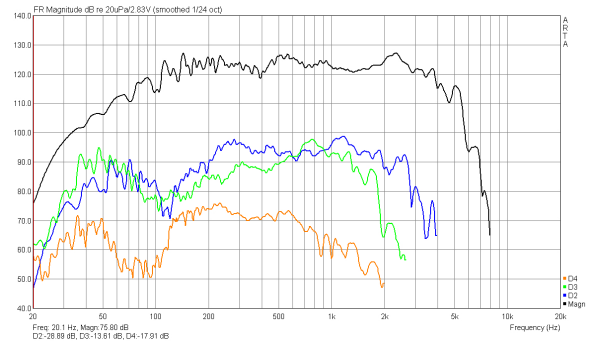
2x Eminence Kappa12

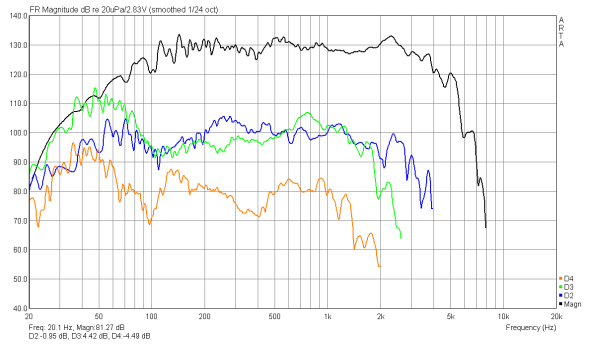








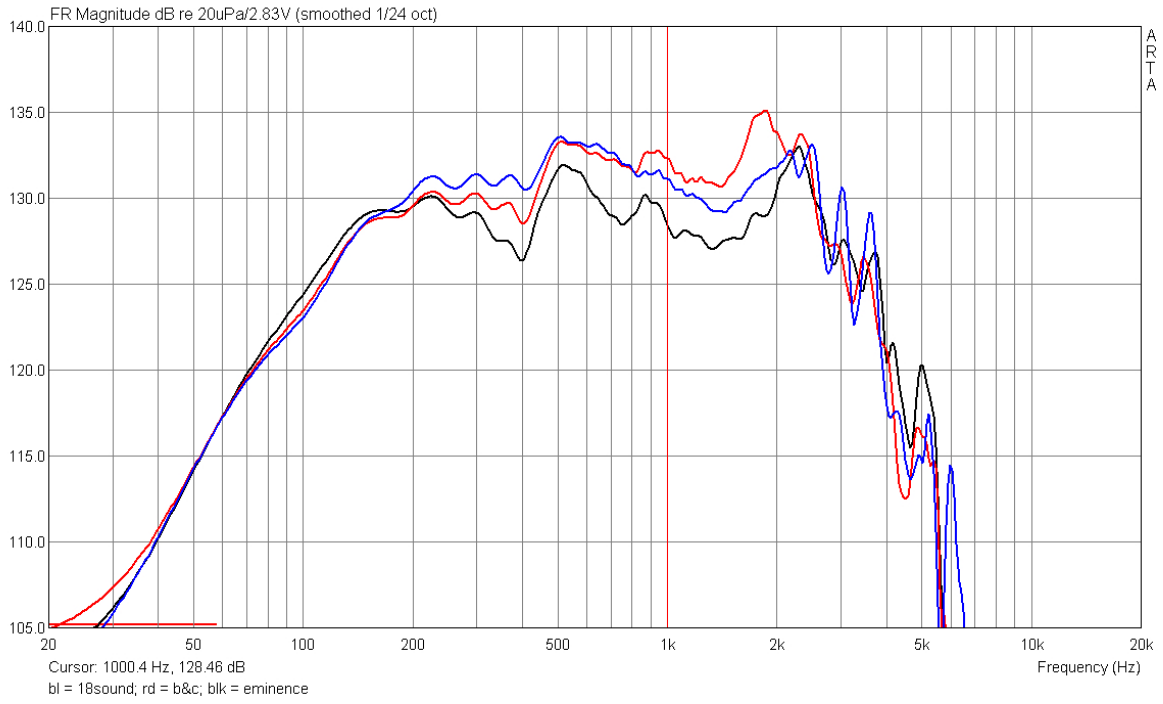




Zur Auswertung der Messungen:

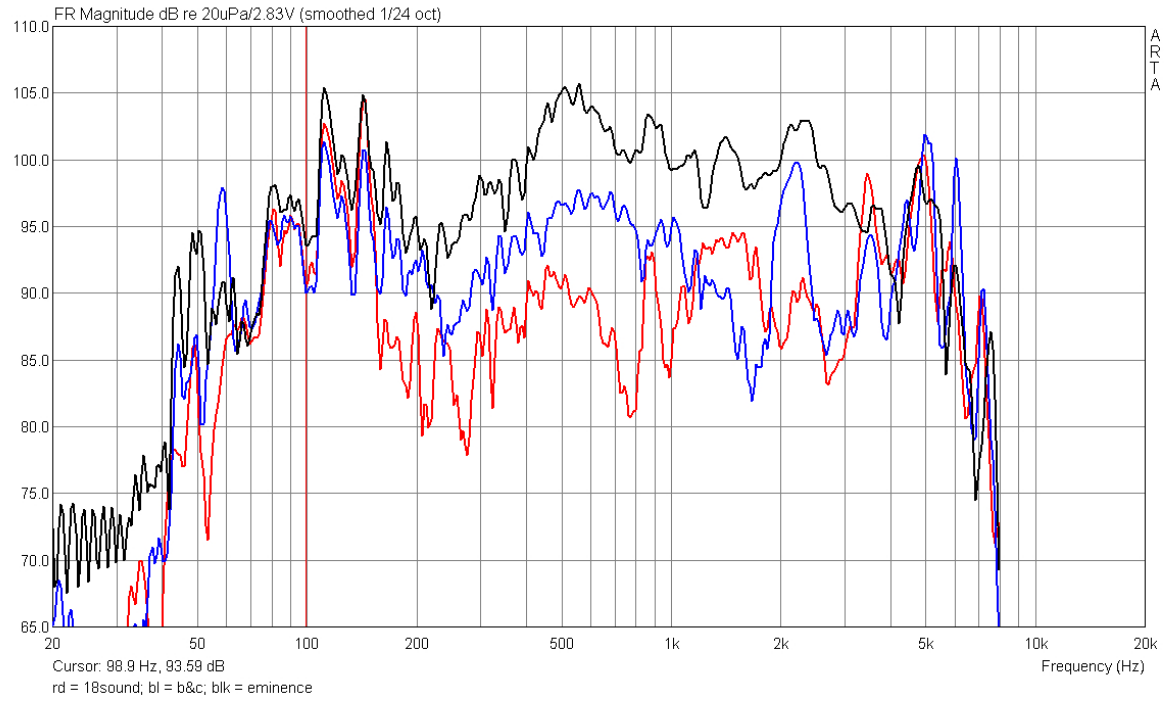
Die Frequenz- und Phasenverläufe zeigen allesamt eine kleine Anomalie im Bereich um die 450Hz. Aller Wahrscheinlichkeit nach dürfte es sich dabei um eine Stehwelle innerhalb der Tieftonkammer handeln, die noch nicht ausreichend bedämpft wurde. Diese Stelle war teilweise auch schon bei den ersten Messungen mit den 12"ern im vorangegangenen Abschnitt zu beobachten.

Die 18Sound 12ND710 zeigen einen vergleichsweise hohen Wirkungsgrad, welcher die direkten Konkurrenzmodelle von B&C oberhalb von 800Hz um bis zu 2dB übertrifft.
Im Gegensatz dazu liegt die Empfindlichkeit der B&C 12NDL76 unterhalb von 500Hz und bis in den Grundton hinein um etwa 2dB höher als die der 18Sound-Modelle.
Die Eminence Kappa12 liegen bis 200Hz mit den anderen Testobjekten noch gleich auf, fallen aber oberhalb davon relativ stark ab, um gleichmäßige 2-3dB Abstand nach unten einzuhalten.

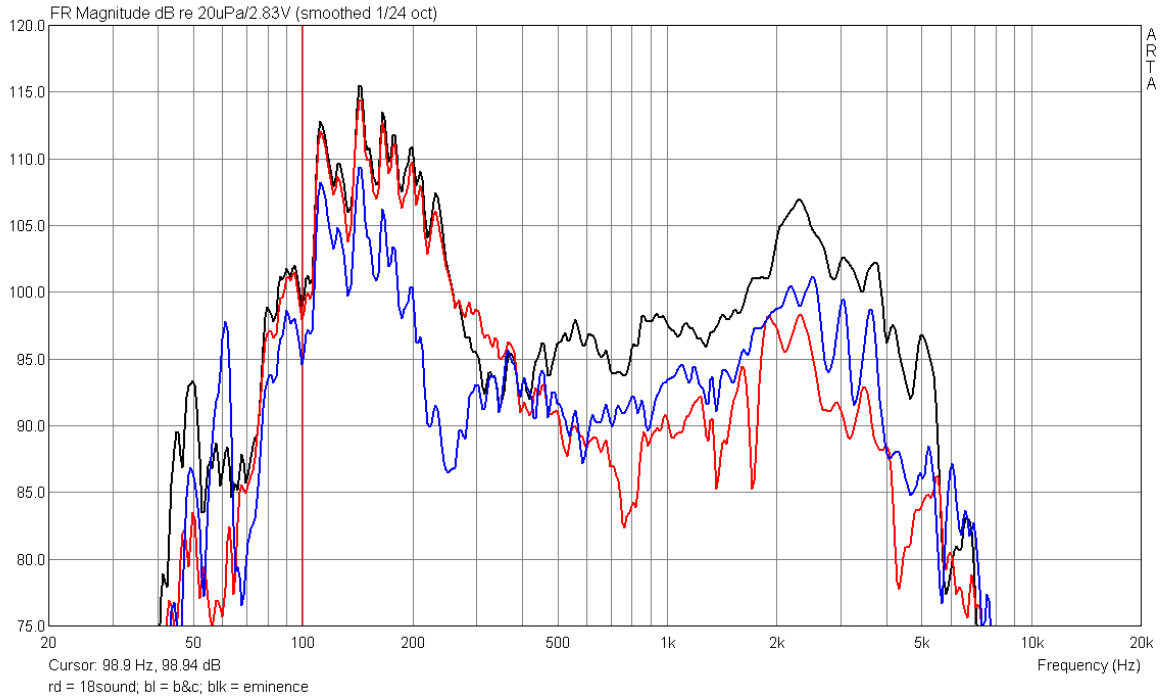


Das Ausschwingverhalten betrachtend, könnte man zunächst annehmen, dass sich die Eminence-Chassis in den oberen Mitten besonders günstig verhalten würden. Jedoch muss man sich an dieser Stelle auch die Grundwelle ansehen, die genau in diesem Frequenzbereich (1...2kHz) einen kleinen Durchhänger aufweist und somit dementsprechend weniger Pegel, auch im Zerfallsspektrum, „ankommt".
Nichtsdestotrotz sieht das Verfallsspektrum dem des 18Sound-Chassis nicht unähnlich; das schnellste Ausschwingen im unteren Mittelton (0,4-1kHz) wird von den B&C 12NDL76 erreicht, wobei die Unterschiede als eher geringfügig zu bezeichnen sind.
Die oberen Membranresonanzen fallen bei letzterem dafür am kräftigsten aus, zu erkennen am ~12ms andauernden Ausläufer knapp oberhalb von 2kHz. Die Resonanzen der beiden Konkurrenzmodelle liegen zwar in einem ähnlichen

Frequenzbereich, scheinen aber besser bedämpft.
Bei den Verzerrungsmessungen fällt zunächst auf, dass diese generell unterhalb von 200Hz stark vom Raum beeinflusst scheinen. Für einen relativen Vergleich ist dieser Mangel allerdings hinnehmbar, auch wenn seine absolute Genauigkeit wie gesagt fragwürdig ist.
Für den Vergleich wurden die einzelnen Klirrkomponenten nochmals übereinandergelegt. Da dabei jeweils die nötigen Zeitfenster gesetzt wurden, sehen die Kurven teilweise etwas anders aus als in den oben gezeigten Darstellungen.
Betrachtet werden sollen im Folgenden nur die Messungen der höchsten Pegelstufe, die bei ca. 130dB SPL lagen.
Bei den dortigen K2-Kurven zeigen die Eminence-Chassis die allerhöchsten Werte, die im Schnitt bei -30dB in Relation zur Grundwelle liegen.
Gute 10dB niedriger liegt das Verzerrungsniveau bei den B&C 12"ern, das aber von den 18Sound-Modellen um weitere 5dB unterboten werden kann – mit einer Ausnahme im Bereich zwischen 1-2kHz, wo die B&C´s etwas geringere Werte zeigen.
Generell lässt sich für alle Testobjekte eine Senke im K2-Verlauf zwischen 150Hz bis 400Hz ablesen.



Bei den K3-Werten zeigen 18Sound- und Eminence-Chassis bis ca. 300Hz einen sehr ähnlichen Verlauf. Die Spitzenwerte liegen bei ca. 150Hz und betragen in etwa -20...25dB. Ab 400Hz laufen die Kurven der beiden Chassispaare zu Ungunsten der Eminence-Chassis auseinander, wohingegen die 18Sound-12"er ab dort die geringsten Verzerrungen im gesamten Testfeld zeigen.
Im Bereich <400Hz zeigen die B&C 12NDL76 die deutlich geringsten K3-Werte.
In Relation zu den 18Sound 12ND710 wird bis ca. 900Hz ein ähnlich guter Verlauf erzielt, der oberhalb davon allerdings etwas ansteigt und stärkere Verzerrungen an den Tag legt.

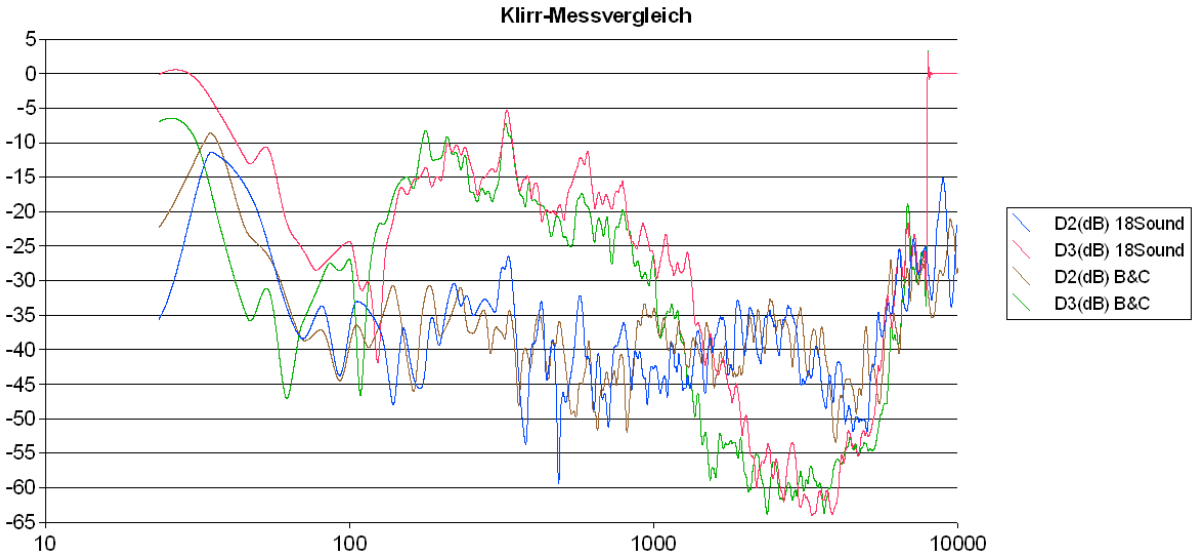


Zur Bewertung:

Aufgrund der vergleichsweise hohen Pegelfestigkeit der B&C 12NDL76 im unteren Frequenzbereich und des relativ geringen Abstands zu den (sehr guten!) 18Sound-Konkurrenten im für diese Box anvisierten Übertragungsbereich (Tiefmittelton bis max. 1...1,3kHz) konnten die B&C-Modelle die Mehrzahl der Diskussionsteilnehmer, den Autor eingeschlossen, überzeugen.
Auch der verhältnismäßig günstige Preis und solide Verarbeitung der Chassis trug zu dieser Entscheidung bei.
Die nur etwa halb so teuren Modelle von Eminence kamen aufgrund durchgängig erhöhter Verzerrungswerte und des recht hohen Gewichts für diese Anwendung nicht in Frage.

Nicht verschwiegen werden soll an dieser Stelle, dass dem zuvor beschriebenen Test eigentlich noch ein weiterer vorausging, der aber aufgrund eines schwer zu klärenden Fehlers keinen wesentlichen Erkenntnisgewinn zu bringen schien.
Kurz gesprochen wurden dort stark erhöhte K3-Werte gemessen, die aber keinem Teil der Messkette eindeutig zugesprochen werden konnten. Nach intensivem Einwobbeln der Chassis konnten bei den folgenden Messungen keine derartigen Effekte mehr festgestellt werden, wie die Dokumentation dieses Abschnitts gezeigt hat.

Die folgende Grafik zeigt einen Vergleich dieser beschriebenen Messungen des 18Sound- und B&C-Chassis bei jeweils 30V Klemmenspannung.
Aus Platzgründen wurde aber, wie erläutert, auf eine ausführlichere Dokumentation dieses eigentlich „vorangegangenen" Abschnitts verzichtet. Dieser steht aber natürlich noch online im PA-Forum zur Einsicht bereit.



4.3.3 Kritik und Ergebnisse

Bei der Umsetzung der Messungen unterliefen diverse Fehler, die im Folgenden kurz angeführt werden sollen:

- Fehlen von TSP-Messungen
- Fehlen von Nahfeldmessungen zur genauen Erfassung des Bereichs <150Hz
- Fehlen von Messungen der Intermodulationsverzerrungen
- Fehlen von Messungen zur Ermittlung der linearen Auslenkung

Einige dieser Kritikpunkte werden im späteren Verlauf dieser Dokumentation für die weiterführenden Messungen noch Berücksichtigung finden, andere sind aufgrund fehlender technischer Ausstattung bis dato nicht umsetzbar.
In einer eventuellen zweiten Auflage dieser Dokumentation sollte es in dieser Hinsicht inhaltliche Erweiterungen geben.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die messtechnische Untersuchung der drei verschiedenen 12"-Tiefmitteltöner durch den direkten Vergleich der gesammelten Daten einen für die geplante Anwendung besonders geeigneten Kandidaten herausstellte. Insofern wurden die Ziele dieses Teilabschnitts wohlbegründet erreicht. Mit der nun vollständig vorhandenen Bestückung im Hoch- wie auch im Tieftonteil konnte die Phase der Komponentenwahl als abgeschlossen betrachtet werden.

