

# BassCADe-Filtersimulation

## Beispiel 2-Wege-System

### Revisions History:

Version	Datum	Beschreibung
1.0	02.02.17	1. Entwurf (bezieht sich auf Softwareversion 3.4.3)

Alle Warenzeichen sind Eigentum ihrer Inhaber, es wird nicht speziell auf diese Trademarks hingewiesen.

Alle Inhalte wurden von mir nach bestem Wissen zusammengetragen. Aber auch mir kann mal ein Fehler unterlaufen. Deshalb kann ich keine Gewähr für die Richtigkeit übernehmen. Für Schäden oder ähnliches, die durch Angaben hier entstehen, schließe ich jede Haftung aus.

Die Inhalte sind urheberrechtlich geschützt, deren Nutzung ist ausschließlich dem nichtkommerziellen Bereich vorbehalten. Jegliche Übernahme von Inhalten (auch in Auszügen) ist ohne meine ausdrückliche, schriftliche Erlaubnis nicht gestattet!

## Inhalt

1. Einleitung.....	3
2. Vorbedingungen.....	4
3. Messdatenimport.....	7
4. Tieftöner-Impedanzkorrektur.....	9
5. Tieftöner mit Tiefpass.....	10
6. Hochtöner-Pegelabsenkung.....	11
7. Hochtöner-Frequenzgang-Korrektur.....	13
8. Hochtöner am Hochpass.....	14
9. Gesamtweiche.....	15
10. Quellen.....	16

Diese wie auch andere Beschreibungen, sowie die Windows-Software (32-Bit) selbst können auf meiner Homepage [www.selfmadehifi.de/basscad.htm](http://www.selfmadehifi.de/basscad.htm) heruntergeladen werden. Sollte jemand diese Datei, die als Hilfe in BassCADe über den jeweiligen Button aufrufbar ist, nicht online sondern offline nutzen wollen, muss sie als filtersimulation.pdf im gleichen Verzeichnis wie die bass.exe gespeichert werden.

Sollte noch irgendetwas unklar sein, weil noch Hinweise in dieser Hilfe fehlen, dann bitte eine E-Mail (siehe auf meiner Webseite unter [www.selfmadehifi.de/hifindex.htm](http://www.selfmadehifi.de/hifindex.htm)) an mich senden, damit ich diese Beschreibung eventuell ergänzen kann.

## 1. Einleitung

Mit BassCADe kann man einfache, passive Filter wie Hochpass (HP), Bandpass (BP) und Tiefpass (TP) berechnen, sowie Längswiderstände oder Spannungsteiler zur Pegelabsenkung. Zusätzlich ist auch eine Impedanzkorrektur möglich, um den welligen Widerstandsverlauf eines dynamischen Lautsprechers zu linearisieren, damit die berechneten Ergebnisse näher an den realen liegen.

Allerdings werden dabei die komplexen Lautsprecherlasten ( $R_e$  und  $X_e$ ) ignoriert und auch Innenwiderstände in Spulen teilweise nicht mit betrachtet.

Mit der Version 3.4.0 kam auch die Simulation des Equalizers (EQ) dazu, der als Kerbfilter, Bandsperre bzw. Hoch- oder Tieftonabsenkung benutzt werden kann. Dieses RLC-, RL- oder RC-Glied wird dann in Längsrichtung zum Lautsprecher verschaltet.

Leider war die Simulation des kompletten Filters an der realen Last, die sich anders als ein einfacher Widerstand verhält, bisher nicht möglich.

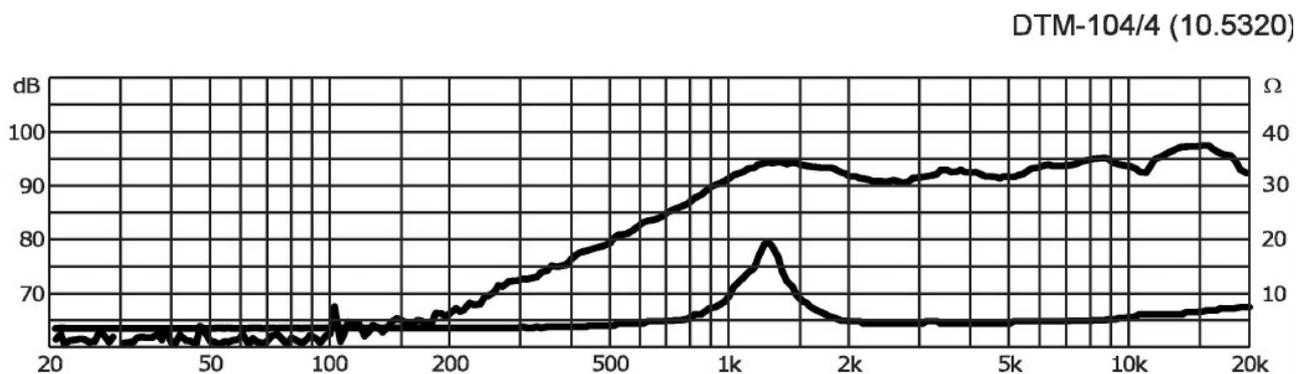
Ab der Version 3.4.1 wurde deshalb das Programm erweitert, um komplexe Lautsprecherlasten mit zu simulieren. Um nun nicht alle Module komplett umzuarbeiten, wurden Import- und Export-Funktionen vorgesehen, die auf den ersten Blick verwirren können.

