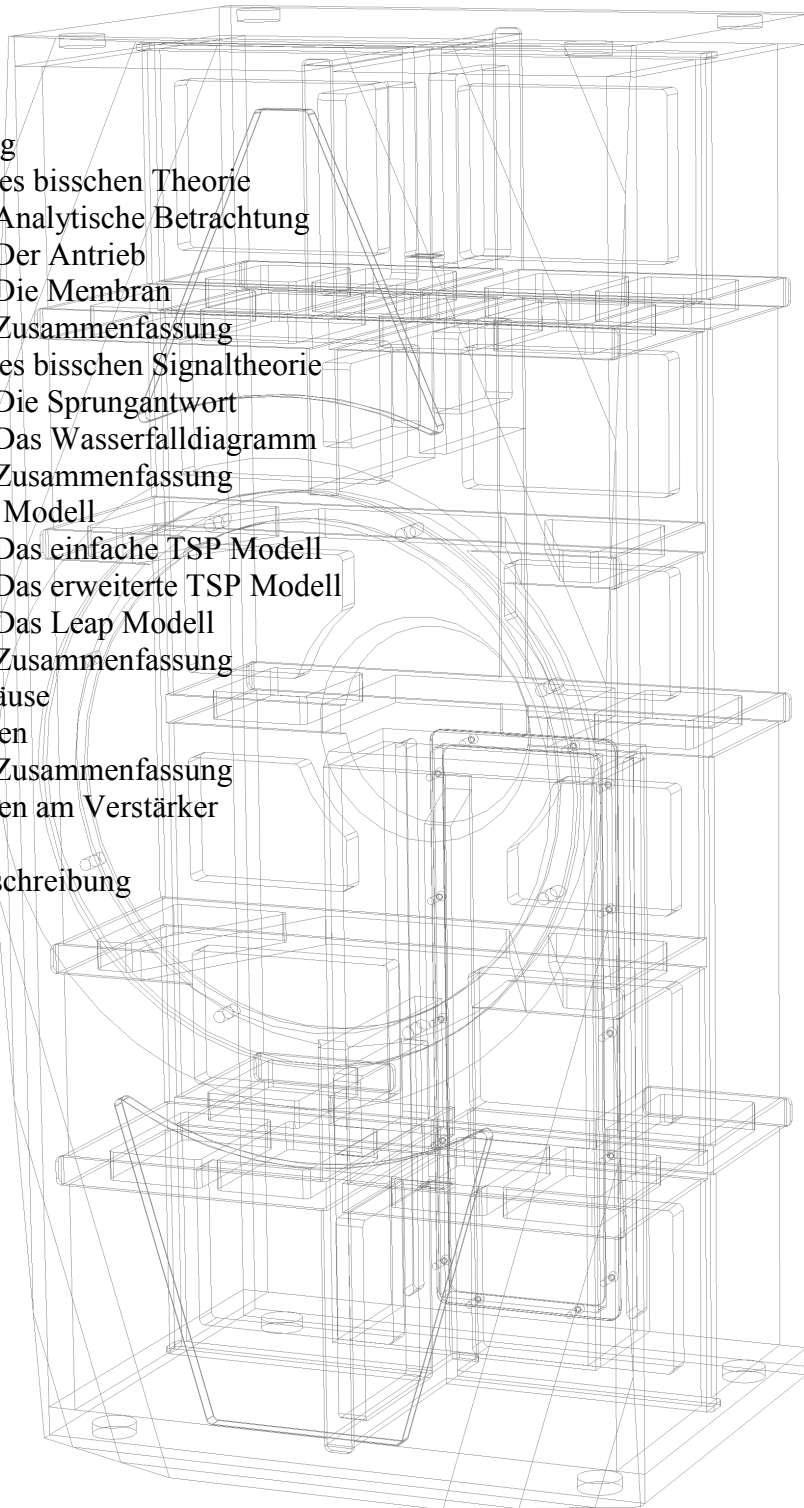


Inhaltsübersicht

1. Einleitung
2. Ein kleines bisschen Theorie
 - 2.1 Analytische Betrachtung
 - 2.2 Der Antrieb
 - 2.3 Die Membran
 - 2.4 Zusammenfassung
3. Ein kleines bisschen Signaltheorie
 - 3.1 Die Sprungantwort
 - 3.2 Das Wasserfalldiagramm
 - 3.3 Zusammenfassung
4. Das TSP Modell
 - 4.1 Das einfache TSP Modell
 - 4.2 Das erweiterte TSP Modell
 - 4.3 Das Leap Modell
 - 4.4 Zusammenfassung
5. Das Gehäuse
6. Messungen
 - 6.1 Zusammenfassung
7. Messungen am Verstärker
8. Der DSP
9. Klangbeschreibung



1. Einleitung

Liebe Leser,

jeder Hersteller hat es in seinem Produktkatalog: Das Referenzsystem.

Dieses System soll veranschaulichen was der Hersteller oder Entwickler für das derzeit machbare hält. Dabei spielen die Kosten meist eine untergeordnete Rolle. Technisch sowie optisch wird versucht das maximal mögliche aus dem Projekt herauszuholen.

Subwoofer genießen meist einen schlechten Ruf, da sie raumakustische Probleme verursachen können. Das muss bei gut strukturierter und sorgfältiger Entwicklung nicht sein. Aus diesem Grund haben wir uns entschieden mit einem Subwoofer, bzw. mit einem Subwoofersystem den Grundstein zum Quint Audio Referenzsystem zu legen. Uns erscheint es darüber hinaus auch wichtig, dass das System auch zukünftig um zum Beispiel Toppteile, Satelliten oder Zusatzmodule erweiterbar sein soll.

Wie üblich werden vor Projektbeginn erst einmal Ideen und Überlegungen zusammengetragen. Es stellt sich die Frage was ein Referenzsubwoofer alles leisten können muss. Zu einem guten Chassis und einer starken Endstufe mit DSP gehört selbstverständlich ein durchdachtes, stabiles und auch optisch attraktives Gehäuse.

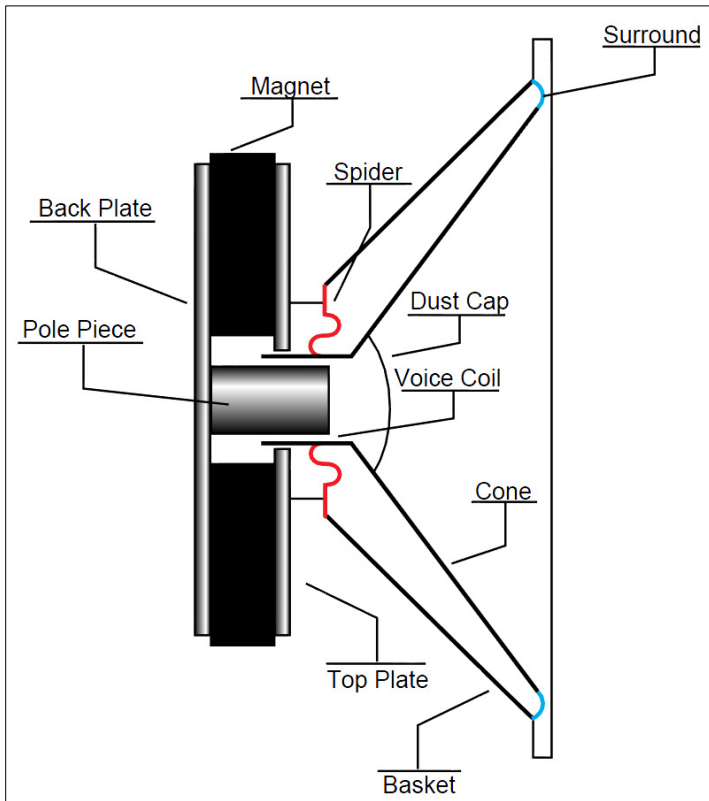
Es erscheint einleuchtend, dass ein Referenzsubwoofer, der im geschlossenen Gehäuse auch 16Hz mit vollem Pegel wiedergeben können soll Membranfläche benötigt, vor allem wenn er auch noch dynamische Fähigkeiten besitzen soll. Der Aurasound NS18-992-4A ist für solche Anforderungen bestens geeignet. Mehr Technisches dazu später. Dass das Aktivmodul, welches den Subwoofer befeuert, potent und mit einem modernen DSP ausgestattet sein sollte versteht sich von selbst.

Man sollte annehmen, dass ein geschlossenes Gehäuse schnell und einfach zusammengeschaubt werden kann. Prinzipiell ist das richtig, aber ein normal und üblich versteiftes Gehäuse kam nicht in Frage. Wir wollen schließlich bis ans sinnvoll Machbare gehen und das Gehäuse bestmöglich versteifen und stabilisieren, damit die Amplituden der Eigenschwingungen so gering wie möglich sind. Darüber hinaus wollen wir untersuchen, ob es sinnvoll ist das Chassis mithilfe des Gehäuses zu stabilisieren um eventuelle Eigenschwingungen des Korbes und des Magnetsystems zu mildern. Selbstverständlich wollen wir die Thesen auch messtechnisch und/oder simulatorisch untermauern um sie zu verifizieren. Das ist wichtig, denn ansonsten stellen Thesen nur Behauptungen dar.

Aus diesem Grund haben wir neben den optimierten Gehäusen auch ein „ganz normales“ Gehäuse mit Ringversteifungen, wie sie üblich sind, angefertigt. So ist es möglich Vergleichsmessungen anzufertigen um die Vorteile aufzuzeigen.

2. Ein kleines bisschen Theorie

Bevor wir uns mit dem eigentlichen Subwoofer befassen, wollen wir die Theorie dahinter näher betrachten. Sicherlich hat fast jeder Leser schon mal etwas von sogenannten „Schlamm-schiebern“ gelesen. So werden Chassis bezeichnet, die große Gummisicken und hohes Membrangewicht aufweisen. Dieses Wort bezieht sich auf die These, dass Lautsprecher mit höheren Massen des schwingenden Systems eine langsame und unpräzise Basswiedergabe verursachen. Um den Sachverhalt zu klären schauen wir uns das Chassis einmal näher an.



Links im Bild sehen wir den typischen Aufbau gängiger dynamischer Lautsprecher. Das sich bewegende System besteht aus der Schwingspule (Voice Coil), Zentrierspinne (Spider), Sicke (Surround) und der eigentlichen Membran (Cone) mit der Staubschutzkappe (Dust Cap).

Die Membran sollte sich im Idealfall kolbenförmig vor und zurück bewegen, um eine Druckdifferenz zu erzeugen. Diese Druckdifferenz in Form einer longitudinalen Welle nehmen wir als Ton wahr.

Die Zentrierspinne sorgt mit einer definierten Federkraft dafür, dass sich die Membran wieder in die ursprüngliche Lage zurückbewegt. Sie sollte steif genug sein um das Nachschwingen zu unterbinden, aber auch weich genug um annähernd kolbenförmige Bewegungen der Membran zuzulassen.

Abbildung 1: prinzipieller Aufbau eines dynamischen Lautsprechers

Die Sicke besitzt ebenfalls eine definierte Federkraft, denn sie muss fest genug sein, um Schaukelbewegungen des schwingenden Systems zu unterbinden. Auch hier muss man einen Kompromiss finden, denn ist sie zu fest buckelt sich die Membran aufgrund der hohen Zugkräfte auf, und zeigt Resonanzerscheinungen in der Symmetrieebene.

Das alles hört sich recht einfach an, aber es ist immens schwierig solch ein schwingendes System definiert zu kontrollieren. Ein Resonator, also ein schwingfähiges System wie ein Lautsprecher, welches auf eine bestimmte Eigenfrequenz abgestimmt ist, kann zum Beispiel mithilfe des folgenden Ersatzschaltbildes nachgebildet werden:

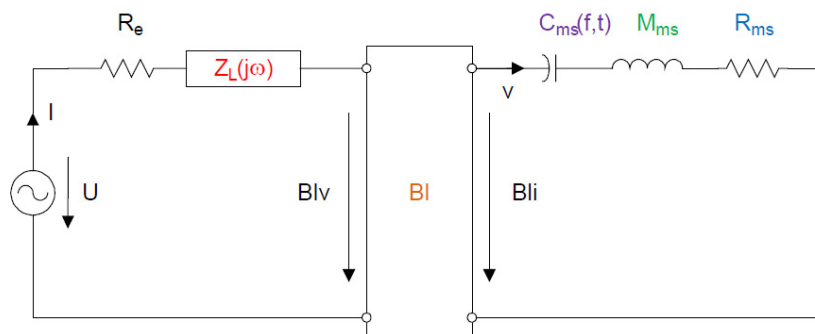


Abbildung 2: Ersatzschaltbild

Der rechte Schaltkreis ist über eine Transformation, in diesem Fall das BL Produkt, mit dem anregenden Schaltkreis verknüpft. Die Resonanzfrequenz errechnet sich damit unter Zuhilfenahme der Kirchhoffschen Regeln, zweimaliger Integration und Umformung zu:

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{C_{ms} \cdot M_{ms}}}$$

Hierbei beschreibt der Wert M_{ms} die mechanisch bewegte Masse mit der dazugehörenden Luftmasse während C_{ms} die reziproke Federkonstante darstellt, die im Falle eines Lautsprechers alles andere als linear ist. Anhand der Formel kann man erkennen, dass folgende Möglichkeiten bestehen, die Resonanzfrequenz niedrig zu halten:

- Durch hohes Membrangewicht => hohes M_{ms}
- Durch eine weiche Aufhängung => hohes C_{ms}
- Hohes Membrangewicht und weiche Aufhängung

2.1 Analytische Betrachtung

Durch eine Schwingspule fließt die zeitlich harmonische Spannung $U = U_0 \cdot e^{i\omega t}$. Der Wert U_0 repräsentiert hier die Amplitude während der Term $e^{i\omega t}$ die Oszillation beschreibt. Aufgrund der Lorentzkraft erzeugt ein magnetisches Feld eine Kraft auf ein geladenes Teilchen. Dabei stehen die Kräfte senkrecht aufeinander. In unserem Fall steht das Magnetfeld senkrecht zum Strom. Man kann sich das anhand der „rechten Hand Regel“ klar machen.

Dazu streckt man Daumen, Zeigefinger und Mittelfinger im 90° Winkel zueinander aus. Der Daumen zeigt nun die Richtung des Stromes, während der Zeigefinger in Richtung des Magnetfeldes zeigt. Der Mittelfinger gibt nun an, in welche Richtung die Kraft wirkt. Dreht man nun den Strom, dann muss man auch die Hand drehen. Die Folge ist, dass die Kraft nun genau in die entgegengesetzte Richtung zeigt. Da in unserem Fall das Magnetfeld konstant ist, können wir eine Kraftänderung nur durch einen Wechsel der Stromrichtung hervorrufen.



Abbildung 3: rechte Hand Regel

Die frequenzabhängige Kraft, die auf eine Spule im Magnetfeld wirkt lautet $F(\omega) = BLI(\omega)$. Dabei ist I der Strom, L die Länge des Drahtes und B die magnetische Flussdichte. Die Spule erfährt bei der Bewegung auch eine rücktreibende elektromagnetische induzierte Spannung $U_{EMF}(\omega) = BLv(\omega)$. Man muss beachten, dass in unserem Fall die Spule kreisförmig gewickelt ist. Das ist in den obigen Gleichungen noch nicht berücksichtigt. Wenn wir nun Zylinderkoordinaten einführen können wir die gewickelte Spule in die Gleichungen einbauen:

$$F(\omega) = I(\omega) \frac{2\pi N}{A} \int r B_r dA$$

$$U_{EMF}(\omega) = v(\omega) \frac{2\pi N}{A} \int r B_r dA$$

Die zwei Faktoren in den Gleichungen sind auch bekannt als der Kraftfaktor BL :

$$BL = \frac{2\pi N}{A} \int r B_r dA$$

N ist hierbei die Anzahl der Windungen und A die Querschnittsfläche des Kreises.

So weit so gut. Aber wie hängen nun die Geschwindigkeit und die Auslenkung mit der Kraft zusammen? Dazu betrachten wir nochmals die Gleichung $F = BLI$. Diese Gleichung ist nichts anderes als eine gewöhnliche lineare Differentialgleichung 2. Ordnung. Anders geschrieben sieht diese Gleichung in Ortsdarstellung (x) wie folgt aus:

$$M_{ms} a = M_{ms} \dot{v} = M_{ms} \ddot{x} = M_{ms} \frac{d^2 x}{dt^2} = BLI$$

Daraus folgt:

$$\int \dot{v} dv = \int \frac{BLI}{M_{ms}} dt \Leftrightarrow v = \frac{BLI}{M_{ms}} t + C_1$$

Und daraus folgt schließlich:

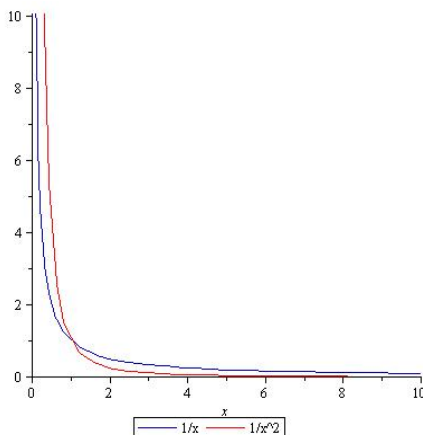
$$\int \dot{x} dx = \frac{BLI}{M_{ms}} \int t dt + C_1 \Leftrightarrow x = \frac{BLI}{M_{ms}} t^2 + C_1 + C_2$$

Die Integrationskonstanten $C_1 + C_2$ können wir in unserem jetzigen einfachen Fall vernachlässigen. Jetzt sehen wir an unserem Ergebnis, dass die Auslenkung proportional zum Quadrat der Zeit ist. Was bedeutet das und wie hängt das mit der Frequenz zusammen?

Nun, die Frequenz ist definiert als ein sich wiederholender Vorgang des Kehrwertes der Periodendauer. Das bedeutet:

$$\omega = \frac{1}{t}$$

Diese Gleichung können wir in unsere Ergebnisse einsetzen und erhalten für die Auslenkung, bzw. die Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Frequenz:



$$x = \frac{BLI}{M_{ms}} \cdot \frac{1}{\omega^2}$$

$$v = \frac{BLI}{M_{ms}} \cdot \frac{1}{\omega}$$

Abbildung 4: Funktionendarstellung

Wir erkennen, dass die Auslenkung proportional zum quadratischen Kehrwert der Frequenz ist. Das bedeutet, dass die Auslenkung zu tiefen Frequenzen hin schnell größer wird, was auch einleuchtet. Weiterhin fällt auf, dass die Geschwindigkeit proportional zum Kehrwert der Frequenz ist. Die Geschwindigkeit nimmt also mit sinkender Frequenz zu.

Das wiederum bedeutet, dass zu jeder Frequenz eine bestimmte Geschwindigkeit gehört. Der Lautsprecher kann also nicht „zu langsam“ spielen, denn ansonsten könnte er die Frequenz nicht wiedergeben. Steigt die Lautstärke, dann steigt auch die Auslenkung und mit ihr die Geschwindigkeit.

Eine reale Messung der Auslenkung einer Membran am Beispiel des NS18-992-4A im Seismic Gehäuse zeigt folgendes Verhalten:

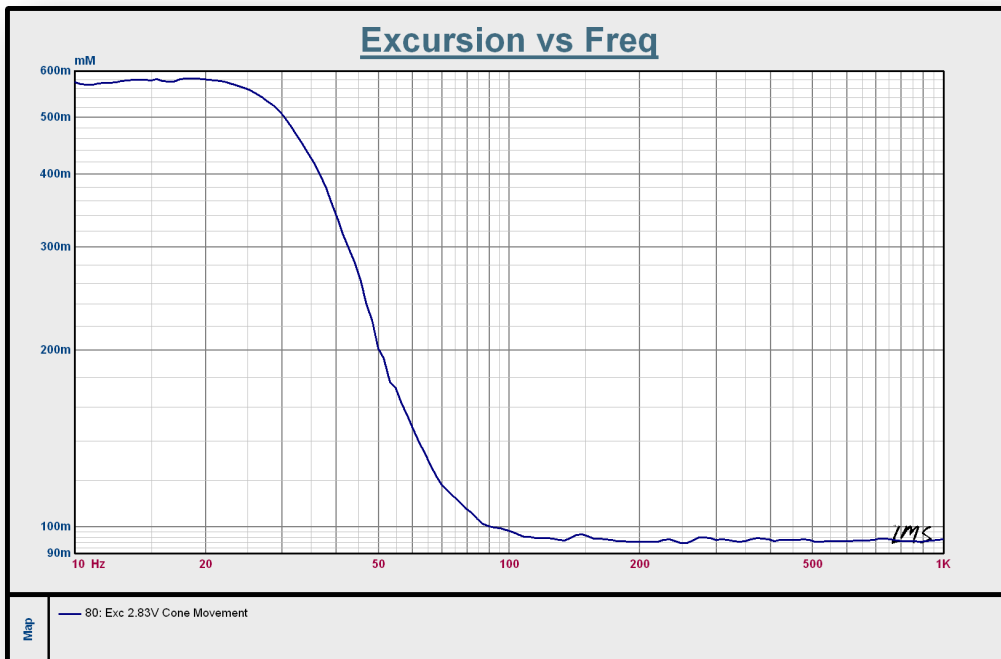


Abbildung 5: gemessene Auslenkung

Gerade haben wir noch errechnet, dass die Auslenkung proportional zum quadratischen Kehrwert der Frequenz ist. Wenn wir das Diagramm betrachten, dann scheint die Theorie nicht mit der Messung übereinzustimmen. Ist die Theorie hier falsch?

Nein, denn wir müssen schon darauf achten, dass die Skalierung stimmt. In der Rechnung sind die Größen linear und nicht logarithmisch. Wenn wir nun die Achsen anpassen, dann ergibt sich folgendes Bild:

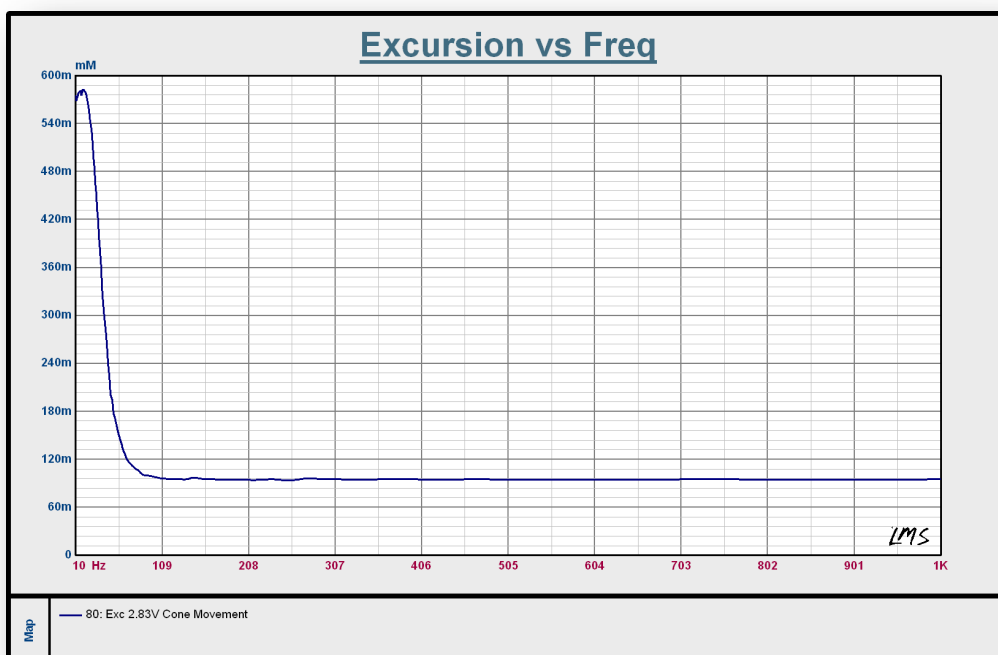


Abbildung 6: umskalierte Messung

Unser sehr einfaches Modell beschreibt diesen Vorgang also recht gut und genau. Nun wollen wir noch die Auslenkung von 3 großen Tieftönern vergleichen. Dazu simulieren wir die drei Probanden in jeweils einem 1000L großen Gehäuse in der unendlichen Schallwand aus:

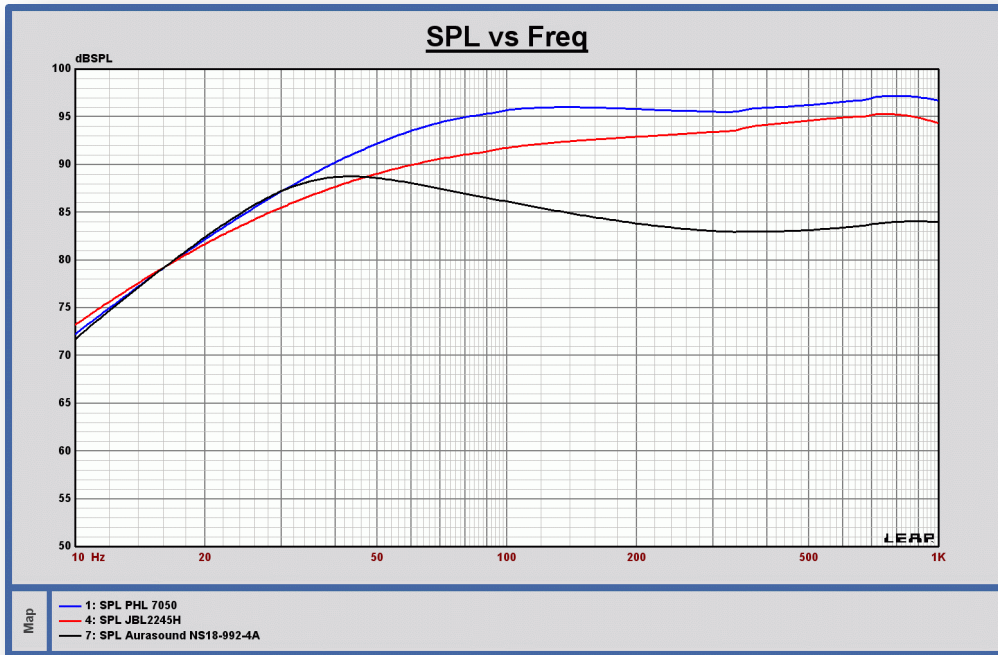


Abbildung 7: Schalldruckverlauf JBL 2245H, PHL 7050 und Aurasound NS18-992-4A

Nun betrachten wir noch die dazugehörigen Auslenkungen der Tieftöner:

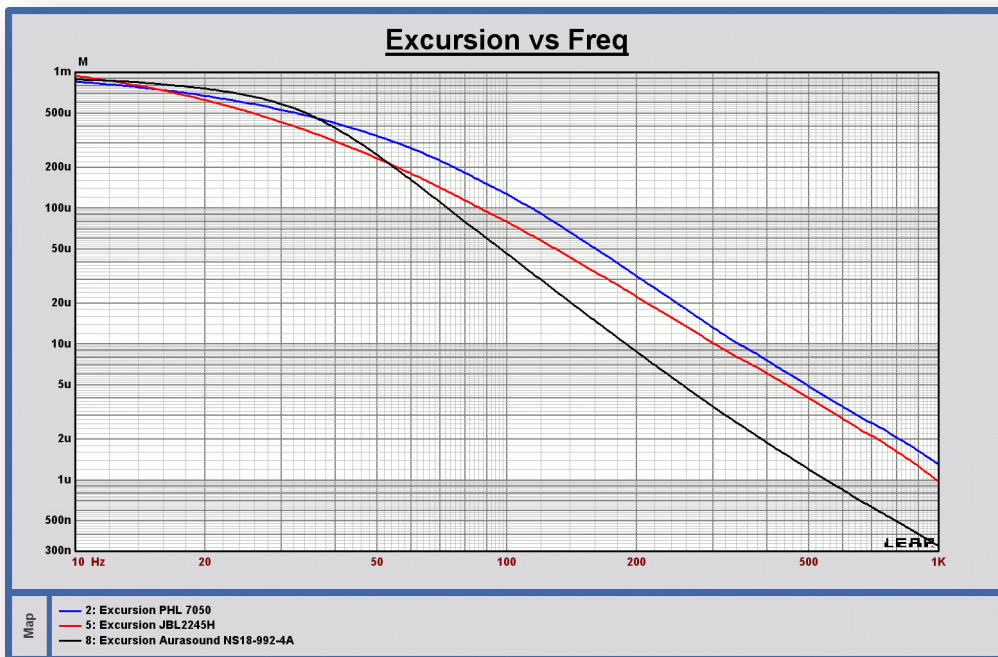


Abbildung 8: Auslenkung 2245H, PHL 7050 und Aurasound NS18-992-4A

Wenn wir den Schalldruckverlauf des PHL und des Aurasound betrachten, dann sehen wir, dass sich die Amplituden im Bereich 10Hz bis 30Hz fast decken. Schauen wir nun auf die Auslenkung, dann decken sich auch diese Kurven. Die geringen Unterschiede resultieren von den Lautstärkeunterschieden und den leicht verschiedenen Membrangrößen:

- PHL 7050	1280 cm ²
- JBL 2245H	1300 cm ²
- Aurasound NS18-992-4A	1164 cm ²

Die Auslenkungen und Geschwindigkeiten sind also bei allen Lautsprechern bei gleicher Membrangröße und Lautstärke um die Resonanzfrequenz gleich. Die Membranmasse bestimmt darüber hinaus die maximal übertragbare höchste Frequenz.

2.2 Der Antrieb

In der Lautsprecherentwicklung gibt es verschiedene Schwingspulenbauarten, die alle ihre Vor- und Nachteile besitzen. Rechts sehen wir die gängigsten Bauformen. Am beliebtesten davon ist die Bauform der Überhangspule (Overhung Coil), obwohl sie aufgrund der Tatsache, dass nie die ganze Spule im Spalt steckt, am ineffektivsten ist.

Andererseits benötigt diese Spulenform keine solch enorm starken und großen Magnetantriebe wie die Unterhangspulen (Underhung Coil). Unterhängige Spulen besitzen darüber hinaus den Vorteil, dass sie sich in ihrem linearen Bereich, einen durchdachten Antrieb vorausgesetzt, immer in einem sehr linearen und homogenen Magnetfeld bewegen. Bewegt man eine Spule in einem Magnetfeld, dann entsteht ein Induktionsstrom. Dieser Strom ist in unserem Fall unerwünscht und ruft parasitäre Effekte wie Verzerrungen hervor.

Durch die kürzere Spule halten sich diese Verzerrungsprodukte, die durch die Induktion über den Strom und der Auslenkung entstehen in Grenzen, denn umso kürzer die Spule ist, umso niedriger ist auch ihre Induktivität.

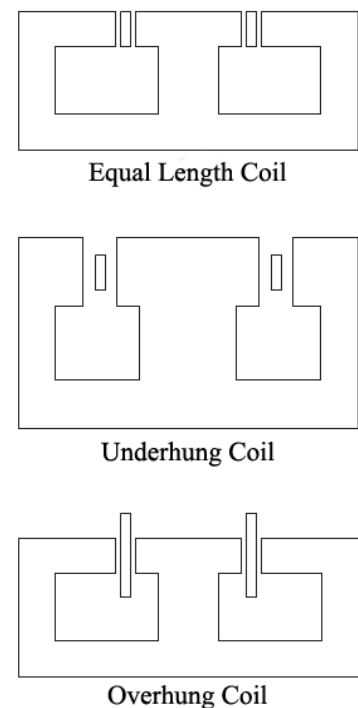


Abbildung 9: verschiedene Spulen

Da der Kraftfaktor nur durch B oder L vergrößert werden kann ist ein starker Motor mit hoher Feldstärke wichtig, denn eine kurze Spule liefert nur einen kleinen Beitrag. Sehr hohe Feldstärken kann man mit einer Neodymlegierung erreichen. Gängig ist die Legierung NdFeB (NeodymFerritBor). Diese Legierung ist in verschiedenen Anreicherungen erhältlich, wobei die Zahl den prozentuellen Neodymanteil angibt, wie z.B. N30, N38SH, N40, N42H, N48... Das silberne Glänzen kommt von dem schützenden Nickelüberzug.

Ein sehr großer Nachteil von hochlegiertem Neodym ist seine schlechte Hitzebeständigkeit. Das Material entmagnetisiert sich bereits bei Temperaturen um 80°C. Es ist daher essentiell ein Magnetsystem zu konstruieren, das eine sehr gute Kühlung aufweist. Im Falle des Aurasound befinden sich die segmentierten Neodymplatten direkt an der Spule, um die hohe und konstante Feldstärke zu erzeugen. Die Neodymplatten sind segmentiert, um Wirbelstromverluste gering zu halten.