5. Frequenzweichenentwicklung

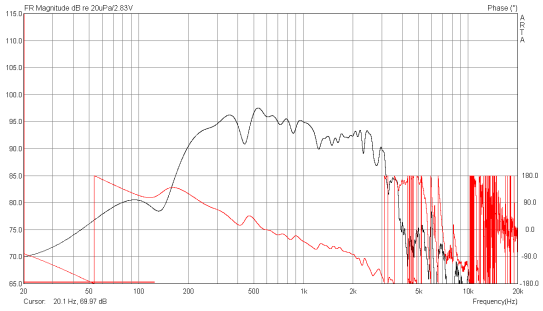
Im folgenden Abschnitt soll die Entwicklung der passiven Frequenzweiche für die Kombination aus 2x B&C 12NDL76 und 18Sound ND1460 auf XT1464-Horn dokumentiert werden.

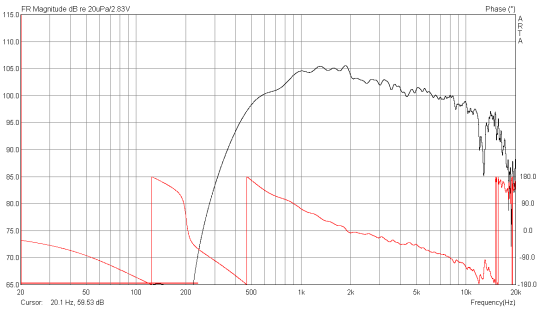
Die durch umfangreiche Messreihen abgesicherte Auswahl der Chassis musste nun praktisch umgesetzt werden, indem ihnen durch passive Filter diejenigen Übertragungsbereiche zugewiesen werden sollten, für die sie konstruktiv geeignet schienen. In der Regel ist die Auslegung der Filter als eigentlich klangentscheidend zu betrachten und nimmt daher auch einen Großteil der Entwicklungsarbeit ein. Im vorliegenden Fall musste die Frequenzweiche zudem noch den recht großen Laufzeitversatz von ~25cm berücksichtigen, der durch die schiere Länge des Hochtonhorns sowie der treiberinternen Schallführung zu Stande kam (vgl. Abschnitt 3.1 bzw. 8).
Angesichts dessen wurde die Entwicklung von Beginn an mit Hinweis auf die besondere Schwierigkeit eines solchen Ausgleiches in passiver Form kommentiert, was, wie sich innerhalb dieses Abschnittes zeigen wird, nicht ganz unberechtigt war.

5.1 Erste Version

In den vorherigen Messreihen wurden wichtige Daten gesammelt, die für die ersten Entwürfe der Filterschaltung von großer Bedeutung sind.
So wurde in Abschnitt 4.1 das Abstrahlverhalten der Tiefmitteltöner erfasst und konnte in Relation zu den bereits im Vorfeld bekannten Isobaren des Hochtonhorns (vgl. Abschnitt 3.1) gesetzt werden. Die Übernahme würde demnach im günstigsten Fall im Bereich 1-1,5kHz liegen, um einen möglichst fließenden Verlauf ohne Unstetigkeiten zu erzielen. Generell ist eine möglichst früh einsetzende Bündelung mit konstantem Gradient für PA-Boxen wünschenswert (Stichwort: Constant Directivity).
In den Abschnitten 4.2.2 und 4.3.2 wurde das Klirrverhalten der Chassis und Treiber unter Last messtechnisch untersucht. Auch unter diesen Gesichtspunkten scheint eine Trennung im Bereich 1-1,5kHz sinnvoll bzw. ist für klanglich ansprechende Ergebnisse als dringend notwendig zu erachten. Die Filterflanken sollten dabei möglichst steil ausfallen, um einerseits die Resonanzgrate der Tiefmitteltöner bei ~2kHz und darüber hinaus zu bedämpfen, andererseits aber auch, um den Hochtöner nicht unnötig mit tiefen, energiereichen Frequenzen zu belasten, die ihn bei hohen Pegeln unter Umständen beschädigen könnten.

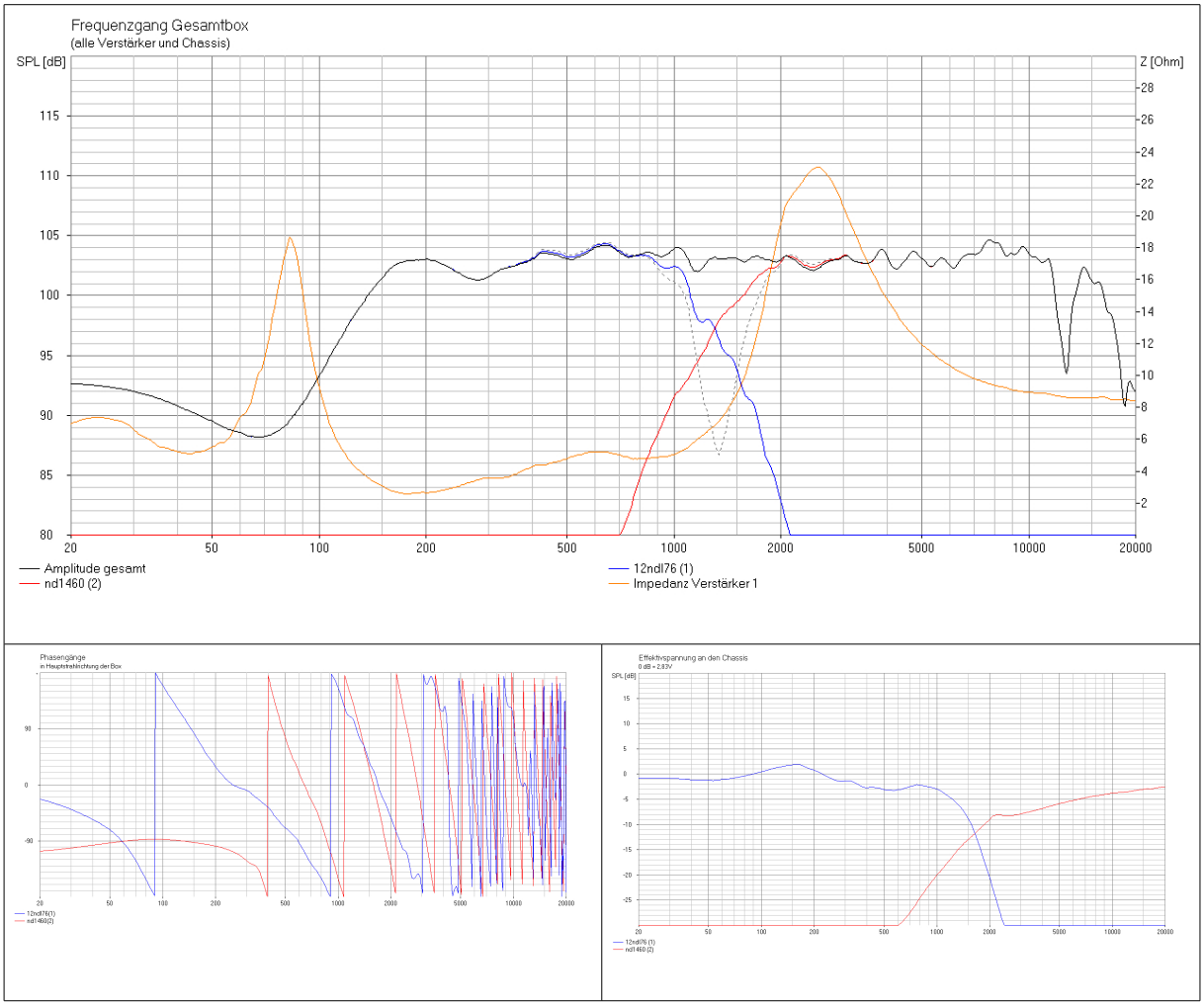
Bevor es an die ersten, hierfür nötigen Messungen ging, musste die gesamte Box mittels eines Stativs aufgestellt werden. Der Abstand zum Boden betrug in etwa 2m.
Es folgten Messungen der Chassis und des Treibers im unbeschalteten Zustand, wobei das Mikrofon in ca. 2m Entfernung stand und genau den Bereich zwischen oberem 12"er und Hochtonhorn anvisierte. Diese Position sollte als „Bezugsebene" für alle weiteren Messungen der Frequenzweichenentwicklung angenommen werden.





Obige Messungen zeigen die dabei gemessenen Amplitudenverläufe inklusive der dazugehörigen Phasengänge in ungeglätteter Form.
Mit den bereits bekannten Impedanzverläufen sowie den relativen Werten der tatsächlichen Schallentstehungsorte konnte nun ein Filtersimulationsprogramm mit den dafür benötigten Daten gespeist werden.

Nach einiger Zeit war eine vielversprechende Schaltung entworfen. Diese setzte sich aus einem 24dB-Tiefpass mit angeschlossener Impedanzentzerrung für den 2x12"-Teil sowie 18dB-Hochpass mit Spannungsteiler für den Hochtöner zusammen.

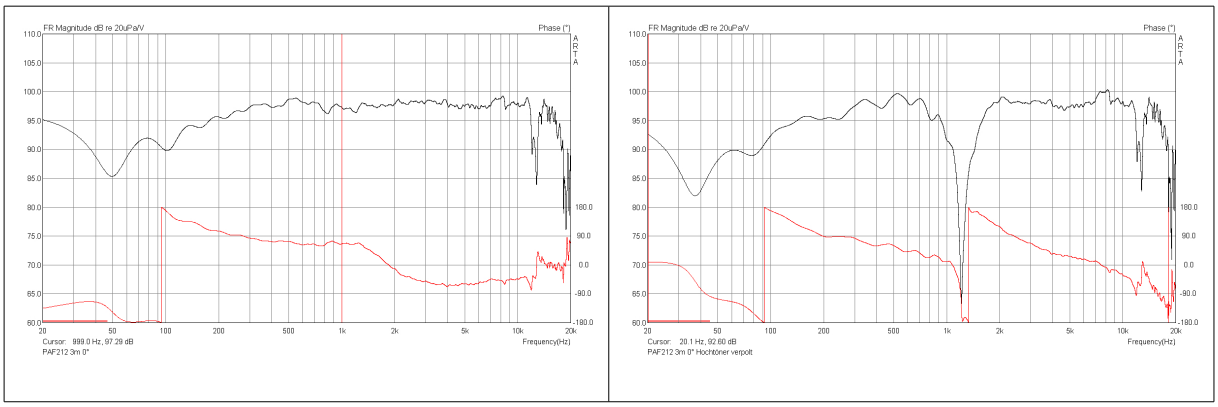


Die obigen Grafiken zeigen den errechneten Amplituden- und Impedanzverlauf, die Phasengänge der einzelnen Lautsprecher sowie die elektrische Filterfunktion.

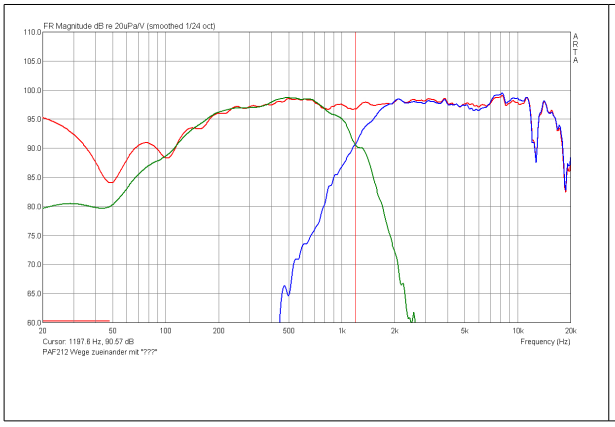
Besonderes Augenmerk sollte bei der Betrachtung zunächst der Phasenbeziehung zwischen den einzelnen Wegen geschenkt werden.
Im Bereich der akustischen Übernahmefrequenz fallen deren Steigungen nur kurzzeitig, quasi „in einem Punkt" bei ca. 1,4kHz zusammen. Darüber und darunter entfernen sie sich wieder voneinander. Der akustische Effekt dessen ist in der obersten Darstellung zu beobachten, wo die Kurven der einzelnen Wege teilweise unterhalb der Summenkurve liegen. Auch wenn die Effekte in diesem Fall noch als relativ erträglich zu bezeichnen sind, sollten sie trotzdem genau beobachtet werden, da eine Veränderung der geometrischen Beziehungen, wie z.B. an einem Abhörort neben der Achse, diese Stellen weiter beeinflussen könnte.
Im nächsten Schritt galt es nun, die Funktion der entwickelten Schaltung in der Praxis zu überprüfen.
Dafür wurden die Frequenzweichenbauteile mittels kurzer Kabel mit Krokodilklemmen miteinander verbunden – dieser „fliegende" Aufbau reicht für Testzwecke i.d.R. völlig aus. Bevor mit der Erprobung der Schaltung begonnen wurde, musste die Tieftonkammer zusätzlich bedämpft werden, um der wiederholt festgestellten 450Hz-Resonanz endlich Herr werden zu können.
Anschließend wurde die Box auf ein ca. 1,5m aufgezogenes Stativ mit Drehtelleraufsatz gehoben. Das Mikrofon zielte auf die Position, die auch für die Simulation angenommen wurde – zwischen oberen Tieftöner und Hochtonhorn. Der Abstand betrug dabei in etwa 3m.

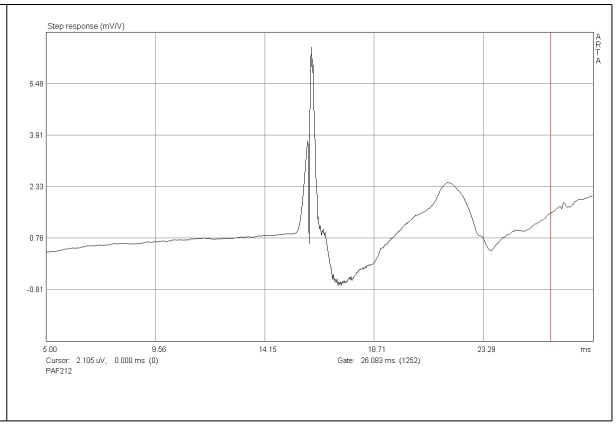
Nun zu den Messungen:

- Amplituden- und Phasengang mit Bezug auf das akustische Zentrum, ungeglättet
- Amplituden- und Phasengang mit Bezug auf das akustische Zentrum, mit verpoltem Hochtöner

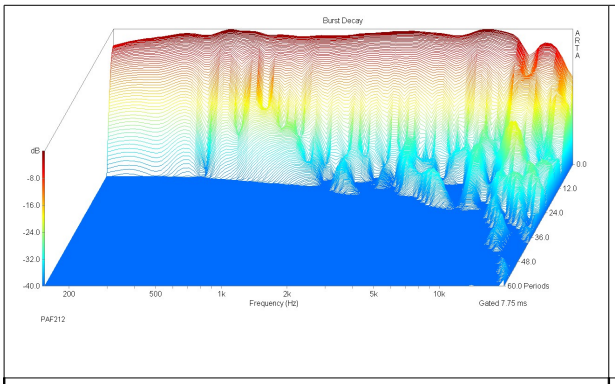


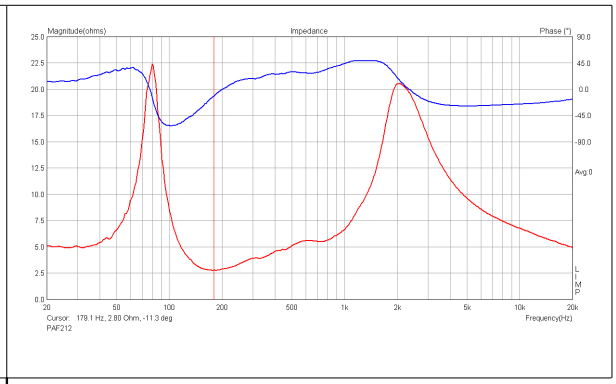
- Addition der Wege zueinander
- Sprungantwort

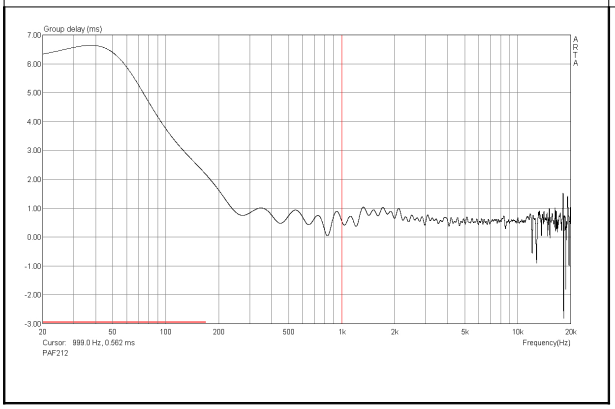




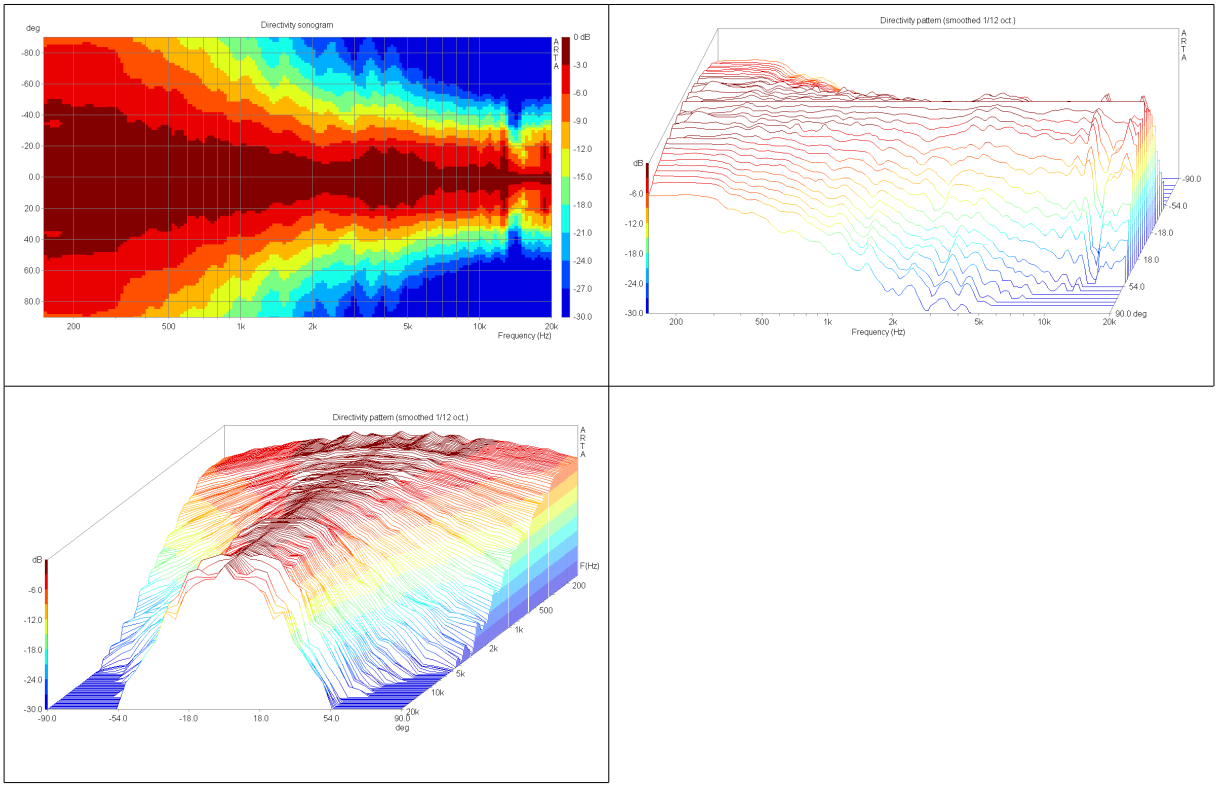
- periodenbasiertes Zerfallsspektrum
- elektrische Impedanz/ Phase
- Gruppenlaufzeit



