

## Schein und Sein – Simulation und Wirklichkeit einer Frequenzweiche

### 1 Worum geht's?

#### Inhalt

Dieser Artikel soll anhand eines Beispiels zeigen, inwieweit eine am Computer simulierte Weiche mit der Realität übereinstimmt. Damit sollen Erkenntnisse über die Genauigkeit und Verlässlichkeit der Weichenentwicklung mit Computerunterstützung gewonnen werden und allfällige Problembereiche aufgedeckt werden.

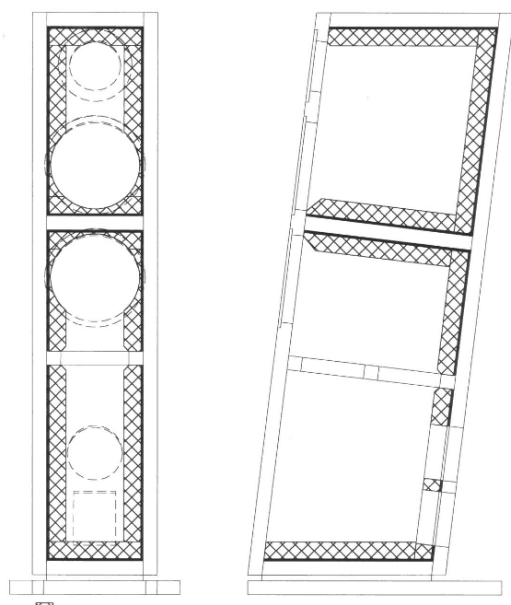
#### Vorgehen

Als Beispiel dient der Lautsprecher *Viper*<sup>i</sup>. Für diesen auch als Fertigbausatz erhältlichen Lautsprecher wurde, wie in einem früheren Artikel gezeigt<sup>ii</sup>, mit Unterstützung einer Computersimulation eine neue Frequenzweiche entwickelt.

Zunächst wird auf mögliche Gründe für eine Differenz zwischen Simulation und tatsächlich gemessenen Frequenzverläufen eingegangen. Anschliessend werden die einzelnen Chassis sowie der gesamte Lautsprecher auf die Übereinstimmung mit der Simulation überprüft. Aus allfälligen Abweichungen sollen Rückschlüsse auf Problembereiche der Simulation gezogen sowie soweit notwendig, die Frequenzweiche modifiziert werden.

Die hier einer Nachkontrolle unterzogene Frequenzweiche ist mit ihren 23 Bauteilen bereits etwas umfangreicher. D.h. die Anzahl der Quellen für potentielle Abweichungen ist relativ gross und deshalb interessant für eine nähere Betrachtung.

#### Der Lautsprecher: die „Viper“



## 2 Potentielle Ursachen für Abweichungen

Simulation und Wirklichkeit der Frequenzweiche können aus verschiedenen Gründen voneinander abweichen.

Eine erste Ursache für eine Abweichung liegt in der Verlässlichkeit des Messsystems. Die Messsoftware ARTA, mit welcher die Messungen durchgeführt werden, gilt als verlässlich. Bei allen Messungen wurde die Möglichkeit genutzt, die jeweiligen Frequenzverläufe aus dem Durchschnitt von 8 Einzelmessungen zu generieren. Die weiteren Komponenten des Messsystems wie Computer, Soundkarte und Verstärker unterliegen keiner nennenswerten Schwankung oder Tagesform.

Eine zweite Abweichungsursache liegt in einem räumlich nicht identischen Messaufbau. D.h. die Position von Lautsprecher und Mikrofon müssen zu beiden Zeitpunkten identisch sein. Alle weiteren im Raum befindlichen Gegenstände müssen ebenfalls unverändert bleiben. Da die Messung in einem bewohnten Raum durchgeführt wird, ist die zweite Bedingung nicht exakt erfüllbar. Aber auch die Reproduktion von Lautsprecher und Mikrofonposition ist nicht zu 100% erfüllbar. Während der Mikrofonabstand zur Schallwand zuverlässig reproduziert werden kann, ist die genau frontale Mikrofonposition oder die genaue Ausrichtung des Lautsprechers für Winkelmessungen schwieriger. Hier müssen kleine Ungenauigkeiten in Kauf genommen werden.