Die Kühlung wurde genauso wie der gesamte Antrieb aufwändig per Software optimiert. Wie man in Abbildung 10 sehen kann verjüngt sich die Polkernbohrung nach hinten. Das erzeugt turbulente Verwirbelung und damit Kühlung. Ansonsten würde sich die Luftsäule nur nach oben und unten bewegen.

Desweiteren besitzt der Antrieb noch einen sogenannten Kurzschluss- oder Faradayring, um die Impedanz zu kontrollieren und um Verzerrungen zu verringern. Dieser ist notwendig, denn wenn sich die Spule nach außen bewegt reduziert sich die Anzahl der Windungen die von einem Eisenkern umgeben sind und damit auch die Induktivität der Spule. Bewegt sie sich nach innen dann vergrößert sich die Spuleninduktivität, denn nun hat die ganze Spule einen Eisenkern um sich. Das verursacht Verzerrungen. Besonders Überhangspulen sind davon betroffen, aber auch Unterhangspulen die im Randbereich ihrer linearen Auslenkung bewegt werden. Vor allem wenn die Spule nach innen taucht vergrößert sich die Induktivität.

Theoretisch betrachtet man die Spule als Primärwicklung eines Transformators. Der Kurzschlussring wird daher als sekundäre Wicklung mit nur einer kurzgeschlossenen Windung betrachtet. Wenn wir die sekundäre Wicklung eines Trafo's kurz schließen, dann fließt ein hoher Strom durch Primärwicklung. Durch diesen Effekt „sieht“ die Spannungsversorgung, welche die Primärwicklung (Spule) antreibt, eine niedrigere Impedanz und Induktivität der Spule.

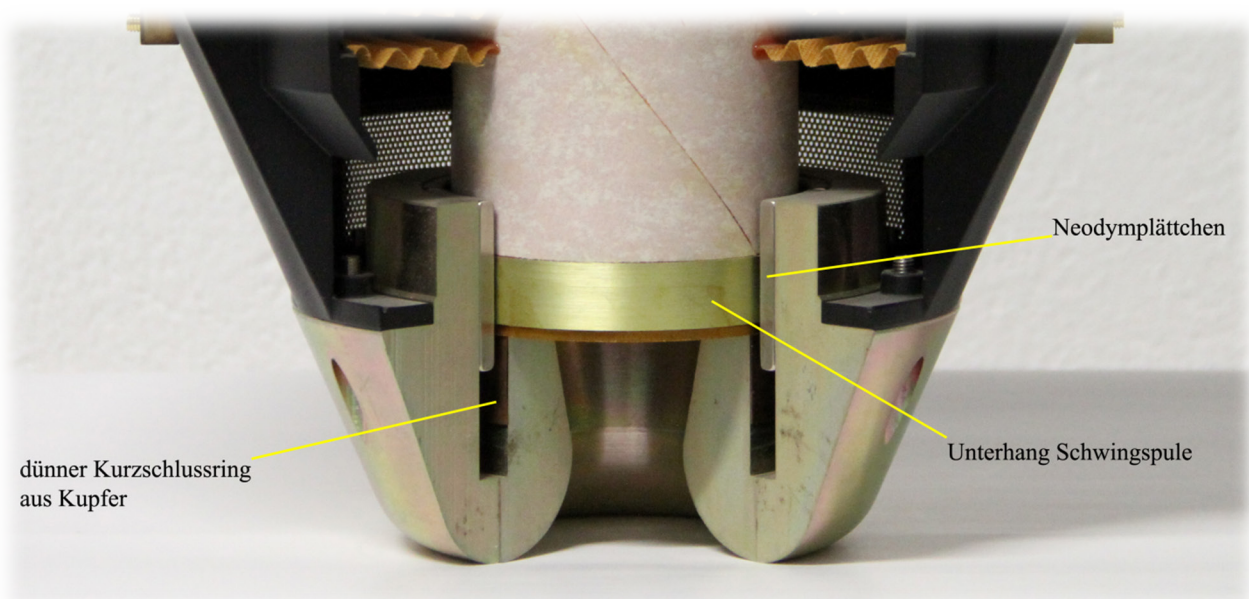


Abbildung 10: Antrieb

Dank der sehr intensiven Arbeit von Wolfgang Klippel ist es heutzutage möglich, die Parameter auch im Großsignalbereich, also bei Bewegung des mechanischen Systems, zu optimieren. Durch die Analyse und anschließender Optimierung lassen sich gezielt Fehler vermeiden, bzw. Verzerrungen reduzieren. Abbildung 11 zeigt den linearen BL Verlauf sowie die sehr niedrige Induktivität des NS18-992-4A, die darüber hinaus auch recht gutmütig verläuft. Man kann hier sehr gut erkennen, dass sich die Induktivität durch den Kurzschlussring beim Eintauchen der Spule in das Magnetsystem verringert.

→ Der Antrieb funktioniert außerordentlich gut

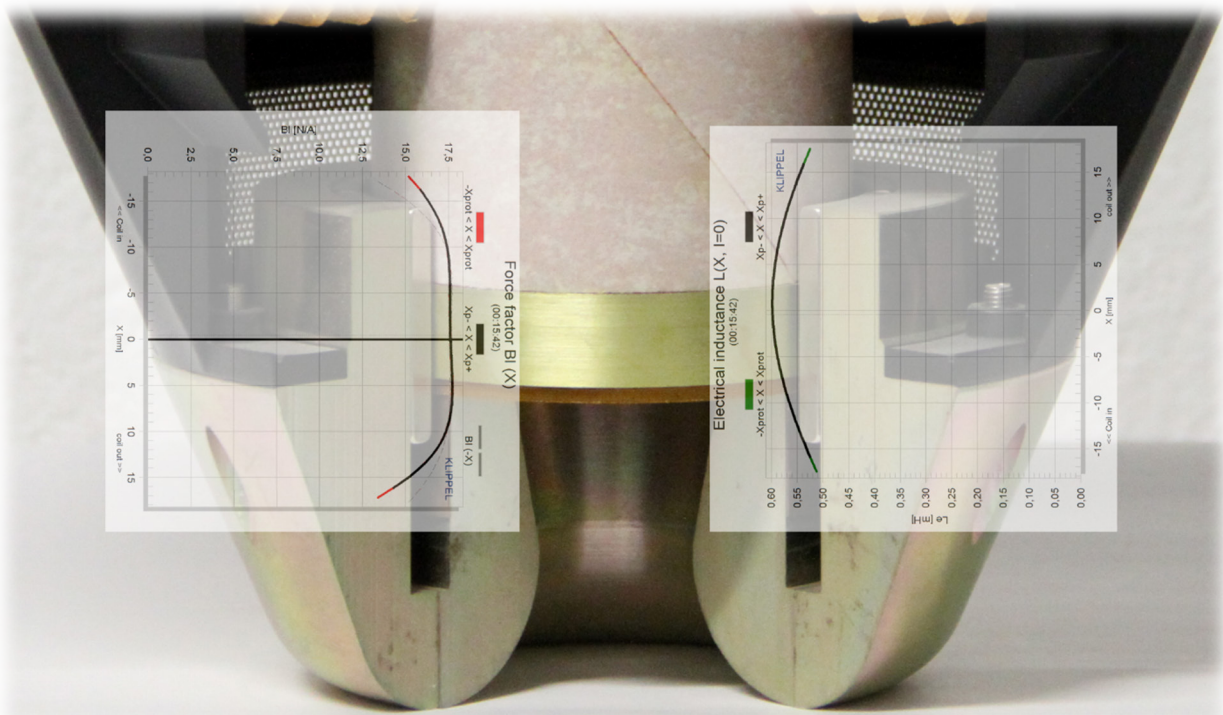


Abbildung 11: Klippelanlyse Antrieb

Neben dem Antrieb ist vor allem noch die Kennlinie der Aufhängung des Systems, bestehend aus Zentrierspinne und Sicke, interessant. Jede Feder besitzt eine Kennlinie. Diese Kennlinie zeigt an, ob sich die Feder bei Ausdehnung linear verhält oder nicht. Linear bedeutet, dass sich die Federhärte unter Ausdehnung nicht ändert. Die Kraft wächst also linear mit der Ausdehnung.

Die Aufhängung des NS18-992-4A besteht aus 3 „Federn“. Zwei Zentrierspinnen und eine große Sicke. Die Zentrierspinnen verhalten sich allgemein recht gutmütig wenn sie richtig zentriert werden während die Sicken oft ein gänzlich anderes Verhalten zeigen. Abbildung 12 zeigt so ein unerwünschtes Verhalten. Während die Federkonstante über der Auslenkung der Spinne sauber symmetrisch verläuft zeigt die Sicke bei Hub in positiver Richtung ein stark asymmetrisches Verhalten. Insgesamt resultiert daraus eine unsymmetrische Federkonstante, die wiederum Verzerrungen verursacht. Es ist nicht leicht ein sauberes symmetrisches Federsystem zu entwickeln. Oft werden deshalb sehr weiche Sicken eingesetzt, da diese nur einen kleinen Teil der Federkonstante ausmachen.

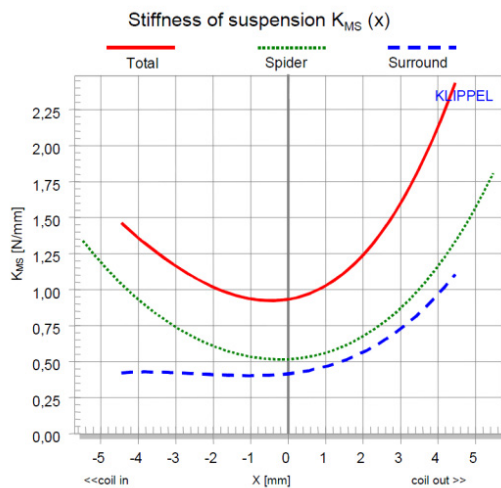
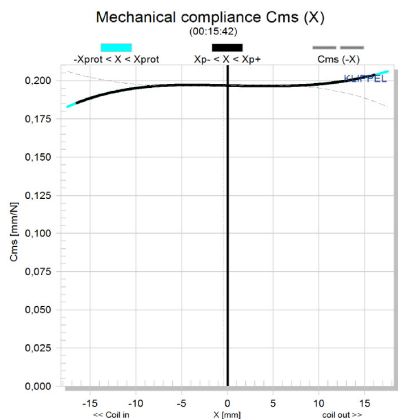


Abbildung 12: Federkonstanten



Mit dem Nachteil, dass diese Lautsprecher zu Schaukelbewegungen des schwingenden Systems neigen, da für die Zentrierung fast nur die Spinne zuständig ist. Heutzutage kann man aber das Verhalten dieses schwingenden Systems simulatorisch sehr gut voraussagen und somit konstruktiv gegensteuern. So ist es auch kein Wunder das die Federkonstante nicht das limitierende und begrenzende Element des NS18-992-4A darstellt. Abbildung 13 zeigt die komplette und sehr symmetrische und lineare reziproke Federkonstante über der Auslenkung.

Abbildung 13: reziproke Federkonstante NS18



Animation 1: Linearer Bereich

Animation 2 demonstriert den großen linearen Bereich der Subwoofer der NS Serie. Der Subwoofer ist also noch nicht am Limit. Der Grund warum die Bewegung nicht harmonisch erscheint liegt an der Animation und deren Komprimierung.



Animation 2 : linearer Bereich mit Stroboskop

Um die Bewegung besser zu analysieren haben wir den Subwoofer zusätzlich noch mit einem Stroboskop illuminiert. Das Resultat kann man sich in Animation 2 betrachten.

Dabei hatte das Stroboskop eine Frequenzdifferenz von 2Hz, so dass man den Eindruck hat, der Woofer bewegt sich ganz langsam.

Bei genauerer Betrachtung sieht man sehr genau, dass sich das gesamte schwingende System sehr harmonisch und sauber bewegt.

In dieser Animation wird einem auch klar, dass sich bei Spannungserhöhung nicht die Periodenzeit, also die Zeit für eine ganze Schwingung ändert, sondern der Woofer nur mehr beschleunigen muss, um dieselbe Strecke in derselben Zeit zurückzulegen.

2.3 Die Membran

Im Folgenden wollen wir die Lautsprechermembran betrachten. Zur Vereinfachung betrachten wir erst einmal eine schwingende Scheibe. Den mathematischen Weg wollen wir an dieser Stelle nur vereinfacht skizzieren, denn um auch so ein einfaches Modell wie dieses zu lösen sind umfangreiche Kenntnisse in der Mathematik nötig. Wir lösen nun die Wellengleichung für unser Randwertproblem in Zylinderkoordinaten für unsere kreisförmige Membran :

$$\Omega := \{(x, y) \mid x^2 + y^2 < 1\} = \{(r \cos(\varphi), r \sin(\varphi)) \mid 0 < r < 1, 0 \leq \varphi < 2\pi\} \quad (1.1)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial r^2} u + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} u + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} u + \lambda u = 0 \quad ; \quad \text{in } \Omega$$

$$u(1, \varphi) = 0 \quad ; \quad \text{für } 0 \leq \varphi < 2\pi$$

Diese Gleichung kann nun in Radial- und Winkelanteil ($u(r, \varphi) = R(r)\Phi(\varphi)$) separiert werden, was zu folgenden Randwertproblemen führt:

1.

$$r^2 \ddot{R} + r \dot{R} + (\lambda r^2 - u) = 0$$

$$R(1) = 0$$

2.

$$\ddot{\Phi} + u\Phi = 0$$

$$\Phi(0) = \Phi(2\pi)$$

Das zweite Problem ist eine relativ einfache und bekannte Differentialgleichung mit den paarweisen orthogonalen Lösungen $\cos(n\varphi)$ und $\sin(n\varphi)$ mit den Eigenwerten $u_n = n^2$. Für die Lösbarkeit des ersten Problems führen wir zuerst eine Variablentransformation $\rho = \sqrt{\lambda}r$ durch, womit sich die Gleichung umschreibt zu:

$$\rho^2 \frac{\partial^2}{\partial \rho^2} R + \rho \frac{\partial}{\partial \rho} R + (\rho^2 - n^2) R = 0$$

Diese Gleichung ist bekannt und wurde nach dem Deutschen Astronomen Friedrich Wilhelm Bessel benannt. Die paarweisen orthogonalen Lösungen der Besselschen Differentialgleichung sind als die Besselschen Funktionen, die üblicherweise als Potenzreihen angegeben werden, bekannt:

$$J_n(\rho) = \left(\frac{\rho}{2}\right)^n \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k!(n+k)!} \left(\frac{\rho}{2}\right)^{2k}$$

Das radiale Randwertproblem liefert demnach die Lösungen

$$R_{mn}(r) = J_n(\sqrt{\lambda_{mn}} r)$$

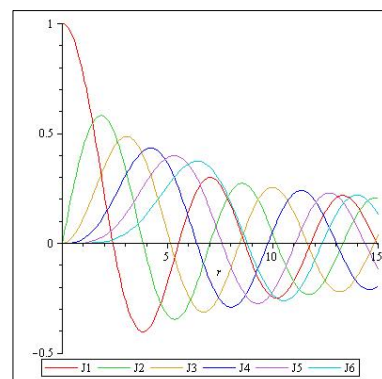


Abbildung 14: Besselfunktionen 1 - 6

Mit diesen Lösungen lassen sich nun diese Schwingungen grafisch darstellen. Ein paar dieser radialen und ringförmigen Moden kann man in der folgenden Animation sehen:



Animation 3: Radiale Moden und Ringmoden auf einer Membran

Das obige einfache Beispiel verdeutlicht die Komplexität dieser Materie. Ein Beispiel eines realen 8 Zoll messenden Lautsprechers mit Papiermembran zeigt die Abbildung 16.

Da die Geometrie einer echten Membran stark von der Form der simplen theoretischen Membran abweicht, ist diese für den allgemeinen Fall nicht anwendbar. Allerdings lässt sich die Modenverteilung numerisch lösen und damit bestimmen.

Heutige Simulationsverfahren können dieses Verhalten zuverlässig und schnell voraussagen. Weiterhin kann man das Verhalten der Modalverteilung durch die Optimierung des schwingenden Systems beeinflussen und so einen ausgeglichenen Schalldruckverlauf im Einsatzbereich erreichen.

Anhand der Laservibrometrie lassen sich die Moden auch direkt am Probanden messen und visualisieren. Dazu findet man auf der Homepage www.Klippel.de fortführende Lektüre.

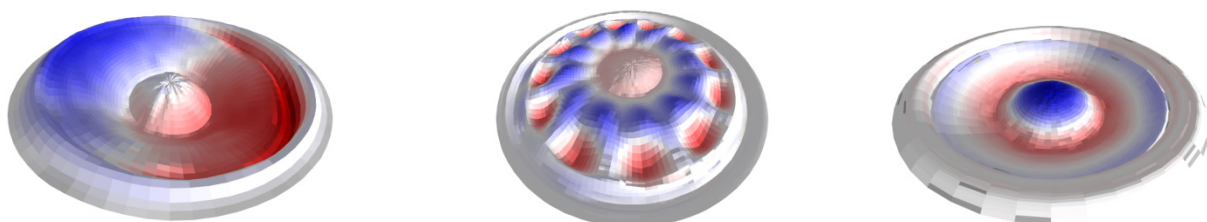


Abbildung 15: Visualisierung

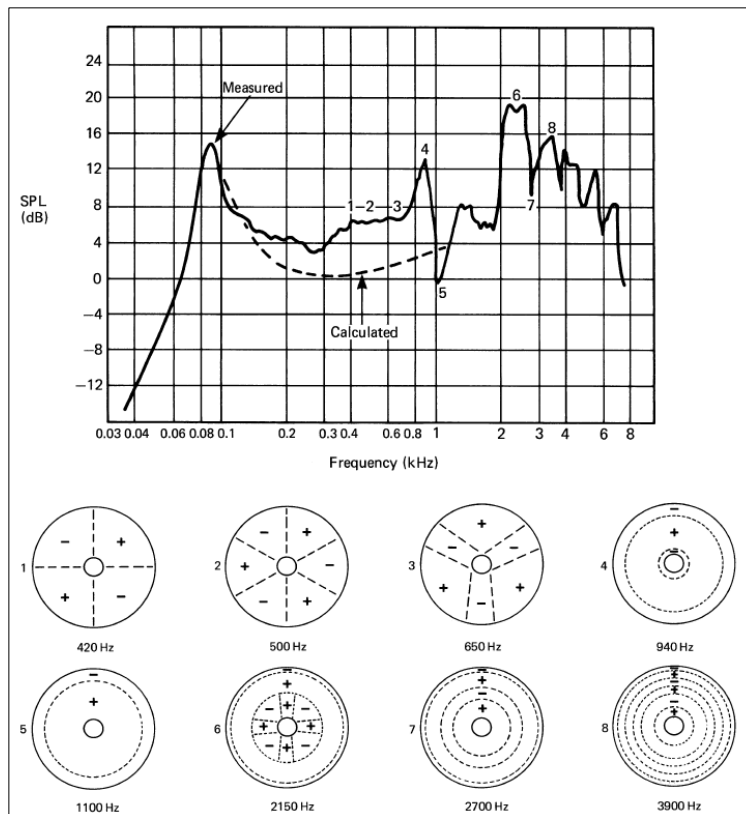


Abbildung 16: Beispiel einer Modenverteilung eines Lautsprechers

2.4 Zusammenfassung

Allgemein ist es so, dass unterhalb der Resonanz die Erregerfrequenz niedrig ist, und damit nur eine geringe Kraft nötig ist um die Masse zu beschleunigen. Dagegen ist die Kraft, die nötig ist um die Feder auszulenken, und damit zu dehnen, groß. In diesem Bereich wird der Lautsprecher also von der Federsteife kontrolliert.

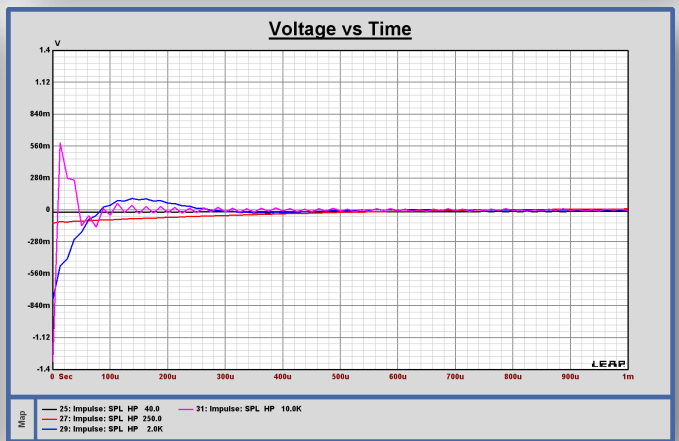
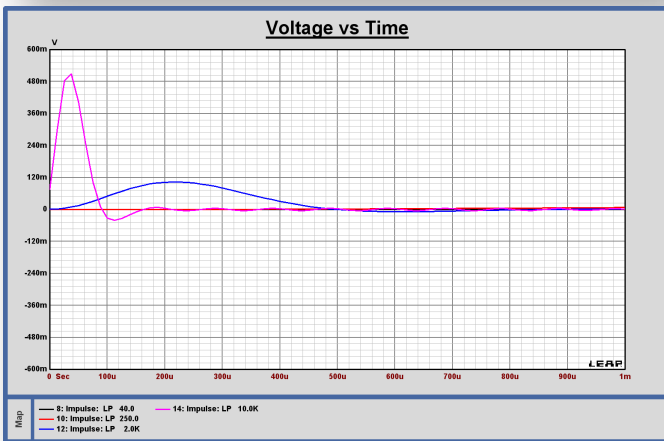
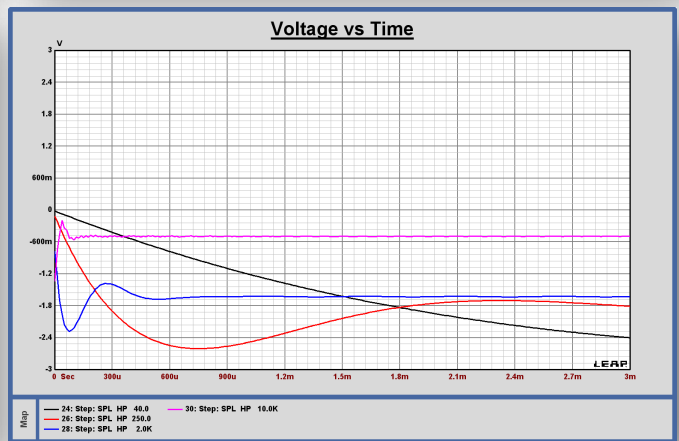
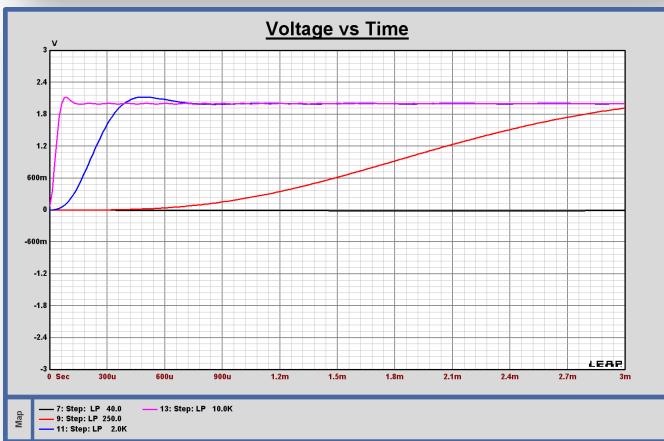
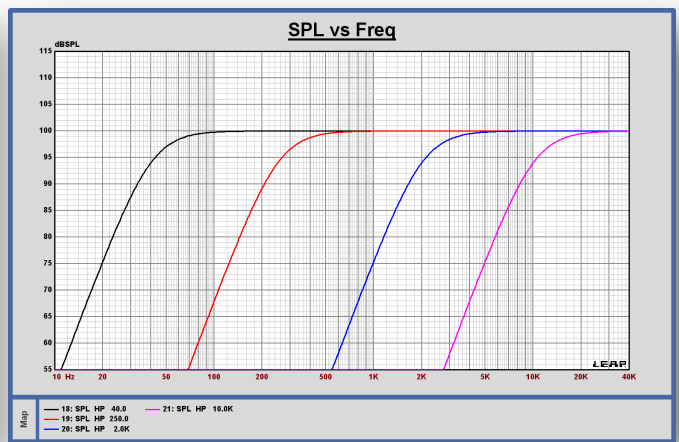
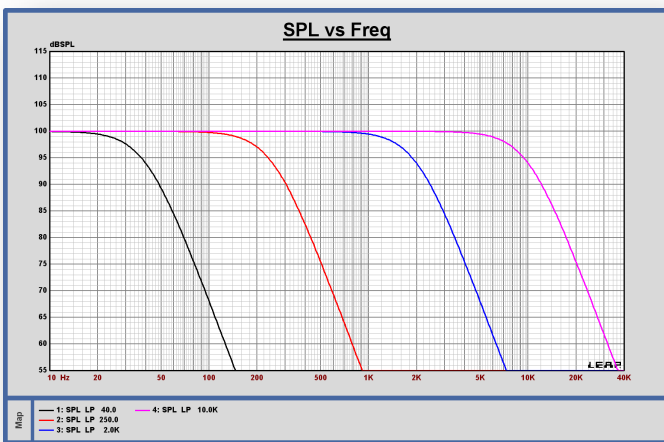
Oberhalb der Resonanz ist die Massenträgheit größer als die Federkraft und deshalb wird in diesem Bereich die Übertragung von der Masse dominiert. Wie bereits erwähnt legt damit die Masse die maximal höchstmögliche Grenzfrequenz fest.

3. Ein kleines bisschen Signaltheorie

3.1 Die Sprungantwort

Die Messtechnik ist ein hervorragendes Werkzeug und Hilfsmittel um Thesen und Theorien zu beweisen oder zu widerlegen. Man benötigt aber auch hier eine gehörige Menge an Know-How und Hintergrundwissen, um die aufgenommenen Daten richtig zu deuten.

Eine oft falsch verstandene Größe ist die sogenannte Sprungantwort, die oft hergenommen wird, um das zeitliche Verhalten zu bewerten. Dabei muss man sich klar machen was genau die „Sprungantwort“ beschreibt. Die Sprungantwort errechnet sich durch Integration aus dem Impuls. Das bedeutet aber auch, dass die Sprungantwort über eine Transformation mit der Amplitude verbunden ist. Hierbei benutzt man die sogenannte Laplacetransformation. Im Folgenden soll verdeutlicht werden, wie die Sprungantwort mit dem Schalldruckverlauf zusammenhängt. Die Simulationen veranschaulichen das.



Auf der linken Seite der Abbildung 17 sehen wir verschiedene Tiefpassfilter 4. Ordnung mit Trennfrequenzen bei 40Hz, 250Hz, 2kHz und 10kHz. Auf der rechten Seite sehen wir Hochpassfilter 4. Ordnung mit denselben Trennfrequenzen.

Die Filter sind farblich markiert, um die Filter in den anderen Diagrammen leichter zu erkennen. Wie man sieht steigt die Sprungantwort bei den Tiefpässen mit größer werdender Bandbreite immer steiler an. Auch die Impulsantwort wird immer spitzer, so wie man sie kennt. Ein ganz ähnliches Verhalten zeigen die Hochpässe.

Es bleibt also die Frage wie die Sprungantwort für Bandpassfilter, wie sie Lautsprecher darstellen, aussehen?

Die Antwort liefert nebenstehende Simulation:

Wie man hier sehr deutlich sieht nähert sich die Sprungantwort in der Mitte mit sehr großer Breitbandigkeit von 20Hz bis 20kHz dem, was man als „Ideal“ bezeichnet.

Ganz anders sieht es bei den beiden anderen Filtern aus.

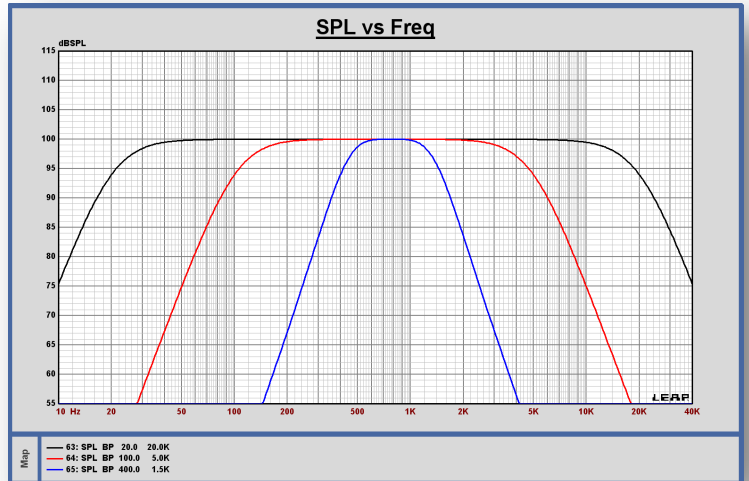
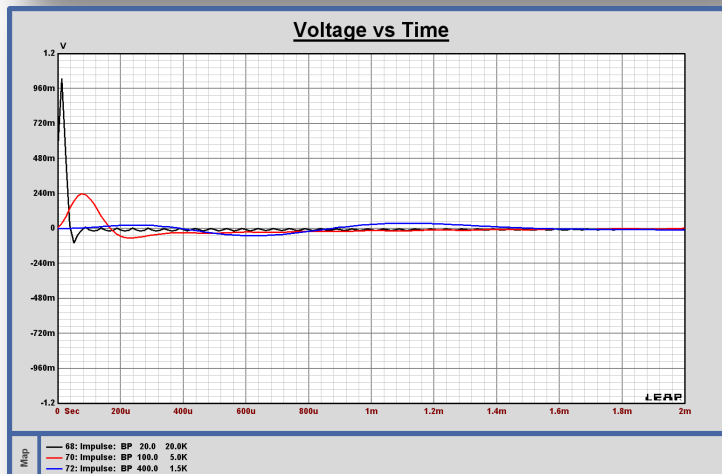
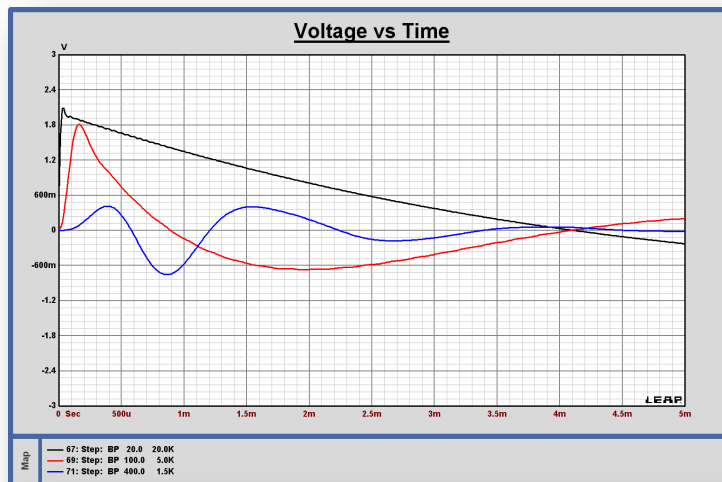


Abbildung 18: Bandpassfilter



Der Vollständigkeit halber soll hier noch das Sprungantwortverhalten anhand von verschiedener Filterordnungen gezeigt werden. Ausgangspunkt sind Tiefpassfilter 2., 3., 4. Und 8. Ordnung bei 1kHz.