Dieses Dokument soll zeigen, wie die Berechnung und Simulation solcher komplexen Filter für passive Weichen in BassCADe funktioniert.

## 2. Vorbedingungen

Das Beispiel geht von einem passiven 2-Wege-HiFi-System aus, das aus einem 16,5 cm-Tiefmitteltöner (TMT) bzw. Tieftöner (TT) sowie einem 25 mm-Hochtöner (HT) besteht und respektive mit einem Tief- und einem Hochpass ausgestattet ist. Als Basis dient das Boxen-Projekt 8, was auch auf der selfmadehifi-Seite [03] detailliert mit Bildern beschrieben ist.

Der Hochtöner soll im Pegel um 5 dB abgesenkt werden, da die Datenblattangaben und Messungen zeigen, dass der HT-Pegel (92 dB im Mittel) um diesen Betrag gegenüber dem Bass (87 dB laut Berechnungen aus den TSPs) zu laut ist. Beim Hochtöner wird in einem (oberen) Frequenzband der Pegel zusätzlich bedämpft, um einen gleichmäßigen Verlauf zu erhalten. Auch das zeigen Messungen, die ebenfalls im Datenblatt zu sehen sind, siehe im nachfolgenden Bild aus [02].

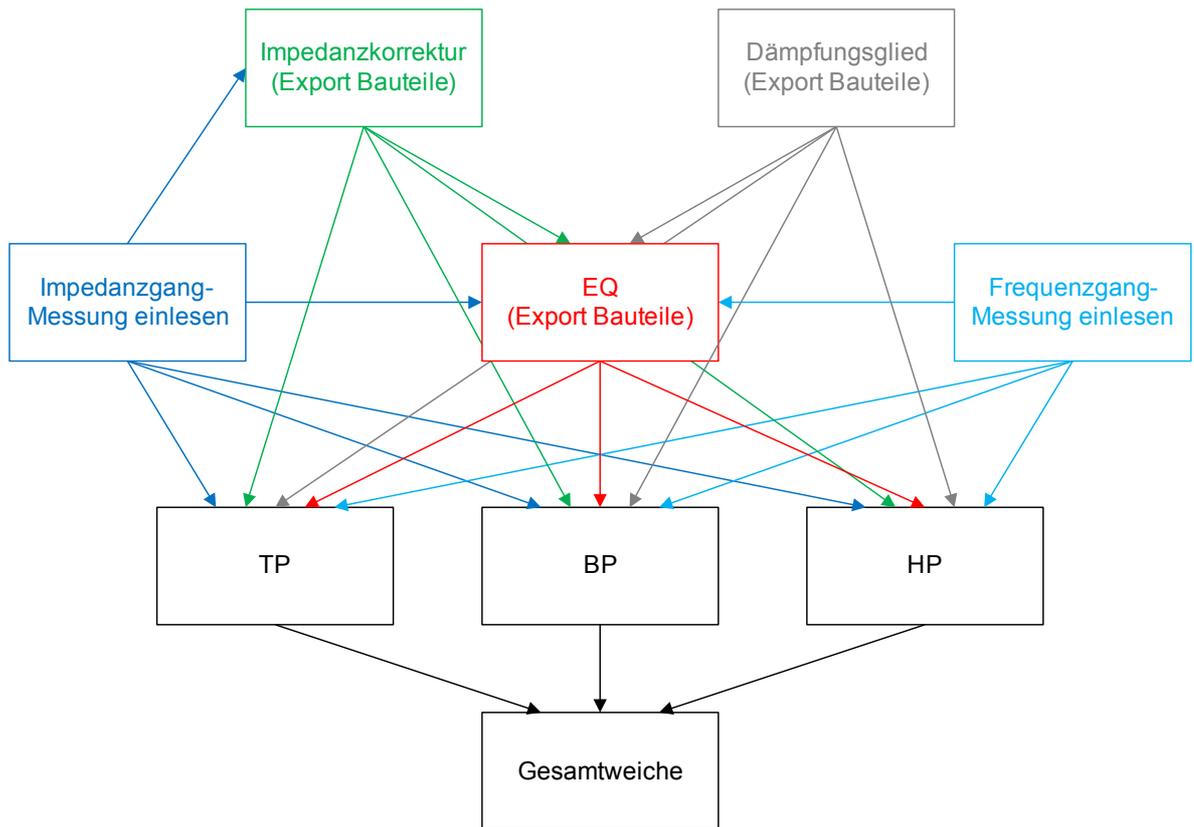


Die relativ kleine Schwingspulenimpedanz des Hochtöners wird bei der Berechnung der Frequenzgangkorrektur mit berücksichtigt, jedoch nicht aktiv wie beim Tieftöner kompensiert.

Damit der Tiefpass wie gewünscht arbeitet, erhält er angepasst an den Tieftöner zusätzlich ein Impedanzkorrekturglied.

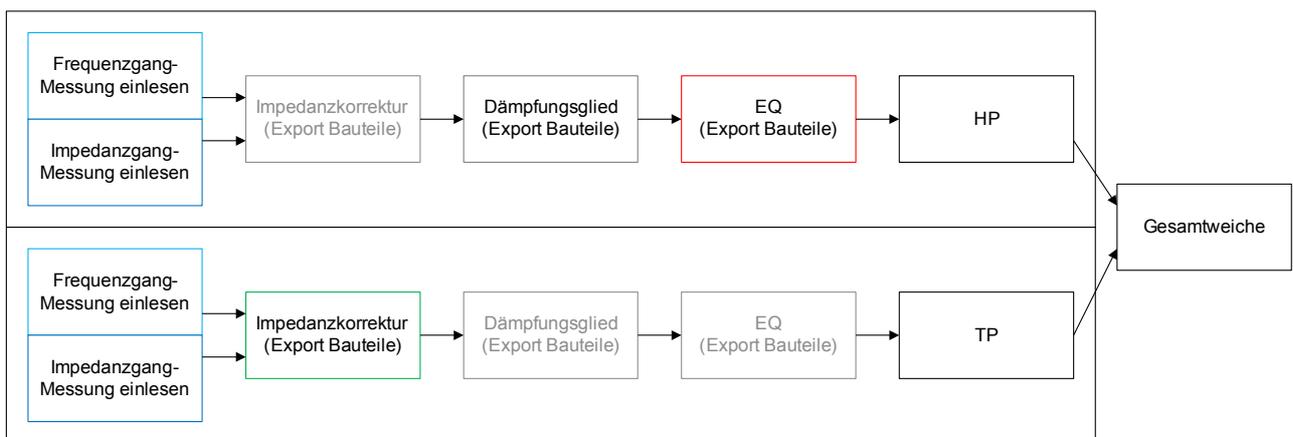
