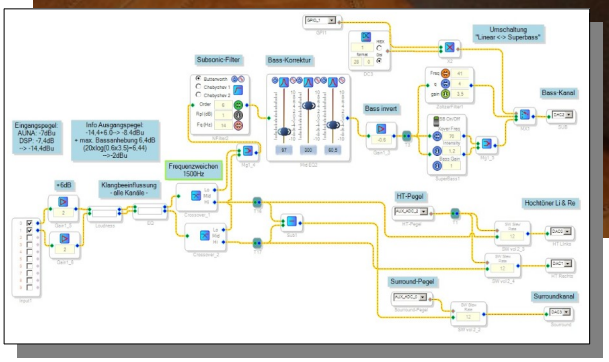
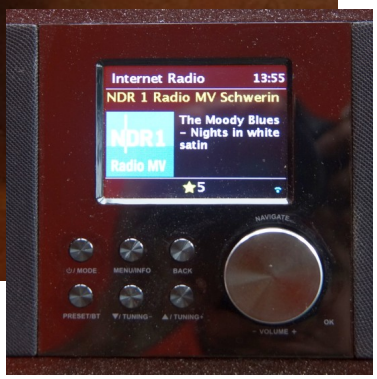
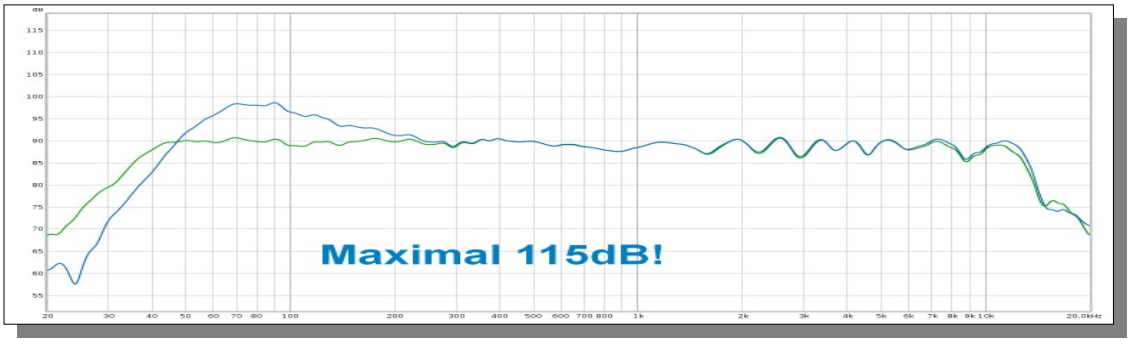
MEINE akkubetriebene Aktiv – Box

(Corona-Box 2020 / Moai-Lautsprecher)







Inhaltsverzeichnis

1. Allgemeines....3
   1.1. Vorgaben....3
   1.2. Bemerkungen zur fertigen Box....4
2. Die passive Box....5
   2.1. Technische Randbedingungen....5
   2.2. Mechanische Abmaße....6
   2.3. Vorderfront zusammenbauen....8
   2.4. Schalltrichter laminieren....9
   2.5. Box zusammenbauen....10
   2.6. Oberflächenbehandlung....11
   2.7. Die Acryl-Abdeckklappe....13
3. Die Elektronik....14
   3.1. Technische Randbedingungen....14
   3.2. Stromversorgung 400W....16
   3.3. Leistungsbilanz....19
   3.4. Pegelplan....20
   3.5. Step-Up-Wandler und Leistungsverstärker (8 Ohm Last)....21
   3.6. Integration von AUNA und digitalem Soundprozessor (DSP)....29
   3.7. Das Programm für den digitalen Soundprozessor (DSP)....33
4. Die fertige Aktivbox....38
   4.1. Kalkulation (in etwa tatsächliche Kosten)....38
   4.2. Ansichten der fertigen Box....39
   4.3. Akustische Messungen (W250S/DT-254 noch ohne DSP)....40
   4.4. Akustische Messungen (W250S, DT-254 mit DSP)....42
   4.5. Akustische Messungen (W250S, KE25SC mit DSP)....47
   4.6. Technische Daten – Zusammenfassung –....51
5. Anlagen....55
   5.1. Subsonic/Sallen-Key Filter im SigmaStudio....55
   5.2. Allgemeines zu aktiven Filtern (aus [1])....58
   5.3. Praktische Filter (aus [2])....59
   5.4. Pegel und Leistung....62
   5.5. Technische Daten Auna Connect 120 (selbst gemessen)....62
   5.6. Technische Daten Board TDA7498 (nachgemessen)....63
   5.7. Technische Daten Step-Up-Wandler & Einstellung....65
   5.8. Ohmsche Last als Chassis-Imitation....66
   5.9. Anschluss und Programmierung ADAU1701 mit SURE Programmer....67
   5.10. Eigenbau-Programmer für ADAU1701....70
   5.11. Frequenzgangmessungen W250S &DT-254 in der Box....72
   5.12. Frequenzgangmessungen W250S &KE25SC in der Box....76
   5.13. Eine Acryl-Biegevorrichtung....78
   5.14. Akustische Messungen an einer JBL Xtreme....79
   5.15. Materialien für den Lautsprecherbau....81
6. Literaturquellen....82

1. Allgemeines

1.1. Vorgaben

(grün: Vorgaben erreicht, rot: Abweichung)

- ✔ Ansprechende Aktivbox mit möglichst allen notwendigen Baugruppen in einem Gehäuse für Partys/Familienfeiern in Räumen und im Freien P_{Gesamt}>100W RMS, Akkubetrieb möglich. Bessere akustische Werte als die JBL Xtreme (siehe Anlage 5.14).
  - ➔ Kompromiss → Verzicht auf breite Stereobasis
- ✔ Budget ca. 800€ (→ 1200 € mit KE25SC)
- ✔ Mechanische Anforderungen: Höhe der Box max. 80 cm, Platzierung in Raumecke mit 135°
  - ➔ da Gewicht >> 15 kg → Rollen zum Transport und Transportgriff(e) vorsehen
    → Gehäuse aus Multiplex mit Mehrfachversteifungen und Dämpfungen, Bedienpult an Oberseite
- ✔ Akkudimensionierung/Kapazität (mindestens):
  - ➔ Partybetrieb: 10h – 10W, 2h – 50W → 200Wh
  - ➔ Diskobetrieb: 6h – 50W → 300Wh
  - ➔ Festivalbetrieb: 40h – 5W, 4h – 50W → 400Wh

    → **3x WP-1236W KungLong (jeweils 9Ah bzw. 90Wh) = 270 Wh**
    - **102 x 151 x 65 (HxLxB), 3x 2,7 kg, 3x 19 €**

    → 3x WP-12-12A-F1KungLong (jeweils 12Ah bzw. 120Wh) = 360 Wh
    - 100 x 151 x 98 (HxLxB), 3x 4,1 kg, 3x 25,30€

    → 3x WP-14-12SE-F2 KungLong (jeweils 14Ah bzw. 140Wh) = 420 Wh
    - 100 x 151 x 98 (HxLxB), 3x 4,4 kg, 3x 29,50€
- ✔ Akustische Anforderungen:
  - ➔ Linearer Frequenzgang von < 70 Hz bis 15 kHz ± 2 dB (→ 14 kHz±2,5dB mit DT-254) (50W RMS) im Freien (direkte Abstrahlrichtung), gemessen in 2 m Entfernung und 1,2 m Höhe. Möglichst tiefer Bass.
  - ➔ Eventuell mit Möglichkeit, aktive Filter gegen Raummoden zu aktivieren.
  - ➔ Abstrahlung leicht nach oben gerichtet → sitzende/stehende Personen im Bereich 2 m … 20 m. Horizontaler Bereich mindestens ± 60°, vertikale Abstrahlung ± 20°
    → Messung Frequenzgang im Abstand 2/4/6/8 m & 120 cm Höhe, jeweils horizontal aller 30° (→ Boden-Reflexionen und HT-Interferenzen haben einen zu großen Einfluss, daher keine (vergleichbaren) Messungen möglich)
    → elektronische Frequenzkorrektur analog oder per DSP, trockener Bass erwünscht.
  - ➔ Da derzeitige Lautstärkeregelungen eine Tiefenanhebung nicht unterstützen → nach Möglichkeit automatischen Bassboost/Loudness für P < 1 W (Innen), bzw. < 5 W (Außen) integrieren

  → Gestaltung als 2-Wege-Box mit 1x Visaton W250S 8 Ohm (100W), 2x Monacor DT-254 8 Ohm (je 90W), 2x Visaton CP13 (4 Ohm) als Surround-LP. 4x 100W Class-D Verstärker mit VDD > 25V.
- ✔ Mögliche Signalquellen (als Musikstation oder Parallelbetrieb zu Video-/Audioanlagen)
  - ➔ Bluetooth, FM, DAB+, Internetradio (Wifi), möglichst auch DLNA, AUX (echtzeitfähig), USB-Stick und/oder SD-Karte. Mehrere Quellen gleichzeitig – nicht notwendig. Fernbedienung wünschenswert (Laut/leise, Quellenumschaltung), Steuerung per App nicht unbedingt notwendig (reine Bluetoothverbindung reicht).
    → ideal dafür ist das „Innere“ von AUNA Connect 120 (inklusive Fernbedienung)
  - ➔ Latenz zwischen ext. Eingang und Signal am Lautsprecher < 25 ms
- ✔ Sonstiges
  - ➔ Akkuzustandsanzeige, Lademöglichkeit per Netzteil/PKW/Solarmodul, Koppelmöglichkeit mit anderen Anlagen (12V für Smartphone-Ladegeräte o.ä.), zusätzliche (rückwärtige oder seitliche) Lautsprecher für Surround, eventuell auch optische Strahler/Laser/Effekte.
    → Interne Stromversorgung auf 12V Basis, mittels Step-Up Wandler >25 V für NF-Verstärker bereitstellen, automatische Abschaltung der Box bei leeren Akkus.

→ Ziel weitgehend erreicht!!!

1.2. Bemerkungen zur fertigen Box

Die fertiggestellte Aktivbox erfüllt weitgehend alle Vorgaben. Auch die ergänzenden Solarzellen und das Lauflicht integrieren sich optimal – im Sommer braucht man draußen kein zusätzliches Netzteil und abends gibt es ein farbiges Ambiente … Einzig, wenn vom USB-Stick Musik abgespielt wird (die dann trotz Normalisierung ca. 8 dB leiser ist als z.B. Internet-Radio) kann man bei minimalster Lautstärke neben dem Rauschen noch ein leises „Knattern“ hören, das offensichtlich durch den Datenverkehr eingekoppelt wird. Aber das ist schon Jammern auf hohem Niveau ;-)

Allerdings gibt es auch einige (noch) nicht umgesetzte Wünsche. Hier die Wichtigsten:

- ✔ Das AUNA und die Lautsprecherchassis sind nicht spritzwassergeschützt. Ein klappbarer Acryldeckel an der Oberseite des AUNA wäre bereits hilfreich.
- ✔ Die Box ist mit 52 kg relativ schwer, bei einem Nachbau könnte das Gehäuse dünner und leichter ausfallen, anstelle von Blei-Vlies auch LiPo zum Einsatz kommen.
- ✔ Zusätzliche Passivmembran(en) für Bassverbesserung 20 … 40 Hz
- ✔ Der Klang ließe sich weiter verbessern durch den Einsatz der wesentlich teureren Visaton KE 25 SC - 8 Ohm (2x 130 €) gegenüber der verwendeten Monacor DT-254 (2x 37 €)
- ✔ Einsatz eines leistungsfähigeren DSPs (bei akzeptablen Preis) um zusätzliche Managementfunktionen zu übernehmen:
  - ➔ Automatische gleitende Modusumschaltung („N“ / „BB“ und „Disko“), je nach Lautstärke
  - ➔ Temperatur- und Leistungsüberwachung der Box
  - ➔ FIR-Filter für zusätzliche Phasenanpassung
- ✔ Ergänzung eines Video-Displays an der Vorderseite.
- ✔ Einbau von „Fluxkompensator“ und „NanoLan“ ;-)

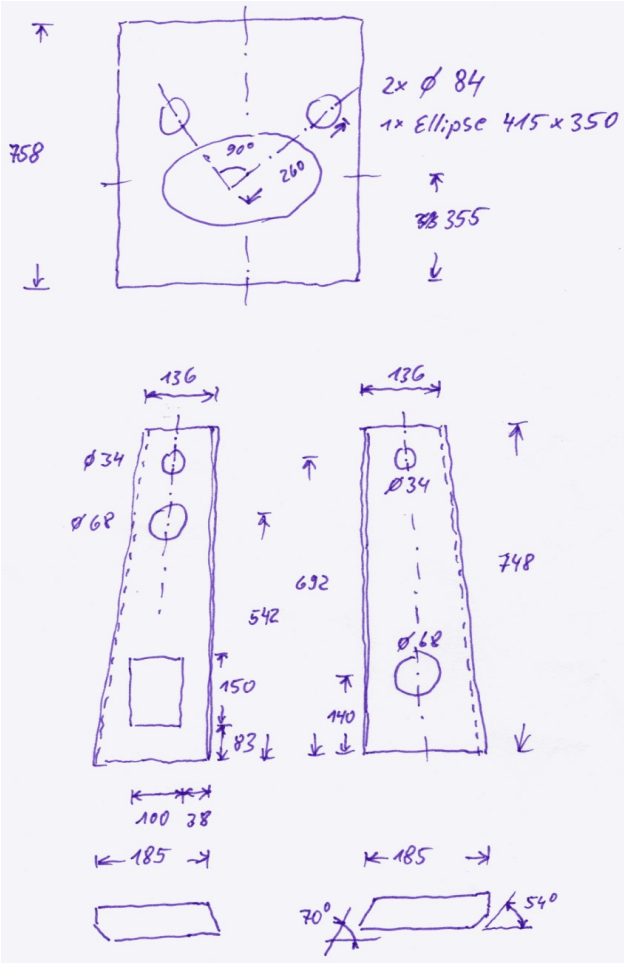
Während diese Dokumentation entstand, kam es bei weiteren Messungen zu einer drastischen Verschlechterung des Klangs der beiden Monacor-Hochtöner. Im Verlaufe weniger Tage stieg der Klirrfaktor allmählich auf Werte um 10-20 %(!). Als Ursache wurde eine thermische Überlastung ermittelt, die zum Erweichen des Klebers in der Gewebemembran und zu einer irreversiblen Verformung des Spulenkörpers führte. Hörbar wurde ein „Kratzen“ bei kleinen Lautstärken und optisch war die Spule auch nicht mehr richtig „rund“. Da eine elektrische Überlastung ausgeschlossen werden konnte (kein Gleichstromanteil, kein Rückkopplungs-Pfeifen, maximale Last < 65W), und beide Hochtöner mechanisch plan eingebaut waren, blieb nur die sommerliche Hitze (pralle Sonne) in Verbindung mit einem normalen Betrieb als Verursacher übrig. Die Monacor vertragen also im Außenbereich unter ungünstigen Bedingungen maximal 30 …40W (RMS) und nicht 90 W, wie angegeben. Vermutlich hatte die Sonne die Konstruktion bereits auf Werte von 60 …70 °C „vorgeheizt“ und die elektrische Leistung dann den Hochtönern den Rest gegeben. Der innere Aufbau des Spulenträgers zeugte auch nicht unbedingt von hoher Qualität (unsaubere Verarbeitung). → nie wieder Monacor!
Folgerichtig wurden jetzt zwei Visaton KE25SC für 2x112€ und zwei Schutzgitter bestellt und eingebaut. Der Klangunterschied ist gewaltig – glasklarer und brillanter Sound erheben die Box nun von einer reinen „Party-Box“ auf ein Soundlevel, dass ich so nicht erwartet hätte. Selbst im Wohnzimmer steht die Box meiner 500 W Teufel-Anlage in nichts nach, im Gegenteil … ;-)
Die Acryl-Abdeckklappe ist mittlerweile auch umgesetzt (siehe 2.7.). Der Frequenzgang der KE25SC ist allerdings nicht so linear wie die Technischen Daten des Herstellers vermuten lassen [13], möglicherweise liegt das an der ausgelagerten „kostenoptimierten“ Fertigung in Fernost, wie in Foren berichtet wurde, eigentlich schade. Für dieses Projekt ist das aber noch „OK“.

2. Die passive Box

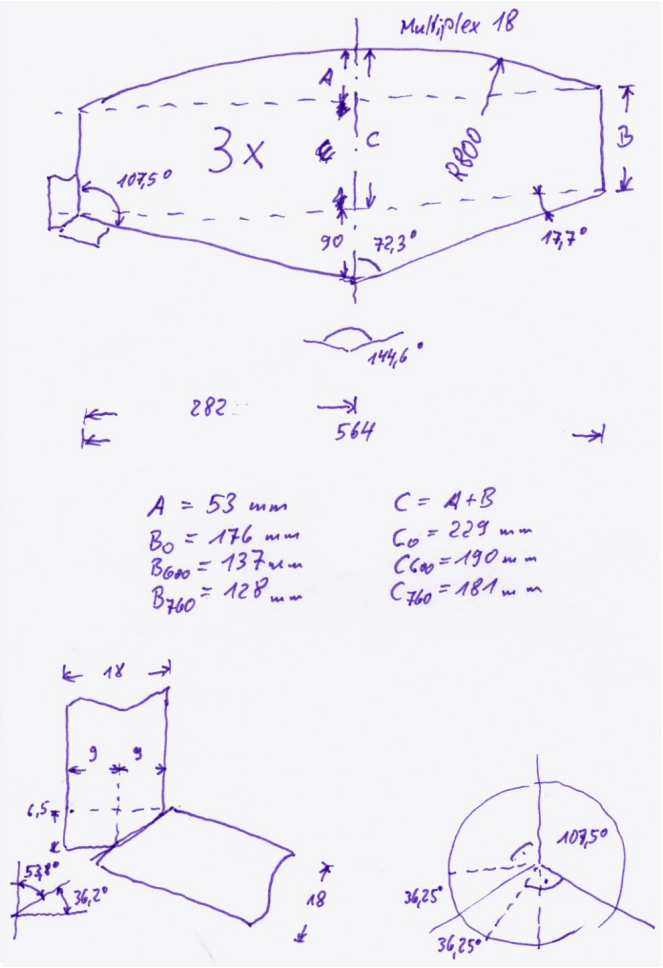
2.1. Technische Randbedingungen

- ⑨ Möglichst resonanzarmes Gehäuse mit dämpfenden Eigenschaften → ideal Sandwich wie z. B. 12 mm MDF/≥4 mm Bitumen/4 mm Sperrholz [3]. Neben Dämpfung sind auch Ableitung in Kraftknoten und Verstärkungsrippen zu nutzen. Schwingende Flächen im Frequenzbereich 600-1500Hz und damit freie Abstände >22 cm sind zu vermeiden, notfalls zu lasten des Gewichts.
- ⑨ Da durch eine gewölbte Vorderfront der Box der Subwoofer (Sub) relativ weit im Inneren verbaut werden muss, ist eine Impedanzanpassung der Membran an die Umgebung durch einen Schalltrichter sinnvoll. Gleichzeitig muss der Membran-Abstand zwischen Hochtöner (HT) und SUB bei der Cross-Over Frequenz berücksichtigt werden.
- ⑨ Da 2-Wege-Konzept, gibt es nur eine nach innen geöffnete Lautsprechermembran → keine Raumabtrennung im Gehäuse für die verschiedenen Chassis erforderlich.
- ⑨ Durch den Einbau von 2 Hochtönern (linker/rechter Kanal) in geringem Abstand voneinander (40 cm), die im Wesentlichen das gleiche Signal wiedergeben, ergeben sich Vor- und Nachteile:
  - Von Vorteil ist die akustische Wiedergabe von Stereosignalen mit einer räumlichen Abbildung im Nahfeld-Bereich in Entfernung von der Box bis maximal 2-3 m.
  - Zwei HT teilen sich die abzustrahlende Leistung → HTs werden nicht überlastet.
  - Von Nachteil ist natürlich die Entstehung von Interferenzen die zu einem gefürchteten „Klangmatsch“ bei mittleren Entfernungen je nach Ausrichtung zur Box führen können. Da die akustischen Achsen beider HTs um etwa 30° divergieren entschärft das ein wenig die Situation. In Innenräumen kommen zusätzliche Raumreflexionen hinzu. Über Erfolg oder Misserfolg der Konstruktion entscheidet am Ende der Höreindruck.
  - Bei großen Hör-Abständen von der Box (> 5 m) arbeiten beide HTs als ein Strahler mit horizontal erweiterter Strahlungsbereich und höherer Leistung im Vergleich zu nur einem HT.
  - Für vergleichbare akustische Messungen der Box sollten vorübergehend Filter im DSP gegen Interferenzen für die aktuelle Mikroposition aktiviert werden.

2.2. Mechanische Abmaße

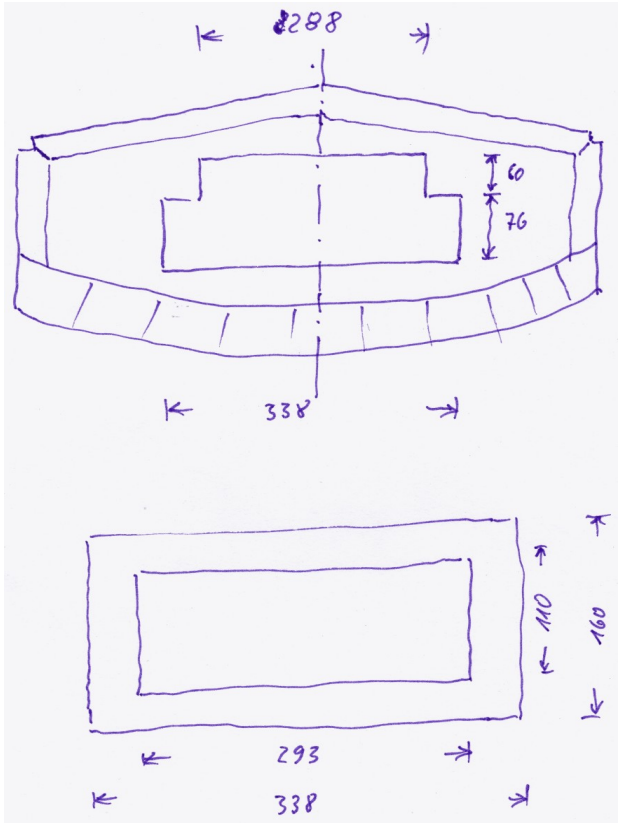


Front und Seitenflächen

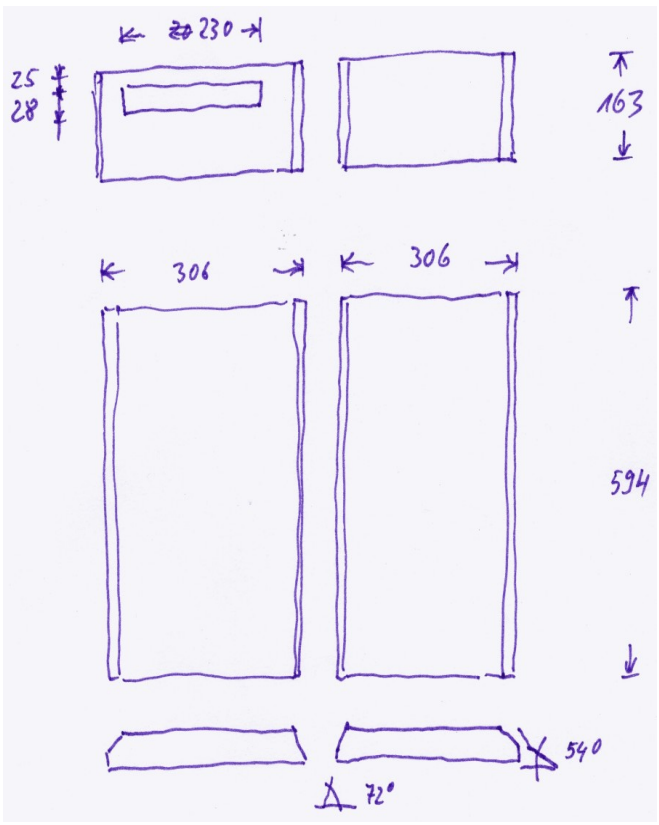


Oberseite, Unterseite, Innenträger

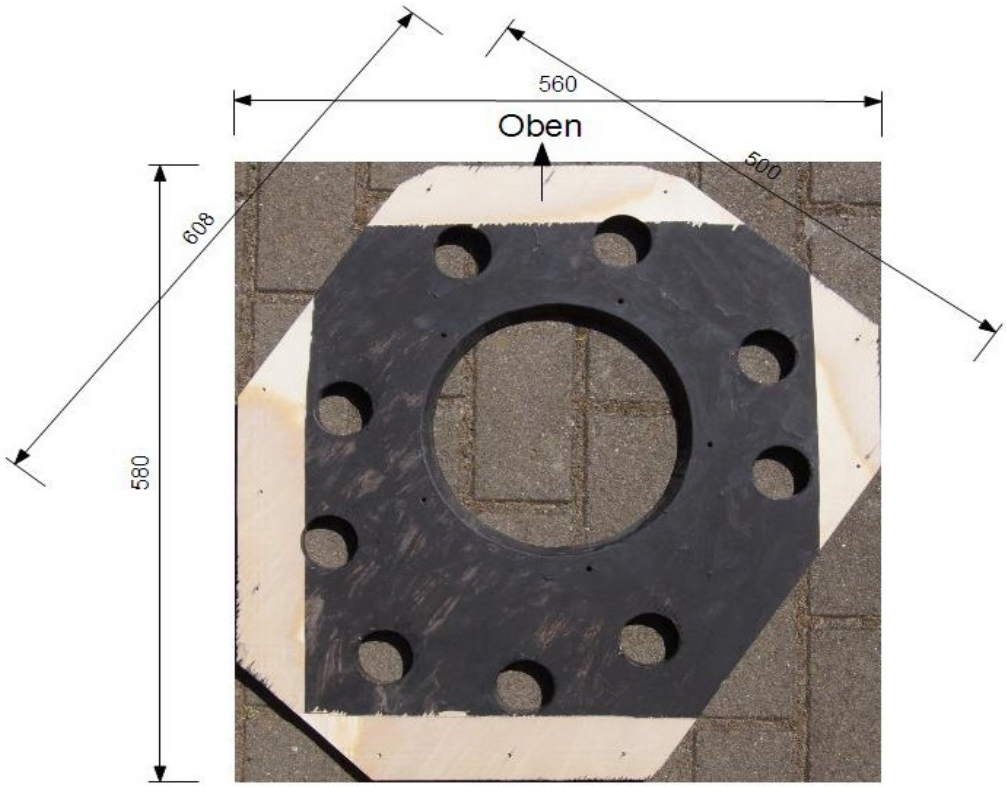
Hinweis: die untere Bohrung 68 mm für das BR-Rohr sollte 4 cm höher (140 mm → 180 mm) angebracht werden, dann passen auch Akkus mit größerer Kapazität in die Box.



Oberseite: Befestigungsrahmen für AUNA



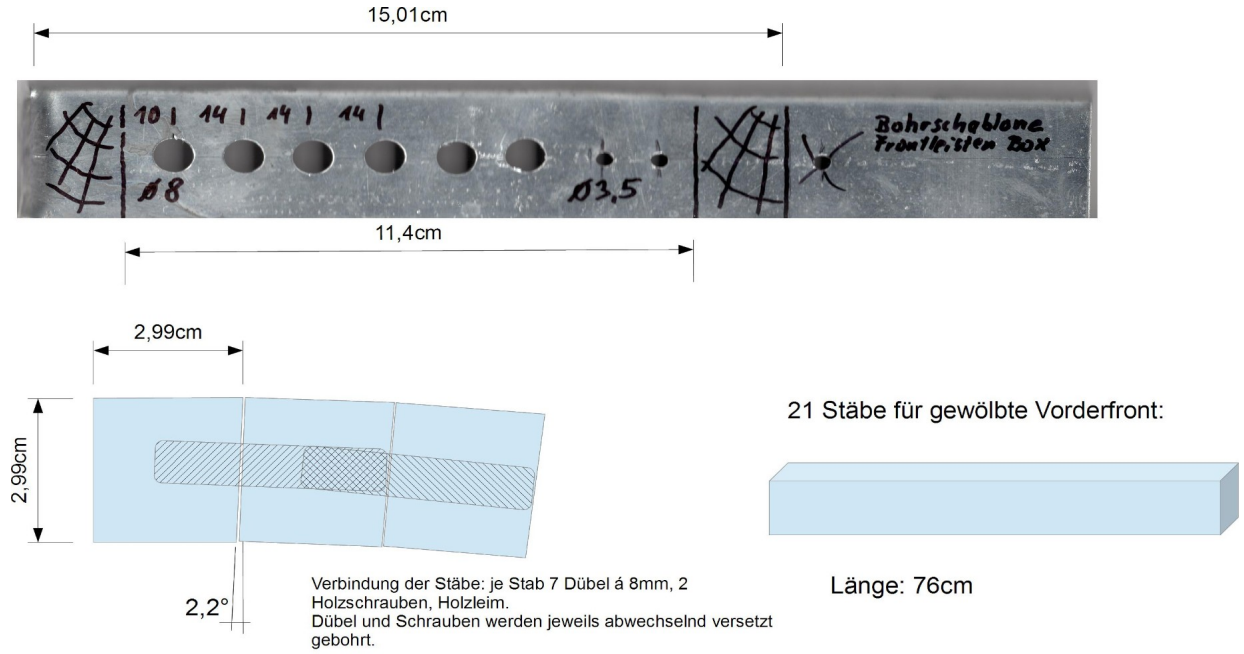
Rückseiten



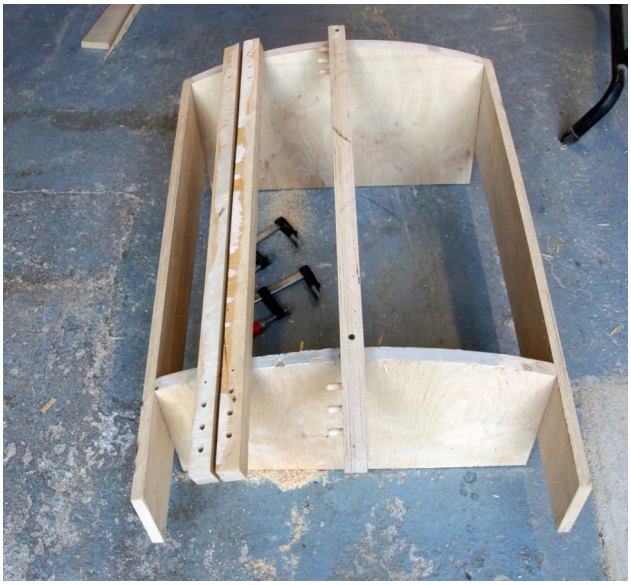
SUB-Trägerplatte 18 mm Sperrholz (Ansicht von vorn)
Innen-DM für SUB: 233 (vorn) 218 (hinten), gemäß Öffnung Vorderfront

2.3. Vorderfront zusammenbauen

Die Vorderfront besteht aus 21 Stäben 30 mm Birke-Sperrholz:



Die Vorderfront wird mithilfe der halbfertigen Unterseite, dem Innenträger und den Seitenteilen zusammengebaut (Dübel, Schrauben, Holzleim). Entscheidend ist ein gleichmäßiger Bogen mit einem Radius von 800 mm. Danach wird die Oberfläche mit Elektrohobel und Bandschleifer geglättet. Dabei ist es insbesondere beim Hobeln hilfreich, wenn zunächst an der linken und rechten Seite ein zusätzlicher Stab befestigt ist, den man später wieder entfernt.



Anschließend können die Unterseite und der Innenträger wieder abgenommen und abgeschrägt werden.

2.4. Schalltrichter laminieren

Als Vorarbeit für den Schalltrichter wird eine elliptische Öffnung gesägt:

a = 21 cm, b = 17 cm. Die Exzentrizität ($e^2 = a^2+b^2$) ergibt sich so zu e = 12,3 cm. Die beiden Brennpunkte sind dann also jeweils 12,3 cm links und rechts vom Mittelpunkt entfernt. Das Anzeichnen erfolgt mit der üblichen Band-Methode. Gesägt wird mit einer Stichsäge im Winkel von ca. 60°, sodass ein konischer Trichter entsteht.

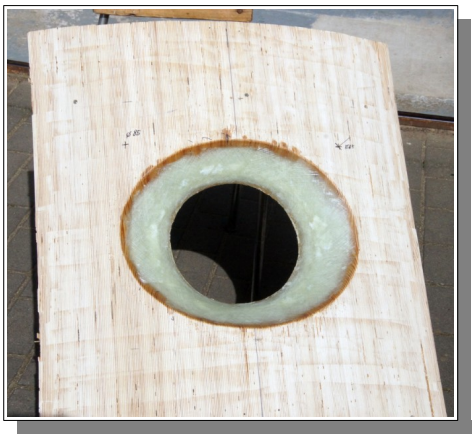
Vorderseite mit Hilfskonstruktion für die Vakuumfolie

Verwendet wurden:

- Vakuumfolie PO150 XD2 für die Form
- 929g Epoxydharz L
- 280g Härter GL 1
- Glasgewebeband: Gelegeband 450g/m² 7cm +/-45° und Gelegeband 600g/m²

Zunächst wird die Vakuumfolie vorsichtig über die Lautsprecher-Öffnung mittels Stückchen aus Weichkunststoff nahe am Rand fest getackert. Dann per Hilfskonstruktion tiefgezogen. Dazu dient eine Holzscheibe mit 232 mm bis in eine Tiefe von 90 mm. Die Folie wird so auf maximal 130% gestreckt. Praktische Versuche haben gezeigt – bis zu maximal 150 % sind möglich. Am nächsten Tag haben sich die Spannungen in der Folie gleichmäßig verteilt und es kann auf der Rückseite laminiert werden. Vorher sollte man dort noch eine etwas größere Scheibe befestigen, um einen sauberen Abschlussrand für das Chassis zu erhalten. Die untersten Schichten wurden mit dem dünneren Gewebeband blasenfrei ausgelegt, dann das dickere und zum Abschluss der Rest des

vorbereiteten Harzes mit Hobelspänen vermischt, um die Fuge bis über die Kante zu füllen. Die am Trichterrand sichtbaren Schrauben waren als Experiment gedacht, können aber weggelassen werden, da durch die konische Öffnung und der Füllung über die Kante hinaus der Trichter nach dem Aushärten ausreichend stabil wird. Nach dem Aushärten wurde die obere Kante mithilfe eines Papprings (D=26 cm) „eingeschalt“ und ebenfalls mit Epoxidharz+Hobelspäne verfüllt und geglättet. So entsteht eine ringförmige ebene Oberfläche von ca. 13 mm Breite.



Der Schalltrichter ist nun fertig zum Schleifen und Spachteln (Entfernen von Unebenheiten bzw. Auffüllen kleiner Löcher).

2.5. Box zusammenbauen

Gemäß den Skizzen wird das Gehäuse der Box fertiggestellt. In die Rückwand wurden zusätzliche Spanten eingezogen. In die Bodenplatte wurden 2 Räder (D 100 mm 100/30-50) mit außenliegender Achse eingearbeitet und 2 Füße (70x70x70 mm) befestigt. An der Oberseite wurde der Aufnahmerahmen als schräges Pult entsprechend des AUNA-Gehäuses gestaltet. Für die Befestigung der Rückfront dient ein umlaufender Rahmen aus Holzleisten (14x14) in der Box.

Die Trägerplatte für den W250S ist herausnehmbar und wird erst nach der Oberflächenbehandlung mit dem Chassis bestückt und in die Box eingesetzt. Dabei kam zusätzlich ein Öldichtring (250 mm x 232,8 mm x 8,6 mm NBR Dichtungsring O-Ring Gummi Dichtung Öldichtung) zum Einsatz. Der Öldichtring wurde bereits vor dem Lackieren mit Silikon an der Rückseite des Schalltrichters fixiert.

2.6. Oberflächenbehandlung

Auf den äußeren Oberflächen der Box werden Unebenheiten mit Spachtel aufgefüllt und mit Sandpapier geglättet (Bandschleifer): beginnend mit 80iger, bis zu 200iger. Besonders gut sind stumpf verbundene Elemente abwechselnd zu spachteln bzw. zu schleifen.

Die Oberflächenbearbeitung erfolgte bei Temperaturen um 20 °C. Für die einzelnen Schichten auf dem Sperrholz kamen u. a. Produkte von der polnischen Firma BOLL zum Einsatz:

- „ Spachtel – 2 Komponenten Polyester Mehrzweckspachtel (BOLL)
- „ Filler – 2 Komponenten Füller 5:1 (BOLL) verdünnt mit FAUST Universalverdünner (ca. 30 %); wurde auch im Innern der Box zur Versiegelung aller Holzoberflächen verwendet – Ziel ist, die vorhandene Holzfeuchte „einzuschließen“, um späteres Quellen zu vermeiden.
- „ Farbe/Lack – WARNEX Strukturlack 1K schwarz 74.49.001.3, halbmatt (mit Rolle). Zweimal gerollt im Abstand 8-10 min.
- „ Farbeffekt – FAUST Granit-EFFEKT-Sprühlack hellgrau (Art.Nr.: F77 0 674 H)
- „ Äußere Schicht – WILCKENS BOOTS & YACHTLACK hochglänzend

Der Schalltrichter aus Epoxidharz wurde anstelle mit oben aufgeführtem Filler mit schwarzem Grundierspray von BOLL (Boll Grundierung SCHWARZ 500 ml Spray Haftgrund Füller 0010199) beschichtet. Das garantiert eine glattere Oberfläche.

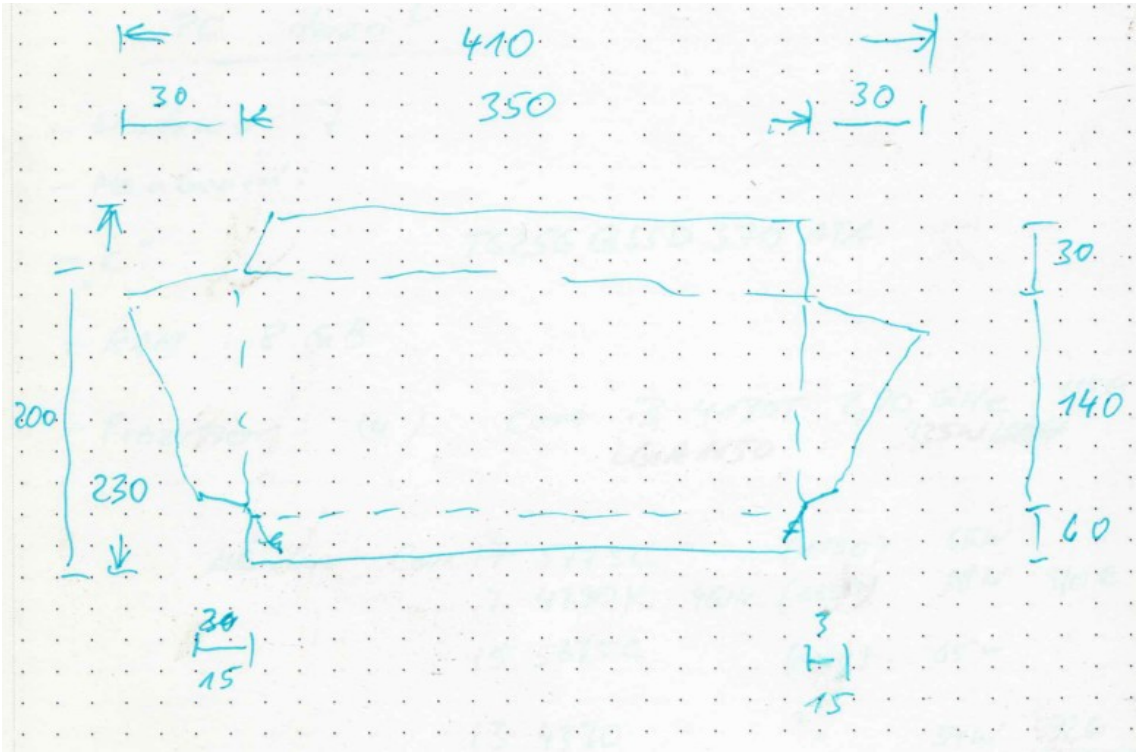
Erfahrungen:

1. Das Spachteln/Schleifen ist zwar zeitintensiv, es sorgt aber für erstklassige Oberflächen. Spätere Farbschichten gleichen nichts mehr aus.
2. WARNEX Strukturlack deckt intensiv, haftet aber nur bedingt auf dem Grundierspray. Auch ist der Lack nach Aushärtung nur bedingt kratz- und stoßfest. Alternativen wurden nicht getestet.
3. FAUST Granit-Sprühlack macht eine schicke Oberfläche, ist aber nicht abriebfest. Der Klarlack als Abschlussschicht verfestigt das Ganze enorm, verleiht Glanz und Wetterfestigkeit dem Gehäuse, erhöht aber auch die thermische Isolation der darunterliegenden Schichten.
4. Auf dem Schalltrichter konnten bei starker Sonneneinstrahlung (Ende Mai) Temperaturen bis 70 °C gemessen werden. Grund ist die schwarze Farbe und die gute thermische Isolation des Epoxidharzes (nach innen), sowie des Bootslacks (nach außen). Dabei trennte sich an einer Stelle der Strukturlack vom Grundierspray in Form einer Blase. Für spätere Projekte: lieber weiße Farbe verwenden oder anderen Strukturlack!

Eindrücke von der (mechanisch) fertigen Box:

2.7. Die Acryl-Abdeckklappe

Für einen Schutz gegen fallende Regentropfen gibt es als „Schmankel“ eine Acrylplatte (3 mm dick), die mittels Kunststoff-Scharniere an der Oberseite befestigt wurde.



Zunächst wird die Platte ausgeschnitten und dann mit der Biegevorrichtung (Anlage 5.13) entsprechend gebogen. Die beiden stylischen Abschrägungen (jeweils 4x12 cm) an der Vorderseite sind leider nicht in der Zeichnung enthalten, sie entstanden erst nach dem Anpassen der Platte nach dem Biegen der hinteren Seite. Die seitlichen und die hinteren Flächen sind um 90° abgekantet, die vordere nur um 30°.