Eine dritte Abweichung ergibt sich zwischen Messung und Simulation des Summenfrequenzgangs des gesamten Lautsprechers. Während der Summenfrequenzgang auf Basis von frontal im Abstand von 60 cm gemessenen individuellen Chassisfrequenzgängen simuliert wird, wird der Summenfrequenzgang am realen Lautsprecher zwecks optimaler Schalladdition zwischen Hoch und Mitteltöner vorgenommen. Dabei beträgt der vertikale Winkel zum Mitteltöner  $5.5^\circ$ , jener zum Hochtöner  $11.5^\circ$ .<sup>iii</sup> Würde der Messabstand beliebig vergrössert, würden diese Winkel gegen null tendieren, allerdings ergeben sich bei grösserem Abstand weit gravierendere Messprobleme. Unter einem Winkel von  $5.5^\circ$  bzw.  $11.5^\circ$  sind noch keine grösseren Abweichungen von der Simulation zu erwarten, allenfalls ein minimaler Schallpegelverlust im oberen Hochtonbereich sowie am oberen Übertragungsende des Mitteltöners.

Die vierte Komponente der Unsicherheit liegt der Toleranz der Weichenbauteile. Während die Simulation mit exakt den eingegebenen Werten rechnet, muss man sich in Praxis mit Bauteilen begnügen, die mehr oder weniger dem aufgedruckten Wert entsprechen. Die in der untersuchten Frequenzweiche verwendeten Bauteile verfügen über die üblichen Toleranzen, das sind bei den Widerständen  $\pm 2\%$ , bei den Spulen und Kondensatoren  $\pm 5\%$ . Werden die Bauteilewerte in der Simulation in den üblichen Toleranzbreiten variiert, ergibt sich bei ungünstiger und unwahrscheinlicher Kumulation der Bauteilefehler in die gleiche Richtung eine Abweichungen von maximal  $\pm 1$  dB, was nicht allzu schwer wiegt. In der Realität wird diese Abweichung aber weit geringer ausfallen.

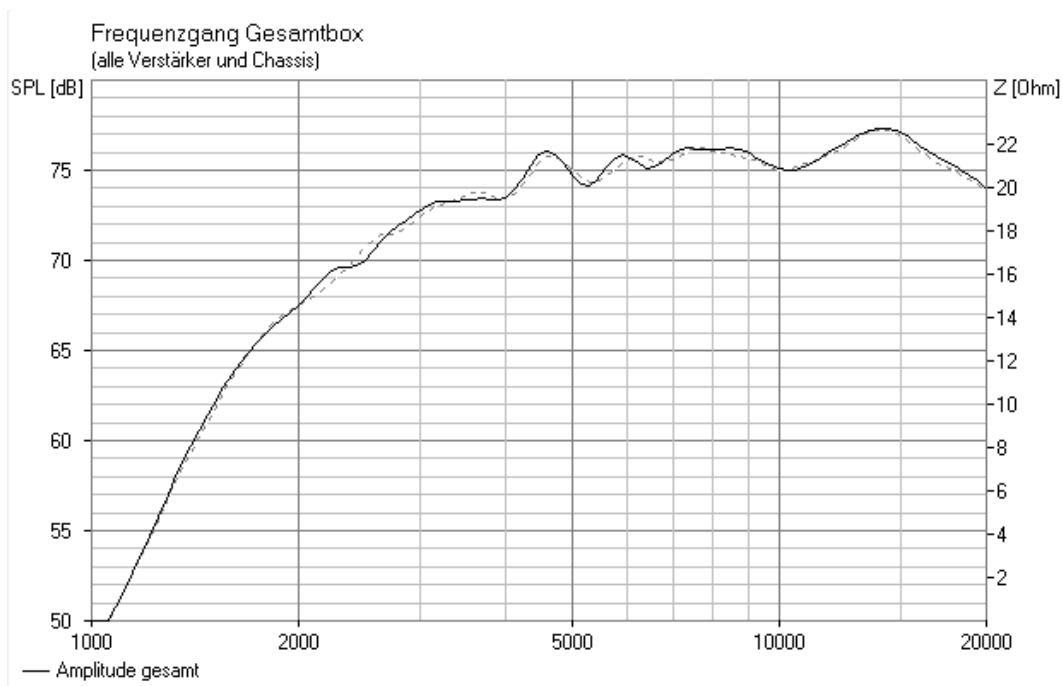
Sind alle äusseren Fehlerquellen (wie bspw. die vier oben genannten) eliminiert, bleibt die letzte Fehlerquelle übrig, die Simulation selbst.