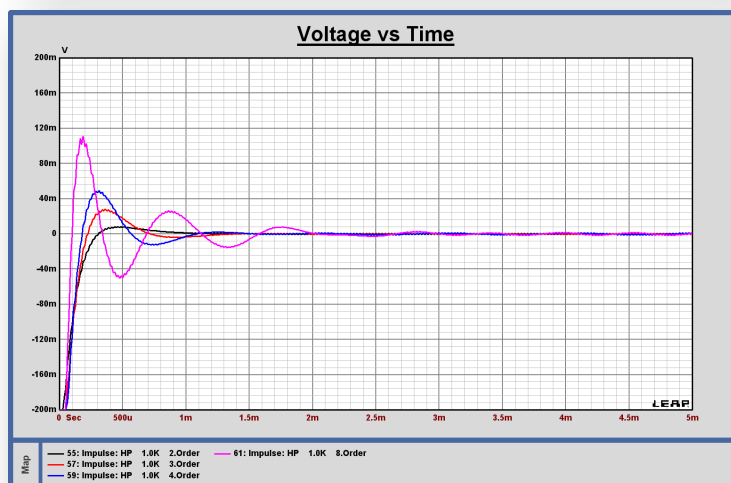
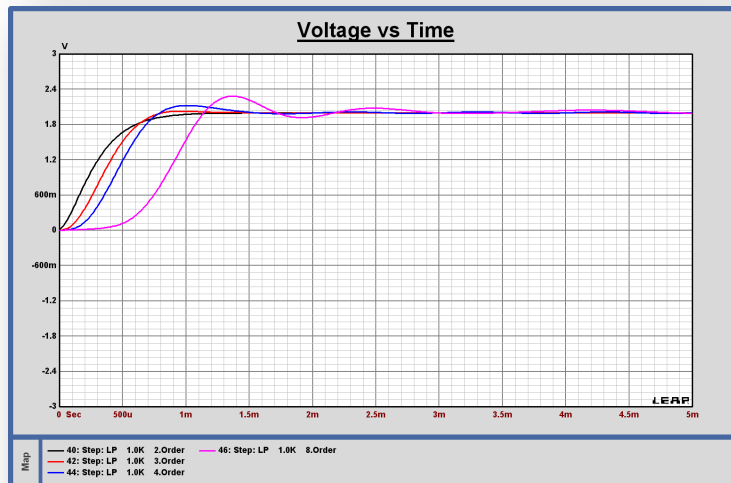
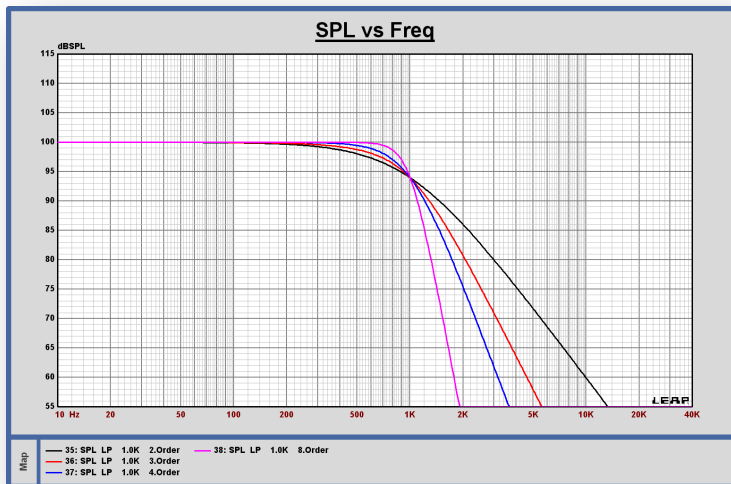


Abbildung 20: Verhalten von verschiedenen Filterordnungen; Sprungantwort Mitte; Impulsantwort unten

Man beachte, dass sich die Simulationen immer nur auf einen Weg beschränken. Kommen mehrere Wege ins Spiel ändert sich die Sachlage. Darauf wollen wir hier aber nicht eingehen. Sind mehrere Wege im Spiel, dann kann man anhand der Sprungantwort leicht die Polarität und die Trennfrequenzen bestimmen. Darauf werden wir allerdings hier nicht mehr darauf eingehen.

3.2 Das Wasserfalldiagramm

Das CSD (Cumulative Spectral Decay), manchmal auch als Wasserfalldiagramm bezeichnet, stellt das zeitliche Verhalten eines Signales, in diesem Fall des Impulses des Lautsprechers, dar. Die Errechnung des CSD's ist eigentlich recht einfach. Man nimmt den gefensterten Impuls und schneidet quasi vom Anfang der Impulsantwort immer mehr ab, bis man das Ende des Fensters erreicht.

Grafisch sieht das folgendermaßen aus. Im ersten Bild sieht man die Impulsantwort. In diesem Bild ist bei ca. 20ms die erste Reflektion in Form einer kleinen Spitze zu sehen. Kurz darauf folgt eine weitere Reflektion.

Diese Reflektionen können wir nun mit einem Fenster ausblenden, so dass die Amplitude ohne Raumeinfluss angezeigt wird. Man zerschneidet sozusagen die Impulsantwort. Technisch realisiert man diese „Kürzung“ mit verschiedenen Filtern.

Zuvor haben wir aber noch den Anfang der Impulsantwort auf den Wert 0 im Zeitbereich gelegt.

Danach erhält man eine Impulsantwort die keine Raumeinflüsse mehr enthält. Der Nachteil ist nun, dass die Auflösung durch die „Fensterung“ schlechter geworden ist. Die Länge des effektiven Fensters hängt direkt mit der niedrigsten Frequenz zusammen, die angezeigt werden kann.

Die tiefste Frequenz die dargestellt werden kann errechnet sich zu:

$$f_{\max} = \frac{1}{t}$$

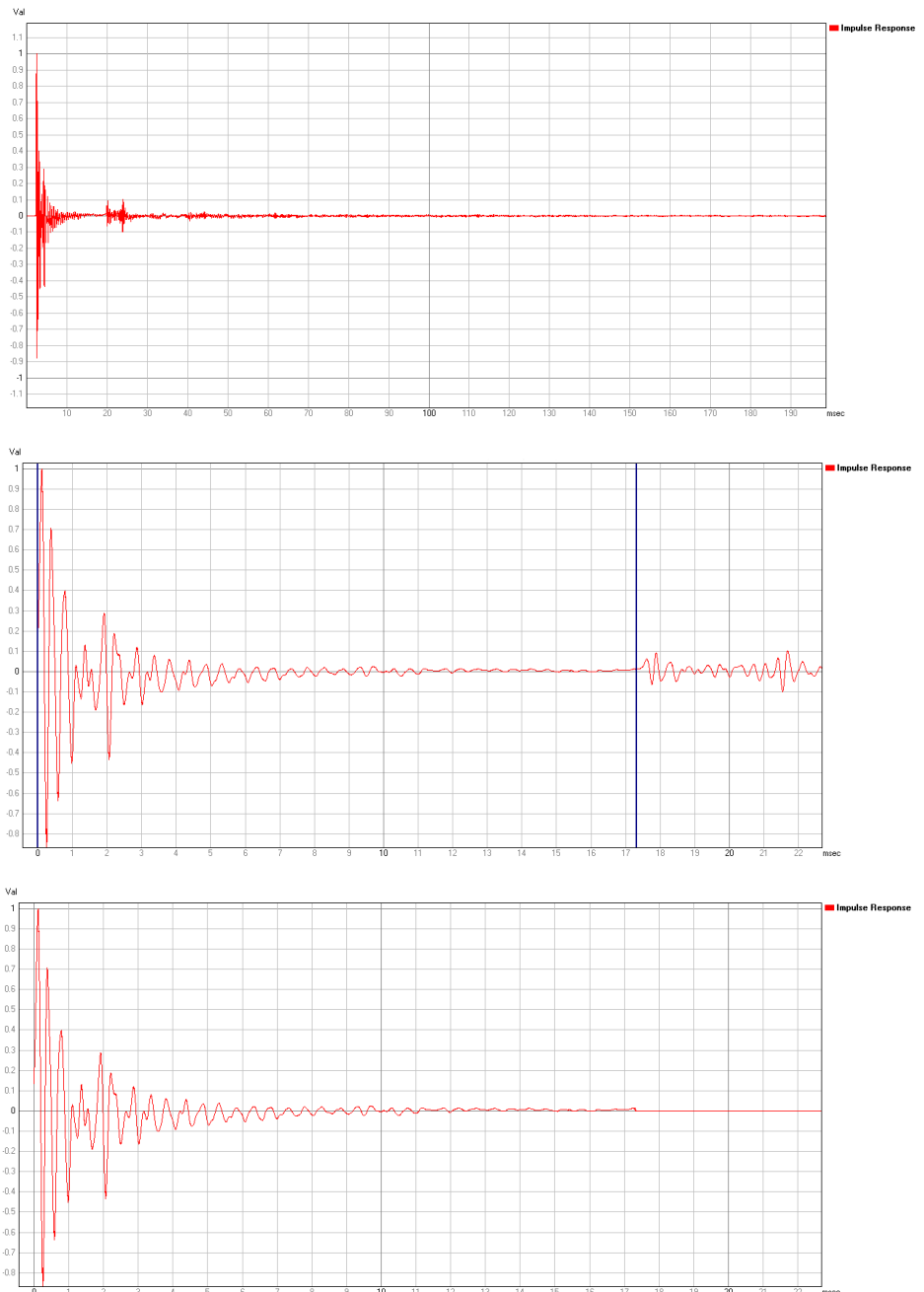


Abbildung 21: Impulsantworten

T ist hier die Länge des Fensters in Sekunden. Wenn wir nun auf das dritte Bild schauen, dann stellen wir fest, dass unser verwertbares Fenster 17,5ms lang ist. Das bedeutet, dass wir bei dieser Messung bis 57Hz hinunter auflösen können. Wir haben also alle 57Hz einen Messpunkt. Die Länge des Fensters hängt natürlich auch direkt mit der Raumgröße zusammen.

Die Raumgröße entspricht hier genau der Wellenlänge, die noch in den Raum passt. Die Formel dazu lautet:

$$\lambda = \frac{c}{f_{\max}}$$

Wenn wir in die Formel für c die Schallgeschwindigkeit ($\sim 340 \frac{m}{s}$) einsetzen, dann erhalten wir als Ergebnis eine Länge von ca. 5.96m, was ziemlich genau einer Kantenlänge unseres Raumes entspricht. In einem normalen Wohnraum mit einer Deckenhöhe von 2,5m ergäbe sich theoretisch eine Auflösung von 136Hz. Da wir aber nur alle 136Hz einen Messpunkt angezeigt bekommen ist die Messung eigentlich erst ab dem zwei bis dreifachen Wert verwertbar, was einer realen Auflösung von ca. 400Hz entspricht.

Das folgende Diagramm soll den Unterschied zwischen einer ganzen und einer gefensterten Messung verdeutlichen.

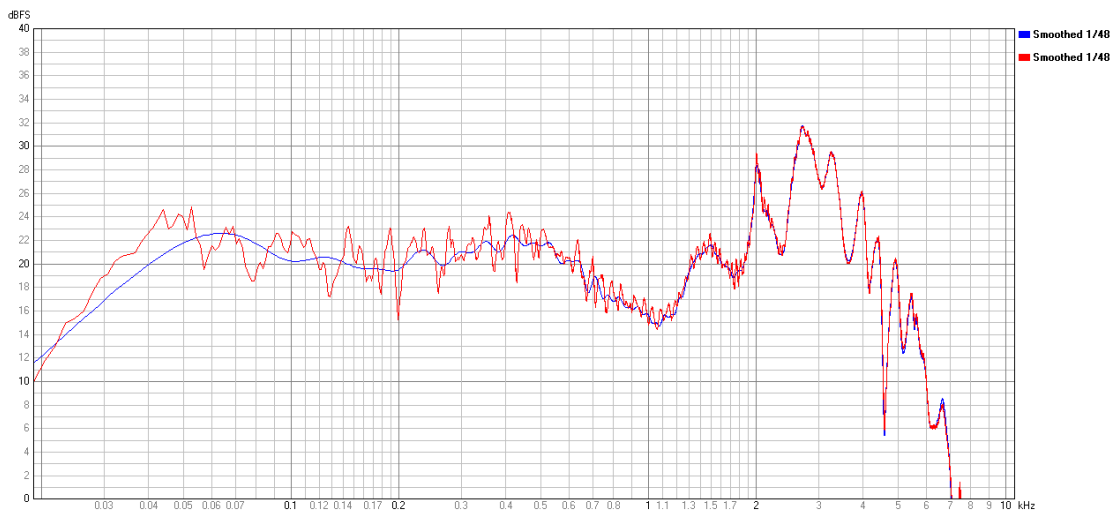
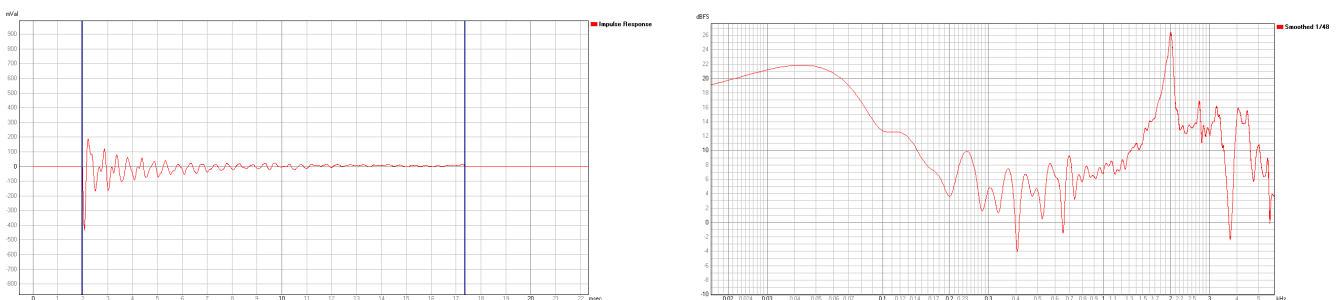


Abbildung 22: gefensterte/ungefensterte Amplitude

Gut zu sehen sind hier die „Dellen“ im Frequenzgang durch die Reflexionen im Raum bei 57Hz, 80Hz, 130Hz usw...

Die Fensterung blendet diese Reflexionen aus, aber schön zu sehen ist der Verlust an Information in Form einer schlechteren Auflösung im Tieftonbereich. Die Kurve ist nun aufgrund mangelnder Messpunkte in diesem Bereich recht glatt.

Wie bereits erwähnt errechnet sich das CSD durch Zerstückelung der gefensterten Impulsantwort. Auch das wollen wir uns einmal genauer anschauen. Wir werden nun die gefensterte Impulsantwort vom Anfang her immer um einige Millisekunden kürzen, bis wir das Ende erreichen. Dabei schauen wir uns gleichzeitig die Änderung der Amplitude an.



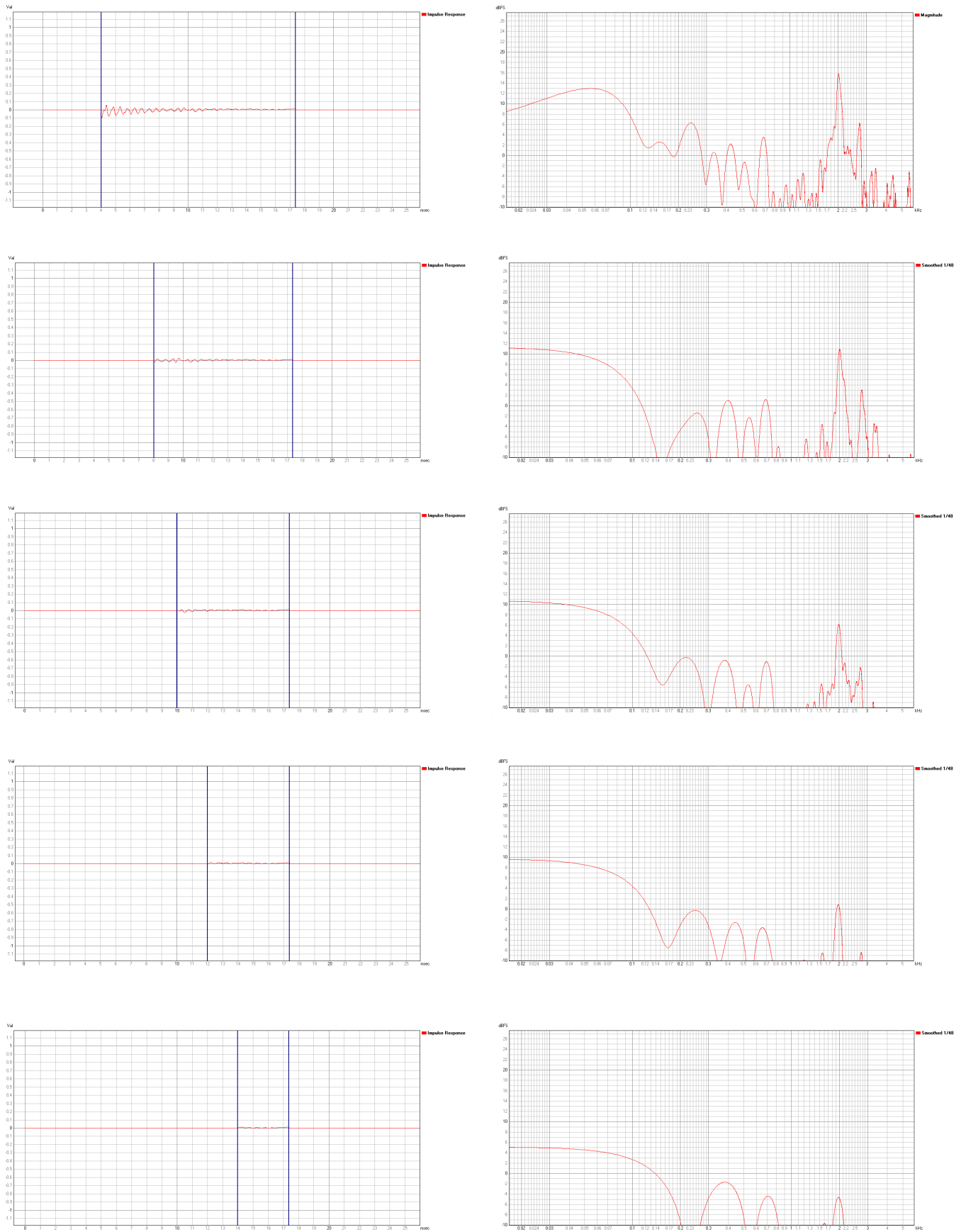


Abbildung 23: Erstellung des CSD

Wenn man sich die Abbildungen oben genauer ansieht, dann wird man feststellen, dass sich die Auflösung zunehmend verschlechtert, was an den immer kleiner werdenden Fensterlängen liegt.

In diesem Fall sieht man im Tieftonbereich immer einen Buckel, was einfach daran liegt, dass wir den Impuls von vorne nach hinten abschneiden. Wir verlieren also immer mehr Hochton. Resonanzen bleiben länger sichtbar, da sie einfach mehr Zeit zum Abklingen benötigen. Zusammengefasst stellt sich das grafisch wie folgt dar:

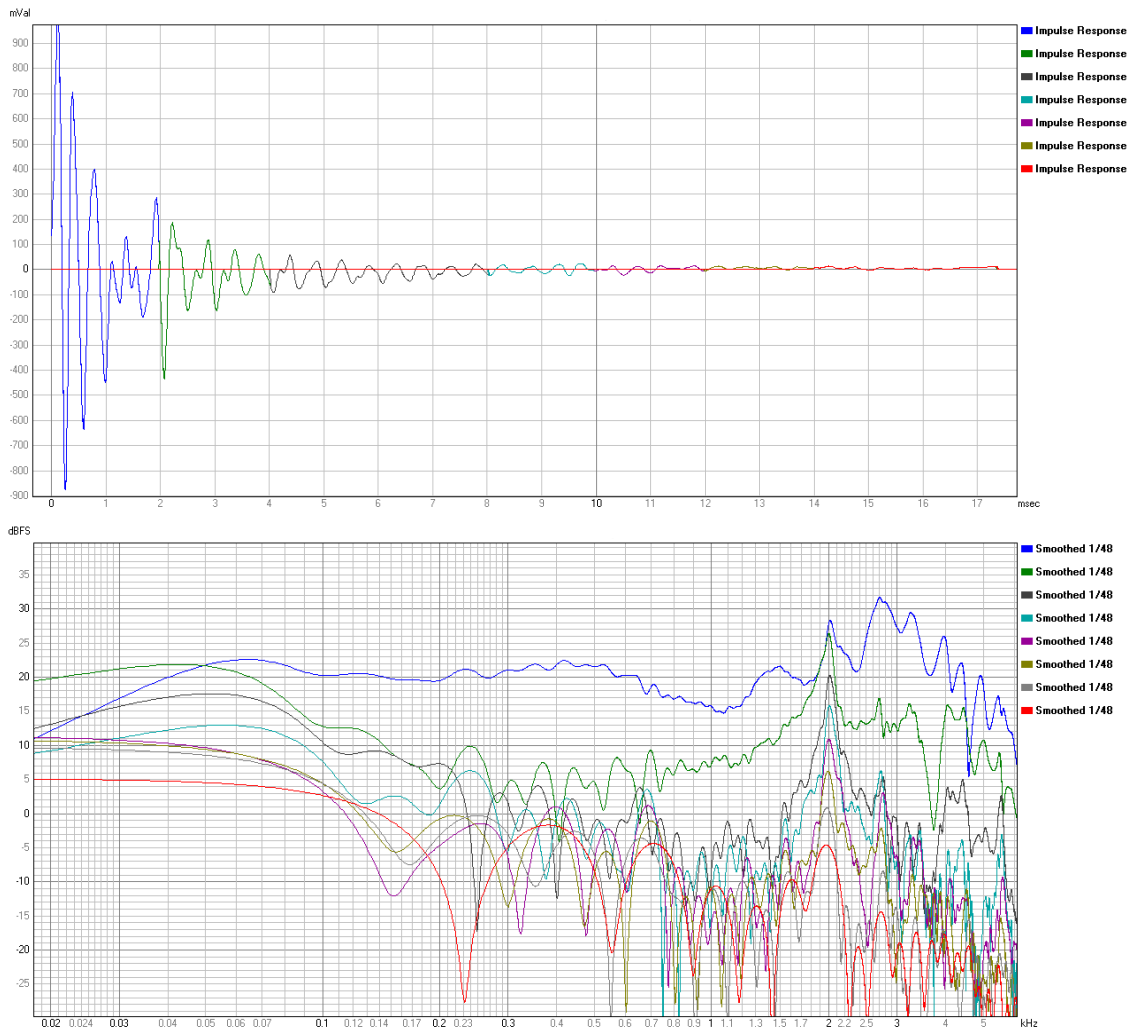


Abbildung 24: Erstellung eines CSD

Die Membranresonanz bei 2Khz ist gut ablesbar, während im Tieftonbereich keine sinnvolle Aussage mehr möglich ist. In den gängigen CSD Ansichten werden die Impulsantworten zwischen 50 und 100mal zerschnitten, was dann entsprechend geläufig aussieht:

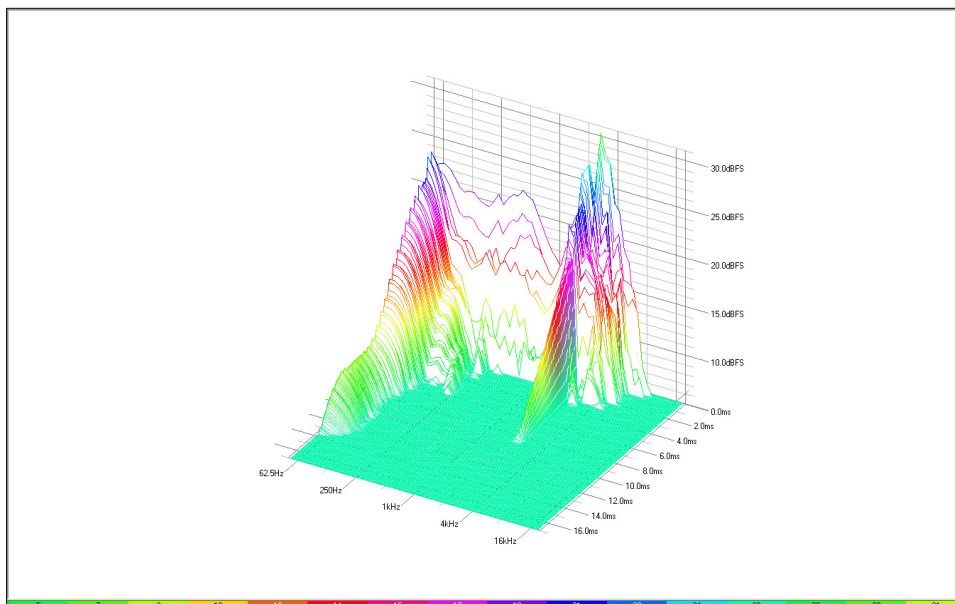


Abbildung 25: gewöhnliche CSD Ansicht

Wie wir nun wissen ist die vermeintlich lange Ausschwingzeit um die 50Hz nicht dem Lautsprecher anzulasten. Man sollte auch bedenken, dass eine Periode eines 50Hz Tones bereits 20ms lang ist. Für Ungeübte wäre es also durchaus einfacher die Darstellung in Perioden anzuzeigen. Eine andere gängige Darstellungsweise ist die folgende:

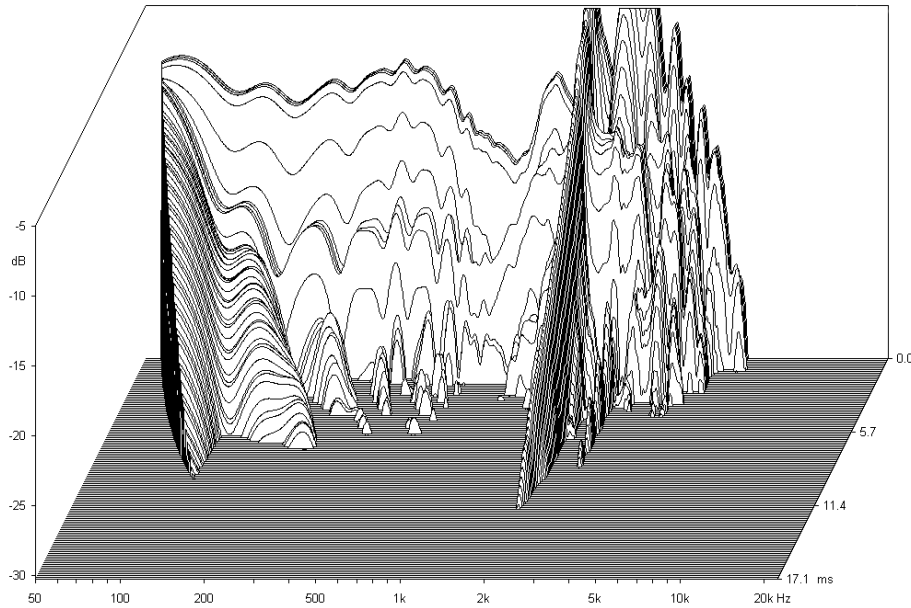


Abbildung 26: Alternative Darstellung des CSD

Man sollte auf die Skalierung achten und auf den angezeigten Frequenz- und Zeitbereich. In Abbildung 26 fällt auf, dass das Wasserfalldiagramm im Tieftonbereich ungewöhnlich gewölbt aussieht. Hier wurde einfach berücksichtigt, dass die untere Grenzfrequenz von der Fensterlänge abhängt und diese Tatsache in der Darstellung gleich mit berücksichtigt.

Wir stellen also fest, dass für eine gute Auflösung im Tieftonbereich ein enorm großes Fenster benötigt wird.

Neben der Darstellung wollen wir der Vollständigkeit wegen noch erwähnen, dass es für die Auswertung bzw. Kürzung des Fensters wie bereits kurz angedeutet verschiedene Filter gibt. Die folgende Abbildung zeigt ein paar Möglichkeiten der Filterung des Fensters, wobei ein Rechteckfilter für das Ende des Fensters gewählt wurde.

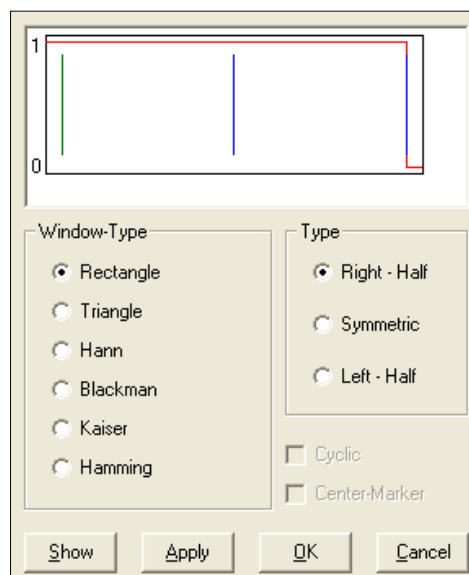


Abbildung 27: verschiedene Filter

Abbildung 28 zeigt den direkten Einfluss des Filters auf den Impuls. In diesem Beispiel wurden ein Rechteckfilter und ein Blackmanfilter benutzt.

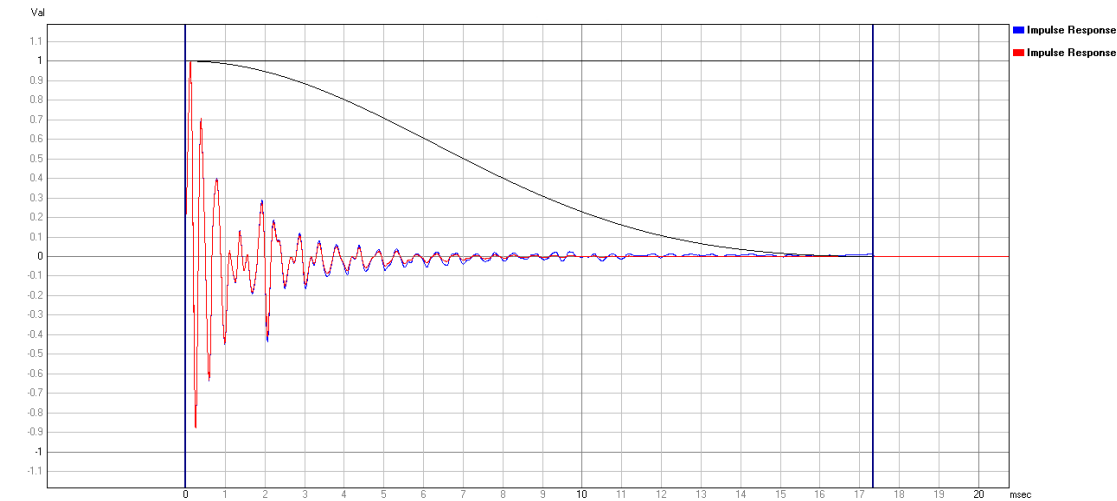


Abbildung 28: verschiedene Fenster

Um die Unterschiede zu verdeutlichen zoomen wir in den Bereich etwas hinein. Deutlich sieht man nun die Unterschiede der Impulse, obwohl nur das Fenster anders gefiltert wurde. Selbstverständlich wirkt sich das auch auf die Darstellung gerade im Tieftonbereich des CSD's aus.

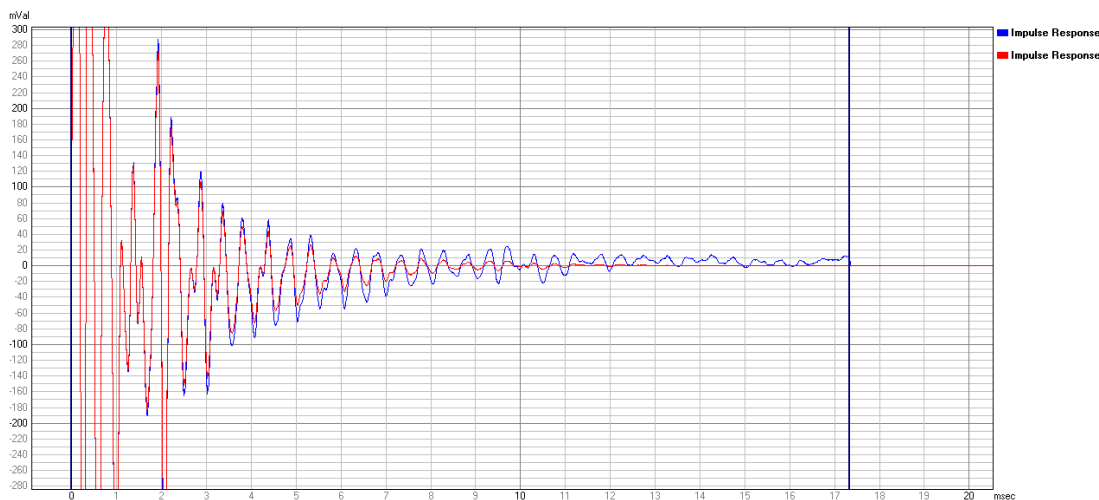
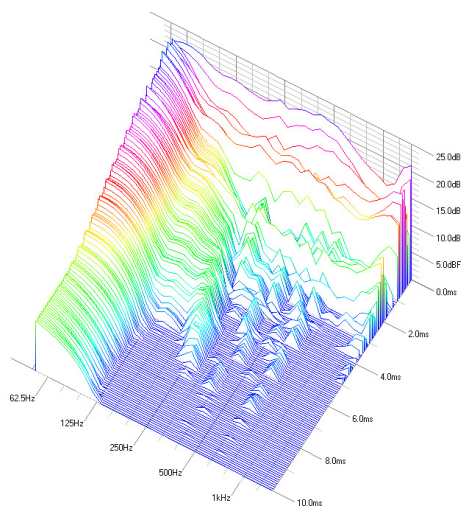


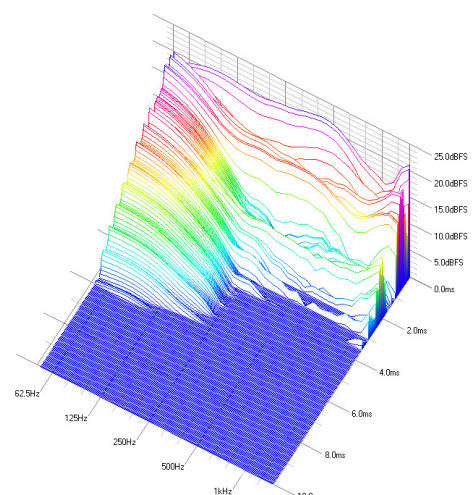
Abbildung 29: verschiedene Filter

Abschließend noch die Resultate der verschiedenen Fenster als Vergleich. Erstaunlich, wenn man bedenkt, dass es sich um eine Messung handelt, welche nur mit einem anderen Fenster dargestellt wird.