Die Trennfrequenz der Weiche soll laut Datenblattempfehlung des Hochtöners zwischen 2000 und 2500 Hz liegen. Da die Hochtönerresonanzfrequenz bei 1,2 kHz liegt, ist meine Empfehlung eher oberhalb von 2,4 kHz mit mindestens 2. Ordnung. Hier ist man aber flexibel, da der Tieftöner problemlos auch bis 5 kHz spielen kann.

Das nachfolgende Diagramm zeigt alle prinzipiellen Möglichkeiten, welche Daten für die Weichenberechnung im Programm ausgetauscht werden können.



Für die Simulationen sollte man sich in jedem Weichenzweig von hinten (Lautsprecher) nach vorn arbeiten. Die Reihenfolge ergibt sich anhand der Sinnhaftigkeit der einzelnen Weichenteile. Direkt parallel zum Lautsprecher sollte das Impedanzkorrekturglied angeordnet sein, davor die Pegelabsenkung, davor wiederum die Frequenzgangkorrektur. Diese folgt direkt nach dem reinen Filter, also dem Tiefpass, dem Bandpass oder dem Hochpass (TP, BP, HP).

Das schrittweise Vorgehen sieht also wie folgt aus: von links nach rechts, ich beginne hier mit dem TP (unten)



Die ausgegrauten Felder werden in diesem Beispiel nicht durchgeführt, das Vorgehen ist aber äquivalent zu dem hier beschriebenen.

Die Filterordnung hat leider nicht nur einen Einfluss auf die Flankensteilheit, je höher sie ist, desto größer wird auch die Phasenverschiebung. Die Summe der Phasenwinkel beider Weichenteile bestimmt neben dem Pegel (jeweils -3 dB an der Grenzfrequenz), wie sich die Pegel addieren.