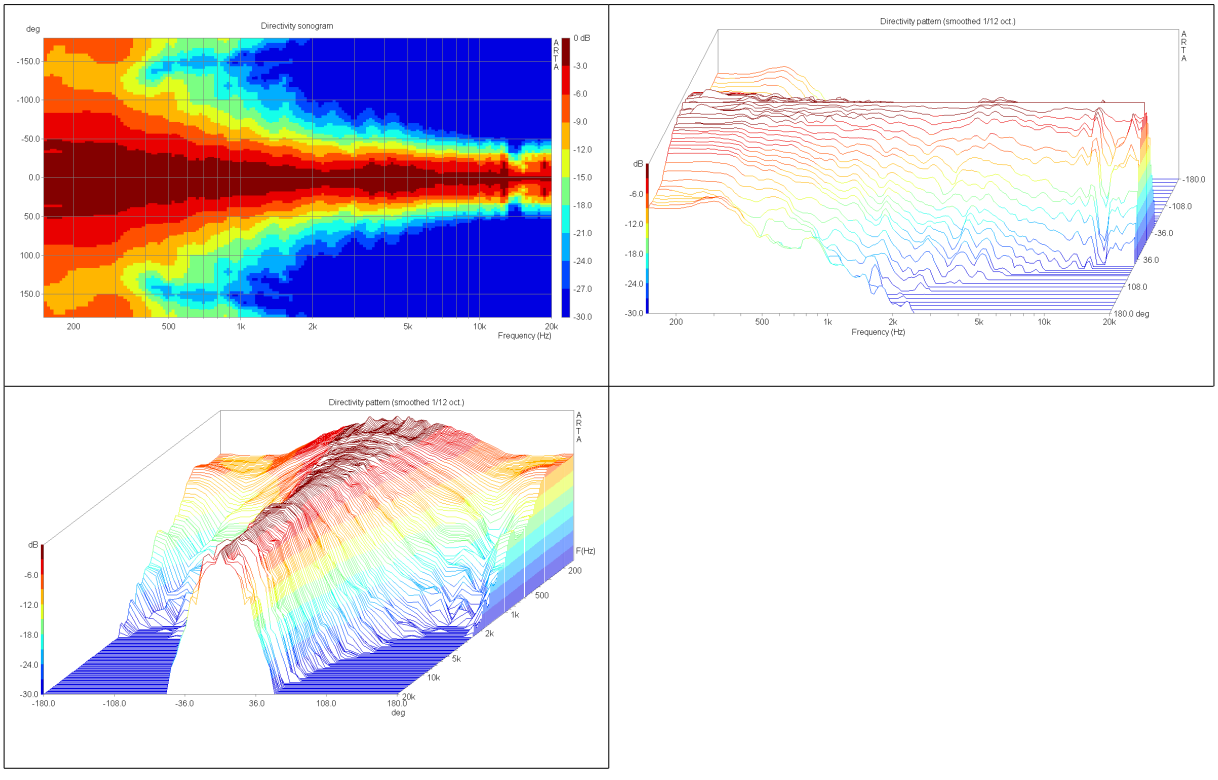




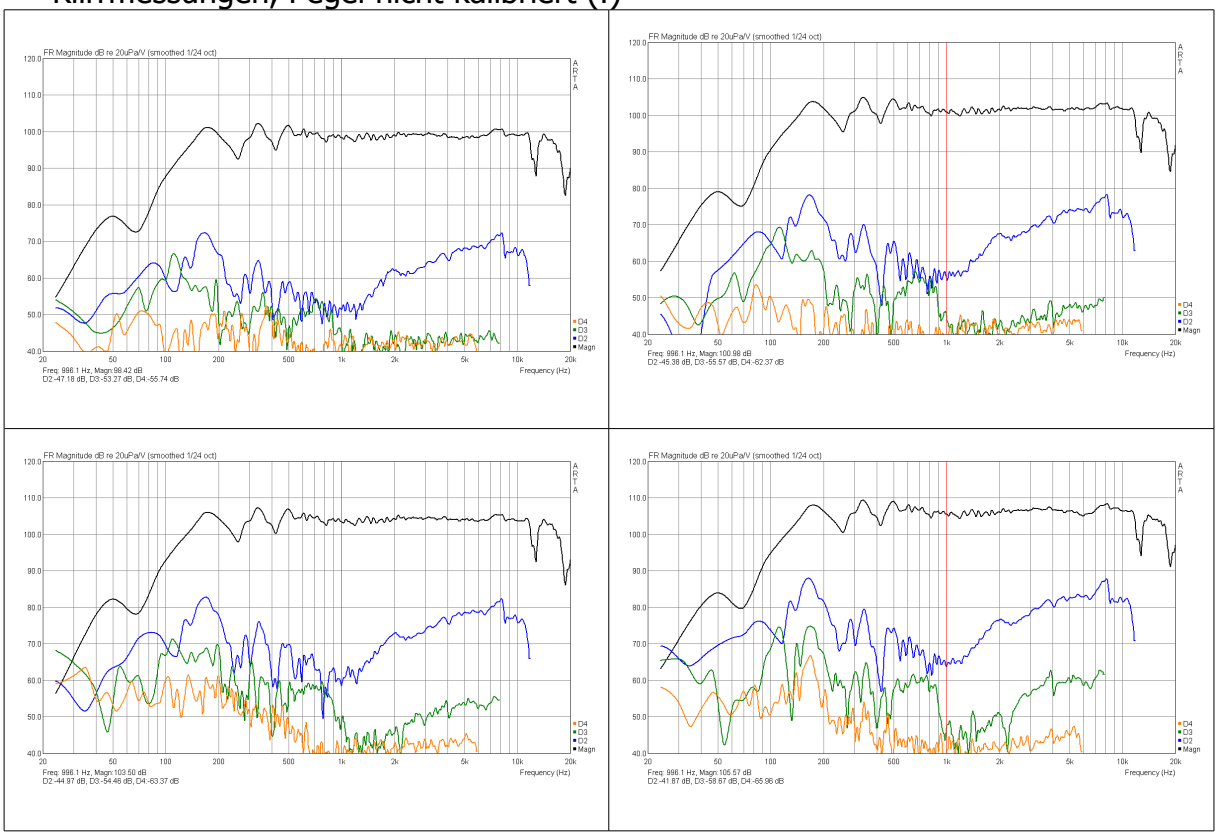
- Horizontale Abstrahlung +/- 90° als Sonogramm
- Horizontale Abstrahlung aus sonstigen Perspektiven



- Horizontale Abstrahlung +/- 180° als Sonogramm
- Horizontale Abstrahlung aus sonstigen Perspektiven



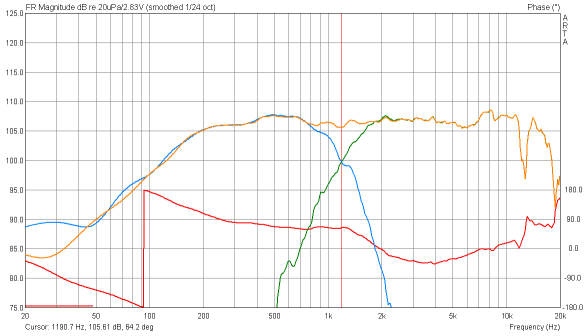
– Klirrmessungen, Pegel nicht kalibriert (!)



Zur Auswertung:

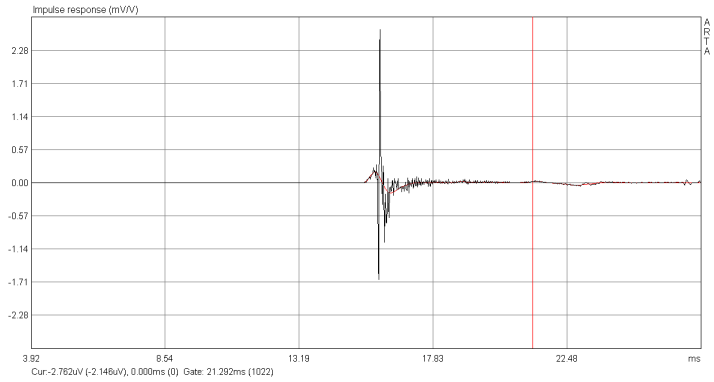
Während der Messungen, die im Freifeld auf einer Wiese durchgeführt worden, störten teilweise kräftige Windböen die Aufnahmen. Aus diesem Grund musste auch darauf verzichtet werden, die Box allzu hoch auf dem Stativ aufzustellen, da das Gehäuse mit seinen recht langen Seitenteilen eine große Angriffsfläche für den Wind dargestellt hätte und ein „Absturz" nicht unwahrscheinlich gewesen wäre. Die Folgen des eher geringen Bodenabstandes bei den Messungen sollen später noch genau beschrieben werden.

Zunächst zu den angesprochenen Windgeräuschen; so ist unter dem Punkt „Addition der Wege zueinander" zu sehen, dass die Summenkurve mit einer gewissen Toleranz um die Kurven der Einzelmessungen herum verläuft. Wie sich bei der Kontrolle herausstellte, sind letztere Messungen mit gutem Störabstand aufgenommen, die Summe jedoch scheint etwas verrauscht zu sein. Ärgerlicherweise fiel dies erst im Nachhinein auf. Durch ein nachträgliches Zusammenfügen der Impulsantworten der einzelnen Wege kann diese Summenbildung rechnerisch nachgestellt werden (siehe Grafik rechts). Die zu beobachtenden Interferenzen ober- und unterhalb des Kreuzungspunktes bei ca. 1,2kHz decken sich ziemlich genau mit den Vorhersagen der Simulation (s.o.).

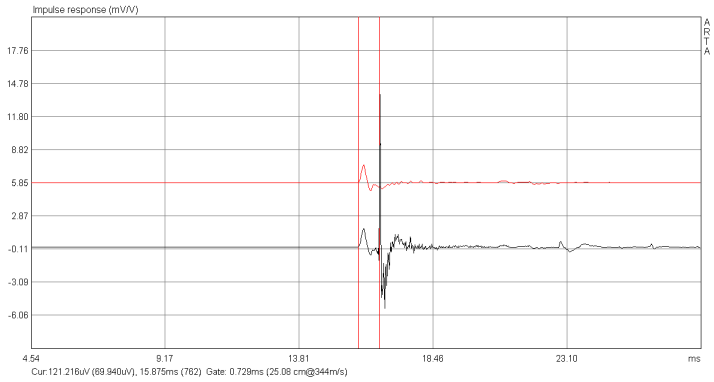


In Korrelation dazu zeugt der Phasenverlauf von einer leichten Fehlanpassung in diesem Bereich, was sich in dem „Sprung" von ca. +70° bei 900Hz auf ca. -45° bei 3kHz ausdrückt (siehe dazu auch obige Darstellung der Gruppenlaufzeit!).
Zu beachten ist, dass sich die Phasendarstellung hier auf das akustische Zentrum des Hochtöners und nicht auf den Beginn der gesamten Impulsantwort bezieht.

Bedingt wird diese Fehlanpassung u. A. durch den großen mechanischen Versatz der Schallentstehungsorte. Davon zeugt auch die Sprungantwort (s.o.); klar zu erkennen ist die zeitliche Differenz zwischen den Einschwingvorgängen von Tief- und Hochtonteil.



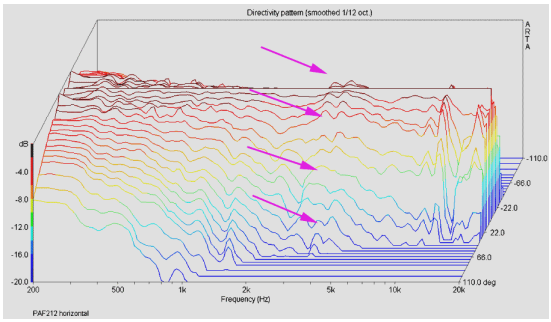
Die rechts stehende Grafik verdeutlicht diesen Zusammenhang durch Hervorhebung der Tieftöner in der gesamten Impulsantwort. Sie eilen dem Hochtonimpuls um ca. 0,55ms voraus, was bei den üblichen atmosphärischen Werten (Schallgeschwindigkeit c = 343m/s @ 20° C) einer Wegstrecke von ca. 18,9cm
entspricht. Ausgehend vom vorher bestimmten, etwa 25cm betragenden Versatz (vgl. Abschnitt 5) konnte die entworfene Schaltung die 2x12"-Tiefmitteltöner also um gute sechs cm „nach hinten schieben", da der Einsatz des dortigen Tiefpassfilters auch eine frequenzabhängige Phasenverschiebung mit sich bringt.



Die rechts stehende Grafik zeigt den beschriebenen Ursprungsversatz. Die Abstandswerte zwischen den Markern sind im unteren Bildrand abzulesen (ca. 0,73ms Differenz zwischen den Einschwingvorgängen).
Zur Verdeutlichung ist der Tieftonimpuls separat als rotes Overlay nach oben hin versetzt dargestellt worden.
Zusammenfassend ist zu konstatieren, dass der erste Schaltungsentwurf in dieser Form noch nicht zufriedenstellend funktioniert. Auch in anderen Teilbereichen, die im folgenden noch zur Sprache kommen sollen, sind einige Problemstellen auszumachen.
So zeigt die Messung der elektrischen Impedanz eine ziemlich niederohmige Stelle im Bereich von ~180Hz. Diese kommt durch ein Überschwingen in der Weiche zu Stande, was sich aber durch Glättung der Einbauresonanz per Saugkreis kompensieren lassen würde. Nach den anerkannten Regeln der Technik wäre eine Unterschreitung der Nominalimpedanz um mehr als 20% bereits unzulässig. Im vorliegenden Fall wäre diese Grenze durch die Minimalstelle von 2,8Ohm bei 180Hz

weit unterschritten. Die für die Entzerrung nötigen Bauteile wären aber teilweise recht kostenintensiv, so dass in diesem ersten Schritt aus rein pragmatischen Gründen darauf verzichtet wurde. Jedoch wurde dieser Punkt in den Forumsbeiträgen moniert, so dass hier eine Verbesserung des Impedanzverlaufs angestrebt werden musste.

Die Abstrahlungsmessungen betrachtend, ist eine gleichmäßig einsetzende Bündelung festzustellen, die auch im Übernahmebereich keine Sprungstelle zeigt. Die angestrebten 60° horizontal werden ab ca. 2kHz erreicht, bei 1kHz liegt der Abstrahlwinkel noch bei ca. 100°.
Die Messungen der Rückwärtsdämpfung mit +/- 180° zeigen, dass auch im tieffrequenten Bereich <200...300Hz sogar noch eine gewisse Richtwirkung messbar ist. Allerdings zeigte sich bei den Abstrahlungsmessungen eine problematische Veränderung des Wiedergabeverhaltens außerhalb der 0°-Achse, was sich besonders gut in der rechts stehenden Grafik ablesen lässt.



Im Bereich um 4kHz setzt die Bündelung im Vergleich zu den Nachbarfrequenzen etwas verspätet ein. Verstärkt wird dieser „Buckel" durch Interferenzeffekte durch im davor liegenden 2kHz-Band, die auf den mangelnden Laufzeit- und Phasenausgleich durch die passive Frequenzweiche zurückgehen. Dies ist für eine PA-Box als besonders problematisch zu bewerten, weil der Bereich um 4kHz vom menschlichen Ohr, verstärkt bei zunehmendem Pegel, mit dem größten „Lautheitsempfinden" wahrgenommen wird (vgl. Sengpiel 1994).
Diese theoretischen Aspekte konnten allerdings vom Autor mit einem insgesamt recht „spitzen" Klangeindruck bei den Hörtests in Übereinstimmung gebracht werden.
Insgesamt wurde daher geschlussfolgert, dass man die Aufweitung durch das Hochtonhorn bei ca. 4kHz nicht beeinflussen könne (vgl. auch Abschnitt 3.1), wohl aber die Phasenbeziehung verbessern müsse, um so das „Absacken" des Pegels im 2kHz-Band zu verhindern.
Dieser Ansatz soll im nächsten Abschnitt fortgesetzt werden.

Zuvor sollen noch die Eingangs erwähnten Probleme, die der geringe Bodenabstand der Box bei den Messungen mit sich brachte, dargestellt werden.
So konnte beispielsweise keine weitreichende Auswertung des Zerfallsspektrums vorgenommen werden, da Reflexionsanteile diese anderenfalls unbrauchbar gemacht hätten. Unvermeidlich in Erscheinung treten letztere bei den Klirrmessungen, wo unterhalb von 500Hz klar erkennbare Kammfilter eine regelmäßige Folge aus Einbrüchen und Überhöhungen hervorrufen.
Zu den Klirrmessungen an sich sei noch zu betonen, dass diese mit einem nicht auf absolute Pegel kalibrierten Messsystem aufgenommen wurden, sondern lediglich der Kontrolle dienten. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf das Klirrverhalten des Hochtöners im unteren Frequenzbereich gelegt, um eine eventuelle Überlastung durch zu eine tief angesetzte Übernahmefrequenz abschätzen zu können.
Da die Messungen aber auch bei gehobenen Pegeln keine unerwarteten Auffälligkeiten zeigten, war deren Zweck auch ohne Kenntnis der genauen

Pegelverhältnisse ausreichend erfüllt.

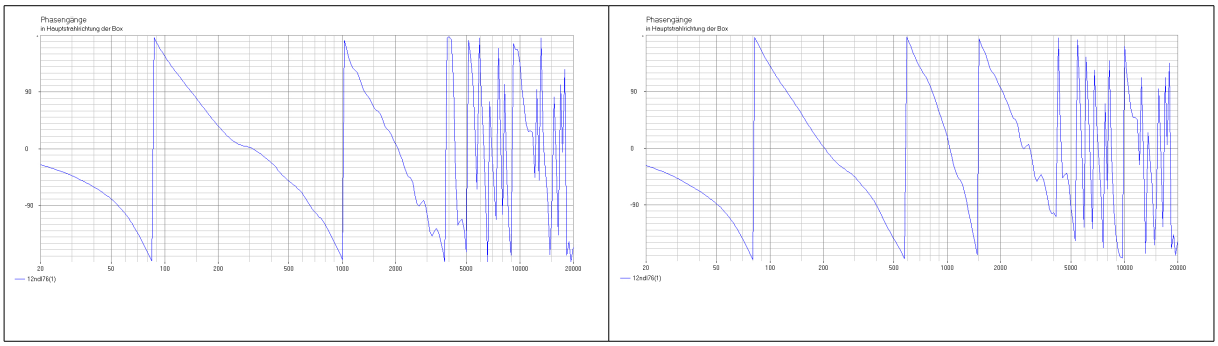
Im Anschluss an diese ersten Messungen fand ein Hörtest statt, zu dem der Autor nicht nur Freunde und Kollegen aus der professionellen Audiolandschaft einlud, sondern auch einen Musikwissenschaftler sowie eine ausgebildete Opernsängerin gewinnen konnte.
Die Resonanzen waren grundsätzlich positiv und hoben die beachtliche Dynamikfähigkeit des Lautsprechers hervor.
Teilweise wurden jedoch die zuvor beschriebenen Interferenzeffekte im 2kHz-Band (die messtechnisch verstärkt neben der Achse zu sehen waren) rein gehörmäßig bemerkt und mit dem Verweis auf eine gewisse „Schärfe" kritisiert.

