

Entwicklungsreport eines hochwertigen 3-Wege-Lautsprechers

In der vorliegenden Ausarbeitung beschreibe ich die einzelnen Entwicklungsschritte auf dem Weg zu meiner derzeitig (Stand Nov. 2020) ambitioniertesten Eigenentwicklung eines Stereo-Lautsprecherpaars.

Zur besseren Übersicht habe ich wichtige Aspekte bei der Lautsprecherentwicklung in kurzen Stichpunkten aufgeführt.

1. Zielsetzung	1
2. Treiber und Komponentenwahl	1
3. Gehäuse	2
4. Messung der einzelnen Chassis im eingebauten Zustand.....	4
5. Simulation	7
6. Anhang	9

1. Zielsetzung

Ziel war es einen Lautsprecher zu produzieren, der auf möglichst hohem Niveau spielt. Darauf lag das Hauptaugenmerk. Um das zu erreichen, wollte ich bei diesem Lautsprecher die Möglichkeit haben verschiedene Setups des Filternetzwerks zu erstellen und zwischen diesen umschalten zu können, um herauszufinden wie groß die Unterschiede zwischen verschiedenen Filtersteilheiten oder Summenfrequenzgängen sind.

2. Treiber und Komponentenwahl

Da ich wie in der Zielsetzung beschrieben eine gewisse Flexibilität bei der Abstimmung gefordert habe, sind Aktivmodule in diesem Fall eine geschickte Wahl. Dank der mittlerweile sehr leistungsstarken, umfangreichen DSPs und der hohen Effizienz von Digitalverstärkern habe ich mich für zwei Hypex FA123 Boards entschieden. Diese bieten je drei hochwertige Digitalverstärker mit jeweils ca. 100 Watt an 4 Ohm und 15 eigenen, digitalen Filtern pro Kanal. Die interne Signalverarbeitung erfolgt durchgehend mit 96 kHz. Filtersteilheiten bis 48 dB/Oktave sind möglich. Damit werden die Module hohen Ansprüchen an die Wiedergabequalität gerecht.

Ich habe mich für ein klassisches 3-Wege-Konzept entschieden. Hierbei können die verschiedenen Frequenzbereiche den einzelnen Chassis und deren optimalem Einsatzbereich sehr gut zugeordnet werden. Jeder Treiber spielt nur in dem Frequenzbereich, den er am besten wiedergeben kann. Zudem kommt eine Passivmembran zum Einsatz, die jedem Reflexkanal aufgrund fehlender Strömungsgeräusche und geringerer Gehäuseverluste überlegen ist. Da das Konzept nun steht müssen noch passende Treiber gefunden werden. Bei gewünschter Wiedergabequalität kommen auch nur Treiber der höheren Preisklasse in Frage. Hersteller, die für mich in Frage kamen, waren z. B.: Accuton, Audaphon, Mundorf, SB Acoustics, Scan-Speak, Seas Excel und Wavecor.