Mit mittleren und höheren Frequenzen (wie in diesem Beispiel) kommen virtuelle Phasenverschiebungen (Laufzeit) durch den Abstand beider Lautsprecher hinzu. Bei 1 kHz beträgt die Wellenlänge in Luft 34 cm. Das bedeutet, dass bereits bei 8,5 cm (=  $\lambda/4$ ) Unterschied in Längsrichtung (Hochtöner- von Tieftönerebene) wie eine Phasenverschiebung von 90° wirken. Durch diesen konstanten Laufzeitunterschied ist die Phasenverschiebung jedoch bei jeder Frequenz unterschiedlich.

Ein Hochpass schiebt die Phase von min. 90° (1. Ordnung) auf 0°, ein Tiefpass von 0° auf mindestens -90° (1. Ordnung). Mit jeder Ordnung wird die Flanke gewünscht steiler, aber die Phase wird immer stärker verschoben, bei 4. Ordnung von 0° über den gesamten Bereich wieder auf 0° (360°).

Die folgende Tabelle zeigt die vektorielle Addition von Butterworth-Tiefpässen und -Hochpässen an der (jeweils gleichen) Grenzfrequenz  $f_g$  (-3 dB) abhängig von der Filterordnung.

Ordnung	Flankensteilheit t	Phase bei $f_g^*$	dB addiert 1**	dB addiert 2***
1	6 dB/Oktave	45°	0 dB	0 dB
2	12 dB/Oktave	90°	- ∞	+ 3 dB
3	18 dB/Oktave	135°	0 dB	0 dB
4	24 dB/Oktave	180°	+ 3 dB	- ∞
5	30 dB/Oktave	225°	0 dB	0 dB
6	36 dB/Oktave	270°	- ∞	+ 3 dB
7	42 dB/Oktave	315°	0 dB	0 dB
8	48 dB/Oktave	360°	+ 3 dB	- ∞

\*Phasenverschiebung beim Butterworth-Hochpass, TP jeweils negativer Wert

\*\*addierter Pegel bei  $f_g$  (-3 dB) von Tiefpass und Hochpass gleicher Ordnung

\*\*\* verpolter Hochtöner mit 180° Phasendrehung

Mit jeder Ordnung benötigt man bei passiven Weichen ein Bauteil mehr.

Wie in der Tabelle zu sehen, kommt es bei einer Phasendifferenz beider Zweige von 180° zur Auslöschung der jeweiligen Frequenz, dem man mit dem Verpolen eines Treibers entgegenwirkt, was einer Phasendrehung, also 180° Phase entspricht. In der Regel nimmt man den Hochtöner oder Mitteltöner dafür. Leider überhöht sich der Pegel leider.

Anhand dieser Tabelle erkennt man, warum jeweils ungerade Filterordnungen bei Hoch- und Tiefpässen bei vielen Designs bevorzugt werden.

Mit kleinen Abständen zwischen den Treibern und niedrigen Trennfrequenzen ist man hier eher auf der sicheren Seite, sonst bleiben nur aufwändige Simulationen und Messungen. Bei angepassten Filtern (z.B Linkwitz-Reilly mit passenden Grenzfrequenzen) funktioniert es aber auch in anderen Fällen.

### 3. Messdatenimport

Um bessere Simulationsergebnisse zu erhalten, wurde zuerst der Impedanzfrequenzgang mit einer ARTA-Box [05] und anschließend der Schalldruckpegel-Frequenzgang des Tieftöners mit einem kalibrierten Messmikrofon im bestehendem Bassreflex-Gehäuse gemessen. Als Messsoftware wird Room-Equation Wizard (REW [04]) verwendet, deren Ergebnisse im CSV-Format (comma separated values) in eine Textdatei exportiert werden können. Dieses JAVA-basierende Tool läuft unter Windows, Linux und Mac-OS.

Leider kann man die Exportbedingungen nicht direkt einstellen. Abhängig von der dargestellten Mittelung werden mehr oder weniger Werte exportiert. Im Zweifelsfall die Mittelung vor dem Export abschalten und das Ergebnis kontrollieren. Anhand der Dateigröße des Exports kann man schon viel erkennen: Über 1 MB (bei mir ca. 59 000 Werte) ist er komplett, mind. 100 KB (2000 Werte) sind ausreichend und 10 KB (ca. 250 Werte) sind zu wenig.

Bild folgt...

Nach dem Import werden im Textfeld oben rechts Details aus der importierten Datei wie z.B. auch die Anzahl aller Datenwerte. Es werden dabei alle Daten in das interne (BassCADE-native) Format konvertiert.