Der individuelle Einfluss der oben erwähnten Fehlerquellen wird hier nicht näher quantifiziert. Im Vordergrund steht die Frage, wie hoch die Abweichungen in den einzelnen Weichenzweigen und insgesamt sein werden. Je genauer das Simulationsverfahren, desto effektiver und effizienter gestaltet sich die Weichenentwicklung.

### 3 Vergleich der einzelnen Chassis

#### Hochtöner

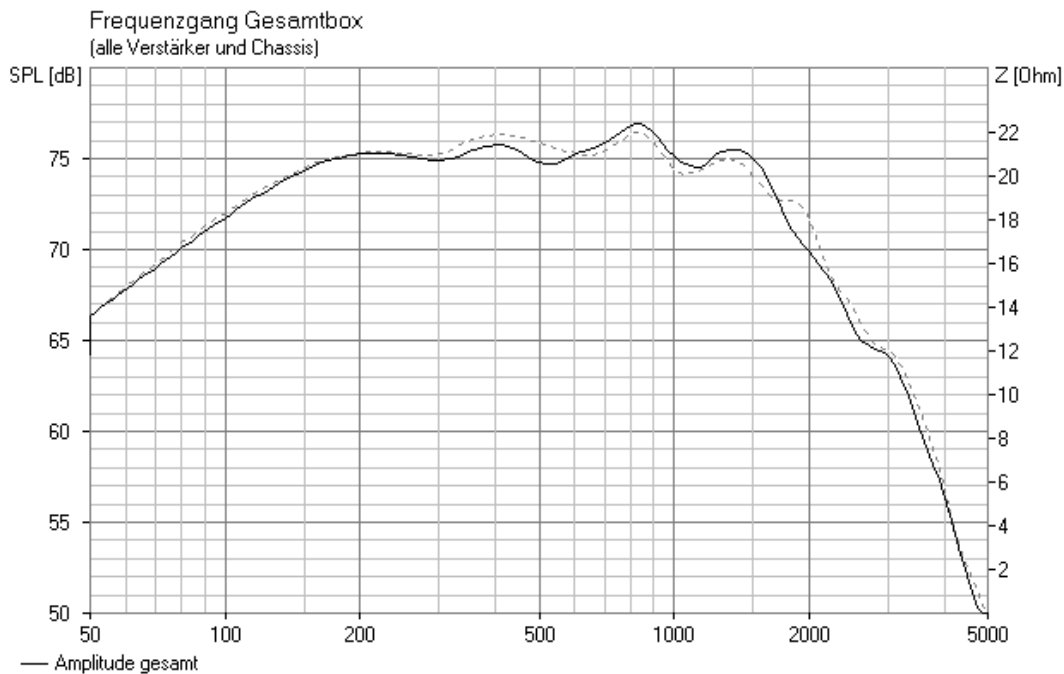
##### Hochtöner gefiltert – Simulation vs. Wirklichkeit



Die ausgezogene Linie zeigt den effektiv gemessenen Frequenzverlauf, die gestrichelte jenen aus der Simulation. Der Hochtöner ist mit 18 dB gefiltert, bei dessen Parallelspele ein Widerstand in Serie liegt, der die Filterresonanz dämpft. Ein L-Glied senkt den Pegel auf das Niveau des Mitteltöners.<sup>iv</sup> Auf den ersten Blick fällt die hohe Deckungsgleichheit auf. Die maximale Abweichung beträgt etwa 1 dB bei etwas unter- und oberhalb von 2 kHz. Die beiden Kurven liegen über keinen grösseren Frequenzbereich auseinander, sondern allfällige Abweichungen bleiben auf einen kleinen Abschnitt beschränkt. Aus praktischer Sicht kann man hier wirklich von Deckungsgleichheit sprechen. Das kann einerseits bedeuten, dass die Simulation selbst hier tatsächlich fehlerfrei funktioniert oder, dass sich alle Fehlerquellen gerade kompensieren. Aus Sicht der Weichenentwicklung gibt's hier jedenfalls nichts zu korrigieren.