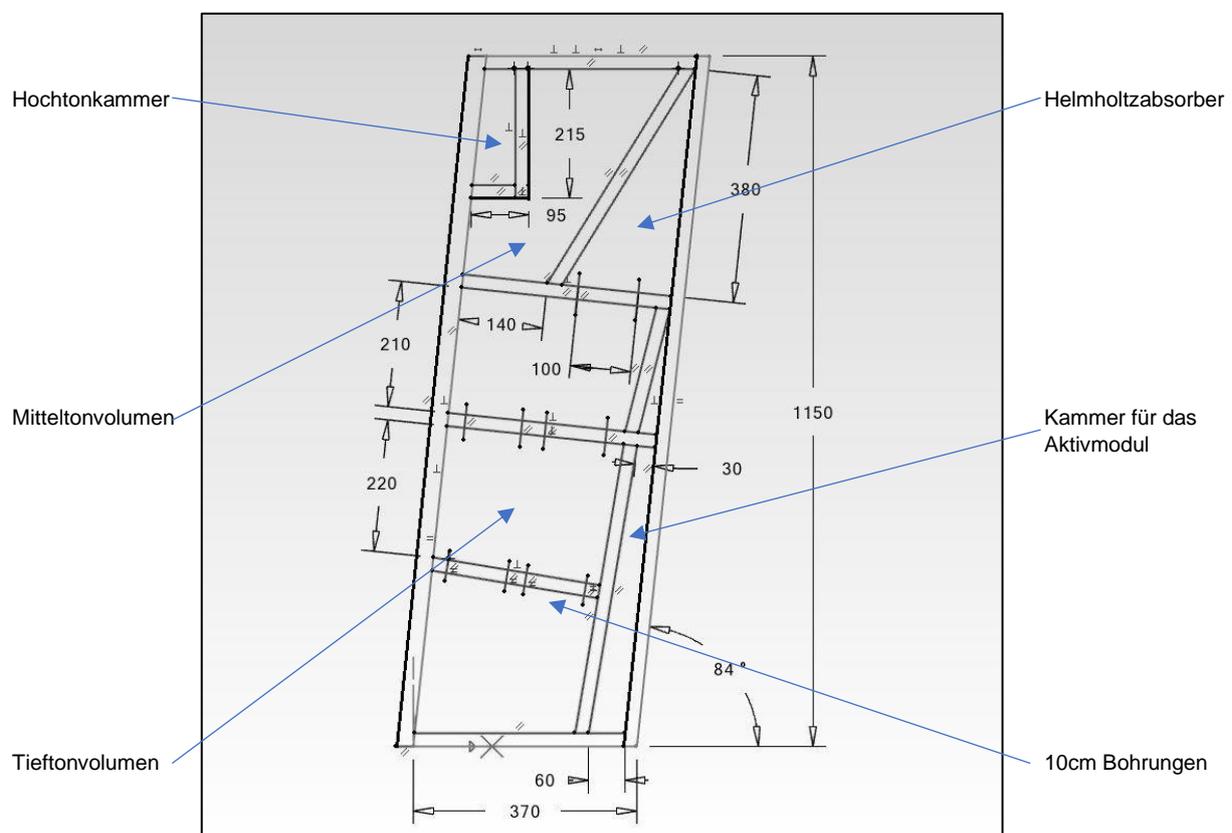
Letztlich bieten leichte Hartmembranen im Tief- und Mitteltonbereich das beste Masse-Steifigkeitsverhältnis. Zudem bewegt sich die Membran kolbenförmiger/linearer als bei Papiermembranen. Partialschwingungen im Nutzfrequenzbereich fallen geringer aus. Sofern die unvermeidlich auftretenden Membranresonanzen wirkungsvoll unterdrückt werden, sind hochwertige Chassis mit Hartmembranen eine sehr gute Wahl.

Ich entschied mich für den Seas Excel W22 EX001 im Tieftonbereich und den Seas Excel W15 CH001 im Mitteltonbereich. Beide haben eine Magnesiummembran, die leichter und steifer als Aluminium ist.

Im Hochtonbereich bieten Bändchenhochtöner oder Air-Motion-Transformer eine sehr luftige und präzise Wiedergabe feinsten Details. Ein schmales Bändchen hat zudem den Vorteil eines geringen Schalldruckabfalls unter horizontalem Winkel. Meine Wahl fiel auf den Audaphon APR 3.2. Alternative mangels Verfügbarkeit mit gleicher Qualität: Mundorf AMT U110W1.1.

3. Gehäuse

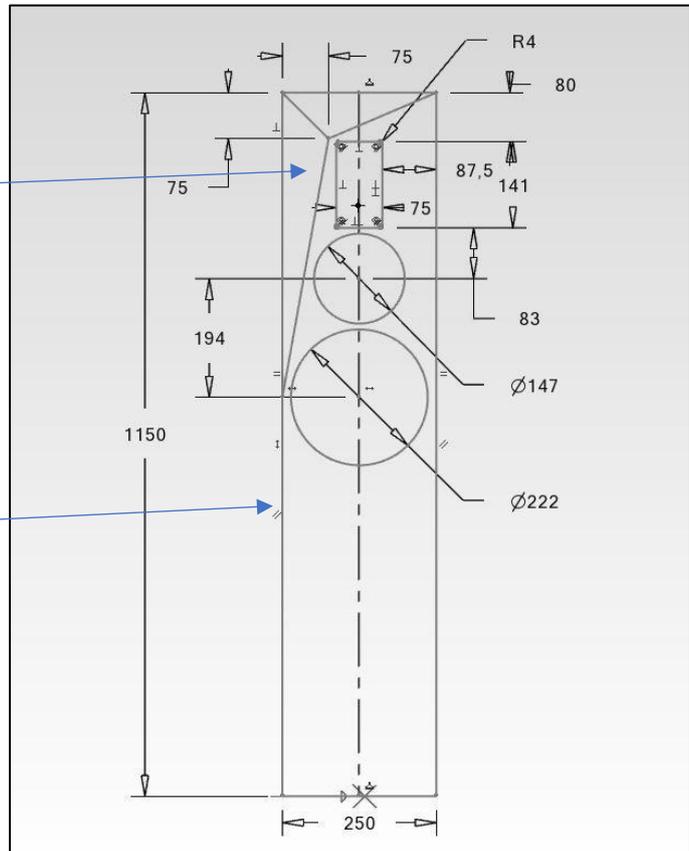
Aus optischen Gründen habe ich ein nach hinten geneigtes Parallelogramm gebaut. Für ein gutes Abstrahlverhalten ist die Front so schmal wie möglich gehalten. Die Höhe hat sich aus der späteren Position des Abhörpunkts auf Hochtonachse ergeben. Die Tiefe wurde so gewählt, dass Tieftöner und Mitteltöner in ihrem optimalen Volumenbedarf arbeiten. Das Gehäusevolumen für Tief- und Mitteltöner wurde auf Basis der selbst bestimmten TSP mit LspCAD berechnet. Zur effektiven Eindämmung von Stehenden Wellen erster Ordnung wurden fast alle Trennbretter im Gehäuse schräg zueinander angeordnet und ein Helmholtzabsorber hinter dem Mitteltonvolumen integriert.