Im aufgeklappten Zustand reflektiert die Platte tatsächlich auch den Schall der beiden oberen (Surround-) Lautsprecher diffus nach vorn. Links und rechts der Abdeckung ist immer noch Platz für je ein Glas Bier ;-)

3. Die Elektronik

3.1. Technische Randbedingungen

Aus der Aufgabenstellung lassen sich folgende Überlegungen/Kompromisse herleiten:

- „Möglichst tiefer Bass“ bedeutet möglichst hohe zusätzliche aktive Bassanhebung bis herab zur Resonanzfrequenz zum Ausgleich der akustischen Möglichkeiten der passiven Box..
- Das preisgünstige DSP-Board ADAU1701 ist mit 2 Eingängen und 4 Ausgängen für dieses Projekt ideal und soll verwendet werden.
- Die Box wird ausschließlich in Umgebungen mit > 5-10 m³ Luft eingesetzt. Deshalb gibt es eine Bedämpfung der Subwoofermembran nur durch die Box selbst, somit ist auch die Resonanzfrequenz der Box die untere Grenze im erzielbaren Frequenzgang.
- Die Vorgabe „Trockener Bass“ ist schwierig, da sie vom Raum abhängt. Die Membran des Subs soll wenig nachschwingen. Letztlich muss also am Aufstellungsort die Nachhallzeit (RT60) gemessen werden, sie sollte im Bereich 0,2-0,5s für alle Frequenzen liegen. Auch sollten im Frequenzbereich 60-120Hz möglichst keine Raummoden angeregt werden.
- Eine Gesamt-Ausgangsleistung >100W RMS ist am besten mit einem 2- oder 4-Wege Class-D Verstärkerkonzept mit TDA7498 umsetzbar. Die Chassis müssen dann aber eine Impedanz ≥ 6 Ohm haben. Festgelegt werden daher: Impedanz 8 Ohm bei einer Versorgungsspannung der Leistungsverstärker von >35V → 2x 80W je Modul möglich. Einsatz von zwei Modulen mit vier Kanälen für die Ansteuerung von jeweils einem Chassis.
- Als mögliche Signalquellen soll es neben Bluetooth auch DAB+ und Internetradio geben, das schränkt die verfügbaren Baugruppen stark ein. Ein guter Kompromiss ist ein ***auna connect 120***, der nebenbei auch mit 12V läuft.
- Lautstärkeregelung: Das Audio-Signal wird von einem ***auna connect 120*** geliefert, der bereits per komfortablen Drehrad mit einem (digitalen) Lautstärkeregler ausgestattet ist → kein mechanischer Regler notwendig. Nur für einen externen Eingang wäre ein zusätzlicher Regler sinnvoll. Eine Regelung per DSP ist zwar möglich, aber in diesem Fall wohl unnötig. Somit muss der elektronische Part (nach der Lautstärkeregelung) vom ***auna connect 120*** bis zu den Lautsprecherchassis möglichst rauscharm ausgelegt werden.
- Frequenzgang: Das 2-Wegekonzept benötigt einen Crossover bei ca. 1,5kHz. Diese Frequenz ist von den Chassis abhängig, wird aus der Passivbox abgeleitet und später per REW/DSP nachjustiert. Ein Frequenzregler auf dem DSP-Board ist nicht unbedingt erforderlich aber hilfreich in der Entwicklungsphase. Das Problem beim Frequenzgang ist die maximal mögliche Lautstärke-Überhöhung durch Filter im Bassbereich um eine möglichst tiefe Basswiedergabe zu erreichen. Da die Art der Musik nicht weiter spezifiziert wurde, ist von ungünstigsten Verhältnissen auszugehen. In Innen-Räumen kann die Nenn-Ausgangsleistung (minimale Verzerrungen) bei ca. 5-10W (ohne Bass) liegen. Der Subwoofer W250S verträgt dagegen aber bis zu 140W. Das wären dann 10*log 140/8 = 12dB mögliche Anhebung. Da der Verstärker aber nur maximal 80W (8 Ohm) an den Sub liefern kann (THD 2% bei 70W), ergibt sich so eine mögliche Anhebung → 10*log 80/8 = 10dB. Im Außenbereich, bei fehlenden Reflexionen und Beschallung über größere Distanz braucht man aber eine etwa 2,5 mal größere Nennleistung im Vergleich zum Innenraum. Ähnliche Verhältnisse gibt es bei der physiologischen Lautstärkebeeinflussung (Loudness/Bassboost). Die Unterscheidung zwischen beiden Anwendungen kann die Box derzeit nicht selbst vornehmen, daher ist ein Umschalter „INNEN/AUßEN“ oder ein Loudness Regler vorzusehen. Bei Verwendung von fertigen Boards mit TDA7498 kann man

dabei auch auf die beiden mittleren/unteren Gain-Select Modi zurückgreifen, die beim Umschalten einen Pegel-Unterschied von 3,5dB/6dB erzielen, während die Bassproblematik durch umschaltbare Filter im DSP über GPIO erfolgen muss.

⑨ Schutz des Subwoofers vor Überlastung: Bei Verwendung einer Bassanhebung im DSP sollte bei großen Ausgangspegeln eine Abregelung der Bassspitzen erfolgen. Das könnte z. B. per LUT (Look up table) und Envelope Follower/Peak External Decay im DSP erfolgen. Das würde auch eine Frequenzumschaltung bei der Bassanhebung (INNEN/AUßEN) im DSP überflüssig machen. Damit gäbe es aber einen Widerspruch zur Pegelumschaltung in den 4 externen Verstärkern per Gain-Select, die müsste dann auch im DSP erfolgen. Als Kompromiss sollte zunächst der Umschalter mit GPIO und Gain-Select vor-verdrahtet, während später immer noch der DSP erweitert und ein fester Gain-Select gewählt werden kann.

⑨ Surround Lautsprecher: Der Pegel der Surround Lautsprecher sollte regelbar/abschaltbar sein. Kompromiss: den Pegel per Poti auf dem DSP-Board einstellbar gestalten und bei Bedarf dieses Poti mit einem externen Bedienelement ergänzen.

⑨ Eine Balance-Regelung ist wegen des Kompaktboxkonzeptes nicht unbedingt erforderlich, ein Mono/Stereo-Umschalter aber schon (Testbetrieb!)

⑨ Die Akku/Stromversorgung erfolgt noch auf Basis Bleivlies, da erprobt, preiswert und sicherer gegenüber LiPo. Außerdem mit Laptopladegerät/Auto/Solarpanel problemlos kompatibel. Es müsste sonst alles neu zusammengestellt werden: Cell-Balancing und Sekundäre Schutzfunktionen (Undervoltage, Overcurrent, Overtemperature, Columbcounting …). Daher im wesentlichen Übernahme aus Festivalbox. Für zukünftige Projekte aber ist die UBBC - Universal Boom Box Control [4] nicht schlecht, vielleicht aber etwas zu komplex …

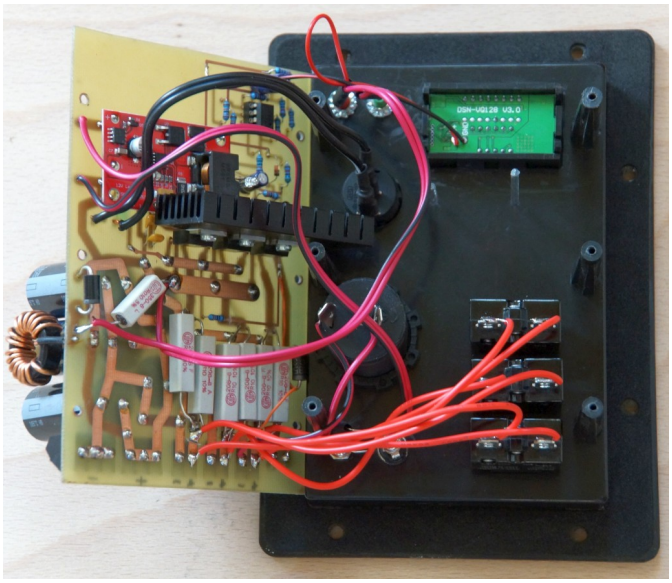
⑨ Am Terminal müssen letztendlich folgende Elemente eingebaut werden:

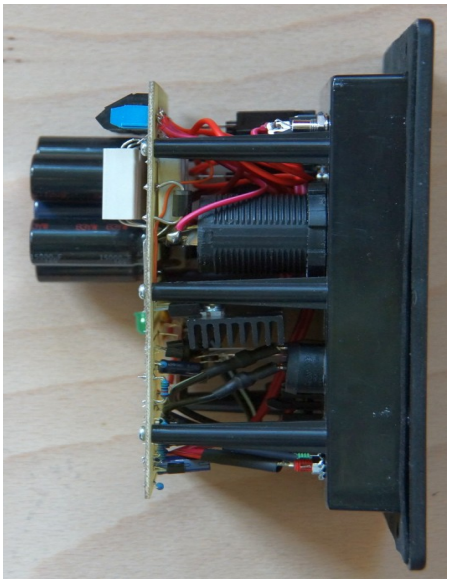
- Schalter E/A
- Ladebuchse 18-30V
- Lade-LED
- 12V Buchse (Standard-Auto)
- 3x Schutzsicherung Akkus
- Buchsen für Leistungsmessung (Shunt)
- Ladezustandsanzeige Akku

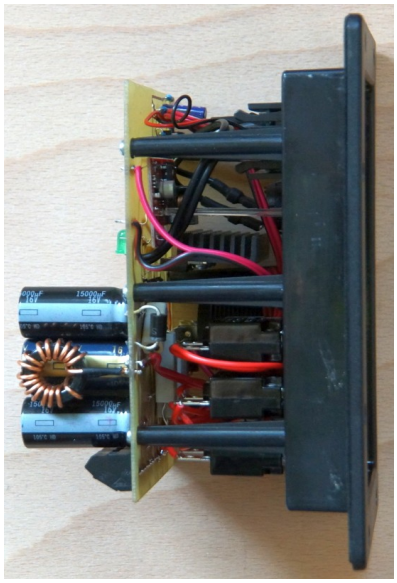
3.2. Stromversorgung 400W

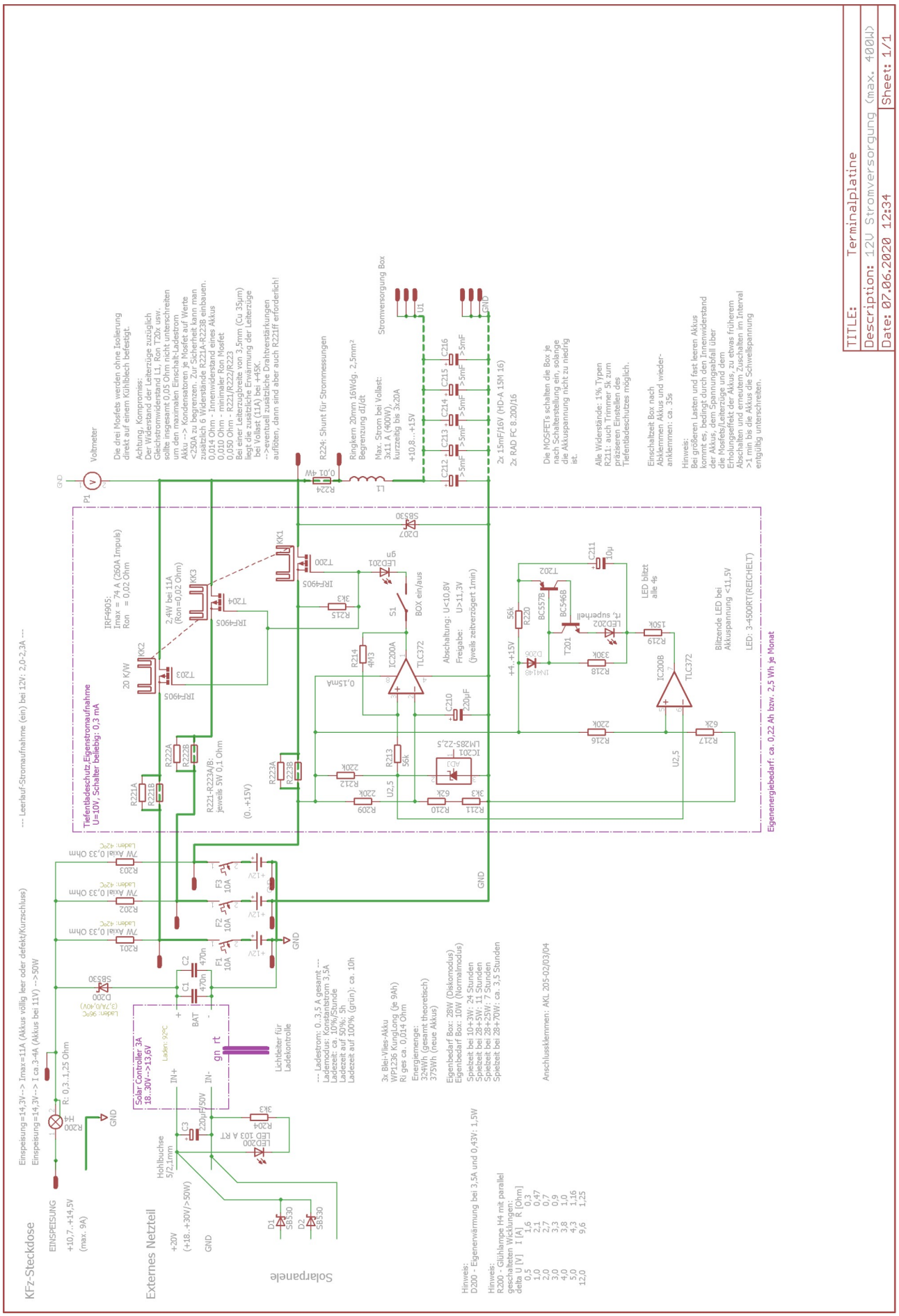
Die Aktivbox ist ausgelegt für eine Basis-Stromversorgung mit 12V Bleiakkus und darauf aufsetzenden Leistungsverstärkern mit Step-Up-Wandlern bei einer Nennleistung von maximal 400W. Dabei sind Ströme von >10A je Akku, bzw. >30A insgesamt zu beherrschen. Die Stromversorgung ist als Block auf einer zweiseitigen Leiterplatte an einem Universalterminal untergebracht. Die Zu- und Abschaltung der Box erfolgt mit 3 Power-MOSFET IRF4905 (>50A, kurzzeitig bis zu 260A). Eine Spannungsüberwachung schaltet bei Unterspannung der Akkus die Box ab. Zuvor weist eine blitzende LED auf den Energiemangel hin. Eine Herausforderung ist der Einschaltstromstoß für das Aufladen der Kondensatoren, ohne das die Mosfets überlastet werden. Der Gesamt-Widerstand vom Akku bis zu den Kondensatoren darf deshalb 0,05 Ohm nicht unterschreiten. Im fertigen Gerät wurden daher die Widerstände R221A-R223B als Ersatz für Leiterbahnen eingelötet.

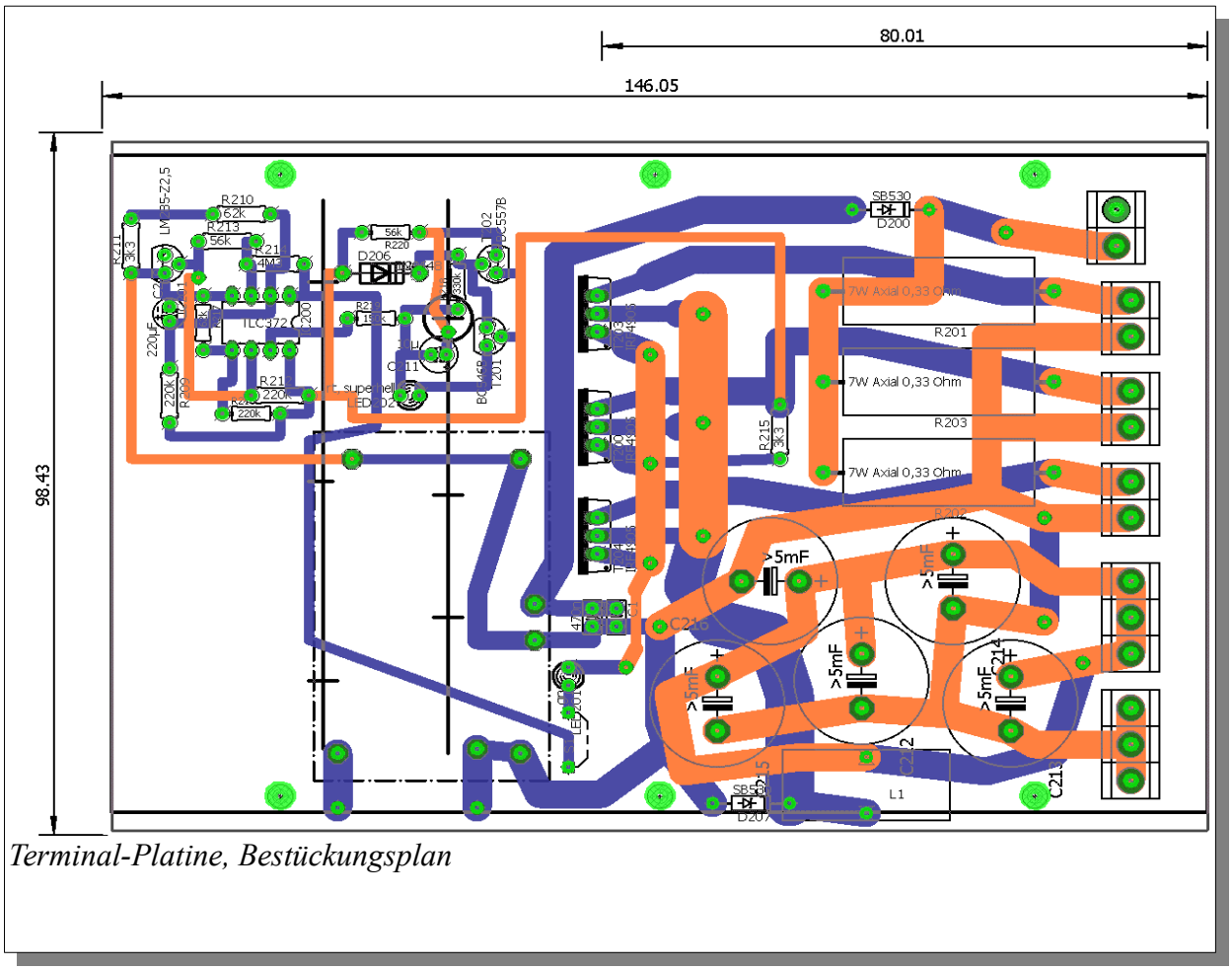
Ein gängiger Solar-Controller dient zum Laden der Akkus über 3 Ausgleichswiderstände und eröffnet zudem die Möglichkeit die Box per Netzteil, aber auch per Solarmodul zu laden. Eine 12V-Buchse für Zubehör oder zur zusätzliche Energie-Einspeisung, die mittels in Serie geschaltete H4-Lampe vor Kurzschluss geschützt ist, rundet die Möglichkeiten ab.





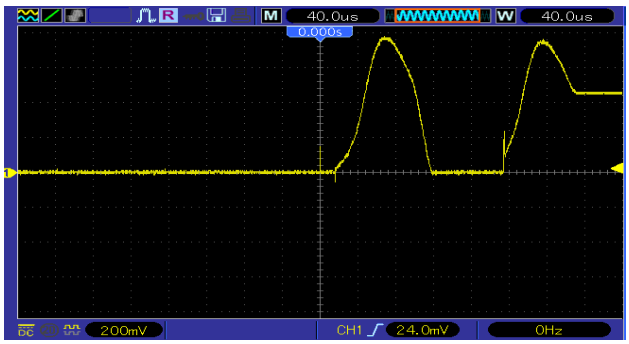



TITLE: Terminalplatine
Description: 12V Stromversorgung (max. 400W)
Date: 07.06.2020 12:34
Sheet: 1/1
KFz-Steckdose
Externes Netzteil
Solarpanele
Tiefentladeschutz,Eigenstromaufnahme
U=10V, Schalter beliebig: 0,3 mA
Eigenenergiebedarf: ca. 0,22 Ah bzw. 2,5 Wh je Monat
Solar Controller 3A
18..30V-->13,6V
Lichtleiter für Ladekontrolle
Voltmeter
Stromversorgung Box
Anschlussklemmen: AKL 205-02/03/04

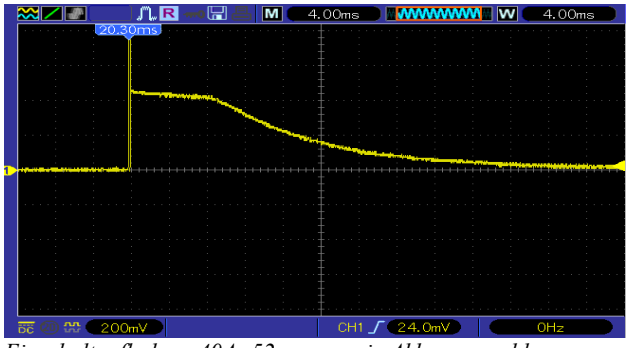


Terminal-Platine, Bestückungsplan

Am Terminal wurde ein Shunt verbaut, um beim Test-Betrieb die Energieaufnahme zu messen:



Einschaltstromstoß 100A; 0,3ms; nur ein Akku angeschlossen



Einschaltaufladung 40A; 52ms; nur ein Akku angeschlossen

3.3. Leistungsbilanz

Ruhe-Leistungsaufnahme „Normalmodus“/“Diskomodus“:

was?	***Spannung***	***Stromaufnahme***	***Ruhe-Leistung „Normalmodus“***	***Ruhe-Leistung „Diskomodus“***
Auna Connect 120	12 V	416 mA	5,0 W	5,0 W
2x TDA7498	18/32V; 23/39V		4 W	13 W
2x Step-Up-Wandle	10 V	24/54 mA	0,35 W	0,6 W
1x DSP ADAU1701	12 V	95 mA	1,1 W	1,1 W
LED-Lauflicht	12 V	0/500 mA	0 W (LEDs aus)	5 W
Gesamt	***12 V***	***0,87/2,14 A***	***10,5 W***	***24,7 W***

Akkureichweite (Akku-Kapazität 324 Wh):

Lautstärke „Null“, „Normalmodus“ - 31 h

Lautstärke „5 W“, „Normalmodus“ - 21 h

Lautstärke „15 W“, „Normalmodus“ - 12 h

Lautstärke „50 W“, „Diskomodus“ - 4 h

Lautstärke „MAX“, „Diskomodus“ - <3 h

3.4. Pegelplan

Der folgende Pegelplan ist ein Hilfsmittel bei der Einstellung der Verstärkerblöcke und des DSPs. Er dient nur zur Übersicht, da die Effizienz der Schallabstrahlung der Chassis unterschiedlich ist und letztlich alle Pegel durch Messung des Frequenzganges im DSP eingeregelt werden. Das AUNA stellt einen Pegel von -5 dBu bei maximaler Lautstärke zur Verfügung (Anlage 5.5), der DSP liefert am Ausgang einen maximalen Pegel von +0,4 dBu (Anlage 5.9). Das Rauschen an den Ausgängen der Verstärkerblöcke hängt von der eingestellten Verstärkung ab – je kleiner die Verstärkung, desto geringer das Rauschen. Der Schalldruckpegel des W250S liegt mit 90 dB (1W/m) nur unwesentlich niedriger als der DT-254 mit 92 dB (1W/m), dieser Unterschied kann im Rahmen der Frequenzgangkorrektur mit ausgeglichen werden.

Version des DSP: automatische Loudness-Regelung, Modi: „Neutral“/„Bassboost“

Diese erweiterte Variante stellt einen Kompromiss zur ursprünglichen Variante dar. Der Umschalter „Innen/Außen“ entfiel ersatzlos und wurde durch eine vollautomatische „Loudness-“ Regelung ersetzt. Dafür gibt es nun eine manuelle Klanganpassung – über Veränderung der Lautstärke der Hochtöner (HT) werden die Höhen angepasst. Das ist praktischer, als die Box permanent im Regime bester Klangqualität laufen zu lassen, wo man sich nicht unterhalten kann. Die Bassanhebung im linearen Betrieb beträgt bei der unteren Grenzfrequenz (40 Hz) 10 dB. Im Modus „Bassboost“ wird die Bassanhebung zugunsten einer insgesamt lauteren Wiedergabe reduziert. Da physiologisch das Ohr den Bass aber dank des „Superbass“ Filters im DSP gleich laut wahrnimmt, kann man die Ausgangsleitung erhöhen. Die Klangqualität verringert sich entsprechend. Beim Bass erhöht sich der Pegel durch die Kanalzusammenführung (Addition von linkem und rechtem Kanal) um 6 dB; dieser Effekt wird im Pegelplan mit +3dB teilweise berücksichtigt.

An den TDAs werden JP1 und JP2 wie folgt eingestellt:

Verstärkerblock	JP1	JP2	Verstärkung
1 (Bass&Surround)	on	off	+31,8 dB
2 (2xHT)	off	off	+25,9 dB

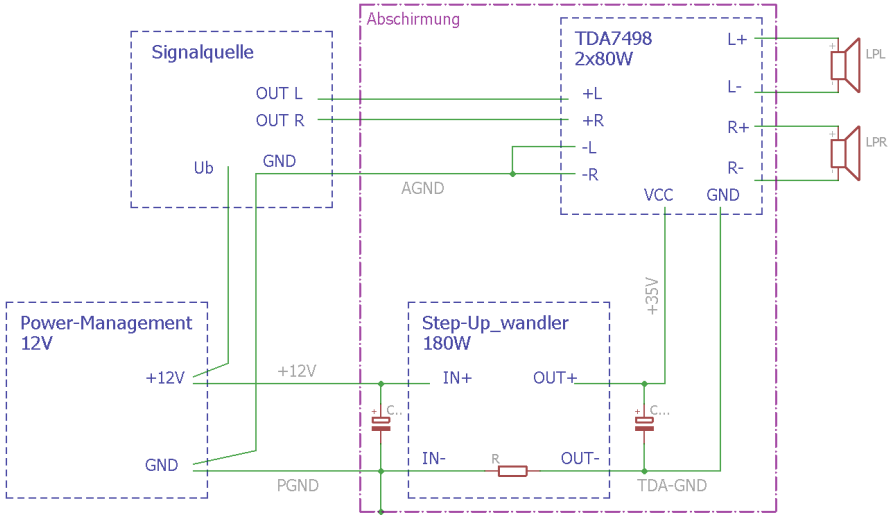
	AUNA	→	**DSP**[1)]	→	**TDA7498**	→	**Chassis**[2)]
Max. Pegel Bass 40Hz (linear)	LS12	-14dBu	-7,4/+7/+3+10dB	-1,4dBu	+31,8dB	30,4dBu	80W
Max. Pegel Bass 70Hz (Bassboost)	LS19	-6dBu	-7,4/+7/+3+2dB	-1,4dBu	+31,8dB	30,4dBu	80W
Nennleistung Bass 400Hz	LS15	-9dBu	-7,4/+7/+3+0dB	-6,4dBu	+31,8dB	+25,4dBu	26W
Nennleistung HT 2000Hz	LS15	-9dBu	-7,4/+7/+0+3dB	-3,5dBu	+25,9dB	+22,4dBu	2x13W

[1)] Eingangsabsenkung ADAU1705 (-7,4) / Eingangs-Pegelanpassung / Bassanhebung bzw. HT Anhebung
[2)] Leistung nur eines Kanals, die Gesamtleistung ist die Summe aller 4 Kanäle.

3.5. Step-Up-Wandler und Leistungsverstärker (8 Ohm Last)

Modulkonzept und Masseführung

Jedem TDA7498 (Anlage 5.6) ist ein Step-Up-Wandler (Anlage 5.7.) zugeordnet. Das Eingangssignal kommt aus der Signalquelle (Signalgenerator oder AUNA).

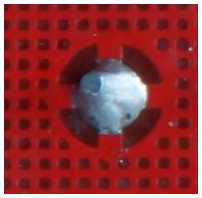


In der Übersicht ist gut die Signalführung, insbesondere die der Bezugsmasse für den Ausgangsverstärker zu sehen. Die Stromversorgung per Step-Up-Wandler ist davon strikt getrennt. Das garantiert eine gute Unterdrückung von Störsignalen. Zusätzlich sind der Step-Up-Wandler und der Verstärker, sowie die meisten Kondensatoren von einer gemeinsamen Abschirmung umgeben – insbesondere die hohen Ausgleichströme des Schaltreglers produzieren enorme elektromagnetische Störungen. Daher sind die Leitungen zwischen den beteiligten Baugruppen auch möglichst kurz zu halten.

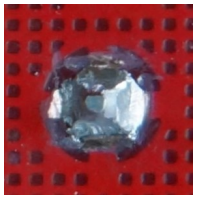
Vorbereitung des Verstärkermoduls

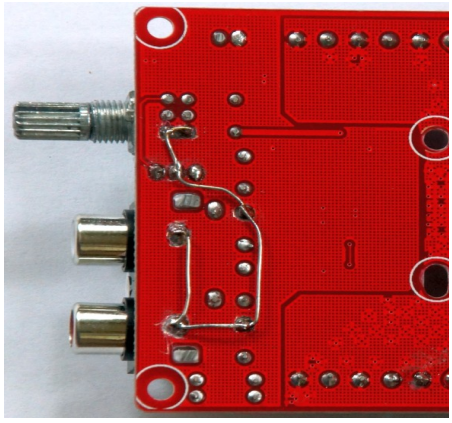
Der TDA7498 unterstützt von Haus aus differentielle Eingangssignale. Beim gelieferten Board sind zwar die vier 1 µF Koppelkondensatoren bestückt, aber leider sind die Bezugsmassen für die Ein- und Ausgänge identisch. Im Referenzdesign [5] sind sie noch korrekt getrennt (mit J7/J8 aber zuschaltbar). Die Trennung dient dazu, Störspannungen und Erdschleifen zu verhindern. Hinzu kommt, dass der gewählte Step-Up-Wandler mit Ausgangsstrombegrenzung einen anderen Massebezug hat. Für den Umbau sind daher die Masseverbindungen der betroffenen Bauteile auf der Leiterseite zu „kappen“ – entweder durch ritzen oder fräsen. Ein Auslöten wäre zu aufwendig. Danach werden die so freigestellten Lötinseln untereinander mit Drahtstückchen verbunden, fertig.

Vorher:



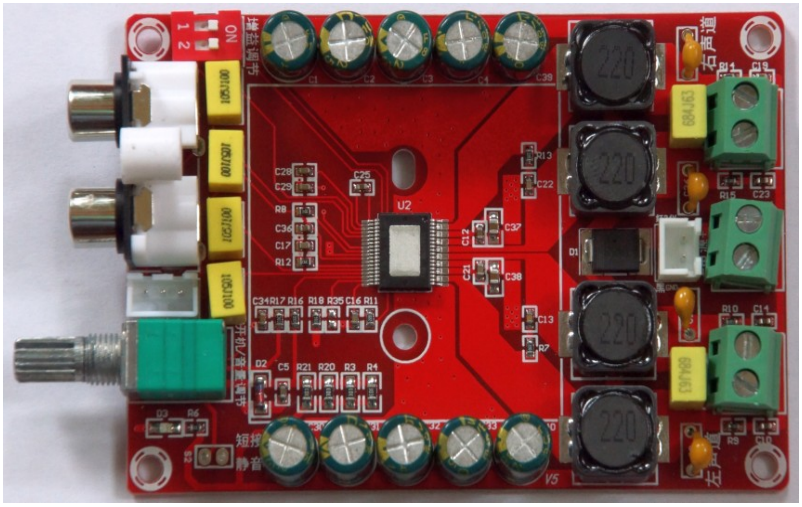
Nachher:





Das Potentiometer ist dann auch weiterhin nutzbar. Es begrenzt auch den Eingangswiderstand auf 47k und verringert so unerwünschte EM-Einstreuungen. Anschließend ist per Multimeter zu prüfen, dass nun die neue Masse keine Verbindung mehr mit der originalen Masse GND hat (R>5 MOhm). Für den späteren Anschluss an die Signalquelle/DSP können nun die weiße 3-polige Buchse oder auch die Cinch-Buchsen genutzt werden.

Eines gilt es aber noch zu ändern: Der Übergang vom TDA7498 zum Kühlblech sollte unbedingt mit Wärmeleitpaste versehen werden, da beim Betrieb über eine sehr kleine Fläche bis zu 20 W thermische Energie (Dissipated power) übertragen werden! Bei den gelieferten chinesischen Boards war nichts davon zu sehen …



Beim Wieder-Befestigen des Kühlblechs ist auf eine plane Ausrichtung zur IC-Oberfläche zu achten.

Test Step-Up-Wandler mit Verstärker an 8 Ohm Last

Zur Überprüfung aller relevanten Parameter wurde ein Leistungstest mit den entsprechend vorbereiteten Modulen und zwei 8 Ohm Lasten (2x100W, siehe Anlage 5.8.) durchgeführt:

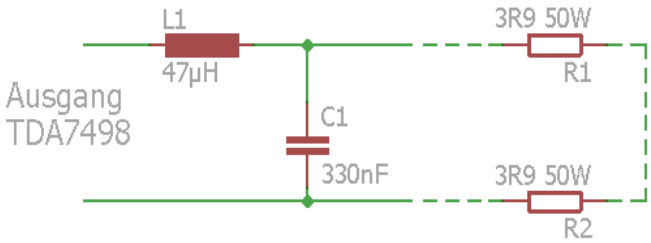
Zwei parallelgeschaltete12 V Akkus → 15 mF → Step-Up-Wandler → 20 mF → TDA7498 → Chassis-Imitation.

Mehrere Messgeräte inklusive Oszi mit Potenzialtrennung, ein optischer Trennverstärker und ein Pyrometer kamen zum Einsatz. Effektivwerte wurden mit einem kalibrierten 1 % TRUE-RMS-Multimeter (DM9199) im Bereich 50 Hz … 400 Hz gemessen.

Es zeigte sich, dass der chinesische Verstärker nicht ganz die erwarteten Parameter bringt. Der maximal erreichbare unverzerrte Ausgangspegel (optisch lt. Oszi unverzerrt) im Ein-Kanal-Betrieb (Eingangssignal: Sinus, 400 Hz) betrug bei 35 V Versorgungsspannung V_{eff}=19,6 und damit „nur“ $19{,}6^2 / 7{,}8 = 49$ W anstelle der erwarteten 78 W. Sind beide Kanäle aktiv, so sind ebenfalls nur ca. 2x 49 W verfügbar. Ursache sind beginnende Verzerrungen in den Sinus-Spitzen vor Erreichen der theoretischen Grenze von $Vmax_{eff} = 2 \cdot 35V \cdot 0{,}353 = 24{,}7\,V$. Zudem erreicht die Kühlkörpertemperatur des Verstärkers bei 2x 50 W trotz zusätzlicher Wärmeleitpaste bereits beachtliche 90 °C! Zu allem Überfluss verschiebt sich das Ausgangssignal bei großen Lasten asymmetrisch in Abhängigkeit des Masse-Spannungsabfalls durch den Step-Up-Wandler, auch je nach Verstärkungsmodus des TDA. Die Eingangs-Schaltung im TDA ist wohl nicht so sehr symmetrisch. Die maximal erzielbare unverzerrte Ausgangsspannung reduziert sich damit natürlich.

Um beste Ergebnisse zu erreichen, habe ich kräftig gemessen und auch experimentiert. Daher erfolgten die abschließenden Messungen auch mit einem zusätzlichen Tiefpass mit f_0 = 40kHz an einem Ausgang. Damit ergeben sich wesentliche Verbesserungen der Klangqualität bei großen Leistungen. Da das Teil nicht im Hörbereich arbeitet, kann eine preiswerte Spule mit Ferritkern

genommen werden (REICHELT: L-PISR 47µ), sie verkraftet auch 5A bei 0,07 Ohm Eigenwiderstand:



Hier die ermittelten Werte (ein Kanal) im Einzelnen:

- Minimale Ausgangsspannung (Poti minimale Lautstärke, keine Leitungen an den Eingängen)
  - Ohne Tiefpass: $Ua_{eff\ Oszi}$ = 30-60 mV (entspricht ca. 320 mW) bei f=320 kHz
  - Mit Tiefpass: $Ua_{eff\ Oszi}$ = 5-7 mV (entspricht 5 mW) bei f=320 kHz
  - $Ua_{eff\ Multimeter}$ = 5 mV (entspricht 3 mW) bei f=<<20 kHz
- Maximale Ausgangsspannung (nur ein Kanal aktiv, Verstärkungsmodus 26 dB)
  - a) U=35 V, ohne Tiefpass: Ua_{eff} = 19,6 V (49 W)
  - b) U=35 V, mit Tiefpass: Ua_{eff} = 20,6 V (54 W)
  - c) U=37 V, mit Tiefpass: Ua_{eff} = 22,3 V (64 W)
  - d) U=39 V, ohne Tiefpass: Ua_{eff} = 21,6 V (60 W)
  - e) U=39 V, mit Tiefpass: Ua_{eff} = 23,2 V (69 W)
- Maximal nutzbarer Dynamikumfang (Störsignale begrenzen Hörbereich):

  $$20\log\left(\frac{20}{0{,}003}\right)=76\text{dB}$$

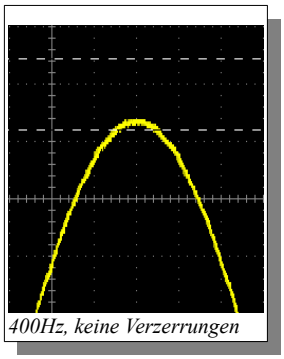
- Maximale Ausgangsspannung (beide Kanäle aktiv) Ua_{eff} = 19,5 V (2x 49 W)
- Thermische Leistung am Kühlblech (TDA7498) bei P_a=2x50W: ca. 12 W; T_{KB5min} = 90 °C

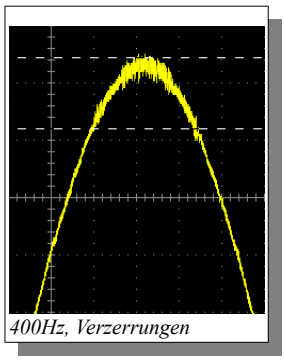
  → gemessener Wirkungsgrad = 2*49/112 = 87,5 %
- Temperatur an Kühlblechen des Step-Up-Wandlers bei P_a=115W: T_{KB5min} = 47 °C
- Höhenanhebung wegen Fehlanpassung C20, C26 (8 Ohm anstelle 6 Ohm Last) auf dem Verstärker-Board:

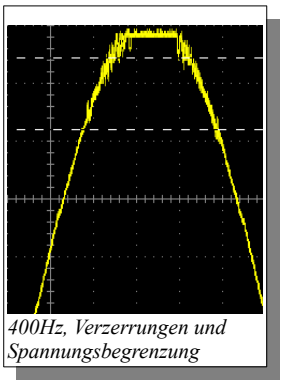
Frequenz	< 1 kHz	4 kHz	8 kHz	12 kHz	16 kHz	20 kHz	25 kHz
$U_{a\ (ohne\ Tiefpass)}$	0 dB	+0 dB	+0,3 dB	+1,2 dB	+1,7 dB	+2,0 dB	+1,9 dB
$U_{a\ (mit\ Tiefpass)}$	0 dB	+0 dB	+0 dB	+0,7 dB	+1,5 dB	+0,5 dB	+0 dB

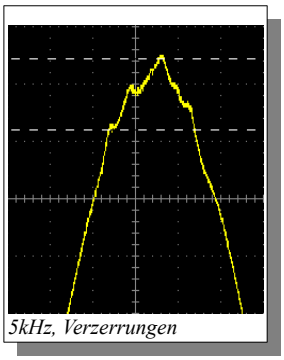
Bei einer Erhöhung der Versorgungsspannung von 35 V auf die maximal im Dauerbetrieb empfohlenen 39 V [5] erhöht sich die entnehmbare Leistung um ca. 10 W. Die gesamte Ausgangsleistung beider Kanäle sollte aber 100 W (RMS) nicht überschreiten (Begrenzung durch den Kühlkörper bzw. der Chiptemperatur).

Die Analyse der Verzerrung bei großen Lasten zeigt einen störenden Frequenzaufschlag im Bereich 15 … 50 kHz. Das ist bei einem Eingangssignal von 5 kHz sehr gut zu erkennen (Bild ganz rechts):


400Hz, keine Verzerrungen


400Hz, Verzerrungen

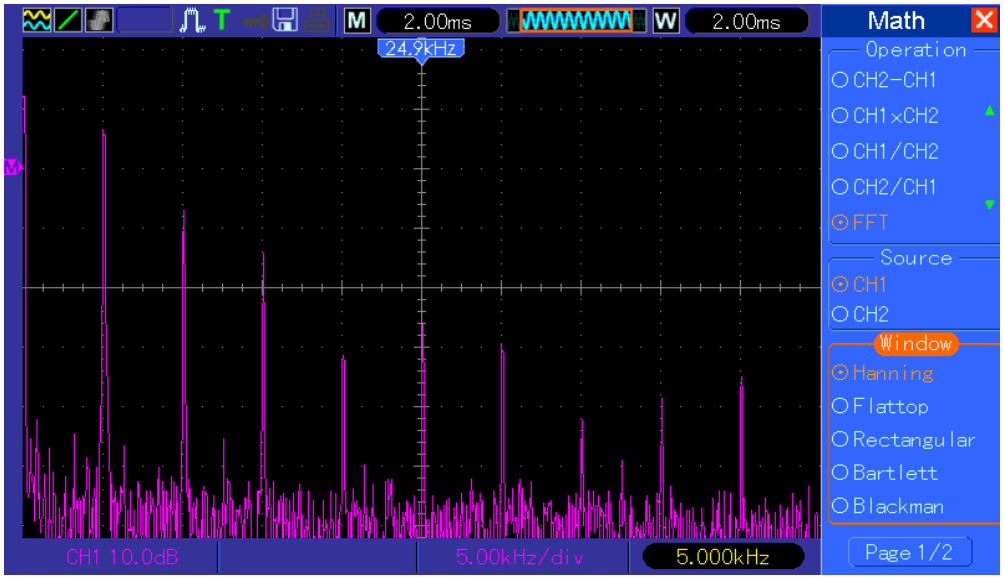

400Hz, Verzerrungen und Spannungsbegrenzung


5kHz, Verzerrungen

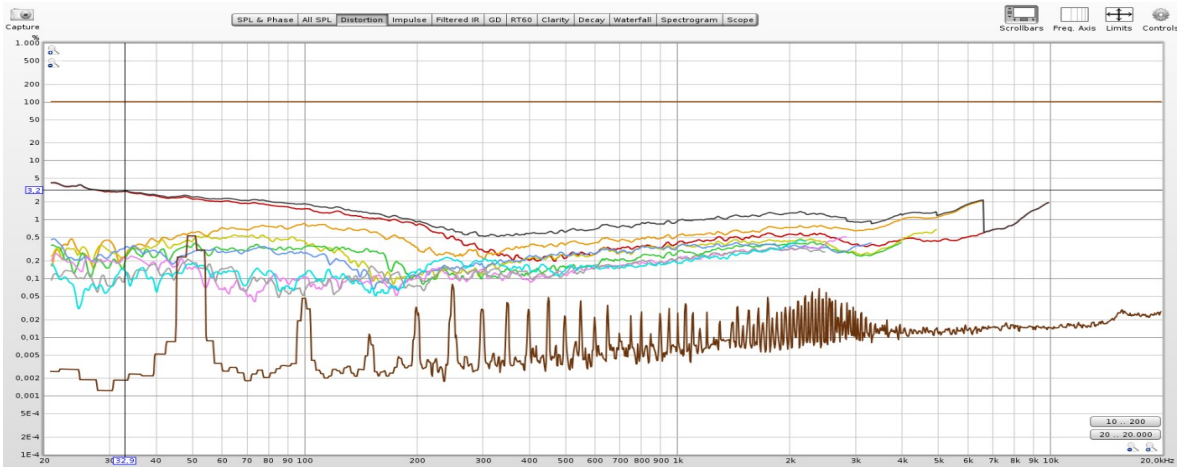
Schaltet man einen zusätzlichen Tiefpass zwischen Verstärker und Last, so verschwinden diese Verzerrungen zumindest im Hörbereich und entsprechend mehr Leistung kann übertragen werden. Ein Tiefpass beeinflusst auch positiv den Frequenzgang und verringert die abgegebene HF-Leistung bei 330 kHz um 18 dB (10*Log320/5) und damit auch die HF-Störstrahlung (Anschlussleitungen zu den Lautsprechern wirken als Antennen!) wesentlich. Die Temperaturerhöhung bei voller Last an der Induktivität des Tiefpasses (+ 6 K) passt auch hervorragend zu den gemessenen 315 mW, die der Tiefpass „vernichtet“.