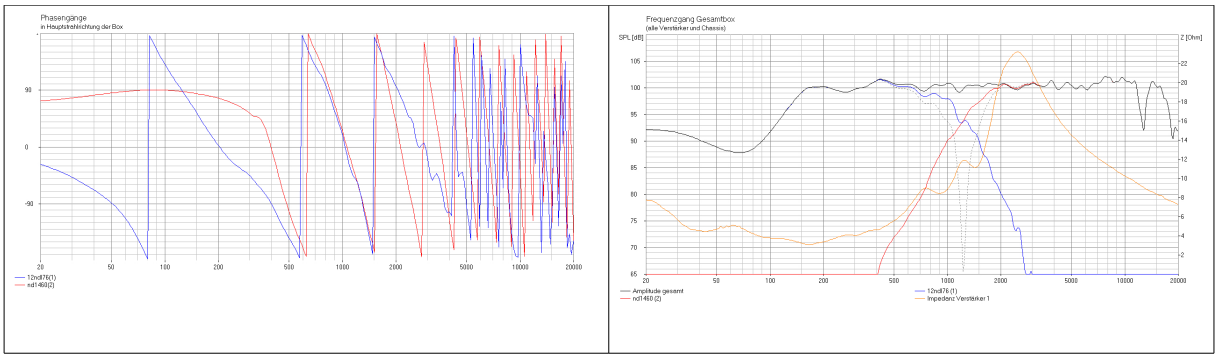
5.2 Zweite Version mit passivem Allpassfilter

Wie die praktische Überprüfung des ersten Filterentwurfs gezeigt hat, musste vor allem unter Beachtung der großen Laufzeitversätze eine geeignetere Lösung entwickelt werden.
Um einen Ausgleich zu erreichen, würde man sich üblicherweise einfach eines Digitalcontrollers bedienen, um über das Einfügen einer Totzeit sowie genauen Phasenangleich dem Problem Herr zu werden.
In passiver Form lässt sich lediglich letzteres als Allpassfilter umsetzen. Die Verzögerung dieses Filters funktioniert, im Gegensatz zu einem „echten" Delay aus dem Digitalcontroller, nicht frequenzunabhängig. Dass sich aber durch passende Auslegung und Kombination mit einem (passiven) Tiefpassfilter ebenso eine zielführende Verzögerung ergeben kann, soll in der Folge gezeigt werden.

Für die ersten Versuche wurde abermals die Filtersimulationssoftware genutzt.
Die Kurven zeigen:

- 24dB-Tiefpass mit 2x B&C 12NDL76
- 24dB-Tiefpass und Allpass zweiter Ordnung mit 2x B&C 12NDL76
- s.o., in Kombination mit Hochtöner
- Aufsummierung und elektrische Impedanz; gestrichelte Linie = verpolter Hochtöner





Der Allpass, der hier übrigens als Typ zweiter Ordnung aufgebaut wurde (je 2 Induktivitäten bzw. Kapazitäten parallel und seriell), bewirkt eine deutliche Phasenverschiebung und bringt die Phasenverläufe von Hoch- und Tieftonlautsprechern über weite Strecken in Übereinstimmung.
In der Konsequenz addieren sich die einzelnen Wege ohne Interferenzeffekte auf; bei Verpolung des Hochtöners entsteht ein scharfer, symmetrischer Einbruch bei der Übernahmefrequenz (gestrichelte Linie).
Es war nun also zu vermuten, dass durch den Allpassfilter nicht nur die zuvor beschriebenen Effekte auf die horizontale Abstrahlung verkleinert würden, sondern zudem auch die Abstrahlung in der vertikalen Ebene auf den physischen „Punkt" zwischen Hoch- und Tieftöner symmetriert werden könne.
Darüber hinaus blieb zu überprüfen, ob die zuvor gemessene Stufe in der Gruppenlaufzeit (vgl. Abschnitt 5.1) durch den Allpass angeglichen wurde – eine Hörbarkeit solcher „Zeitunterschiede" in diesen Dimensionen wird wissenschaftlich zwar eher kontrovers betrachtet; eine dezidierte Ortbarkeit der einzelnen Schallquellen wäre aber der natürlichen Wiedergabe von Musik und Sprache in höchstem Maße abträglich – das Signal würde regelrecht „zerfallen" und „unnatürlich" wirken.
Die Kritikpunkte aus Abschnitt 5.1 berücksichtigend, wurde für die hier gezeigte, zweite Schaltungsversion zudem eine Entzerrung der Einbauresonanz per Saugkreis integriert.

Eigentlich war für die Überprüfung der neuen (Allpass-)Schaltung ein Termin zum Messen im reflexionsarmen Raum einer bekannten Berliner Firma für Audiotechnik vorgesehen, der aufgrund kurzfristiger Umbelegung allerdings nicht mehr stattfinden konnte.

Daher mussten die Messungen wie zuvor auch auf einer Wiese durchgeführt werden. Auf dem rechts stehenden Foto ist das dafür vorbereitete Prototypengehäuse zu sehen. Um die Seitenteile aus leichtem Massivholz zuverlässig als eventuelle, spätere Fehlerquelle bei den Messungen des Ausschwingverhaltens oder des Klirrs ausschließen zu können, wurde dieses mit diagonalen Multiplexleisten von außen versteift. Zudem wurde es durch vier auf der Unterseite verschraubte 25mm Gummifüße (zumindest



ansatzweise) vom Untergrund entkoppelt.



Für die Messungen wurde die Box auf den Boden gestellt, das Messmikrofon wurde in 1m Entfernung genau zwischen Hochtonhorn und oberen 12"-Tiefmitteltöner ausgerichtet. Vor die Box wurde eine Lage aus 2x 10cm Noppenschaumstoff gelegt, was die erste Bodenreflexion möglichst absorbieren sollte (siehe Foto). Mit Sicherheit ist dieser Messaufbau als kompromissbehaftet zu bezeichnen. Wie sich später anhand der Messungen aber noch zeigen wird, sind dessen systematische Fehler unter den gegebenen Voraussetzungen zumindest genau identifizierbar und lassen sich sogar entsprechend ausblenden.

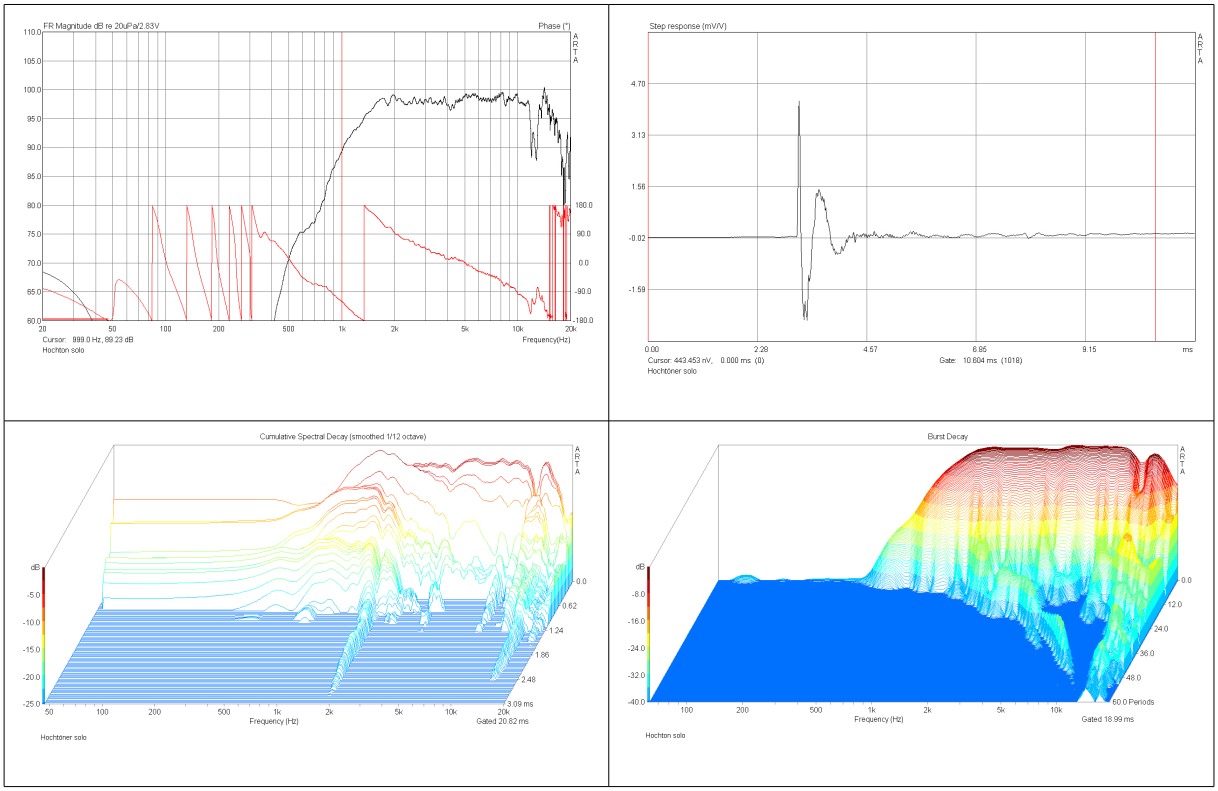
Das Messsystem wurde für diese Messungen zudem durch ein neues High-End Interface von RME ergänzt (vgl. Abschnitt 4.1), das nicht nur durch niedrigste Verzerrungen, sondern auch durch höhere Abtastraten (bis zu 192kHz im Full-Duplex Modus) eine wertvolle Ergänzung darstellte.
Als Verstärker wurde eine PA-Endstufe vom Typ Crest CA9 (vgl. Abschnitt 4.1) verwendet, um für die geplanten Klirrmessungen ausreichend Headroom zur Verfügung zu haben.



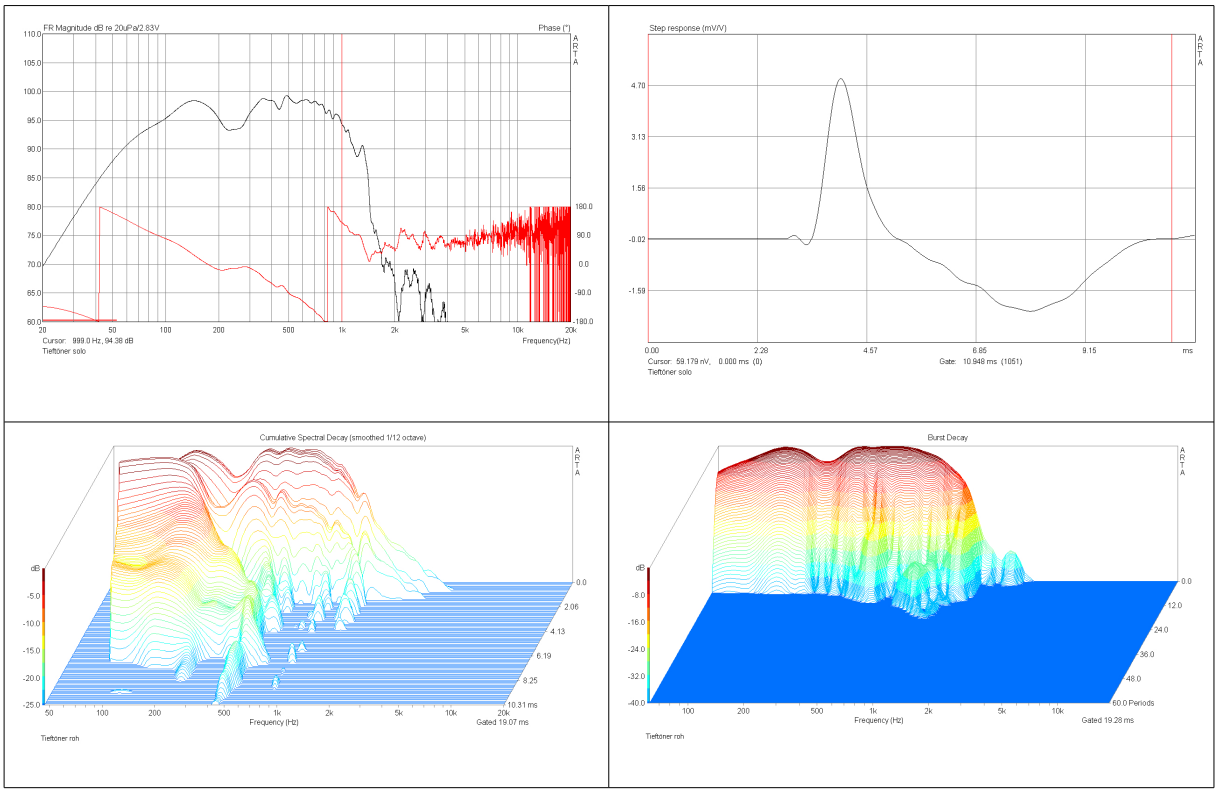
Zunächst musste das System für die Wirkungsgradmessungen eingestellt werden. Dafür mussten an den Klemmen der frei verdrahteten Frequenzweiche 2,0V anliegen (entspricht 1W @ 4Ohm). Gleichzeitig wurde darauf geachtet, dass die Regler der Endstufe 0dB Gain anzeigten. So konnte die Signalspannung am Lautsprecher komplett über die digital regelbaren Master-Outs des RME-Interface geregelt werden, was u.A. die zuvor beschriebene, latente Fehlerquelle des stufenlos verstellbaren Potis des Edirol-Interface (vgl. Abschnitt 4.2.2) für diese Messreihe ausräumen konnte.

Nun zu den Messungen, die in der Absicht, die „finale Messreihe" durchzuführen, aufgenommen wurden.

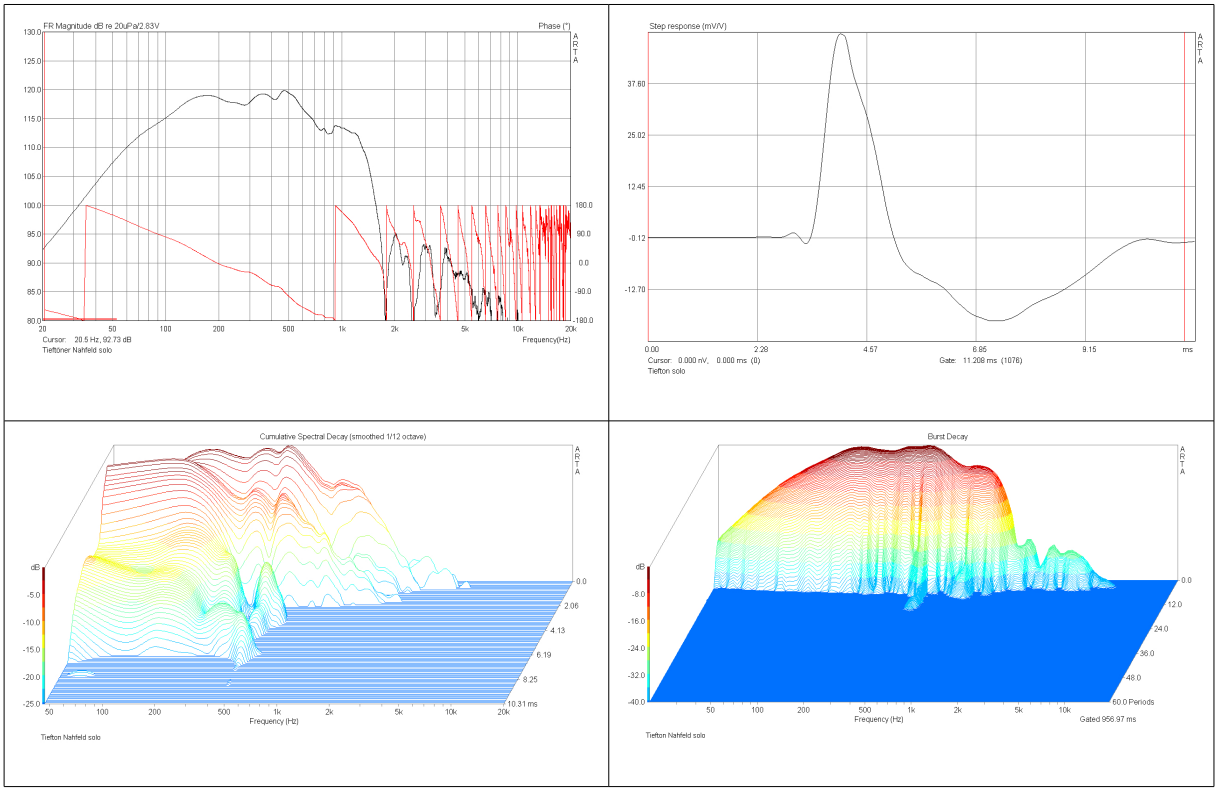
- Hochtöner solo; mit Frequenzweiche, Sprungantwort, kumulatives und periodenbasiertes Zerfallsspektrum



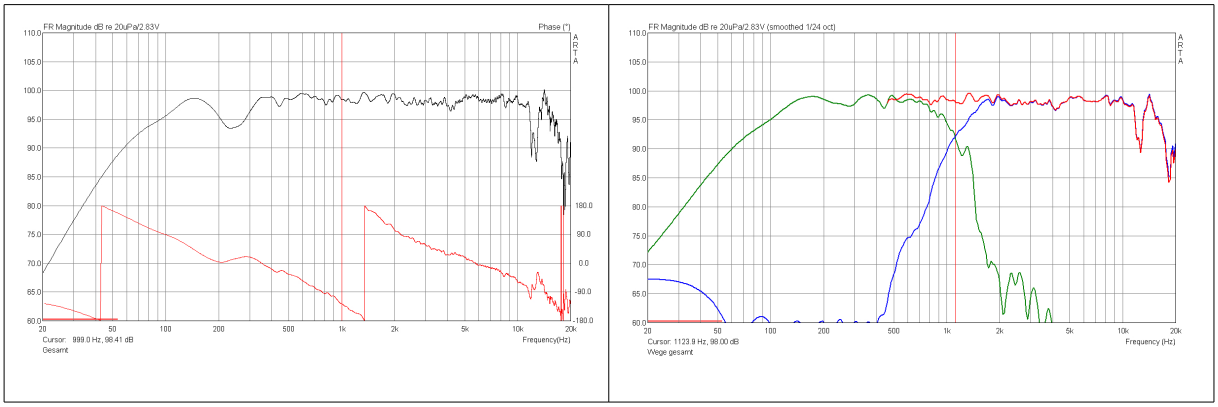
- beide Tieftöner solo; mit Frequenzweiche, Sprungantwort, kumulatives und periodenbasiertes Zerfallsspektrum