## Mitteltöner

### Mitteltöner gefiltert – Simulation vs. Wirklichkeit



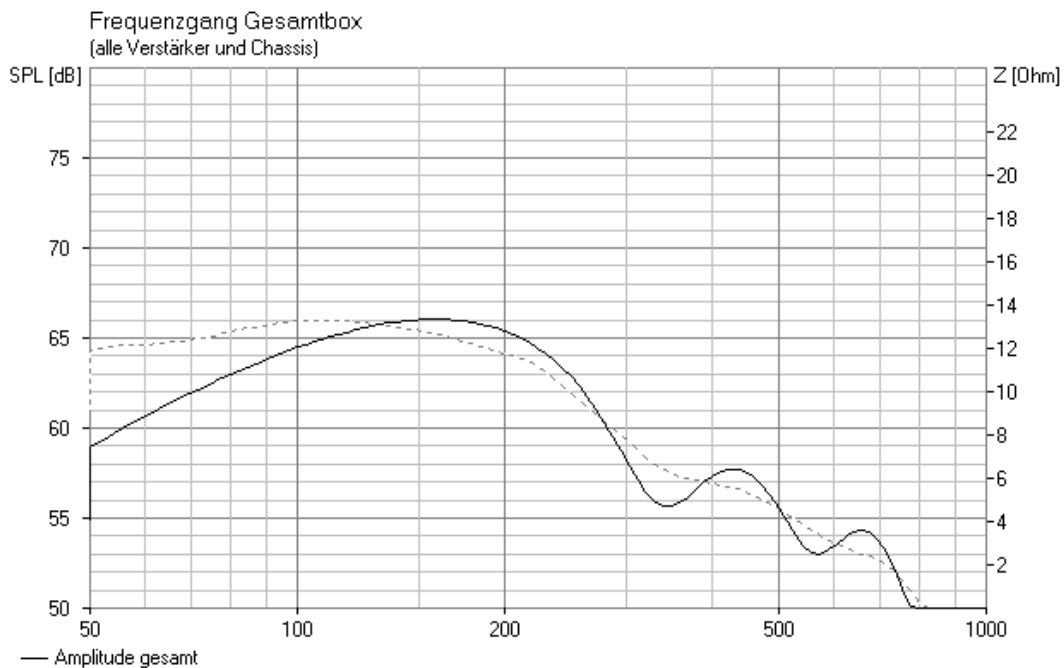
Die ausgezogene Linie zeigt wiederum den realen gefilterten Mitteltöner, die gestrichelte die Simulation. Der Mitteltöner bleibt zu tiefen Frequenzen hin ungefiltert, zu hohen Frequenzen hin wirkt ein 18-dB Tiefpass, wobei der Impedanzanstieg (aufgrund der Schwingspuleninduktivität) linearisiert wurde. Weiter unterdrückt ein erster Saugkreis eine Membranresonanz bei 1500 Hz, ein zweiter unterdrückt den Bafflestep und eine zweite Resonanz zusammen im Bereich von 500 bis 800 Hz.

Beide Kurven stimmen im Grossen und Ganzen gut überein, allerdings nicht mehr so exakt wie beim Hochtöner. Die grösste Abweichung befindet sich etwas unterhalb von 2 kHz und beträgt ca. 2.5 dB. Die Weiche ist zwischen 300 und 600 Hz sowie oberhalb von 1.7 kHz leiser als die Simulation und zwischen 700 Hz und 1.7 kHz lauter als die Simulation. In anderen Worten: Simulation und Wirklichkeit verlaufen auf grösseren Frequenzbereichen verschieden, was in Praxis durchaus hörbar ist, auch wenn die Unterschiede klein sind. Der maximale Fehler im Durchlassbereich des Filters liegt bei etwas über 1 dB.

Die Gegenüberstellung der beiden Kurven lässt vermuten, dass das 18 dB Filter zusammen mit der Impedanzlinearisierung grundsätzlich zum gewünschten Filterverhalten führt, die beiden Saugkreise aber möglicherweise nicht wie geplant wirken. Der erste Saugkreis, der die 1.5 kHz Resonanz dämpft, dürfte in seiner Wirkung etwas stärker sein. Die Mittenfrequenz des zweiten Saugkreises liegt etwas zu tief, was um 800 Hz für zu viel Pegel und unterhalb davon für zu wenig Pegel sorgt. Trotz den Simulationsabweichungen liegt der Frequenzverlauf zwischen 200 Hz und 1.5 kHz in einer Toleranzbreite von  $\pm 1.5$  dB, was immer noch als linear bezeichnet werden kann.