An einem angeschlossenen Lautsprecher ist ohne Signal am Verstärkereingang nur ein geringes Rauschen (Ohrabstand ca. 10 cm) zu hören. Zuerst dachte ich, es gäbe ein Kontaktproblem … Das bestätigt den bisher nur errechneten 76 dB umfassenden Dynamikumfang – für eine Aktivbox ein hervorragender Wert. Auch das Thema Einschaltknacken ist unproblematisch: Sind Eingangsmasse des Verstärkers und Masse am Powerblock komplett getrennt, so ist überhaupt nichts beim Einschalten zu hören. Sind beide verbunden, also so, wie sie später im Gerät verkabelt werden, so ist ein geringfügiges „flatschen“ parallel zur Aufladung der vielen Kondensatoren zu hören. Somit benötigt man keine zusätzliche Schaltung zur Unterdrückung des Einschaltknackens.

Die FFT-Analyse zeigt ein etwas präziseres Bild der Nichtlinearitäten des Verstärkers: Bereits ab ca. Ua_{eff} = 8 V (8 W) sind Oberwellen des eingespeisten Signals sichtbar. Im nachstehenden Screenshot gemessen bei 5 kHz und etwa Ua_{eff} = 17 V (U_B=35V):



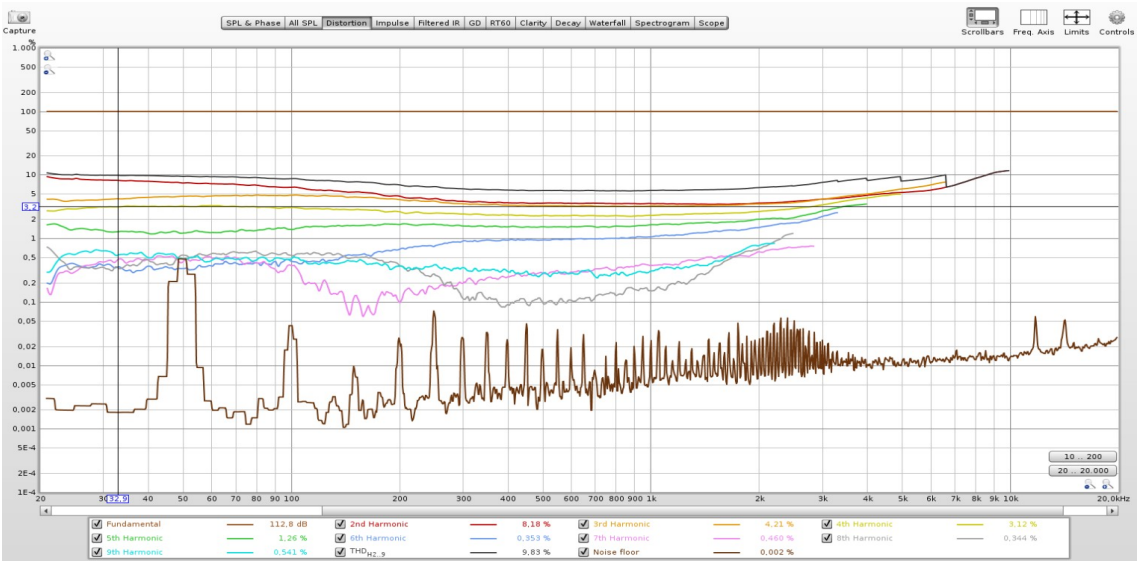
Der messbare Klirrfaktor überschreitet 3 % aber erst bei Ua_{eff}>22,5 V, bzw. 65 W (U_B=39V):



Mit REW & optischem Trennverstärker gemessene Verzerrungen am TDA7498 Ua_{eff}=22,5V (U_B=39V)
Klirrfaktor im Bereich 150 Hz … 6 kHz < 1,5% (65 W RMS)

Unterhalb von Ua_{eff}< 20 V (50 W) sind die Verzerrungen vernachlässigbar klein (< 0,5%).

Für ein Chassis, dessen obere Wiedergabe-Frequenz AM AUSGANG des TDA7498 mittels eines Tiefpasses auf 25 kHz begrenzt wurde, können P= 24,0²/7,8 = 74 W bei 5 % und P=25,1²/7,8 = 80,7 W bei 10 % Gesamt-Klirrfaktor entnommen werden:

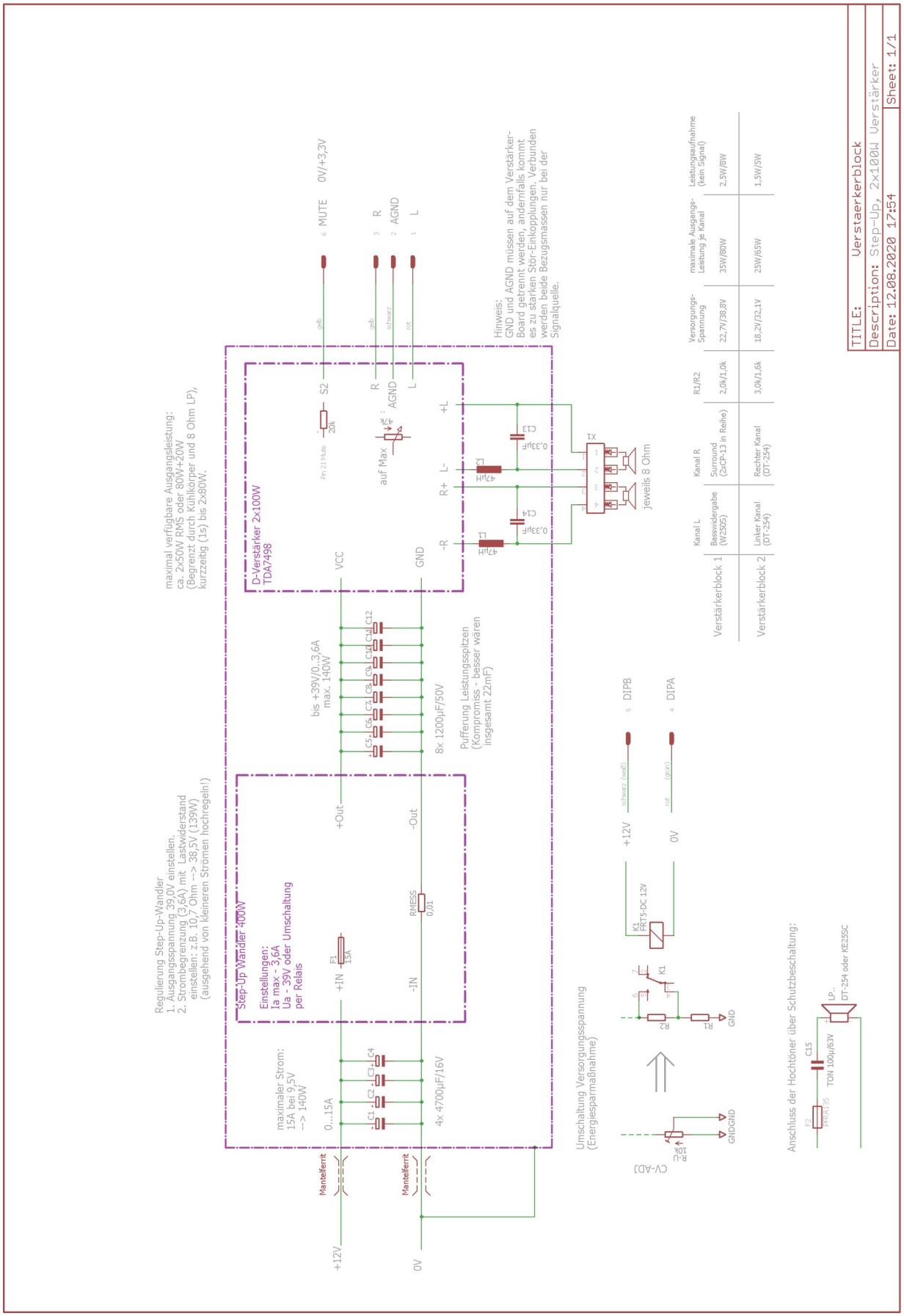


Mit REW & optischem Trennverstärker gemessene Verzerrungen am TDA7498 Ua_{eff}=25,1V (U_B=39V)
Klirrfaktor im Bereich 150 Hz … 6 kHz < 10% (80 W RMS)

Fazit: Für dieses Projekt (4 Kanäle, davon ein Subwoofer mit P>70W, geforderte Gesamtleistung > 100W) ist ein Doppelpack von TDA7498 geradeso geeignet. Der zweite Kanal an dem Verstärker mit der größten Leistung (Tieftöner), sollte aber eine wesentlich geringere Last antreiben, z. B. den Surround-Kanal. Wärmeentwicklung und Versorgungsspannung begrenzen die Möglichkeiten des Moduls. Für andere Projekte mit weniger Kanälen und/oder höherer geforderter Ausgangsleistung ist als Basis ein TPA3116D2, TDA7294 o. a. mit Übergang zu 4 Ohm (z. B. TAS5630) oder bipolarer Versorgungsspannung wohl in Hinblick auf die maximale Ausgangsleistung zielführender.

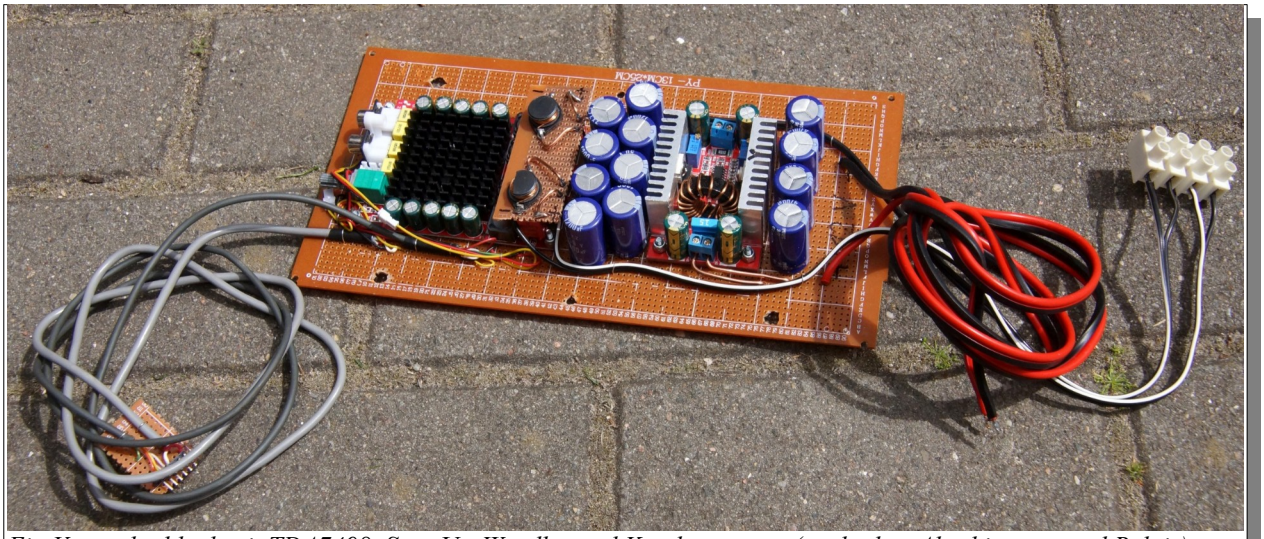
Der eingesetzte Step-Up-Wandler mit zusätzlichen Kondensatoren kann bei 35V problemlos 136 W bereitstellen. Die notwendige Kondensatorkapazität zur Verhinderung von Spannungseinbrüchen am Verstärker ist aber nicht zu unterschätzen. Eine Erhöhung der Versorgungsspannung auf 39V, ein Tiefpass an jedem Ausgang und die Nutzung der differentiellen Eingänge verbessern die erzielbaren Parameter deutlich. Nun folgt die fertige Schaltung …

Schaltplan des Verstärkerblocks

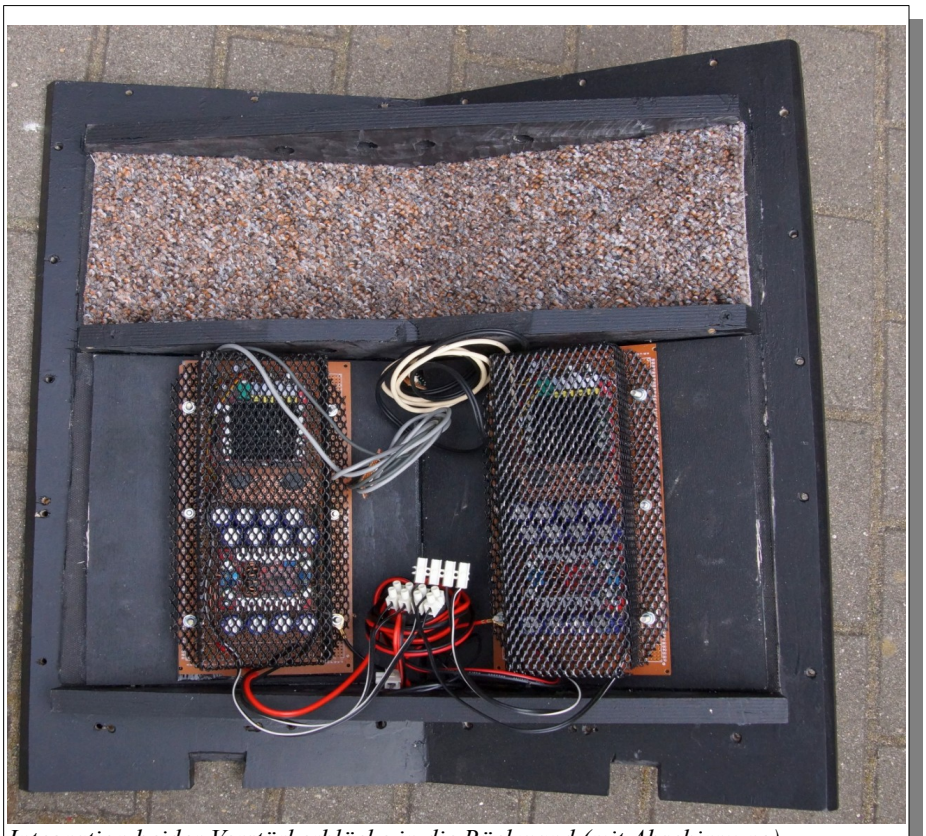


Verstärker und Step-Up-Wandler als fertige Baugruppe

Gemäß den vorangegangenen ausgeführten Test und Messungen wurden 2 Verstärkermodule aufgebaut:



Ein Verstärkerblock mit TDA7498, Step-Up-Wandler und Kondensatoren (noch ohne Abschirmung und Relais)



Integration beider Verstärkerblöcke in die Rückwand (mit Abschirmung)

Jeder Verstärkerblock wird in „Sandwich-“ Bauweise mit einer allseitigen metallischen Abschirmung, einer doppelten Bitumenlage sowie Mantelferriten an den Stromversorgungseingängen versehen (Ferrite fehlen im Bild noch). Die Befestigung der Verstärkerblöcke auf dem rückseitigen Deckel und damit letztlich im Innenraum des Subs hatte keine messbaren akustischen Rückkopplungen zur Folge.

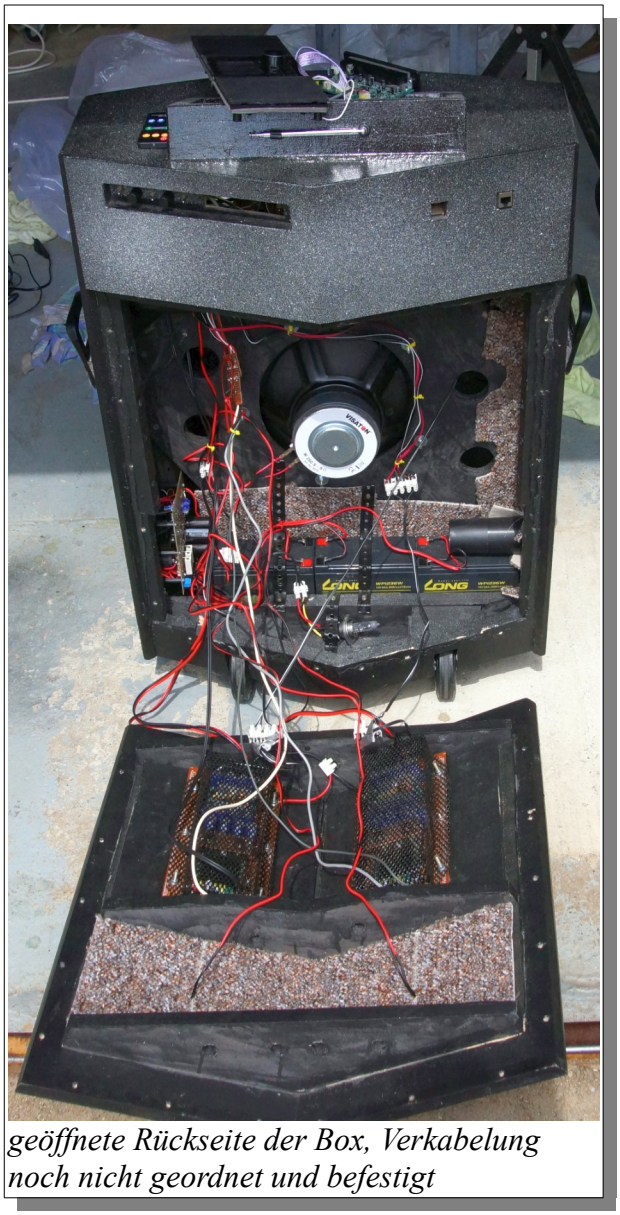
Thermische Betrachtungen, Einbau in Aktivbox

Die beiden Verstärkerblöcke haben trotz D-Verstärker Konzept eine große Wärmeentwicklung. Bei der maximal möglichen Last (2x140W) wandeln die beiden Verstärker jeweils etwa 15 W (11 %) in Wärme um. Hinzu kommt der vergleichsweise geringe Wandlerverlust der Step-Up-Wandler. Insgesamt müssen so bis zu 35 W Wärme aus dem Gehäuse über die beiden Bassreflexrohre abgeführt werden. Hinzu kommt die Wärmeentwicklung der Terminal-Platine beim Laden der Akkus.

Beim Einbau in die Box (rechtes Bild) sind alle Komponenten (auch Kabel!) vor Vibrationen zu schützen → Kabelbinder.

Die Ruhestromaufnahme der Verstärker bei 39V Versorgungsspannung ist ebenso sehr groß. Da das zulasten der Akkukapazität geht, wurden zwei Betriebsmodi eingeführt. Dabei wird die Versorgungsspannung per Relais in den beiden Step-Up-Wandlern zwischen zwei Varianten umgeschaltet: „Disko-Modus“ bzw. „Normalmodus“. So reduziert sich im „Normalmodus“ die Leistungsaufnahme ohne Signal auf ein Drittel (4 W gegenüber 13 W im „Diskomodus“), während die maximale RMS-Leistung am Sub sich dabei nur geringfügig verringert (80 W → 65 W). Das Relais und die beiden Festwiderstände sind jeweils auf einer kleinen Lochrasterplatine im Step-Up-Wandler zwischen den Kühlblechen platziert.

Die „Akku-Reichweite“ für die gesamte Aktivbox verdoppelt sich mit dieser Maßnahme praktisch im „Normalmodus“:



geöffnete Rückseite der Box, Verkabelung noch nicht geordnet und befestigt

Modus	Versorgungsspannung	Maximale Ausgangsleistung (an 8 Ohm)	Aufgenommene Leerlaufleistung (ohne Eingangssignal)
Normalmodus Block 1 / Block 2	22,7 V / 18,2 V	35 W / 25 W	2,5 W / 1,5 W Gesamt: 4 W
Disko-Modus Block 1 / Block 2	38,8 V / 32,1 V	80 W / 65 W	8 W / 5 W Gesamt: 13 W

Die 4 verschiedenen Versorgungsspannungen an den beiden Blöcken sind ein Kompromiss hinsichtlich akustischer Leistung und Akku-Laufzeit der Box in Hinblick auf die spätere Nutzung. Eine vollautomatische Regelung der Versorgungsspannungen, je nach Gesamtleistung, ist in diesem Projekt zu aufwändig. Daher gibt es nur eine einfache Relais-Umschaltung.

3.6. Integration von AUNA und digitalem Soundprozessor (DSP)

Eine weitere Lochrasterplatine (Verteilerplatine) dient zur Aufnahme des DSP (ADAU1701), der zugehörigen Stromversorgung (+5V), der Stromversorgung für das LED-Lauflicht, sowie die Bereitstellung der Steckanschlüsse für alle Baugruppen in einem abgeschirmten Gehäuse.

Vom Power-Terminal wird die Verteilerplatine mit +12V/1A versorgt. Ein Step-Down-Regler erzeugt die notwendigen +5V für den DSP. Zusätzliche Dioden verhindern Rückflüsse bei Programmiervorgängen oder Spannungseinbrüchen bei Bassspitzen. Der DSP wird über externe Schalter und Potentiometer gesteuert – die originalen Potis können dabei auf der DSP-Platine verbleiben, sie brauchen nicht entfernt zu werden.

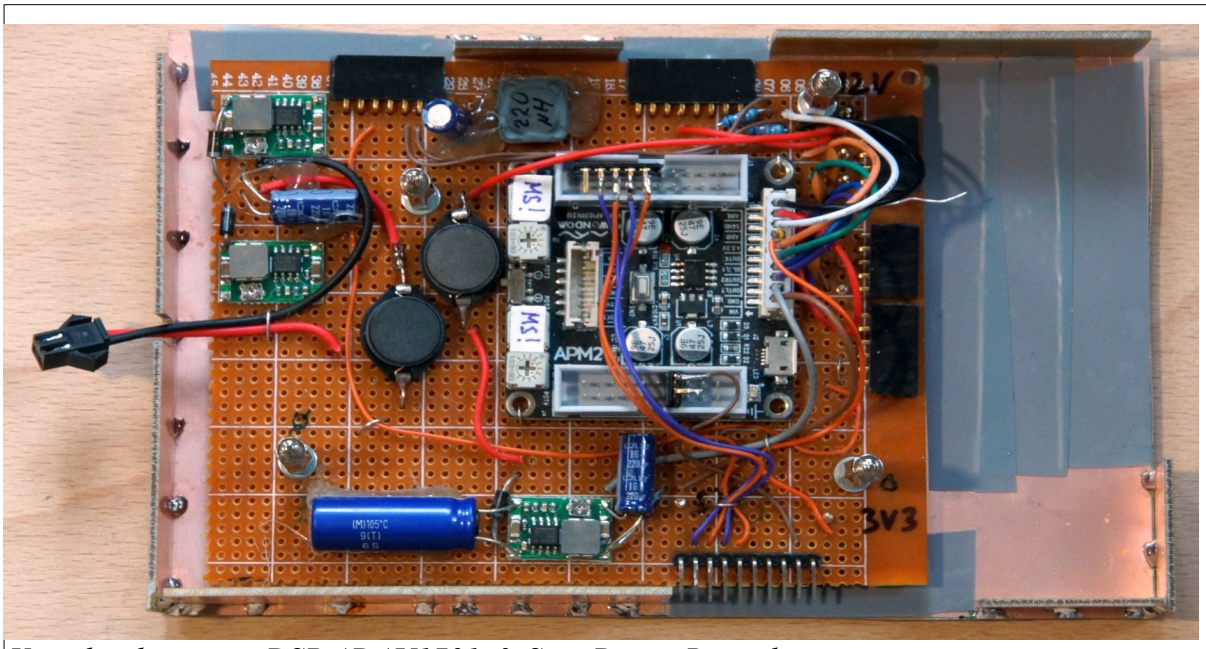
Hinweis: Die originalen Potis auf dem DSP sind bei parallelem Anschluss externer Regler unbedingt in Mittelstellung zu stellen, andernfalls droht Kurzschlussgefahr!

Das AUNA-Radio bekommt +12V/AGND und liefert den linken und rechten Kanal vom Kopfhörerausgang zurück. Die AUNA-Lautsprecher sind nun auch an den Verstärkerblöcken (linker&rechter Kanal) angeschlossen, daher kann das mechanisch störende Kühlblech am Leistungs-IC auf der Eingangsplatine des AUNA entfernt werden. Der Anschluss „DC IN“ auf der gleichen Platine wird mit schwarzem Silikon verschlossen. Der Kopfhörerausgang kann weiter genutzt werden, führt aber nicht zur Abschaltung der Box. Die beiden Lautsprecher des AUNA sind über einen Drehwiderstand 10 Ohm/10W an den Surround-Kanal in Reihe angeschlossen.

Das Lauflicht und der Box-Modus werden über einen externen 3-Stellungsschalter eingestellt:

Stellung	***Box-Modus***	***Lauflicht***	***Ruheleistung Box***
„DISKO“	Disko-Modus	Hell (+7,6V)	24,7 W
„-“	Normalmodus	Aus	10,5 W
„LED“	Normalmodus	Dunkler (+5V)	13,5 W

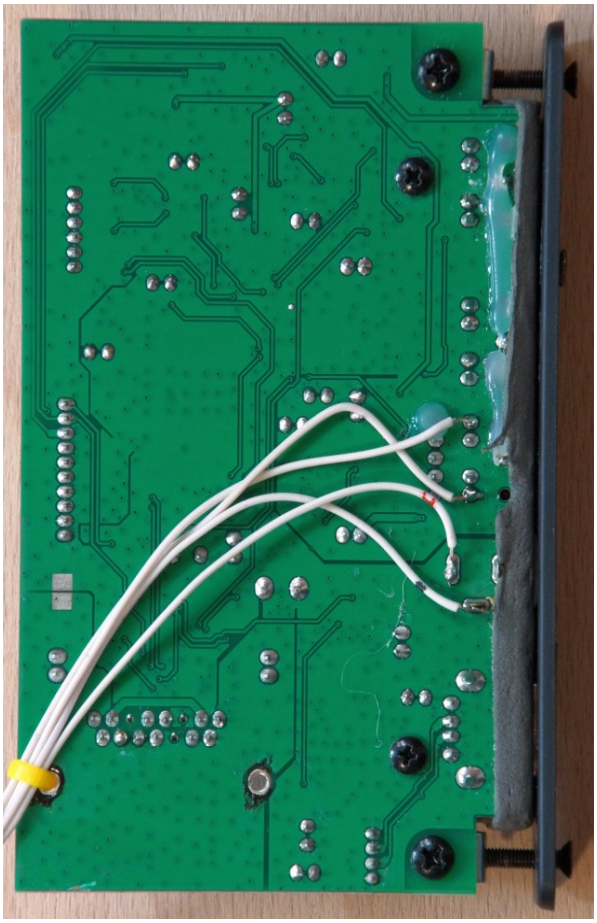
Für das Lauflicht gibt es 2 Step-Down-Regler, einen für den helleren und einen für den dunkleren Modus. Beide sind ebenfalls ausgangsseitig mit Schottky-Dioden gegen Rückströme entkoppelt.



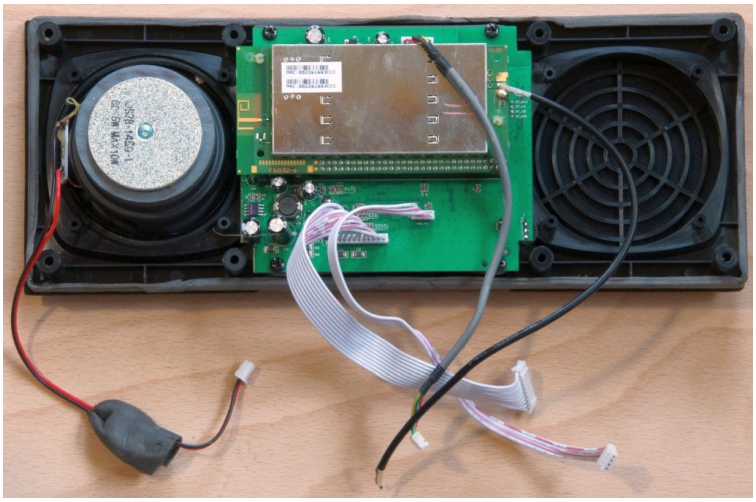
Verteilerplatine mit DSP ADAU1701, 3xStep-Down, Bestückungsseite

Als effektiv beim Eliminieren von Impuls-Störungen insbesondere vom Lauflicht haben sich auch Induktivitäten erwiesen. Sie sollten einen Gleichstromwiderstand von < 0,6 Ohm aufweisen. Das abgeschirmte Gehäuse verbessert die Empfindlichkeit des AUNA in den FM und DAB+ Bereichen. Dazu wurden aus einseitig kaschiertem Basismaterial zwei ineinander verschraubbare Halbschalen zusammengelötet.

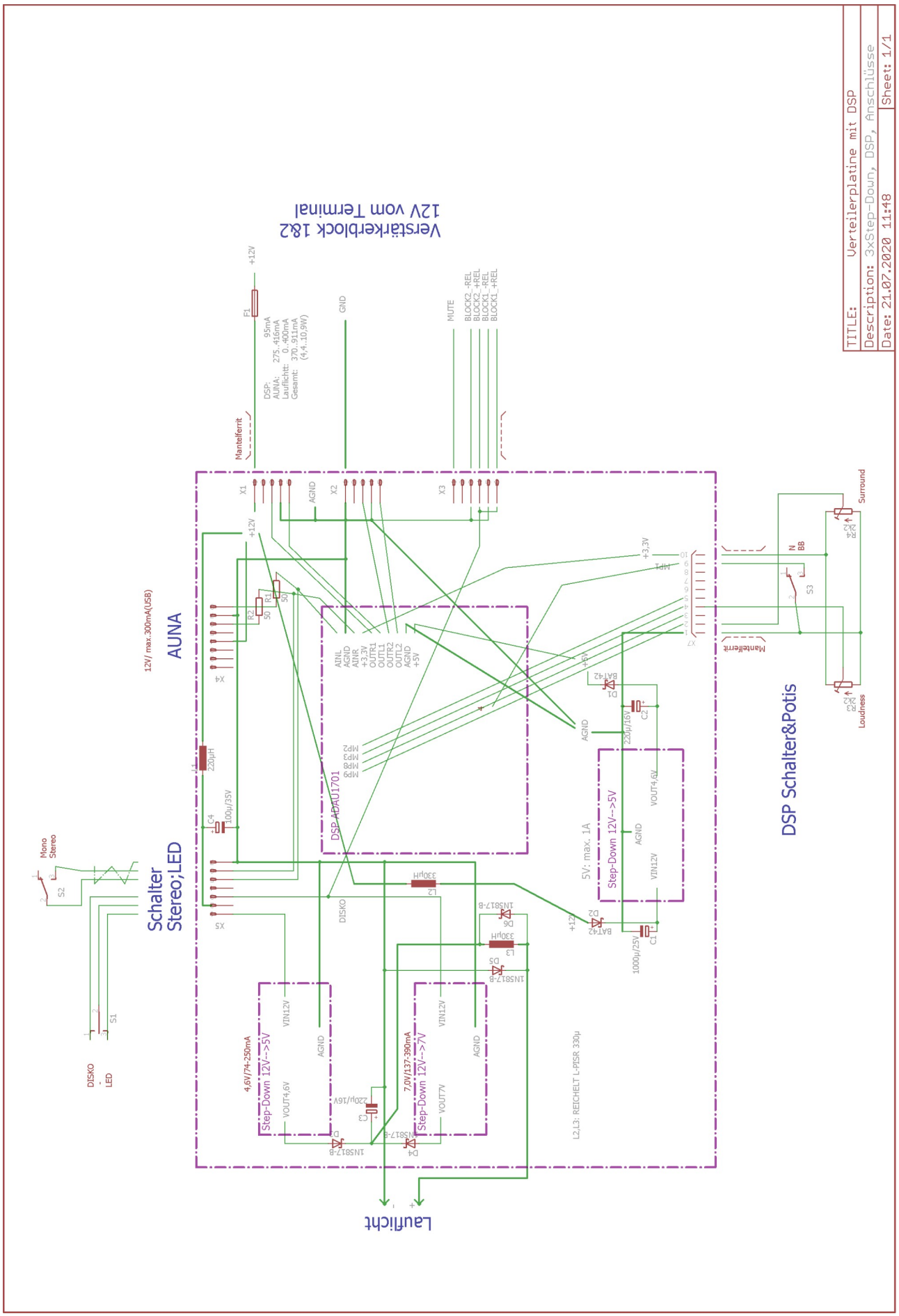
AUNA Eingangsplatine -Bestückungsseite-



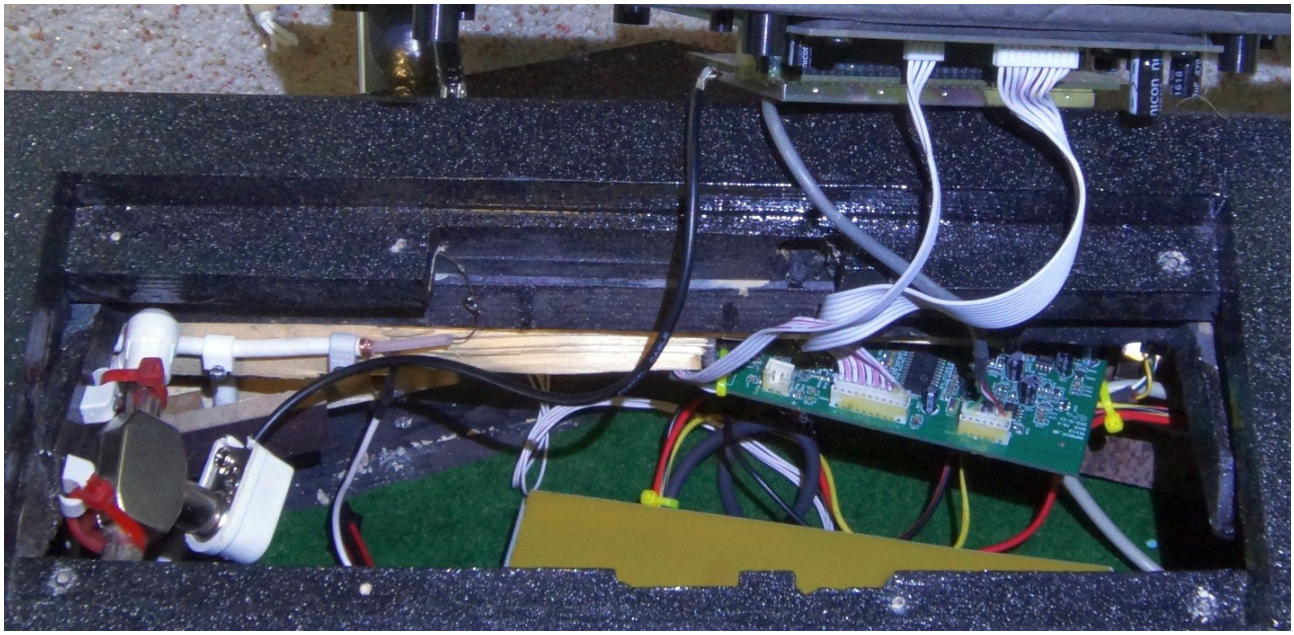
AUNA Eingangsplatine -Leiterseite-



AUNA Hauptplatine mit Display/Tuner/Lautsprecher


TITLE: Verteilerplatine mit DSP
Description: 3xStep-Down, DSP, Anschlüsse
Date: 21.07.2020 11:48
Sheet: 1/1
Verstärkerblock 1&2
12V vom Terminal
AUNA
12V/ max.300mA(USB)
Schalter
Stereo;LED
DSP Schalter&Potis
Lauflicht
DSP ADAU1701
Step-Down 12V-->5V
Step-Down 12V-->7V
5V: max. 1A
4,6V/74-250mA
7,0V/137-390mA
L2,L3: REICHELT L-PISR 330µ
Mantelferrit
Surround
Loudness
Mono
Stereo
DISKO
LED

Der Einbau des AUNA, der Verteilerplatine sowie der Bedienelemente erfolgt über die obere Öffnung in den separaten Elektronikraum:



Blick in den oberen Einbauraum der Aktivbox

Alle Baugruppen müssen so befestigt sein, dass Vibrationen später nicht zu Beschädigungen oder akustischen Verzerrungen führen. Besonderes Augenmerk ist auf die HF-Verkabelung der FM/DAB+ Antenne zu legen. Sie ist sehr empfindlich für elektromagnetische Störungen die von den Digitalkomponenten (Class-D-Verstärker, Step-Up/Down-Regler, DSP) ausgehen, während die fest verbaute 2,4 GHz Antenne (Bluetooth/WLAN) relativ klaglos gute bis sehr gute Verbindungen gewährleistet. Für erstere Antenne wurde ein Splitter eingebaut, der die fest verbaute Teleskop-antenne und den externen Antenneneingang anbindet. Zusätzlich ist auch der Programmiereingang des DSP auf eine externe RJ-45 herausgeführt (sehr praktisch bei der Entwicklung :-).

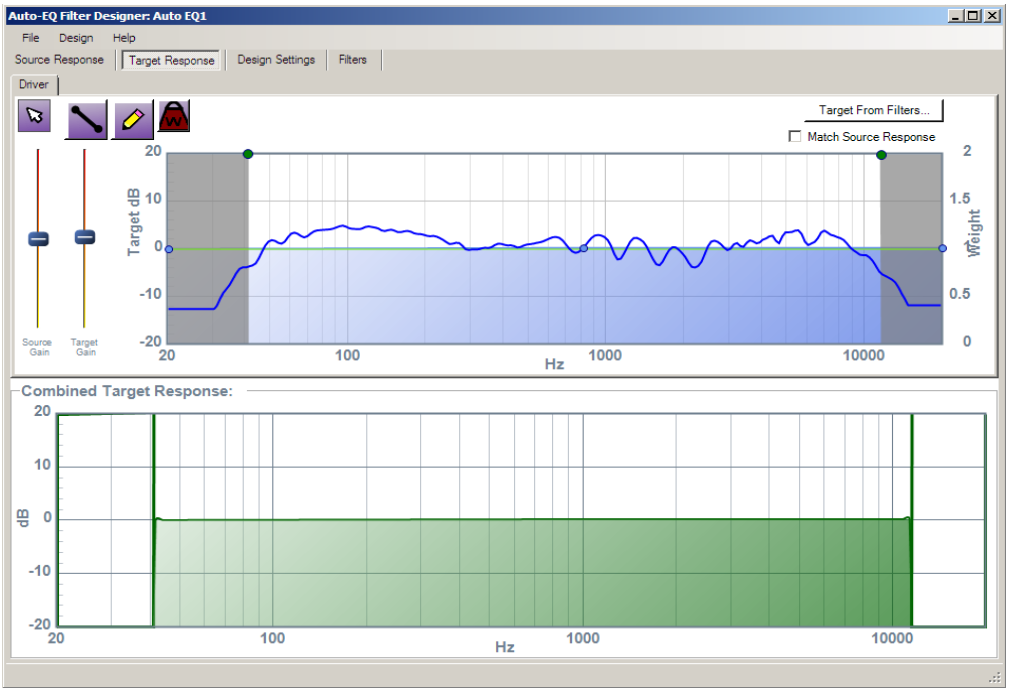
Rückseite der Box (oberer Elektronik-Einbauraum)

3.7. Das Programm für den digitalen Soundprozessor (DSP)

Der DSP ADAU1701 wurde mit dem genialen Programm SigmaStudio programmiert, die akustischen Messungen erfolgten mit einem kalibrierten Messmikrofon (UMIK-1) unter REW.

Eines vorweg – da der ADAU1701 in seinen Möglichkeiten begrenzt ist, es aber zahllose Wünsche gab, musste ich Kompromisse eingehen. So wurde komplett auf eine aktive Temperatur- und Leistungsüberwachung der Box verzichtet. Die Sicherheitsschaltungen in den Endverstärkern müssen reichen. Ein FIR-Stereo-Filter konnte deshalb ebenfalls nicht umgesetzt werden. Um trotzdem möglichst viele (IIR) Filter für akustische Korrekturen zu bekommen, wurde das Programm zudem optimiert: Die Abtastrate beträgt nur 48kHz, alle Filter werden in „Single Precision“ anstatt in „Double Precicion“ berechnet und anstatt „Volume“ kommen „Gain“ Regler zum Einsatz. Das spart Speicherkapazität bei noch akzeptabler Qualität als „Partybox“. Letztlich sollte bei möglichst guter akustischer Qualität, die Box auch praxistauglich sein. Abwechselnde Arbeit am Programm, akustische Messungen und Hörproben führten am Ende zu einem passablen Ergebnis. Der ADAU1701 ist dabei bis zum letzten Byte voll ausgelastet. Den ADAU1701 durch einen leistungsfähigeren DSP zu ersetzen habe ich verworfen, da für den Einsatzzweck (2 analoge Eingänge, 4 analoge Ausgänge) nur deutlich teurere DSPs verfügbar sind (z. B. Aurora DSP) oder erst mit D/A Wandlern ergänzt werden müssen (z. B. ADAU1452/1466). Einzig das „Nacheinander schalten“ mehrerer ADAU1701 mit Abstrichen an der Qualität (größeres Rauschen) wäre eine Lösung gewesen, aber es ging ja gerade so auch mit einem …

Das menschliche Ohr erkennt Geräusch-Ereignisse sofort, die Klangqualität eines Lautsprechers aber erst nach gewisser Zeit des „Zuhörens“. Hier spielen mehrere Faktoren eine Rolle: neben der individuellen Art des Hörens müssen z. B. erst eine Reihe von Geräuschen in verschiedenen Frequenzbereichen das „Ohr-Gehirn“ System durchlaufen haben. Zusätzlich erfolgt eine allmähliche Adaption des Hörens an die Geräuschkulisse, sowohl frequenz- als auch amplitudenabhängig. Warum schreibe ich das? Eine gute Aktivbox, die keinen festen Stellplatz hat, sollte einen ausgewogenen Frequenzgang haben, in dem die Maxima einen größeren Stellenwert haben als die Minima – Maxima führen zum „Galmen“, während (schmalbandige) Minima wegen der fehlenden Informationen im Ohr oft „unter den Tisch fallen“.