Das Gehäuse ist aus 22mm MDF gefertigt und gut ausgesteift. Die Front misst 28mm und hat asymmetrisch angefasete Kanten, sodass die Fasen beider Lautsprecher innen liegen und die Kanten möglichst nah an den Rändern der Chassis verlaufen. Das sorgt für ein gleichmäßigeres Rundstrahlverhalten und setzt einen optischen Akzent.

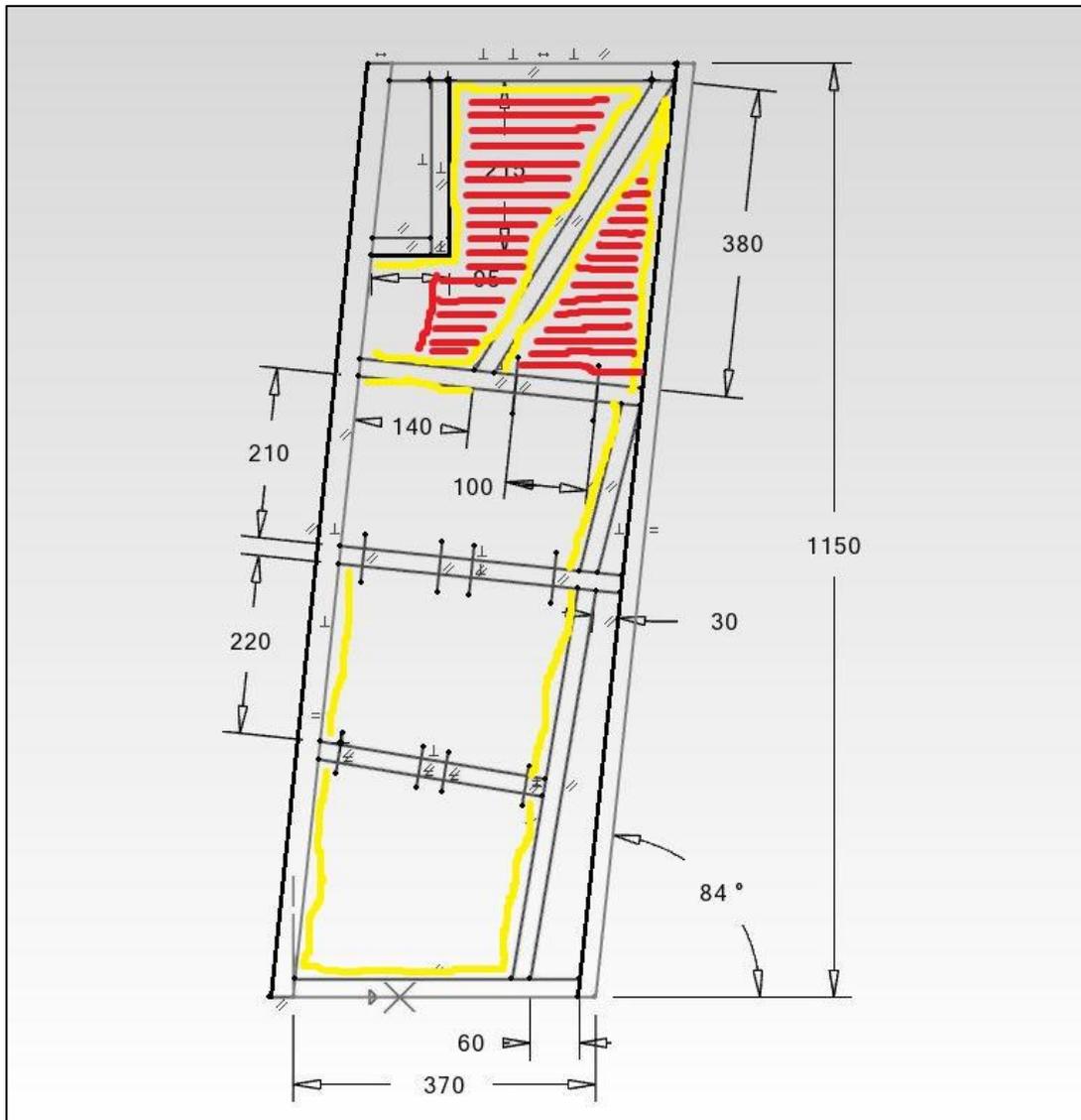
Asymmetrische Fasen (bei beiden Boxen innenliegend)