## Tieftöner

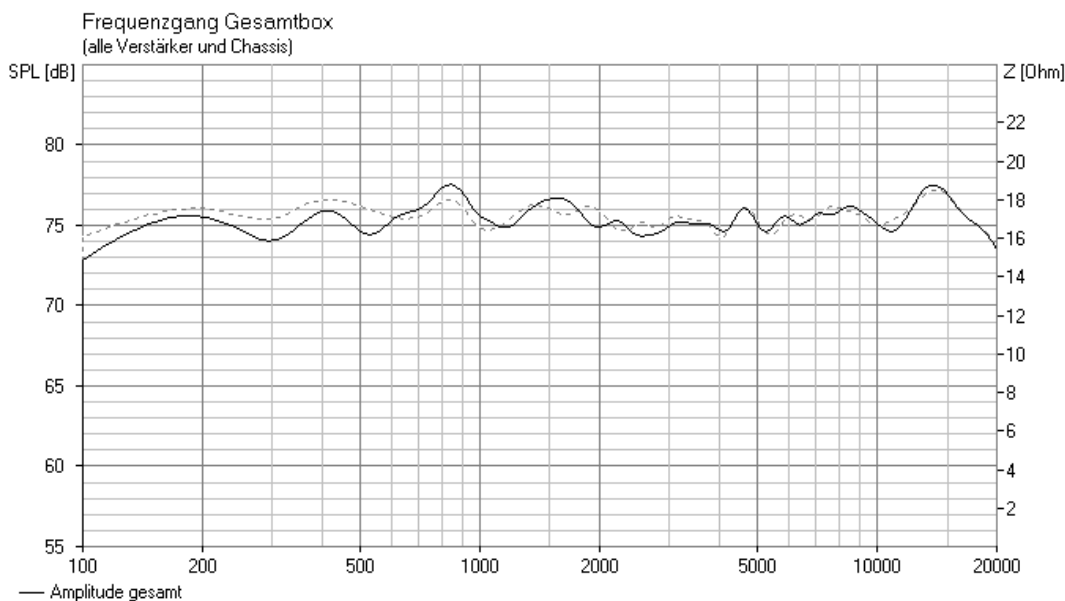
### Tieftöner gefiltert – Simulation vs. Wirklichkeit



Der Bass ist mit 12 dB pro Oktave gefiltert und verfügt über eine Impedanzlinearisierung bei der Einbauresonanzfrequenz. Aufgrund des Messverfahrens sind die Frequenzgänge bei tiefen Frequenzen nicht mehr zuverlässig bestimmbar, weshalb hier auf eine detaillierte Interpretation verzichtet wird. Es ist jedenfalls erkennbar, dass tatsächlicher (ausgezogen) und simulierter (gestrichelt) Frequenzgang bis auf die Welligkeit sehr ähnlich sind.

## 4 Vergleich Gesamtbox

### Gesamtbox - Simulation vs. Wirklichkeit



Der Frequenzverlauf des realen Lautsprechers ist im aussagekräftigen Messbereich zwischen 200 Hz und 20 kHz innerhalb einer Schwankungsbreite von  $\pm 2$  dB. Im Hochtonbereich bis hinunter auf etwa 3.5 kHz verlaufen Simulation und realer Lautsprecher annähernd identisch. Zwischen 600 und etwa 1700 Hz ist der reale Lautsprecher lauter als die Simulation, in den übrigen Frequenzbereichen hingegen etwas leiser. Weniger technisch ausgedrückt: die Mitten werden z.T. etwas betont, der Bass und Grundtonbereich ist minimal zurückhaltend, ebenso wie der Präsenzbereich.

Wer also genau den simulierten Frequenzgang erreichen will, muss nochmals an der Weichenabstimmung arbeiten. Würde der Lautsprecher nur punktuell abweichen, wäre rein subjektiv kaum ein Unterschied zum simulierten Frequenzgang wahrnehmbar. Erstrecken sich Differenzen, wenn auch minimal und wie im Beispiel hier, über einen grösseren Frequenzbereich, ist ein deutlicher Einfluss auf die Klangbalance zu erwarten.