Bild folgt...

Zuerst wird die Impedanzmessung vom TT importiert. Die untere und obere Frequenz hängt von der Messung ab, sie wird oben in der Mitte dargestellt und lässt sich auch eingrenzen.

Hat die CSV-Datei (Endung TXT) weniger als 50 Werte pro Dekade, sollte, falls kein besserer Export möglich ist, vor dem Import „antialiasing“ angewählt werden, um den Verlauf zu glätten und Zwischenwerte zu interpolieren. Sind es in Summe mehr als 100 000 Werte, liegt also über dem Import-Maximalwert, kann mit dem Schieberegler oben links beim Import nur jeder zweite, dritte ... zehnte Wert eingelesen werden, um diese Anzahl zu reduzieren. Bei Impedanzmessungen darf keine Mittelung vorgenommen werden. In das Feld Name wird „Sinus-live“ eingetragen und dann rechts und unter „Impedanzmessung 1“ gespeichert. Wird dabei (beim Exportieren) die Phase dargestellt, ist also die Checkbox „Phase“ angewählt, werden die Phaseninfos auch mit exportiert, sonst nicht. Empfehlenswert ist das in fast allen Fällen.

Bild folgt...

Danach wird die Frequenzgangmessung vom Bass importiert. Das geschieht in ähnlicher Weise wie bei der Impedanz. Hier macht eine Mittelung beim Pegel oftmals Sinn. Möglich sind Mittelungen von 1/96, 1/48, 1/24, 1/12, 1/10...1/2 und einer gesamten (1/1) Oktave. Je nach Messung ist der Bereich 1/24 bis 1/3 sinnvoll. Die Option zur Mittelung der Phase sollte man nur in Ausnahmefällen benutzen. Beim Pegel wird der Maximalwert als Offset genommen, die Werte selbst sind dann auf diesen 0 dB-Wert bezogen. Dieser Offset-Wert ist veränderbar und wird auch

durch eine grüne links an der Y-Achse angezeigt. Mit dem Korrekturfeld daneben kann man die Messung virtuell verschieben, so ist eine Anpassung auf den realen SPL möglich. Mit der Checkbox „0dB-Ref“ kann man wählen, ob man die absolute Angabe oder die relative (auf 0 dB-bezogene) sehen will. Mit der Checkbox „full“ wählt man, ob man den wichtigen Audio-Bereich 10 Hz...20 kHz oder den gesamt möglichen Bereich in BassCADe 1 Hz...100 kHz sehen will. Intern werden oberhalb von 10 Hz 900 Werte pro Dekade verarbeitet. Man kann diese Messung auch in einen der 6 Slots der Gehäusesimulation exportieren und ihn so z.B. mit verschiedenen Bassreflex-Simulationen vergleichen.

Bild folgt...

Anschließend wird alles unter „Frequenzgangmessung 1“ gespeichert. Wird beim Exportieren die Phase dargestellt, ist also die Checkbox „Phase“ angewählt, werden die Phaseninfos ebenfalls exportiert.

Die Hochtonmessungen im Gehäuse werden ebenso importiert. Leider ist die Messung bei Hochtönern hier oftmals nur in einem eingeschränkten Bereich von 1 kHz bis 20 kHz möglich, da tiefere Frequenzen die Tweeter schädigen oder zerstören würden. Nach dem Import kann man hier die untere Frequenz mit dem Button daneben auf z.B. 20 Hz setzen. So wird der bisherige untere Wert für alle kleineren Werte übernommen. Damit sind auch Simulationen außerhalb des reinen HT-Bereiches möglich, aber so natürlich fehlerbehaftet. Diese Anpassung ist nur beim importierten Frequenzgang vor dem exportieren möglich.

Bild folgt...

Die beiden HT-Messungen werden dann ähnlich wie beim Tieftöner unter „Impedanzmessung 2“ sowie „Frequenzgangmessung 2“ gespeichert.

## 4. Tieftöner-Impedanzkorrektur

In der Regel ist aufgrund der deutlich größeren Schwingspuleninduktivität bei größeren Treibern, also Tieftönern, eine solche Korrektur notwendig, da die passive Weiche sonst nicht wie erwünscht arbeitet. Die hohe Impedanz des Lautsprechers (Faktor 10...20 gegenüber Nennimpedanz) wirkt direkt gegen den Filter und hebt die Dämpfung im oberen Frequenzbereich wieder auf. Nach Tiefpässen ist dieser Teil also fast immer empfehlenswert.

In diesem Beispiel wird deshalb genau so ein Korrekturglied bestehend aus 2 Bauteilen benutzt.