Festlegung der Zielfunktion (grün) im Modul Auto-EQ (SigmaStudio)

Deshalb stört uns der fehlende Bassbereich bei einem Lautsprecher auch erst dann, wenn wir den aktuellen Sound in der Erinnerung mit einem besseren Klangerlebnis vergleichen, während Schall aus einem Bahnhofslautsprecher ein beständig unangenehmen Klang erzeugt. Diese psychologische Eigenheit des Hörens hat eine praktische Konsequenz in diesem Projekt – da nur begrenzt Korrekturfilter zur Verfügung stehen, muss auf das Hilfsmittel „Auto-EQ“ verzichtet werden, da hier die gleichmäßige Wichtung positiver und negativer Abweichungen im Frequenzverlauf nicht veränderbar ist. Anfangs hatte ich auch per Auto-EQ einen Frequenzgang „errechnen“ lassen, aber das Ergebnis war enttäuschend. Deshalb habe ich dann letztlich den Frequenzgang nur noch auf ein „Maximum“ eingeebnet, inklusive einer stark störenden Raummode im Resonanzbereich am späteren Stellplatz. Das Ergebnis ist ein wesentlich authentischer und angenehmerer Höreindruck sowohl im Innenraum, als auch im Garten. Für die praktische Berechnung von FIR/IIR Filtern gibt es übrigens ein gut dokumentiertes niederländisches Lautsprecher-Projekt [10]. Dabei kommen die Programme SigmaStudio (mit Auto-EQ), REW für die akustischen Messungen und rePhase für die IIR-Berechnungen zum Einsatz.

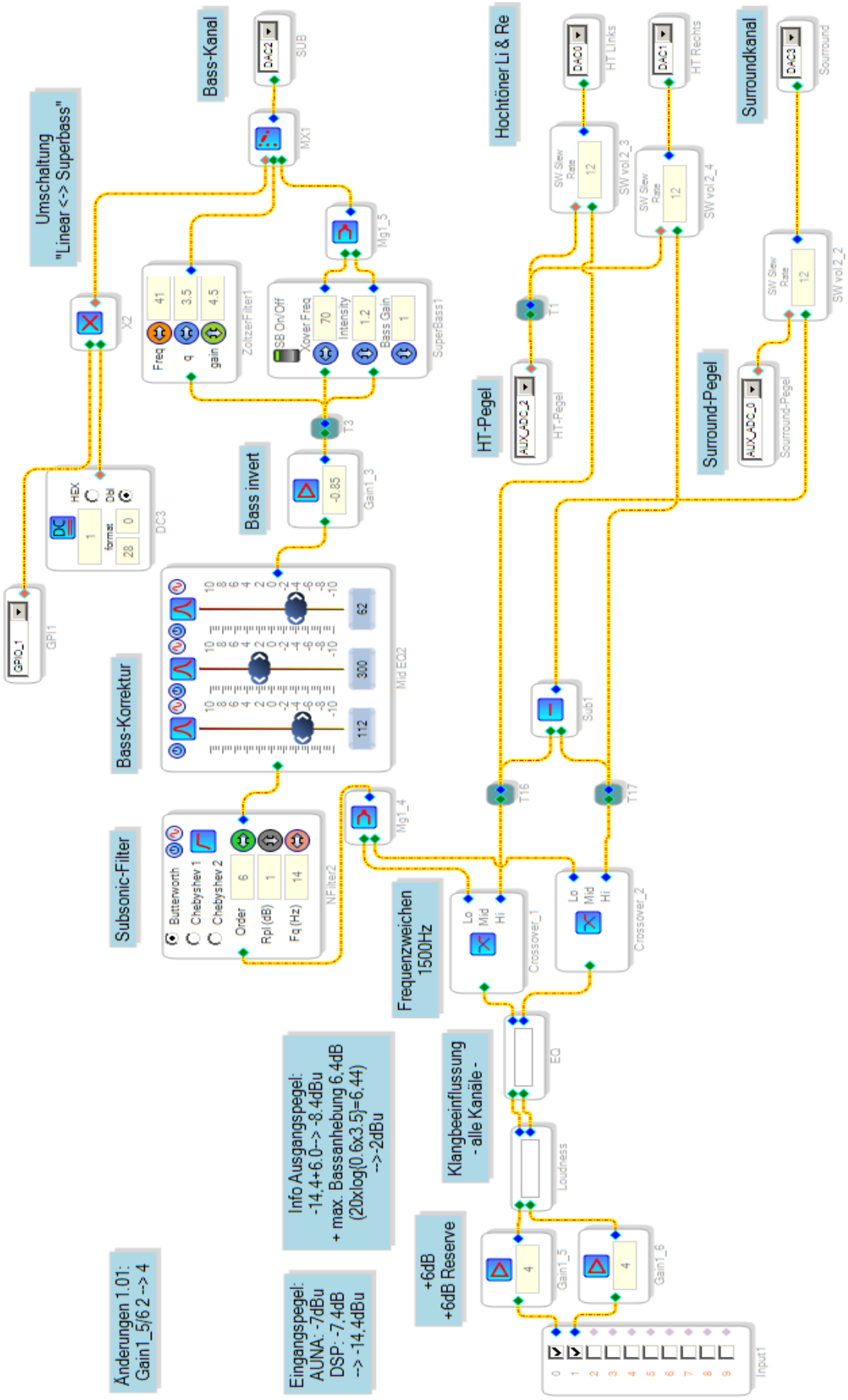
Main

Aber nun zurück zum Projekt. Auf der nächsten Seite ist die „Main“-Struktur im SigmaSudio dargestellt (Meine Aktivbox 1-2.dspproj).

Die beiden analogen Eingänge in den DSP werden vom Kopfhörerausgang des AUNA bereitgestellt, da so bereits eine bequeme Lautstärkeregelung am AUNA erfolgt und der DSP entlastet ist. Außerdem ist die Bedienung der Box so viel einfacher. Im DSP durchläuft das Stereosignal eine Klangbeeinflussung, bestehend aus einer automatischen physiologischen Lautstärkeregelung und einem Equalizer mit 4 parametrischen Stereo-Filtern. Anschließend werden die beiden Kanäle in 2 Crossover-Filtern bei 1500 Hz in zwei Wege getrennt. Die höheren Frequenzen gelangen über je einen Pegelsteller direkt an die beiden Hochton-Verstärker, sowie per Differenzsignalbildung an den Surround-Verstärker. Der Tieftonausgang beider Crossover-Filter wird in MG1_4 als Basskanal zusammengeführt. Anschließend werden im Subsonic-Filter die niederfrequenten Anteile zur Membranentlastung des Tieftöners herausgefiltert. Drei parametrische Filter erlauben zusätzlich eine Frequenzkorrektur. Der anschließende „Gain“ Block invertiert das Signal und korrigiert die Signalamplitude im Verhältnis zu den Hochtöner. Die Inversion ist notwendig, weil die Bassmembran sich ca. 11 cm tiefer in der Box befindet, als die Schallebene der Hochtöner. Das entspricht in etwa der halben Wellenlänge bei 1500Hz, der Crossover-Frequenz. Im späteren Phasenverlauf gibt es damit einen sauberen Übergang, der akustisch auch perfekt klingt.

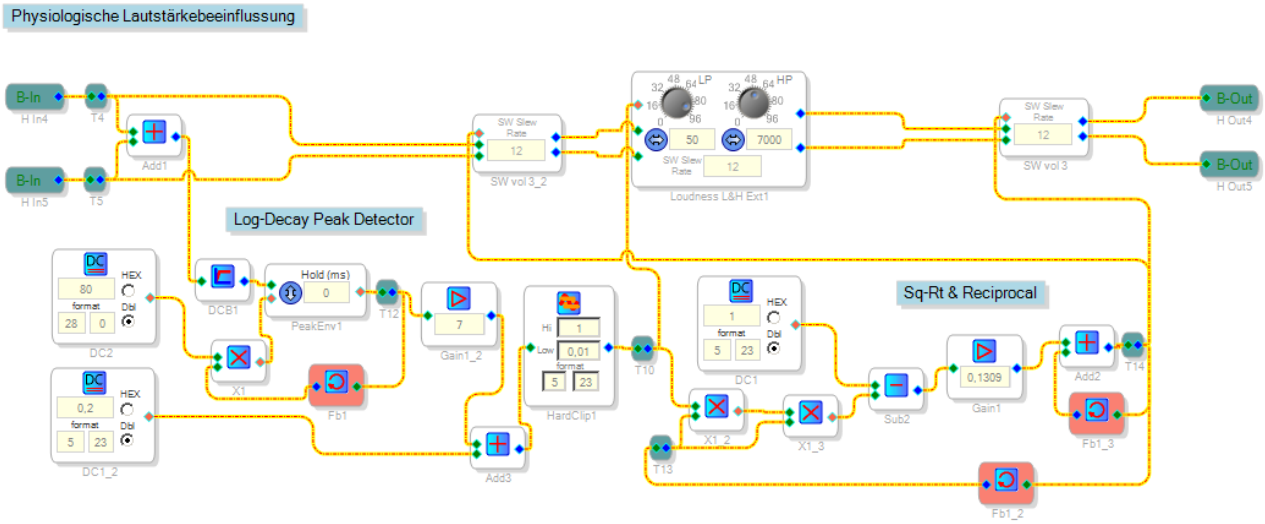
Bevor das Basssignal an den Bassverstärker übergeben wird, gibt es noch eine interessante Lösung für den universellen Charakter der Box: per externem Schalter kann man den Signalweg umschalten zwischen einem normalen, linearem Klang „N“ und einer physiologischen Bassanhebung (Bassboost) „BB“. Bei ersterem kommt ein abgestimmter Zoltzer-Filter mit 10 dB Bassanhebung unterhalb der Resonanzfrequenz der Box zum Einsatz. Der Klang ist dabei weitgehend linear bis herab unter 40 Hz – allerdings zulasten der verzerrungsfrei maximal erreichbaren Leistung. Im Modus „Bassboost“ werden die Frequenzen unterhalb von 70 Hz verdoppelt und dem Signal beigemischt. Das klingt „wuchtiger“ und ist als Party/Disko-Modus gedacht. Da die Bassanhebung dabei komplett entfällt, kann mehr Leistung abgerufen werden. Viele Menschen hören den qualitativen Unterschied nicht, sondern empfinden im Modus „BB“ nur „mehr Bass“.

Die herausgeführten Pegelregler für die beiden Hochtöner ergeben einen einfachen „Höhenregler“ – das ist sinnvoll, wenn die Musik nur als nicht störende „Untermalung“ im Hintergrund laufen soll. Der ebenfalls herausgeführte Pegelsteller für den Surroundkanal erlaubt ein individuell einstellbares Klangfeld um die Box herum (Klingt bei dezenter Verwendung einfach fantastisch).


Bass-Kanal
Umschaltung
"Linear <-> Superbass"
Hochtöner Li & Re
Surroundkanal
HT-Pegel
Surround-Pegel
Bass-Korrektur
Bass invert
Subsonic-Filter
Frequenzweichen
1500Hz
Klangbeeinflussung
- alle Kanäle -
+6dB
+6dB Reserve
Info Ausgangspegel:
-14,4+6,0--> -8,4dBu
+ max. Bassanhebung 6,4dB
(20xlog(0,6x3,5)=6,44)
-->-2dBu
Eingangspegel:
AUNA: -7dBu
DSP: -7,4dB
--> -14,4dBu
Änderungen 1.01:
Gain1_5/6 2 --> 4

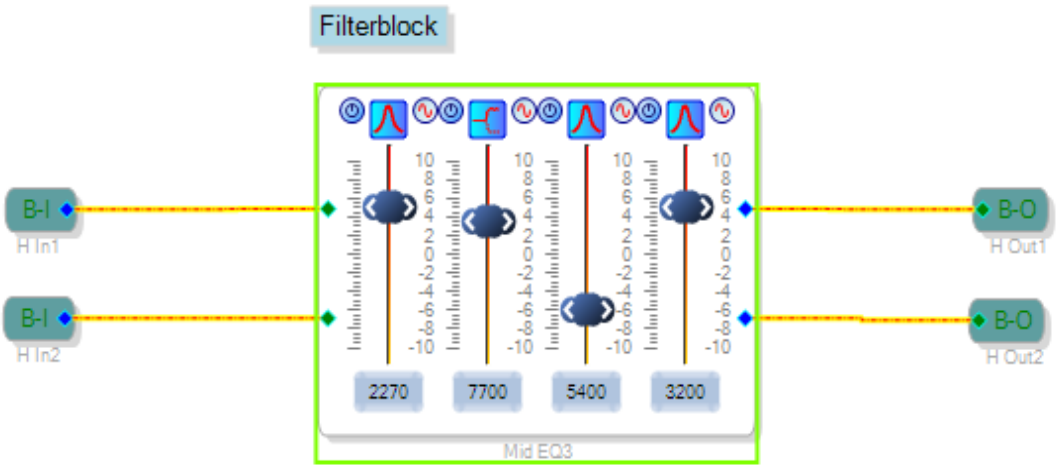
Loudness

Die automatische, physiologische Lautstärke-Korrektur, also bei kleinen Lautstärken eine zusätzliche Tiefen- und Höhenanhebung, ist unter SigmaStudio etwas schwierig umzusetzen. Ich habe die Version von [11] in etwas abgewandelter Form übernommen. Kernstück ist der (statische) Loudness-Modul im SigmaStudio. Je nach Eingangspegel (Log-Decay Peak Detektor) erfolgt eine Nachregelung des Frequenzganges. Für die dabei notwendige gegenläufige Lautstärke-Korrektur dient der „Sq-Rt & Reciprocal“ Block. Der Hardclip-Modul am Übergang zwischen beiden Strukturen begrenzt mit 0.01 den Steuerwert für die maximale Beeinflussung und mit 1 den Steuerwert für keine Beeinflussung. Die Höhe des Steuerwertes ergibt sich aus dem Signalpegel multipliziert mit dem Faktor in „Gain1_2“ und dem Wert aus „DC1_2“. Praktisch wird in „Gain1_2“ programmiert, bei welchem Pegel es keine Beeinflussung mehr gibt und in „DC1_2“ die Intensität der gewünschten physiologischen Beeinflussung. In diesem Projekt waren eine Verstärkung von „7“ und ein DC-Wert von 0,2 (=80 %) optimal.



EQ

Nachdem alle notwendigen Programmteile fertiggestellt waren, wurde der restliche Programmspeicher für parametrische Stereo-Filter verwendet. Es reichte gerade so für 4 Filter:



Die Stereo-Filter im EQ-Block linearisieren zusammen mit den Filtern im Basskanal den Frequenzgang der Aktiv-Box. Die bei mehreren Messungen und Hörproben ermittelten Einstellungen sind in der nachfolgenden Tabelle gelistet. Sicher kann man die eine oder andere

Einstellung dabei noch perfektionieren. Gemessener Frequenzgang und Hörproben ergaben relativ gleichmäßige akustische Parameter. Wichtige Eigenschaften wie Bassanhebung oder Höhenabsenkung sind bei laufendem Betrieb ohnehin über zusätzliche externe Bedienelemente einstellbar. Für den Einsatz der KE25SC wurden die Filter modifiziert.

1x Visaton W250S, 2x Monacor DT-254 (Meine Aktivbox 1-2.dsppproj):

Bereich	Filtertyp	Frequenz	Güte	Pegel	Bemerkungen
Main	Gain1_5/6	-	-	4,0	Eingangsanhebung
Main	Gain_1_3	-	-	-0,85	HT/SUB-Ausgleich, Phasendrehung
Main	Peaking EQ	112	0,7	-5 dB	Absenkung W250S „Buckel“
	Peaking EQ	300	1,5	+2 dB	Anhebung Minima (Bodenreflexion)
	Peaking EQ	62	9,0	-4 dB	Energie-Absenkung Raummode im Bereich Resonanzfrequenz der Box
EQ	Peaking EQ	2270 Hz	8,0	+5 dB	Anhebung Interferenz-Minima (HT) [2)]
	High Shelf EQ	7700 Hz	-	+3 dB	HT-Ausgleich [1)]
	Peaking EQ	5400 Hz	2,0	-6 dB	Absenkung Monacor „Buckel“
	Peaking EQ	3200 Hz	9,0	+5 dB	Anhebung Interferenz-Minima (HT) [2)]

1x Visaton W250S, 2x Visaton KE25SC (Meine Aktivbox 2-0.dsppproj):

Bereich	Filtertyp	Frequenz	Güte	Pegel	Bemerkungen
Main	Gain1_5/6	-	-	3,0	Eingangsanhebung
Main	Gain_1_3	-	-	-1,05	HT/SUB-Ausgleich, Phasendrehung
Main	Peaking EQ	112	0,7	-5 dB	Absenkung W250S „Buckel“
	Peaking EQ	250	2	+2 dB	Anhebung Minima (Bodenreflexion)
	Peaking EQ	45,8	9,0	-4 dB	Energie-Absenkung Raummode
	Peaking EQ	61,1	9,0	-7 dB	Energie-Absenkung Raummode im Bereich Resonanzfrequenz der Box
EQ	Peaking EQ	1700 Hz	1,2	+4 dB	Anhebung HT-Bereich
	Peaking EQ	13000 Hz	1,0	+4 dB	Anhebung HT-Bereich
	Peaking EQ	2400 Hz	5,0	-3 dB	Absenkung Interferenz-Maximum (HT) [3)]

[1)] Bei hohen Frequenzen sind die Monacor DT-254 nicht mehr sehr effektiv.

[2)] Nur für diese Doku aktiviert – um die Interferenzen der beiden HTs in den Messdiagrammen zu unterdrücken.

[3)] Nachträglich als Kompromiss für verschiedene Entfernungen eingefügt

4. Die fertige Aktivbox

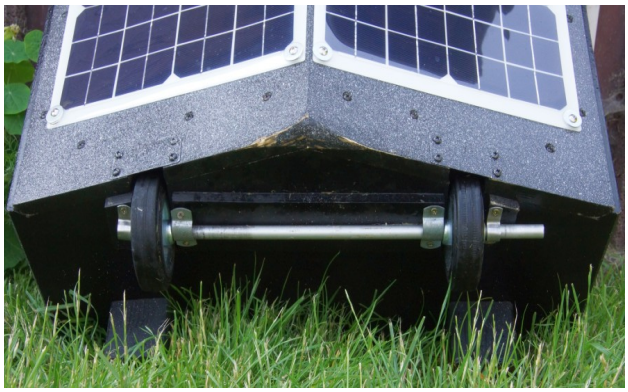
4.1. Kalkulation (in etwa tatsächliche Kosten)

Lautsprecherchassis (1x Visaton W250S, 2x Visaton CP13)	120 €	120 €
2x Monacor DT-254	70 €	
2x Visaton KE25SC, 2x Gitter Visaton 10R/134		232 €
Konstruktionsholz (18 mm und 30 mm Sperrholz)	130 €	130 €
Terminal & Terminalelektronik	50 €	50 €
2x Step-Up-Wandler 400W, 2x Endverstärker je 2x 100W, Kondensatoren und Befestigungs- und Abschirmmaterial (Klappferrite, Lochrasterplatinen usw.)	90 €	90 €
AUNA Connect 120	100 €	100 €
Epoxidharz mit Zubehör	70 €	70 €
3x Akku WP-1236W KungLong	60 €	60 €
Sure ADAU1701-BOARD	30 €	30 €
Sonstige Elektronik (Bedienelemente, 3x Step-up-wandler, Verbinder, Kabel usw.)	40 €	40 €
Solarpaneele (2x)	46 €	46 €
Lauflicht&Aluprofile	55 €	55 €
Bitumenmatten, 2x BR-Rohre	30 €	30 €
Strukturlack, Filler, Grundierungen, Spachtelmasse	58 €	58 €
Schutzbügel, Griffe, Trolleygriff	45 €	45 €
Schrauben, Dübel, 2x Räder+Achse -vorhanden-	0 €	0 €
Gesamt	**994 €**	**1.156 €**

In der Kalkulation nicht enthalten sind die Kosten für den Sure-Programmer, den Last-Imitator (Anlage 5.8) sowie Entwicklungsmaterial (durchgeknallter Verstärker usw. ;-). Das geplante Budget wurde letztlich auch bereits mit den Monacor DT-254 wesentlich überschritten. Insbesondere die Kosten für Holz/Epoxidharz und „Kleinigkeiten“ habe ich unterschätzt. Die ursprüngliche Annahme, die Chassis machen ca. 1/3 der Gesamtkosten aus, war falsch. Sie liegen nur bei 1/5. Letztendlich kostet 1 kg der Aktivbox ca. 19 €, wobei mehr als die Hälfte davon auf Elektrotechnik bzw. Elektronik entfällt. Nach Beschaffung und Einbau der hochwertigen Visaton KE25SC erhöhten sich zwar die Kosten, aber die bessere Klangqualität machen die Box zu einem exzellenten Unikat. Lithium-Ionen-Akkumulatoren inklusive entsprechender Ladetechnik anstelle der verbauten Blei-Vlies-Akkus hätten den Preis wahrscheinlich um weitere 150 € erhöht (angenommer LiPo Akku-Preis von 50 ct/Wh).

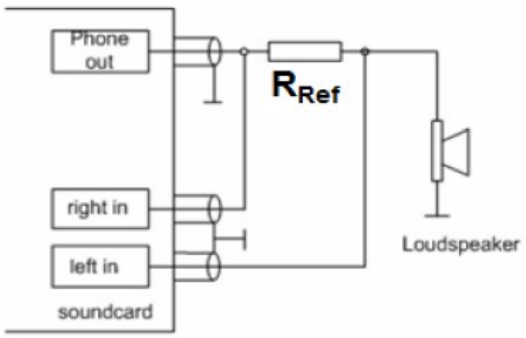
Die Arbeitsstunden inklusive Entwicklung und Dokumentation schätze ich auf maximal 200–300 Personenstunden. Die Box entstand im Zeitraum März – Juli 2020.

4.2. Ansichten der fertigen Box



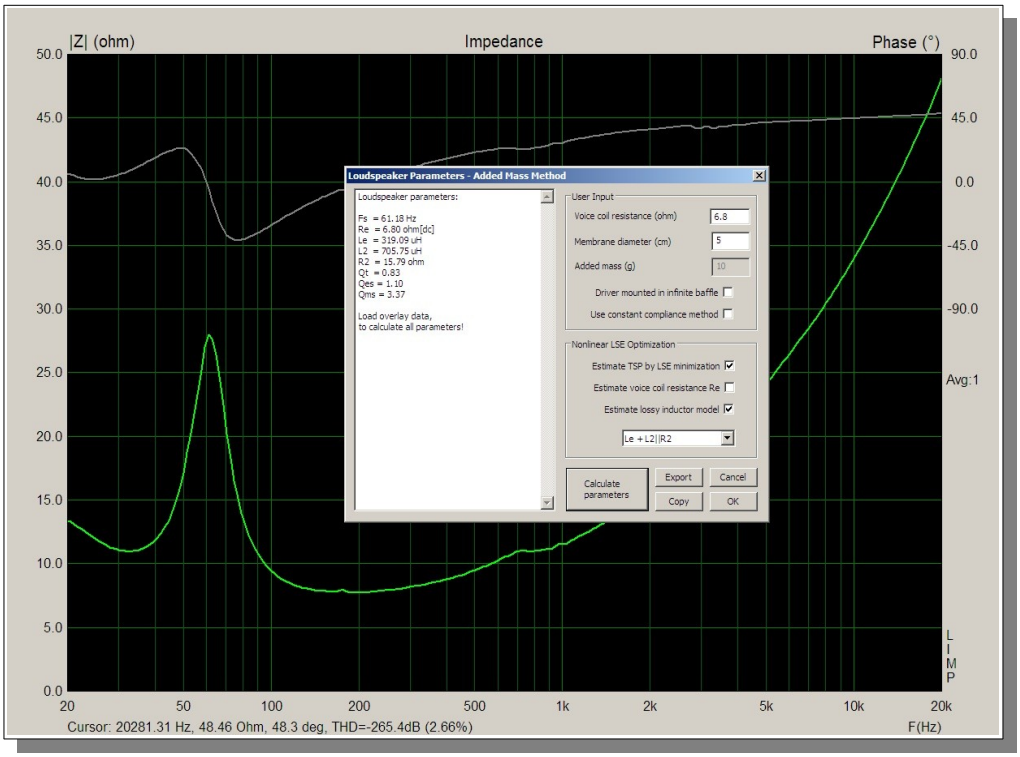
4.3. Akustische Messungen (W250S/DT-254 noch ohne DSP)

Vor der Inbetriebnahme der Verstärker und des digitalen Soundprozessors (DSP) wird zunächst die (mechanisch) fertige Box ausgemessen, das ist entscheidend für die spätere Parametrierung des/der DSPs. Dabei benötigt man nur die Werte des Basstreibers (W250S), da die anderen Chassis geschlossen sind. Für die Messung von Resonanzfrequenz und Impedanz wurde auf LIMP [9] von Ivo Mateljan zurückgegriffen. Der W250S wird entsprechend folgendem Schema an den PC angeschlossen (Auszug aus dem Handbuch):

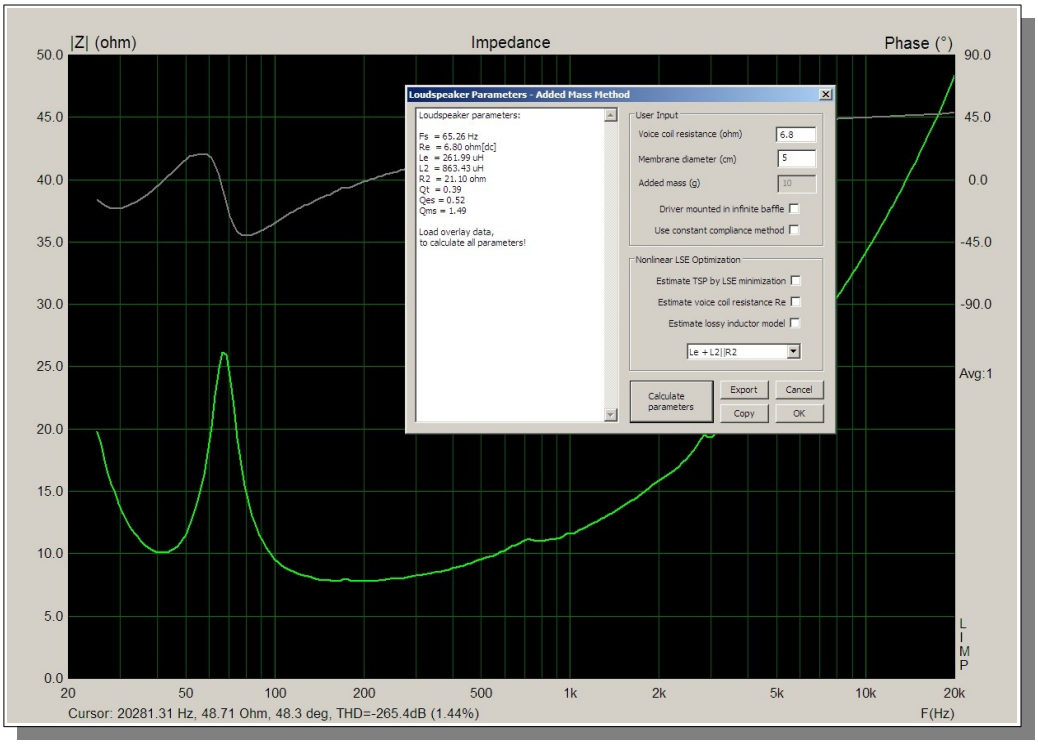


Als Referenzwiderstand wurde 68 Ohm verwendet.

Resonanzfrequenz der Box mit W250S – komplett geschlossenes Gehäuse:



Resonanzfrequenz der Box mit W250S – 2x Bassreflexrohr (HP50, 50x143 mm):



Beide Resonanzfrequenzen (65,3 und 61,2 Hz) unterscheiden sich nur geringfügig. Um das Gehäuse bei Maximalbelastung besser ventilieren zu können, wurde daher die Lösung mit den beiden kleinen Bassreflexrohren (diagonal versetzt, eins unten, eins oben) im Weiteren verwendet. Die formale Linkwitz-Entzerrung findet so erst einmal keine Anwendung.

Frequenzgangmessungen der Einzelchassis (W250S und DT-254 in der Box) im Garten

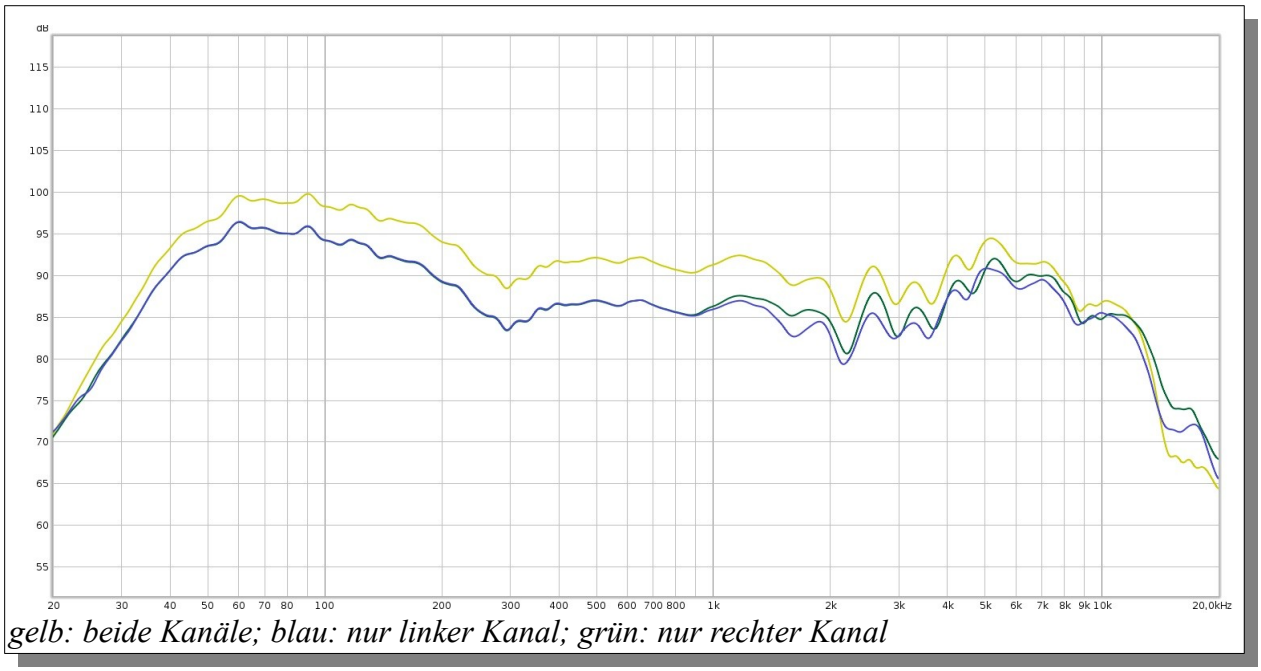
In Anlage 5.11. sind die Messungen auszugsweise dargestellt. Diese Messungen sind natürlich mit Vorbehalt zu sehen, da das Ganze doch sehr amateurhaft aufgenommen wurde. Das Prinzip ist aber ersichtlich: Ein akustisch „harter“ Untergrund verschlechtert deutlich den Frequenzgang und damit die spätere Wiedergabequalität in realistischer Entfernung bei z. B. Gartenpartys. Aber selbst recht hoher Rasen führt zu Reflexionen und damit zu bemerkenswerten Interferenzen in 2 m Entfernung. In Räumen kommen dann noch die unkalkulierbaren Raummoden hinzu. Letztlich war dieses Ergebnis doch unerwartet, sodass ich auf eine geplante spätere „Ausbügelung“ der Frequenzgang-kurve mit DSP „auf wenige dB genau“ verzichten werde. Da die Box ja im Gegensatz zu einem Hörerlebnis im eigenen „HiFi-Studio“ in sehr unterschiedlichen Situationen zum Einsatz kommen wird – ohne entsprechende situationsbezogene Korrektur der akustischen Parameter – sollte trotzdem ein guter Kompromiss bezogen auf den Frequenzgang erreicht werden. Dazu gehört neben der Bassanhebung und der physiologischen Lautstärkekorrektur auch eine Kompromiss-Korrektur der zu erwartenden Bodenreflexionen. Insbesondere durch den niedrigen Einbauort des W250S sollte deshalb der Bereich 300 Hz ±50 Hz um 3 dB angehoben werden. Bei höheren Frequenzen ergeben sich leider keine allgemeingültigen Regeln, außer dass vielleicht zusätzliche mechanische Konstruktionen vor den Hochtönern den nach unten gerichteten Schall „hemmen“ und eine „Rasenaufstellung“ bevorzugt werden sollte. Ein als Transparent gestaltetes Baumwolllaken vor der Box verbessert die Akustik und schützt etwas vor betrunkenen Gästen ;-)

Die Bassanhebung um 10 dB soll bei einer Frequenz von 41 Hz einsetzen und mit 0 dB bei 65 Hz enden. Die Übergangsfrequenz für die aktive Frequenzweiche im DSP kann wie geplant im Bereich 1500 … 1800 Hz umgesetzt werden.

4.4. Akustische Messungen (W250S, DT-254 mit DSP)

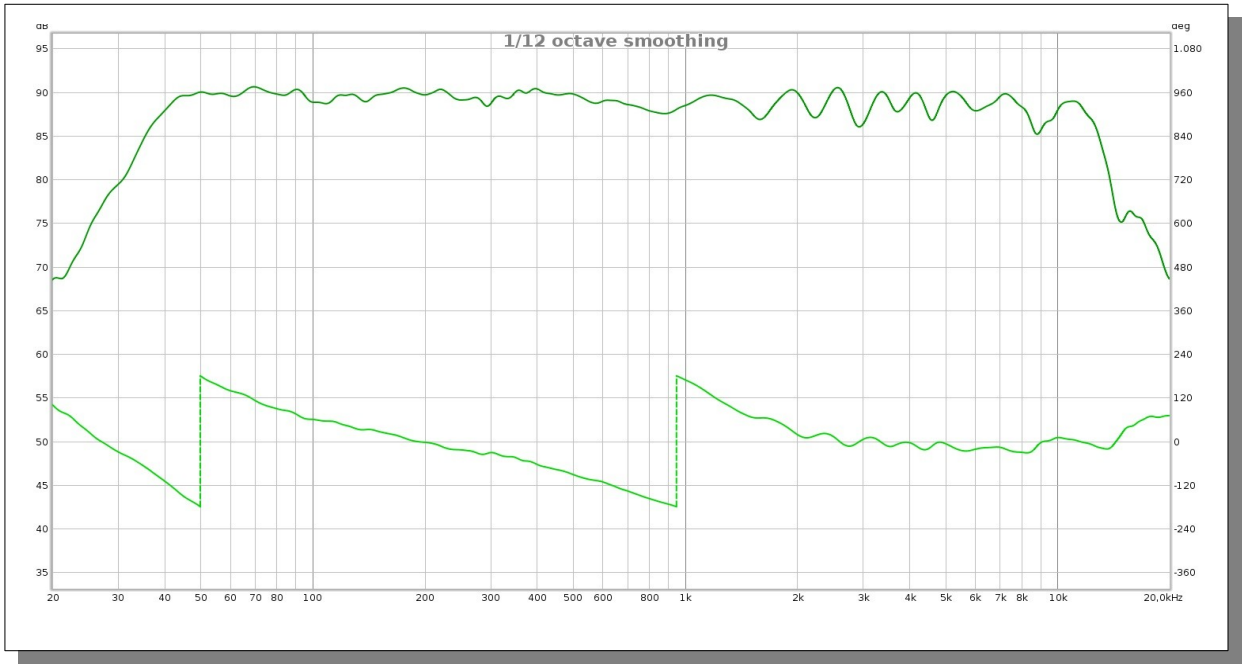
Nach Fertigstellung der Aktiv-Box erfolgte eine Abschlussmessung aller akustischen Parameter im Garten. Die Mikrofonentfernung betrug 1 m, die Mikrofonhöhe ca. 53 cm, Reflexionen wurden weitgehend eliminiert. Diese Anordnung ist (fast) unabhängig von externen Einflüssen und gewährleistet eine Vergleichbarkeit der akustischen Parameter. Da die Änderungen der akustischen Parameter bei unterschiedlichen Entfernungen, Winkeln und Mikrofonhöhen bereits bekannt sind, werden sie hier nicht weiter behandelt → siehe auch Anlage 5.11. Die Messungen erfolgten mit REW und kalibriertem Mikrofon.

Frequenzgang Box mit Crossover-, Subsonic-, Zoltzer- aber ohne EQ-Filter (DSP)



gelb: beide Kanäle; blau: nur linker Kanal; grün: nur rechter Kanal

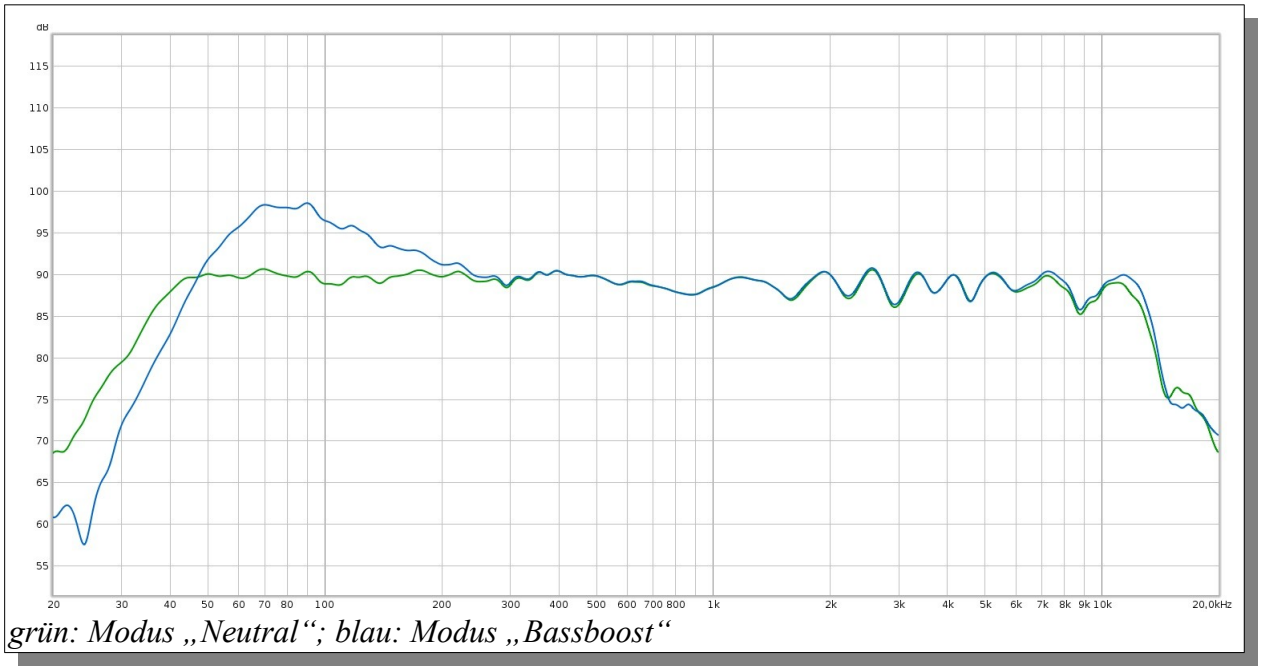
Frequenz- und Phasengang Box mit allen Filtern im Modus „Neutral“, beide Kanäle aktiv



Der Frequenzgang im Bereich 35 Hz bis 14 kHz ist ausgeglichen, der Phasengang ändert sich im

Tieftonbereich gleichmäßig, unterhalb der Resonanzfrequenz (ca. 60 Hz) erwartungsgemäß stärker.

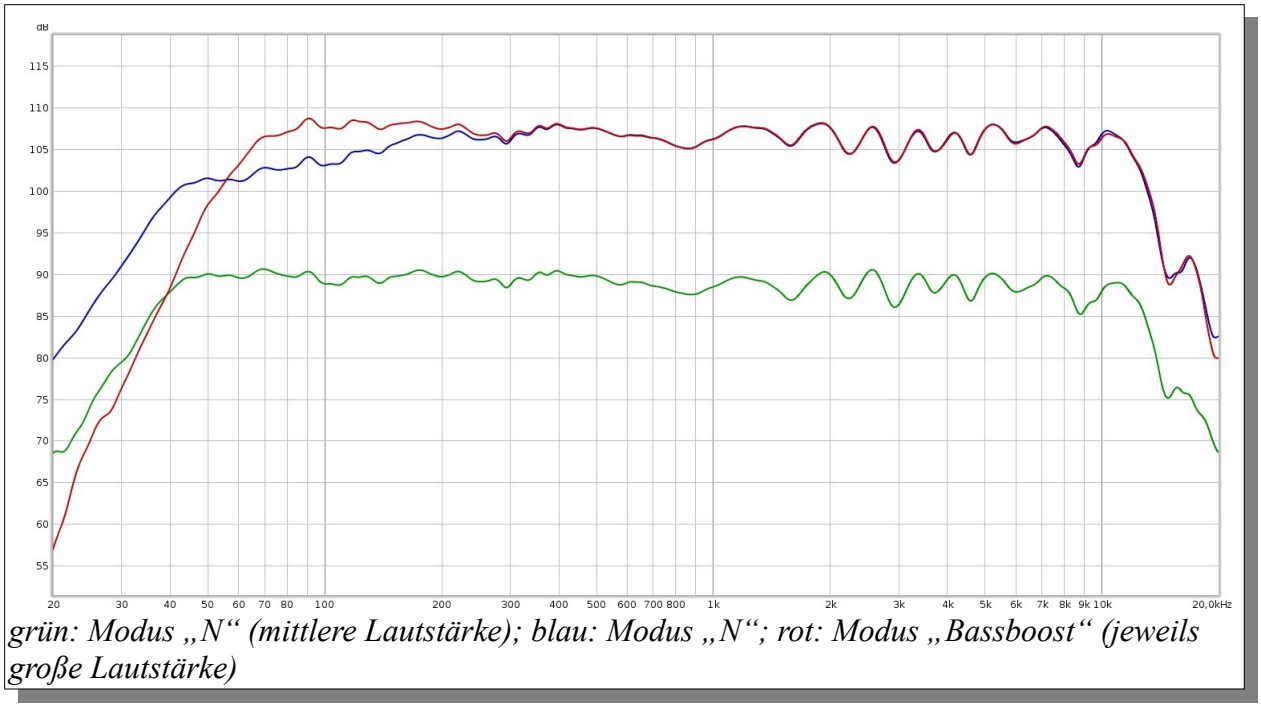
Vergleich Frequenzgang Box in Modi „N“ und „BB“ bei mittleren Lautstärken



grün: Modus „Neutral“; blau: Modus „Bassboost“

Bei kleinen und mittleren Lautstärken gibt es im Modus „Bassboost“ bei Frequenzen 50… 200 Hz eine deutliche Lautstärkeüberhöhung, bedingt durch die „Verschiebung“ tieferer Frequenzanteile nach oben. Dafür wird die Bassmembran bei niedrigen Frequenzen entlastet und es kann mehr Leistung umgesetzt werden.