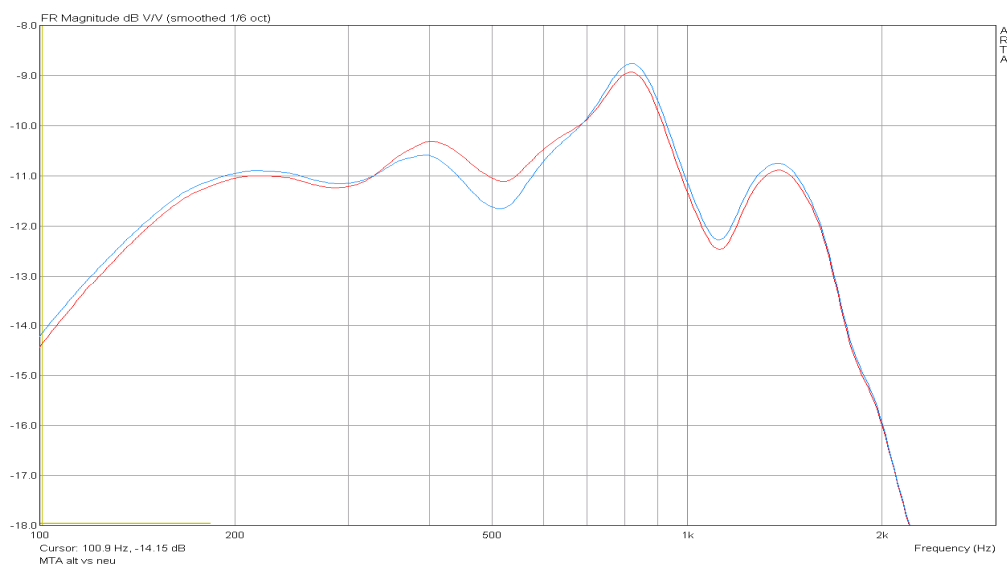
## 5 Weichenmodifikation

Dank der hohen Übereinstimmung zwischen Simulation und tatsächlichen Messergebnissen kann die Weichentopologie unverändert bleiben, ein Tuning der Weiche mit veränderten Bauteilwerten reicht aus. Dabei kann man zwei verschiedene Ziele vor Augen haben: Erstens, wie erwähnt der Simulation möglichst nahe zu kommen oder zweitens, den Klang des Lautsprechers ohne primären Fokus auf die Messergebnisse nach seinen Vorlieben abzustimmen. Meist empfiehlt sich ein kombiniertes Vorgehen, da die Abweichung des tatsächlichen Messergebnisses von der Simulation mit ein Grund ist für ein nicht optimal empfundenes Klangbild.

Mit Blick auf die Messergebnisse und das subjektives Hörempfinden wird einerseits beim Mitteltoner der Saugkreis, der den Bafflestep und eine Resonanz (im Frequenzbereich zwischen 500 und 800 Hz) wegsaugt und andererseits das Hochtonfilter modifiziert.

### Feintuning des Mitteltonzweigs

#### Mittelton: Frequenzgang vor und nach Tuning



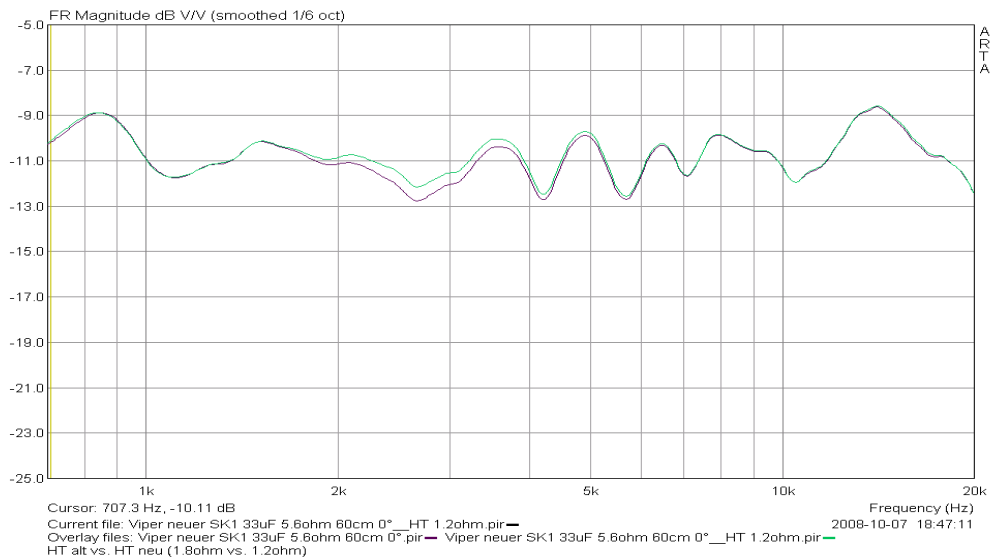
Die blaue Kurve zeigt den Frequenzgang vor der Modifikation, die rote jenen nach der Modifikation. Die Mittenfrequenz des Saugkreises wurde durch eine Verkleinerung des Kondensators erhöht (von 36.3 auf 33  $\mu$ F). Gleichzeitig wurde der Widerstand erhöht (von 4.7 auf 5.6 Ohm). Dadurch wird die Viper im unteren Mittelton lauter (350 bis 700 Hz), sprich es wird weniger Energie weggesogen. Der lauteste Bereich um 800 Hz wird hingegen etwas leiser. Der Frequenzgang schwankt im alleinigen Arbeitsbereich des Mitteltoners nicht viel mehr als +/- 1 dB, was also einer Verbesserung gleichkommt.