Das parallelgeschaltene RLC-Glied unterdrückt die obere Gehäuseresonanzfrequenz, sie ist aber in diesem Fall bei ca. 100 Hz und somit 4...5 Oktaven, also deutlich über 1 Dekade von der Filtergrenzfrequenz entfernt, so dass sie einen vernachlässigbaren Einfluss besitzt. Dieser Einfluss lässt sich im Tiefpassmodul auch simulieren, da man an der realen Lautsprecherimpedanz simulieren und die Impedanzkorrektur an- und abwählen kann.

Mit der importierten Impedanzmessung lassen sich mit „Werte aus Imp.-Messung 1“ Empfehlungen errechnen. Mit den gleichen Werten „Lese Impedanzverlauf 1“ kann man nun auch den resultierenden Impedanz-Verlauf simulieren.

Ideal wäre hier eine waagerechte Linie bei 4 Ohm. Vor allem im Bereich der Grenzfrequenz sollte dieser Wert nur wenig schwanken.

Bild folgt...

Die Daten der 2 Bauteile aus der Impedanzkorrektur werden zum TP exportiert, da keine weiteren Teile in diesem Weichenzweig enthalten sind. Sie können dann direkt später mit simuliert werden.

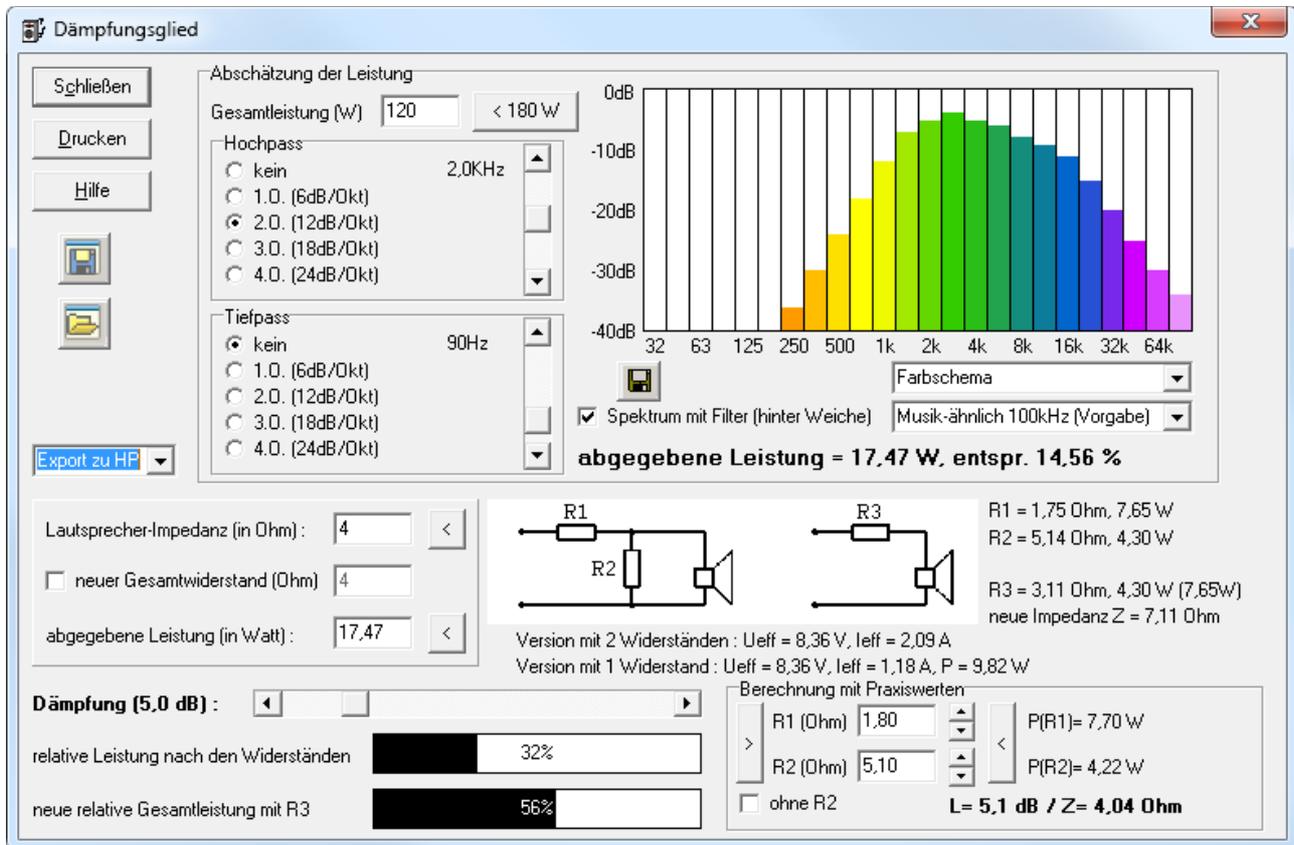
## 5. Tieftöner mit Tiefpass

Mit der Tiefton-Impedanzkorrektur kann nun hier in diesem Beispiel auch gleich der Tiefpass berechnet werden.