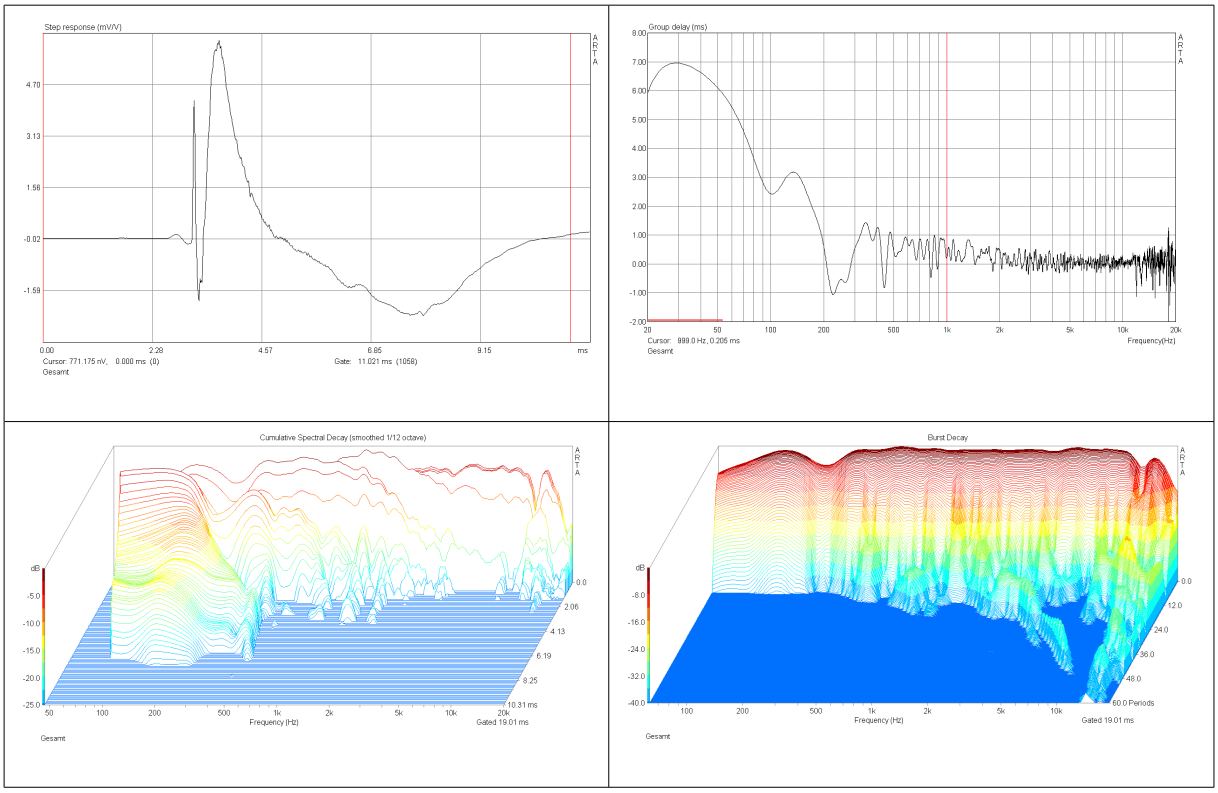
- oberer Tieftöner im Nahfeld; mit Frequenzweiche, Sprungantwort, kumulatives und periodenbasiertes Zerfallsspektrum



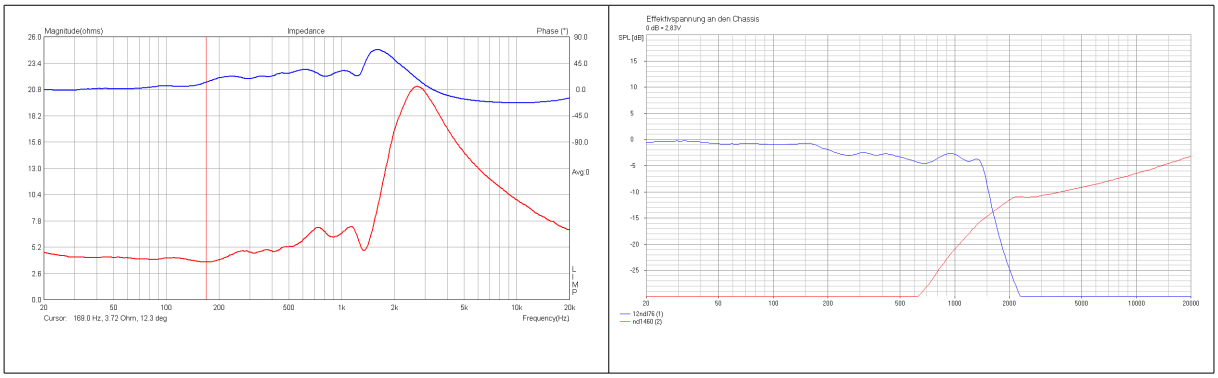
- Gesamtfrequenzgang und Phasenverlauf mit Bezug auf Beginn der Impulsantwort, ungeglättet
- Gesamtfrequenzgang in Darstellung mit angehängter, pegelkorrigierter Nahfeldmessung



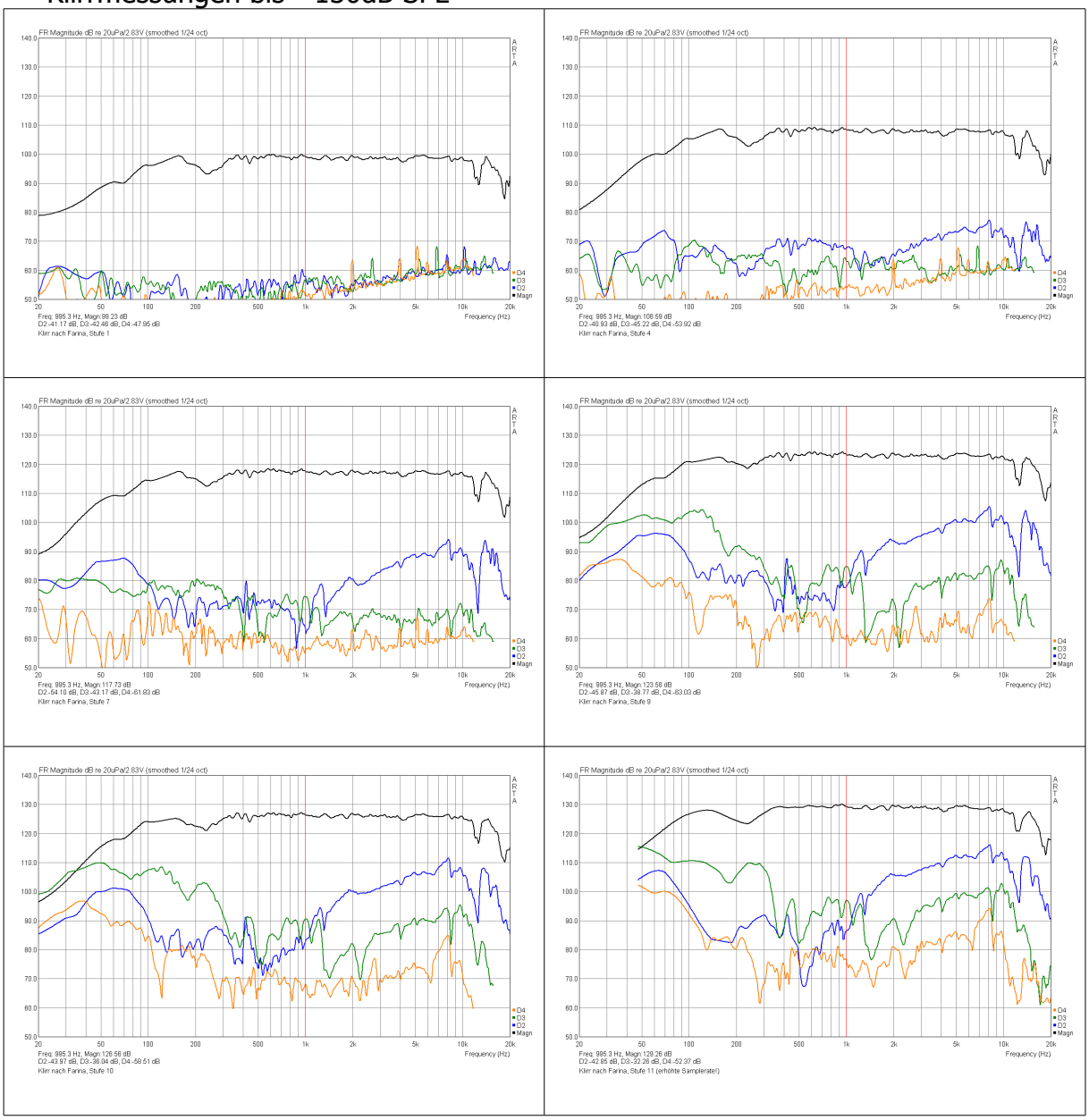
- Sprungantwort
- Gruppenlaufzeit
- kumulatives und periodenbasiertes Zerfallsspektrum



- elektrische Impedanz und Phase
- elektrische Weichenfunktion laut Filtersimulation



- Klirrmessungen bis ~130dB SPL



Zur Auswertung der Messungen:

Auffällig ist die Delle bei den Frequenzgangmessungen im Bereich 200...300Hz. Diese entspricht, ausgehend von einem Abstand der 12"er zum Boden von 50...60cm, in etwa der halben Wellenlänge in diesem Bereich.
Bei den Nahfeldmessungen, die oben auch separat aufgeführt wurden, kommen diese Effekte nicht zum tragen. Ebenso wurde für die Darstellung der Summierung der Wege ebendiese Nahfeldmessung „angehangen", so dass diese Messung den tatsächlichen, „quasi-reflexionsfreien" Frequenzgang zeigt.
Für alle weiteren Messungen müssen diese Abweichungen billigend in Kauf genommen werden, auch wenn sie auf Fehlverhalten aufzeigen, das tatsächlich dem Testobjekt anzulasten wäre.

Generell lassen die Messungen den Schluss zu, dass der entworfene Allpassfilter auch

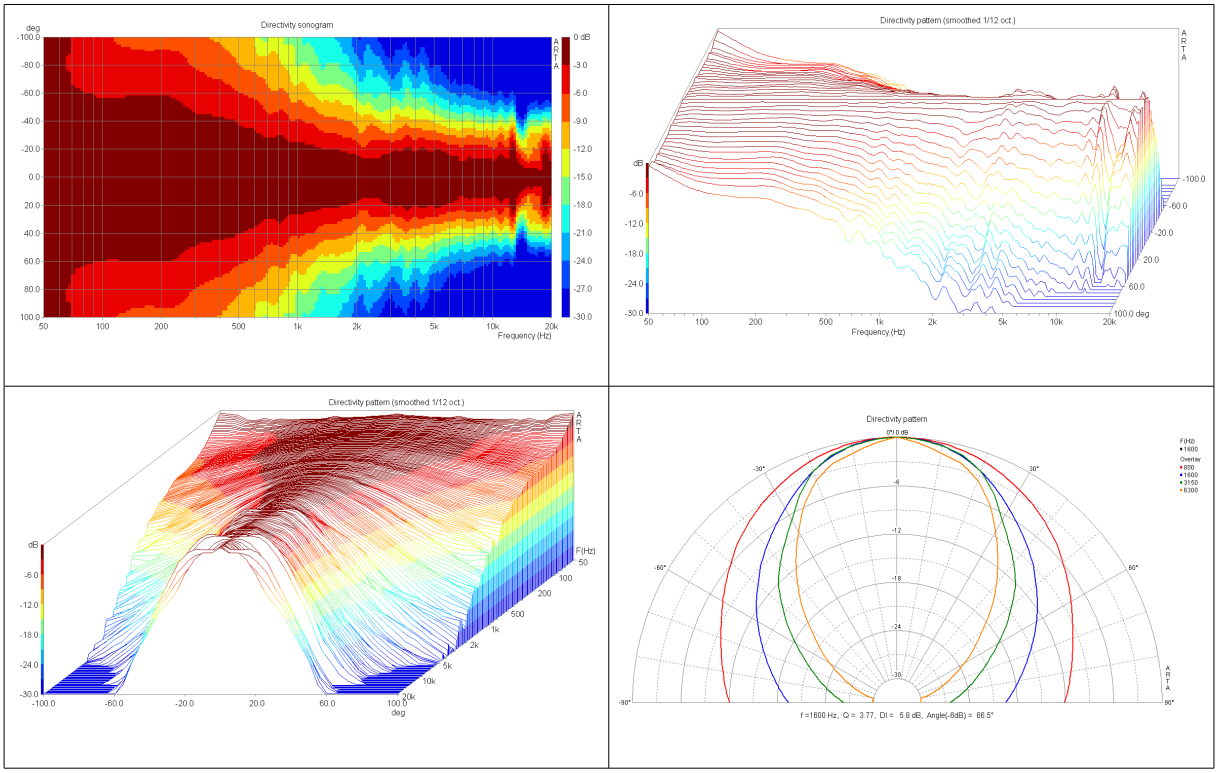
in der Realität mit guten Ergebnissen einsetzbar ist.
So zeigt der Phasengang des Gesamtlautsprechers nur noch den minimalphasigen Rest der Filter (theoretische 360° für einen Tiefpass vierter Ordnung), zeigt aber nicht mehr die Phasenverschiebungen durch die ursprünglich noch vorhandenen Laufzeitversätze. Insgesamt verläuft die Phase ohne Unstetigkeiten und lässt die Trennfrequenz so kaum noch sichtbar in Erscheinung treten, was zuvor nicht der Fall war (vgl. Abschnitt 5.1).
Dies zeigt sich auch in Gruppenlaufzeit und Sprungantwort. Grade letztere zeigt, dass die Einschwingvorgänge der einzelnen Lautsprecher nun zum selben Zeitpunkt starten. Der Tieftonimpuls konnte durch den Allpassfilter also passend verzögert werden; die Laufzeit im Übernahmebereich ist daher als „ausgeglichen" zu bezeichnen.
Dadurch ergibt sich auch eine interferenzfreie Aufsummierung der einzelnen Wege zueinander; der Schnittpunkt der Flanken lässt sich bei ca. 1,15kHz und damit etwas tiefer als bei der ersten Version der Frequenzweiche des vorherigen Abschnitts ablesen.
Das Ausschwingverhalten ist, bis auf eine wahrscheinlich vom Mund des Hochtonhorns herrührende, schmale 2kHz-Reflexion über den kompletten Sprachbereich (300...400Hz bis 4kHz) ziemlich einwandfrei, was zudem auch für tiefere Frequenzen bis hinein in den Grundton abzulesen ist.
Außerdem wurde die elektrische Impedanz durch Verwendung von sehr niederohmigen Kernspulen in diesem neuen Weichenentwurf nicht nur ihren eigenen Innenwiderstand, sondern auch ihre zuvor problematische 180Hz-Stelle betreffend optimiert, so dass der jetzige Verlauf den Anforderungen an ein nominelles 4Ohm-System gerecht wird.
Anzumerken ist, dass der Innenwiderstand der Frequenzweiche jedoch in einer verlöteten Version noch minimal (~0,1Ohm) sinken könnte, da die hier gemessene Weiche lediglich mit kurzen Krokodilklemmenkabeln aufgebaut war.
Die Klirrmessungen offenbaren die erwarteten Limitationen im tieffrequenten Bereich durch die Mechanik der Tiefmitteltöner, auch wenn diese auf recht hohem Niveau liegen. Für den letzten Schritt der Verzerrungsmessungen wurde die Samplerate verdoppelt, um so die Anregungszeit im Tiefton zu verkürzen. Angesichts der hohen K3-Werte, die auf grenzwertige Beanspruchung der Einspannungen der 12"er hinweisen, schien dies notwendig. Zudem konnte durch diese Maßnahme auch die obere Grenzfrequenz für die Erfassung der Klirrkomponenten erhöht werden, so dass hier Daten aller relevanten Oberwellen bis zur 20kHz-Grenze und darüber hinaus gesammelt werden konnten.

5.2.1 Abstrahlungen

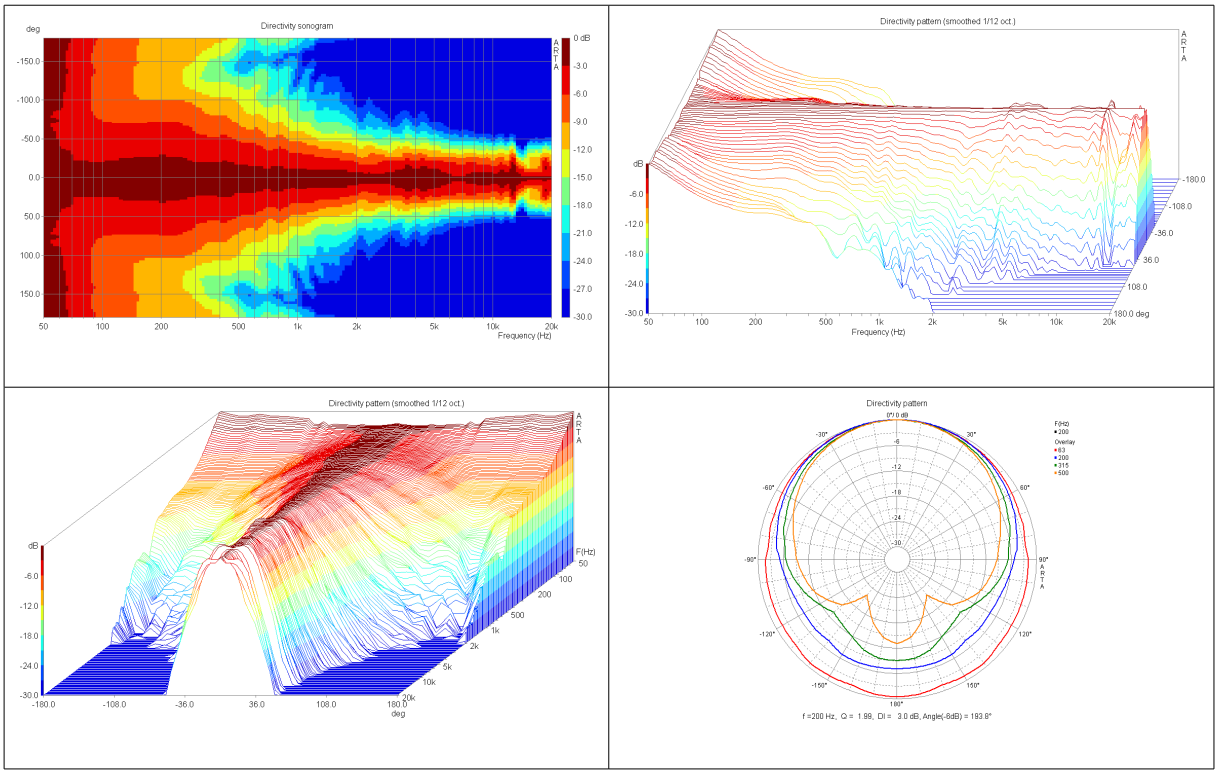
Das im vorherigen Abschnitt 5.1 kritisierte Abstrahlverhalten sollte in einem weiteren Schritt, zusammen mit dem neuen Weichenentwurf mit passivem Allpassfilter, untersucht werden. Besondere Aufmerksamkeit galt dabei dem 2kHz-Band, welches zuvor einigen Interferenzeffekten unterworfen schien.