Rechteckfilter:



Blackmanfilter:



Neben den Filtern haben wir auch noch die Möglichkeit durch andere Skalierung das CSD sehr unterschiedlich darzustellen, denn wir können die Daten auf verschiedene Arten auf den Achsen „verteilen“.

3.3 Zusammenfassung

Wie wir sehen ist es nicht ganz einfach Daten zu interpretieren, wenn man nicht die Bedingungen kennt. So wird zum Beispiel Subwoofer aufgrund der Sprungfunktion oft ein verzögertes Ausschwingen nachgesagt, obwohl die Sprungantwort wie gezeigt Passbandabhängig ist.

Auch ein CSD, basierend auf einer gefensterten Messung, kann keine exakten Aufschlüsse über das Ausschwingverhalten im Tieftonbereich geben. Vor allem nicht, wenn das Fenster sehr klein ist. Belässt man die Messung ungenfenstert, dann sind die Raumeinflüsse ebenfalls enthalten, was eine Analyse eventuell noch schwieriger macht.

Die Interpretation ist nicht immer sofort einleuchtend, und so sollte man sich immer erst einmal überlegen was man eigentlich sieht, und wie es erstellt wurde. Allzu oft wird nicht einmal die Skalierung beachtet und vorschnell Schlüsse gezogen, die eigentlich nicht haltbar sind.

4. Das TSP Modell

In diesem Kapitel wollen wir die Thiele-Small-Parameter (TSP) und deren Bedeutung bei der Simulation von Gehäusen näher betrachten. Dabei wollen wir auf die einzelnen Parameter und deren Errechnung nicht eingehen, da diese zuhauf in anderer Lektüre zu finden sind.

Vielen Hobbyisten ist nicht klar, was genau die TSP beschreiben, wo die Unterschiede zu den erweiterten Modellen liegen und wo die Parameter versagen.

Sicherlich kennt jeder die Frage welche TSP nun genauer seien, ohne sich zu fragen wovon die Parameter und deren Erstellung eigentlich abhängig sind.

Das Modell der TSP kommt noch aus einer Zeit, in der die Chassis gänzlich anders entwickelt wurden. Da die damalige Verstärkerleistung sehr begrenzt war mussten die Lautsprecher einen hohen Kennschalldruck besitzen. Tiefbass war kein Kriterium. Deshalb baute man Chassis mit kleinen und kurzen Schwingspulen, brettharter Einspannung und extrem leichten Membranen, um das schwingende Gewicht so niedrig wie möglich zu halten. So erhält man eine hohe Sensitivität, aber man benötigt eben auch ein extrem großes Gehäuse, um dem Lautsprecher ein bisschen Bass zu entlocken. Hörner waren deshalb sehr beliebt und quasi nötig. Großer Hub der Membran war nicht möglich, denn wie schon gesagt mussten die Schwingspulen kurz und klein sein.

Heutzutage sind kleine Lautsprecher welche in der Lage sind Tiefbass wiederzugeben modern und beliebt, weshalb die heutigen modernen Chassis für den Heimgebrauch auch einen anderen Aufbau besitzen. Verstärkerleistung ist günstig und beliebig ausreichend verfügbar. Aus diesem Grund sind heutige Chassis mit eher schweren Membranen und weichen Aufhängungen ausgestattet. So sind die Lautsprecher in der Lage aus kleinen Gehäusen erstaunlichen Tiefbass zu liefern. Diese Art von Chassis müssen aber Hubarbeit leisten können um höhere Lautstärken zu erreichen. Und genau hier fängt das Problem an...

4.1 Das einfache TSP Modell

Vielen Simulationsprogrammen reicht die Eingabe von nur ein paar Parametern um das passende Gehäuse zu finden. Diese Programme rechnen intern mit dem ursprünglichen TSP Modell, welches einen Resonator um die Resonanz in dem simulierten Gehäuse in einer unendlichen Schallwand beschreibt. Dieses Modell können wir ganz einfach mit einer Impedanzmessung errechnen, falls das Membrangewicht bekannt ist. Der Mms (Moving Mass Air Load) Wert, welcher neben dem Gewicht des schwingenden Systems auch die Luftmasse berücksichtigt, lässt sich recht einfach aus dem Mmd (Moving Mass Diaphragm) Wert errechnen. Die Angaben der Hersteller sind diesbezüglich recht verlässlich.

Eine andere Möglichkeit besteht darin, die Membran mit einem bekannten Gewicht, wie beispielsweise Knetmasse etc., zu beschweren, und eine zweite Impedanzmessung zu erstellen. Auch daraus kann man verlässlich die Parameter erstellen. Das Problem hierbei ist aber, dass die Membran bei zu hohem Zusatzgewicht durchhängt oder gar zu Taumelbewegung neigt, während die Messung mit zu geringem Gewicht kaum Differenz zu der normalen Messung zeigt. Ein anderes Problem ist die Federkennlinie des schwingenden Systems, die wie wir bereit wissen nicht linear ist.

Messungen mit verschiedenen Zusatzgewichten können verschiedenen Parameter hervorbringen.

Welche Werte stimmen aber nun? Nun im Standard Modell stimmen alle Werte, denn das Modell nimmt Cms als konstanten Wert an, woraufhin sich die anderen Werte anpassen müssen. Das Modell kann einen Lautsprecher also nur bedingt repräsentieren und zeigt an unserem einfachen Beispiel sehr schön die Grenzen auf.

Die folgende Abbildung zeigt die simulierte Impedanz anhand der TSP und die gemessene Impedanz des Chassis. Man kann hier erkennen, dass das Model den Lautsprecher um die Resonanz herum recht gut beschreibt. Über 50Hz ist aber keine Übereinstimmung mehr zu finden. Die Kurven weichen hier erheblich voneinander ab, was unkorrekte Ergebnisse liefern kann.

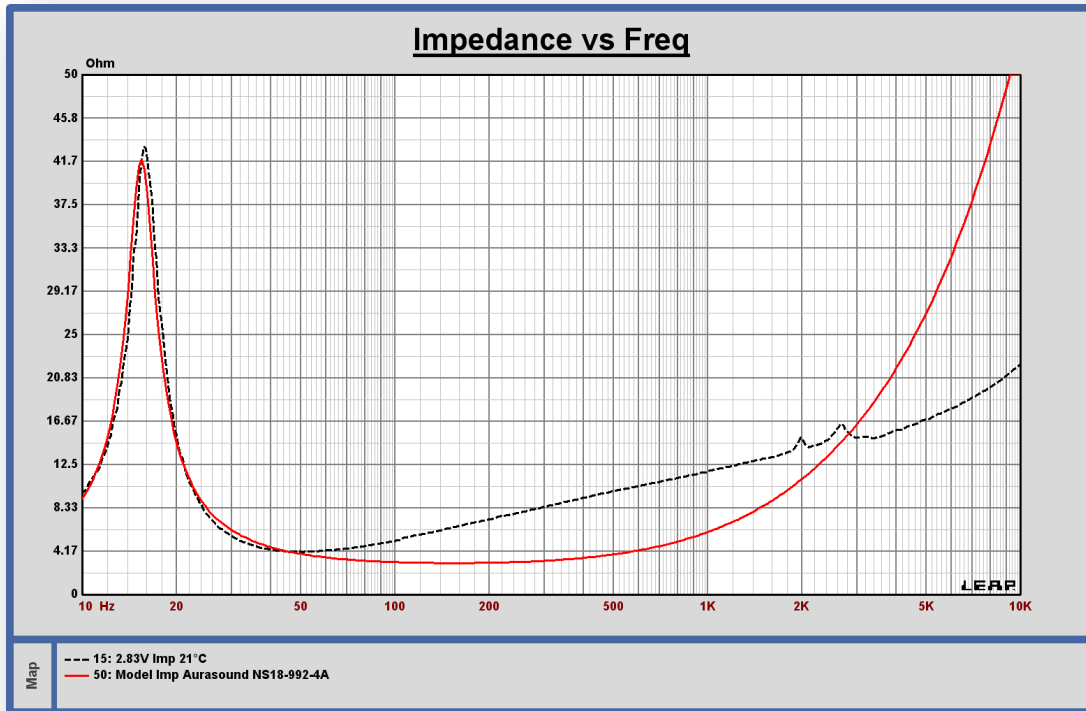


Abbildung 30: Impedanzvergleich Messung - Standard TSP Model Simulation

Zur Veranschaulichung wurde im Folgenden eine gemessene Impedanzkurve mit bekanntem Mmd in Leap importiert und die TSP im Standardmodell berechnet.

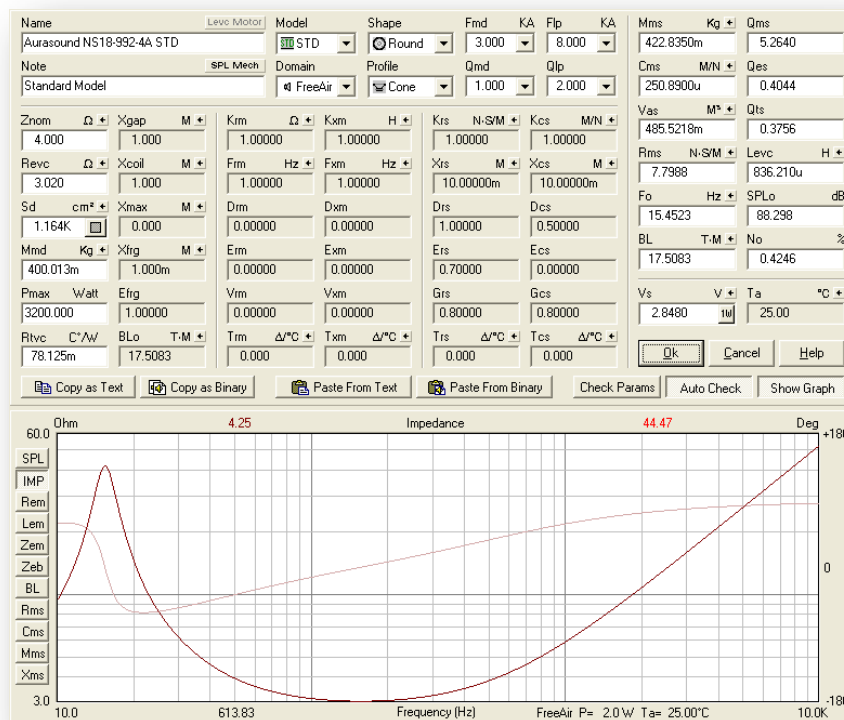
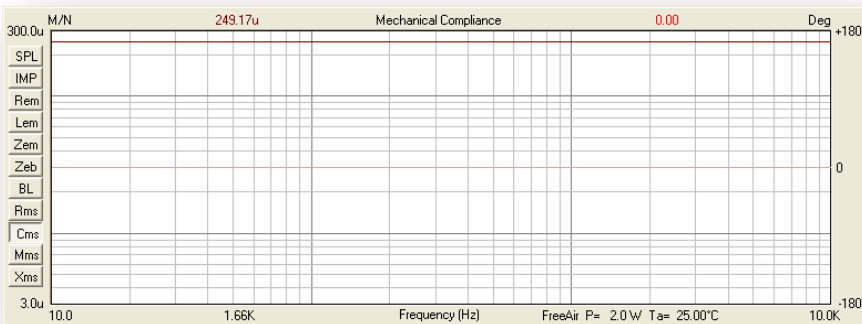
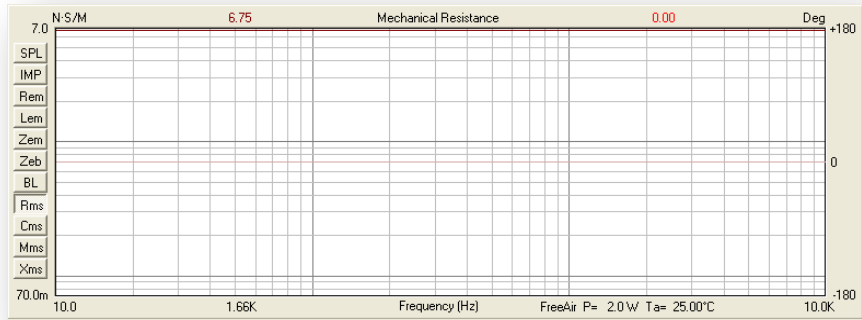
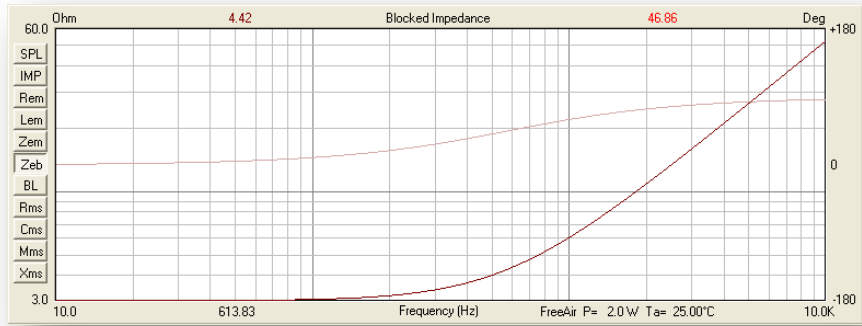
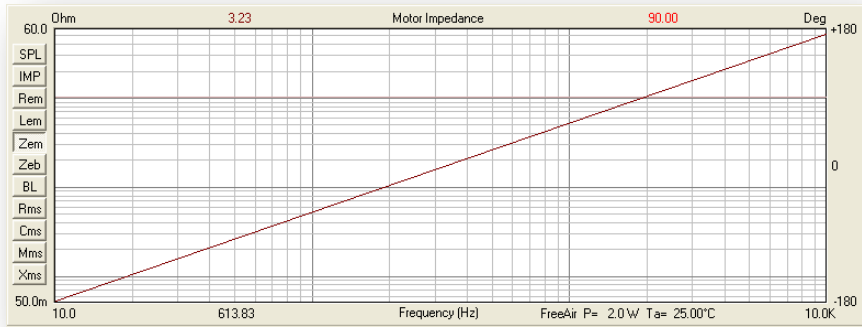
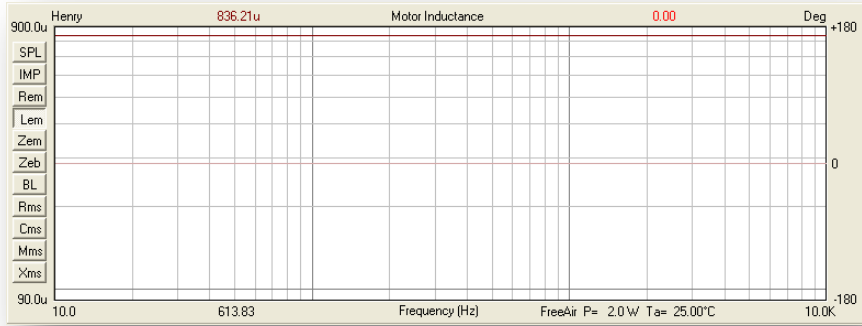
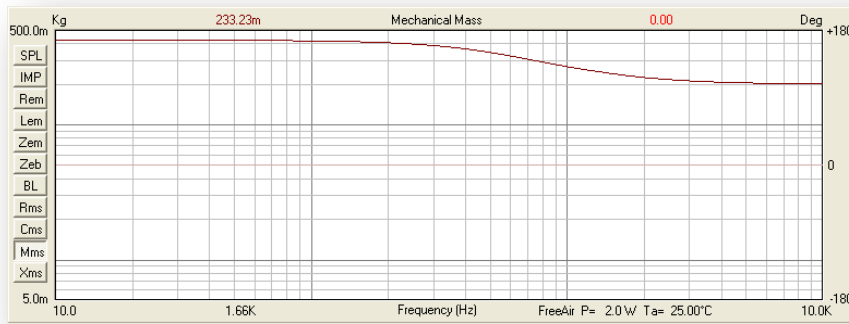


Abbildung 31: Standard TSP Modell





Man kann in den Diagrammen deutlich sehen, dass alle Parameter bis auf Zeb (blocked Impedance) und Mms linear verlaufen, was bei realen Chassis nicht der Fall ist. Die Mms Kennlinie folgt einer gemittelten Funktion, die gute Übereinstimmungen zeigt.

4.2 Das erweiterte TSP Modell

Neben den sehr einfachen Modellen gibt es mittlerweile auch zahlreiche Programme, die mit einem erweiterten Modell arbeiten. Meist werden für solche Modelle neben den üblichen TSP noch ein paar Induktivitätswerte bei verschiedenen Frequenzen verlangt, um die Impedanzkurve im Mittelhochtonbereich besser anzupassen. Die Programme arbeiten schon um einiges besser und liefern auch bessere und realistischere Werte.

Auch das erste Leap Modell arbeitet so ähnlich. Für dieses Modell importiert man die gemessene Impedanzkurve und ergänzt diese um ein paar Parameter wie Mmd, Spulenlänge und Luftspalttiefe etc.

Danach lässt sich die simulierte Impedanz mit der gemessenen vergleichen. In der folgenden Abbildung ist das um ein vielfach besseres Ergebnis zu sehen.

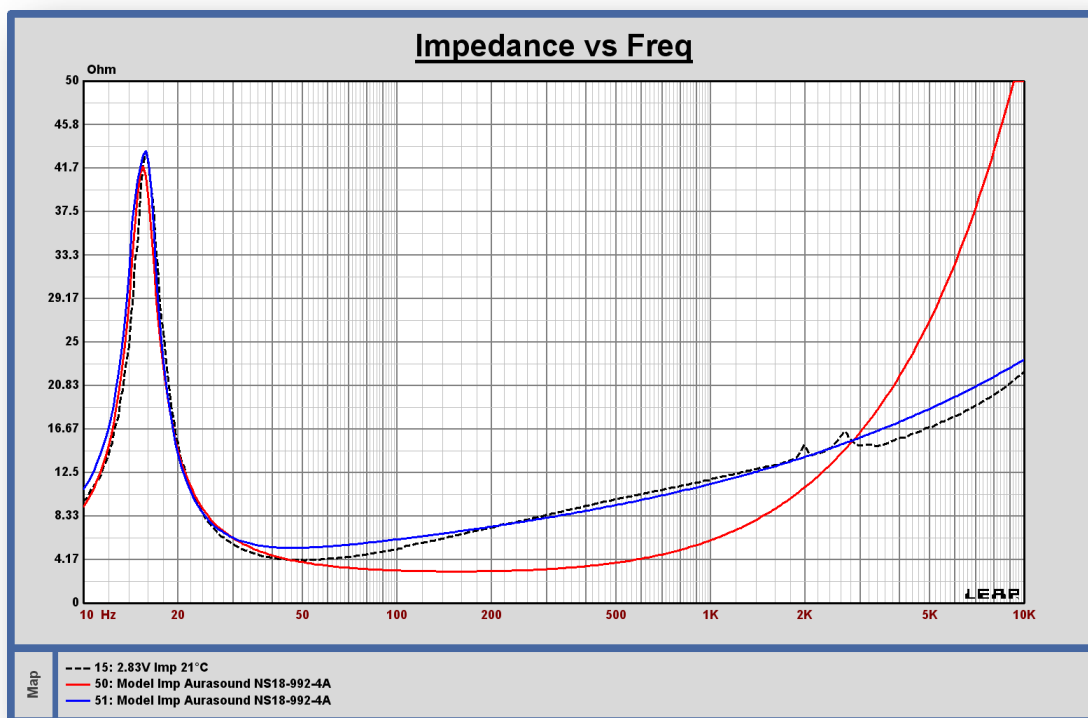


Abbildung 32: Erweitertes TSP Modell

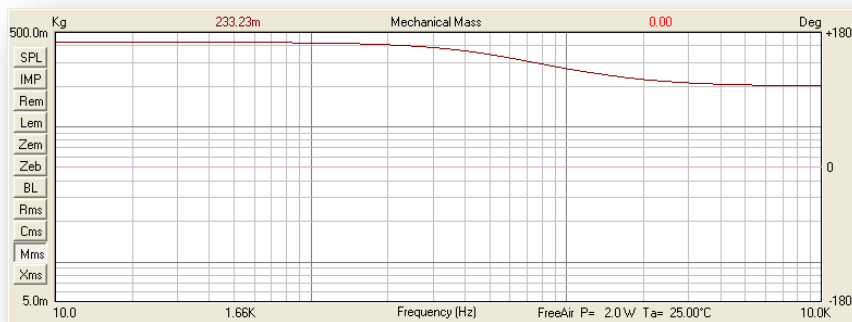
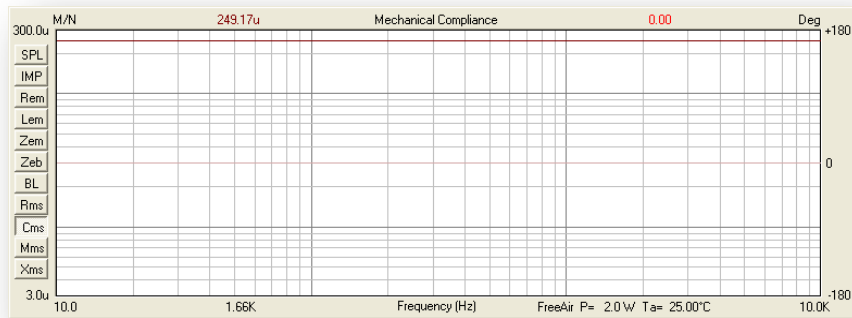
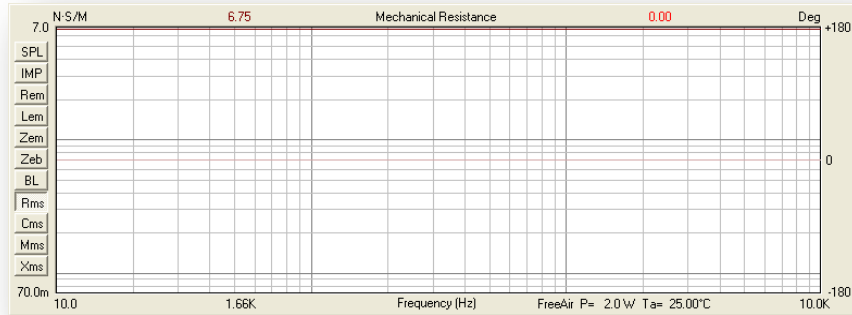
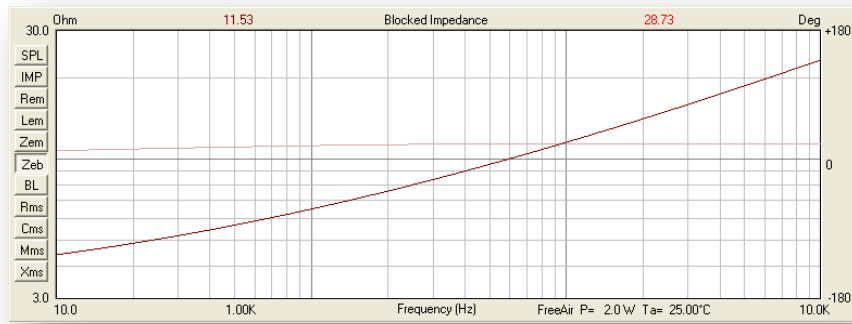


Abbildung 33: erweitertes TSP Modell

Es fällt auf, dass neben den Standard Parametern nun auch andere Werte aktiv sind. Dies sind die Werte, die das Modell erweitern und letztendlich verfeinern. Man sollte aber bei diesem Modell bedenken, dass es recht schnell an Grenzen stößt. Kompression und viele andere Effekte, die Spannungs- oder Temperatur- oder Hubabhängig sind lassen sich nicht erfassen.

Dennoch kann man mit diesem Modell recht zuverlässige Ergebnisse erhalten. Allerdings sollte man die Limitationen im Hinterkopf behalten und das in die Überlegungen mit Einfließen lassen.

4.3 Das Leap Modell

Leap, die Standard Simulationssoftware der Industrie, besitzt seit der Version 5 ein eigenes Modell, das von Grund auf anders „aufgebaut“ ist. Umso mehr ein Modell erweitert wird, umso mehr muss man es mit Daten füttern. Leap verlangt bei diesem Modell mehrere Impedanzkurven mit unterschiedlichen Spannungen und unterschiedlichen Temperaturen. Auch die einzelnen Spannungsverläufe an den Klemmen müssen importiert werden.

Die Impedanzen, die aus den Spannungs- und Stromverläufen errechnet werden, müssen dabei im Konstant-Spannungs-Verfahren ermittelt werden.

Danach versucht die Software durch Iteration die mechanischen, elektrischen und akustischen Parameter zu erstellen, und vergleicht dieses Modell gleichzeitig mit den vorliegenden gemessenen Daten.

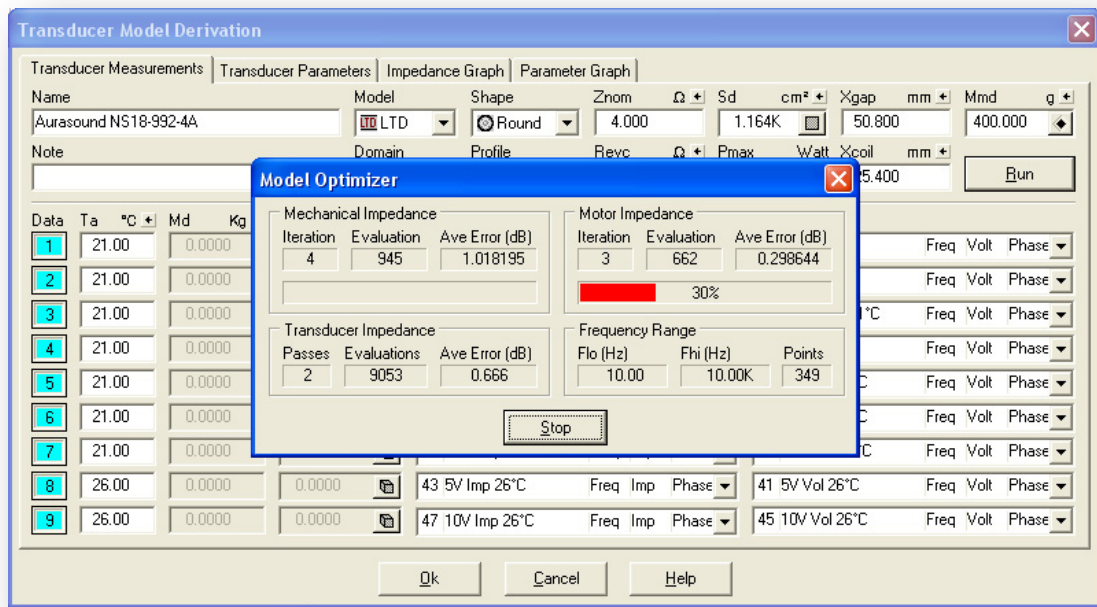


Abbildung 34: Iteration

Auf diese Weise erstellt man ein Modell, das vollständig nichtlinear ist, und auch Effekte wie Kompression etc. zuverlässig simulieren kann. Das Modell ist aber zu diesem Zeitpunkt noch nicht ganz vollständig. Zu guter Letzt wird der Lautsprecher noch in ein bekanntes Gehäuse eingebaut und mit der Simulation verglichen.

Nach dem Abgleich mit der Simulation hat man nun ein Modell des Chassis erstellt, das man nun virtuell in verschiedene Gehäuse setzen und sehr präzise Simulationen erstellen kann.

Die folgenden Abbildungen veranschaulichen das Modell und zeigen die gemessenen und die simulierten Impedanzen des Chassis bei verschiedenen Temperaturen und Spannungen. Die einzigen Abweichungen, die man erkennen kann liegen im Bereich um 10kHz und sind sehr klein.