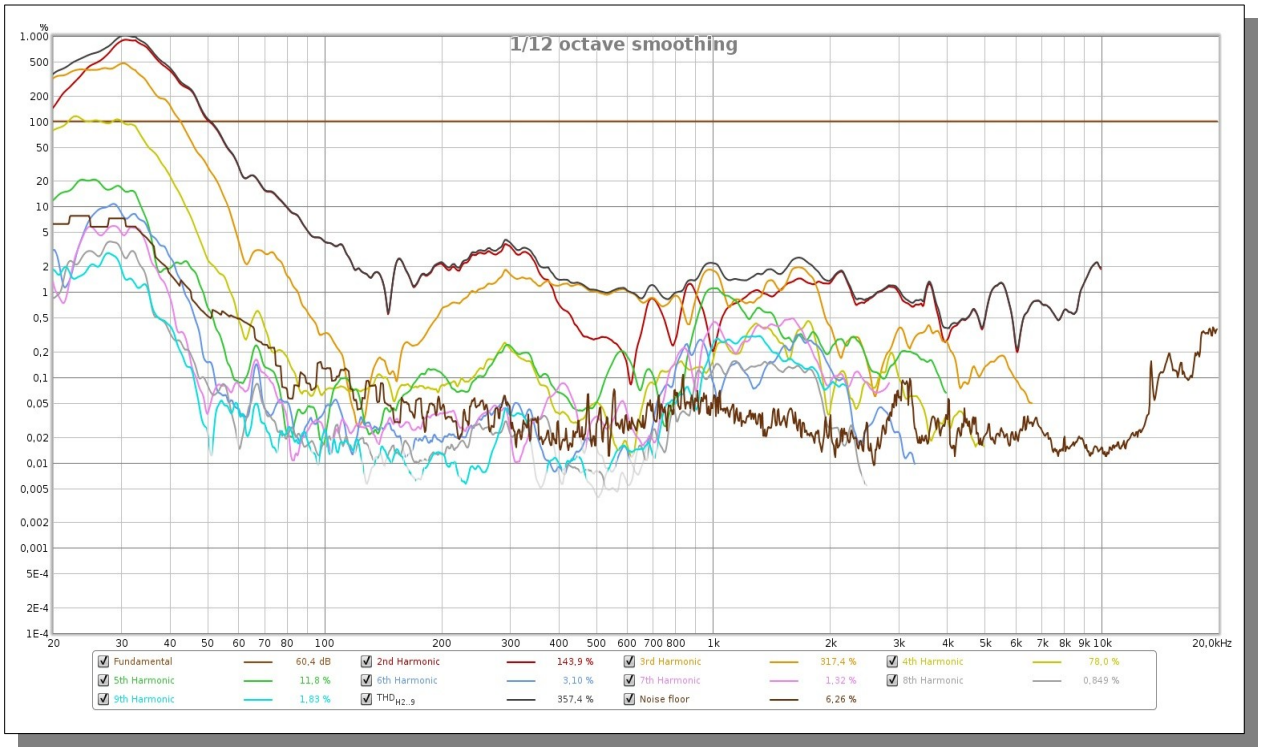
Vergleich Frequenzgang Box in Modi „N“ und „BB“ bei großen Lautstärken (Regime „Disko“)



grün: Modus „N“ (mittlere Lautstärke); blau: Modus „N“; rot: Modus „Bassboost“ (jeweils große Lautstärke)

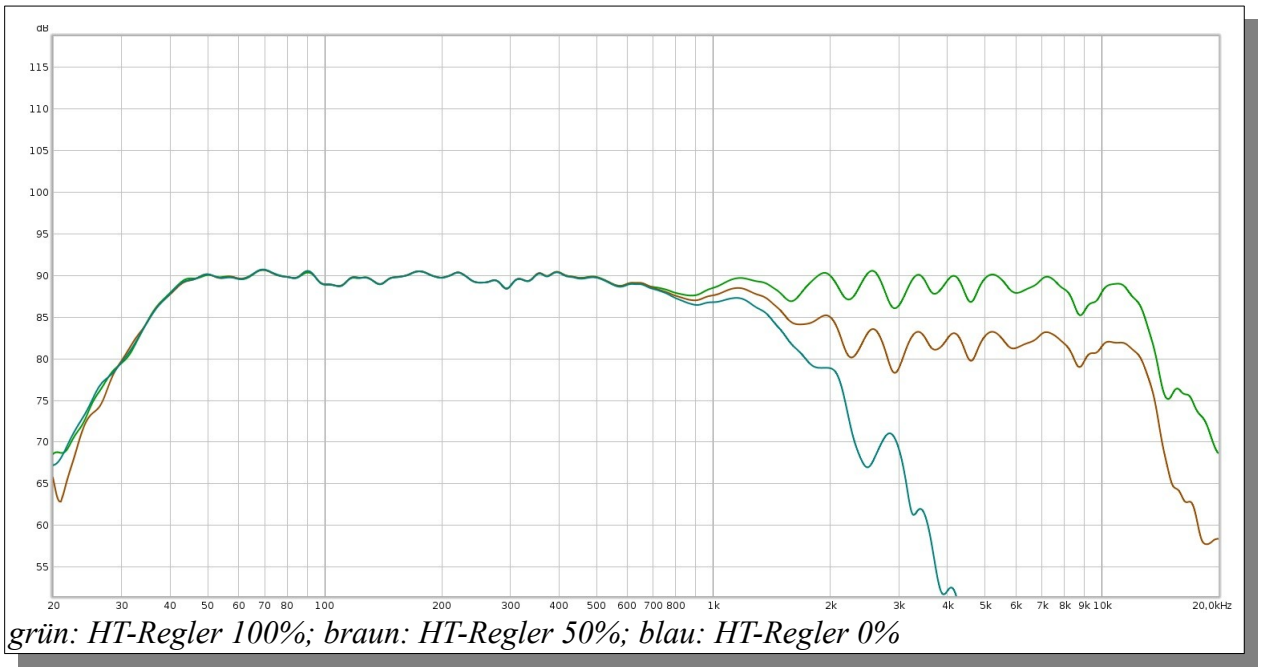
Bei großen Lautstärken reicht die Verstärkerleistung im Modus „N“ nicht mehr aus, die Bässe korrekt wiederzugeben, während im Modus „BB“ der Frequenzgang bei einem Schalldruck von beachtlichen108 dB durchaus noch mithalten kann und auch der Höreindruck überzeugt.

Verzerrungen im Modus „BB“ bei großen Lautstärken



Trotz maximaler Lautstärke (LS20) halten sich die hörbaren Verzerrungen (oberhalb 100 Hz) in Grenzen. Bei einem Schalldruck von 108 dB liegen die nicht linearen Verzerrungen unter 4 %.

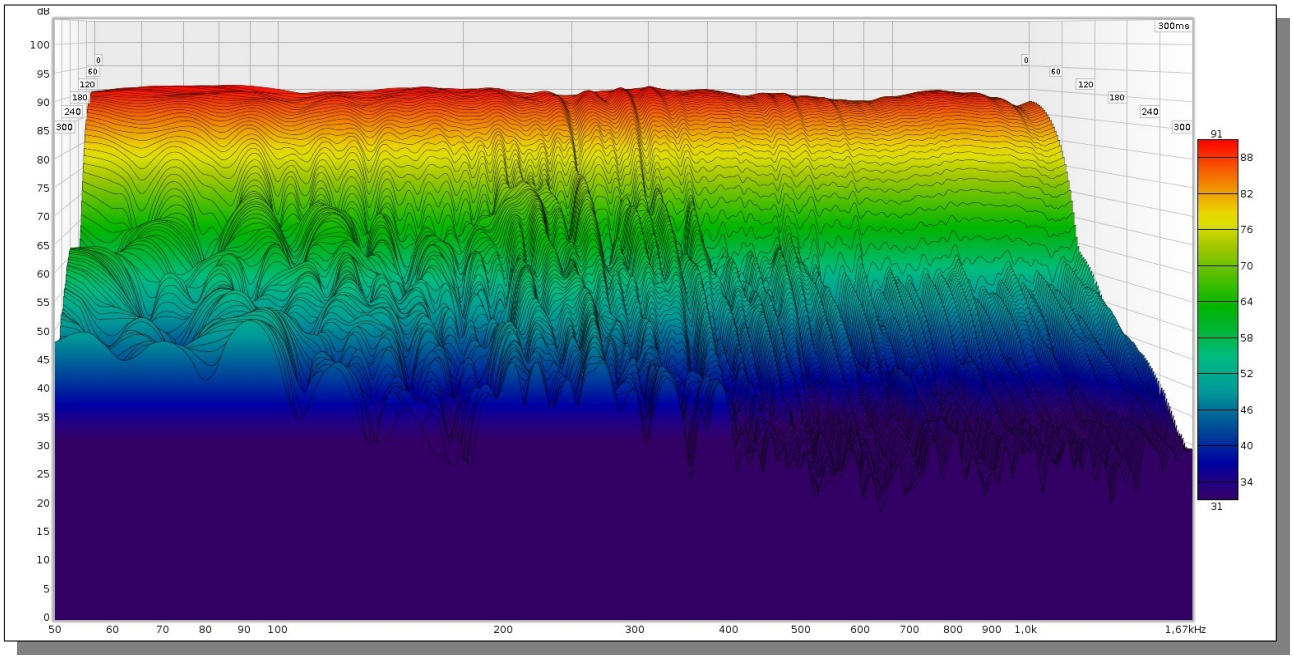
Frequenzgang der Box bei Absenkung der Höhen mittels „HT-Regler“



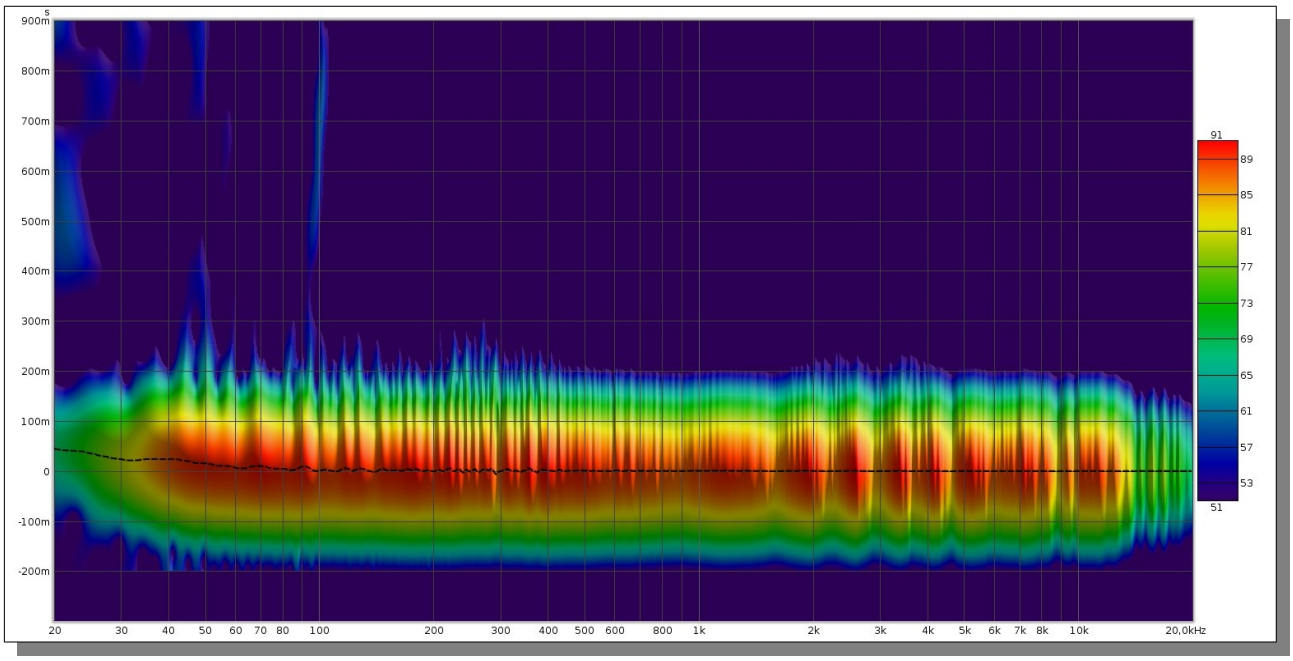
grün: HT-Regler 100%; braun: HT-Regler 50%; blau: HT-Regler 0%

Eine gute Höhenabsenkung erreicht man mit dem HT-Regler, obwohl genaugenommen nur die Lautstärke der Hochtöner verringert wird. In Verbindung mit dem Surround-Regler kann so ein optimales Hörfeld um die Box herum gestaltet werden. Auch beim Einsatz der Box zur Hintergrundbeschallung lassen sich die Aufmerksamkeit erheischenden Höhen zielgerichtet reduzieren.

Wasserfall-Diagramm bei kleinen Lautstärken (Modus „Neutral“)

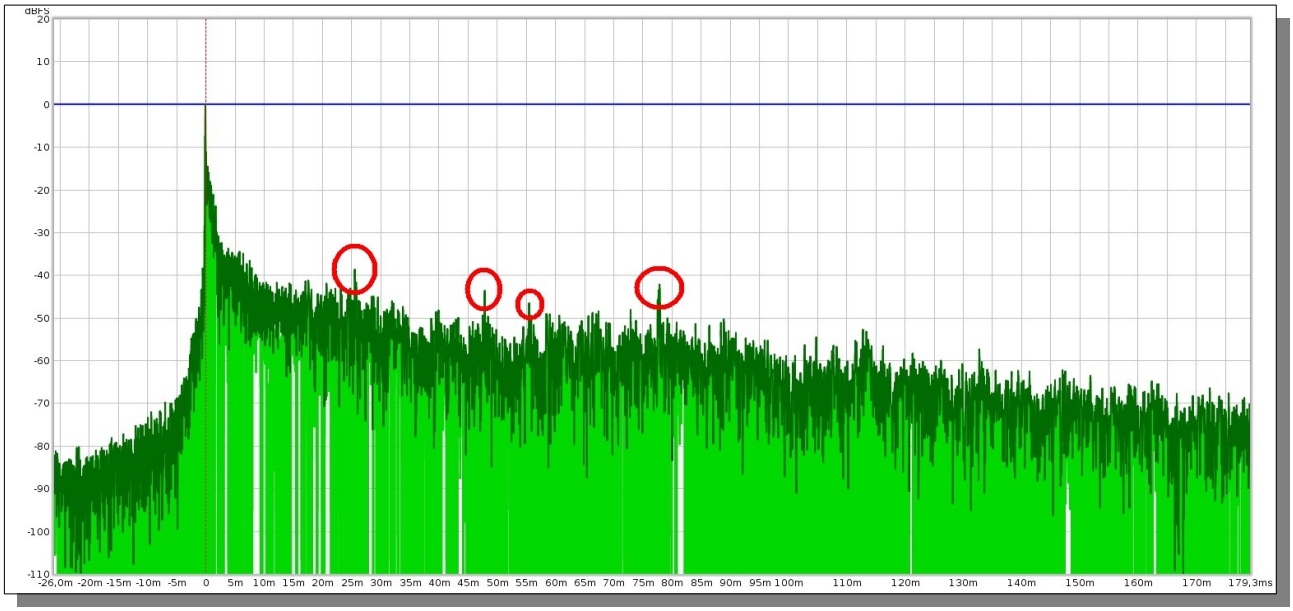


Spektrogramm bei kleinen Lautstärken (Modus „Neutral“)



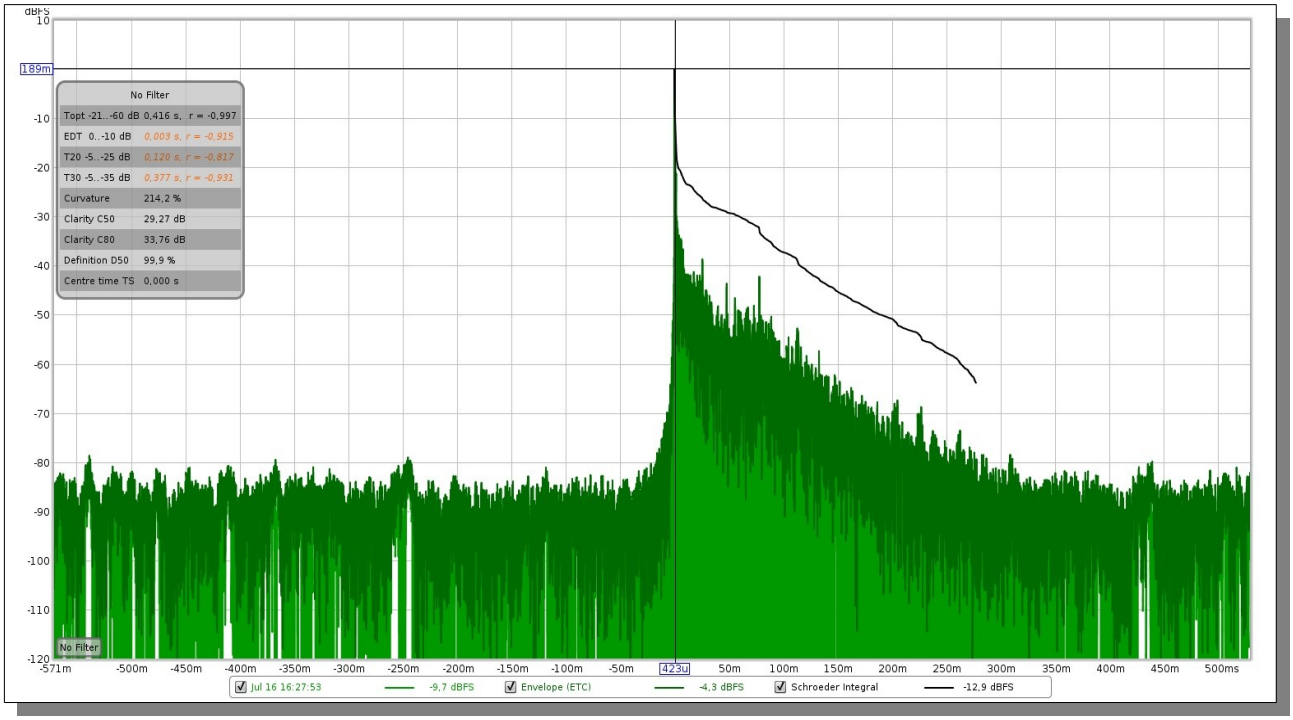
Noch ein paar Worte zur Qualität der akustischen Messungen. Der Aufstellungsort der Box und des Mess-Mikrofons wurden so gewählt, dass möglichst weder der Untergrund das Messergebnis verfälscht, noch störende Reflexionen von Wänden sich negativ auswirken. Die Interferenzen der beiden Hochtöner wurden mit 2 Filtern im DSP vorübergehend „neutralisiert“. Sicher ist das Ganze nur etwas behelfsmäßig ausgeführt. Die Messungen selbst sind aber durchaus brauchbar.

Impulsantwort der Box und der Umgebung (Modus „Neutral“) – „Impulse“ unter REW



Die Impulsantwort zeigt vereinzelte Reflexionen in Entfernungen von 8/2 m bis 27/2 m. Da hierbei der Schallpegel aber bereits um 40 dB abgefallen ist, können diese Reflexionen vernachlässigt werden. Etwas mehr Einfluss haben die Bodenreflexionen in den ersten 2 ms, also Schall, der einen „Umweg“ von maximal 70 cm nimmt. Dieser wirkt sich aber genauso (negativ) aus, wie die Box später genutzt wird. Da die akustischen Korrekturen mittels Filter hier eliminierend eingreifen, kann man ihn ebenfalls vernachlässigen. Zur Vervollständigung noch die …

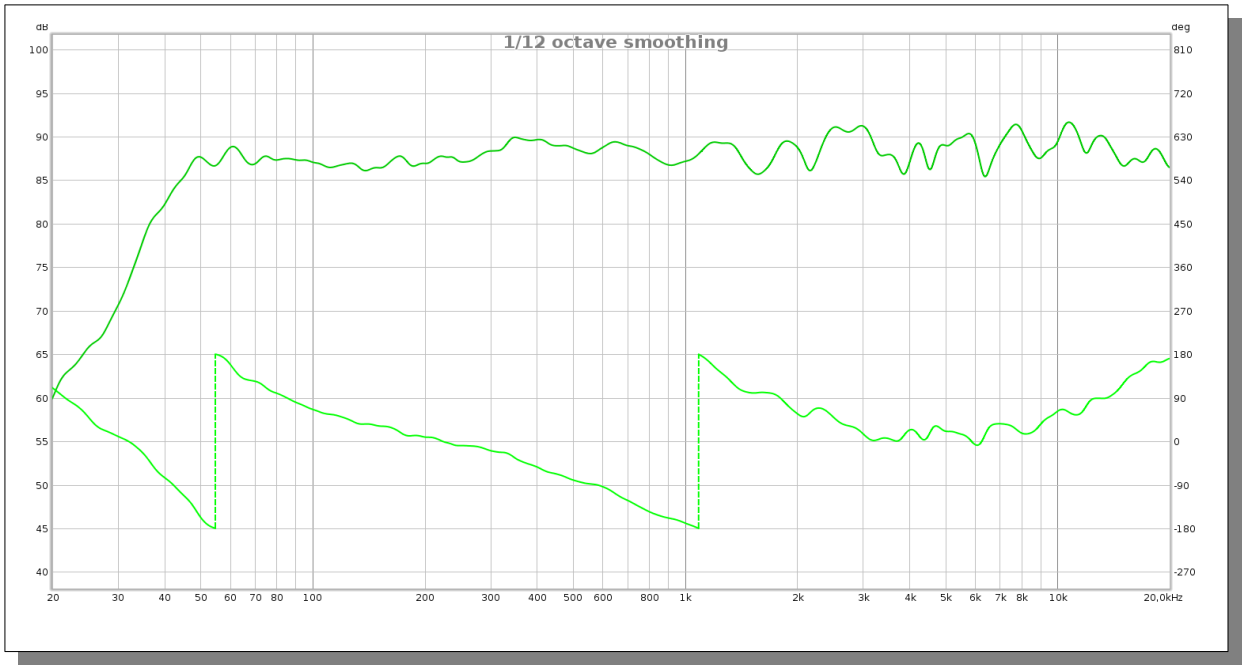
Impulsantwort der Box und der Umgebung (Modus „Neutral“) – „Filtered IR“ unter REW



4.5. Akustische Messungen (W250S, KE25SC mit DSP)

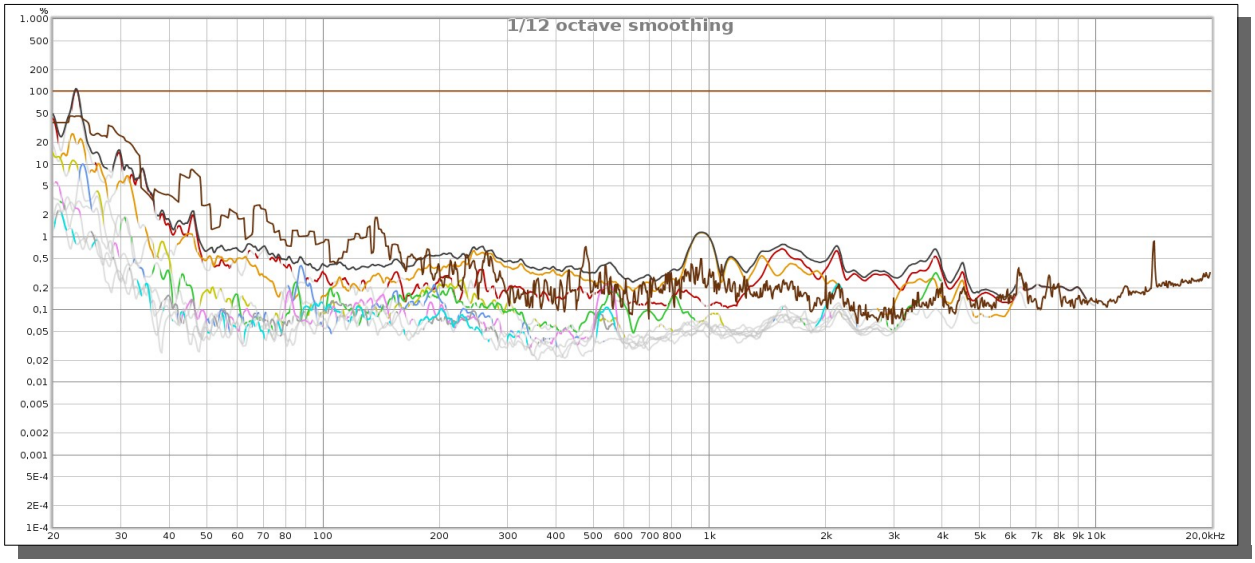
Nach Umbau der Aktiv-Box auf 2x KE25SC erfolgte ebenso wie unter 4.4. eine Abschlussmessung aller akustischen Parameter im Garten. Die Einzelmessung der Chassis → siehe Anlage 5.12. Dafür wurden diesmal keine Filter gegen Interferenzen aktiviert. Auch der Raummodenfilter (61,1 Hz) ist inaktiv. Für den Frequenzgang wurden die Kanäle einzeln gemessen. Dargestellt ist im Weiteren der rechte Kanal (der linke ist weitgehend identisch).

Frequenz- und Phasengang der Box mit allen Filtern im Modus „Neutral“, 1 m Entfernung, nur rechter Kanal



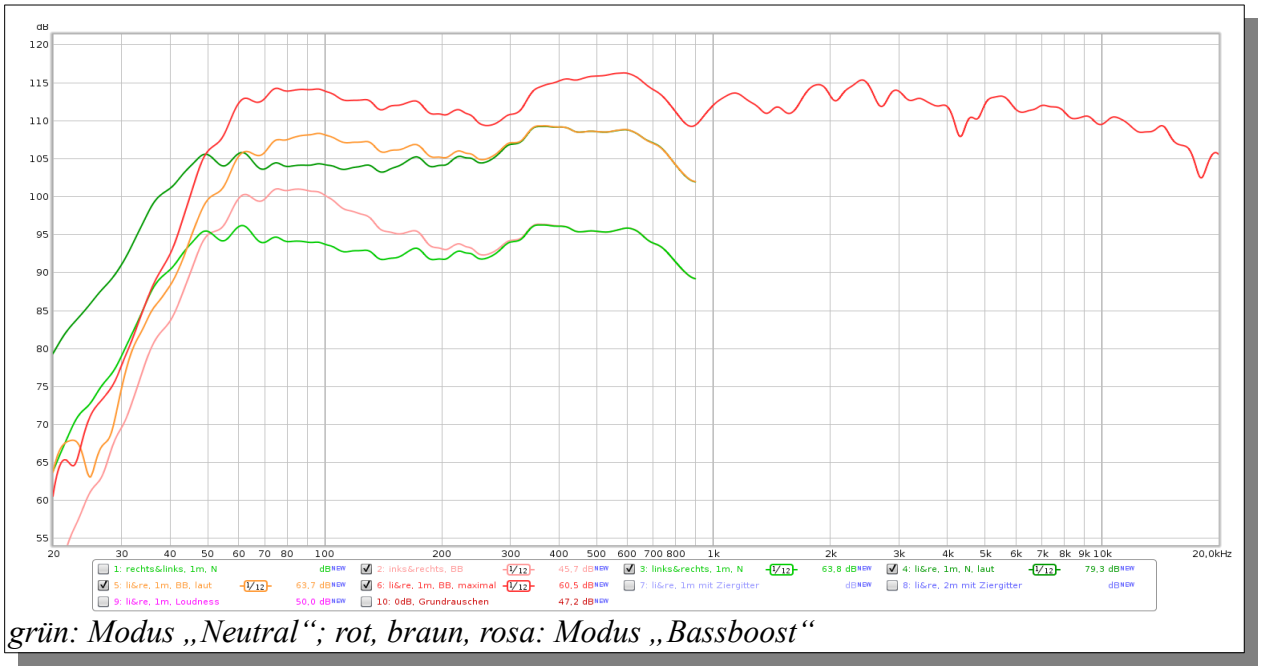
Der Frequenzgang im Bereich 35 Hz bis 22 kHz ist halbwegs ausgeglichen, der Phasengang ändert sich gleichmäßig, unterhalb der Resonanzfrequenz (ca. 60 Hz) erwartungsgemäß stärker.

Nicht lineare Verzerrungen mit allen Filtern im Modus „Neutral“ mittlere Lautstärke, 1 m, nur rechter Kanal



Die nicht linearen Verzerrungen liegen unter 1 % (f > 80 Hz) und sind daher praktisch nicht hörbar!

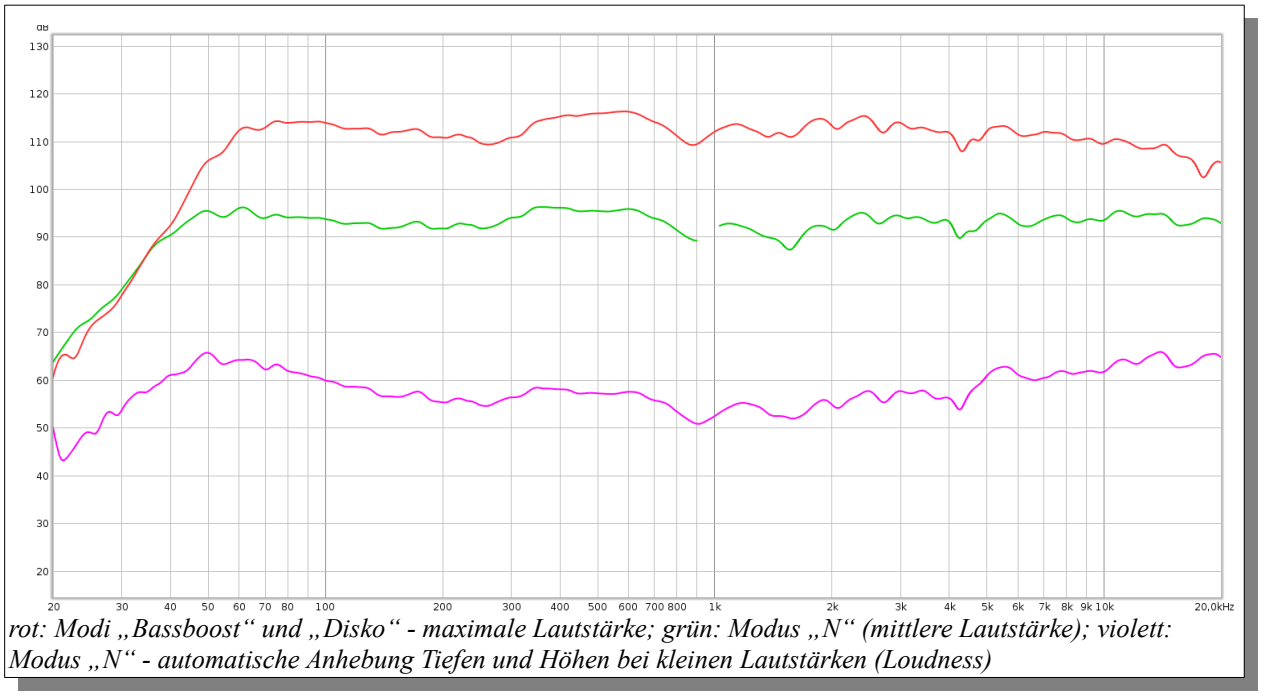
Vergleich Frequenzgang Box in Modi „N“ und „BB“ bei verschiedenen Lautstärken



grün: Modus „Neutral“; rot, braun, rosa: Modus „Bassboost“

Bei kleinen und mittleren Lautstärken gibt es im Modus „Bassboost“ bei Frequenzen 50… 200 Hz eine deutliche Lautstärkeanhebung, bedingt durch die „Verschiebung“ tieferer Frequenzanteile nach oben. Dafür wird die Bassmembran bei niedrigen Frequenzen entlastet und es kann mehr Leistung umgesetzt werden. Die in der obigen Grafik sichtbare Überhöhung im Bereich 350 … 600 Hz wandelt sich mit größer werdender Entfernung durch Bodenreflexionen in ein „Tal“ und wird daher nicht mit Filtern „geglättet“.

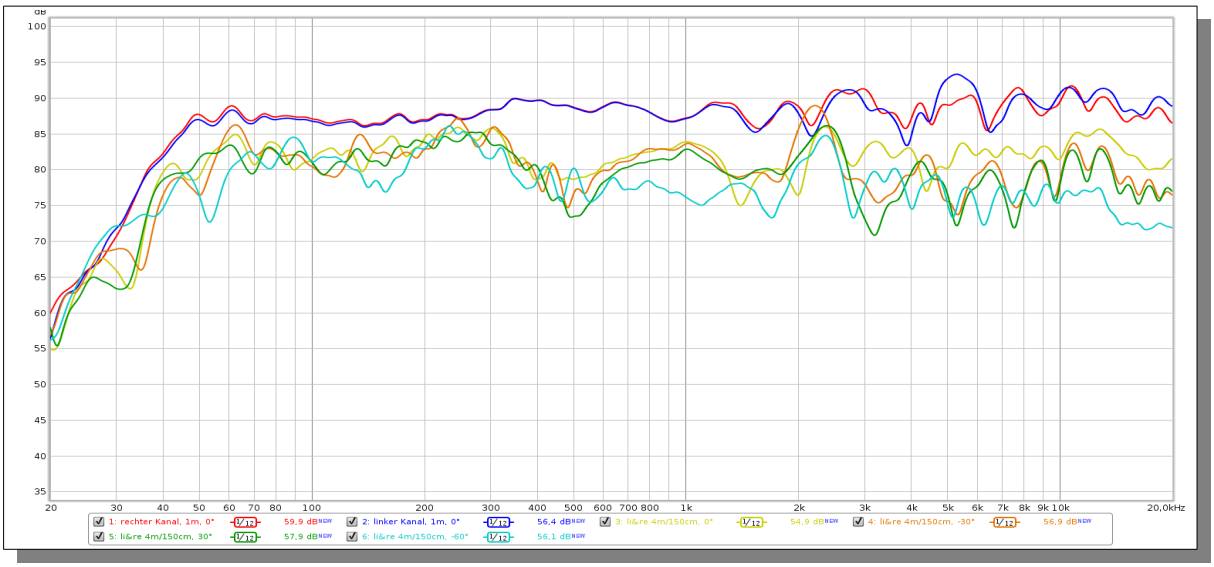
„Loudness“ Funktion im Vergleich zu verschiedenen Lautstärken



rot: Modi „Bassboost“ und „Disko“ - maximale Lautstärke; grün: Modus „N“ (mittlere Lautstärke); violett: Modus „N“ - automatische Anhebung Tiefen und Höhen bei kleinen Lautstärken (Loudness)

Im Bereich geringer Lautstärken setzt die automatische Loudness-Regelung ein. Sehr gut zu sehen an der größeren Verstärkung der Tiefen und Höhen (violette Linie) in obiger Grafik.

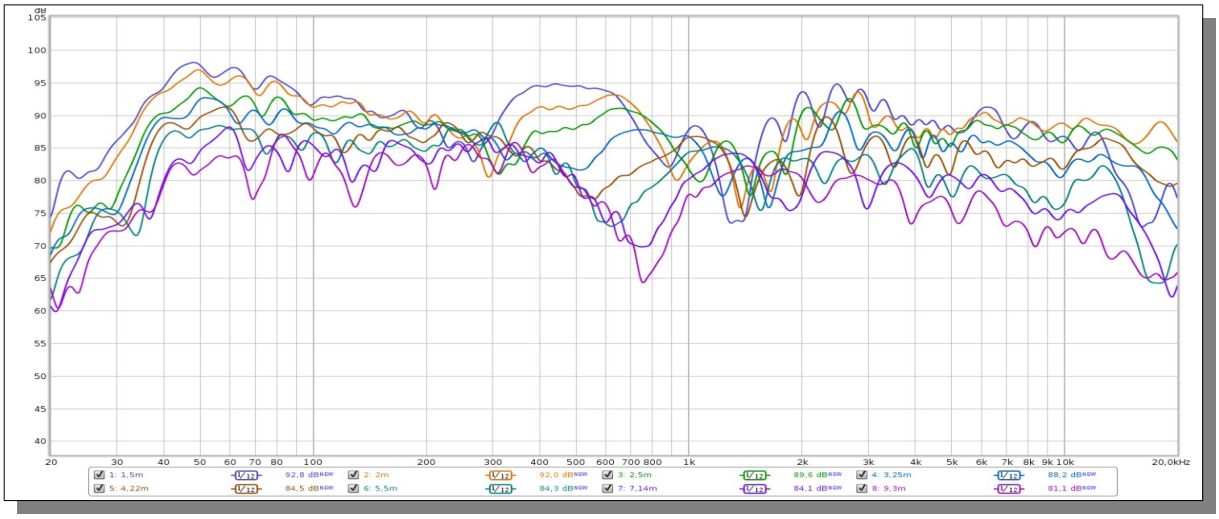
Mit Spannung habe ich die Messung des Frequenzganges der Box links und rechts außerhalb der Symmetrieachse erwartet, so müssten sich ja nun deutlich Interferenzen der beiden Hochtöner zeigen. In der folgenden Grafik sind zum Vergleich die Frequenzgänge in der Symmetrieachse (blau, rot, jeweils 1 m Entfernung) und die Winkelmessungen in 4 m Entfernung angegeben.



Und tatsächlich, je nach Winkel kommt es z. B. bei 2,1 … 2,2 kHz (±30°) und dann wiederholend aller 2,1 kHz zu einer deutlichen Überhöhung (braune und grüne Linie). Das korreliert sehr gut mit dem rechnerischen Wert von 2125 Hz, die als Interferenz bei 30° entstehen, wenn die Entfernungsdifferenz zu den beiden Hochtönern etwa 16 cm beträgt (340 m/s / 0,16 m = 2125 Hz). Dass die braune und grüne Linie (+30°/-30°) nicht deckungsgleich sind, hängt womöglich mit dem nicht ganz korrekten Winkel und der Exemplarstreuung der Hochtöner zusammen.

Interessanterweise gibt es auch in 4 m Entfernung bei 0° eine Überhöhung bei 2,3 kHz (gelbe Linie), die nur durch Bodenreflexionen entstehen konnte. Vielleicht sollte man hier doch noch mit einem Filter etwas korrigierend eingreifen. Aber auch der Frequenzgang der Hochtöner bei 60° ist (bis auf die Spitze bei 2,3 kHz) in etwa gleichmäßig, womit eine gute „Ausleuchtzone“ erreicht wird (hellblaue Linie).

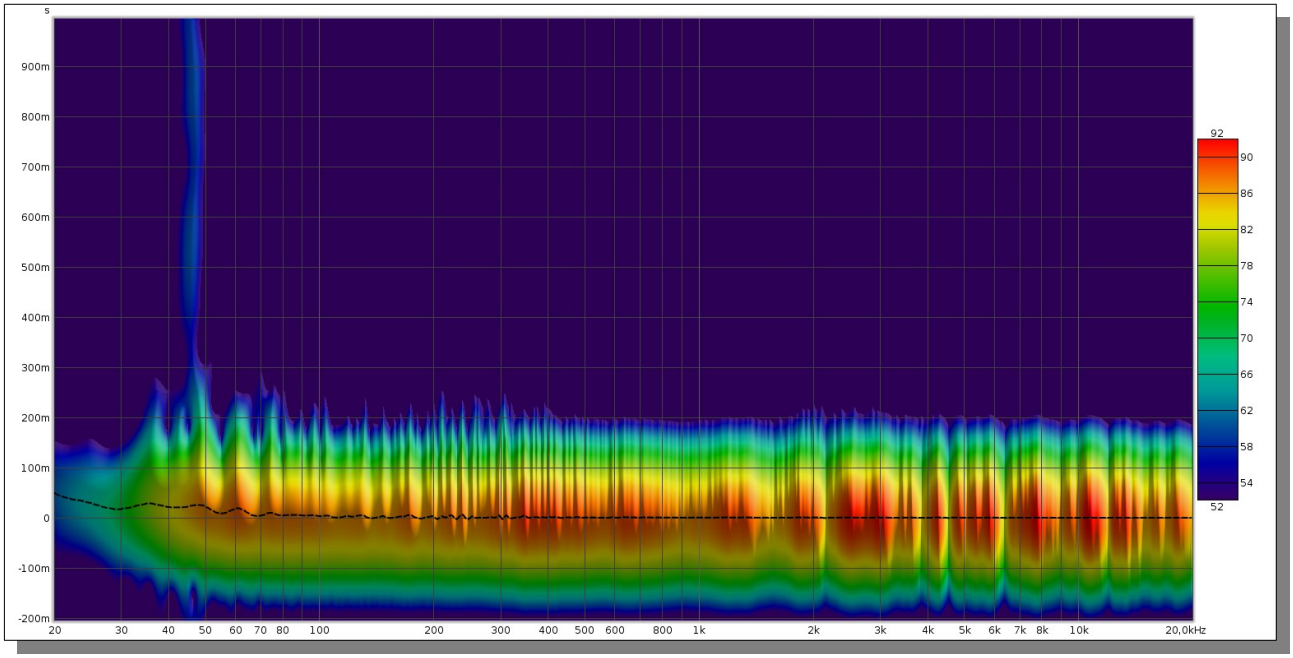
Deshalb habe ich zum Abschluss noch eine Messung in der Symmetrieachse in verschiedenen Entfernungen von der Box (Rasen) bei einer praxisnahen Mikrofonhöhe von 160 cm durchgeführt:



Deutlich sichtbar verschieben sich mit steigender Entfernung von der Box die Interferenzen, die

z. T. zu Auslöschungen von 20 dB führen (!) und äußerst komplex sind. Das kann selbst der beste DSP ohne Personentracking nicht korrigieren – ausgenommen das „Grundtonloch“ um 250 Hz. Daher ist an dieser Stelle die DSP-Programmierung beendet. Abschließend nur noch das …

Spektrogramm bei mittleren Lautstärken (Modus „Neutral“) in Symmetrieachse, 1 m, rechter Kanal (noch ohne Korrekturfilter 45,8 Hz und 61,1 Hz)



Hörproben der fertig abgestimmte Box mit Visaton W250S, KE25SC und CP-13

Insgesamt liefert die Box einen exzellenten Klang mit glasklaren Höhen und einem guten Bassfundament. In einer Entfernung von bis zu 3 m direkt vor der Box ist ein räumliches Stereo-Klangbild lokalisierbar, um die Box herum bei aktivierten Surround-Strahlern ist der Sound auch in größeren Entfernungen ausgeglichen „räumlich“ und nicht aufdringlich. Die Interferenzen zwischen beiden Hochtönern, wenn man seitlich von der Symmetrieachse steht, wirken sich kaum negativ auf den Klang aus. Die Bässe sind in der Nähe voller und nehmen mit steigender Entfernung etwas ab. Natürlich führen störende Bodenreflexionen im Freien zu einem komplexen Frequenzgang, der für ein trainiertes Ohr hörbar ist, in Innenräumen überwiegen aber die Raummoden. Die Bedämpfung der beiden tiefen Bassspitzen führt zu einem ausgeglichenen Klang ohne Dröhnen.