Die Messungen dazu zeigen folgendes:

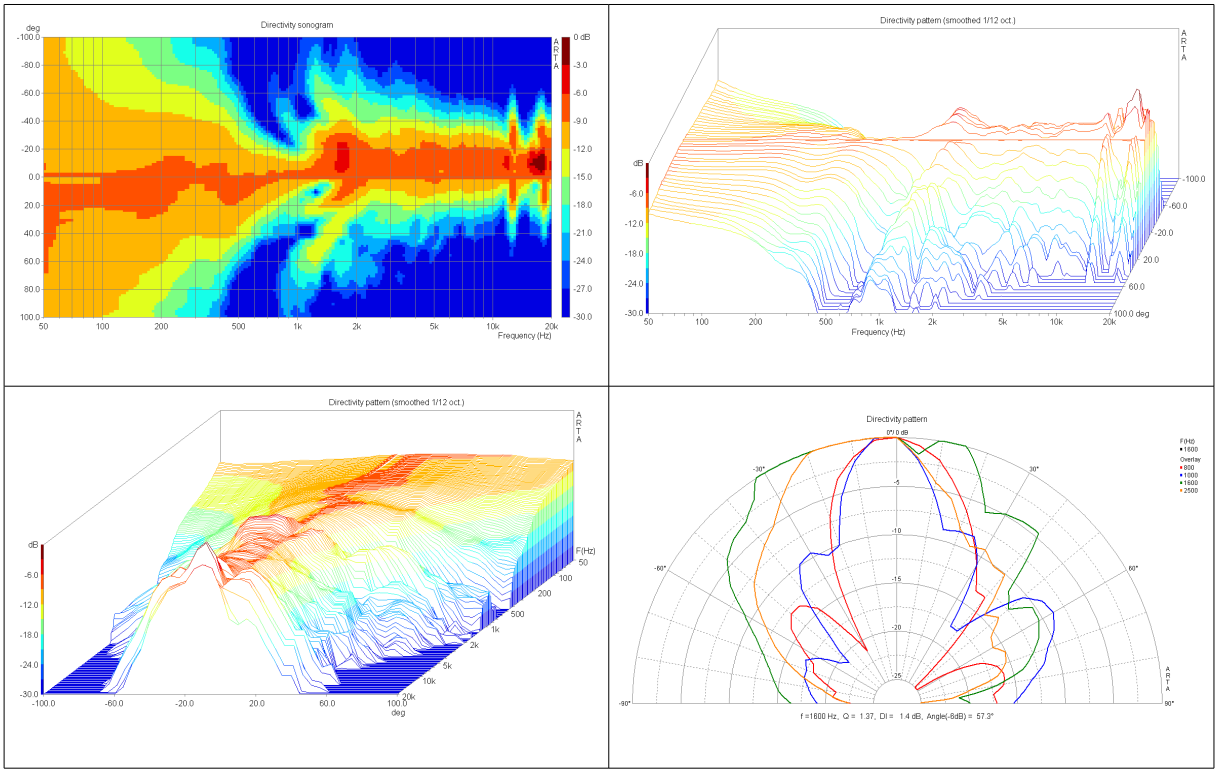
- Horizontale Abstrahlung +/- 100° als Sonogramm
- Horizontale Abstrahlung aus sonstigen Perspektiven



- Horizontale Abstrahlung +/- 180° als Sonogramm
- Horizontale Abstrahlung aus sonstigen Perspektiven



- Vertikale Abstrahlung +/- 100° als Sonogramm
- Vertikale Abstrahlung aus sonstigen Perspektiven



Zur Auswertung der Messungen:

Die Abstrahlung im 2kHz-Band ist durch den Einsatz des Allpassfilters scheinbar nur geringfügig besser geworden; maßgeblicher Einfluss auf den Abstrahlwinkel in diesem Bereich muss demnach dem verwendeten Hochtonhorn (vgl. Abschnitt 3.1) zugesprochen werden.
Bemerkenswert scheint die Rückwärtsdämpfung der hier vermessenen 2x12"-Tiefmitteltonanordnung. So werden ab 200Hz aufwärts bereits ca. 200° horizontal erreicht. Ansonsten gibt sich die Abstrahlung im Hochtonbereich sehr gleichmäßig mit minimaler Einschnürung zu den höchsten Frequenzen hin.

Die vertikale Abstrahlung betreffend sind die üblichen Interferenzeffekte auszumachen, wie sie für eine Anordnung dieser Art als unvermeidlich zu bezeichnen sind. Minimiert werden könnten sie lediglich durch Anwendung eines 2,5- oder 3-Wege Konzeptes, bei dem zumindest einer der 12"er durch ein Tiefpassfilter mit zunehmender Frequenz abgekoppelt wird. Die typische Einengung in der vertikalen Abstrahlung durch die Zeilenanordnung der Chassis (vgl. Abschnitt 4.3.1) würde somit verhindert, was in dem vorliegenden Fall allerdings auch zu erheblichem Wirkungsgradverlust im wichtigen Stimmbereich geführt hätte und somit nicht als Option betrachtet werden konnte.

Anzumerken ist zudem, dass die Darstellung der vertikalen Abstrahlung an einer bislang noch nicht behobenen, fehlerhaften Interpretation der Daten durch die ARTA Software krankt; so dominieren vereinzelte Pegelspitzen (im Beispiel etwa um die 15kHz) die Darstellung und verschieben somit den für die relative Auswertung

wichtigen 0dB-Wert nach oben. Es bleibt zu hoffen, dass durch Ergänzung der Skala um einen positiven Wertebereich in Zukunft derartige, schmale Pegelspitzen sinnvoll „abgefangen" werden können, um normierte Darstellungen zu ermöglichen.

5.3 Kritik und Ergebnisse

Das zu Beginn dieses Kapitels erwähnte Ziel, mit dieser letzten Messreihe das Projekt abschließen zu wollen, wurde nach Meinung des Autors erreicht.

Die Messungen beschreiben einen PA-Lautsprecher, der in der Lage ist, auch sehr hohe Pegel unverzerrt wiederzugeben. Mit sauberem Ausschwingverhalten und auch unter Winkel ausgeglichener Amplitude können selbst kritische Musik- und Sprachsignale abgebildet werden.
Leider konnte das Abstrahlverhalten von zwei nebeneinander stehenden Lautsprechern in Ermangelung der dafür nötigen, zusätzlichen Testchassis nicht mehr gemessen werden. Für eine eventuell folgende Neuauflage dieser Dokumentation bemüht sich der Autor um Ergänzung dieser Messungen.

Nach subjektiver Einschätzung des Autors überzeugt der Lautsprecher durch analytischen bzw. „neutralen" Klang, wobei besonders die hohe Durchsetzungsfähigkeit von Stimmen bemerkenswert scheint.
Leichte Kritik könnte im Bereich >10kHz geäußert werden, wo die eigene Massenträgheit der 3"-Titanmembran des Hochtöners der „schnellen" Wiedergabe dieser Frequenzen naturgemäß Probleme bereitet.

Der Materialaufwand für die Frequenzweichenschaltung der Box inklusive des Allpassfilters stellt nach Einschätzung des Autors, trotz seiner nicht von der Hand zu weisenden Kostenintensität, nicht nur einen vermeintlich „abnehmenden Nutzen im Grenzbereich" dar, sondern sollte vielmehr als notwendige Bedingung für den Betrieb der vorliegenden Lautsprecherkombination zu betrachten sein.

6. Fazit

Das Ziel der vorliegenden Dokumentation, eine fast neun Monate andauernde Entwicklungsarbeit aufzuarbeiten, wurde durch chronologische Rückverfolgung der einzelnen Arbeitsschritte erfüllt.
Ausführlich wurden dabei die Daten präsentiert und Gedankengänge aufgezeigt, die zur Auswahl der nötigen Komponenten führten.
Ebenso wurde die Entwicklung der Filterschaltung nachskizziert und durch umfangreiche Messungen objektiv abgebildet.

Die in Abschnitt 2. vorgegebenen Ausstattungsmerkmale wurden bei der Entwicklung umgesetzt und technisch so dimensioniert, dass den angepeilten Veranstaltungscharakteristika auch bei hohen Qualitätsansprüchen entsprochen werden kann.

Insgesamt wurde während der Dokumentationsarbeit eine verhältnismäßig große Menge an Fehlern, die bei sich bei der Durchführung des Projektes einschlichen, aufgedeckt.
Angefangen bei Messungenauigkeiten, über fehlerhafte Vorüberlegungen bis hin zu schlicht suboptimalen Messaufbauten – der bekannte Ausspruch: „Wer misst, misst Mist!", ging dem Autor bei der Kontrolle mehrmals durch den Kopf.

Dies soll aber keine Kritik an der gezeigten Vorgehensweise an sich implizieren, sondern vielmehr darauf hinweisen, dass der skeptische Umgang mit Messdaten, grade unter den dokumentierten, semiprofessionellen Bedingungen, immer an erster Stelle stehen sollte.

7. Spender- und Dankesliste

Nachfolgend aufgeführt sind diejenigen, die sich materiell oder immateriell an diesem Forumsprojekt beteiligt haben; ihnen sei Dank für die unbürokratische Hilfe gesagt.

Nicht erwähnt sind die unzähligen Freunde und Kollegen, die dem Autor während der Entwicklungszeit durch Wortmeldungen im Forum oder auf anderen Wegen durch ihre Kritik (oder einfach nur durch ihre Fähigkeit, die gewissen Spleens des Autors gekonnt zu ertragen...) stets halfen, das Projekt in die gewünschten Bahnen zu lenken. Auch ihnen sei vielmals gedankt!

- Alexander Hornbostel (H-Audio elektroakustische Konzeptionen) aka. alec:
  2x Eminence Kappa12, 1x HK-Horn
- Andreas Wessling aka. hiandreas:
  3D-Gehäusezeichnungen und -konstruktion
- Dirk Hahn (X-Max Lautsprechertechnik):
  2x 18-Sound 12ND710
- Fabian Reimann aka. F.A.Bi.A.N.:
  2x B&C 12NDL76, 1x BMS 4550-16, 1x BMS 4552-16, 1x BMS 4554-16, 1x RCF N350-8, 1x 18-Sound XT1464, 2D Gehäusezeichnungen, Messtechnik und komplette Entwicklungsarbeit
- Heinrich Malik aka. DJ Heini:
  Layout der Frequenzweichenplatinen
- Matthias Schuler aka. Text&Ton:
  1x BMS 4594-16 über BMS Elektronik GmbH Hannover
- Thomas Hammes (Apollo-Soundshop) aka. Apollo-Soundsystems:
  1x 18-Sound ND1460, 1x Prototypengehäuse
- Toni Drögemeyer aka. Userkiller:
  1x B&C DE700, 1x 18-Sound XT1464

8. Links

Anzumerken ist, dass es sich bei den Links um dynamische Eintragungen handelt, so dass deren Richtigkeit nicht garantiert werden kann.
Der Stand aller Links entspricht dem Veröffentlichungsdatum dieser Dokumentation.

1. Link zum Thread im PA-Forum:
   http://www.paforum.de/phpBB/viewtopic.php?t=63732
   oder www.pa-forum.de → Kategorie „Selbstbau"
2. Datenblatt der PAF212 in Kurzform:
   http://hr-systems.biz/downloads/Kurzdatenblatt_PAF212.pdf
3. ARTA Homepage:
   http://www.fesb.hr/~mateljan/arta/index.htm
4. Fachwörterlexikon des PA-Forums:
   http://www.paforum.de/Infos/lexikon.html
5. Boxsim (Filtersimulationsprogramm):
   http://www.boxsim.de/
6. Microtech Gefell Messmikrofone:
   http://www.microtechgefell.de/prod/mess/mess_0.htm
7. RFT Präzisionsimpulsschallpegelmesser 00 023 – komplette Dokumentation zum Download im PDF-Format:
   http://rapidshare.com/files/76343532/PSI_00_023_Doku.pdf bzw.
   http://ibtk.de/project/microphone/PSI_00_023_Doku/PSI_00_023_Doku.pdf
8. MBHO Messmikrofon:
   http://www.mbho.de/pdf/mbnm550el.pdf
9. RME Interface:
   http://www.rme-audio.de/products_fireface_400.php
10. 18Sound, Lautsprecherhersteller
    http://www.eighteensound.com/
11. B&C, Lautsprecherhersteller
    http://www.bcspeakers.com/
12. Eminence, Lautsprecherhersteller
    http://www.eminence.com/
13. BMS, Lautsprecherhersteller
    http://www.bmspro.info/
14. RCF, Lautsprecherhersteller
    http://www.rcf.it/

9. Literaturverzeichnis

D'Appolito, Joseph (2005):
„Lautsprecher-Meßtechnik. PC-gestützte Analyse analoger Systeme"
Elektor-Verlag, 2. Auflage 2005

Farina, Angelo (2000):
„Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique"
Link: http://pcfarina.eng.unipr.it/Public/Papers/134-AES00.PDF

Mateljan, Ivo (2007):
„ARTA User Manual Version 1.3"
Link: http://www.fesb.hr/~mateljan/arta/download/ARTA-user-manual.pdf

Sengpiel, Eberhard (1994):
„Fletcher-Munson ist nicht Robinson-Dadson"
Link: http://www.sengpielaudio.com/Fletcher-MunsonIstNichtRobinson-Dadson.pdf

Weber, Heinrich/ Mateljan, Ivo (2006):
„ARTA AP No. 5 - ARTA Chamber for the Lower End Microphone Calibration"
Link: http://www.fesb.hr/~mateljan/arta/AppNotes/AP5_MikroMeasChamber-Rev03Eng.pdf

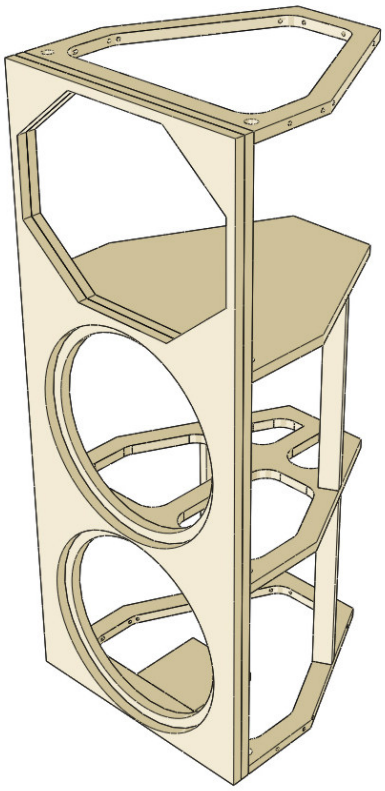
Weber, Heinrich (2007):
„ARTA AP No. 6 – Directivity und Polar"
Link: http://www.fesb.hr/~mateljan/arta/AppNotes/AP6_Directivity_und_Polar-Rev01Ger.pdf

Vanderkooy, John (2006):
„**Polar Plots at Low Frequencies: The Acoustic Centre"**
Link: http://www.aes.org/sections/uk/meetings/a0604.html

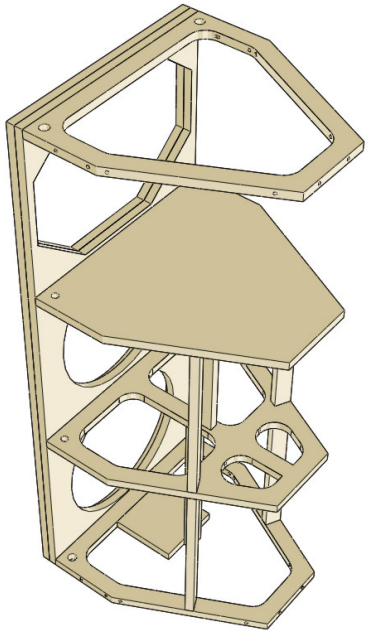
Anhang

a. dreidimensionale Visualisierungen

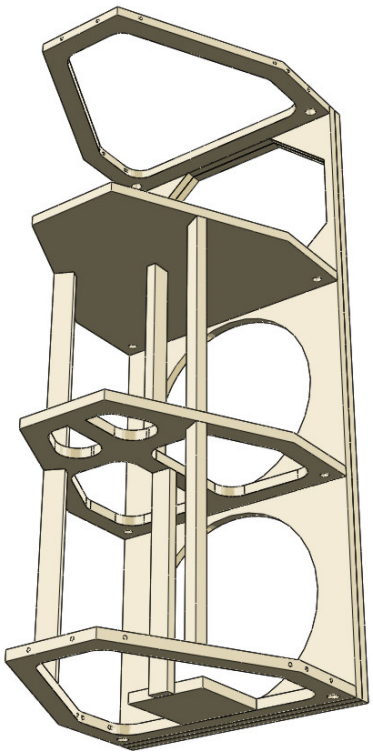
a.



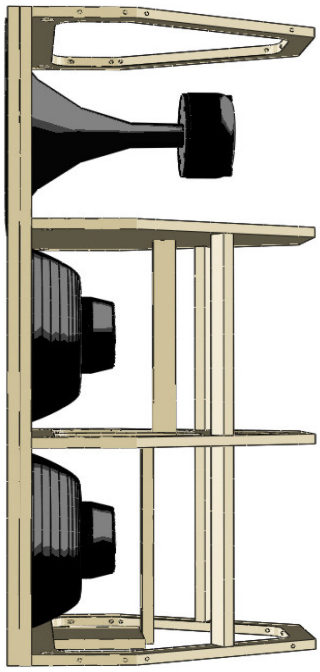
b.



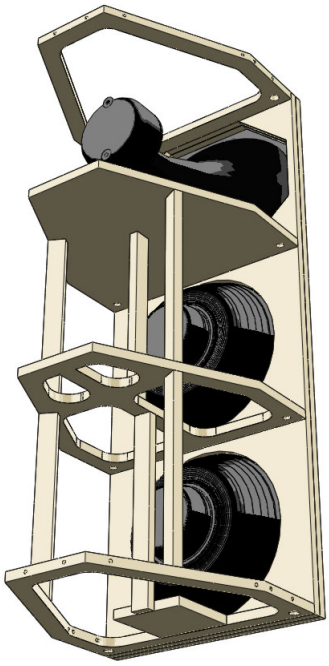
c.



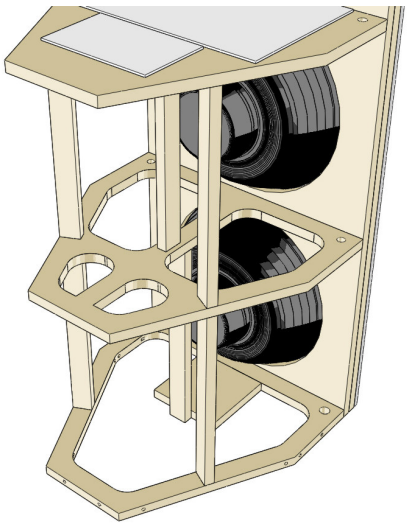
d.