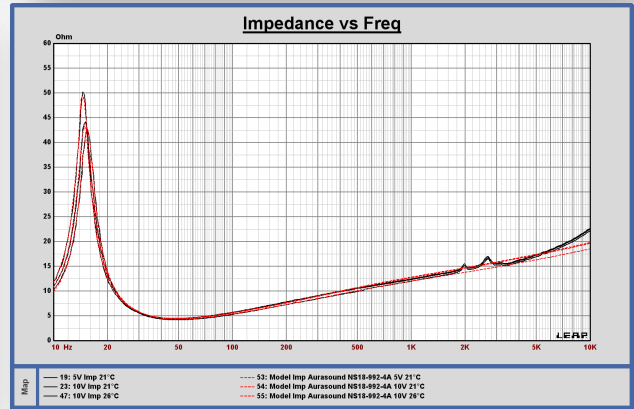
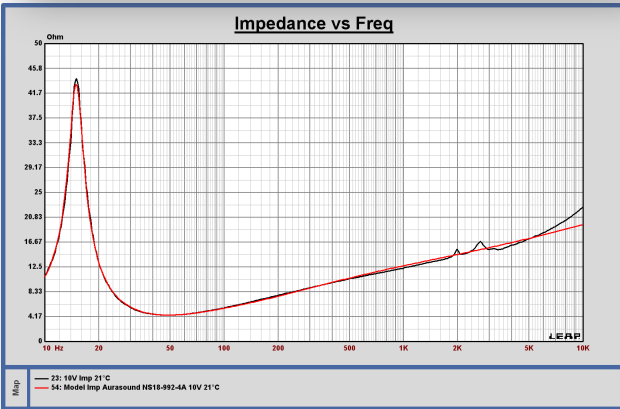
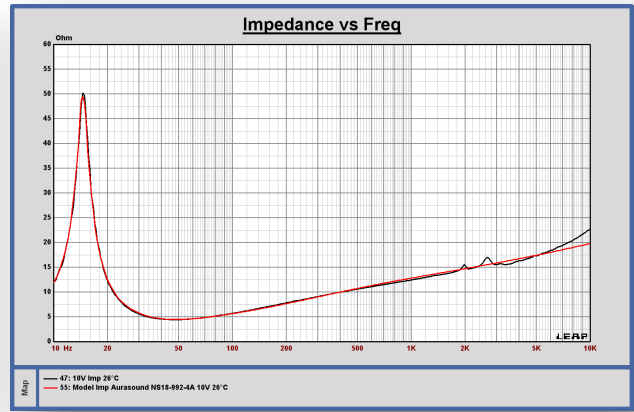
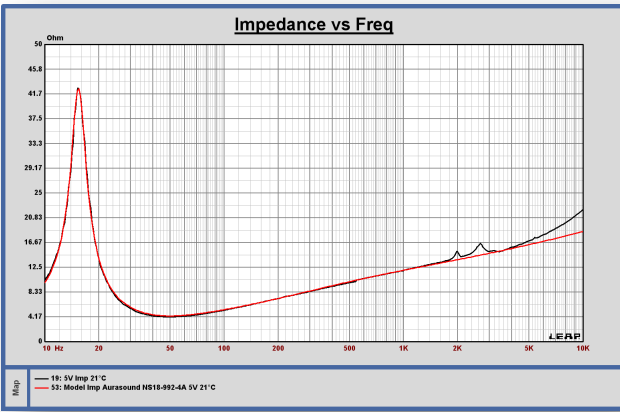
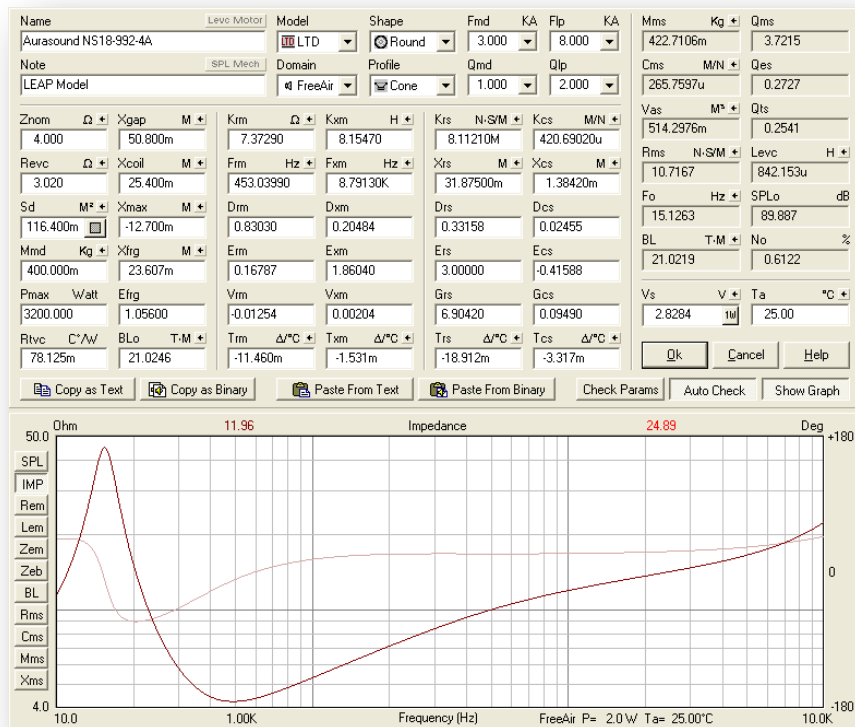
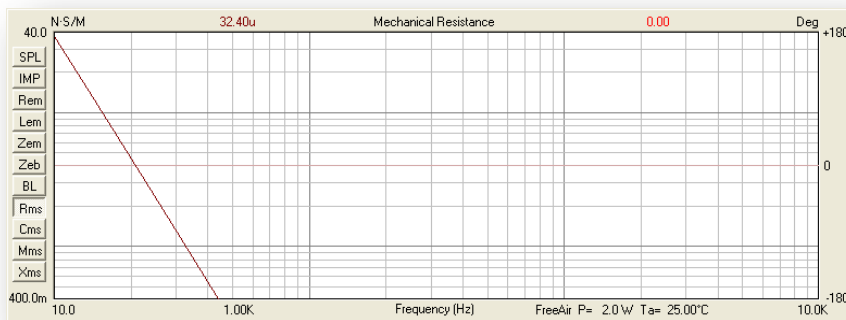
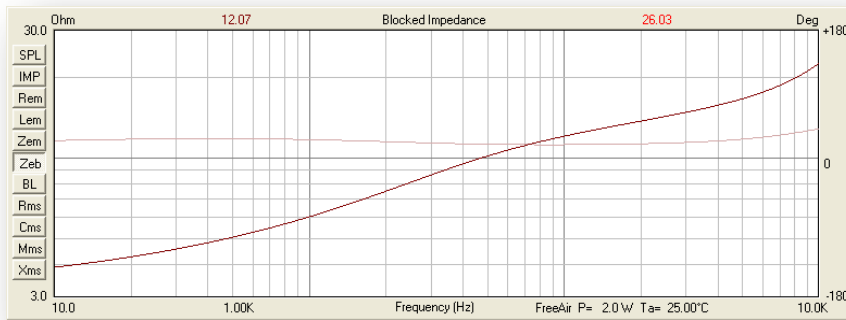
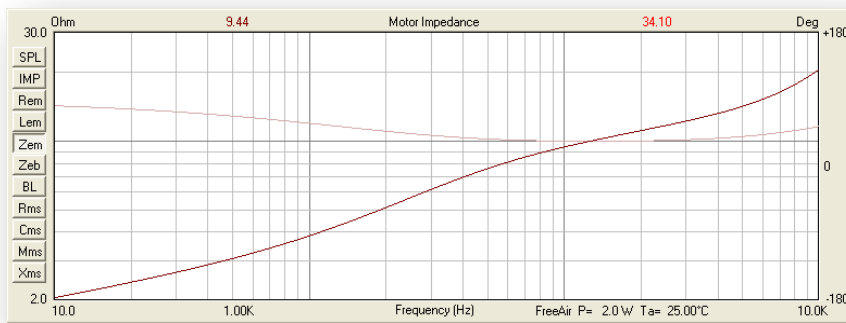
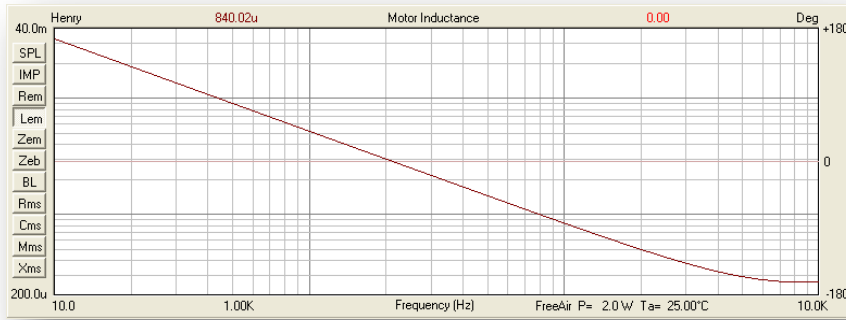
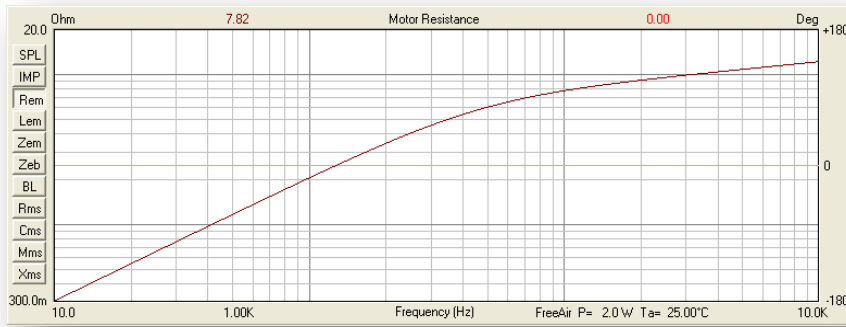


Abbildung 35: Vergleich Simulation – gemessene Impedanz

Auch hier wollen wir das Modell und die daraus berechneten Parameter betrachten.





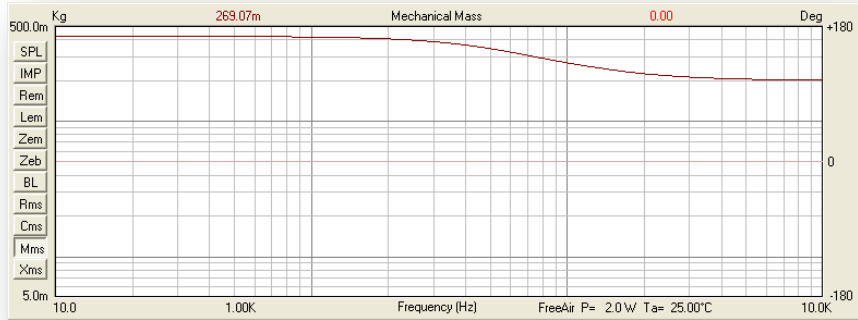
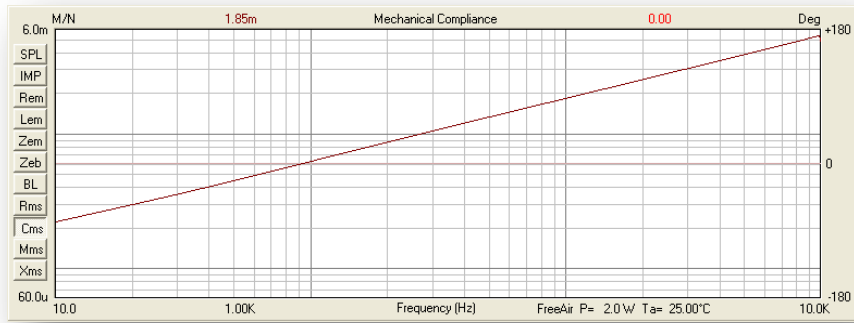


Abbildung 36: Leap Modell

Nun sehen wir sehr gut, dass sich die einzelnen Parameter alles andere als linear verhalten. Interessant an diesem Modell ist die Tatsache, dass man nun die Parameteränderung durch Spannungserhöhung oder Temperaturerhöhung betrachten kann (rechts unten).

Name	Levco Motor	Model	Shape	Fmd	KA	Flp	KA	Mms	Kg	Qms		
Aurasound NS18-992-4A	LTD	Round	3.000	8.000	422.7106m	3.7215						
Note	SPL/Mech	Domain	Profile	Qmd	Qlp	Cms	M/N	Qes				
LEAP Model	FreeAir	Cone	1.000	2.000	265.7597u	0.2727						
Znom	Xgap	Krm	Kxm	H	Krs	N-S/M	Kcs	M/N	Vas	M ³	Qts	
4.000	50.800m	7.37290	8.15470		8.11210M	420.69020u	514.2976m	0.2541				
Revc	Xcoil	Frm	Fxm	Hz	Xrs	M	Xcs	M	Rms	N-S/M	Levc	H
3.020	25.400m	453.03990	8.79130K		31.87500m	1.38420m	10.7167	842.153u				
Sd	M ²	Xmax	Drm	Dxm	Drs	Dcs	Fo	Hz	SPLo	dB		
116.400m	-12.700m	0.83030	0.20484		0.33158	0.02455	15.1263	89.887				
Mmd	Kg	Xfrg	Ern	Exm	Ers	Ecs	BL	T-M	No	%		
400.000m	23.607m	0.16787	1.86040		3.00000	-0.41588	21.0219	0.6122				
Pmax	Watt	Efrg	Vrm	Vxm	Grs	Gcs	Vs	V	Ta	°C		
3200.000	1.05600	-0.01254	0.00204		6.90420	0.09490	2.8284	25.00				
Rtvc	C ² /w	BLo	T-M	%	Trs	Δ°C	Tcs	Δ°C				
78.125m	21.0246	-11.460m	-1.531m		-18.912m	-3.317m						

Name	Levco Motor	Model	Shape	Fmd	KA	Flp	KA	Mms	Kg	Qms		
Aurasound NS18-992-4A	LTD	Round	3.000	8.000	422.7049m	2.7072						
Note	SPL/Mech	Domain	Profile	Qmd	Qlp	Cms	M/N	Qes				
LEAP Model	FreeAir	Cone	1.000	2.000	256.2634u	0.2893						
Znom	Xgap	Krm	Kxm	H	Krs	N-S/M	Kcs	M/N	Vas	M ³	Qts	
4.000	50.800m	7.37290	8.15470		8.11210M	420.69020u	495.9204m	0.2614				
Revc	Xcoil	Frm	Fxm	Hz	Xrs	M	Xcs	M	Rms	N-S/M	Levc	H
3.020	25.400m	453.03990	8.79130K		31.87500m	1.38420m	15.0020	845.520u				
Sd	M ²	Xmax	Drm	Dxm	Drs	Dcs	Fo	Hz	SPLo	dB		
116.400m	-12.700m	0.83030	0.20484		0.33158	0.02455	15.5101	89.710				
Mmd	Kg	Xfrg	Ern	Exm	Ers	Ecs	BL	T-M	No	%		
400.000m	23.607m	0.16787	1.86040		3.00000	-0.41588	20.9021	0.5877				
Pmax	Watt	Efrg	Vrm	Vxm	Grs	Gcs	Vs	V	Ta	°C		
3200.000	1.05600	-0.01254	0.00204		6.90420	0.09490	20.0000	25.00				
Rtvc	C ² /w	BLo	T-M	%	Trs	Δ°C	Tcs	Δ°C				
78.125m	21.0246	-11.460m	-1.531m		-18.912m	-3.317m						

Name	Levco Motor	Model	Shape	Fmd	KA	Flp	KA	Mms	Kg	Qms		
Aurasound NS18-992-4A	LTD	Round	3.000	8.000				422.7123m		2.9912		
Note	SPL Mech	Domain	Profile	Qmd	Qlp			Cms	M/N	Qes		
LEAP Model	FreeAir	Cone	1.000	2.000				273.4089u		0.2584		
Znom	Xgap	Krm	Kxm	H	Krs	N-S/M	Kcs	M/N	Vas	M ³	Qts	
4.000	50.800m	7.37290	8.15470		8.11210M		420.69020u		529.1004m		0.2378	
Revc	Xcoil	Frm	Fxm	Hz	Xrs	M	Xcs	M	Rms	N-S/M	Levc	H
3.020	25.400m	453.03990	8.79130K		31.87500m		1.38420m		13.1452		855.046u	
Sd	Xmax	Drm	Dxm		Drs	Dcs			Fo	Hz	SPLo	dB
116.400m	-12.700m	0.83030	0.20484		0.33158	0.02455			14.9689		90.059	
Mmd	Xrg	Erm	Exm		Ers	Ecs			BL	T-M	No	%
400.000m	23.607m	0.16787	1.86040		3.00000	-0.41588			21.0219		0.6370	
Pmax	Watt	Erg	Vrm	Vxm	Grs	Gcs			Vs	V	Ta	°C
3200.000	1.05600	-0.01254	0.00204		6.90420	0.09490			2.8283	1u	15.00	
Rtvc	C/W	BLo	T-M		Trs	Δ°C	Tcs	Δ°C				
78.125m	21.0246	-11.460m	-1.531m		-18.912m	-3.317m						

Name	Levco Motor	Model	Shape	Fmd	KA	Flp	KA	Mms	Kg	Qms		
Aurasound NS18-992-4A	LTD	Round	3.000	8.000				422.7066m		2.2045		
Note	SPL Mech	Domain	Profile	Qmd	Qlp			Cms	M/N	Qes		
LEAP Model	FreeAir	Cone	1.000	2.000				264.0167u		0.2742		
Znom	Xgap	Krm	Kxm	H	Krs	N-S/M	Kcs	M/N	Vas	M ³	Qts	
4.000	50.800m	7.37290	8.15470		8.11210M		420.69020u		510.9246m		0.2438	
Revc	Xcoil	Frm	Fxm	Hz	Xrs	M	Xcs	M	Rms	N-S/M	Levc	H
3.020	25.400m	453.03990	8.79130K		31.87500m		1.38420m		18.1508		858.465u	
Sd	Xmax	Drm	Dxm		Drs	Dcs			Fo	Hz	SPLo	dB
116.400m	-12.700m	0.83030	0.20484		0.33158	0.02455			15.3953		89.878	
Mmd	Xrg	Erm	Exm		Ers	Ecs			BL	T-M	No	%
400.000m	23.607m	0.16787	1.86040		3.00000	-0.41588			20.9047		0.6109	
Pmax	Watt	Erg	Vrm	Vxm	Grs	Gcs			Vs	V	Ta	°C
3200.000	1.05600	-0.01254	0.00204		6.90420	0.09490			20.0000	1u	15.00	
Rtvc	C/W	BLo	T-M		Trs	Δ°C	Tcs	Δ°C				
78.125m	21.0246	-11.460m	-1.531m		-18.912m	-3.317m						

Bei genauerer Betrachtung fällt auf, dass sich die Güte und die Resonanzfrequenz nur geringfügig ändern. Das ist ein Indiz dafür, dass der Lautsprecher auch unter Last und Hub unverändert und linear arbeitet.

Ein anderes Beispiel zeigt einen anderen, nicht näher benannten Lautsprecher bei verschiedenen Spannungen und Temperaturen. Hier sieht man schön, dass sich die Parameter stärker verändern, was am Design des Lautsprechers liegt.

Name	Levco Motor	Model	Shape	Fmd	KA	Flp	KA	Mms	Kg	Qms		
	LTD	Round	2.000	4.000				99.1817m		8.1564		
Note	SPL Mech	Domain	Profile	Qmd	Qlp			Cms	M/N	Qes		
	FreeAir	Cone	2.828	1.000				397.5411u		0.3116		
Znom	Xgap	Krm	Kxm	H	Krs	N-S/M	Kcs	M/N	Vas	M ³	Qts	
8.000	8.000m	5.28300	9.19800		80.22280		390.95520u		447.7415m		0.3001	
Revc	Xcoil	Frm	Fxm	Hz	Xrs	M	Xcs	M	Rms	N-S/M	Levc	H
6.680	28.000m	1.36160K	1.06440K		6.88190m		4.73520m		1.9365		1.427m	
Sd	Xmax	Drm	Dxm		Drs	Dcs			Fo	Hz	SPLo	dB
88.800m	10.000m	0.70773	0.69533		0.75398	0.39904			25.3531		95.527	
Mmd	Xrg	Erm	Exm		Ers	Ecs			BL	T-M	No	%
84.000m	7.833m	0.68953	0.64562		0.74348	0.01634			18.6910		2.2434	
Pmax	Watt	Erg	Vrm	Vxm	Grs	Gcs			Vs	V	Ta	°C
600.000	14.86300	0.01428	0.03242		4.72850	0.97449			2.8284	1u	25.00	
Rtvc	C/W	BLo	T-M		Trs	Δ°C	Tcs	Δ°C				
416.667m	18.7098	-192.252u	558.454u		-41.582m	9.578m						

Name	Levco Motor	Model	Shape	Fmd	KA	Flp	KA	Mms	Kg	Qms		
	LTD	Round	2.000	4.000				99.1723m		2.3792		
Note	SPL Mech	Domain	Profile	Qmd	Qlp			Cms	M/N	Qes		
	FreeAir	Cone	2.828	1.000				297.8402u		0.4973		
Znom	Xgap	Krm	Kxm	H	Krs	N-S/M	Kcs	M/N	Vas	M ³	Qts	
8.000	8.000m	5.28300	9.19800		80.22280		390.95520u		335.4507m		0.4113	
Revc	Xcoil	Frm	Fxm	Hz	Xrs	M	Xcs	M	Rms	N-S/M	Levc	H
6.680	28.000m	1.36160K	1.06440K		6.88190m		4.73520m		7.6697		1.532m	
Sd	Xmax	Drm	Dxm		Drs	Dcs			Fo	Hz	SPLo	dB
88.800m	10.000m	0.70773	0.69533		0.75398	0.39904			29.4270		94.125	
Mmd	Xrg	Erm	Exm		Ers	Ecs			BL	T-M	No	%
84.000m	7.833m	0.68953	0.64562		0.74348	0.01634			16.8679		1.6242	
Pmax	Watt	Erg	Vrm	Vxm	Grs	Gcs			Vs	V	Ta	°C
600.000	14.86300	0.01428	0.03242		4.72850	0.97449			20.0000	1u	25.00	
Rtvc	C/W	BLo	T-M		Trs	Δ°C	Tcs	Δ°C				
416.667m	18.7098	-192.252u	558.454u		-41.582m	9.578m						

Name	Leve Motor	Model	Shape	Fnd	KA	Flp	KA	Mms	Kg	Qms	
		LTD	Round	2.000		4.000		99.1789m		6.3416	
Note	SPL Mech	Domain	Profile	Qmd		Qlp		Cms	M/N	Qes	
		FreeAir	Cone	2.828		1.000		357.9085u		0.3155	
Znom	Xgap	Krm	Kxm	Krs	N-S/M	Kcs	M/N	Vas	M³	Dts	
8.000	8.000m	5.28300	9.19800	80.22280		390.95520u		403.1043m		0.3005	
Revc	Xcoil	Frm	Fzm	Xrs	M	Xcs	M	Rms	N-S/M	Levc	
6.880	28.000m	1.36160K	1.06440K	6.88190m		4.73520m		2.6250		1.419m	
Sd	Xmax	Drm	Dxm	Drs		Dcs		Fo	Hz	SPLo	
88.800m	10.000m	0.70773	0.69533	0.75398		0.39904		26.7251		95.701	
Mmd	Xfig	Erm	Exm	Ers		Ecs		BL	T-M	No	
84.000m	7.833m	0.68953	0.64562	0.74348		0.01634		10.6334		2.3350	
Pmax	Walt	Efig	Vrm	Vxm	Grs	Gcs		Vs	V	Ta	
600.000	14.06300	0.01428	0.03242	4.72850		0.97449		2.8284	1u	15.00	
Rtvc	C/W	BLo	T-M	Tm	Δ°C	Txm	Δ°C	Trs	Δ°C	Tcs	Δ°C
416.667m	18.7098	-192.252u	558.454u	-41.582m		9.578m					

Name	Leve Motor	Model	Shape	Fnd	KA	Flp	KA	Mms	Kg	Qms	
		LTD	Round	2.000		4.000		99.1707m		2.0934	
Note	SPL Mech	Domain	Profile	Qmd		Qlp		Cms	M/N	Qes	
		FreeAir	Cone	2.828		1.000		280.3769u		0.4825	
Znom	Xgap	Krm	Kxm	Krs	N-S/M	Kcs	M/N	Vas	M³	Dts	
8.000	8.000m	5.28300	9.19800	80.22280		390.95520u		315.7821m		0.3921	
Revc	Xcoil	Frm	Fzm	Xrs	M	Xcs	M	Rms	N-S/M	Levc	
6.880	28.000m	1.36160K	1.06440K	6.88190m		4.73520m		8.9841		1.523m	
Sd	Xmax	Drm	Dxm	Drs		Dcs		Fo	Hz	SPLo	
88.800m	10.000m	0.70773	0.69533	0.75398		0.39904		30.3651		94.387	
Mmd	Xfig	Erm	Exm	Ers		Ecs		BL	T-M	No	
84.000m	7.833m	0.68953	0.64562	0.74348		0.01634		17.0815		1.7254	
Pmax	Walt	Efig	Vrm	Vxm	Grs	Gcs		Vs	V	Ta	
600.000	14.06300	0.01428	0.03242	4.72850		0.97449		20.0000	1u	15.00	
Rtvc	C/W	BLo	T-M	Tm	Δ°C	Txm	Δ°C	Trs	Δ°C	Tcs	Δ°C
416.667m	18.7098	-192.252u	558.454u	-41.582m		9.578m					

4.4 Zusammenfassung

Wir haben nun gezeigt, dass sich die TSP bei Spannungs- oder Temperaturänderungen bei einigen Lautsprechern mal mehr und mal weniger stark ändern. Aus diesem Grund liefern verschiedene Routinen verschiedener Analyzer unterschiedliche Ergebnisse, da die Analyzer die Impedanzen mit verschiedenen Spannungen messen, und mit verschiedenen elektrischen Ersatzmodellen die TSP bestimmen.

Deshalb kann man die TSP, die manuell zu Fuß oder mit verschiedenen Messgeräten gemessen wurden nicht untereinander vergleichen, denn während des Vorgangs werden die Parameter bei verschiedenen Spannungen und mit verschiedenen Modellen erstellt.

Wie stark sich die Parameter unter Spannungserhöhung verändern zeigt die Linearität des Antriebes im Grosssignalbereich.

Wir messen die Spannungs- und Stromverläufe bei verschiedenen Spannungen und verschiedenen Temperaturen des Lautsprechers im Freifeld ohne Gehäuse und nicht in der Normschallwand. Das Chassis wird dazu fest in einen Schraubstock, der auf einem ca. 100kg schweren Ständer montiert ist eingespannt, um Vibrationen zu verhindern. Da der Schraubstock aus Eisen besteht werden noch Abstandhalter aus Gummi angebracht, damit der Schraubstock den Antrieb nicht zusätzlich „verstärkt“.

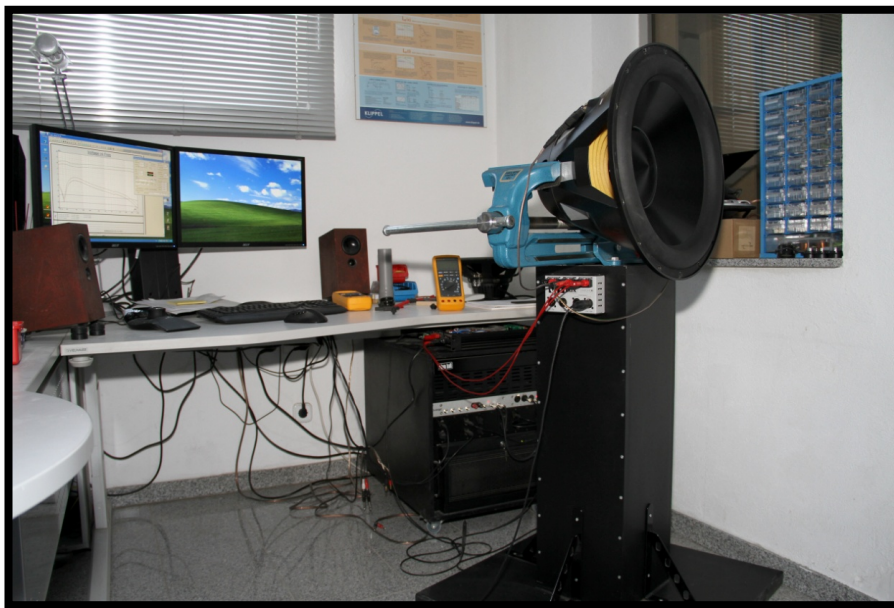


Abbildung 37: Parametermessung

Wie man sehen kann ist es mit Programmen wie Leap möglich verschiedene Gehäuseformen unter verschiedenen Bedingungen zuverlässig und präzise zu simulieren. Allerdings setzen diese Simulationen präzise Messungen und einen Simulationsabgleich voraus. Aber auch diese Programme haben ihre Grenzen die man kennen und verstehen muss.

Des Öfteren findet man Leap Simulationen, die den Druckkammereffekt bestimmter Raumgrößen und den damit verbundenen Tieftonanstieg aufzeigen sollen. Leap kann den Druckkammereffekt von Wohnräumen und deren Modenverteilung nicht simulieren, sondern nur einfache Reflektionen. Das Simulationsprogramm rechnet lediglich den Anstieg anhand einer bekannten Funktion von reflektionsarmen Messräumen hinzu. Vor allem sollte man bedenken, dass die Modenverteilung eines reflektionsarmen Raumes gänzlich anders aussieht wie die eines Wohnraumes, denn in einem Wohnraum sind die Wände in der Regel schallhart.

5. Das Gehäuse

Folgt...

6. Messungen

In diesem Abschnitt wollen wir uns nun die realen Messungen des Subwoofers betrachten. Um die Vorteile des massiv versteiften Gehäuses aufzuzeigen haben wir auch Messungen am ersten Prototypengehäuse durchgeführt, welches aus 21mm dickem Multiplex bestand und innen mit 3 großen Streben versteift war.

Die mittlere Versteifung ist gut zu sehen, während die anderen beiden oben und unten durch die Schallwand verdeckt sind. Das Prototypengehäuse ist demnach alles andere als schnell zusammengebastelt und durchaus als „amtlich“ zu betrachten. Dennoch wirkt dieses erste Prototypengehäuse recht billig im Gegensatz zu dem finalen Gehäuse.

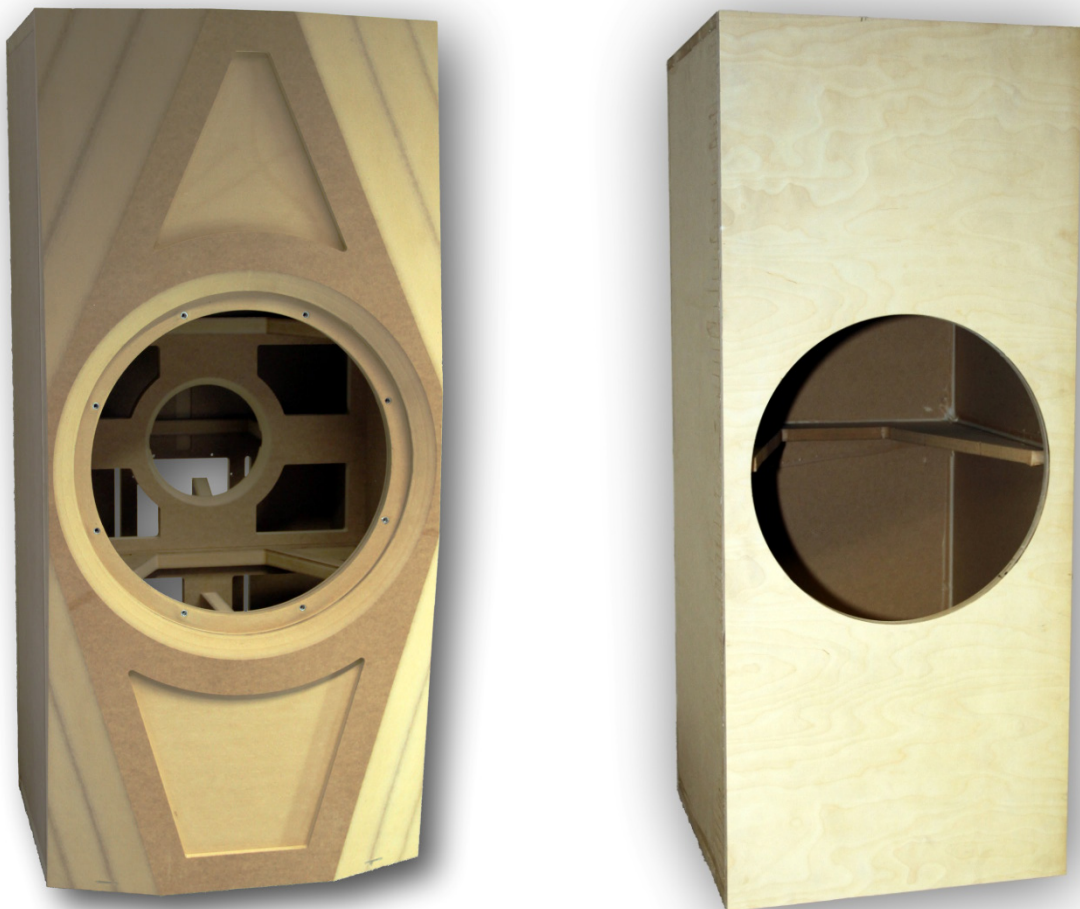


Abbildung 38: Vergleich der unterschiedlichen Gehäuse

Durch die Größe des Gehäuses entstehen im Inneren stehende Wellen die so lang werden können, dass sie sich im Passband, also im Übertragungsbereich, befinden. Diese Moden können die Wiedergabe beeinträchtigen, denn durch sie entstehen mehrere Probleme. Solche Resonatoren oder stehende Wellen speichern Energie und schwingen demnach lange aus. Im Inneren des Gehäuses entstehen dadurch Druckunterschiede, bzw. Druckfelder, die auf die Lautsprecher rückwirken können.

Durch die Anregung im laufenden Betrieb kann es durchaus auch passieren, dass die Moden nach außen über die Membran oder aber eine Schallwand gelangen können. Davon besonders betroffen sind natürlich Bassreflexgehäuse oder andere „offene“ Systeme, denn hier kann der Schall im schlimmsten Fall fast ungehindert nach außen gelangen.

Eine schnelle Impedanzmessung zeigt sehr deutlich, dass das normal versteifte Gehäuse im Bereich um 160Hz und 220Hz Moden aufweist, während das optimierte Gehäuse in dieser Messung keine stehenden Wellen erkennen lässt. Der Schall wird hier so oft gebeugt, das sich nur Moden mit sehr geringer Güte und Amplitude ausbilden, die jedoch in einer Impedanzmessung nicht mehr sichtbar sind.

Man sollte jedoch beachten, dass beide Gehäuse nicht bedämpft wurden, also leer sind. Bei starker Spreizung kann man deshalb auch noch ein paar stehende Wellen im Gehäuse entdecken. Aus diesem Grund haben wir den Seismic Subwoofer zusätzlich noch gezielt bedämpft, um die Bewegungsenergie der Luftteilchen in Wärmeenergie umzuwandeln. Beachten muss man bei der Interpretation der Messungen, dass man nicht die Schwingungsmoden der Gehäusewände mit den Moden im Gehäuse verwechselt!

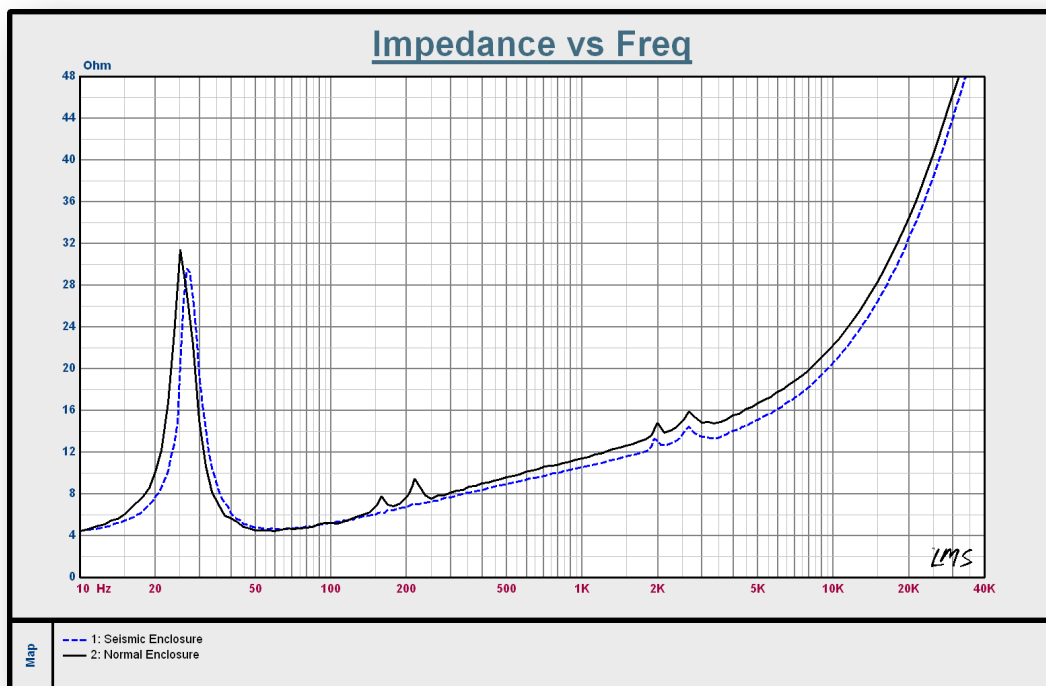


Abbildung 39: Impedanzvergleich

Weiterhin erkennt man den Nettovolumenverlust des optimierten Gehäuses durch die Matrix. Die Güte sowie die Resonanzfrequenz sind etwas höher als im normalen Gehäuse. Auch gut zu sehen sind die zwei Membranresonanzen der Metallmembran um 2kHz und 2,6kHz. Für einen Treiber dieser Größe sind die Resonanzen weit außerhalb des sinnvollen Übertragungsbereiches und damit unkritisch.