Die Original-Simulation geht von einem konstanten 4-Ohm-Abschluss aus. Die Veränderung mit realem Lautsprecher-Impedanzgang (Messung), sowie mit und ohne Korrekturglied kann man sich aber auch anzeigen lassen.

Bild folgt...

## 6. Hochtöner-Pegelabsenkung



Der gesamte obere Teil dient zur Abschätzung der Leistung jedes Widerstandes. Nur ein kleiner Teil der Gesamtleistung geht überhaupt in den Hochtonbereich, der Großteil ist im Bass- und Mitteltonbereich. Der Richtwert sagt etwa 10 %. Doch die untere Grenzfrequenz des Hochpasses, dessen Steilheit und vor allem das Spektrum des Audiosignals spielen eine wichtige Rolle. In diesem Beispiel soll die Grenzfrequenz bei 2... 3 kHz liegen, der relativ kleine Tieftöner kann ja problemlos so hoch spielen. Der Tieftöner hat eine max. RMS-Leistung von 100 W, ich nehme 120 W für die Gesamtbox an. Je nach Musikrichtung ist der Hochtonanteil größer oder kleiner, wobei man die Widerstände doch für einen ungünstigen Fall (aber nicht den worst-case) auslegen sollte. Das Spektrum „Musik-ähnlich 100kHz“, das auch als Vorgabe dient, ist dafür ein guter Kompromiss. Bei einem HP 2. Ordnung kommen damit etwa 15 % im Hochtonzweig an. Würde man die Grenzfrequenz doppelt so hoch wählen, wäre es davon nur noch die Hälfte.

Mit einem Klick auf den Button unten bei „abgegebene Leistung in Watt“ wird der errechnete Wert von oben übernommen. Das sind dann ca. 17,5 W.

Mit dem Slider wird nun die gewünschte Dämpfung (0,1...30 dB) gewählt, auch die Lautsprecher-Impedanz ist wichtig. Optional kann man die Gesamtimpedanz des Teilers zusammen mit dem Lautsprecher auch verändern, also bei entsprechend hoher Dämpfung auch mit einem 4-Ohm-Lautsprecher ein 8-Ohm-Abschluss realisieren oder einen 6-Ohm-Hochtöner an eine 4-Ohm-Weiche anschließen. Das Programm errechnet dann, sofern möglich, die Werte der beiden Teiler-Widerstände.

Unten rechts werden die geplanten Bauteilwerte eingetragen: Mit dem rechten Button werden aus den errechneten Werten die nächstliegenden Normwerte (E24) beider Widerstände eingetragen. So ergeben sich aus 1,75 / 5,14 Ohm dann 1,8 und 5,1  $\Omega$ .

Der 4,04  $\Omega$  Ersatzwiderstand liegt nah an dem Sollwert 4 Ohm, die resultierende Dämpfung beträgt 5,1 dB. Diese beiden Widerstände R1 und R2 exportiert man nun in das Hochpass-Modul und zusätzlich in das EQ-Modul, da ja für diesen Zweig auch eine Korrektur eingeplant ist.

So lässt sich für jeden Zweig (HP, BP, TP) ein eigenes Dämpfungsglied definieren, obwohl es in der Regel nur im Hochtonzweig Sinn macht.

In einigen Fällen ist es bei 3-Wege-Weichen auch für den Mitteltöner nach dem Bandpass-Filter notwendig. Dann wird in diesem Modul zur Abschätzung ein Hochpass und ein Tiefpass zur Abschätzung verwendet, also bei einem Bandpass 4. Ordnung ein Hochpass z.B. mit  $f_g=710$  Hz und ein Tiefpass mit  $f_g=4$  kHz, beide jeweils mit 2. Ordnung.