Seitlich, innen positionierte Passivmembran



Die Abstände der Chassis zueinander sind geringgehalten, um einer Punktschallquelle näher zu kommen. Die Passivmembran ist seitlich und relativ nah an der Front positioniert. Das bietet einen vorteilhaften Kompromiss aus gutem Impulsverhalten und einem nur geringen Schalldruckverlust gegenüber der Positionierung auf der Front.

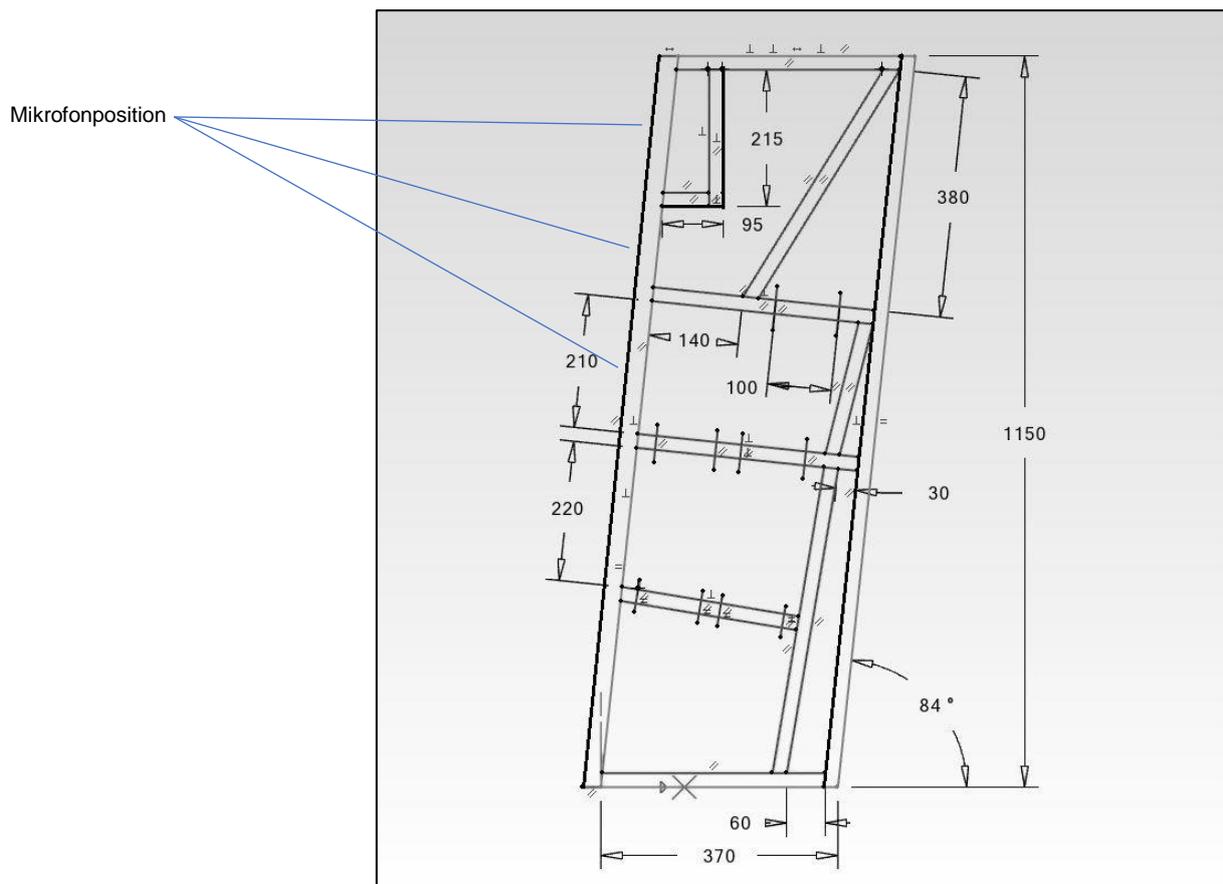
Sämtliche Außenwände des Gehäuses wurden mit verdichteter Polyesterwatte ausgekleidet. Das vermeidet Flatterechos und reduziert den Schalleintrag in die Wand hinein. Zusätzlich wird das Mitteltonabteil zu ca. 90% mit Watte gefüllt sowie der Helmholtzabsorber vollständig, damit er richtig arbeiten kann. Der Tieftonbereich bleibt spärlich bedämpft, damit die Luft in Verbindung mit dem Passivmembrankonzept ungehindert schwingen kann.