Als nächstes betrachten wir die Schalldruckkurve auf Achse. In unserem Fall ist sie eher unwichtig, da der Subwoofer nur im tieffrequenten Schallbereich eingesetzt, und zusätzlich equalisiert wird. Die Messung erfolgte in einem Meter Abstand und ist nicht geglättet, was an der hohen Auflösung ersichtlich ist. Oft sind gemessene Kurven im Tieftonbereich aalglatt, was auf einer geringen Auflösung der Messung beruht.

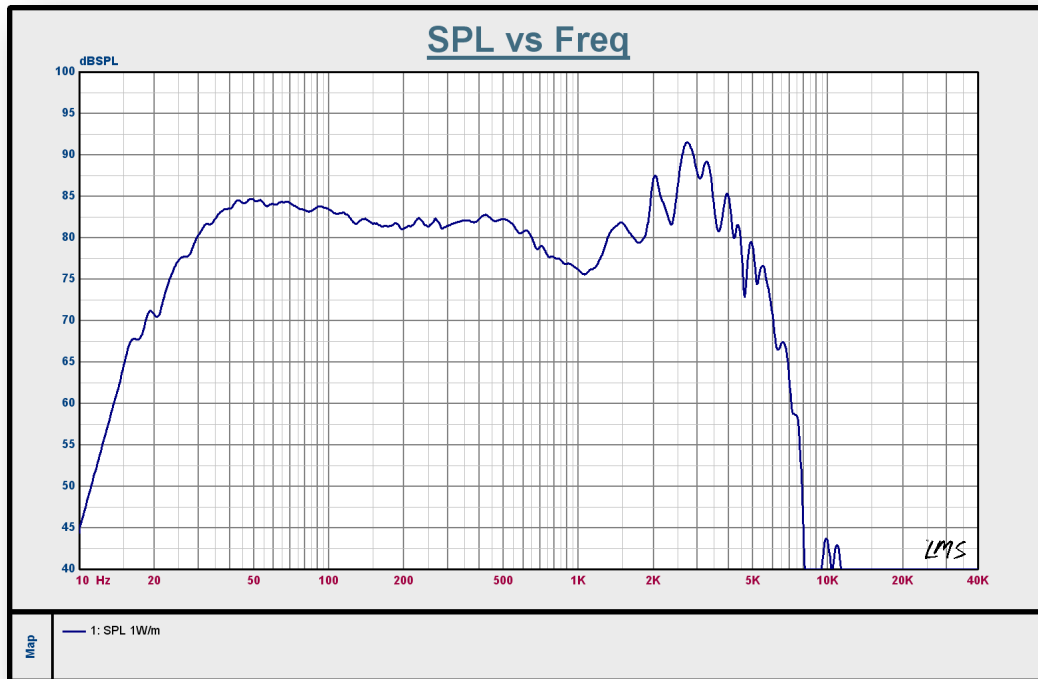


Abbildung 40: Schalldruckkurve 1W/m

Die Schallwandbreite von 55cm verursacht das breite Loch zwischen 600Hz und 1,5kHz. Aber wie bereits erwähnt ist das schon weit außerhalb des von uns geforderten Einsatzbereiches. Beachtlich hingegen ist die Grenzfrequenz des geschlossenen und bis dato nicht entzerrten Lautsprechers mit ca. 30Hz.

Auch sonst verläuft die Amplitude makellos. Man könnte den Subwoofer durchaus höher trennen und 500Hz stellen laut SPL Messung absolut kein Problem dar. Für unsere Applikation als reinen Subwoofer sind solche Trennfrequenzen nicht erforderlich, aber falls der Seismic zukünftig noch erweitert werden sollte, zum Beispiel mit einem Mittelhochtonmodul oder einem Breitbandmodul etc., werden solche Anforderungen essentiell.

Der NS18-992-4A besitzt eine nominelle Impedanz von 4 Ohm, auf Grund dessen die Messung in einem Meter mit 2V erfolgte. Mittlerweile gibt man aber den Schalldruck oft allgemein bei 2,83V RMS an. In diesem Fall darf man noch 3dB dazu addieren.

Selbstverständlich stellt man sich natürlich die Frage, welche Vorteile den nun die ganzen Versteifungen und die gezielte Dämpfung etc, effektiv bringen?

Dazu haben wir den Klirr bei beiden Gehäusen bei verschiedenen Lautstärken gemessen. Um die Unterschiede so deutlich wie möglich darzustellen wurde der Klirr bei 110dB gemessen.

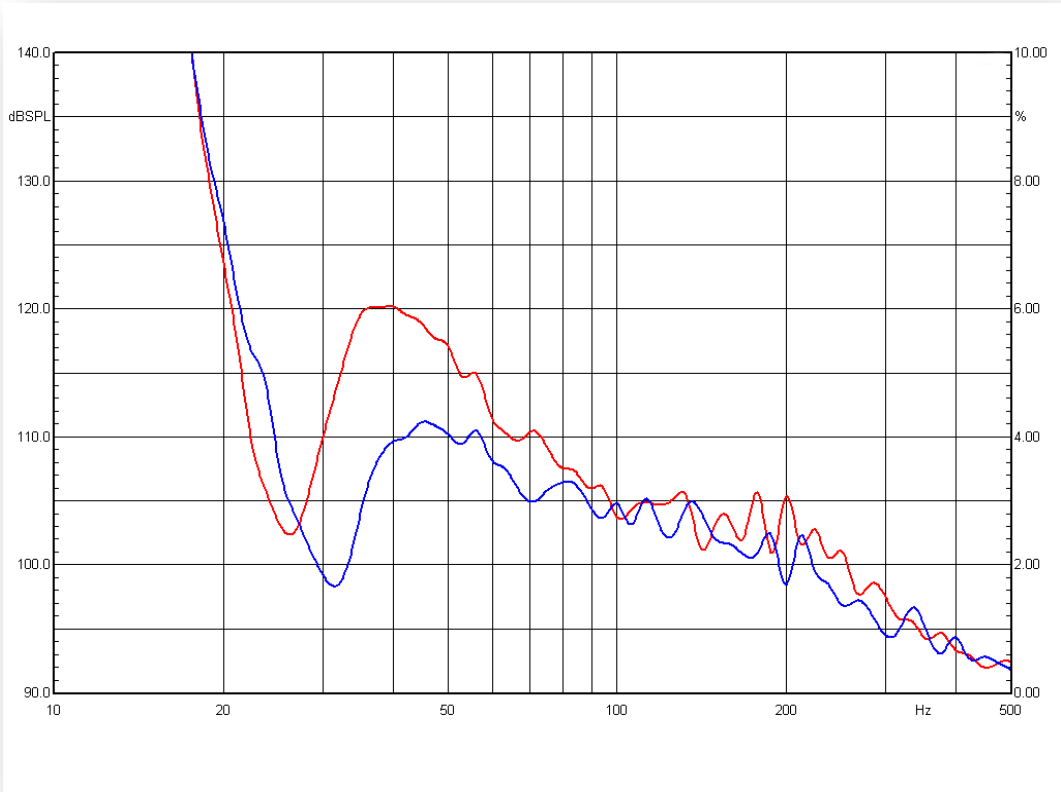


Abbildung 41: Verzerrungen K2 bei 110dB (Blau=Seismic ; Rot=Testgehäuse)

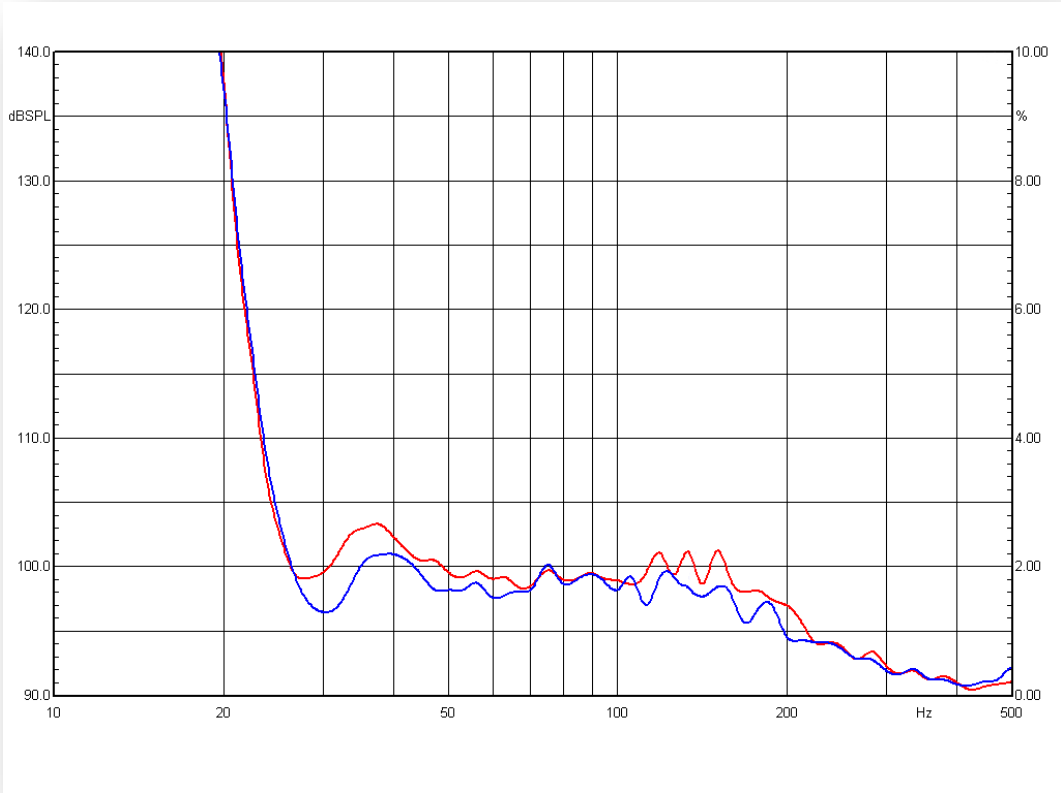


Abbildung 42: Verzerrungen K3 bei 110dB (Blau=Seismic ; Rot=Testgehäuse)

Die Verzerrungen sind bei beiden Gehäusen extrem gering, aber dennoch kann man eindeutig erkennen, dass das extrem versteifte Gehäuse etwas niedrigere Verzerrungen besitzt. Gerade im Tiefsttonbereich ist der K2 um 2% geringer, während der K3 um bis zu 1% niedriger ist.

Allerdings muss auch hier erwähnt werden, dass das Chassis im Seismic fest mit dem Gehäuse verbunden ist. Es wird in einem Haltering der Matrix beim Einschrauben sehr fest verspannt und dadurch fixiert.

Den effektiven Nutzen zeigen die folgenden Messungen, bei denen ein sehr leichter und präziser PCB Beschleunigungsaufnehmer einmal am Korb und einmal am Magnet befestigt wurde, um dort direkt die Auslenkung zu messen.

Testgehäuse:

Seismic:

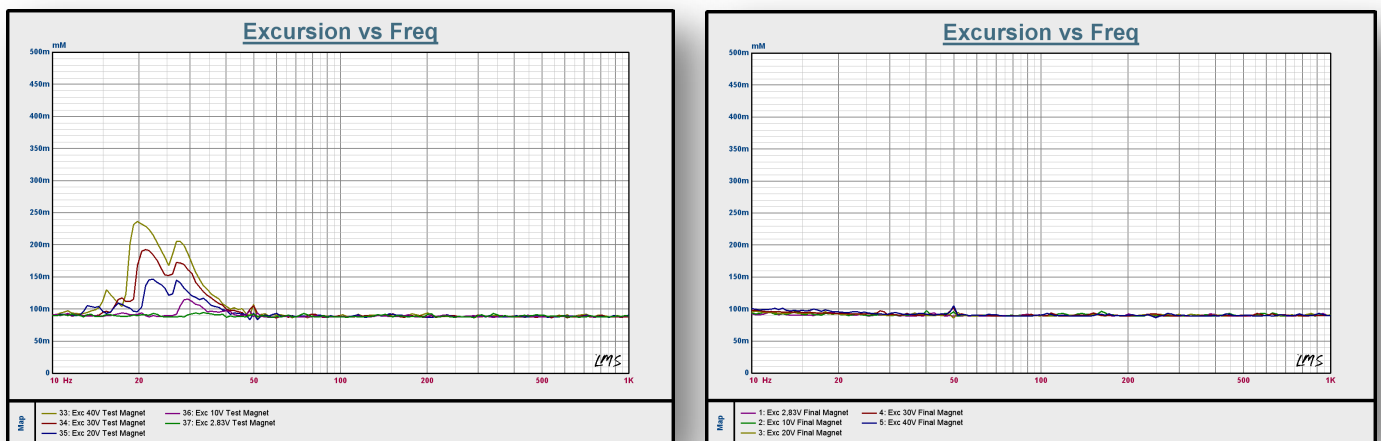


Abbildung 42: Vergleich Auslenkung am Magnet ; Testgehäuse-Seismic

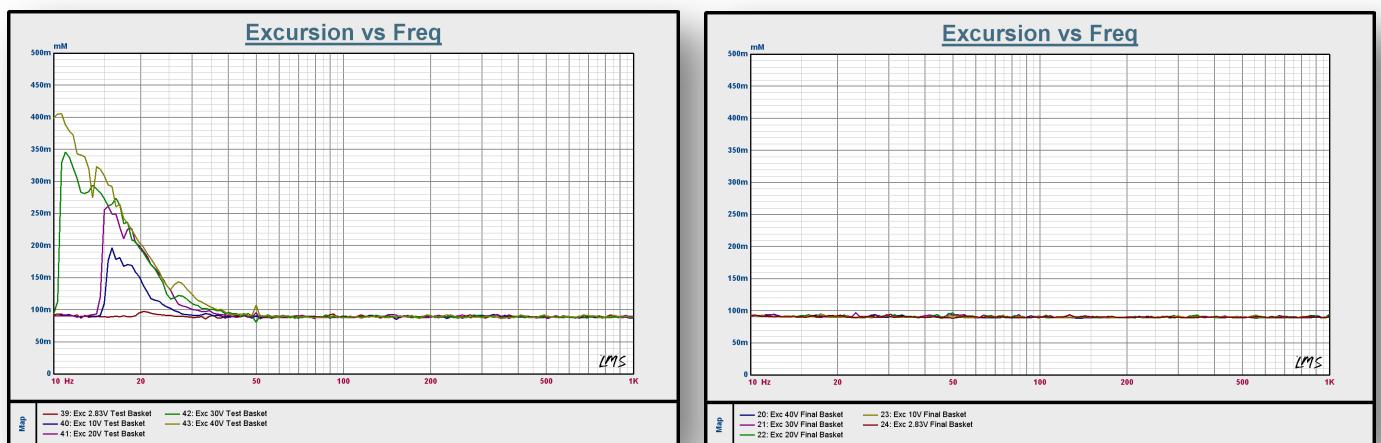


Abbildung 43: Vergleich Auslenkung am Korb ; Testgehäuse-Seismic

Die Ergebnisse sprechen für sich, wobei man nicht vergessen sollte, dass das finale Seismic Gehäuse deutlich steifer ist, was die Messungen gut belegen. Die Frontschallwand schwingt mehr oder weniger stark mit. Wir erinnern uns, dass das Testgehäuse um eben die Schallwandschwingung zu unterbinden in der Mitte eine große und stabile Strebe besitzt, die aber offensichtlich nicht ausreicht. Normalerweise sind Korb- oder Magnetschwingungen, welche durch die schwingende Membran angeregt werden, zu vernachlässigen, da die bewegende Masse im Gegensatz zum Chassisgewicht extrem klein ist.

Bei modernen Tieftonchassis ist aber die schwingende Masse zum Teil so hoch, dass diese Faustregel nicht mehr allgemein gültig ist. Wie man in den Abbildungen 42 und 43 sieht ist die Auslenkung nicht sonderlich groß, aber dennoch messbar. Vor allem sei erwähnt, dass der Korb des NS18-992-4A extrem steif und stabil ist. Viele günstige Subwoofer besitzen Blech- oder Kunststoffkörbe, welche so extrem schwingen können, dass man es mit bloßem Auge sehen kann.



Testgehäuse:

Seismic:

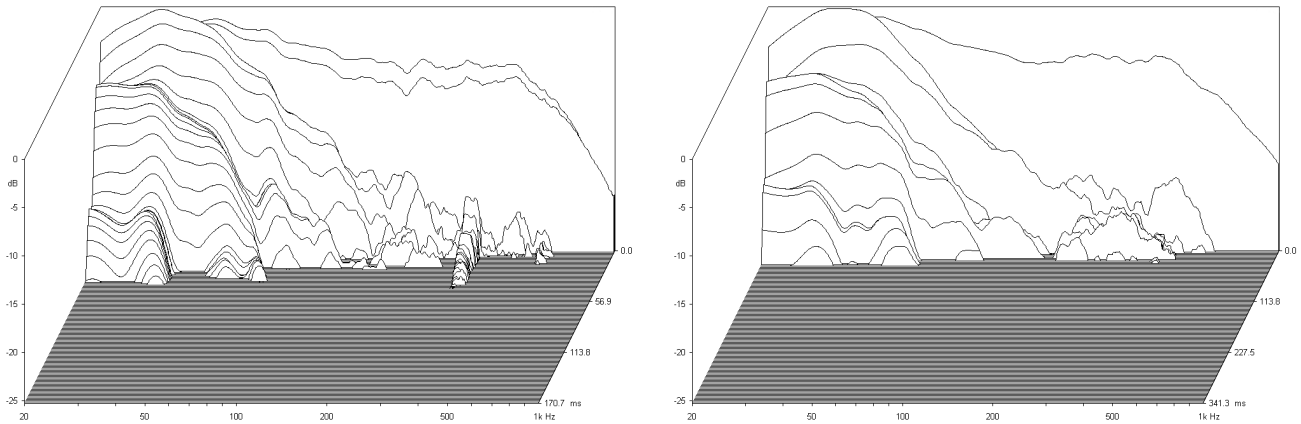


Abbildung 44: Vergleich Wasserfall Testgehäuse - Seismic

Abbildung 44 zeigt nun das Ausschwingverhalten der verschiedenen Gehäuse. Das Seismic Gehäuse zeigt eindeutig schnelleres Ausschwingen. Allerdings spielen auch hier – wie wir schon im Theorieteil festgestellt haben - noch mehrere Faktoren wie die leichte Änderung der Güte etc. eine Rolle.

Die Verzerrungen bei verschiedenen Lautstärken von 85dB bis 110dB zeigen die folgenden Abbildungen. Hierbei blieb der Subwoofer ungefiltert.

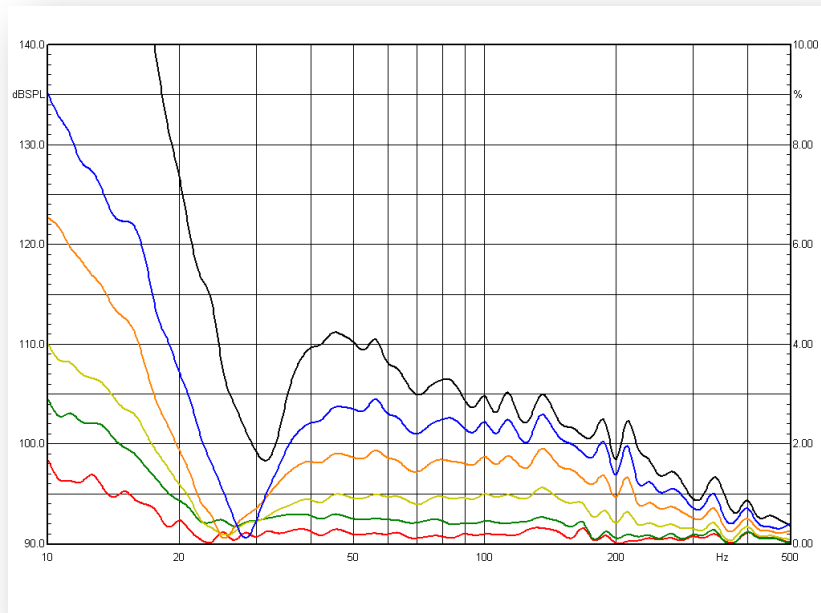


Abbildung 45 : K2 von 85dB – 110dB

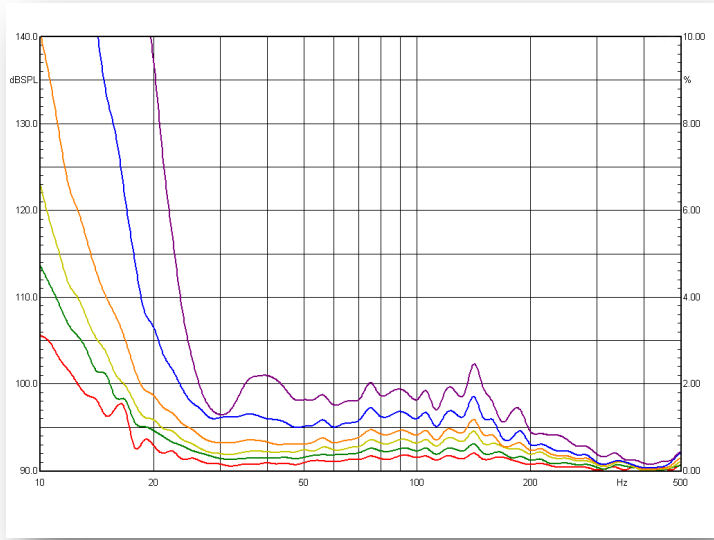


Abbildung 46 : K3 von 85dB – 110dB

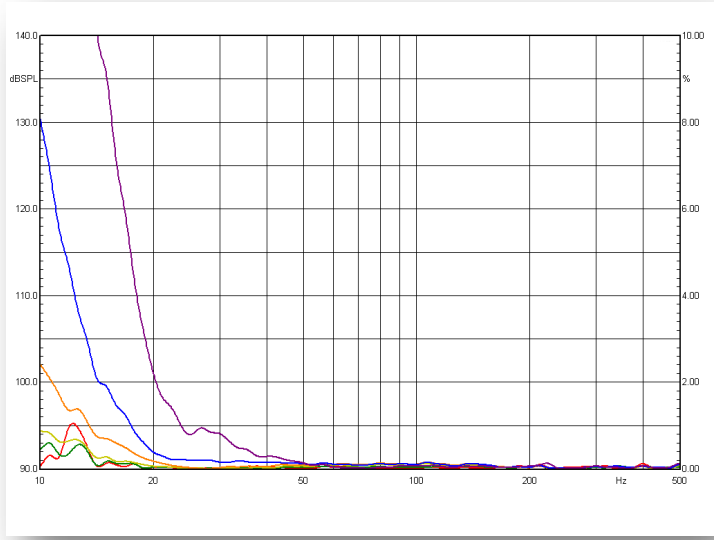


Abbildung 47 : K42 von 85dB – 110dB

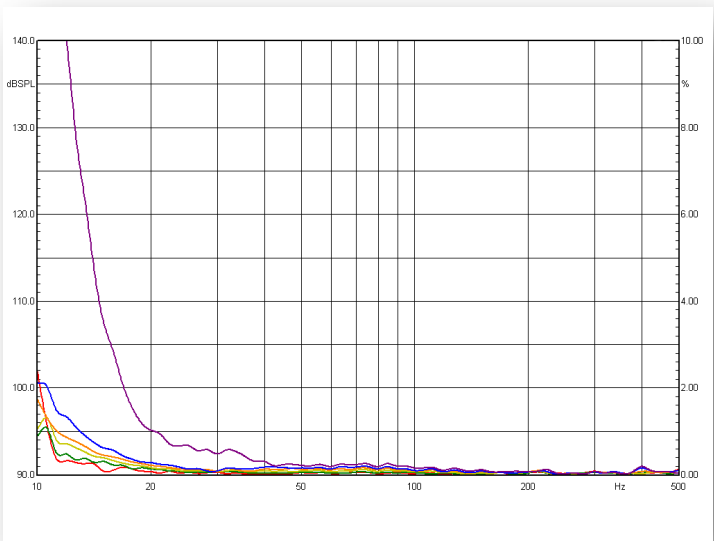


Abbildung 48: K5 von 85dB -110dB

Interessant ist auch die Änderung des Klirrverhaltens bei verschiedenen Abstimmungen. Dazu haben wir eine sehr extreme Abstimmung mit einer Anhebung um 15dB bei 16Hz gewählt und eine „normale“ Abstimmung von 25Hz mit Hochpassfilter.

25Hz Abstimmung (90dB – 110dB)

16Hz Abstimmung (90dB – 105dB)

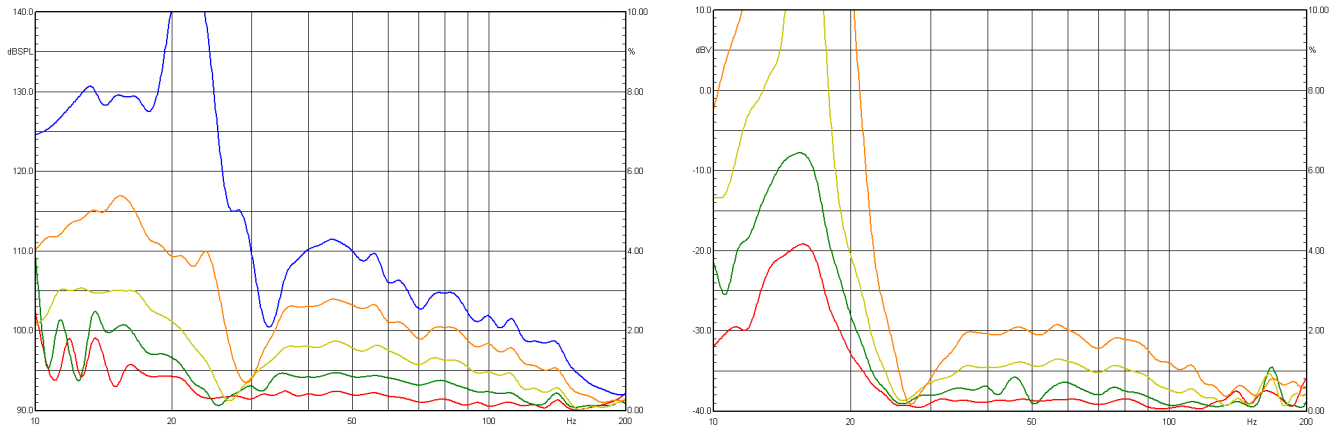


Abbildung 49: K2 bei 25Hz und 16Hz Abstimmung

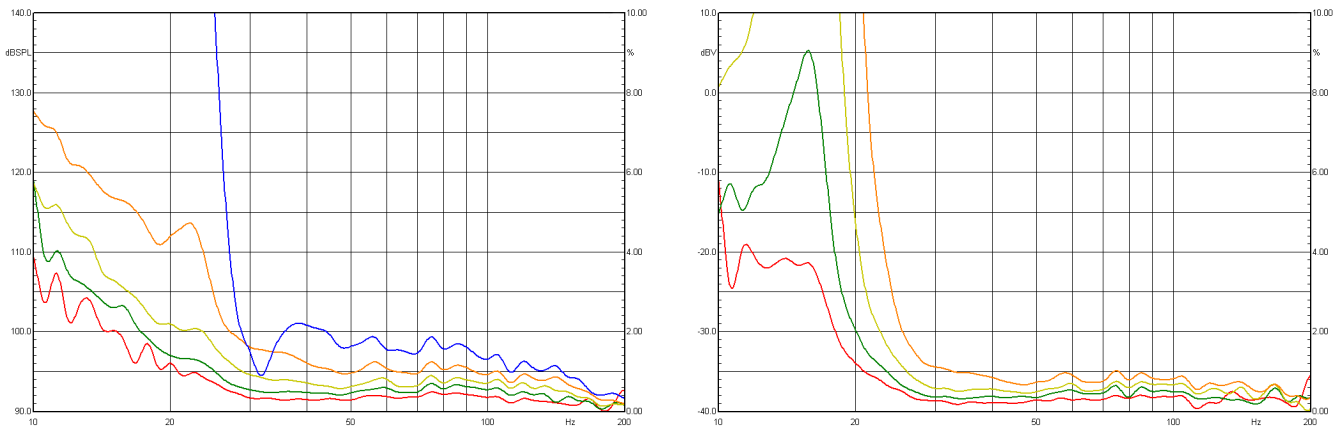


Abbildung 50: K3 bei 25Hz und 16Hz Abstimmung

Genau wie erwartet steigen die Verzerrungen bei der 16Hz Abstimmung schneller an als bei der 25Hz Abstimmung oder bei ungefiltertem Betrieb. Dennoch ist selbst bei der extremen Abstimmung bis 16Hz der Maximalpegel mit über 105dB im Freifeld enorm. Bei Betrieb auf dem Boden addieren sich 6dB dazu, und bei Betrieb mit einem zweiten Subwoofer sind es im Idealfall nochmals 3 dB.

Das reicht auf jeden Fall aus um gewöhnliche Wohnräume ordentlich anzuregen.

Als nächstes wurde wieder ein Beschleunigungsaufnehmer verwendet, um die Auslenkung der Membran zu messen. Dazu wurde der Aufnehmer direkt auf die Membran geklebt. Neben dem ungefilterten Betrieb wurde auch hier die Auslenkung bei der 25Hz und bei der 16Hz Abstimmung gemessen.