Bei großen Leistungen (Party) muss von Hand auf die Modi „BB“ und „Disco“ umgeschaltet werden (Kompromiss, da der DSP bereits voll ausgelastet ist). Dabei sind im Freien (Gartenparty) bei weitgehend verzerrungsfreier Wiedergabe auch in 10 m Entfernung noch mehr als 90 dB Lautstärke möglich. Im Sektor ±40° vor der Box ist kaum ein Abfallen der Lautstärke wahrnehmbar, im erweiterten Sektor ±70° wird es dann zwar leiser, aber in etwa bei gleicher Klangqualität. Erst wenn man mehrere Meter neben oder hinter der Box steht, fehlen logischerweise die brillanten Höhen und die Lautstärke lässt nach.

Das Bedienkonzept mit einem großen Lautstärkeregler an der Oberseite überzeugt und ist praktikabel. Mit den beiden rückwärtigen Höhen- und Surroundreglern kann man die Box individuell nach Geschmack gut abstimmen. Die beiden Fernbedienungen braucht man kaum.

Insgesamt ist das Ergebnis eine sehr gute Party-Box, deren Klang auch verwöhnte Ohren überzeugt.

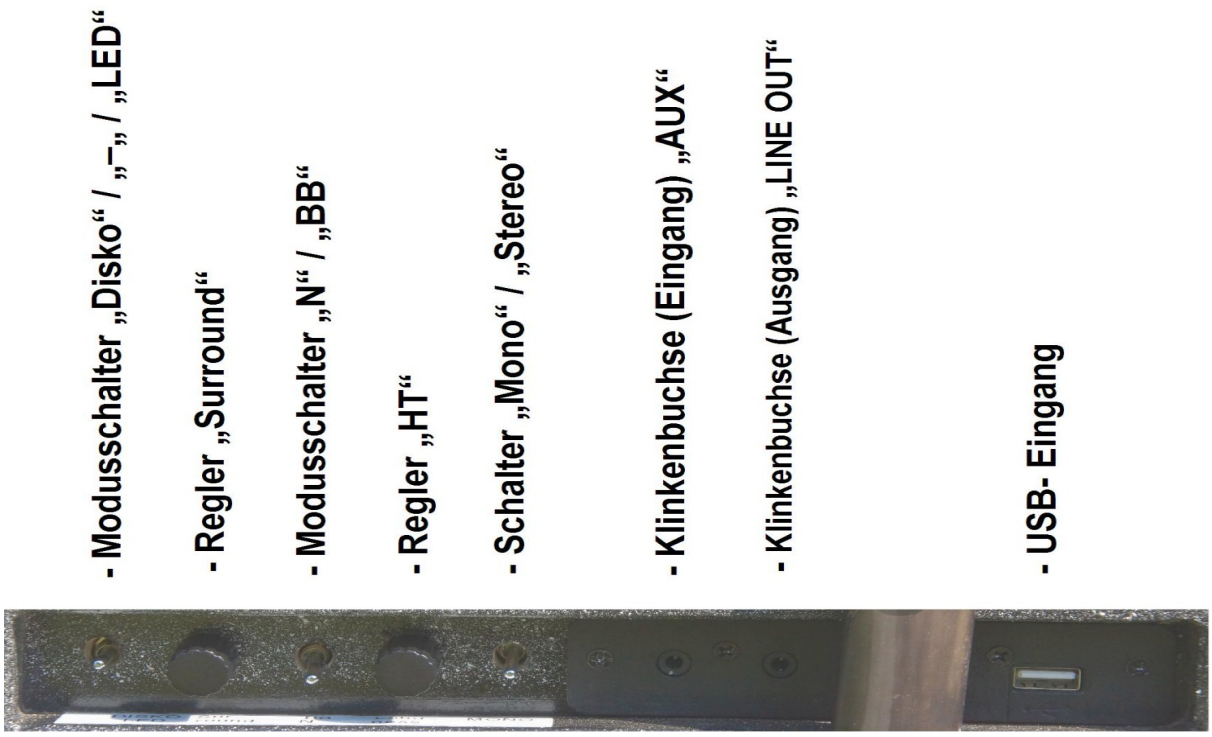
Ergänzung 2021: Eine zusätzliche durchsichtige Schutzhülle für die Box erlaubt auch den Betrieb der Box bei kurzen Regengüssen im Garten.

4.6. Technische Daten – Zusammenfassung –

Was?		*Bemerkungen*
Bedien- und Wiedergabeeinheit	AUNA Connect 120	Zusätzlicher externer Antenneneingang
Klangbeeinflussung	ADAU1701-BOARD	Nachträgliche Programmiermöglichkeit über RJ-45 Buchse
Wiedergabemodi	- Bluetooth - Internet-Radio (WLAN) - FM-Radio - DAB+ - USB-Stick (MP3) - DLNA Streaming - AUX	Der externe Eingang (AUX) ist latenzfrei. In fast jedem Bereich sind Presets speicherbar. Bei USB-Sticks können Unterordner abgespielt werden. Die Formate MP3, WAV, WMA, AAC und FLAC werden unterstützt. Bei Internetradio wird zusätzlich die Uhrzeit angezeigt. Nach Einschalten wird automatisch der letzte Wiedergabemodus eingestellt.
Zusätzliche Bedienelemente an der Box (Rückseite)	- Umschalter Mono-Stereo - Hochtonabsenkung - Umschalter N-BB - Surroundregler - Wahlschalter Boxmodus	N: Neutral; BB: Bassboost Boxmodi: Disko / – / LED Eine automatische physiologische Lautstärkebeeinflussung ist immer „ein“.
Terminal an der Box (rechte Seite)	- Ein/Ausschalter Box - 3x Akku-Schutzsicherung - Hohlbuchse Netzteil - Signalisation (rt) Netzteil/Solarladung - Signalisation des Ladezustands (rt/gn) - Akkuspannungsanzeige mit Bargraf (rt/gn) - 12 V Ladebuchse (E/A) - 2x Messbuchsen Strom-Shunt	Die 12 V Ladebuchse erlaubt kurzschlussfest sowohl das Laden der internen Akkus von externen Quellen (Pkw), als auch den Anschluss von Zusatzgeräten (z. B. Kfz-USB-Ladegeräte für Smatphones). Per Strom-Shunt kann die aktuelle Leistung der Box gemessen werden.
Chassisbestückung	2x Visaton CP13 (Surround) 2x AUNA 6W (Surround) 1x Visaton W250S (Bass) 2x Monacor DT-254 (HT) **oder** 2x Visaton KE25SC	Theoretische maximale akustische Leistung ca. 400 W (RMS)
Akustische Parameter	**Modus “–“ bzw. LED / Disko**	
Leistung Bass & Surround	Jeweils max. 35 W / 80 W (RMS)	
Leistung HT links & HT rechts	Jeweils max. 25 W / 65 W (RMS)	
Ausgangsleistung Box	Maximal 280 W (Impuls)	Theoretischer Wert, in der Praxis von Einstellungen und Musik abhängig
Frequenzgang (± 3 dB) ohne HT-Interferenzen	35 … 14000 Hz (DT-254) 35 … 22000 Hz (KE25SC)	Modus „Normal“, LS=12, HT Max, kein Surround
Frequenzgang (± 3 dB) ohne HT-Interferenzen	58 … 14000 Hz (DT-254) 58 … 22000 Hz (KE25SC)	Modi „Bassboost“ und „Disko“, LS=18, HT Max, kein Surround

Was?		***Bemerkungen***
Nicht lineare Verzerrungen im Bereich 100 … 5000 Hz	< 2 % (bei < 95 dB in 1 m) < 5 % (bei < 105 dB in 1 m)	KE25SC sind im Vergleich zu DT-254 deutlich „klarer“
Min. Schalldruckpegel, Lautstärke „0“ (LS0)	<30 dB (1 m, unbewertet)	Nur gleichmäßiges Rauschen in Entfernung bis ca. 1 m hörbar
Max. Schalldruckpegel (LS20)	ca. 115 dB (1 m, unbewertet)	DISKO-Modus, nicht lineare Verzerrungen >>10 %
Praktisch nutzbarer Dynamikbereich	ca. 75 dB (30 dB … 105 dB)	
Maximale Gruppenlaufzeit	< 25 ms (f < 80 Hz) < 7 ms (f > 80 Hz)	
Akkukapazität	324 Wh (12 V / 27 Ah)	3x KungLong WP1236 (Blei-Vlies)
Externes Ladegerät/Netzteil	+18 … +30 V / ≥ 50 W	Optimal: Laptopladegerät 19 V / ≥ 3 A
Akku-Ladezeit	> 10 %/h, max. 10h	Ladezustand wird signalisiert
Solarpaneele	Max. 2 x 20 W (18V)	Automatische Ladung der internen Akkus
LED-Lauflicht	Länge 2 m, Funk-Fernbedienung	Musik gesteuert, 1500 Modi, vollautomatischer Wechsel einstellbar
Startzeit Box	15 s (Modus AUX) 25 … 35 s (Internetradio)	Vom Einschalten Hauptschalter, bis Modus aktiv
maximale Laufzeit Box	**Leistung / max. Laufzeit**	**Akkus voll, [1)]Durchschnittsdauerleistung**
Modus „-“	10,5 W / > 24h	Box ein, Lautstärke „0“
Modus „-“	20,0 W / ca. 16h	Box ein, Zimmer-Lautstärke (8 W RMS[1)])
Modus „-“	30,0 W / ca. 11h	Box ein, Lautstärke laut (17 W RMS[1)])
Modus „LED“	15,0 W / ca. 22h	Box ein, Lautstärke minimal
Modus „Disko“	24,7 W / ca. 13h	Box ein, Lautstärke minimal
Modus „Disko“	53,0 W / ca. 6h	Box ein, Lautstärke laut (25 W RMS[1)])
Modus „Disko“	170 W / ca. 2h	Box ein, Lautstärke Max (130 W RMS[1)])
Elektrische Schutzklasse	III (Sicherheitskleinspannung)	Höchste interne Gleichspannung: 39 V Höchste interne Wechselspannung: 35 V
Bauweise Gehäuse	Sperrholz, geleimt und geschraubt 18 mm	Vorderfront: 30 mm, Sub-Trichter: Epoxidharz. AUNA und LP-Chassis nicht spritzwassergeschützt.
Transport	2 seitliche Griffe, zusätzlicher Trolleygriff	An der Unterseite befinden sich 2 Räder. Transport in beliebiger Laage.
Abmaße (B/T/H)	68 / 38 / 102 [cm]	Mit Trolleygriff
	68 / 38 / 87 [cm]	Ohne Trolleygriff
Gewicht	52,1 kg	Davon 8,1 kg Akkugewicht (≈15 %)

Bedienelemente an der Rückseite der Aktiv-Box:



Box-Einstellungen – Empfehlungen –

	Modusschalter „N“ / „BB“	*Modusschalter „Disco“ / „–“ / „LED“*	*HT-Regler*	*Surround-Regler*
Innenräume[1)], kleine bis mittlere Lautstärken (LS1-LS14)	„N“	„-“ oder „LED“	80 %	20 %
Innenräume[1)], Außenbereich, Gartenpartys, mittlere bis große Lautstärken (LS12-LS20)	„BB“	„Disco“	80 %	20 %
Zur Hintergrundbeschallung im Innen- und Außenbereich	„N“	„-“ oder „LED“	40 %	10 %

[1)] Räume <100 m³

Fernbedienungen für Lauflicht und AUNA

Ladezustand Akkus

AKKU	**BOX/AUTO**
Laden ...	**> 13 V**
voll	**12,7 V**
75 %	**12,5 V**
50 %	**12,2 V**
25 %	**11,7 V**
leer	**< 11 V**

5. Anlagen

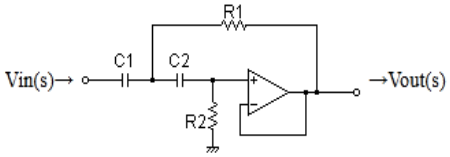
5.1. Subsonic/Sallen-Key Filter im SigmaStudio

Die Kaskadierung von 2 Butterworth Filtern ergibt das Linkwitz-Riley Filter. Es wird für einen linearen Übergang bei einem Crossover-Filter benutzt. Im einfachsten Fall wäre das 2. Ordnung mit 40dB/Dekade. Aufbau analog mit OPVs als Sallen-Key mit Q=0,5. Bei 4. Ordnung (80dB/Dekade) nimmt man zwei Sallen-Key in Reihe mit je Q=0,71 (Gesamt Q=0,71 * 0,71 = 0,5).

Für diesen Anwendungsfall gibt es im SigmaStudio die Crossover-Filtermodule. Allerdings unterstützt das SigmaStudio direkt keinen Linkwitz-Riley/Sallen-Key Filter mit einstellbarer Güte, der gern bei Basslautsprechern inklusive Subsonic eingesetzt wird.

Für die Berechnung eines konkreten Subsonic/Sallen-Key Filters wurden lt. http://sim.okawa-denshi.jp/en/OPstool.php folgende Parameter ermittelt:

Sallen-Key High-pass Filter



Transfer Function:

$$G(s)=\frac{s^2}{s^2+166.66666666667s+64102.564102564}$$

Cut-off frequency

fc = 40.295619083781[Hz]

Quality factor

Q = 1.5191090506255

Damping ratio

ζ = 0.32914029430219

Pole(s)

p = -13.262911924325 +38.050388757972i[Hz]
|*p*|= 40.295619083781[Hz]
p = -13.262911924325-38.050388757972i[Hz]
|*p*|= 40.295619083781[Hz]

R1=13k Ω C1=100n F
R2=120k Ω C2=100n F
p:pico, n:nano, u:micro, k:kilo, M:mega

Frequency analysis

☑ Bode diagram
◉ Phase ○ Group delay
☑ Nyquist diagram
☑ Pole, zero
☑ Phase margin
☑ Oscillation analysis
Analysis on frequency range:
f1=10 ~f2=1000 [Hz] (optional)

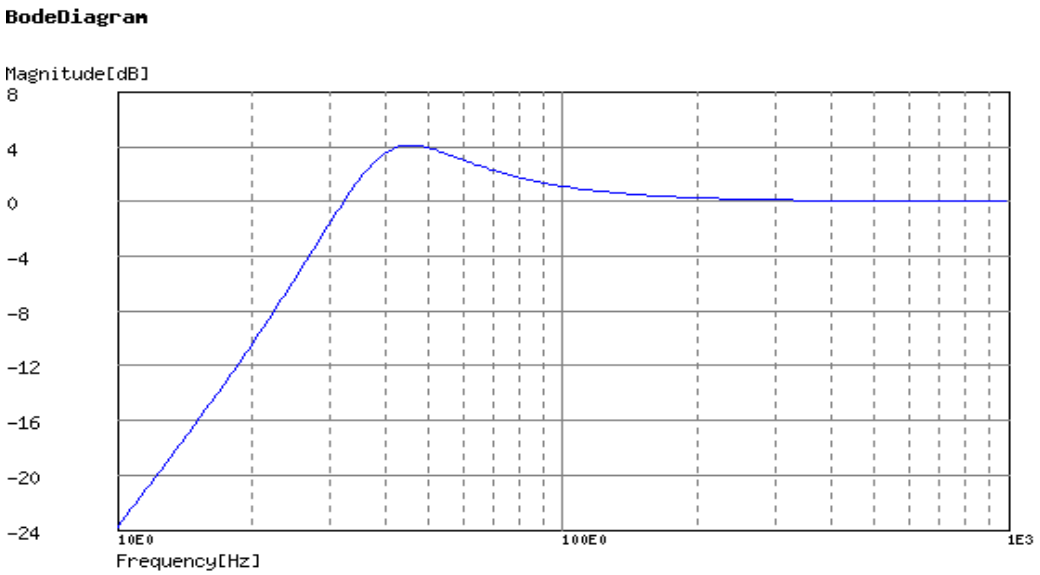
Transient analysis

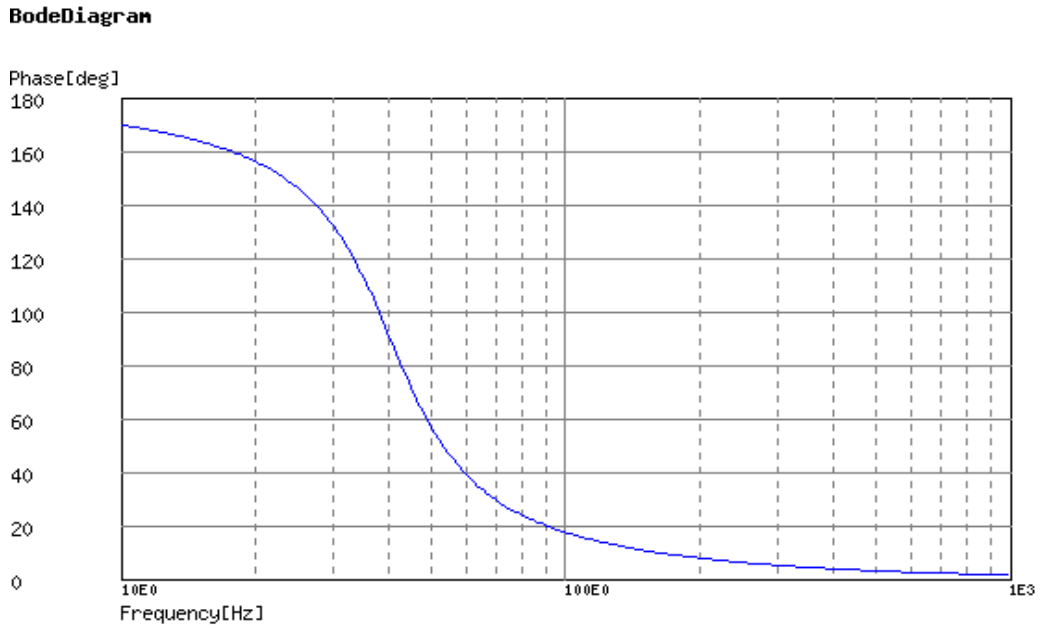
☑ Step response
☐ Impulse response
☑ Overshoot
☑ Final value of the step response
Analysis on time range:
0~ [sec] (optional)

Calculate

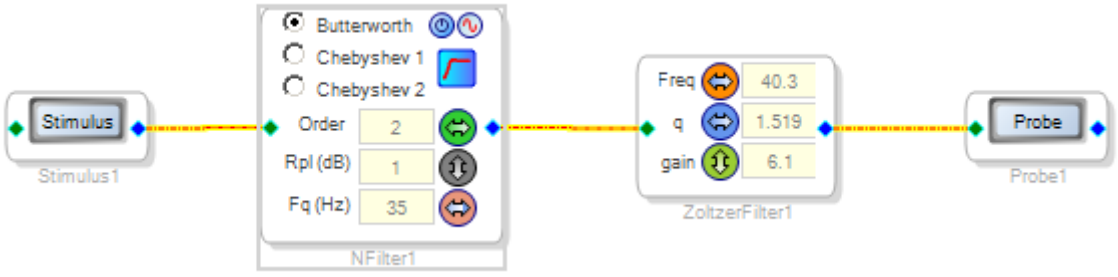
Für die Güte von 1,52 ergibt sich bei 45Hz eine Überhöhung von ca. 4,1dB.

… mit den entsprechenden Kurven im Bodediagramm:

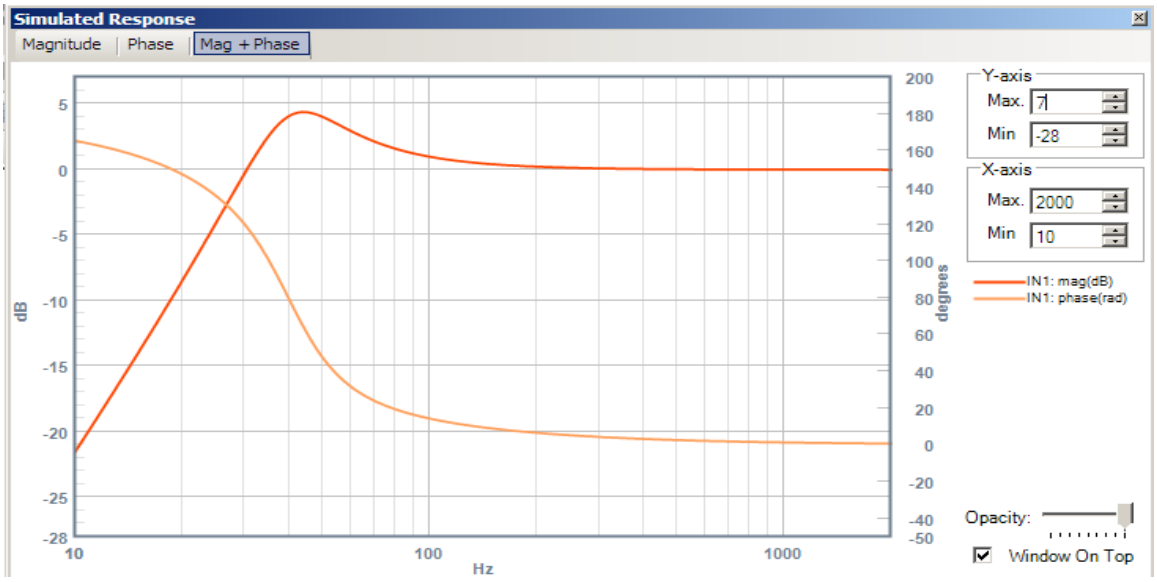




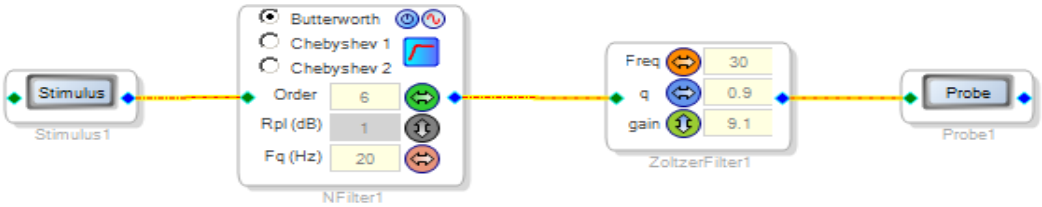
Will man das gleiche im SigmaStudio umsetzen, so erscheint die Kombination von einem Butterworth-Filter 2. Ordnung (Hochpass) mit einem ZoltzerFilter mit einstellbarer Güte am ähnlichsten. Dazu wird am Butterworth f*0,87 und am ZoltzerFilter g=6,1 eingestellt.

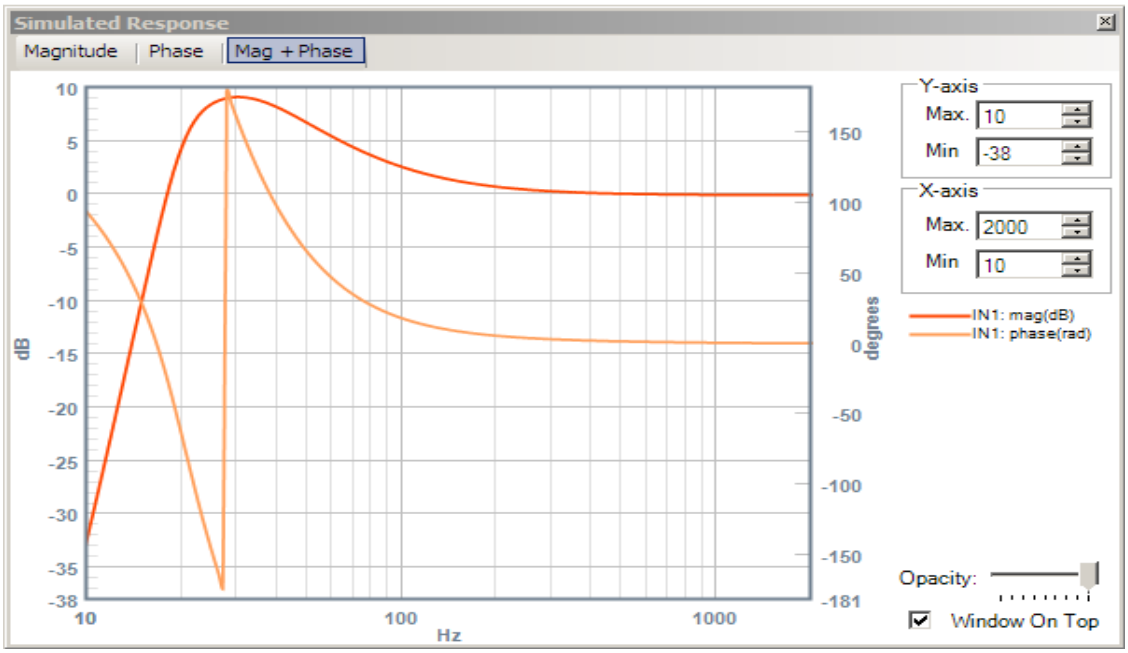


Hier der entsprechenden Frequenz- und Phasengang:



Der Phasenanstieg zu tieferen Frequenzen hin verläuft aber etwas günstiger (bei 40Hz nur 80° gegenüber 90° beim Sallen-Key). Nun kann man im SigmaStudio auch einfach die Verstärkung der beiden Filter bei 40Hz auf 9dB verdoppeln und zugleich den Subsonic steiler machen, ohne den Phasengang oberhalb der Resonanzfrequenz wesentlich zu verschlechtern:





Der Butterworth ist nun in 6. Ordnung. Allerdings müssen die Frequenzen angepasst werden. Diese Variante ist der analogen OPV-Technik weit überlegen – dort hätte man zwei identische Sallen-Key in Reihe geschaltet. Das hätte zwar auch eine Überhöhung von 9dB und einen steilen Subsonic ergeben, aber auf Kosten eines wesentlich ungünstigeren Phasenverlaufs. Zudem lässt sich das Ganze viel eleganter an das konkrete Lautsprechergehäuse anpassen.

5.2. Allgemeines zu aktiven Filtern (aus [1])

Bessel (Q=0.58) has maximally flat delay. However you can't quite get a completely flat amplitude response. This is my favourite type.
Linkwitz-Riley (Q=0.49: critically damped) will have the best impulse response, if you like that sort of thing.
Butterworth (Q=0.71) is popular because it has the steepest slope you can get while retaining a flat amplitude response.

- A first order filter is described by a f0 only. f0 is the frequency at which the asymtotes for very low and very high frequencies cross.

- A second order filter is described by A f0 and a Q. The definition of f0 is the same as for the first order filter. The definition of Q can be the amplitude at f0. Other definitions exist, but they give the same numerical value for a given filter.

- A third order filter is a first and a second order filter in series. This filter has two f0:s and one Q. This Q is not the amplitude at either f0, but the Q of the 2nd order section.

- A fourth order filter is two 2nd order filters in series. This filter has two f0:s and two Q:s. Neither Q is the amplitude at either f0, but the Q of the 2nd order sections.

- etc, etc...

The bottom line here is that many filters (almost all crossover filters) can be decomposed into a cascade of 1st and 2nd order filters. Each of these sections have a f0, and each 2nd order section also has a Q value. Trying to describe filters of orders >2 with a single Q value is doomed to fail, and will only add confusion. In the light of this:
All first order filters of a given f0 have identical transfer functions.
Filters of any order >1 are commonly described by a f0 (which may be different from those of the subsections) and a "family name", eg butterworth, bessel etc. The f0 can be defined in different ways, two common ways are by the -3 dB point, or the frequency at which the high and low frequency asymptotes cross. If the filter does not fit a well defined family, it is preferrably described by the f0:s and Q:s of all the subsections. Again, a single Q value will not tell the whole story except for the 2nd order filter.

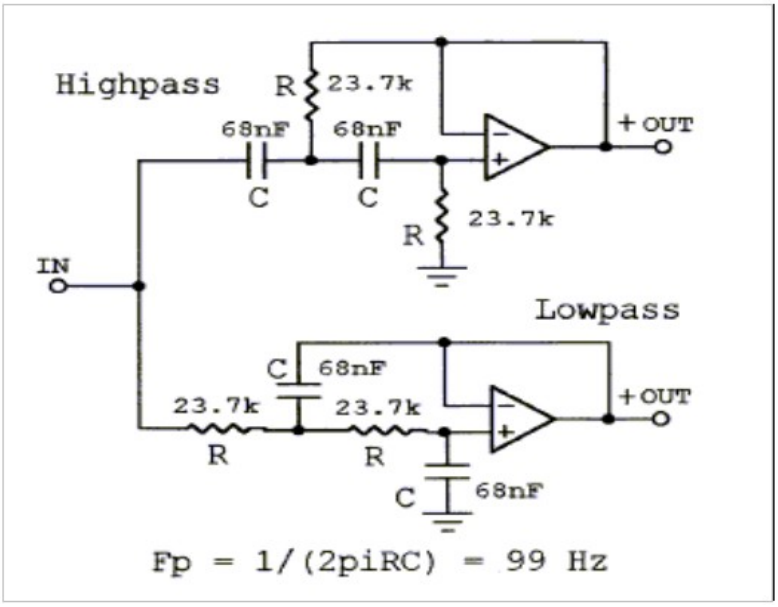
Butterworth filters have sections with identical f0:s, but different Q:s. These filters are 3 dB down at the asymtotic f0.
Linkwitz-Riley filters are two cascaded butterworth filters and are therefore always of even order. These filters are 6 dB down at the asymtotic f0.
Bessel filters filters have cascaded sections with different F0:s and Q:s. These filters are typically more than 3 dB down at the asymtotic f0.
Tjebychev filters have cascaded sections with different F0:s and Q:s. These filters are designed to have a "ripple" of x dB in the pass band, and the f0 is usually defined as when the response goes below x dB. This f0 is lower than the asymtotic f0.
For crossover filters, Butterworth filters produce a flat sum if and only if the filter is odd order, Linkwitz-Riley filters produce a flat sum for even orders.
Bessel and Tjebychev filters do not produce a flat sum, so they are not principally interesting for crossover filters.

PS. When I speak of cascaded filter sections, I think of active filter sections, where there are no interaction effects between from loading the previous section.

There is only one kind of first order filter for a given -3dB frequency. You may call it Butterworth, Chebychev or Bessel but not Linkwitz-Riley. The only thing you can change is the cutoff frequency.
BTW, two cascaded 1st order filters with the same fc is a second order filter with Q=0.5. But please, stop thinking that Q is the amplitude at fc, it is not except for the 2nd order filter.

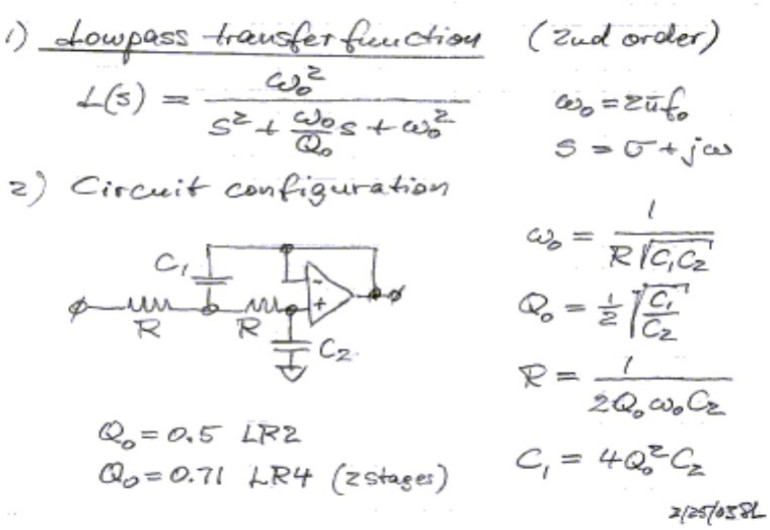
5.3. Praktische Filter (aus [2])

2 - 12 dB/oct Linkwitz-Riley crossover



The two outputs from the LR2 crossover filter are 180 degrees out of phase at all frequencies, which requires to use one of the drivers with reversed polarity, so that the two acoustic outputs add in phase. At the crossover frequency the filter outputs are 6 dB down.
The acoustic frequency and polar response is controlled by the electrical filters and the response of the mounted drivers. The electrical filter will not give the desired results, if there is insufficient overlap and flatness of the driver frequency response and when they are offset from each other. This can be corrected in many cases with the addition of a phase shift correcting network. I consider the crossover marginally useful, because the 12 dB/oct roll-off of the highpass filter below the crossover frequency does not reduce the excursions of a driver's cone when flat frequency response is obtained. My earlier assumption that the group delay of a 4th order LR4 crossover at low frequencies would introduce audible distortion was not correct. Therefore I recommend not to use the LR2 crossover. (38xo_eq1.gif, FAQ19, xo12-24b.gif)

The LR2 circuit uses the Sallen-Key active filter topology to implement the 2nd order transfer function. The response is defined by w_0 and Q_0 which sets the location of a pole pair in the complex frequency s-plane and by an additional two zeros at s = 0 for the highpass filter. In the case of the LR2 filters $Q_0 = 0.5$, and $Q_0 = 0.71$ for each of the two cascaded 2nd order filters that form the LR4 filter. The frequency response is obtained by setting s = jw and solving the transfer function for magnitude and phase. The formulas below can be used to design filters with different values for w_0 or Q_0, or to analyze a given circuit for its w_0 and Q_0 values.

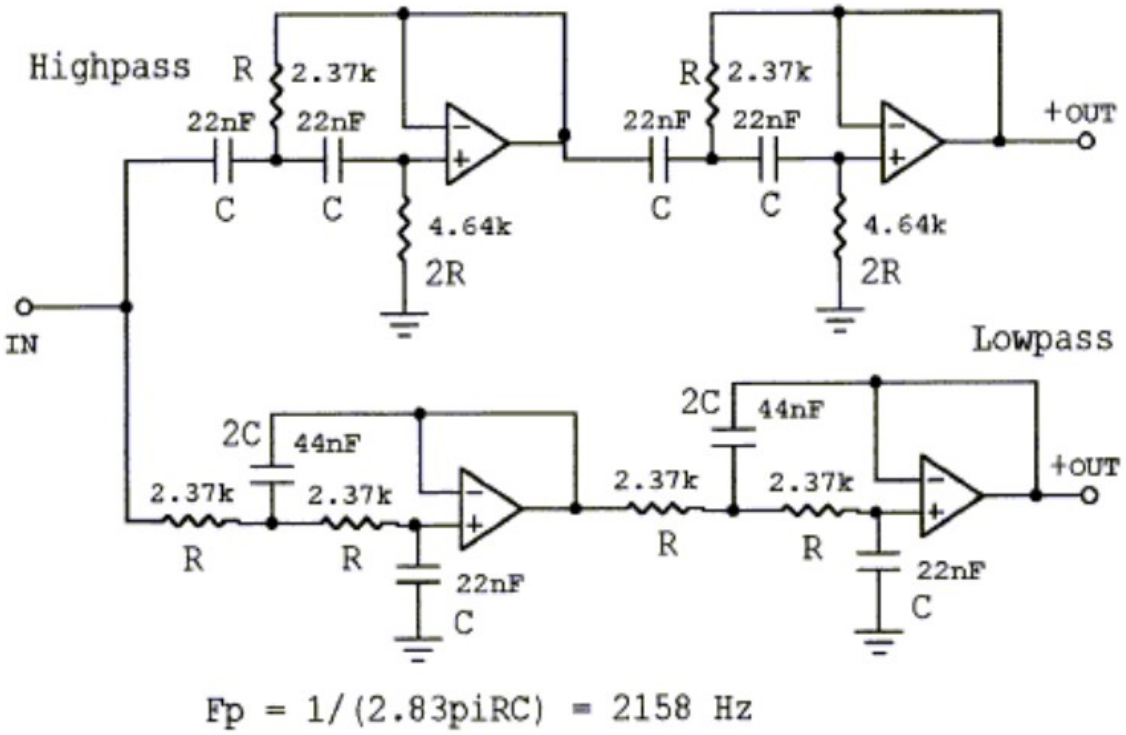


Any order Linkwitz-Riley filters can be implemented by a cascade of 2nd order Sallen-Key filters. The Q_0 values for each stage are listed in the table below. The component values of each stage for a given crossover frequency f_0 can be calculated by using Q_0 and selecting a convenient value for C_2 or R_2 in the formulas above.

	LR2	LR4	LR6	LR8	LR10
Q_0 of stage 1	0.5	0.71	0.5	0.54	0.5
Q_0 of stage 2		0.71	1.0	1.34	0.62
Q_0 of stage 3			1.0	0.54	1.62
Q_0 of stage 4				1.34	0.62
Q_0 of stage 5					1.62
dB/octave slope	12	24	36	48	60

Crossover filters of higher order than LR4 are probably not useful, because of an increasing peak in group delay around f_0.

3 - 24 dB/oct Linkwitz-Riley crossover



The 24 dB/oct LR4 crossover filter provides outputs which are 360 degrees offset in phase at all frequencies. At the transition frequency Fp the response is 6 dB down. The electrical network will only give the targeted exact acoustic filter response, if the drivers are flat and have wide overlap. This is seldom the case. The steep filter slopes make the combined acoustic response less sensitive to magnitude errors in the driver responses, but phase shift errors usually have to be corrected with an additional allpass network. (xo12-24b.gif, 38xo_eq1.gif, models.htm#E) Top

5.4. Pegel und Leistung

Aus Oszi-Messungen erhält man Spitze-Spitze Spannungen, was nützlich ist bei der Bestimmung von Aussteuerungsgrenzen von Verstärkern, vom TRU-RMS-Multimeter erhält man den Effektivwert und für den Pegelplan benötigt man den absoluten Pegel. Dabei gibt es folgende Umrechnungen/Konvertierungen:

Absoluter Spannung/Pegel: $U = 20 \cdot \log \frac{U_{eff}}{0{,}775} \ [dBu]$. Für Leistungen gilt: $P = \frac{U_{eff}^2}{R} \ [W]$.

Für rein sinusförmige Signale gilt:

$$U_{Sp-Sp} = 2\hat{u} = 2\sqrt{2}\,U_{eff} = 2{,}83 \cdot U_{eff} \ [V] \ , \text{ bzw. } U_{eff} = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{2}} \cdot U_{Sp-Sp} = 0{,}353 \cdot U_{Sp-Sp} \ [V]$$

Anmerkung: Ein TRU-RMS-Multimeter misst bei höheren Frequenzen zu niedrige Spannungen. Daher sind Messungen bei maximal 400Hz am aussagekräftigsten.

Folgende Tabellen sind zum Ausmessen von Verstärkern mit Sinus-Testsignalen hilfreich:

U_{Sp-Sp} [V]	U_{eff} [V]	U [dBu]
3,10	1,095	+3
2,19	0,775	0
1,55	0,548	-3
1,00	0,353	-6,8
0,42	0,15	-14,3
0,22	0,0775	-20
0,10	0,0353	-29
0,01	0,00353	-47

U_{Sp-Sp} [V]	U_{eff} [V]	U [dBu]	P_{4Ohm} [W]	P_{8Ohm} [W]
7,9	2,8	11,1	2	1
12,7	4,5	15,3	5	2,5
17,8	6,3	18,2	10	5
25,2	8,9	21,2	20	10
43,8	15,5	26	60	30
56,6	20	28	100	50
69,3	24,5	30	150	75
80,0	28,3	31,2	200	100

5.5. Technische Daten Auna Connect 120 (selbst gemessen)

Ausgangspegel (MP3 normalisiert):

- Line Out (lautstärkeunabhängig) – max. +12 dBu, MP3 per USB: +0,9 dBu
- KH Out (Lautstärke LS20) – max. -1,4 dBu, MP3 per USB: -3,4 dBu
  - LS10 – MP3 per USB: -19 dBu
  - LS5 – MP3 per USB: -34 dBu
  - LS2 – MP3 per USB: -50 dBu
  - LS1 – MP3 per USB: -55 dBu

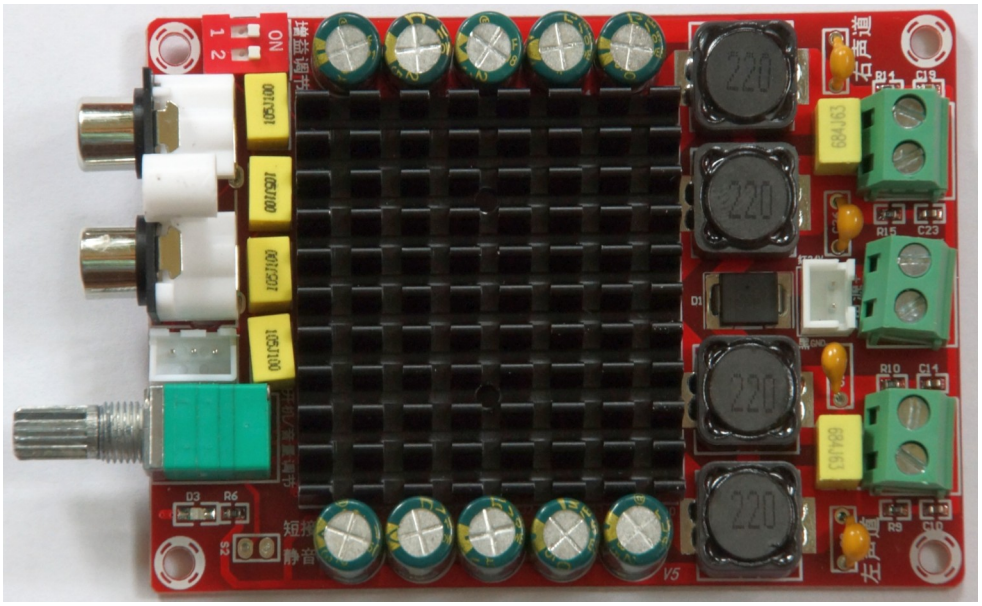
Die Pegel von DAB, FM liegen etwa 1,5 dBu unter dem von normalisierten (-1 dBu) MP3.
Letztlich beträgt der maximal nutzbare LS20 Ausgangspegel an der Kopfhörerbuchse etwa -5 dBu.

Latenz: AUX IN → KH OUT – 12 µs

AUX IN → LINE OUT – 10 µs

Stromaufnahme: – 5,0W an 12V (LS0)

5.6. Technische Daten Board TDA7498 (nachgemessen)



1. Verstärkung

Jumper 1	Jumper 2	Verstärkung
off	off	+25,9 dB
on	off	+31,8 dB
on	on	+37,9 dB
off	on	+35,3 dB

Die ermittelten Verstärkungen decken sich natürlich mit dem Datenblatt von STMicroelectronics [5], die Angaben des chinesischen Lieferanten waren falsch.