4. Messung der einzelnen Chassis im eingebauten Zustand

Messungen habe ich mit ARTA und REW durchgeführt. Es wurde eine Steinberg UR22 Soundkarte und ein ASE Mic 240 in Verbindung mit dem Monacor MPA 102 Mic Preamp verwendet. Das System wurde selbstverständlich kalibriert. Lediglich der absolute Schalldruckpegel ist nicht korrekt dargestellt, weil mir derzeit das Zubehör zur akkuraten Kalibrierung noch fehlt. Entscheidend für die Entwicklung ist lediglich der relative Pegel.

Zuerst wurde ein gemeinsamer Messpunkt für alle Chassis festgelegt. Dieser sollte natürlich möglichst der Hörsituation entsprechen. Folglich wurde als Bezugshöhe die Hochttonachse verwendet. Der Messabstand muss mindestens dem 5-6-Fachen des größten Chassis-Durchmessers entsprechen, damit man sich im akustischen Fernfeld befindet. Ein Abstand von 1m, horizontal zum Hochtöner, ist in diesem Fall ausreichend.



Ein größerer Abstand würde in meinem Messraum zu viele verfälschende Raumeinflüsse enthalten.

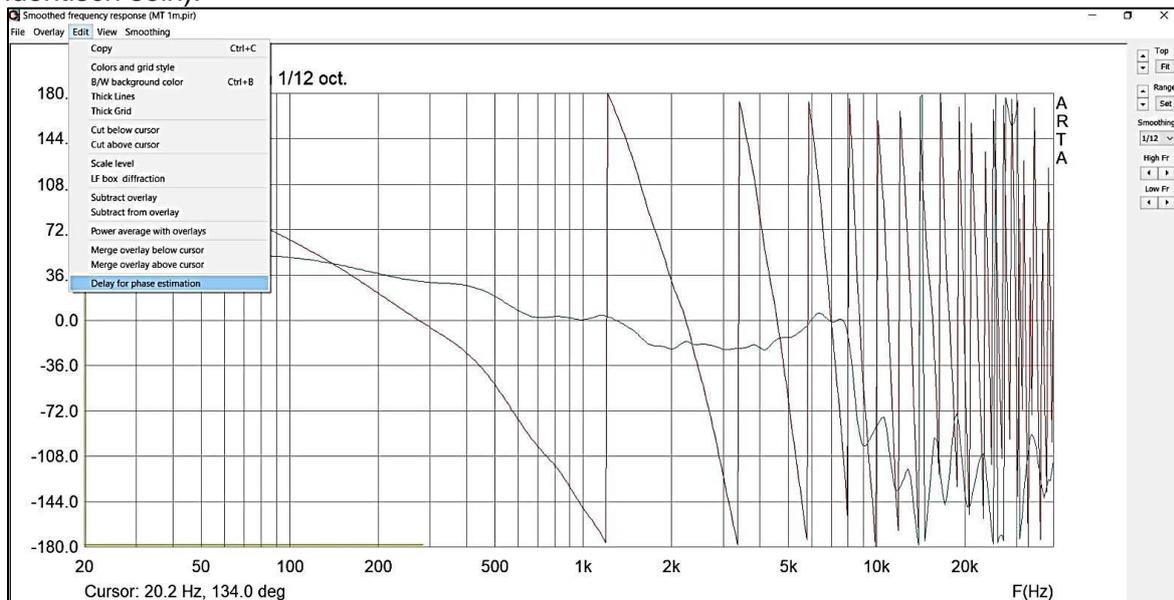
Nachdem der Messpunkt festgelegt ist, werden alle Chassis an dieser Position gemessen und die Impulsantwort jedes Treibers gespeichert. Beim Hochtöner wird der linke Cursor etwas vor die Impulsantwort und der rechte Cursor vor die erste Raumreflexion gesetzt. Dieser Frequenzgang kann inkl. der Minimalphase direkt für das Simulationsprogramm exportiert werden.