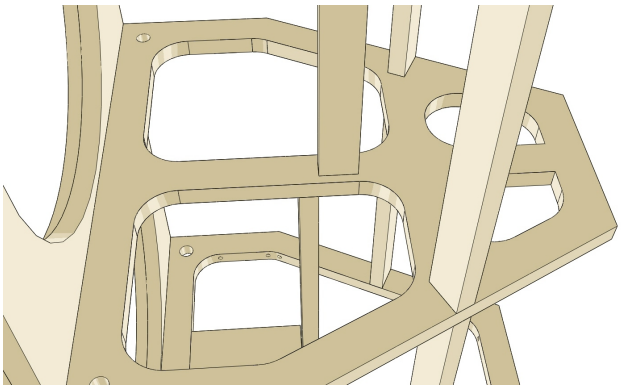
e.



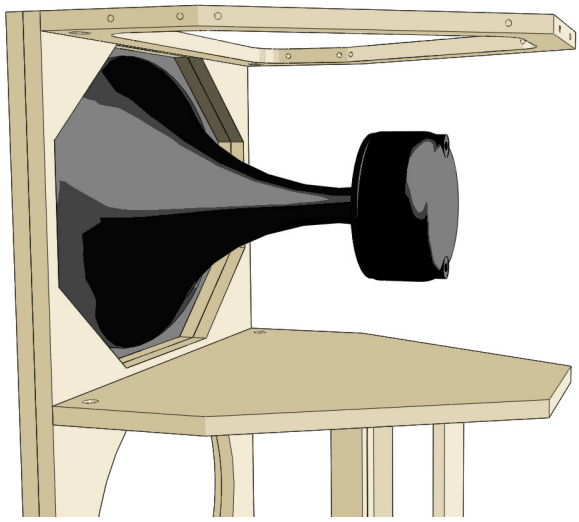
f.



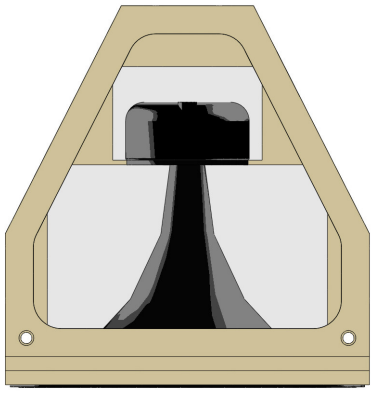
g.



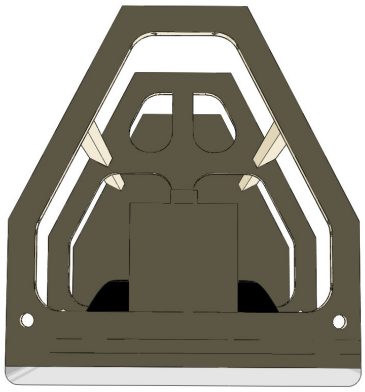
h.



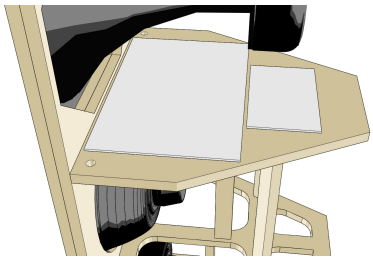
i.



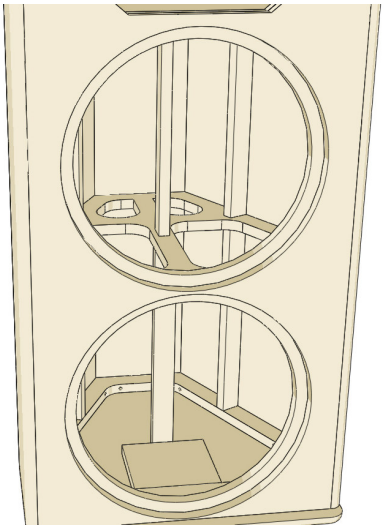
j.



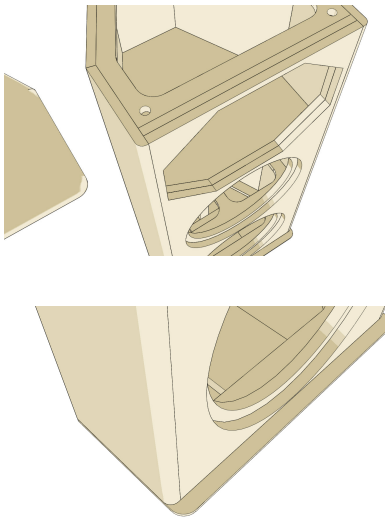
k.



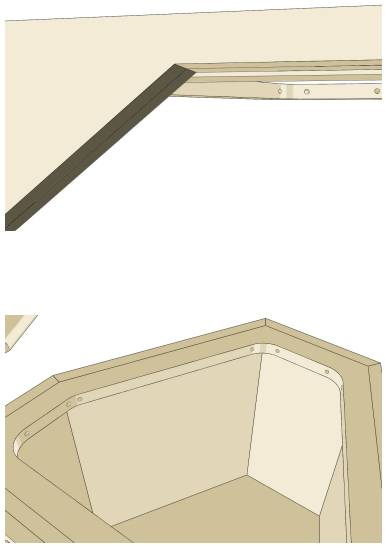
l.



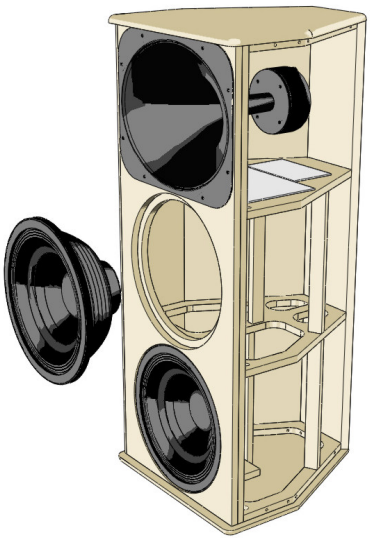
m.



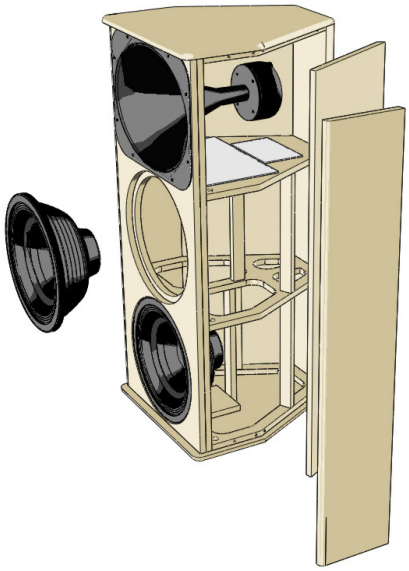
n.



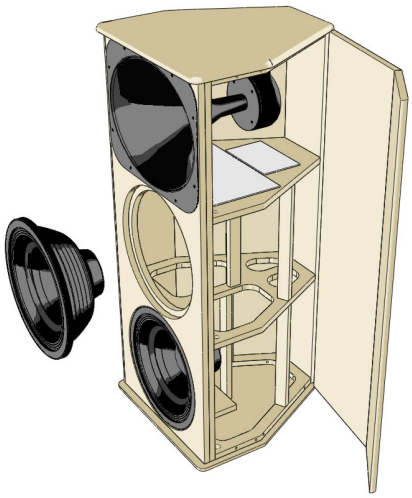
o.



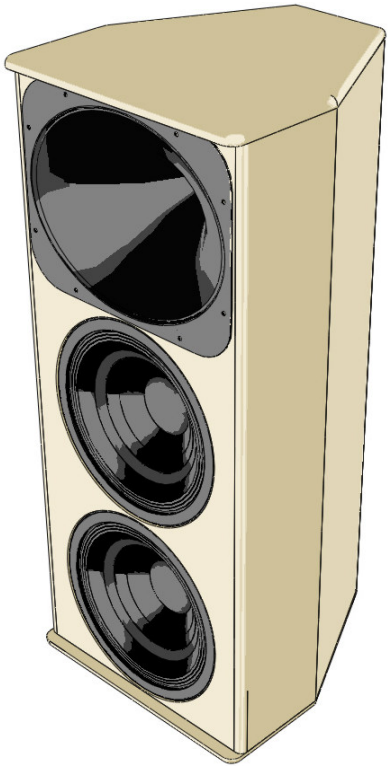
p.



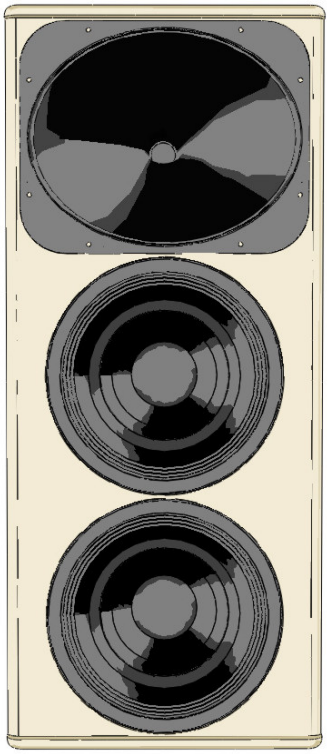
q.



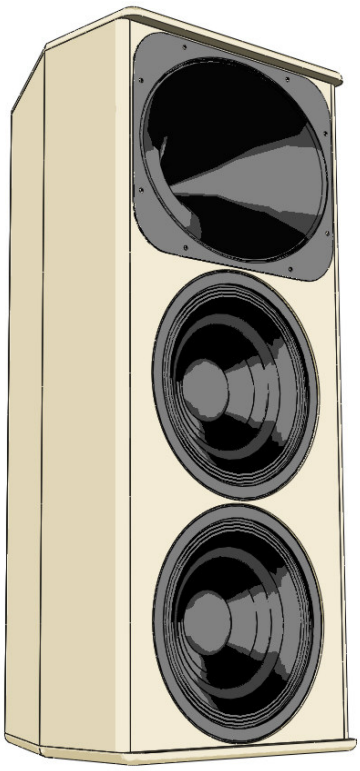
r.



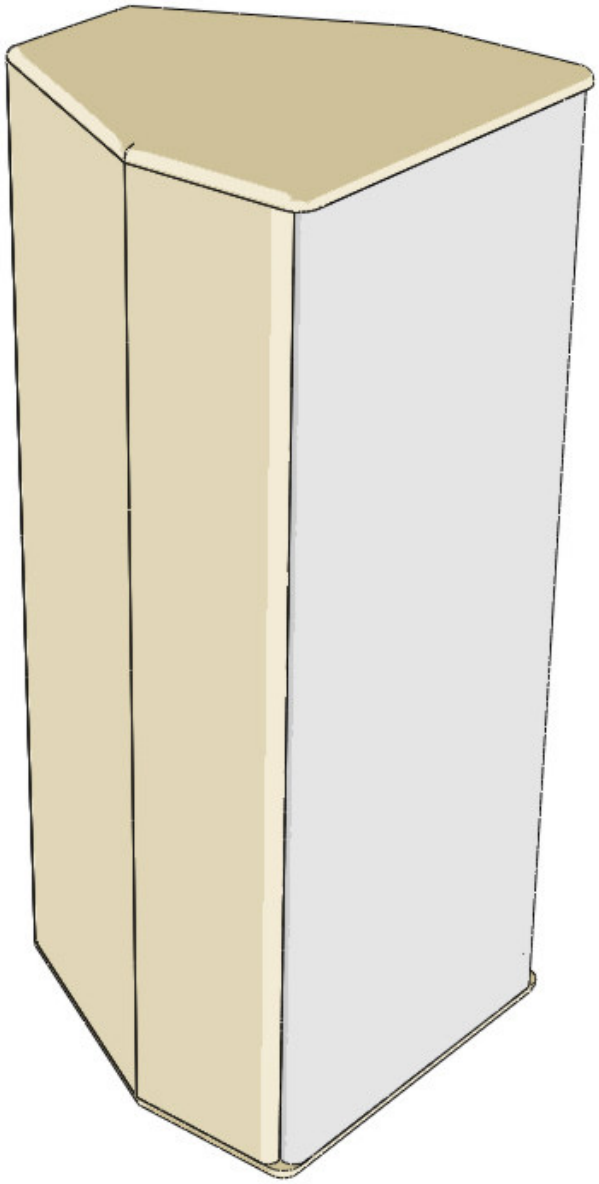
s.



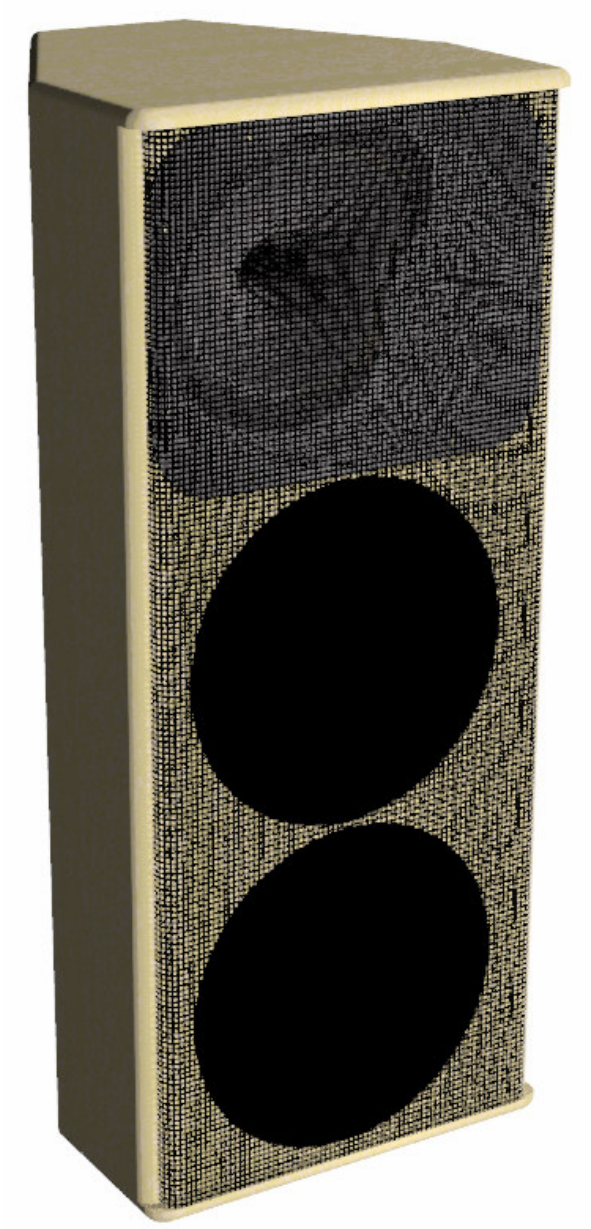
t.



u.

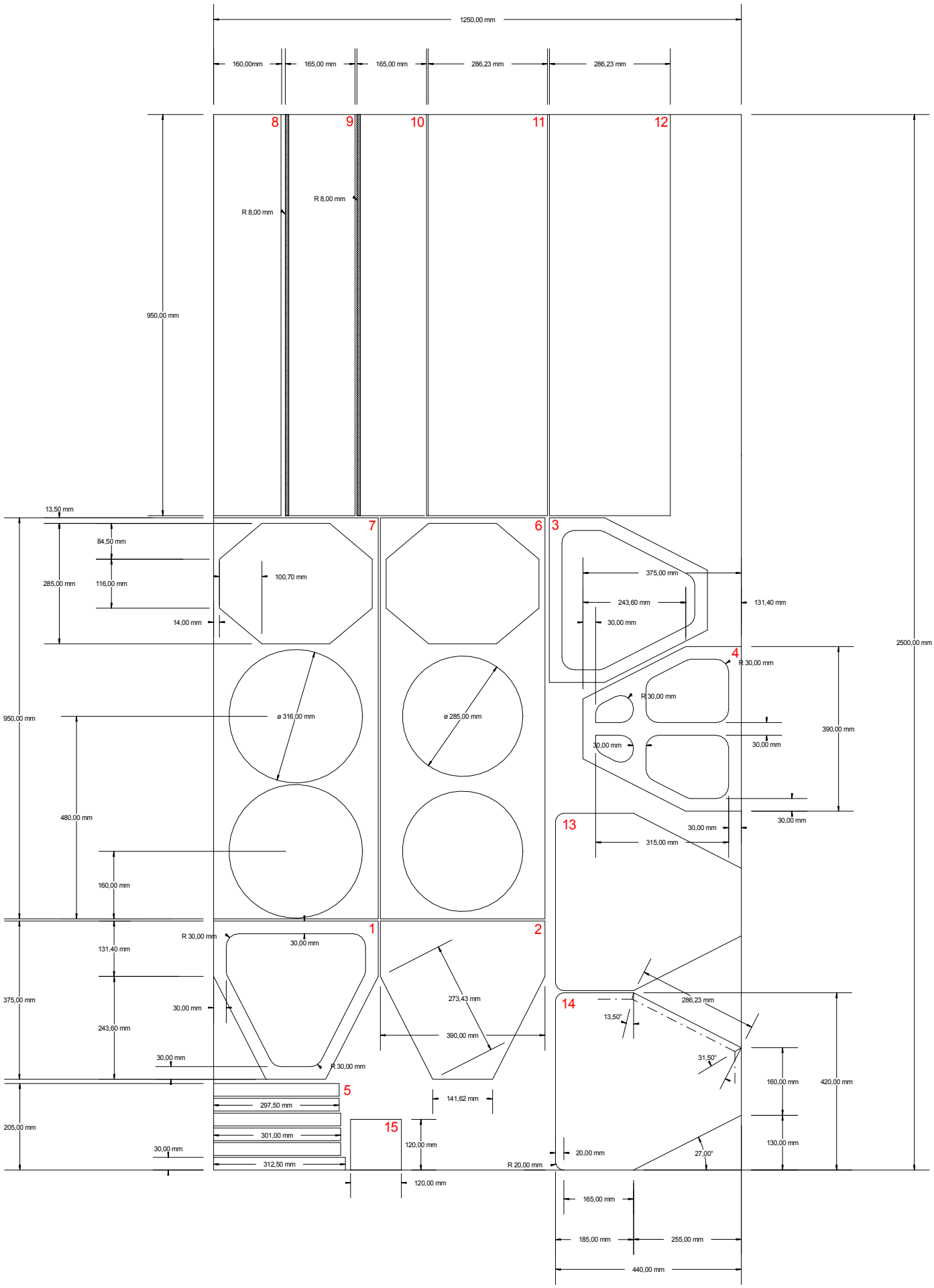


v.



Anhang

b. Zuschnittliste



Anhang

c. Aufbauhinweise

Erfahrungsgemäß gibt es viele Möglichkeiten, ein Lautsprechergehäuse aufzubauen.
Im Folgenden sollen einige konkrete Hinweise zum Bau des PAF212-Gehäuses gegeben werden, die unbedingt befolgt werden müssen, um die rein akustischen Grundvoraussetzungen zu schaffen.
Andere Hinweise sind weniger verbindlich und lediglich als Anregung zu verstehen.

Ganz grundsätzlich sollte als Material für das Gehäuse 15mm Birkenmultiplex mit mindestens sechs Schichten verwendet werden, auch Buchenmultiplex in der selben Stärke macht Sinn.
Für reine Installationsanwendungen ist MDF denkbar, wobei es in 15mm etwas schwieriger zu beschaffen sein dürfte.
Abstand ist von Massivholz- oder Tischlerplatten zu nehmen, da diese rein akustisch nicht geeignet sind!