Für die 6 dB – Umschaltung wird JP1 genutzt (JP2 ist dabei off)

JP1=off / on → 25,9 / 31,8 dB (Delta=5,9 dB)

2. Ruhestromaufnahme

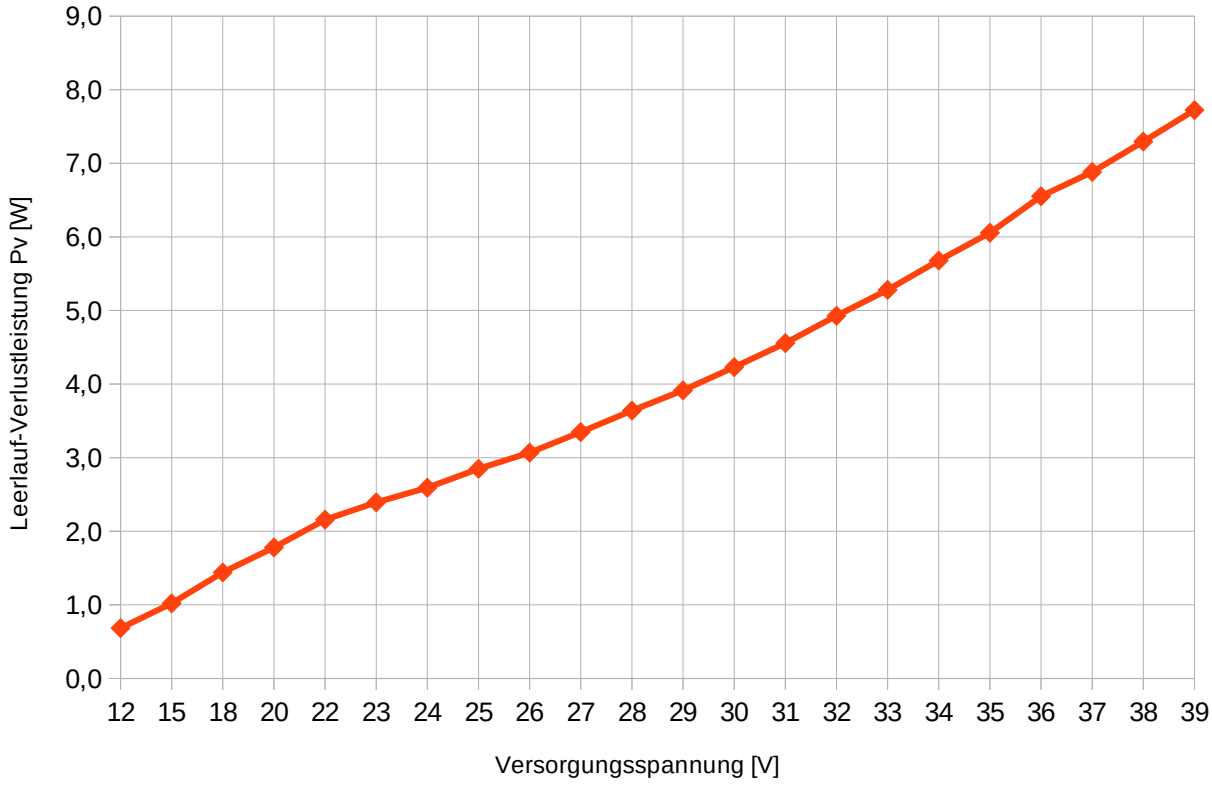
Ohne Eingangssignal, bzw. ohne Last muss auch ein D-Verstärker bereits thermische Leistung am Kühlblech bzw. an den 4 Spulen am Ausgang abgeben:

Versorgungsspannung U [V]	12	20	25	30	35
Ruhestromaufnahme I_0 [mA][1)]	43/53/56	46/80/88	56/102/115	65/124/140	78/150/173
Thermische Leistung P = U * I_0 [W]	0,5-0,7	0,9-1,8	1,4-2,9	1,9-4,2	2,73-6,0
Max. Ausgangsleistung an 8 Ohm [W] lt. Datenblatt	14	33	50	65	82

1) gemessen an 3 Exemplaren (rotes Board XH-M510)

Die Streuung der Ruhestromaufnahme ist bemerkenswert groß. Anschließend wurde an dem Exemplar mit der größten Stromaufnahme exemplarisch die Kennlinie für die Leerlauf-Verlustleistung aufgenommen (ohne Eingangssignal; JP1,2 off; an jedem Ausgang 10 Ohm als Lastwiderstand; kein zusätzlicher Tiefpass am Ausgang). Der Strombedarf bei 39V betrug dabei übrigens ganze 182 mA! Die thermische Leerlauf-Verlustleisung (Grafik nächste Seite) reicht dabei von 1 W bei 12 V bis zu knapp 8 W bei 39 V. Das ist bei

der Anwendung bei hohen Spannungen zu berücksichtigen und drückt natürlich die Effizienz bei akkubetriebenen Geräten.



Als Kompromiss kann die Versorgungsspannung in Abhängigkeit der gewünschten maximalen Leistung auch umgeschaltet oder abgeregelt werden.

3. Besonderheiten

Neben Jumper 1&2 kann man einen Mute-Schalter per S2 anschließen.

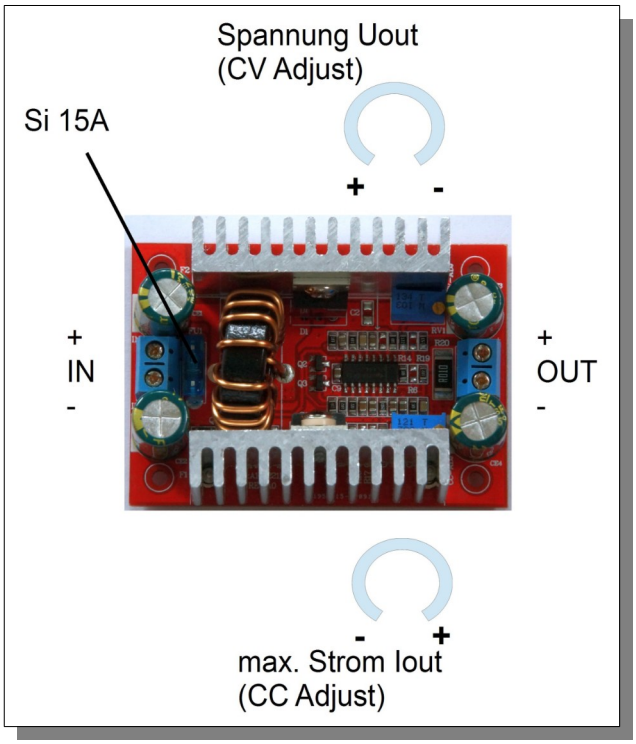
C20, C26 müssen lt. [5] bei 8 Ohm-Last eigentlich mit 470nF bestückt werden, aber selbst die für 6 Ohm angegebenen 680nF funktionieren bei 8 Ohm ebenso problemlos. Allerdings sind an den beiden Ausgängen noch hohe Anteile der Schaltfrequenz (ca. 330 kHz) nachweisbar. Ein zusätzlicher Tiefpass am Ausgang (z. B. 47µH/330nF) filtert sie heraus.

5.7. Technische Daten Step-Up-Wandler & Einstellung

Step-Up-Wandler „400W 15A DC-DC Power Converter Boost Module Step-up“

Ue = 8,5-50V; Ua = 10-60V; Ie_{max} = 15A (Eingangssicherung); Ia_{max} = 12A (lt. Datenblatt)

Ua und Ia_{max} sind einstellbar: Für das Projekt werden 35V am Ausgang benötigt, während am Eingang 9–14 V



bereitstehen. Somit ergibt sich eine maximale Leistung, wo die 15 A Eingangssicherung noch nicht auslöst:

Pmax = 9V * 15A = 135W, bzw. 3,86 A bei 35 V. Das bedeutet, erstens jeder TDA7498 benötigt auch seinen eigenen Wandler und zweitens die maximale Leistung für den Verstärker ist auf ca. 135W (Dauerleistung) begrenzt.

Im Wandler sind leider die beiden Klemmen -IN und -OUT nicht direkt miteinander verbunden. Dazwischen befindet sich ein 10 mOhm Widerstand für die Strommessung. In der Praxis ist erhöht sich dann das Potenzial bei Nennleistung (135W) an -OUT um 40 mV inklusive Störsignalen. Somit ist eine Ansteuerung der TDA7498 UND gleichzeitigem Leistungsbezug durch den Step-Up-Wandler mit gemeinsamer Masse ausgeschlossen. Es gibt aber eine Lösung – über die differentiellen Eingänge am Verstärker.

Bei Impulslasten am Ausgang des Step-Up-Wandlers muss mit Kondensatoren (low ESR) gepuffert werden, da die Regelung etwas Zeit benötigt, um die 35V wiederherzustellen.

Für einen Lastsprung von 0 → 61W und Kondensatoren vom LXZ-Typ ergaben sich folgende Werte:

Kondensator am Ausgang [mF]	0	3,9 mF	7,8 mF	11,7 mF
Spannungseinbruch [V]	-17V	-7V	-4V	-2,5V
Zeitdauer U<32V	30 ms	26 ms	12 ms	0 ms

Zur Pufferung eines 60W Lastsprungs sollten am Ausgang also Kondensatoren > 8 mF eingesetzt werden. Müssen die gesamten möglichen 135W gepuffert werden, so ist die zwei- dreifache Kapazität nötig (z. B. 2x BSN22.000/40 REICHELT).

Ruhestromaufnahme des Moduls (Ue = 12V, Ua = 23V/39V): ca. 12/38 mA (ca. 0,14/0,46 W)

Achtung beim Einbau: Die beiden Kühlbleche sind jeweils mit -OUT bzw. +OUT verbunden, Kurzschlussgefahr!

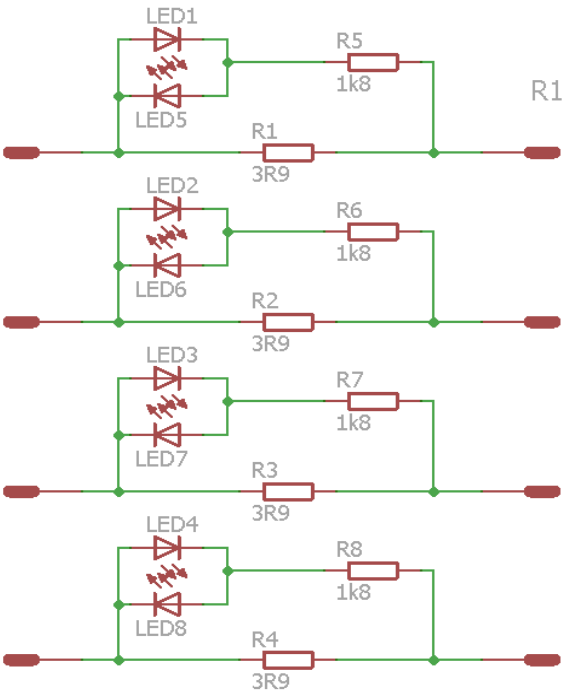
Einstellung des Moduls

Es muss der maximale Ausgangsstrom eingestellt werden, damit später bei den vielen Kondensatoren nicht die 15A-Sicherung auslöst (Das passiert sonst tatsächlich!!!). Grob einstellen lässt sich das mithilfe eines 12 V Akkus und einer H4-KFz Lampe, bei der beide Wicklungen in Reihe geschaltet werden → ca. 4,5 Ohm. Bei einer Eingangsspannung von etwa 12V stellt man den Wandler mittels CV-Adjust zunächst ohne Last auf eine ungefähre Ausgangsspannung von 22 V und CC-Adjust auf Linksanschlag ein. Dann die H4-Lampe am Ausgang des Wandlers anschließen. Die Ausgangsspannung sollte nun stark einbrechen. Nun kann man den maximalen Strom mittels CC-Adjust auf 4,2 A hochregeln. Die Ausgangsspannung wird dann etwa bei 19,3 V liegen. Abschließend wird die Last entfernt und die Ausgangsspannung des Moduls auf 35V eingestellt. Eine bessere Einstellung der Strombegrenzung erreicht man bei 35 V mit einem Leistungswiderstand (Lautsprecherlast) wie in Anlage 5.8. beschrieben. Dabei entsprechen die vorher grob eingestellten 4,2 A bereits einer Begrenzung auf 3,9 A bei besagten 35V. Mittels ohmscher Last von 7,8 Ohm stellt sich dabei eine Spannung von 30,4 V ein (30,4 V = 7,8 Ohm * 3,9 A). Letztlich kann der Wandler dann bei 35 V 3,9 A bzw. 136,5 W liefern.

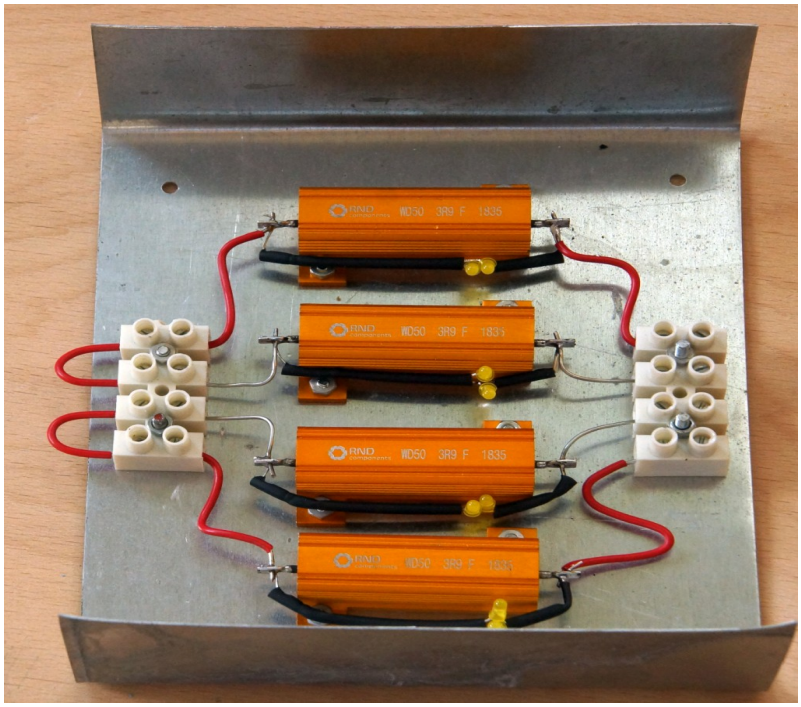
R CV-ADJ	5,0k	4,57k	3,00k	1,59k	1,24k	1,00k
Ua	17,3V	18V	23V	32V	36V	39V

5.8. Ohmsche Last als Chassis-Imitation

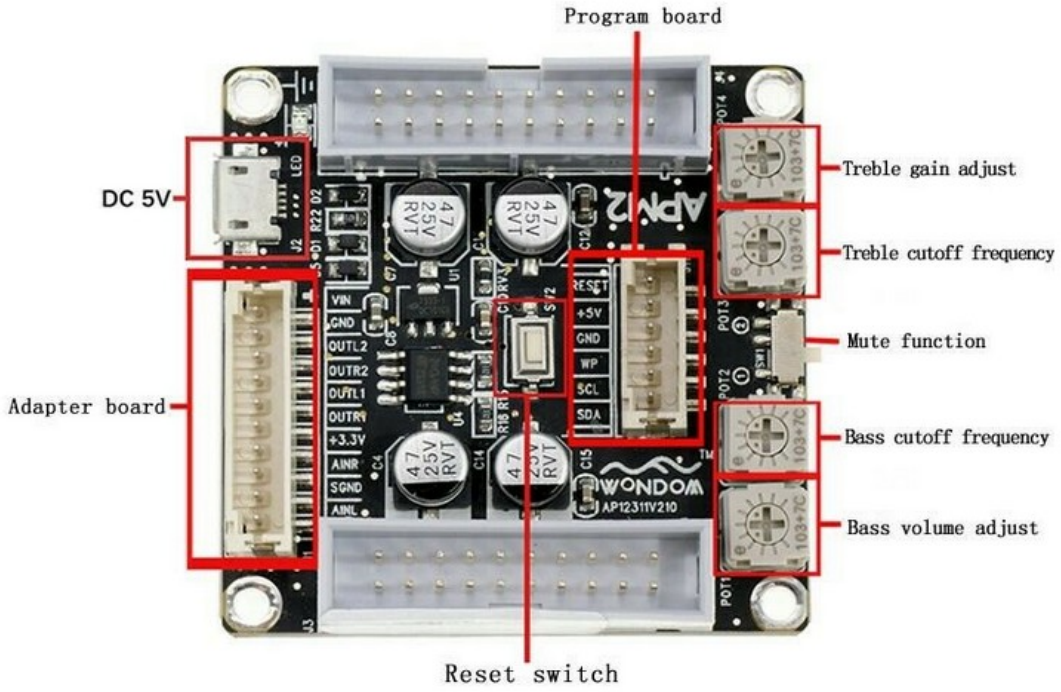
Für Entwicklung und Test von Lautsprecherboxen/Verstärkern lohnt sich ein Hilfsmodul, mit dem man anstelle von Lautsprecher-Chasis ohmsche Widerstände einsetzen kann. Das Fehlen der induktiven Komponente ist für Leistungsmessungen nicht so wichtig. Die Ersatz-Widerstände müssen in erster Linie die geforderte Leistung thermisch umsetzen können. Sinnvoll sind vier 4-Ohm Widerstände, die per Lüsterklemmen-leiste je nach Anwendung zusammengeschaltet werden. Damit man die anliegende Spannung auch optisch sehen kann, sind LEDs parallelgeschaltet. Hier ein Eigenbau für 200W Nennleistung (kurzzeitig bis zu 600W):



R1-4: - RND 155-50-3R9F (REICHELT)
- 50W Widerstände auf Kühlblech



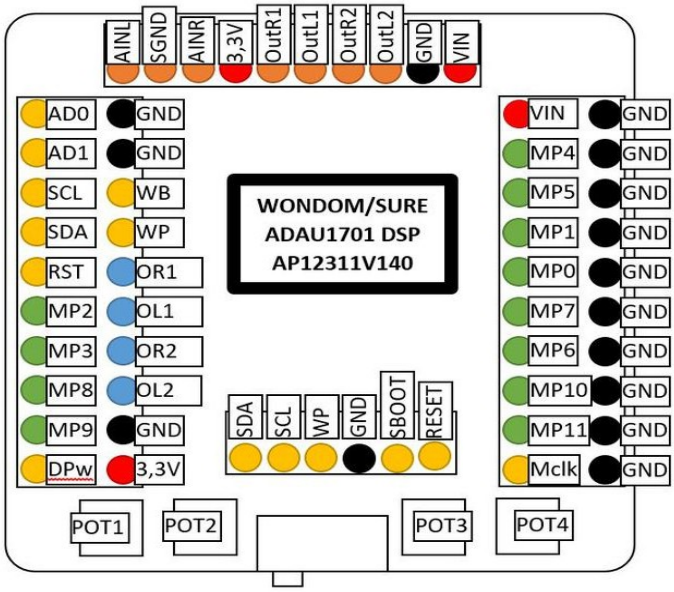
5.9. Anschluss und Programmierung ADAU1701 mit SURE Programmer



Board AP12311V210, Potifunktionen sind von Programm abhängig

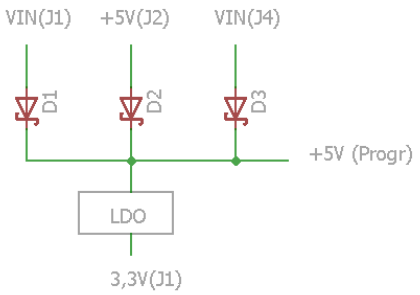
Anschluss Stromversorgung und Programmierleitungen an das ADAU1701 board

- GND
- +5V an VIN Hinweis: „SBOOT“ ist bei AP12311V212 auch VIN und ist beschriftet mit „+5V“
- Anschluss Programmer per 6pol. Stecker

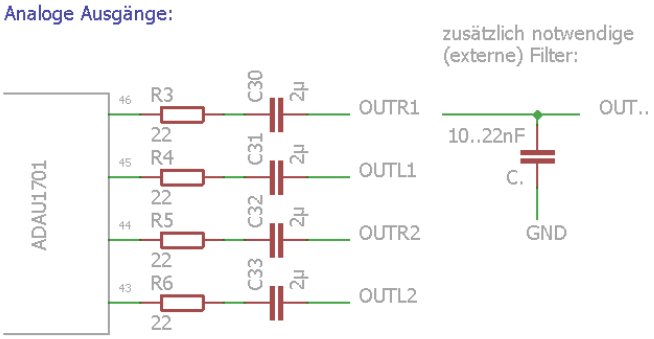


Details ADAU1701-Board Wondom (AP12311V212)

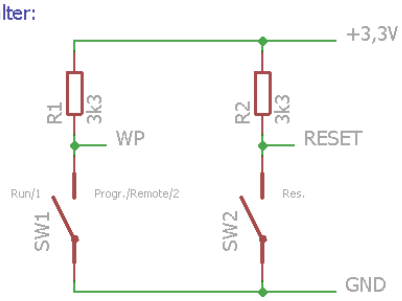
Stromversorgung:



Analoge Ausgänge:

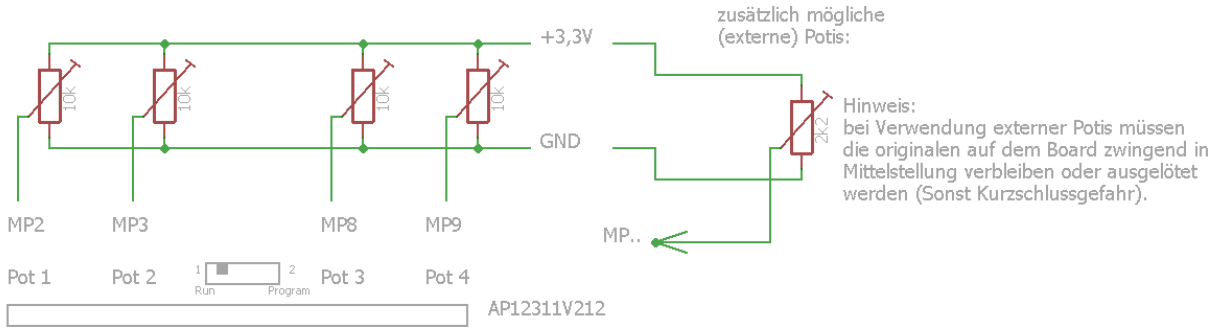


Schalter:



Masseführung:

Potis:



Technische Daten ADAU1701-Board

	Ueff [V]	U Sp-Sp [V]	Pegel [dBu]
Maximaler Eingangspegel (das Eingangssignal wird intern anschließend um 7,4dB abgesenkt)	2,0	5,7	+8,2
Maximales (unverzerrtes) Ausgangssignal	0,81	2,3	+0,4

Eingangsabsenkung: – -7,4 dB
Polarisierung: – Das Ausgangssignal (analoge Ausgänge) ist invertiert zum Eingangssignal!
Ausgangsimpedanz: – ca, 200 Ohm
Stromaufnahme: – ca. 105 mA (5V)

Inbetriebnahme (aus [7])

1) Board mit Spannung versorgen
2) Programmieradapter mit Rechner verbinden und darauf achten, dass er grün hinterlegt angezeigt wird
3) Programmieradapter mit dem Board verbinden
4) Resetknopf am Board drücken. Die Tonausgabe stoppt nun, falls es vorher eine gab.
5) Link Compile Download drücken.

Hochladen des Programms

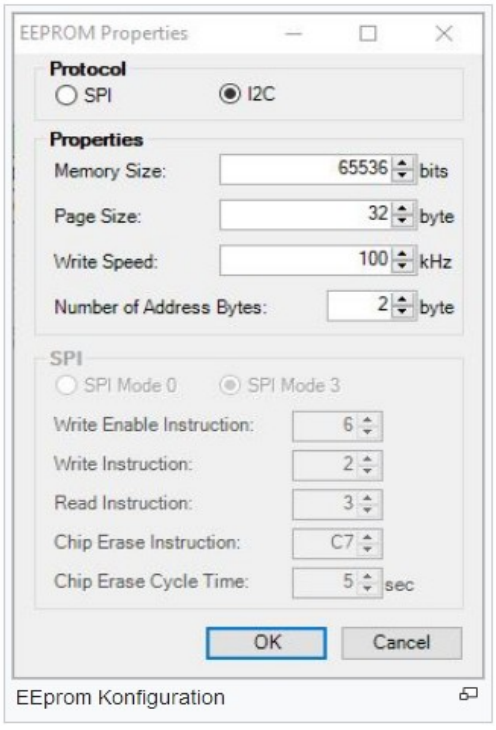
Wenn der grobe Aufbau des Programms erstellt ist, kann es auf den DSP geladen werden. Dafür gibt es zwei Arten. Beim temporären Hochladen wird eine Verbindung zwischen Computer und DSP erstellt und Änderungen an Parametern werden in Echtzeit auf das DSP übertragen. So kann z.B. der Einfluss der Trennfrequenz direkt ermittelt werden ohne jedes mal neu auf Hochladen drücken zu müssen. So kommt es auch zu keiner Unterbrechung in der Wiedergabe. Wenn allerdings Änderungen am Schematic gemacht werden, z.B. das Hinzufügen von einem neuen Block, oder das Hinzufügen eines neuen Filters im Equalizer, muss neu hochgeladen werden. Dann kommt es zu einer Unterbrechung von ca. einer Sekunde. Gemachte Einstellungen bleiben allerdings nur bis zu einem Neustart vom DSP erhalten. Um das DSP dauerhaft neu zu konfigurieren, muss der EEprom beschrieben werden. Bei beiden Arten hochzuladen muss bei dem Sure Programmer ICP1 der Schalter auf Stellung 1 "Program" stehen.

Temporäres Hochladen

Das Temporäre Hochladen funktioniert über den Button "Link Compile Download", zu finden in der oberen Leiste, das Symbol mit gelben Pfeil. Dazu müssen DSP und Programmer selbstverständlich verbunden sein. Wenn das reine DSP Board verwendet wird, muss der Schalter auf der linken Stellung stehen. Der Verbindungsaufbau sollte nur ca. eine Sekunde dauern. Falls die Verbindung fehlschlägt, wird unten rechts im Fenster "Compiled, Comms Failed" angezeigt. Beim ersten mal erscheint auch eine Fehlermeldung. Wenn das "USB" im Hardware Configuration Tab nicht grün hinterlegt ist, funktioniert die Verbindung zwischen Programmer und DSP nicht richtig. Ein Neustart von DSP und Programmer hilft meistens. Je nach DSP Board, Programmer und Computer kann der Aufbau sehr fehleranfällig sein. Hat die Verbindung geklappt, steht unten rechts "Active: Downloaded". Bricht die Verbindung nach einiger Zeit ab, wird keine Meldung ausgegeben.

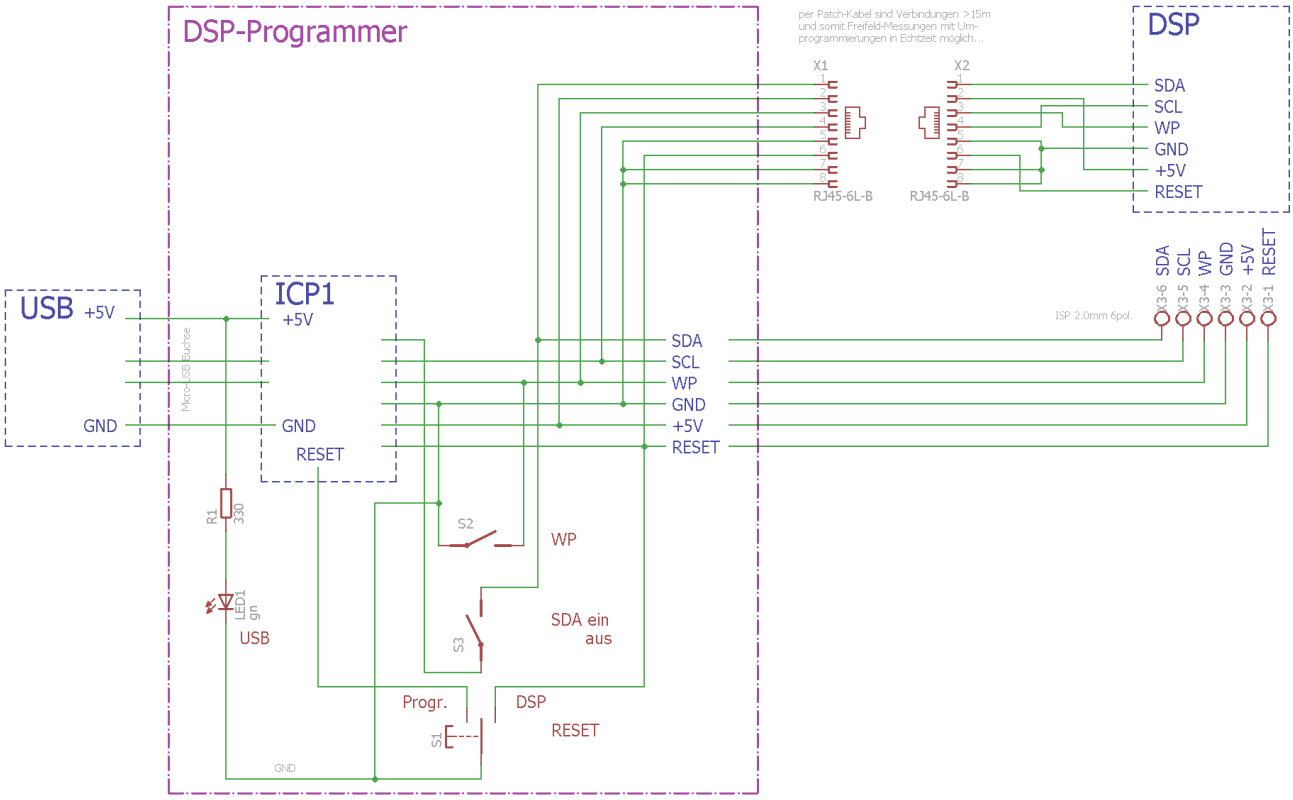
Dauerhaftes Hochladen

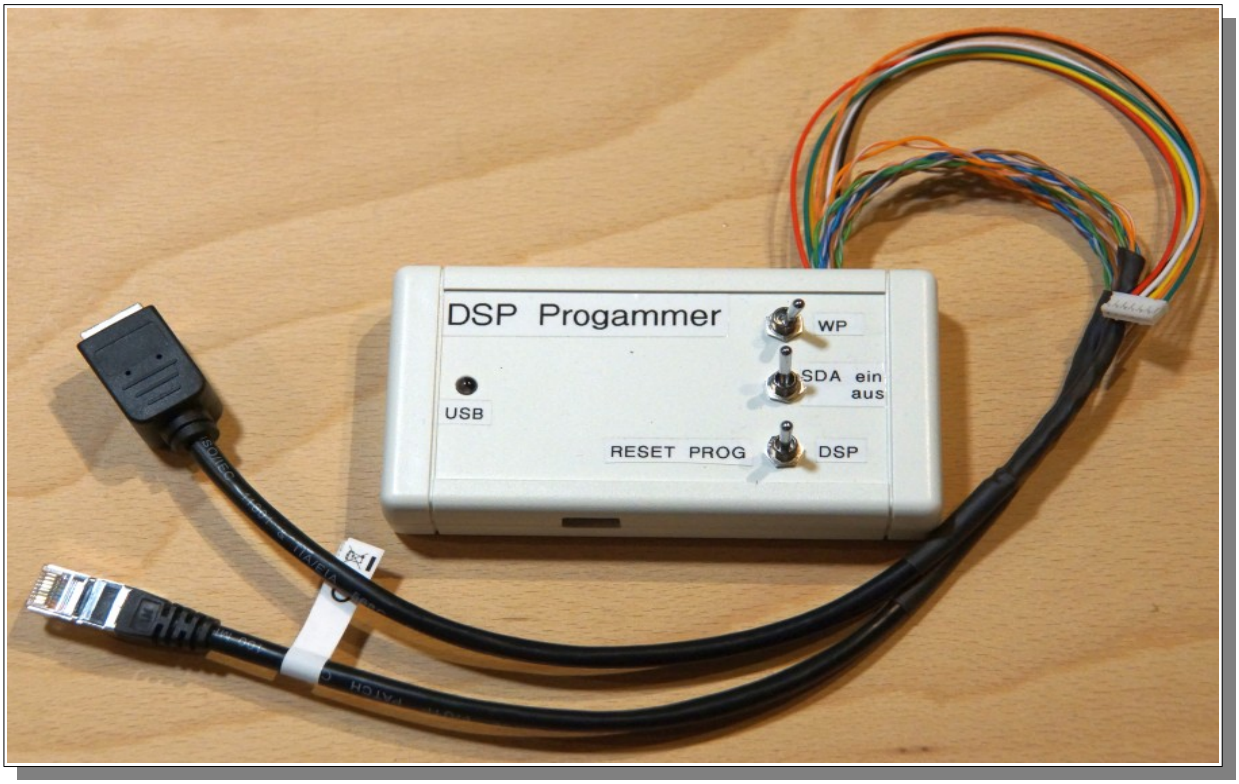
Um den EEprom zu beschreiben, muss auf den Hardware Configuration Tab gewechselt werden. Bei der reinen DSP Platine muss der Schalter auf der rechten Stellung stehen. Per Rechtsklick auf den "ADAU1701" Block kann "Write Latest Compilation to E2PROM" gewählt werden. Da das Sure DSP nur einen 8kByte Speicher verbaut hat, der Standart aber 32kByte sind, muss der Wert "Memory Size" auf 65536 Bits geändert werden. Da der EEprom immer von vorne beschrieben wird, fällt das aber erst bei größeren Projekten auf. Durch Klicken auf "Ok" beginnt der Schreibvorgang. Dieser startet sofort und ist innerhalb weniger Sekunden abgeschlossen. Wenn nicht innerhalb von 5 Sekunden ein grüner Balken sichtbar wird, hat die Verbindung zwischen DSP und Programmer nicht geklappt. Für einen erneuten Versuch wird der Programmer vom PC, das DSP vom Strom und die Verbindung zwischen beiden getrennt. Anschließend werden wieder Programmer und PC, Strom und DSP und als letzten Schritt Programmer und DSP verbunden und der Schreibvorgang erneut gestartet.



5.10. Eigenbau-Programmer für ADAU1701

Für die Vereinfachung des Echtzeit-Hochladens/Steuerung des ADAU1701 bei Freifeldmessungen der Box bzw. der (auch nachträglichen) Änderung der DSP-Programmierung wurde ein ICP1-Programmer mit entsprechenden Kabelanschlüssen in einem Universalgehäuse eingebaut. Neben dem standardmäßigen ISP-Stecker gibt es nun auch eine RJ45 Schnittstelle, über die per einfachem Patchkabel, auch mehrere Meter Entfernung überbrückt werden können. An der aktiven Box wird dann später zum Programmieren nur relativ einfach das Patchkabel angesteckt.





Die Abläufe zum Programmieren mithilfe des SigmaStudios sind folgende:

was?	***WP***	***SDA***	***RESET***	***ADAU1701 Mode***	***SigmaStudio Action***	***SigmaStudio Status***
Ausgangsstellung	-	aus	-	-	-	-
Anschluss DSP an Programmer; Anschluss Programmer an USB (und USB-LED-->grün)	-	aus	-	→ SELF-BOOT	-	→ USBi grün
Zuschalten ADAU1701	WP	ein	DSP (1s)	I2C	-	USBi grün
Dauerhafte Programmierung DSP						
Vorbereitung Upload	WP	ein	-	I2C	„Link Compile Download“ (F7)	→ „Active: Downloaded“
Start Upload in EEPROM	WP	ein	-	I2C	„Write Latest Compilation to E2PROM“	→ „Download E2PROM in Progress“, „Write“
Kontrolle Upload	WP	ein	-	I2C	„Check Last Compilation vs E2PROM“	→ „READ/WRITE SUCCESSFUL“
Neustart/Reset DSP						
Start DSP-Programm	-	X	DSP (1s)	→ SELF-BOOT	-	USBi grün, „Hardware Configuration“
Temporäres Hochladen						
Start DSP	-	ein	DSP (1s)	→ SELF-BOOT		
Vorbereitung Verbindung per I2C zum DSP	-	ein	-	SELF-BOOT	„Link Compile Connect“	grüne Zeile, „READY Compiled“
	-	ein	-		Änderungen (z.B. Koeffizienten in Schematic) werden in Echtzeit über-tragen	
Reset ICP1-Programmer	X	aus	PROG (1s)	X	-	→ USBi grün → USBi rot → USBi grün

5.11. Frequenzgangmessungen W250S &DT-254 in der Box

Für die spätere Kompensation per DSP muss zunächst der Frequenz- und Phasengang der Einzelchassis ermittelt werden. Dazu wurde die mechanisch fertige Box mittels REW im Garten vermessen – weitgehend ohne störende/reflektierende Wände oder Hindernisse. Dabei wurden die Endverstärker direkt (ohne DSP) vom Laptop aus angesteuert.

Messaufbau im Garten, Messmikrofon UMKIK-1 in 2m Entfernung vor der Box. Im Vodergrund: Laptop mit REW-Software

Reflexionsarme Messung in 30cm Abstand vom Hochtöner

Eigentlich hatte ich dabei einen Frequenzgang ähnlich den Datenblättern (insbesondere beim Hochtöner) erwartet. Aber die (eigene) Festlegung in 2 m Entfernung zu messen (& Mikrofon in 1,2 m Höhe) ergab erstaunliches: Die Messungen lieferten sehr unsaubere Kurven, die auf Interferenzen hindeuteten. Die Ursache war schnell gefunden, beim Mikrofon kommt neben dem Direktschall vom Chassis auch der reflektierte Schall vom Boden an, der je nach Art des Untergrundes mehr oder weniger zu Interferenzen führt. Die Mikrofonkapsel befand sich zum Schluss 205 cm vom Hochtöner entfernt, der reflektierte Schallweg betrug ca. 256 cm. Die Wegdifferenz liegt somit bei 51 cm, was bei 340 m/s Schallgeschwindigkeit einer Frequenz von 666 Hz entspräche. Bei einer Grundfrequenz von 333 Hz käme es dann erstmalig zur (subtrahierenden) Interferenz (180° Phasenlage zwischen direktem und indirektem Weg) und dann entsprechend bei höheren Frequenzen 333+n*666 Hz. Die Maxima (Addition der Wellen) gibt es dann bei Vielfachen von 666 Hz. Beim Tieftöner W250S ist die Wegdifferenz etwas kleiner, da der W250S tiefer eingebaut ist.

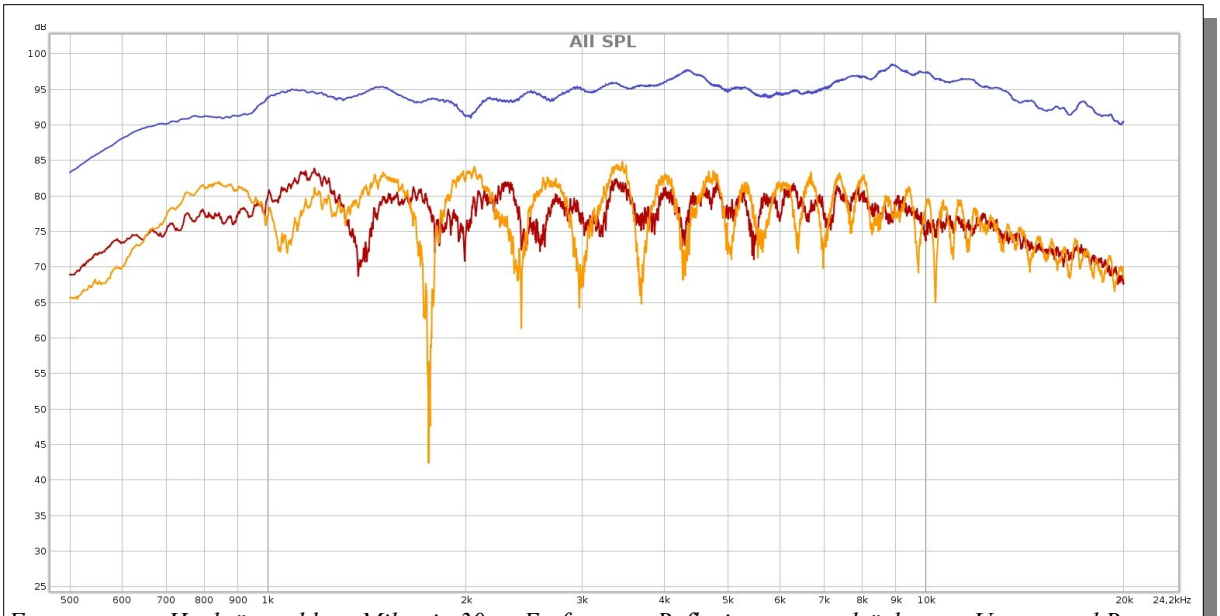
Aber natürlich führt die kleinste Änderung am Mikrofon-Standort auch zu Änderungen im Frequenzverhalten. Je nachdem, welches Material zwischen Box und Mikrofon auf den Boden gelegt wurde, änderten sich ebenso die Frequenzgänge, mit gravierenden Auswirkungen im gemessenen Pegel der überlagerten direkten und indirekten Schallwellen. Die folgende Tabelle gibt die maximalen und die minimalen Pegel im Bereich 800 Hz … 3 kHz für den Hochtöner Monacor DT-254 je nach Untergrund an. Die Differenz der beiden Pegel ist charakteristisch für den jeweiligen Untergrund:

Untergrund	maximaler Pegel	minimaler Pegel	Differenz
Gras (8-10cm hoch)	83 dB	69 dB	14 dB
Spanplatte auf Gras	84 dB	42 dB	42 dB
Rasenteppich (2mm) auf fester Erde	84 dB	34 dB	50 dB
Lautsprecherwolle (10 cm dick) auf Gras	83 dB	69 dB	14 dB
Filzmatte (4 mm dick, Rückseite Folie)	85 dB	56 dB	29 dB
Dünnes Baumwolllaken auf Rasen (8-10cm hoch)	82 dB	71 dB	11 dB

kurzflorige Auslegeware	83 dB	55 dB	28 dB
Box ca. 30° nach hinten gekippt, Untergrund Gras (8-10cm hoch)	81 dB	66 dB	15 dB
Minderung Bodenreflexion mittels akustischer Barriere unterhalb/vor Chassis, Untergrund Gras	81 dB	68 dB	13 dB
Flauschige Plüschmatte Fasern 3 cm lang	81 dB	73 dB	8 dB
Zum Vergleich: Entfernung Mikro 6 m, Untergrund Gras	75 dB	37 dB	38 dB
Zum Vergleich: Entfernung Mikro 0,3 m, reflexionsarme Messung mittels Schaumstoff-Auflieger, Untergrund Gras	91 dB	95 dB	4 dB

Eine Referenzmessung in 30 cm Entfernung – weitgehend ohne Interferenzen – beweist eindeutig den Einfluss des Bodens auf die Messung. Die wenigsten Bodenreflexionen gab es mit einer „langhaarigen“ Plüschmatte direkt vor der Box (Bild rechts), interessanterweise ist aber auch der nicht gerade kurze Rasen immer noch viel besser als ein Teppich. Im rechten Bild ist zusätzlich ein Waveguide-Blech unterhalb eines Hochtöners für Experimente angebracht.