Bei Mittel- und Tieftöner sowie der Passivmembran müssen noch zusätzlich einzelne Nahfeldmessungen im Abstand von ca. 0,5 – 1,5 cm vor der Dustcap bzw. des Phaseplugs gemacht werden. Dies bietet bei meiner Messraumsituation die beste Auflösung. Das Zeitfenster der Nahfeldmessung wird wie im ARTA Kompendium empfohlen auf 100 – 200 ms gesetzt. Anschließend erfolgt eine Bafflestep-Korrektur mittels einer Funktion in ARTA. Die Nah- und Fernfeldmessungen werden inkl. der zugehörigen Phase miteinander verbunden und können wie bei der Hochtonmessung inkl. der Minimalphase exportiert werden. Die Messung der Passivmembran ist durch eine „Load and Sum“ Funktion in ARTA mit der Tieftonmessung zusammengefügt worden.

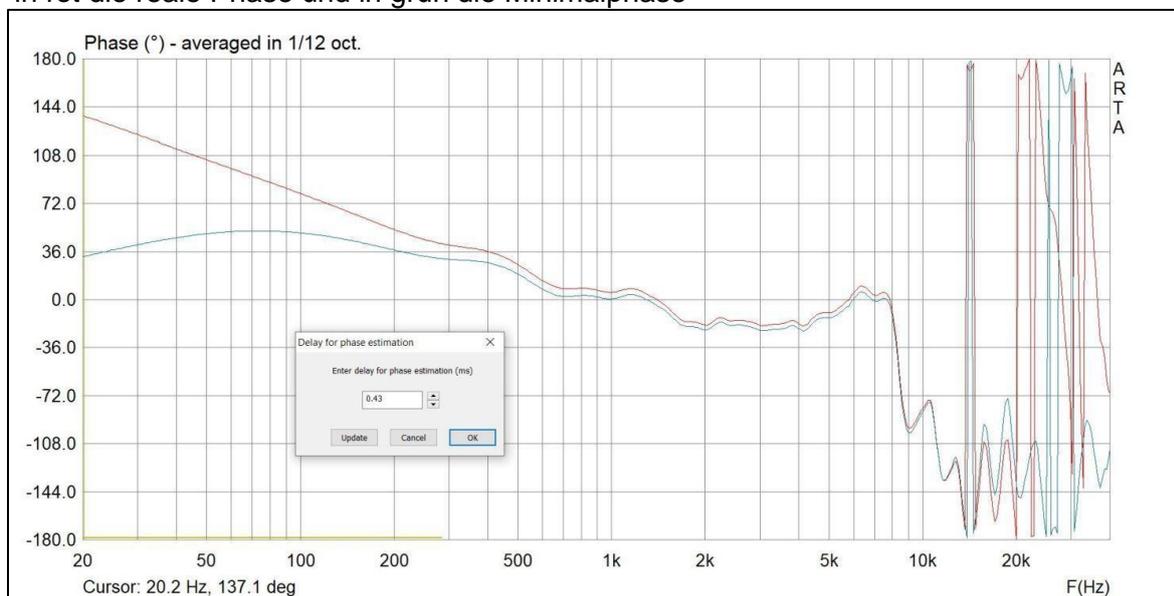
Ein letzter wichtiger Schritt ist die Bestimmung der relativen Schallentstehungsorte zueinander. Wie im ARTA Kompendium beschrieben, erfolgt dies durch Angleichen der „echten Phase“ an die Minimalphase mittels Delays. Dazu wird ein Referenzpunkt des linken Cursors gesetzt, der bei jeder Impulsantwort der verschiedenen Treiber die exakt selbe Position hat. In meinem Fall auf 6 ms. Der rechte Cursor wird individuell vor die erste Raumreflexion gesetzt, um den Freifeld-Frequenzgang richtig darzustellen.

Veranschaulichung der Vorgehensweise beim Mitteltöner:

Die Minimalphase des Mitteltöners wird als Overlay gespeichert. Danach wird die reale Phase eingeblendet. Ausgehend von der Position des linken Referenz-Cursors wird jetzt ein Delay eingefügt, das so lange erhöht wird, bis sich die reale Phase der Minimalphase fast vollständig angleicht. Wenn man eine gute Übereinstimmung der beiden Phasen erreicht hat, ist das richtige Delay gefunden (die Übereinstimmung sollte im Bereich der Trennfrequenz nahezu identisch sein).



*in rot die reale Phase und in grün die Minimalphase



*in rot die angleichene Phase im Bereich der Trennfrequenz

Das wiederholt man bei jedem Chassis und notiert das jeweilige Delay. Ausgehend vom linken Referenz Cursor errechnet man die Differenz in Millisekunden. Diese Differenz umgerechnet in cm beschreibt den relativen Versatz der Chassis zueinander und muss im Normalfall dem Simulationsprogramm mitgeteilt werden. Je kürzer die Wellenlänge, desto wichtiger ist die korrekte Angabe/Messung des Versatzes.