1.) Fräsungen

- Ausfräsungen in der Schallwand laut Plan vornehmen
- Schallwand besteht aus zwei Platten mit unterschiedlichen Ausschnittdurchmessern für die 12”er, da diese in der vorderen Platte plan versenkt werden
- Ausschnitt für Hochtonhorn ist auf beiden Platten identisch
- das Hochtonhorn selbst wird nicht versenkt sondern lediglich plan aufgesetzt

2.) Vorgehensweise beim Zusammenbau

- Ausschneiden der vier Innenteile (1-4; identische Maße)
- dort Anzeichnen der 30mm-Ränder mit den Versteifungsleisten (5) und Aussägen der Mittelteile mit Stichsäge
- Vorbohren von Schraubenlöchern von außen in die Montagehilfen bzw. Versteifungen (1; 3; 4)
- Vorbohren von Schraubenlöchern von außen in die innere Frontplatte (6), dort, wo die Versteifungen sitzen
- mit 4x40...45- Spax werden nun die Innenteile (1 - 4) mit der Front (6) verschraubt und mit Weißleim verklebt
- anschließend Verschrauben der Versteifungen (5) durch die Innenteile hindurch, auch hier sollte geleimt werden
- danach wird die äußere Schallwand (7) mit reichlich Weißleim aufgeklebt
- durch die vorgebohrten Löcher der Innenteile können nun die Seitenteile (8 – 12; benötigen Gehrungsschnitte!) von innen angeschraubt werden
- unbedingt ist darauf zu achten, dass die Schrauben nicht auf der Aussenseite austreten!
- für erhöhte Stabilität und garantierte Fugendichtigkeit empfiehlt sich hier die Verwendung von PU-Kleber

- anschließend werden der Deckel und Boden (13 - 14) mit PU-Kleber versehen und von innen verschraubt
- bei Bedarf wird eine Verstärkung für Hochständerflansch (15) mit Weißleim und vier Spax eingebaut
- die Kanten der Box werden abschließend mit 10...12mm- Rundfräser verrundet bzw. an den langen Seiten mit Schwingschleifer großzügig gebrochen

Kurze Bemerkung zur Vorgehensweise:
Der Aufbau mit Montagehilfen (1; 3) ist bei Verwendung von Nut und Feder-Verbindungen zwischen den Seiten und Deckel/ Boden sicherlich verzichtbar und stellt lediglich einen Vorschlag dar.
Die Vorteile bestehen in der vergrößerten Oberfläche für die Verleimung im Kantenbereich sowie darin, dass die Box nicht verspachtelt werden muss.
Spachtelmasse ist nicht völlig witterungsbeständig und „arbeitet" zudem, im Gegensatz zu Holz, nicht.

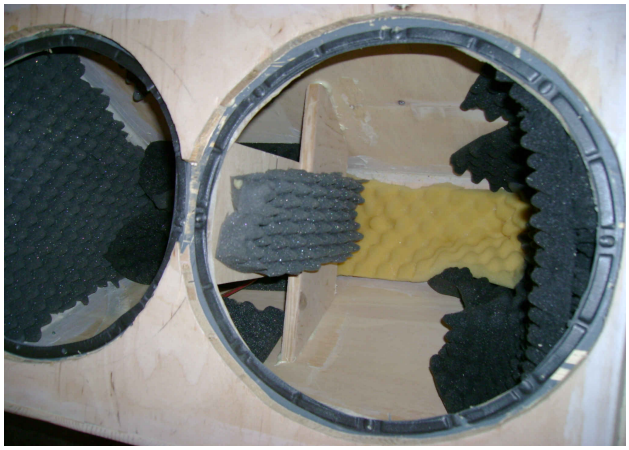
3.) Einbau der Frequenzweichen

- die Weiche ist auf zwei getrennten Platinen für Hoch- und Tiefton aufgebaut
- Platzierung auf dem Trennbrett in der Hochtonkammer, unterhalb des Horns
- Verschraubung jeweils mit kurzen Linsenkopfschrauben
- das Eingangssignal wird zunächst an Hochtonplatine angeschlossen und dann von parallelen Flachsteckern an die Tieftonplatine weitergeleitet
- über Bohrung im Trennbrett wird ein Kabel zu den Tieftönern geführt (Querschnitt 1,5...2,5mm²)

4.) Bedämpfung

- Hochtonkammer wird nicht bedämpft
- im Tieftonteil muss mit Noppenschaum gearbeitet werden:
- eine Lage von min. 6cm Stärke jeweils auf Boden und Trennbrettinnenseite, vollflächig
- eine Lage von min. 3cm Stärke auf die Rückwand, vollflächig
- eine Lage von min. 3cm auf die parallelen Seitenwände, vollflächig
- die trapezoiden Seiten brauchen nicht bedämpft zu werden
- eventuelle Reste können locker auf der mittigen Versteifung befestigt werden

Foto aus dem Prototypen:



5.) Frontgitter

- abzuraten ist von Rundlochgittern mit Lochdurchmessern <10mm, da diese ein heftiges Interferenzmuster hervorrufen
- gute Ergebnisse liefern Quadrat- oder Hexagonallöcher mit schmalem Steg
- das Gitter muss an den Kanten rundgebogen oder in zwei Schritten abgekantet werden, um der Kontur des überstehenden Deckels bzw. Bodens zu folgen
- zur Befestigung des Gitters bieten sich z.B. kleine Neodymmagnete an

6.) Lackierung

- neben dem Standardlack von Warnecke & Böhm kommt auch eine Beschichtung mit PU in Frage, wobei hier zu beachten ist, dass alle Ausschnitte und Fräsungen entsprechend der Filmdicke des Auftrages zu vergrößern sind

7.) Griffe, Füße, Anschlüße usw.

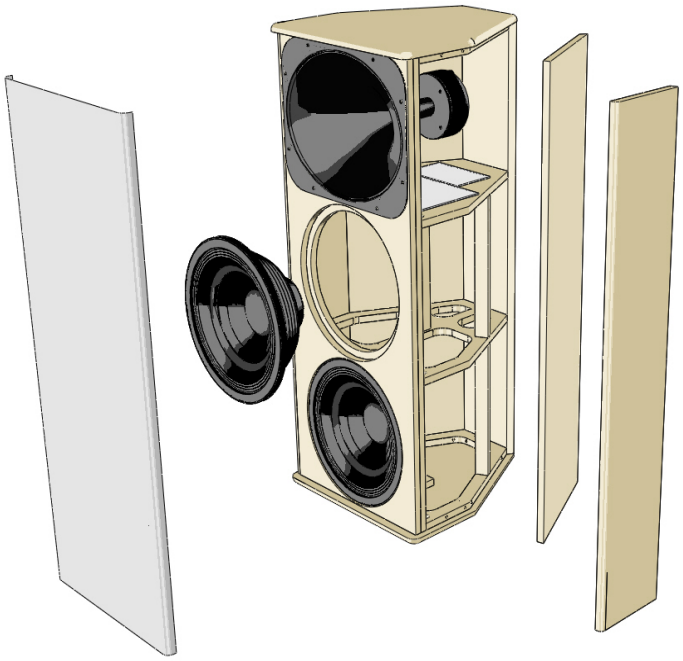
- hier darf sich der Nachbauer kreativ betätigen, nur ein paar Vorschläge:
- je eine seitliche Griffschale auf Höhe des oberen 12”ers
- Anschlußterminal auf Höhe des Hochtonhorns (spart Kabelwege zur Weiche)

8.) Flugzubehör

- dieser Punkt wird vom Autor nicht unterstützt!
- Laien sollten für die Planung und Inbetriebnahme unbedingt professionelle Hilfe in Anspruch nehmen

PAF212 technische Informationen

- **direktstrahlendes 2x12" / 1,4" System für hohe Ansprüche**
- **komplexes, passives Filternetzwerk mit steilflankigen Trennungen und Allpass zur Laufzeit- und Phasenkorrektur**
- **60 x 50 Grad horizontale/ vertikale Abstrahlung**
- **breites Anwendungsspektrum durch neutrale Abstimmung und hohe Maximalpegel**
- **Betrieb alleine oder im Cluster**



Die PAF212 wurde entwickelt, um mittlere und große Veranstaltungen in hoher Qualität zu beschallen.

Entstanden als Gemeinschaftsprojekt von www.pa-forum.de wird die PAF212 nicht als Fertigprodukt vertrieben, sondern kann mit den frei verfügbaren Gehäusebauplänen in Eigenregie nachgebaut werden.
Nicht öffentlich ist jedoch die Frequenzweichenschaltung, die nur fertig aufgebaut erhältlich ist.

Bei der Entwicklung wurden die zur Zeit leistungsfähigsten Komponenten speziell für die angestrebte Kombination ausgewählt.

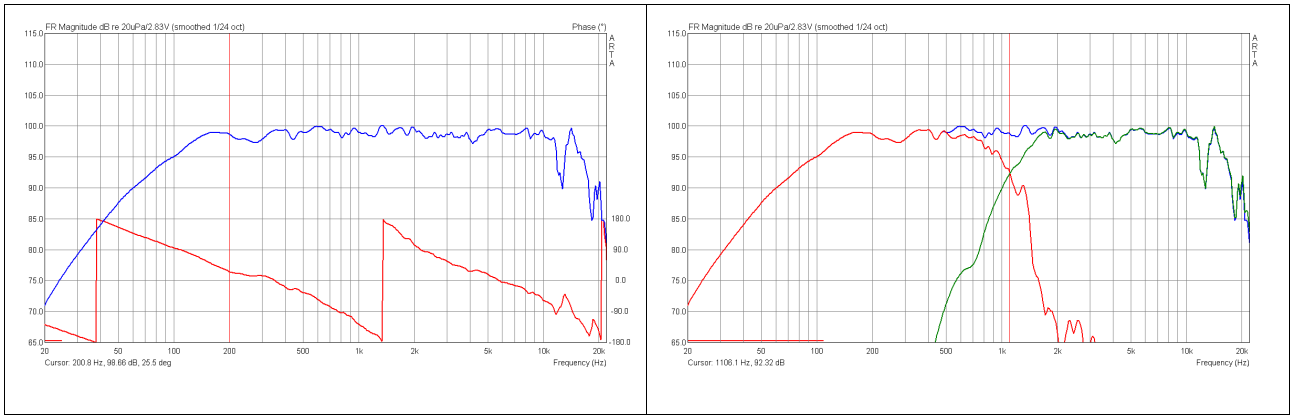
Dank des großen Hochtonhorns und der Zeilenanordnung der 12"-Tiefmitteltöner wird eine hohe Reichweite erzielt und ein definierter Abstrahlwinkel eingehalten.

Die komplexe Frequenzweichenschaltung mit passivem Allpassfilter sorgt für eine gleichmäßige Laufzeit und lässt die Treiber optimal miteinander „verschmelzen", so dass auch kritisches Musik- oder Sprachmaterial natürlich wiedergegeben werden kann.

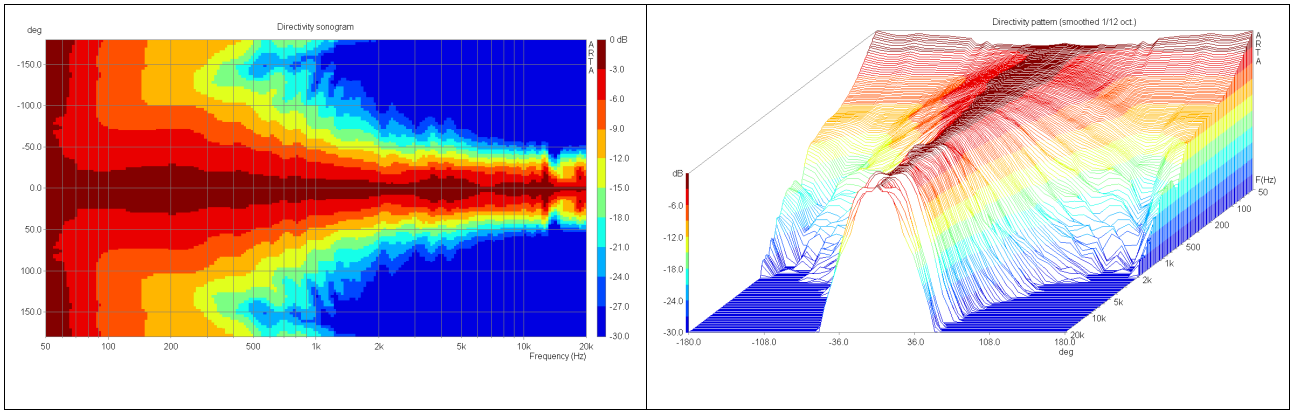
Die PAF212 eignet sich für die Kombination mit beliebigen Subwoofern, wobei diese zumindest eine obere Eckfrequenz von ca. 80Hz erreichen sollten. Bei Anwendungen ohne Bassunterstützung sollte eine Möglichkeit zur Entzerrung des Tieftonbereiches (Digitalcontroller o. Ä.) vorhanden sein.

Prinzip	2-Wege Passiv-System, geschlossenes Gehäuse
Bestückung Hochton	18Sound ND1460 / XT1464
Bestückung Tiefton	B&C 12NDL76
Frequenzweiche	18dB Hochpass; 24dB Tiefpass; Allpassfilter zur Laufzeit- und Phasenkorrektur
Trennfrequenz	1,15kHz
SPL 1m/ 1W/ Peak	99dB/ 138dB
Belastbarkeit	800W RMS/ 1200W Programm
Impedanz	4Ω (Minimalwert = 3,71Ω bei 160Hz)
Übertragungs-bereich -10dB	55Hz – 18kHz
Übertragungs-bereich ±1,5dB	125Hz – 12kHz
Abstrahlung	60 x 50 Grad nominal
Gehäuse	15mm Birkenmultiplex, teilweise trapezförmig mit Clusterwinkel
Abmessungen	980 x 420 x 440mm
Gewicht	34kg (je nach Ausführung)

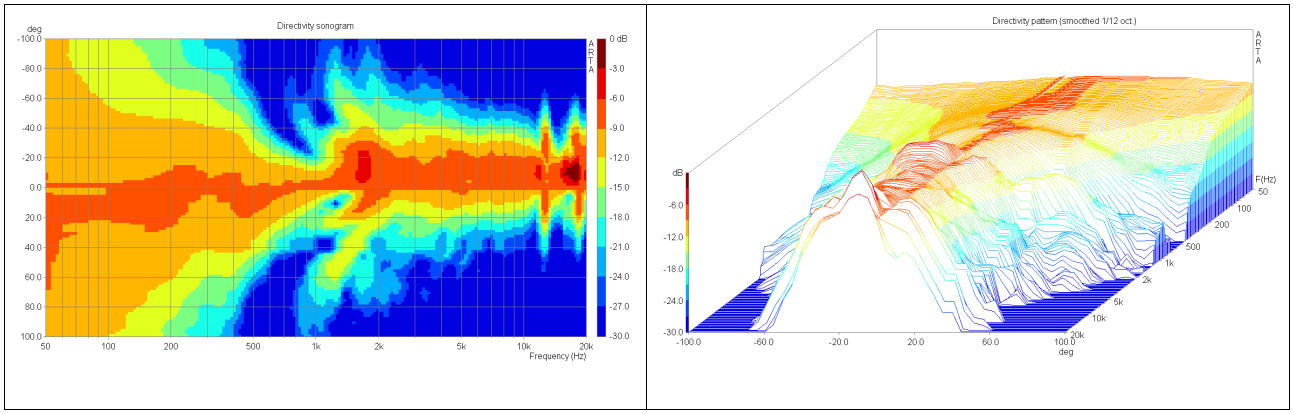
Frequenz- und Phasengang; Wege zueinander



horizontale Abstrahlung ± 180°

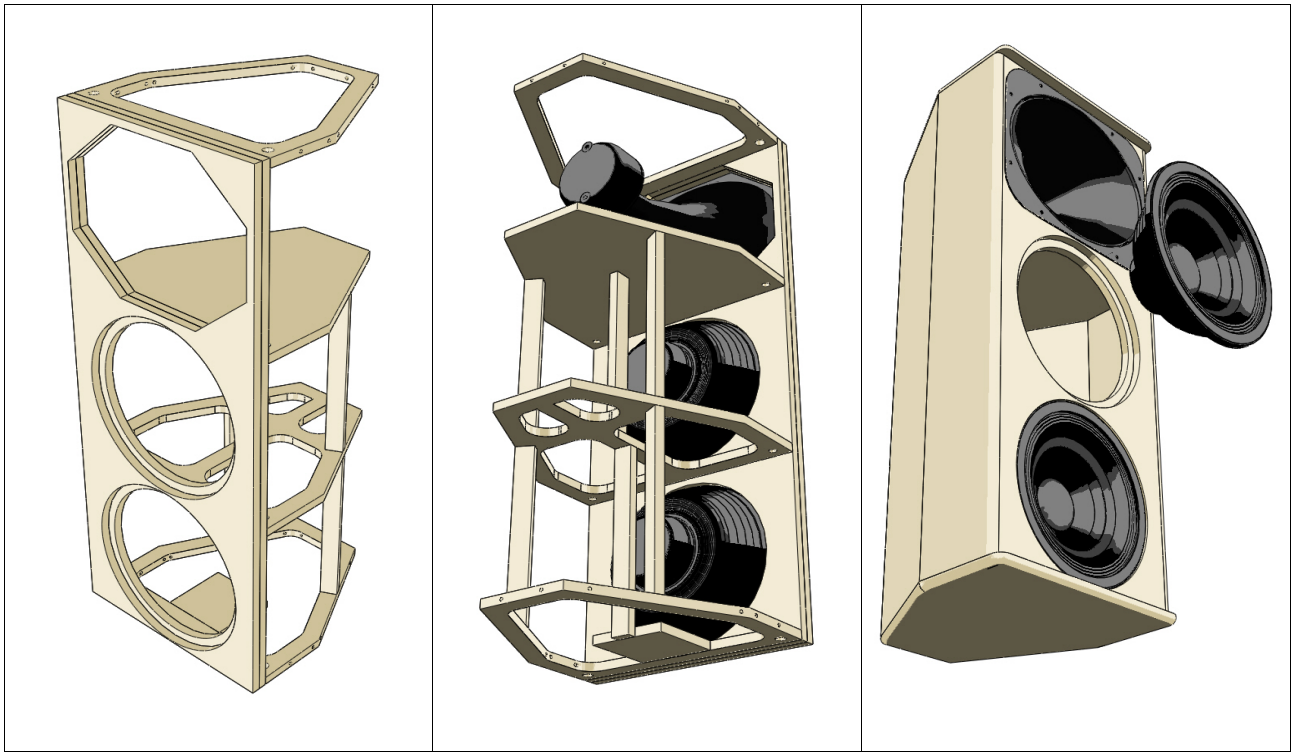


vertikale Abstrahlung ± 100°



PAF212 technische Informationen

Visualisierung des Gehäuses



Bei technischen Fragen und Auskünften zum Vertrieb zögern Sie bitte nicht, uns zu kontaktieren.

Fabian Reimann, Semiramisstraße 1, 13089 Berlin

1. Auflage April 2008
Alle Rechte vorbehalten.

fon 1: +49 30 47 30 94 51
fon 2: +49 179 361 82 87

email: reimann@hr-systems.biz
www.hr-systems.biz