Die unterschiedlichen Interferenzfrequenzen in den Grafiken resultieren aus geringfügigen Änderungen der Mikrofonaufstellung und der Niveau-Höhe des (reflektierenden) Untergrundes.



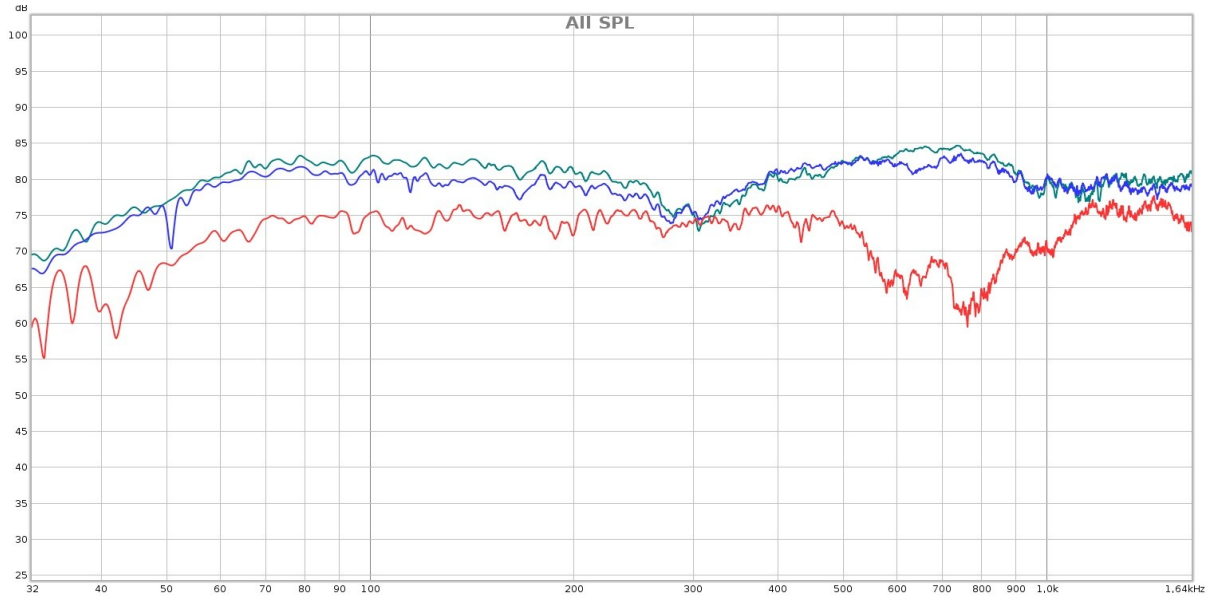
Frequenzgang Hochtöner; blau: Mikro in 30cm Entfernung, Reflexionen unterdrückt; rot: Untergrund Rasen; orange: Untergrund Spanplatte, jeweils in 2m Entfernung gemessen

Wegen des großen negativen Einflusses des Bodens auf den Frequenzgang, insbesondere im Sprachbereich 700 Hz … 3 kHz wurde probeweise unmittelbar unter der Membran des DT-254 ein Waveguide aus Holz angebracht (rechtes Bild).

Das Teil ist optisch natürlich absoluter Mist, aber eine andere Variante war leider nicht in Sicht. Die Messungen erfolgten in Pfeilrichtung, wo das Holzstück ca. 0 … 6 cm vom Hochtöner entfernt nach unten „abschattet“. Die Ergebnisse waren ernüchternd: Deutliche Verringerungen der „Bodenwelle“ ergaben sich nur bei Frequenzen oberhalb von 3,5 kHz und in Hör-Entfernungen unter 3 m. Im wichtigen Frequenzbereich 700 Hz … 3 kHz wurde bei 3 m Hör-Entfernung nur eine Verringerung der Pegeldifferenz um 2,2 dB gemessen (ohne Waveguide – 9,1 dB; mit Waveguide – 6,9 dB). Bei 5 m Hörentfernung betrug der Unterschied nur noch 0,2 dB. Somit kann man das Teil (draußen) auch weglassen und eher eine Dämpfungsmatte vor die Box legen – der Unterschied ist viel deutlicher hörbar! Durch die Interferenzen muss man also auch im Außenbereich mit Pegeldifferenzen > 10 dB rechnen.

In künftigen Konstruktionen einer Lautsprecherbox (die auf dem Boden steht) sollten die Hochtöner so platziert werden, dass die Abschattungen (in Richtung Boden) mindestens bis 20 cm vor den Hochtönern wirksam bleiben. In Innenräumen hängt es noch viel mehr von der konkreten Aufstellsituation ab.

Ausgewählte Frequenzgänge des Tieftöners W250S:



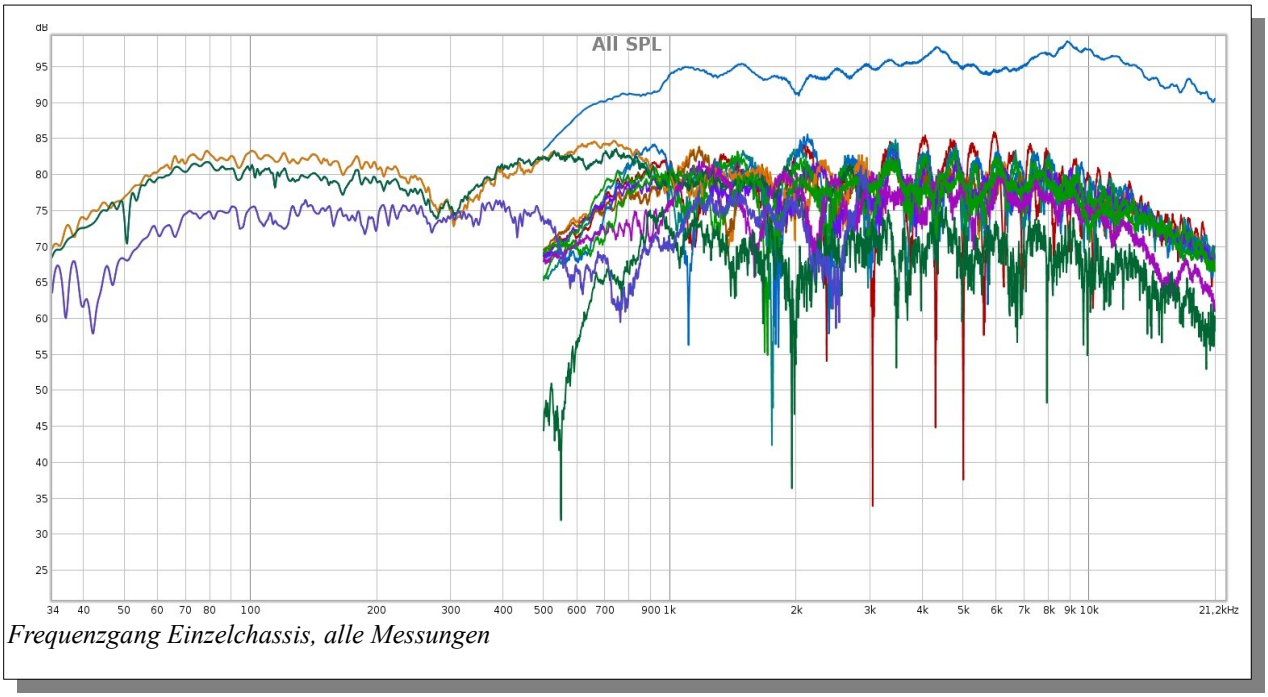
Frequenzgang W250S; blau und grün: Mikro in 2m Entfernung, verschiedene Untergründe; rot: Mikro in 6m Entfernung (und jeweils in 1,2m Höhe)

Die Resonanzfrequenz der Box begrenzt den Übertragungsbereich des Tieftöners nach unten, unterhalb von 65 Hz fällt der Bass mit etwa 12 dB je Oktave ab. Auch die Phasengänge lagen alle im erwarteten Bereich und sind hier wegen der besseren Übersichtlichkeit nicht dargestellt.

Der Hochtöner Monacor DT-254 zeigt im Zusammenspiel mit dem Endverstärker einige Schwächen im Bereich 10 … 20 kHz, das kann aber später mit dem DSP ausgeglichen werden (wohl dem, der das noch heraushören kann …).

Bis auf die störende Bodenreflexion gab es also keine weiteren Überraschungen bei den Messungen. Leider ist eine Aktivbox, die auf dem Boden steht, bereits gehandikapt, da die Hochtöner in geringer Höhe abstrahlen. Besser sind da natürlich Boxen auf Ständern mit Hornstrahlern, die den Schall mehr horizontal als vertikal streuen …

Zum Abschluss die grafische Darstellung aller (wichtigen) Messungen:



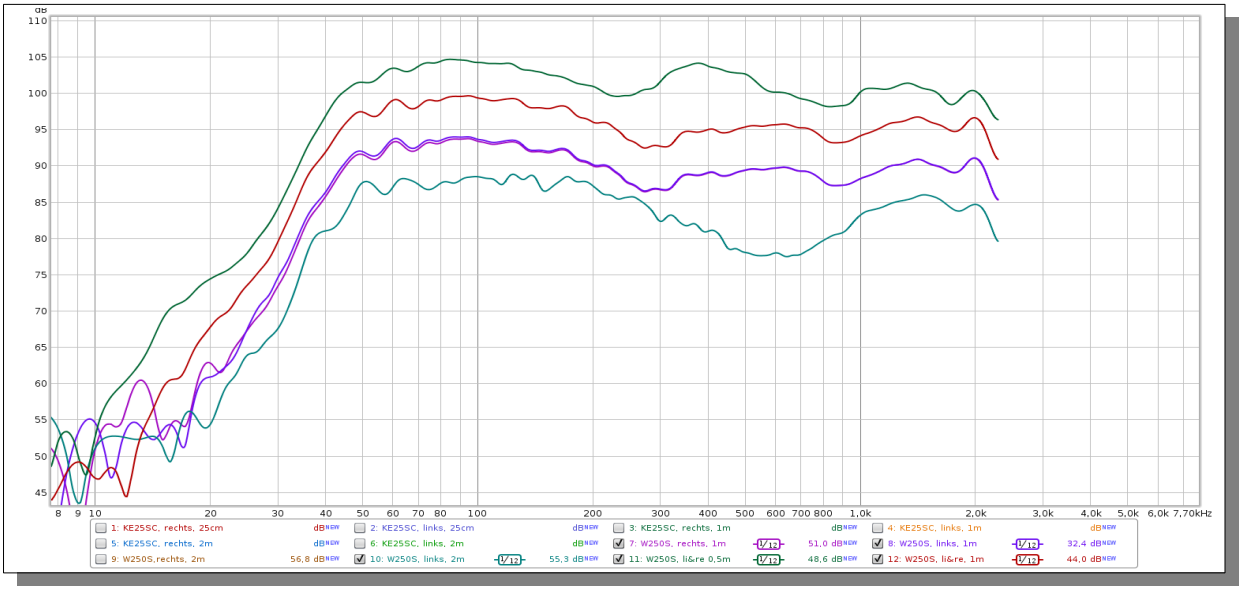
Frequenzgang Einzelchassis, alle Messungen

Zusammenfassend kann man sagen, die Kombination aus 2x Monacor DT-254 und 1x W250S ist für eine mobile 2-Wege Aktivbox im Leistungsbereich 100W+ vom Frequenzgang bereits ohne DSP relativ gut umsetzbar. Die Abweichungen beim Hochtöner betragen < ± 4dB, beim SUB < ± 3dB (f > 70 Hz). Mit einem DSP lässt sich natürlich noch mehr herausholen. Bodenreflexionen und Rauminterferenzen haben einen wesentlich größeren Einfluss auf die Klangqualität als die Chassis. Als 2-Wege Konzept müssen die dann erforderlichen beiden Frequenzweichen (Stereo) im Bereich 1,2 … 2 kHz trennen und die Stereo-Kanäle müssen in einem Tieftonzweig (SUB) zusammengefasst werden.

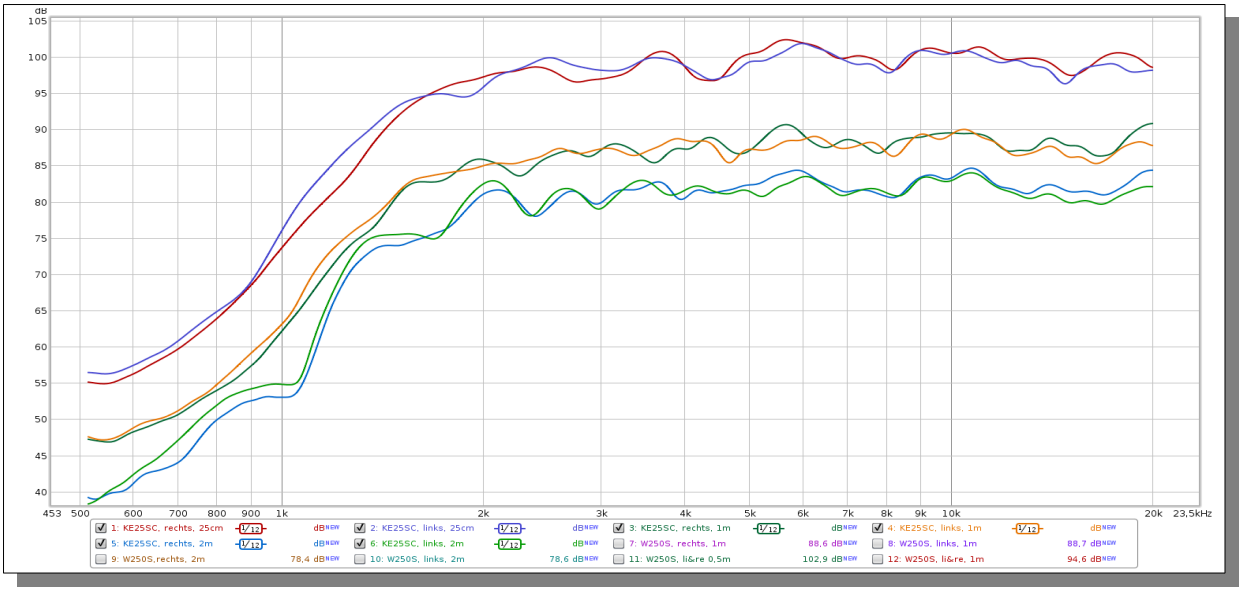
5.12. Frequenzgangmessungen W250S &KE25SC in der Box

Nach Austausch der beiden Monacor DT-254 gegen zwei Visaton KE25SC (mit herstellereigener Impedanzanpassung) war ein erneutes Ausmessen der einzelnen Chassis erforderlich. Da der DSP bereits eingebaut war, habe ich nun im SigmaStudio neben der Abschaltung der Filter lediglich die Frequenzweichen auf 100 Hz (Messung Hochtöner) bzw. 15 kHz (Messung Sub) gesetzt, damit sie sich nicht störend auf die Messungen auswirken. Die Messungen erfolgten einzeln jeweils für den linken und rechten Kanal. Das Messmikro wurde dabei in der akustischen Achse des jeweiligen Chassis in unterschiedlichen Entfernungen angeordnet. Nun konnte erstmalig auch die gesamte Elektronik in die Einzelmessungen einbezogen werden.

Die Ergebnisse für den W250S waren wie erwartet unverändert – eine leichte Überhöhung des Frequenzganges im Bereich 60 … 130 Hz, sowie Interferenzen bei 300 Hz und höher, je nach Entfernung.



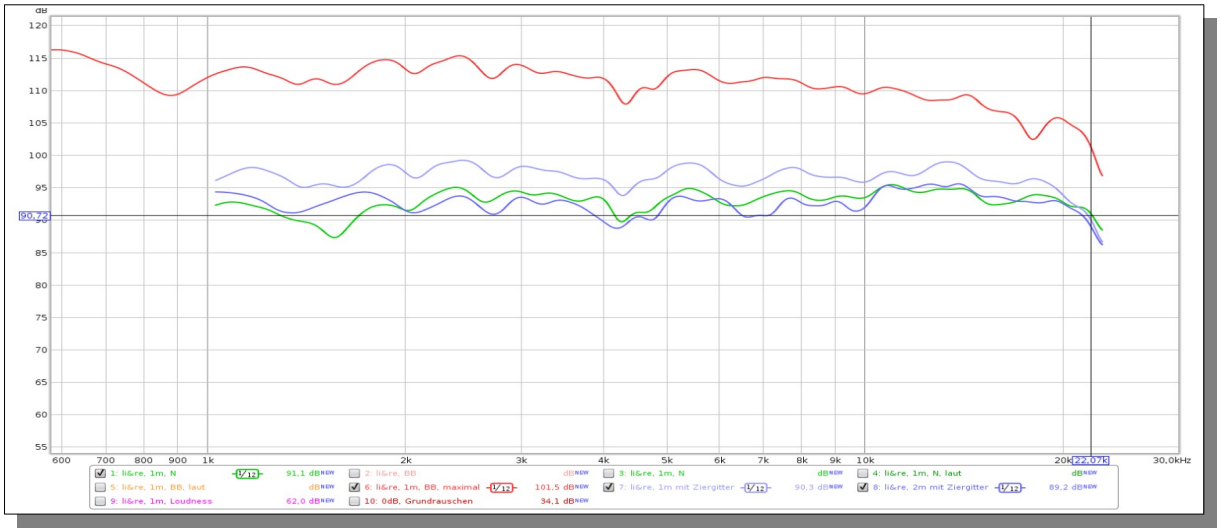
Spannend wurde es mit hochgelobten KE25SC:



Wie im obigen Diagramm ersichtlich gibt es einen fast linearen Verlauf im hohen Frequenzbereich. Lediglich

unterhalb von 3 kHz fällt die Kurve langsam aber stetig ab. Eine sehr leichte Absenkung ist im Bereich 10 … 20 kHz zu erkennen. Die nicht linearen Verzerrungen (insbesondere die ungeraden Ordnungen ab 1,5 kHz) spielen praktisch keine Rolle, sie liegen im Bereich 0,2 … 0,5 % und sind somit nicht hörbar. Auch der Unterschied im Frequenzgang beider Hochtönern ist zwar deutlich vorhanden, aber er wirkt sich praktisch nicht aus. Interessant ist, dass die Box nun auch Frequenzen von bis zu 22 kHz wiedergeben kann.

Nach diesen Messungen wurden die Visaton Schutzgitter (10R/134) vor den Hochtönern befestigt und deren Einfluss geprüft. Die beiden Frequenzweichen wurden nun wieder auf 1500 Hz eingestellt und eine Anhebung von +4 dB bei 1700 Hz (Q=1,2) im EQ eingefügt. Zusätzlich wurde ein Peaking EQ mit +5 dB bei 13 kHz (Q=1,0) ergänzt:

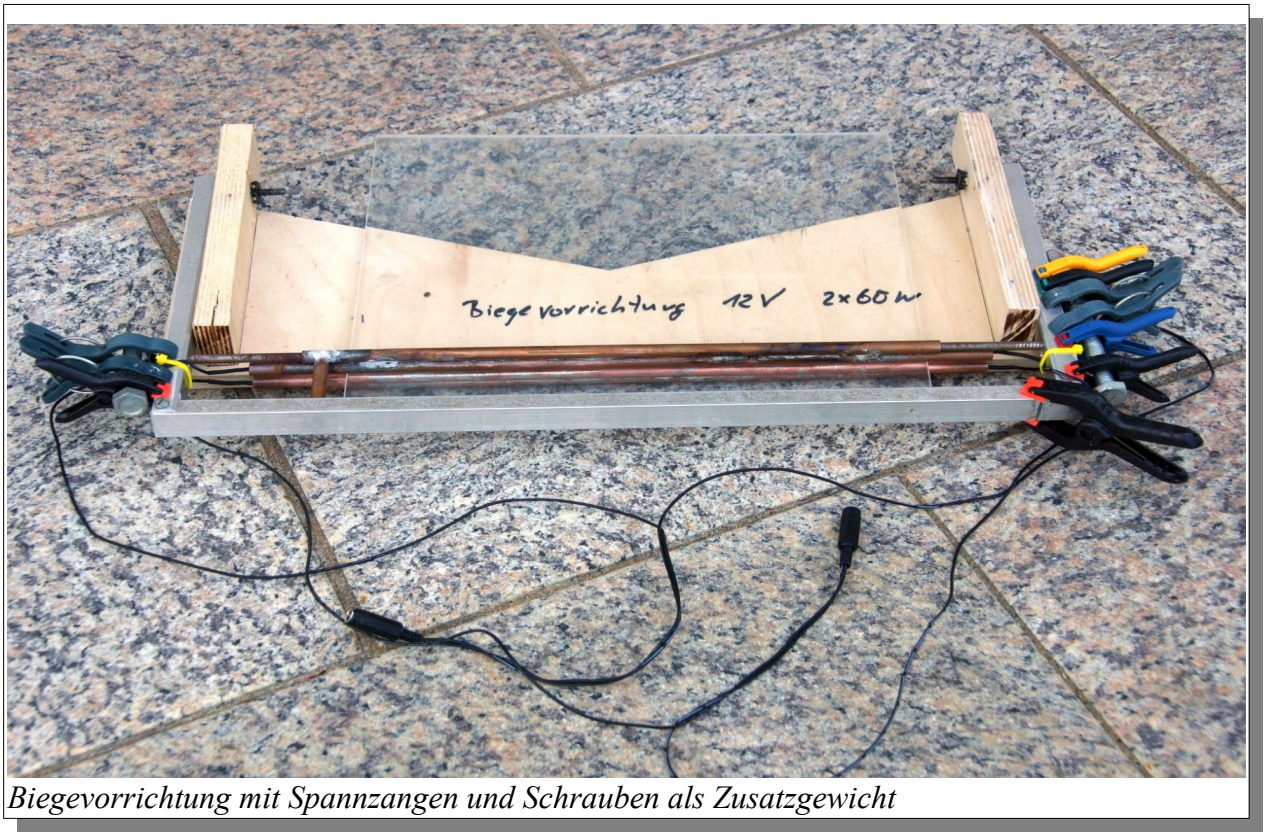


Die grüne Kurve zeigt den nun linearen Frequenzgang beider Kanäle ohne Ziergitter (mit etwas reduzierter Lautstärke), während die beiden blauen Linien den Frequenzgang mit Ziergitter in 1 m bzw. 2 m Entfernung wiedergeben. Ich denke, örtliche Interferenzen haben einen größeren Einfluss, als die beiden Ziergitter. Der rote Graph stellt übrigens den Frequenzgang bei maximaler Lautstärke dar, wobei beide Hochtöner in gerader Achse 1 m vor der Box bis zu 115 dB erzeugen (!). Die nicht linearen Verzerrungen erreichen dabei natürlich Werte von 10 % bei gleichzeitiger Absenkung höherer Frequenzbereiche.

Fazit: Der W250S und die beiden KE25SC vertragen sich außerordentlich gut miteinander, die für die KE25SC relativ niedrige Trennfrequenz von 1,5 kHz lässt sich mit nur einem Zusatzfilter gut umsetzen. Der Übertragungsbereich inklusive Elektronik geht weit aus dem Hörbereich heraus. Auch die Ansteuerung bei großer Leistung ist optimal zwischen den Chassis verteilt.

5.13. Eine Acryl-Biegevorrichtung

Für die Herstellung der Acryl-Abdeckung war eine Biegevorrichtung notwendig geworden. Sie entstand kurzfristig aus 4 Kupferrohren (8 mm) 40 cm lang, mit einem Innen-Durchmesser von 6 mm. Jeweils 2 Kupferrohre wurden längs zusammengelötet um eine spätere Durchbiegung zu minimieren. Ein Doppelpack wurde an der Längsseite eines Reststückes Sperrholz angeschraubt, das andere Doppelpack an einem nach oben klappbaren Rahmen befestigt. In die beiden Rohre, die sich im zu-geklappten Zustand berühren, wurden je 20 Widerstände (REICHELT: 2W DRAHT 0,15), als Kette zusammengelötet, eingeschoben. Da die Widerstände einen Außendurchmesser von 5 mm haben, passen sie ausgezeichnet hinein. Die beiden Widerstandsketten sind mit jeweils einer Hohlstecker-Buchse (REICHELT: LUM NEK 210) verbunden. Wenn man dann 2 Netzteile 12V/5A anschließt, werden in den Kupferrohren an jedem Widerstand 2,4 W



Biegevorrichtung mit Spannzangen und Schrauben als Zusatzgewicht

elektrische Leistung in Wärme umgesetzt. Die Gesamtleistung beträgt $P\,Ges = \frac{12^2}{20 \cdot 0{,}15} = 48\text{W}$.

Infolgedessen erwärmen sich die Kupferrohre relativ gleichmäßig auf Werte über 100°C. Die Widerstände halten das durchaus auch längere Zeit aus. Bei mir waren nur 2 unzureichende Lötstellen wieder aufgegangen. Ordentlich mit bleifreiem Lötzinn gelötet, sollte das eher nicht passieren.

Die Handhabung ist einfach: Netzteile einschalten, ca. 10 min warten und dann die zu biegende Acrylplatte einlegen. Je nach Dicke kann man nach wenigen Minuten durch leichten Druck auf den zu biegenden Acrylteil das Material biegen – aber nicht zu schnell, damit keine Risse entstehen!

Ein Tempern der fertig gebogenen Platte (z.B. im Backofen) ist bei Acrylglas/Bastlerglas nicht notwendig sondern eher kontraproduktiv [12].

5.14. Akustische Messungen an einer JBL Xtreme

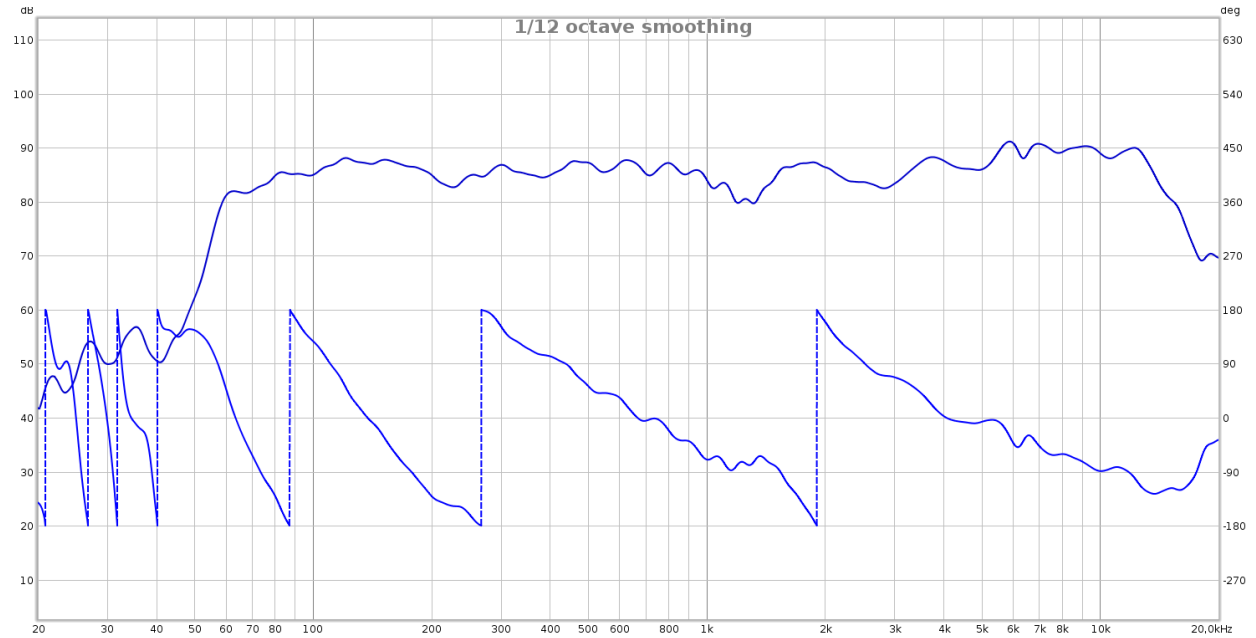
Der relativ gute Klang einer JBL für „Draußen“ inspirierte mich vor Jahren für den Selbstbau von Aktivboxen, auch weil Akkuleistung und Lautstärke des „Gettoblasters“ trotz relativ hohem Preis der Xtreme begrenzt sind. Hier folgen nun die von mir gemessenen akustischen Parameter.

Messaufbau: Xtreme und Messmikro (kalibriertes UMIK-1) jeweils auf Stativ (1,5 m Höhe), Entfernung voneinander: 1,00 m. Lufttemperatur: 12 °C.

Software: REW (V5.19), Linux Mint 19.3

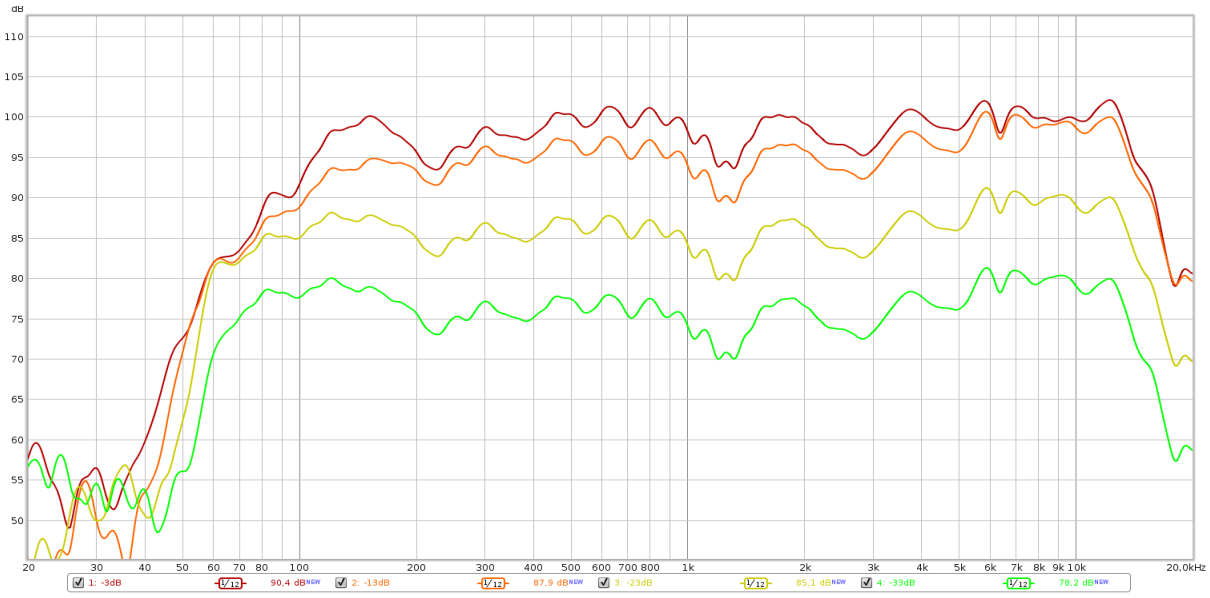
Einstellungen: An Xtreme: Audio-Eingang, maximale Lautstärke; am PC: Lautstärke 90 %, Balance neutral.

Frequenz- und Phasengang (Bodediagramm) bei kleinen Lautstärken:



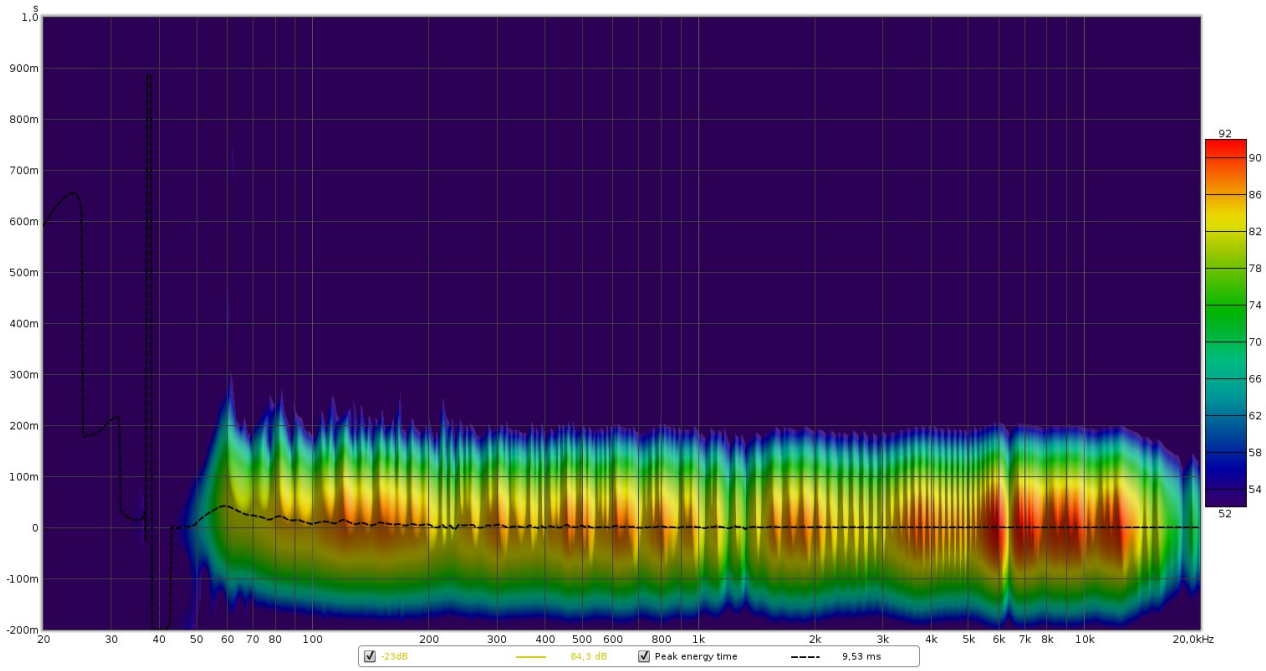
Der Frequenzgang im Bereich 58 Hz … 15 kHz schwankt um reichlich ± 6 dB. Wenn der Einbruch um 1,25 kHz nicht wäre, hätte die Box einen ausgeglichenen Klang im Bereich 60 Hz … 14 kHz. Für dieses kleine Hörwunder mit 4 Mini-Lautsprechern ein erstaunliches Ergebnis. Allerdings gibt es auch Resonanzen bei mehreren Frequenzen (im Bild ist nur das geglättete Diagramm zu sehen), welche den Höreindruck klassischer Musik verschlechtern. Gerade in Innenräumen spielt die Qualität eine größere Rolle. Aber das ist wohl der jugendlichen Zielgruppe eher egal. Wichtig ist der „Wums“ bei den Bässen. Erreicht wird das neben dem internen DSP durch einen gewaltigen Hub bei den 2 Tief-Mitteltonlautsprechern (2-Wegekonzept) in Verbindung mit den beiden seitlichen Passivmembranen, deren „Resonanz“- Gewicht ausgezeichnet auf den Bereich 60 … 100 Hz abgestimmt wurde. Der Nachteil dieser Konstruktion zeigt sich bei größeren Lautstärken – hier muss der digitale Soundprozessor die Membranauslenkung durch Kompression des Gesamtsignals und Frequenzbeschneidung der Tiefen begrenzen. Allerdings wird dann leider der Bereich um 150 Hz noch etwas mehr verstärkt, was sich durch ein unangenehmes „Dröhnen“ bemerkbar macht. Das sieht man sehr gut im folgenden Diagramm ...

Frequenzgang für 4 verschiedene Lautstärken in REW (-3dB, -13dB, -23dB, -33dB):



Die relativ kleine Xtreme (im Vergleich zu „richtigen“ Lautsprechern) erreicht so maximal 100 dB in 1 m Entfernung! Natürlich hält da der Bass nicht mehr mit, aber immerhin … Obwohl sich der eingespeiste Pegel bei diesen 4 Messungen um jeweils 10 dB unterscheidet, gibt es zwischen „-3 dB“ und „-13 dB“ nur eine Lautstärke-Differenz von nur etwa der Hälfte. Das bedeutet, intern erfolgt eine „Soft“-Begrenzung bzw. eine Kompression des Signalpegels bei großen Lautstärken. Zudem verringert sich die Bass-Lautstärke bereits ab mittleren Pegeln deutlich (Begrenzung der maximalen Membranauslenkung). Auf diese Art und Weise kann der Klirrfaktor über einen weiten Frequenz- und Pegelbereich auf Werte unter 10 % gehalten werden. Bei mittleren und kleinen Pegeln liegt der Klirrfaktor im Sprachbereich sogar bei < 2 %. Also alles in Allem ein guter Kompromiss für die Zielgruppe. Ergänzend hier noch das …

Spektrogramm der JBL Xtreme bei Zimmerlautstärke (-23 dB):



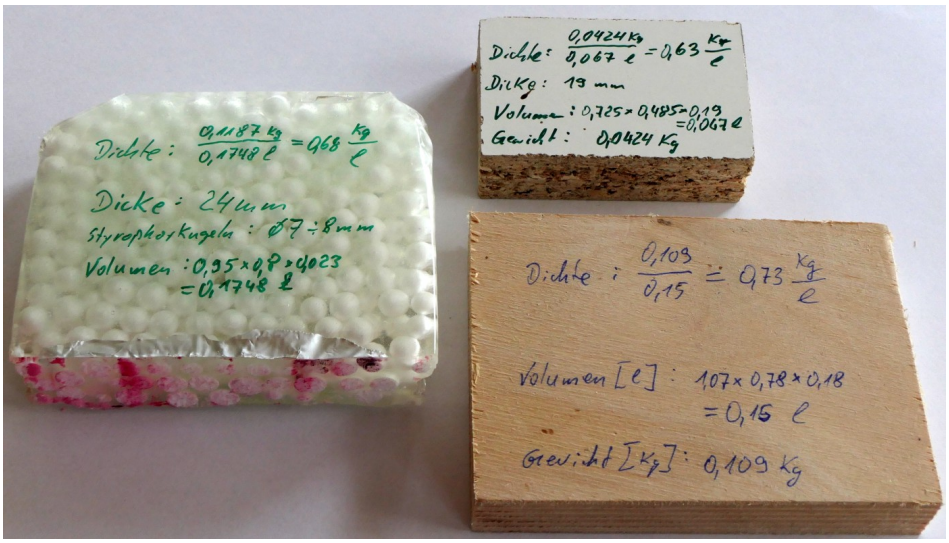
Die akustischen Parameter der Xtreme und der Xtreme 2 unterscheiden sich vor allem im Bereich über 13 kHz während Akku-Laufzeit und Leistung gleich sind. Einen Vergleich findet man unter [14]. Der Akku hat 37 Wh (neu) und hält bei 5 W Gesamtleistung somit ca. 7 h. Die oft zu findende Angabe „10.000 mAh“ ist übrigens reine Werbung und bezieht sich nur auf eine Teilspannung von 3,7 V des Akku-Packs.

5.15. Materialien für den Lautsprecherbau

Für den Selbstbau von Lautsprechern gibt es mittlerweile unzählige Bauanleitungen im Netz. Hier nun ein paar Kriterien für die Materialauswahl für das Gehäuse. Das Gehäuse soll stabil sein und eventuelle Resonanzen vermeiden. Neben der Gestaltung des Schallraumes soll Material eingesetzt werden, dass eingekoppelte Schallenergie möglichst gut dämpfen kann (d.h. in Wärme umwandeln), gut verarbeitbar und preiswert ist. Auch soll eine gute Oberflächengestaltung möglich sein. Damit scheiden Metalle in der Regel als Grundmaterial aus, von Aluminiumschaum einmal abgesehen. Akustisch „totes“ Material wie z.B. Beton wäre ideal, ist aber zu schwer. Spezielle kreuz-verleimte Sandwich-Konstruktionen (Sperrholz/Multiplex) oder gar mit z.B. einer zusätzlichen Lage Bitumen erreichen die besten Dämpfungswerte. Sie sind nicht besonders leicht, dafür aber einfach mit überall verfügbaren Technologien bearbeitbar und Fehler lassen sich ohne Probleme auch nachträglich korrigieren. Bei Epoxidharz/GFK ist das schon wesentlich komplizierter.

„Das“ Material gibt es leider nicht. Wer gute Qualität zu geringem Preis und Gewicht möchte, muss einen mehr oder weniger komplexen Schichtaufbau in Kauf nehmen. Letztlich besteht die Kunst beim Lautsprecherbau darin, bei möglichst geringem Materialeinsatz störende Resonanzen zu reduzieren oder in andere Frequenzbereiche zu schieben. Dazu gehören viel Erfahrung, ein gutes Test-Equipment und ein solides Wissen.

Material	Dichte [kg/m³]	Bemerkungen
MDF	600-1000	gut verfügbar, preiswert
Spanplatte (z.B. OSB)	550-750	preiswert, keine Kantenstabilität
Balsaholz	120	sehr leicht aber nicht sehr stabil
Aluminiumschaum	ca. 500	nur als Füllung verwendbar
GFK	2000	hart, stabil, komplizierte Handhabung, teuer, geringe Schalldämpfung
GFK/Epoxid mit Styropor	500-700	hart, stabil, sehr komplizierte Handhabung, Dämpfung ähnlich MDF
Hartholz	800	stabil, teuer, schwer
Sperrholz (Birke)	ca. 700	stabil, gut verfügbar und leicht bearbeitbar
-“- (Modellbau-rötlich)	ca. 350	leicht, begrenzte Stabilität
-“- (Pappel)	ca. 350	leicht, begrenzte Stabilität
Multiplex Hartholz	850	gute Kantenstabilität, teurer als MDF
Multiplex Weichholz	550	
Bitumen	ca. 1000	dämpfende Eigenschaften, nur als Fülllage



6. Literaturquellen

[1] http://www.hifi-forum.de/viewthread-71-11890.html, aufgerufen am 25.3.2020

[2] http://www.linkwitzlab.com/filters.htm#2, aufgerufen am 25.3.2020

[3] www.picosound.de/D_gehmat.htm aufgerufen am 27.3.2020

[4] http://www.hifi-forum.de/viewthread-331-458.html aufgerufen am 27.3.2020

[5] Doku TDA7498 von STMicroelectronics (9.9.2015) DocID16107 Rev 9

[6] http://www.freedsp.cc/ aufgerufen am 11.4.2020

[7] http://www.hifi-forum.de/viewthread-71-12581-8.html aufgerufen am 12.4.2020

[8] https://www.elektronik-labor.de/HF/Lautsprecher/LS0.html

[9] http://www.artalabs.hr/

[10] https://doc.soundimports.nl/imagine/mkt/Blog/%2327%20Active%20Speakers/Active%20Speaker%20project.pdf

[11] https://ez.analog.com/dsp/sigmadsp/f/q-a/121790/adaptive-loudness

[12] https://www.meisterkuehler.de/thema/fragen-zum-tempern-von-plexi/

[13] https://www.visaton.de/sites/default/files/dd_product/ke25sc_8_fs.gif

[14] https://www.bluetooth-lautsprecher-infos.de/artikel/der-jbl-xtreme-und-der-xtreme-2-im-vergleich