Da ich DSPs verwende, versehe ich Hoch- und Mitteltöner, deren Impuls aufgrund der kleineren bewegten Masse und der geringeren Trägheit fast immer vor dem Tieftöner ans Ohr gelangt, mit einem Delay und gleiche die zeitliche Differenz damit aus. Im Simulationsprogramm wird dementsprechend kein Versatz notiert.

Tief- und Mitteltöner haben parallel ein RC-Glied zur Impedanzlinearisierung erhalten, um eine über den Frequenzbereich gleichmäßige Leistungsaufnahme zu ermöglichen. Impedanzmessungen wurden direkt an der Soundkarte mit REW ermittelt (ebenso die TSP). Da die Impedanz bei Aktiv-Konzepten im Gegensatz zur passiven Frequenzweiche eine nur geringe Rolle spielt, führe ich die erfolgten Messungen an dieser Stelle nicht weiter aus.

5. Simulation

Alle Simulationen erfolgten mit LspCAD. Ein wichtiger Punkt bei der Weichen-Entwicklung ist die Festlegung der Trennfrequenzen. Berücksichtigt werden sollte vor allem:

- Klirrvverhalten
- Frequenzgang im Gehäuse
- Bündelung

Durch Messungen, Tests und Datenblätter habe ich herausgefunden, dass der Hochtöner aufgrund von Klirr- und Frequenzgang frühestens ab 2,5 kHz einsetzbar ist. Zudem fängt der Mitteltöner erst knapp über 3 kHz an nennenswert zu bündeln. Der Mitteltöner sollte den größten Bereich der menschlichen Stimme abdecken, damit diese aus einem Guss wiedergegeben werden kann. Da sich dieser Frequenzbereich von ca. 80 bis 5000 Hz erstreckt, sollte der Mitteltöner nach oben hin möglichst spät herausgenommen werden. Unter Berücksichtigung der Bündelung wurde als Kompromiss eine Trennfrequenz von 3000 Hz gewählt. Dies ist bereits relativ hoch und sichert dem Hochtöner genug Pegelfestigkeit. Der Tieftonbereich reicht bis ca. 200 Hz und sollte ebenfalls von einem einzigen Chassis im optimalen Arbeitsbereich wiedergegeben werden. Eine Trennfrequenz von 200 Hz sichert diese Anforderung und schont den Mitteltöner vor höheren Membranauslenkungen. Der Mitteltöner deckt somit einen großen Teil der menschlichen Stimme ab und Hoch- bzw. Tieftöner spielen nun in ihrem optimalen Frequenzbereich. Das Klirrspektrum der Chassis ist dabei ebenfalls im grünen Bereich.

Start der Simulation:

Die aufbereiteten Messungen werden ins Programm importiert. Unter Berücksichtigung der Trennfrequenzen werden Filter so gesetzt, dass ein möglichst linearer Verlauf des Frequenzgangs erzielt wird. Es ist sehr wichtig, dass die Frequenzgänge der Einzel Chassis bei der Trennfrequenz symmetrisch und gleichmäßig zueinander abfallen. Der Kreuzungspunkt muss recht genau 6 dB unter der Grundlinie liegen. Nur so können sich die Schalldruckverläufe richtig addieren. Ebenfalls muss darauf geachtet werden, dass Membranresonanzen mindestens 30 dB unterhalb des Summenfrequenzgangs liegen.

Ich verwende Butterworth Filter, weil diese eine geringe Überschneidung der Chassis im Frequenzbereich verzeichnen und dabei ein gutes Ein-/Ausschwingverhalten bieten. Ab hier ist es sinnvoll den Summenfrequenzgang und die Filtersteilheiten zu verändern und dabei immer das Ergebnis sowie die Unterschiede z. B. auch in unterschiedlichen Räumen anzuhören.

Meiner Erfahrung nach führt eine leichte Senke im Mitteltonbereich in den meisten Hörräumen zur subjektiv angenehmsten Klangwiedergabe. Der Stimmbereich ist dezent und nicht aufdringlich. Da der Raum ohne besondere Maßnahmen fast immer ausschließlich hohe Frequenzen absorbiert, gleicht ein leicht steigender Frequenzgang zu hohen Frequenzen hin diesen Effekt etwas aus.