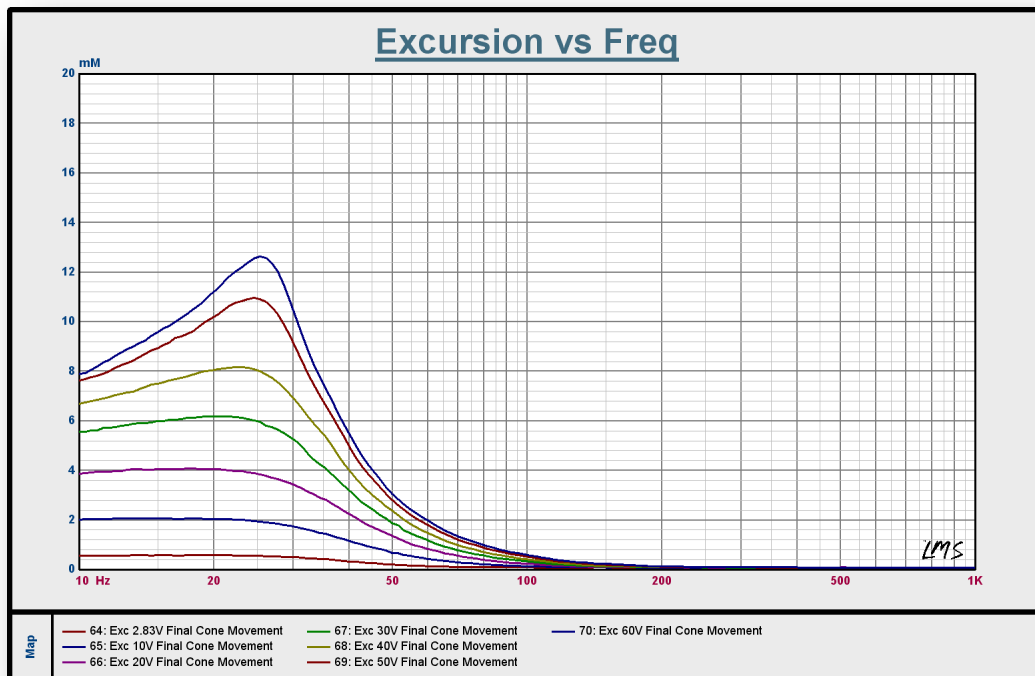


Abbildung 51: Auslenkung ungefiltert

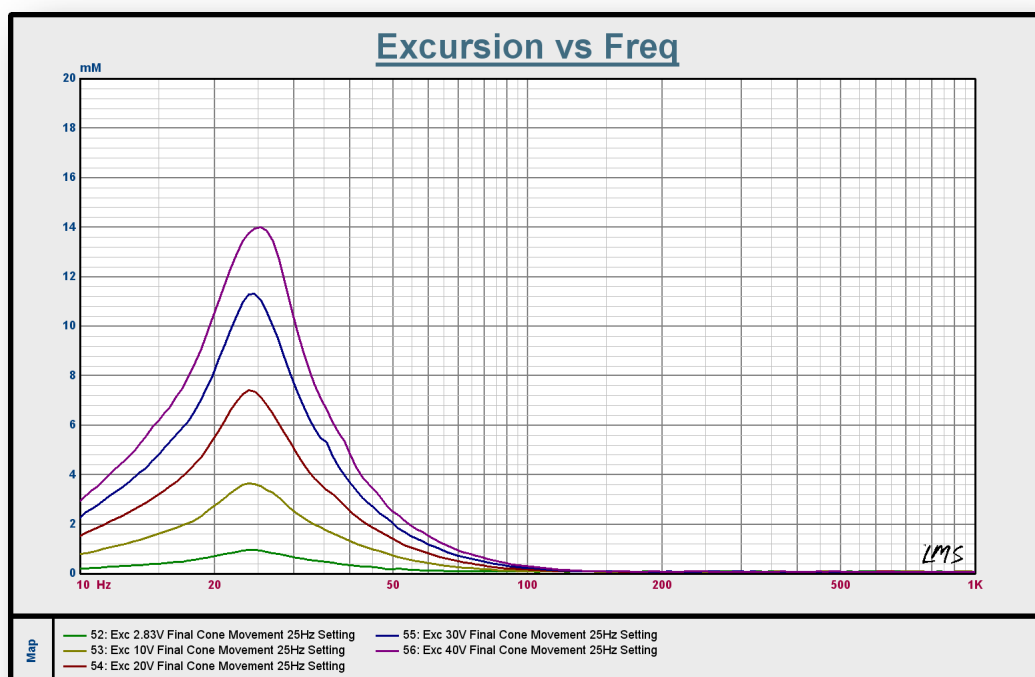


Abbildung 52: Auslenkung 25Hz Abstimmung

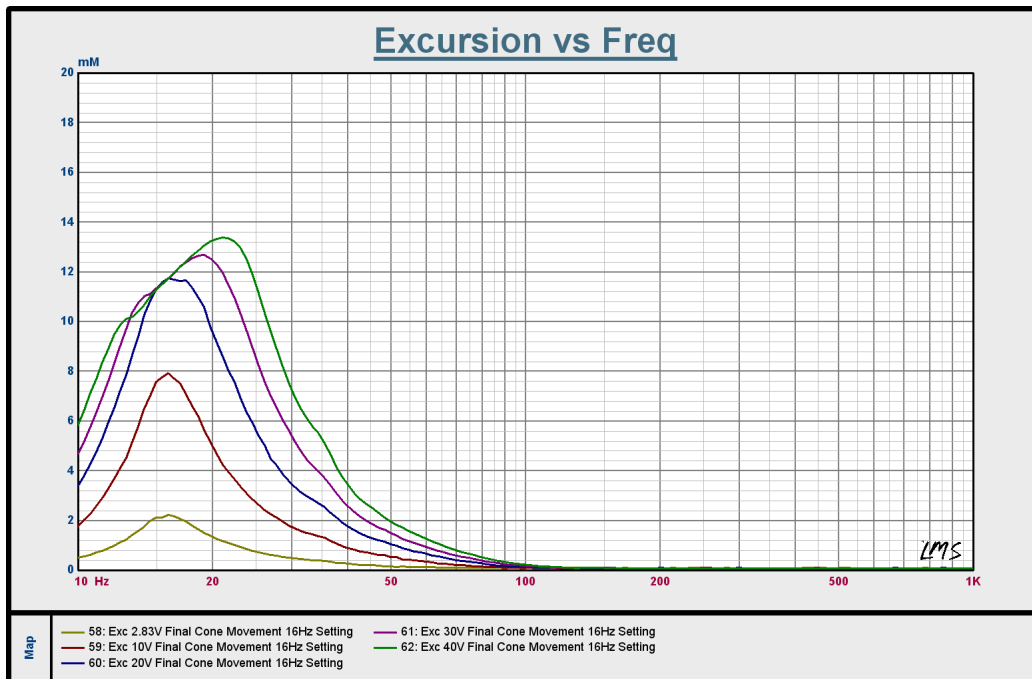


Abbildung 53: Auslenkung 16Hz Abstimmung

Bei ungefiltertem Betrieb wurde mit bis zu 60V Spannung gemessen. Das entspricht einer Leistung von 900W bei einem nominellen 4Ω Lautsprecher. Weil hier kein Subsonicfilter verwendet wurde sieht man sehr schön die langsam einsetzende Kompression im Bereich um 10Hz – 20Hz. Die Messungen mögen ein wenig verfälscht sein, denn die Messungen mit steigender Spannung wurden sehr schnell hintereinander durchgeführt um Zeit zu sparen. Dadurch kann sich die Spule nicht mehr richtig abkühlen. Man sieht das auch gut an der steigenden Resonanzfrequenz.

Bei der 25Hz Abstimmung wurde die 60V Messung schlicht vergessen. 60V scheinen beim Anblick der Messungen aber problemlos möglich. Man sieht hier sehr schön, dass der Hochpass die Auslenkung um 10Hz - 25Hz senkt und den Lautsprecher entlastet.

Die extreme 16Hz Abstimmung zeigt natürlich die höchsten „Verzerrungen“ der Kurven bezogen auf die Eingangsleistung. Gerade bei der 40V Messung ist die 16Hz Anhebung gut zu erkennen.

Abschließend wollen wir noch der Vollständigkeit halber die Standarddiagramme im ungefiltertem Betrieb abbilden. Die Gruppenlaufzeit ist sehr niedrig, was aber abzusehen war, denn die Gruppenlaufzeit errechnet sich aus der Ableitung der Phase. Wechselt die Phase schnell ihren Betrag und damit die Amplitude, was z.B. bei Bassreflexsystemen oder Abstimmungen höherer Ordnung allgemein der Fall ist, dann erhöht sich die Gruppenlaufzeit.

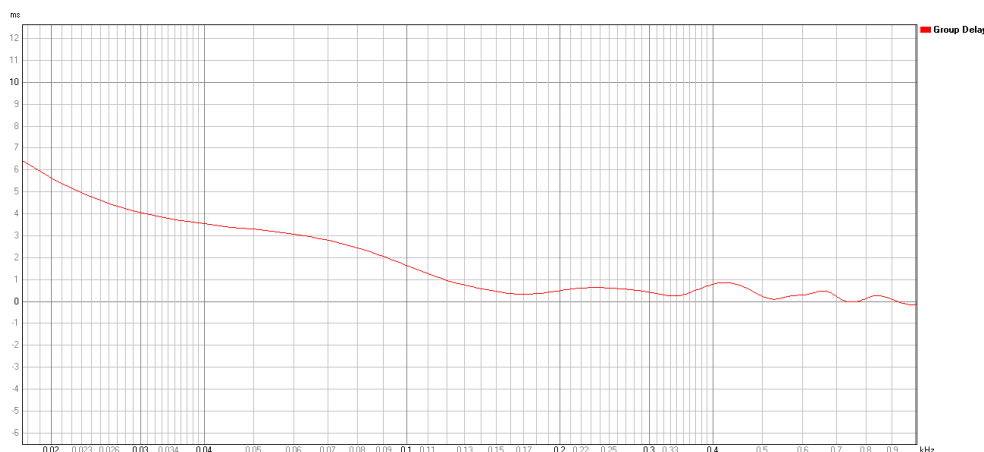


Abbildung 54: Gruppenlaufzeit

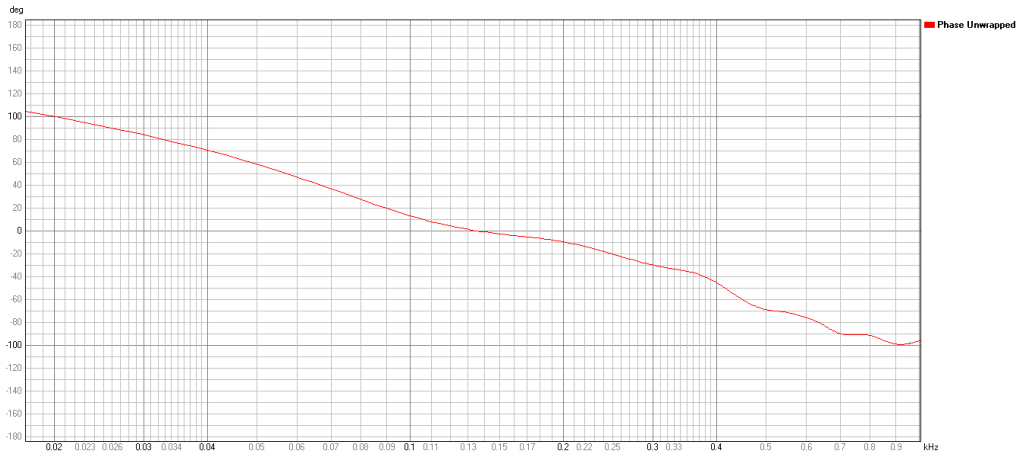
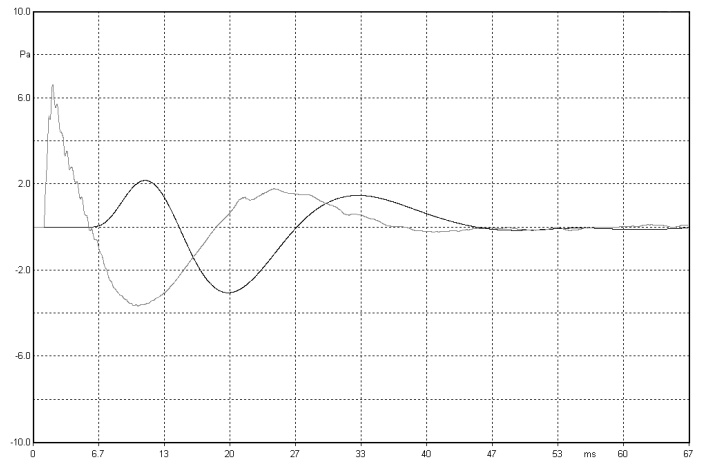
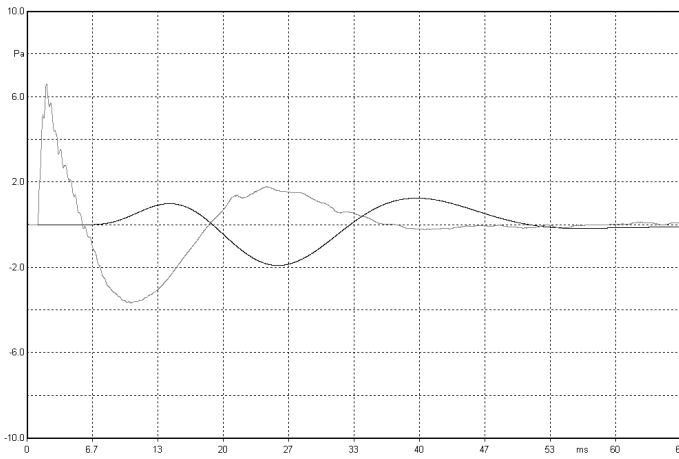


Abbildung 55: Phase

Die Phase fällt gleichmäßig und langsam und zeigt keinerlei Störstellen oder Anomalitäten. Die Sprungantwort wurde mehrfach mit verschiedenen Trennfrequenzen (ungefiltert, 50Hz, 100Hz, 150Hz und 200Hz) errechnet.

Ungefiltert; 50Hz

Ungefiltert; 100Hz



Ungefiltert; 150Hz

Ungefiltert; 200Hz

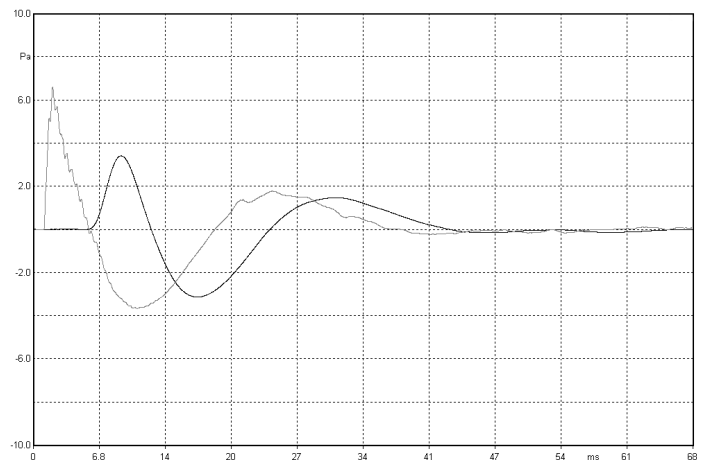
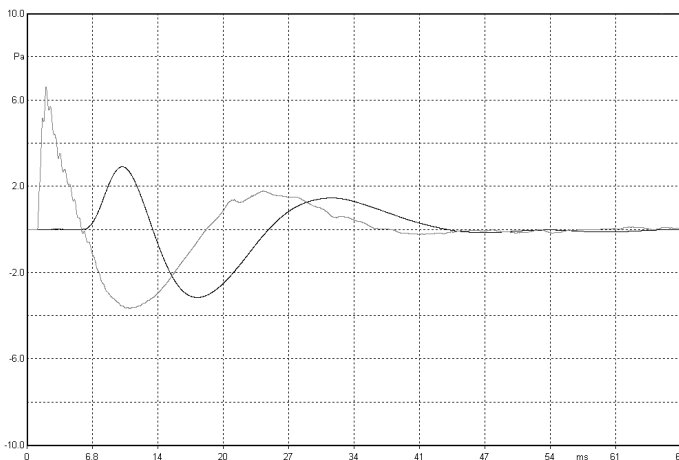


Abbildung 56: Sprungantworten bei verschiedenen Trennfrequenzen

Die Sprungantworten verhalten sich wie in der Theorie bereits erklärt und zeigen ebenso keine Anomalien.

6.1 Zusammenfassung

Auch die Messungen bestätigen einen perfekten Betrieb unter den verschiedensten Umständen. Der Subwoofer leistet sich in keiner Disziplin Ausrutscher und glänzt mit verblüffend niedrigen Verzerrungen im Tieftonbereich.

Selbst Trennungen bis 500Hz oder höher stellen laut den umfangreichen Messungen kein Problem dar, was den Subwoofer auch mehrwegefähig macht.



7. Messungen am Verstärker

Der Seismic Subwoofer wird standardmäßig mit einem DSP Modul und einem 1kW Icepowermodul von Bang&Olufsen ausgeliefert. Je nach Applikation kann der Einschub auch mit mehreren Verstärkermodulen ausgestattet werden.

Das macht allerdings nur Sinn, wenn zwei Subwoofer genutzt werden. Denn so kann der DSP seine Vorteile vollständig nutzen und die Filter des DSP Ausgangs können auch für die Hauptlautsprecher benutzt werden. Das bedeutet, dass der vorhandene Verstärker weiterhin für die bestehenden Lautsprecher benutzt werden kann. Zusätzlich kann man aber nun die Filter des DSP's nutzen, um eventuelle Problemstellen des Systems zu lindern oder zu beheben.

Das Modul kann auch mit zwei Verstärkermodulen ausgestattet werden. In diesem Fall kann man direkt vom Vorverstärker oder vom Wandler in das Modul einspeisen. Auch so können die DSP Funktionen für die „Satelliten“ benutzt werden.

Die maximale Bestückung beinhaltet 3 Verstärkermodule, mit denen sich zum Beispiel ein bestehendes Zweiwegesystem vollständig aktivieren lässt, oder ein bestehendes Dreiwegesystem teilaktivieren lässt.

Für die folgenden Messungen wurde ein 1kW Icepowermodul benutzt. Zuerst wurde der Frequenzgang der Verstärker bei verschiedenen Impedanzen (8Ω , 4Ω und 2Ω) gemessen. Da die Verstärker nach dem Class-D Prinzip arbeiten haben wir für den Messvorgang den LinearX LF280 Verstärkerfilter benutzt, um Hochfrequente Störungen zu unterdrücken.

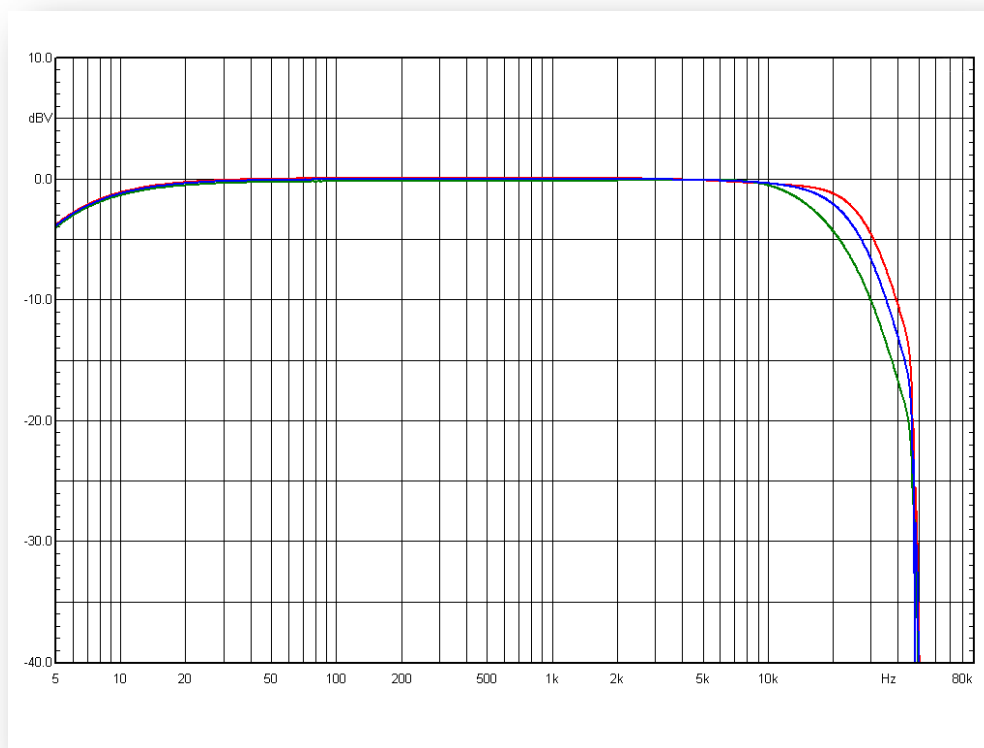


Abbildung 57: Frequenzgang 8Ω (rot), 4Ω (blau) und 2Ω (grün)

Die Filterwirkung ab 40kHz des LF280 ist hier gut zu sehen. Ansonsten verhält sich der Verstärker vorbildlich, auch unter der 2Ω Last. Der leichte Höhenabfall um 20kHz bei der 2Ω Messung ist nicht problematisch, und könnte auch per DSP ausgeglichen werden.

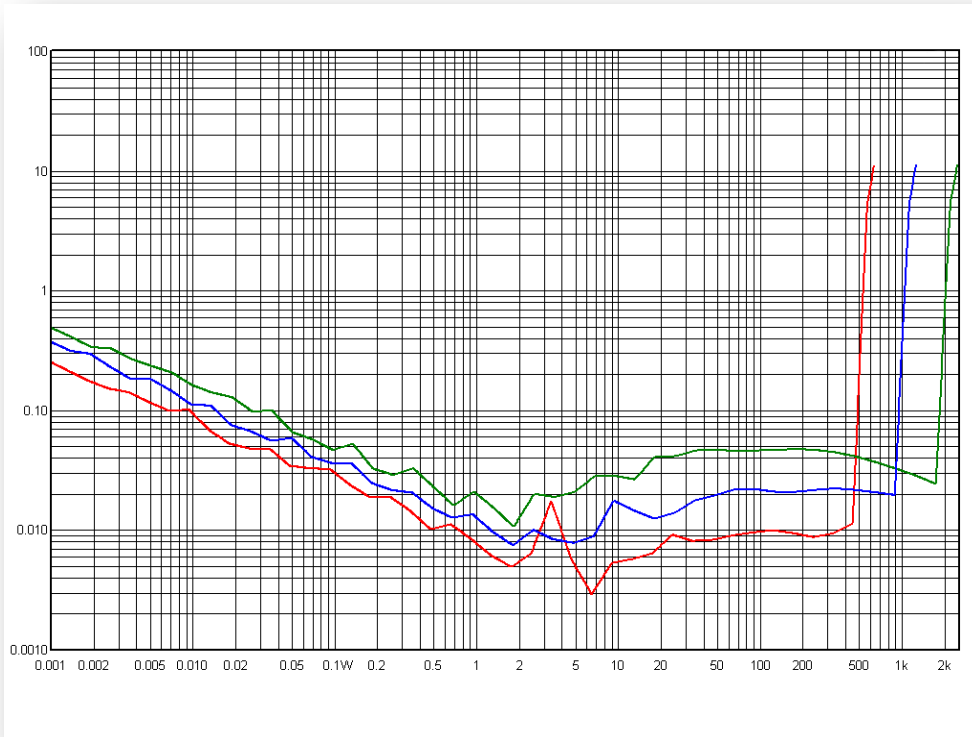


Abbildung 58: THD / Ausgangsleistung bei 8Ω (rot), 4Ω (blau) und 2Ω (grün)

Abbildung 58 zeigt die maximale Ausgangsleistung über den Verzerrungen bei verschiedenen Lasten. Auch hier zeigt sich das Modul von seiner besten Seite. Bei 8Ω erreicht das Modul die angegebene Leistung von 500W, und auch beim 4Ω Betrieb werden die angegebenen 1000W erreicht. Selbst im 2Ω Betrieb läuft der Verstärker stabil und liefert 2000W.

Abbildung 59 zeigt die maximale Ausgangsspannung in Volt über den Verzerrungen bei verschiedenen Lasten. Man kann leicht erkennen, dass der Verstärker Lastunabhängig immer saubere 60V liefert ohne nennenswert zu verzerren.

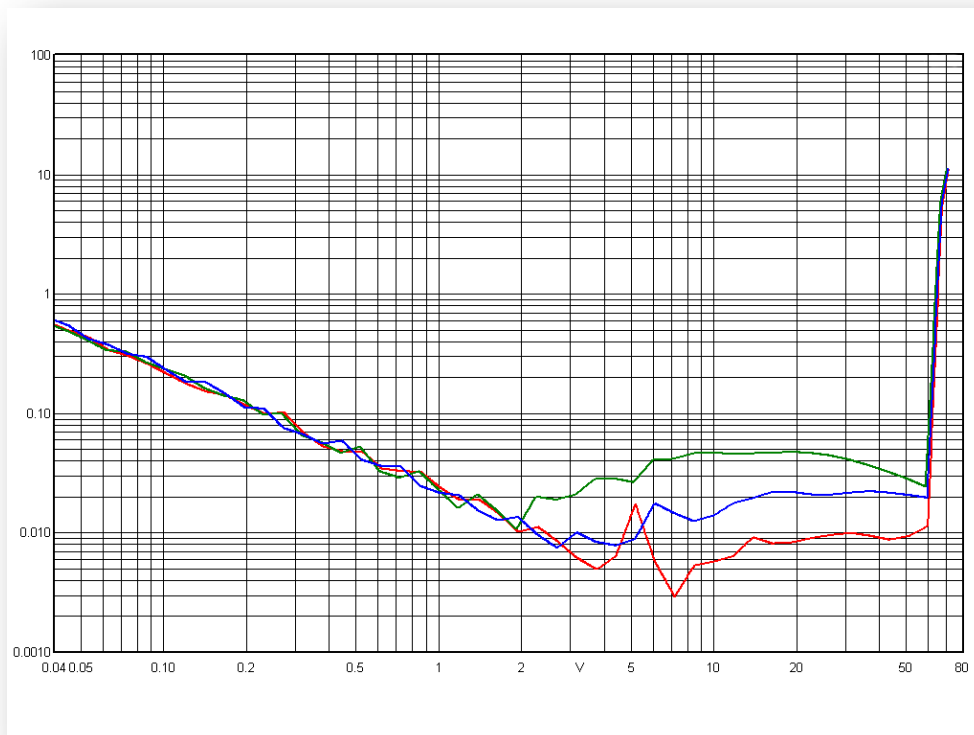


Abbildung 59: THD / Ausgangsspannung bei 8Ω (rot), 4Ω (blau) und 2Ω (grün)

Die folgende Messung zeigt die Verzerrungen über dem Eingangssignal bei verschiedenen Impedanzen (nominell 2, 4 und 8Ω). Wie man dem Diagramm entnehmen kann ist der DSP - Aktiveinschub mit 2V ausgereicht.

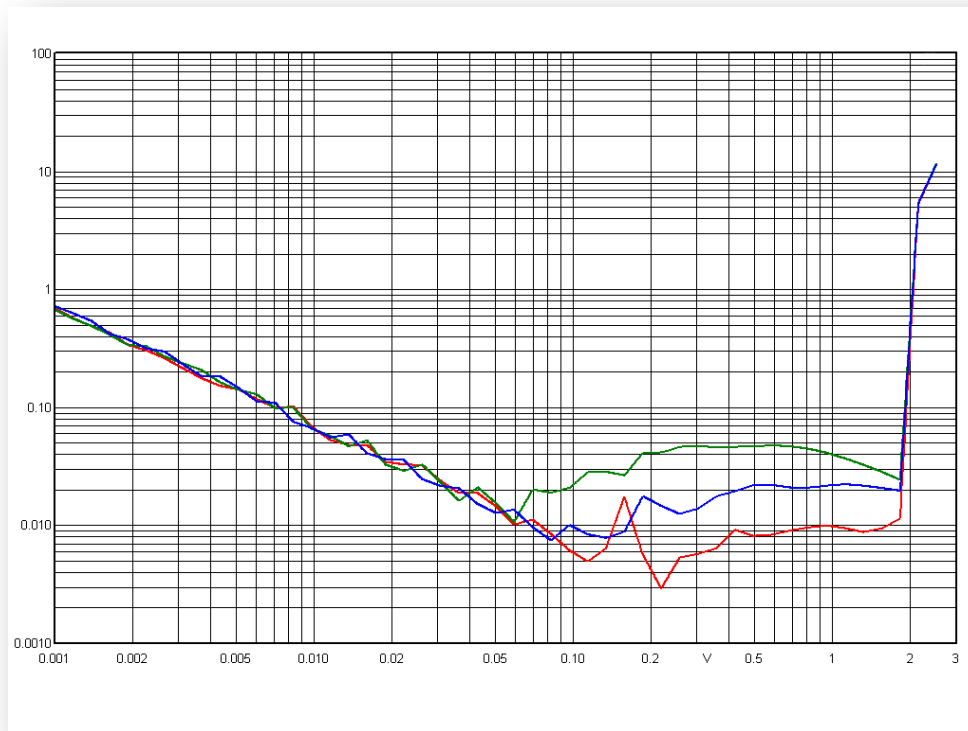


Abbildung 60: THD / Eingangssignal bei 8Ω (rot), 4Ω (blau) und 2Ω (grün)

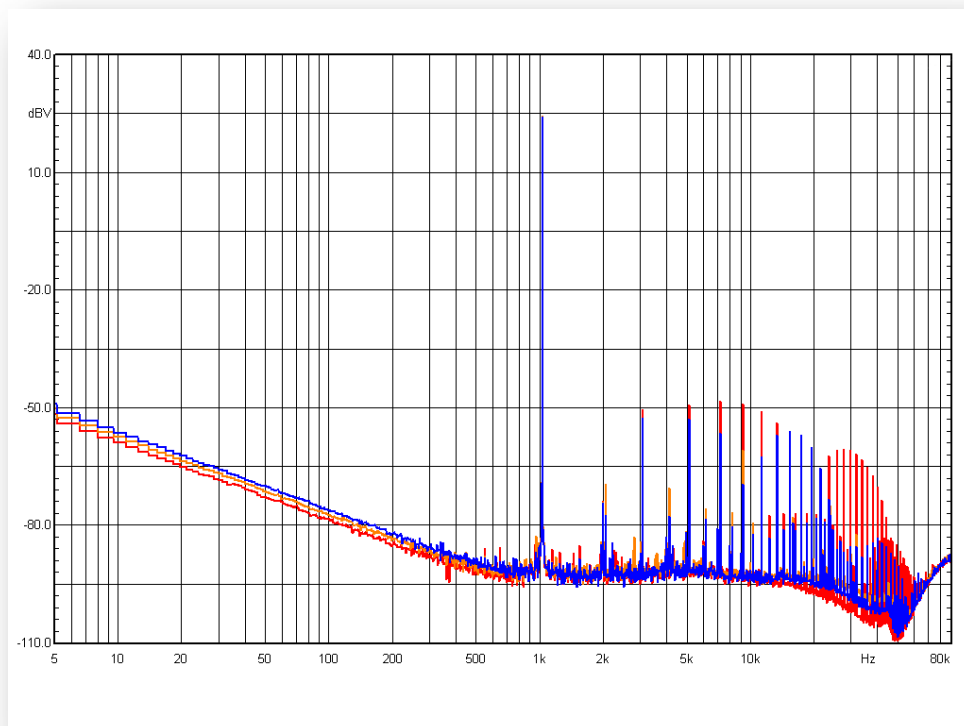


Abbildung 61: Intermodulationsverzerrungen 1kHz bei Vollast, 8Ω (rot), 4Ω (blau) und 2Ω (grün)

8. Der DSP

Wie bereits mehrfach erwähnt besitzt der Aktiveinschub des Seismic Subwoofers einen digitalen Signalprozessor. Dieser Chip ermöglicht es, die Subwoofer fast beliebig zu filtern. Darüber hinaus besitzt der DSP die Möglichkeit, den Satelliten oder Hauptlautsprecher zu verzögern, um die Subwoofer perfekt zu integrieren. Es ist somit also kein Problem die Subwoofer stehend oder liegend direkt an der Wand zu betreiben.

Der DSP wird über die mitgelieferte Software für Windows programmiert. Dadurch wird das Setzen von diversen Filtern, Equalizern oder des Delays sehr vereinfacht. Die Software bietet auch die Möglichkeit die SPL Messung am Hörplatz zu importieren und direkt am PC zu bearbeiten. So kann man Raumprobleme wie Moden sehr wirkungsvoll und effektiv mildern.

„Live Update“ nennt sich eine weitere interessante Funktion, bei der die Filter, die Equalizer und auch das Delay direkt im Betrieb verändert werden können, um die Unterschiede direkt zu hören.

Die Kompressor- und Limiterfunktion des DSP vervollständigen die Ausstattung, obwohl diese Funktionen eher im Pro Audio Segment Verwendung finden.

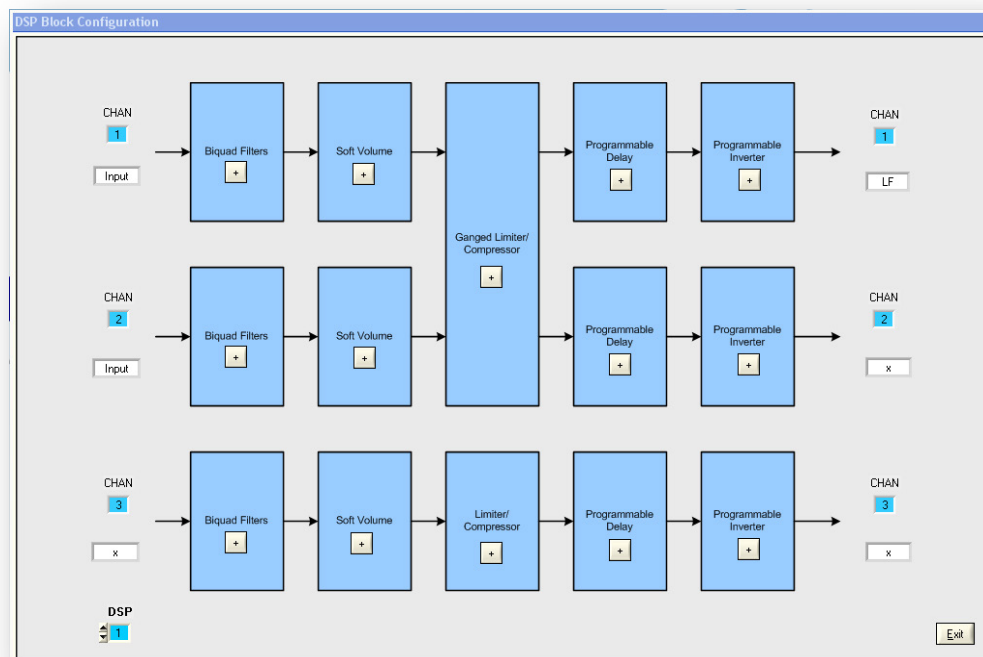


Abbildung 62: Übersicht über die DSP Funktionen

Bei Verwendung von zwei Subwoofern und entsprechend zwei DSP erhält man zusätzlich noch die Möglichkeit die Ausgänge der Mono-Prozessoren für die bestehenden Hauptlautsprecher zu nutzen. Das bedeutet, dass man nun den Hauptlautsprecher mit einem Hochpassfilter ausstatten kann, was ihn im Tieftonbereich von Hubarbeit und damit verbundene Verzerrungen entlastet. Gerade 2-Wege Systeme profitieren dadurch enorm.