### Feintuning des Hochtonzweigs

Der Bereich zwischen 2 und 4 kHz ist gemäss Messung etwas unter dem Sollwert der Simulation. Bereits die Simulation ist auf der vorsichtigen Seite, da allfällige Überhöhungen in diesem Bereich sich schnell in vorlautem Klang und je nach Musikmaterial als nervig bemerkbar machen. Der sub-

jektive Klangeindruck bestätigt aber, dass der Lautsprecher dann doch etwas zu gutmütig und sanft aufspielt.

### Frequenzgang vor und nach Tuning des Hochtonzweigs



Die violette Kurve zeigt den Frequenzverlauf vor dem Tuning des Hochtonzweigs, die grüne jenen danach. Durch die Verkleinerung des Widerstands (von 1.8 auf 1.2 Ohm) im Parallelglied des 18-dB Hochpassfilters wurde die Filterform etwas bauchiger gemacht, was zwischen 2 und 4 kHz zu mehr Pegel führt. Damit spielt die Viper um einiges frischer, ohne allzu schnell ins aggressive zu kippen. Wie stark der Lautsprecher hier in seinem Präsenzbereich ausgefahren werden soll, ist auch eine Frage des persönlichen Geschmacks.

## 6 Fazit

Der Artikel dokumentiert, dass im vorliegenden Beispiel die Simulation und die Realität trotz genannter Fehlerquellen nicht weit auseinander liegen. Die Filterflanken stimmen verblüffend genau mit der Simulation überein. Gewisse Vorbehalte gibt es bei den Saugkreisen, deren Deckungsgleichheit nicht gleich hoch ist. Für die Entwicklung der Frequenzweiche bedeutet dies, dass man sich nicht alleine auf die Simulation verlassen kann, man aber mit wenigen nachfolgenden Korrekturschritten schnell und effizient das gewünschte Ergebnis erzielen kann.

Aus klanglicher Sicht lohnt es sich ebenfalls, nicht auf ein Übereinstimmen von Simulation und Wirklichkeit zu hoffen oder sich mit dem Erreichten zufrieden zu geben, sondern in Kenntnis der Differenz und der gewonnenen Hörerfahrung den Lautsprecher zu optimieren. Für die Viper bedeutet dies, dass sie sehr neutral klingt und dabei gehörig Spass macht.