Ein für mich hochinteressanter Teil meines Projektes war das Ausprobieren von ultrasteilen Filtern. Mir persönlich ist nur eine Lautsprecherfirma bekannt, die Filterordnungen im Bereich von 50 dB/Oktave realisiert, weshalb ich skeptisch war, ob dieses Konzept aufgehen würde. Nachdem ich mir einige Erklär-Videos dieser Firma angesehen habe, in denen mathematisch genau erklärt wird, warum steiflankige Filter verwendet werden und welche Vorteile diese bieten, habe ich mich an den Versuch gewagt und wurde mehr als positiv überrascht. Entscheidend war, dass nur bei folgenden, unter größter Sorgfalt eingehaltenen Bedingungen herausgefunden werden kann, ob ein Unterschied zwischen verschiedenen Filtersteilheiten hörbar ist oder zu einer nennenswerten positiven oder negativen Veränderung des Klangeindrucks führt:

- Absolut identischer Summenfrequenzgang
- exakt gleiche Trennfrequenzen
- Symmetrische Überschneidungsbereiche der Einzelfrequenzgänge, deren Kreuzungspunkte genau 6 dB unterhalb der Grundlinie liegen
- gleicher Hörplatz und gleiche Position der Lautsprecher im selben Raum
- und zuletzt, auch wenn das banal klingt, der gleiche Lautsprecher

Anders ausgedrückt ist es in diesem Fall nur möglich eine verlässliche Aussage über das Verhalten verschiedener Filtersteilheiten zu erhalten, wenn man einen einzigen Parameter ändert und den Rest unangetastet lässt. In diesem Fall ist dies die Filtersteilheit. Und genau das habe ich getan. Passiv lässt sich ein aussagekräftiger Unterschied in diesem Fall nicht ausmachen, da für ultrasteile Filter deutlich mehr Bauteile benötigt werden und sich diese natürlich auch auf den Klang auswirken. Preislich schießt das Ganze auch schnell in die Höhe weshalb vor allem zur Entwicklung und Forschung ein aktiver Lautsprecher große Vorteile hat.

Und was hat der ganze Aufwand gebracht? Der Klang hat sich meiner Meinung nach durch ultrasteile Filter hörbar verbessert. Die Bühne war gestaffelter, Stimmen und Instrumente waren genau platziert und haben ihre Position nicht mehr verändert. Die Musik war allgemein differenzierter und hat mehr Details offenbart. Ich würde ultrasteile Filter nicht als besser bezeichnen, da die Reproduktion von Musik natürlich viel mit dem subjektiven Geschmack zu tun hat. Flachere Filter bieten z. B. eine voluminösere Stimme und eine oftmals als „Wolke“ bezeichnete räumliche Abbildung in der das Klangbild vielleicht etwas „wärmer“ klingt. Von meinen Testhörerinnen und -hörern bevorzugten 5 von 6 Personen das ultrasteile Setup. Will man sich auf eine möglichst unverfälschte Wiedergabe eines Signals durch den Lautsprecher beziehen, worum es bei „High End“ Lautsprechern eigentlich geht, ist eine Weiche mit sehr steilen Filterflanken meiner Meinung nach näher an der „Realität“.

Trotz genauestens eingehaltener Vorgaben beim Test von unterschiedlichen Filterflanken und nur einem geänderten Parameter ist der hörbare Unterschied nicht allein durch die höhere Filtersteilheit bestimmt, weil das Abstrahlverhalten durch die kleineren Überschneidungsbereiche der Chassis anderes sein kann als bei flachen Filtern. Jedoch hat das akustische Ergebnis gewisse Vorzüge, die mit ultrasteilen Filtern automatisch einhergehen. Deshalb schreibe ich die genannten tonalen Vorzüge im zuvor genannten Abschnitt einzig den steileren Filtern zu.

Obwohl ich mit dem Klang meines Lautsprechers mehr als zufrieden bin, und dachte, dass 22mm Gehäusestärke in Verbindung mit den platzierten Versteifungen ausreichend ist, habe ich festgestellt, dass das Gehäuse bei manchen Frequenzen spürbar zum Mitschwingen angeregt wird. Die Basspräzision, obwohl bereits gut, kann hier sicherlich noch etwas verbessert werden. Ich arbeite derzeit an einer Gehäusetechnik, mit der die nötige Schwingungsarmut erreicht werden soll.

6. Anhang

Literatur, die mir beim Thema Lautsprecherbau und Messtechnik sehr geholfen hat, ist z. B.:

- Lautsprechermesstechnik von Joseph D'Appolito
- Studio Akustik von Andreas Friesecke
- Sound Reproduction von Floyd E. Toole
- das originale ARTA Kompendium sowie die deutsche Ergänzung
- das REW Handbuch