Mit den Equalizern kann man anschließend noch Unstimmigkeiten des „Satelliten“ lindern oder persönliche Vorlieben herausarbeiten. Den Frequenzgang kann man so sehr einfach anpassen. Letztendlich handelt es sich dann nicht mehr um ein getrenntes Sub-Sat System, sondern um ein völlig neues und beliebig einstellbares System, das das bestehende System um einen Weg erweitert.

Die vorhandenen Endstufen lassen sich dabei weiterhin für die Satelliten nutzen. Auf Wunsch kann das Aktivmodul aber auch um eine weitere 1kW Icepowerendstufe erweitert werden.

Die maximale Ausbaustufe enthält insgesamt 3 Icepowermodule mit zweimal 1kW und einmal 500W Leistung an 4Ω. So lassen sich bestehende 2 Wege Systeme vollständig oder 3 oder mehr Wege Systeme teilweise aktivieren.

Ein kleines Beispiel soll das geschriebene verdeutlichen. Die Subwoofer sollen bei 100Hz getrennt werden und bis 20Hz entzerrt werden. Die Filter sehen wie folgt aus:

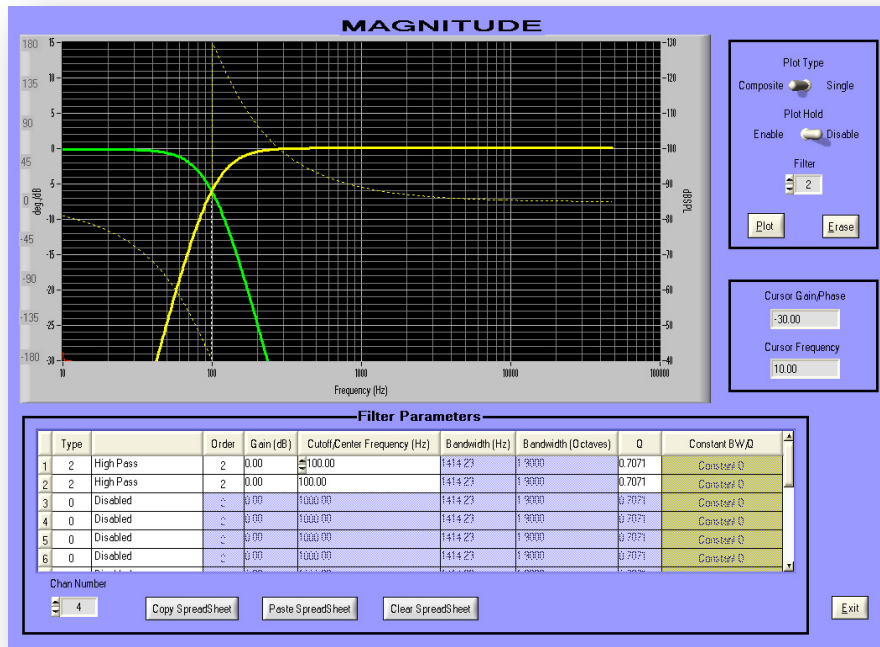


Abbildung 63: Hoch- und Tiefpass bei 100Hz

Danach wird die Messung des Subwoofers importiert und auf die Zielfunktion, in unserem Fall eine lineare Wiedergabe bis ca. 20Hz, entzerrt. Die dicke Kurve entspricht dabei der elektrischen Übertragungsfunktion der Filter während die dünne Kurve die SPL Kurve des Subwoofers mit Filter darstellt.

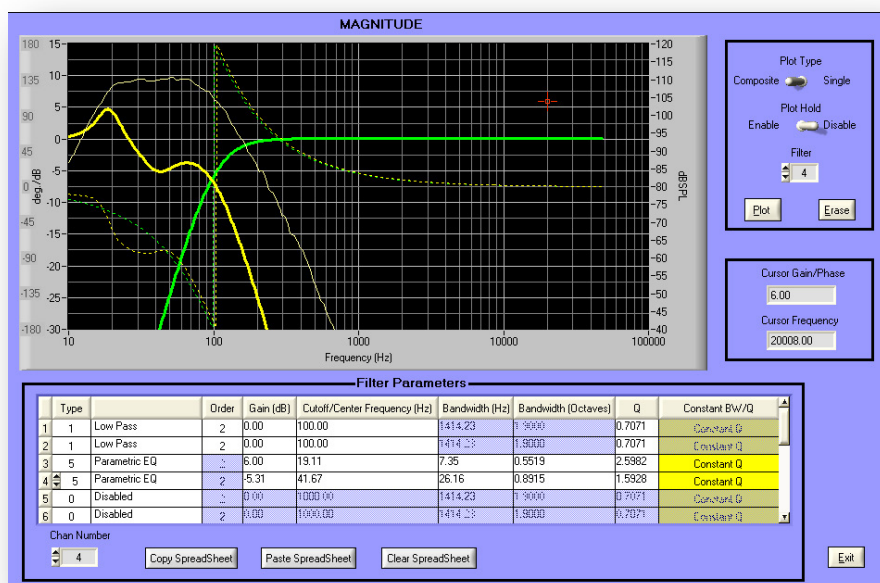


Abbildung 64: Entzerrung des Subwoofers

Im nächsten Schritt importieren wir nun die Schalldruckkurve des Satelliten.

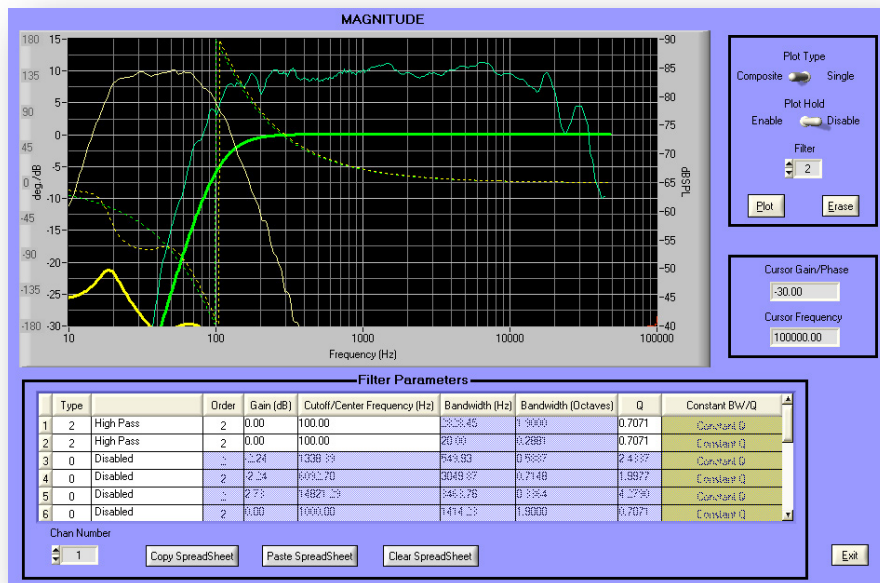


Abbildung 65: Import der Schalldruckkurve des Satelliten

Nachdem man die Pegel des Subwoofers mit dem des Lautsprechers abgeglichen hat, besteht nun noch die Möglichkeit auch diesen Verlauf mit Equalizern zu ändern. In folgendem Bild wurde der Lautsprecher linearisiert und das Delay so angepasst, bis sich die Schalldruckkurven des Subwoofers und des Satelliten perfekt summieren.

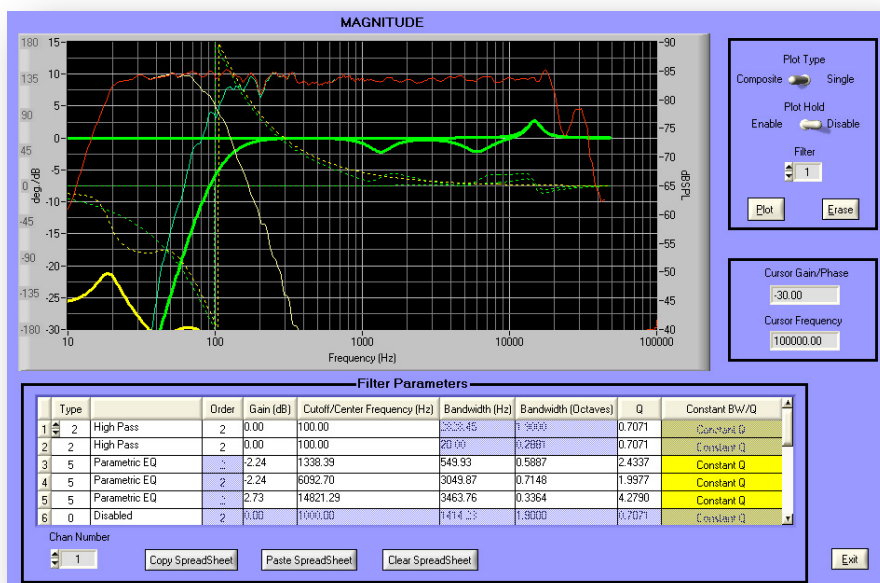


Abbildung 66: Optimierung des Systems

Das Beispiel zeigt sehr deutlich die Vorteile bei der Nutzung eines DSP. Analog ist dieses Ergebnis unter anderem wegen dem mechanischen Versatz zwischen Subwoofer und Satellit realisierbar und selbst mit analogen Aktivschaltungen ist der Aufwand enorm und nicht vergleichbar.

Die folgenden Bilder stellen klar, dass die Einstellungen des DSP auch mit realen Messungen übereinstimmen. Dazu wurden zuerst verschiedene EQ Einstellungen bei 1kHz gewählt und am Ausgang messtechnisch überprüft.

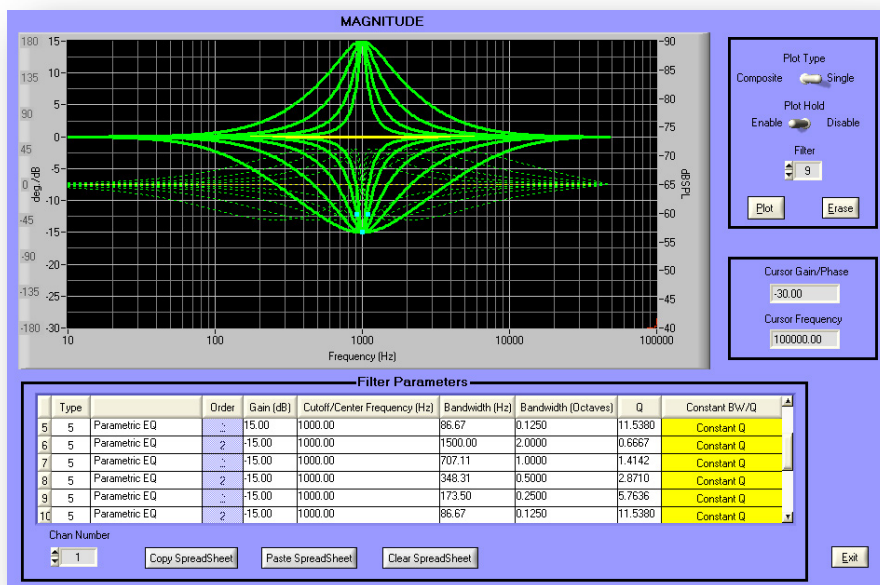


Abbildung 67: verschiedene Güten der Equalizer

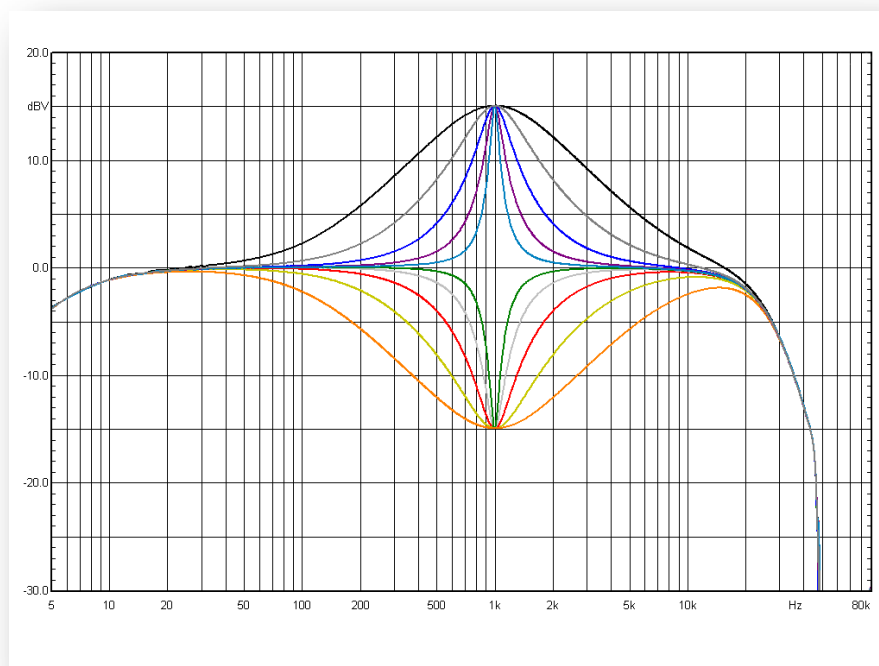


Abbildung 68: verschiedene Güten der Equalizer nachgemessen

Die Equalizer wurden dazu mit maximal 15dB angehoben, bzw. abgesenkt und in ihrer Güte variiert. Das Ergebnis passt hervorragend zu den Einstellungen in der Software.

Die nächsten Bilder zeigen den Vergleich zwischen der Einstellung am PC und einer Kontrollmessung am Ausgang des DSP zweier Filter (Hoch- und Tiefpass bei 100Hz) und deren Summation.

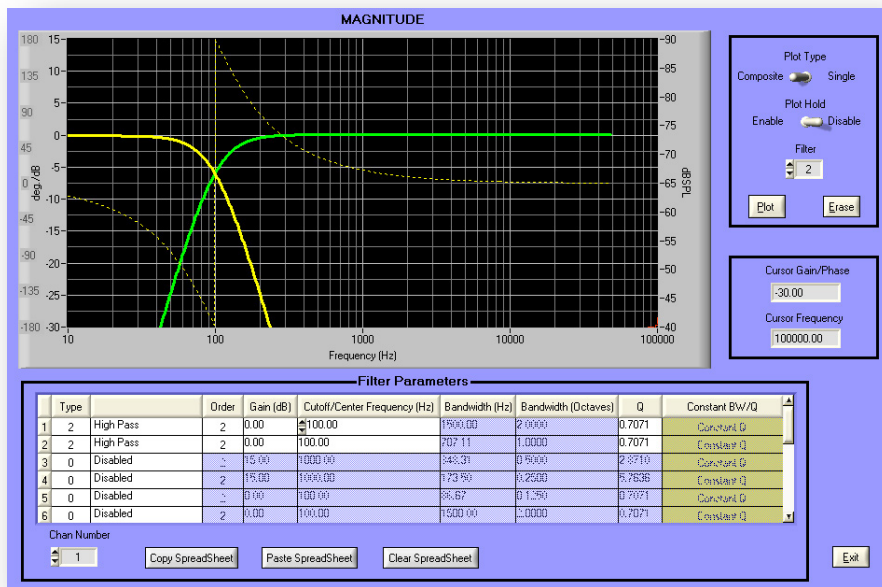


Abbildung 69: Hoch- und Tiefpass bei 100Hz

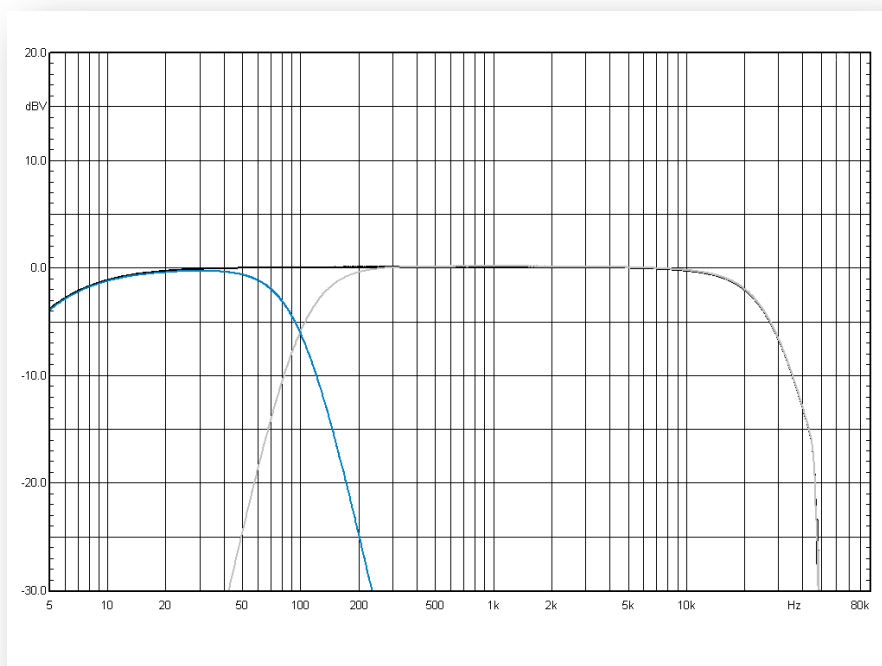


Abbildung 70: Kontrollmessung des Hoch- und Tiefpasses

Auch hier zeigt der DSP keine Schwächen und arbeitet genau nach Vorgabe. Die Filterfunktionen sind natürlich in der Frequenz und der Steilheit fast beliebig einstellbar, und selbstverständlich lässt sich auch ein Hochpassfilter bei minimal 15Hz als Subsonicfilter benutzen um den Subwoofer vor extrem niedrigen Frequenzen zu schützen.

Zu guter Letzt überprüfen wir noch die Funktion des Delays, welches sich sehr genau im Bereich zwischen 0,01ms und maximal 21ms einstellen lässt. Für die Messung haben wir den Ausgang um 20ms verzögert. In der Abbildung 71 kann man deutlich den Zeitunterschied zwischen den 2 gemessenen Impulsen herauslesen.

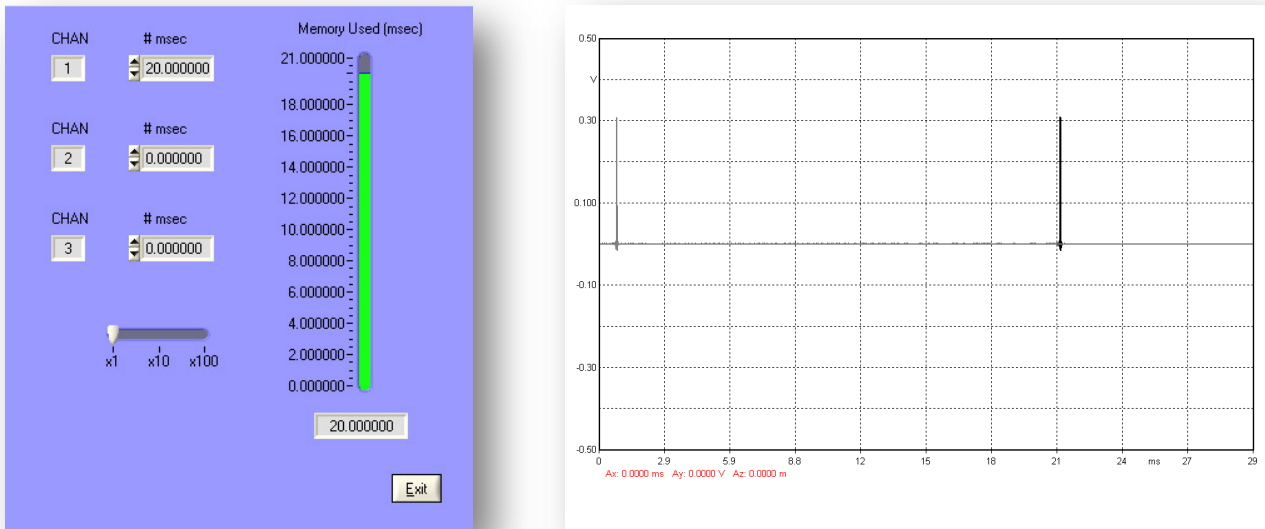


Abbildung 71: Impulsmessung zur Veranschaulichung der Verzögerung

Es zeigt sich, dass der DSP gravierende Vorteile gegenüber passiven Weichen besitzt. Die Möglichkeiten sind fast unbegrenzt. So bietet es sich auch an verschiedene Settings, also Einstellungen, für verschiedene Gegebenheiten wie Heimkino- oder Stereobetrieb zu speichern.

Ein weiterer großer Vorteil des DSP besteht darin, vorhandene Raumprobleme, in Form von dröhnenden Moden, zu mildern. Gerade im Tiefbassbereich wo Absorber unverhältnismäßig groß werden stellt das eine sehr gute und leicht handhabbare Lösung dar. Das Niveau der bestehenden Anlage wird dadurch enorm gesteigert.

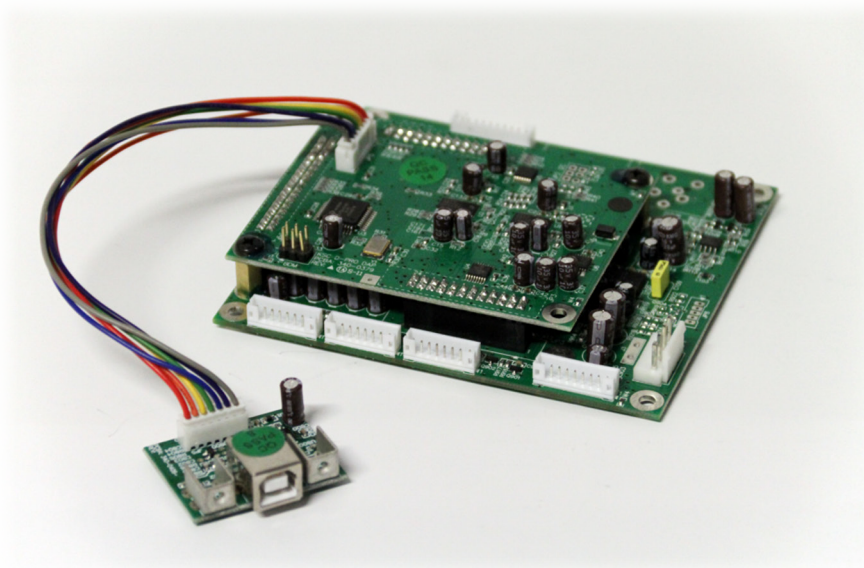


Abbildung 72: DSP Modul

9. Klangbeschreibung

Es ist nicht immer einfach das Gehörte in Worte zu fassen. Die Wahrnehmung im Tieftonbereich ist sehr unterschiedlich. Während die einen Menschen eher einen recht schlanken Tiefton, der aus einer höheren Grenzfrequenz resultiert, präferieren, bevorzugen die anderen einen extrem tiefen Tieftonbereich.

Gerade Hörer, die extrem tiefe Abstimmungen nicht gewohnt sind, empfinden den Tiefton als langsam oder schwammig. Dabei sollte man aber nicht vergessen, dass die Wellenlänge bei 20Hz bereits fast 17m beträgt und die Periodenzeit, also die Zeit einer kompletten Schwingung, bereits 50ms beträgt. Aus diesem Grund setzen viele Anwender eine höhere bewegte Masse der Membran mit schwindender Präzision gleich, da gerade sehr tief abgestimmte Systeme Chassis mit höherer Membranmasse, welche für eine tiefe Resonanz nötig ist, besitzen. Wie wir bereits im Theorieteil festgestellt haben ist diese These oder Aussage nicht richtig. Vielmehr begrenzt die Masse die obere Grenzfrequenz.

Wie beschreibt man nun einen Subwoofer, den man beliebig einstellen kann?

Die Grundvoraussetzungen für präzisen und neutralen Klang (extrem niedrige Verzerrungen und sehr schnelles Ausschwingen) sind von Haus aus gegeben. Den gewünschten „Sound“ kann man schließlich mit dem DSP einstellen. Man kann sogar soweit gehen und andere Subwoofer „imitieren“ oder akustisch „nachahmen“, indem man deren Amplitude anhand des DSP nachbildet.

Als Beispiel haben wir dazu einmal ein typisches Eckhorn gemessen. Die Amplitude kann man in Abbildung 73 sehen. Neben der Amplitude ohne Filterung sieht man in dieser Abbildung auch die Trennung bei verschiedenen Frequenzen mit gängigen Filtern diverser Aktivmodule.

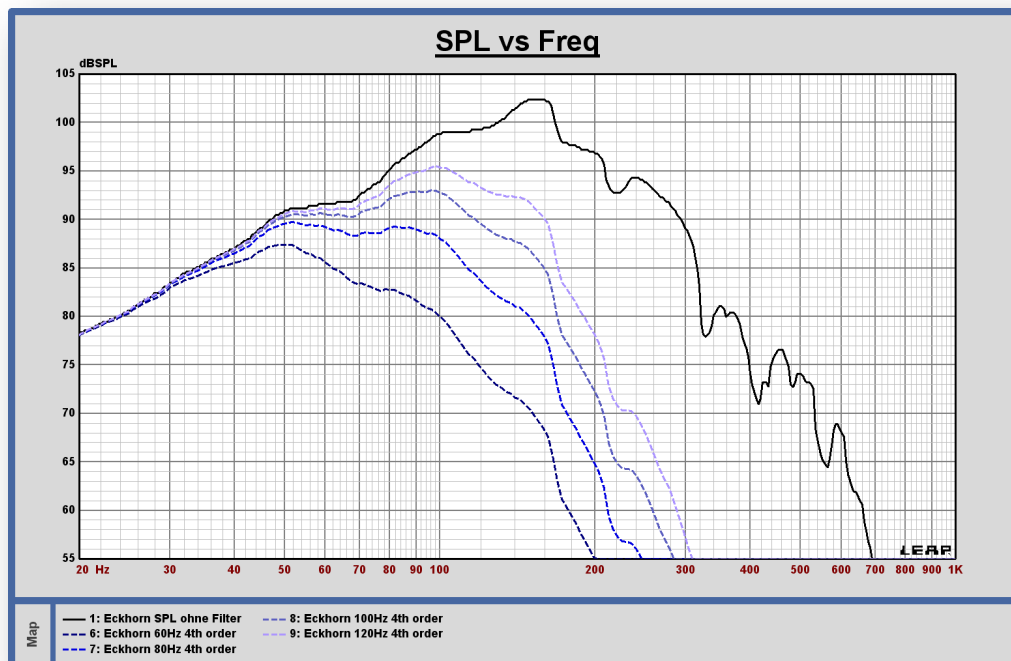


Abbildung 73: Schalldruckkurve eines typischen Eckhorns

Diese Kurve wurde nun anhand der Software mit diversen Filtern nachmodelliert. Nachdem die Kurve dann in den DSP geladen wurde konnte nun ein direkter Vergleich gemacht werden. Die Ähnlichkeit des Klanges ist wirklich verblüffend und nur sehr schwer zu erraten. Erst wenn es sehr laut wird kristallisiert sich das Eckhorn heraus. Bei normaler Laustärke fällt der Seismic nur durch seine Ruhe und Verzerrungsarmut auf.

Für den Hörtest wurden verschiedene Einstellungen, sogenannte Setups, erstellt. Dazu wurden die Subwoofer im Raum direkt an der Vorderwand mit definiertem Abstand zu den Seitenwänden (je $\frac{1}{4}$ Länge der Vorderwand) positioniert. So erhält man näherungsweise ein Single Bass Array, welches viele raumakustische Vorteile mit sich bringt. Darauf wollen wir hier aber nicht näher eingehen. Der Idealfall sieht 4 Subwoofer an der Vorderwand vor, wobei jeweils 2 Subwoofer übereinander gestapelt werden. Wie bereits erwähnt wurde das Gehäuse entsprechend gewählt um in normal hohen Räumen die Kriterien eines Arrays einzuhalten.

Erst nachdem die Subwoofer standen wurden Messungen am Hörplatz erstellt. Diese Messungen wurden anschließend in die DSP Software importiert. So kann man nun den Subwoofer sehr genau an den Raum anpassen und gleich auch noch bestehende Moden durch Einsatz von Equalizern zähmen. Normalerweise wären dazu enorm große Absorber oder umständlich abzustimmende Plattenresonatoren nötig, die nicht jeder aufstellen oder aufhängen mag. Ohne den DSP wäre eine dröhnfreie und präzise Wiedergabe nicht möglich.

Neben der Entzerrung der Subwoofer wurden auch gleich noch die Satelliten mit einem Hochpass ausgestattet und linearisiert.

Zuerst wurden natürlich bekannte Stücke mit extremen Tiefbass angehört. Dazu gehören Aufnahmen wie das bekannte Orgelstück „also sprach Zarathustra“, oder diverse Stücke mit Okodotrommeln. Die verschiedenen Felle der Trommeln sind klar unterscheid- und differenzierbar. Man kann auch das Ausschwingen der Felle sehr gut hören. Die Orgelaufnahme hingegen klingt mit diesen Subwoofern extrem mächtig und bringt das ganze Zimmer zum beben. Die Bässe sind dabei derart mächtig und überzeugend, dass man Gänsehaut bekommt.

Auch moderne Pop- und Rockmusik geizt nicht mit synthetischen Tiefbasseinlagen. Was sofort auffällt ist die absolute Kontrolle und Präzision des Subwoofersystems. Gerade bei Liveaufnahmen spürt und hört man nun auch den Trittschall den die Mikrofone auf der Bühne aufnehmen, was den Liveeindruck gewaltig verbessert.

Nachdem Stereobetrieb wurde selbstverständlich auch der Surroundbetrieb ausprobiert. Hier bot sich die sehr beliebte Szene aus „Jurassic Park“ an, in der der T-Rex auftaucht und brüllt. Hier zuckt man erst einmal ordentlich zusammen, und wenn der Saurier dann auch noch rennt, dann bewegt sich das Wasser im Glas im Hörraum genauso wie im Film. Das Gestampfe ist derart wuchtig und laut das man wie festgenagelt dasitzt. Das Atmen fällt einem aufgrund der Druckschwankungen schwerer.

Ein weiteres Highlight ist der Film Tron. Der Tiefbass auf dieser Blu-Ray ist so enorm, dass man das Grinsen nicht mehr aus dem Gesicht bekommt. Man spürt den Bass förmlich im ganzen Körper. Wir möchten auch darauf hinweisen, dass nicht alle Menschen Tiefbass vertragen. Unwohlsein oder Übelkeit ist nach einiger Zeit nicht ungewöhnlich.



Das Subwoofersystem wurde in dem Selbstbaumagazin Klang&Ton in der Ausgabe 6/2011 getestet. Die folgenden Zitate stammen aus dem Bericht:

- "*<Vergessen Sie alles, was Sie über Subwoofer zu wissen glauben - dieses Monster stellt sie alle in den Schatten. Er ist unglaublich groß und unheimlich schwer, spielt unglaublich tief und tut dies mit einer so unbestechlichen Präzision und Kontrolle, dass man nur noch grinsende Gesichter sieht.>*"

- "*<...der wohl konsequenteste Subwoofer, der mir jemals untergekommen ist...>*"

- "*<...denn jetzt kann man die berühmte 16-Hz-Orgelaufnahme "Also sprach Zarathustra" nicht nur hören, sondern auch erfühlen, und das in Originallautstärke...>*"

- "*<...lassen den über dem Hörraum residierenden Kollegen nach eigenem Bekunden "mit dem Schreibtisch durch den Raum wandern" und schieben abartige Druckwellen in und durch den Hörraum...>*"

- "*<Mit diesen Woofern entdecke ich meine gesamte Musiksammlung neu.>*"

- "*<Vermeintlich fette Nummern klingen bei der gebotenen Präzision plötzlich normal, vorher als durchschnittlich eingestufte Lieder lassen ungeahnte Qualitäten entdecken.>*"

- "*<Diese Subwoofer machen wirklich alles hörbar...>*"

Gesamtfazit:

"Der ultimative Subwoofer - hier ist er. Quint Audio beantwortet wirklich alle aufkommenden Fragen konsequent und schafft mit dem Seismic-18 ein audiophiles Traumgerät mit schier unendlicher Belastbarkeit, unbestechlicher Klangpräzision und bester Fertigungsqualität."

Viel Spaß bei hören wünscht euch das Team von

Quint Audio

Ein großer Dank geht an Dr. Arnold, Dipl. Ing. M. Schmidt und Dipl. Ing. Matthias Sylvester, ohne deren Mithilfe dieses Dokument nicht lesbar wäre...