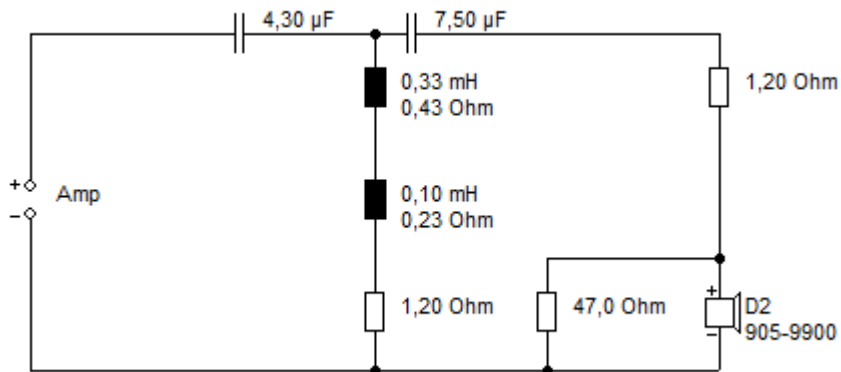


## Endnoten

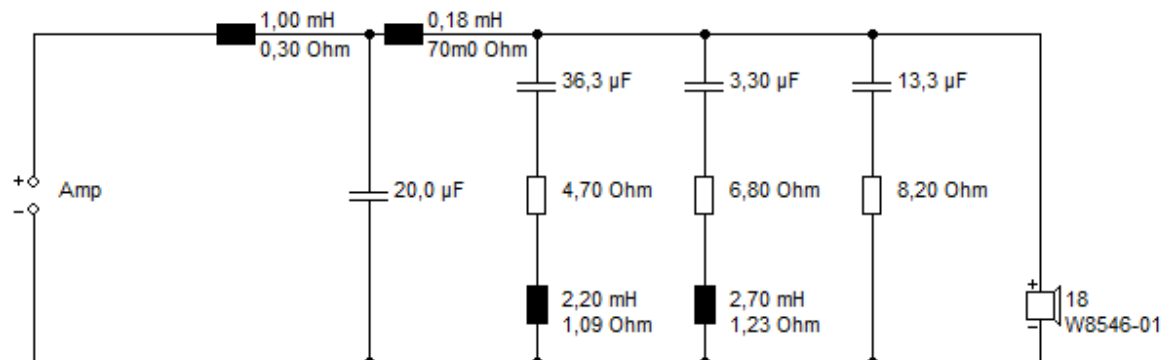
- <sup>i</sup> Bauplan der „Viper“, nachfolgend zu finden unter dem Namen „reference plus“:  
[http://www.audiocomponents.nl/speakers/scanspeak/reference/scanspeak-reference\\_eng.htm](http://www.audiocomponents.nl/speakers/scanspeak/reference/scanspeak-reference_eng.htm).
- <sup>ii</sup> Artikel zur Weichenentwicklung abzurufen unter:  
<http://www.siggaudiodesign.ch/others/Entwicklung%20einer%20Frequenzweiche.pdf>.
- <sup>iii</sup> Das Messmikrofon wird also nicht exakt zwischen Hoch- und Mittelton platziert, sondern leicht darunter, weshalb sich der Winkel zum Hochtöner vergrößert und jener zum Mitteltöner verkleinert. Diese nach unten gerichtete optimale Summenbildung wird durch die um 3° geneigte Schallwand kompensiert, wodurch letztendlich das Abstrahlverhalten in horizontaler Richtung optimal ist.
- <sup>iv</sup> Vgl. Anhang zu den Schaltbildern der einzelnen Weichenzweige.

## 7 Anhang

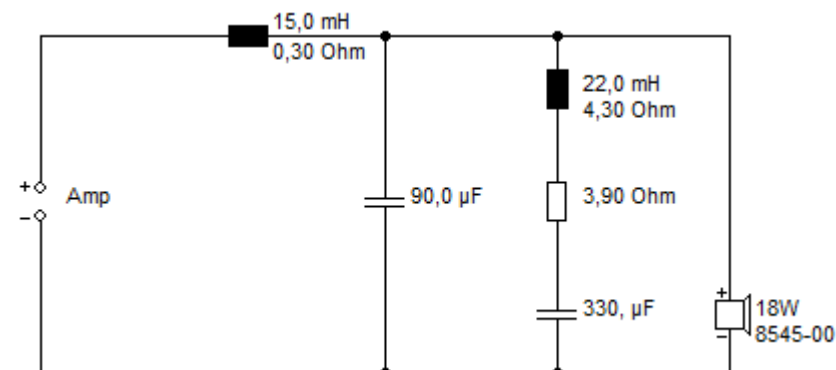
### Weichenschaltbild für den Hochtöner



### Weichenschaltbild für den Mitteltöner



### Weichenschaltbild für den Tieftöner



### **Linksammlung**

Datenblatt Hochtöner: [http://www.tymphony.com/files/products/pdf/D2905\\_990000.pdf](http://www.tymphony.com/files/products/pdf/D2905_990000.pdf)

Datenblatt Mitteltöner: [http://www.tymphony.com/files/products/pdf/18W\\_8546-00.pdf](http://www.tymphony.com/files/products/pdf/18W_8546-00.pdf)

Datenblatt Tieftöner: [http://www.tymphony.com/files/products/pdf/18W\\_8545-00.pdf](http://www.tymphony.com/files/products/pdf/18W_8545-00.pdf)

Messsoftware: <http://www.fesb.hr/~mateljan/arta/>

Simulationssoftware: <http://www.boxsim.de/>

Simulations-Projektdatei: [http://siggaudiodesign.ch/others/Viper\\_SiggAudioDesign.BPJ](http://siggaudiodesign.ch/others/Viper_SiggAudioDesign.BPJ)