## 7. Hochtöner-Frequenzgang-Korrektur

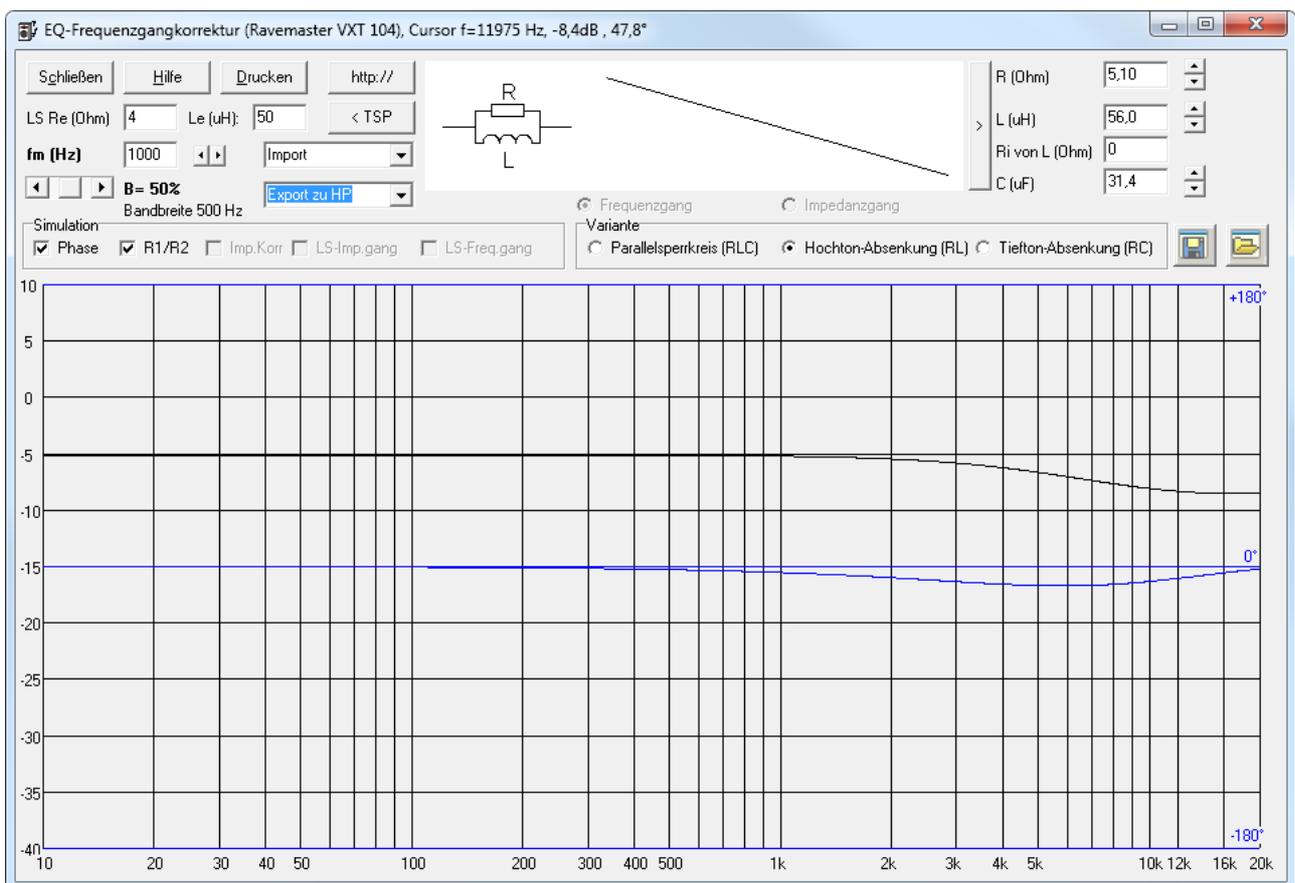
Wie in der Herstellermessung zu sehen, hat der Hochtöner einen Pegel-Anstieg bei 2,2 kHz etwa 91 dB, über 95 dB bei 8,2 kHz bis zu 97 dB bei 15 kHz.

Anhand der Impedanzgangs im gleichen Bild, kann man eine Schwingspuleninduktivität mit ca. 50  $\mu\text{H}$  annehmen. (Das habe ich mit dem BassCADe-Modul „Ermittlung der Thiele-Small-Parameter“ (Messwerteingabe) errechnet. DC-Widerstand 3,5 ... 4 Ohm, Impedanz = 7,5 Ohm bei 20 kHz. Diese hat leider Auswirkungen im oberen Frequenzbereich.

Für diese frequenzabhängigen Pegel-Absenkungen gibt es leider keine guten Vorberechnungen, hier muss man etwas mit den Bauteilwerten herumspielen. Für die Hochtonabsenkung wird die Variante mit dem Widerstand und der Spule verwendet. Auch die Pegelreduzierung wird hier gleich mitsimuliert, da deren Widerstände auch das komplexe Verhalten beeinflussen.

Die Checkbox „Phase“ gibt an, ob der Phasenverlauf mit angezeigt werden soll, simuliert wird er immer.

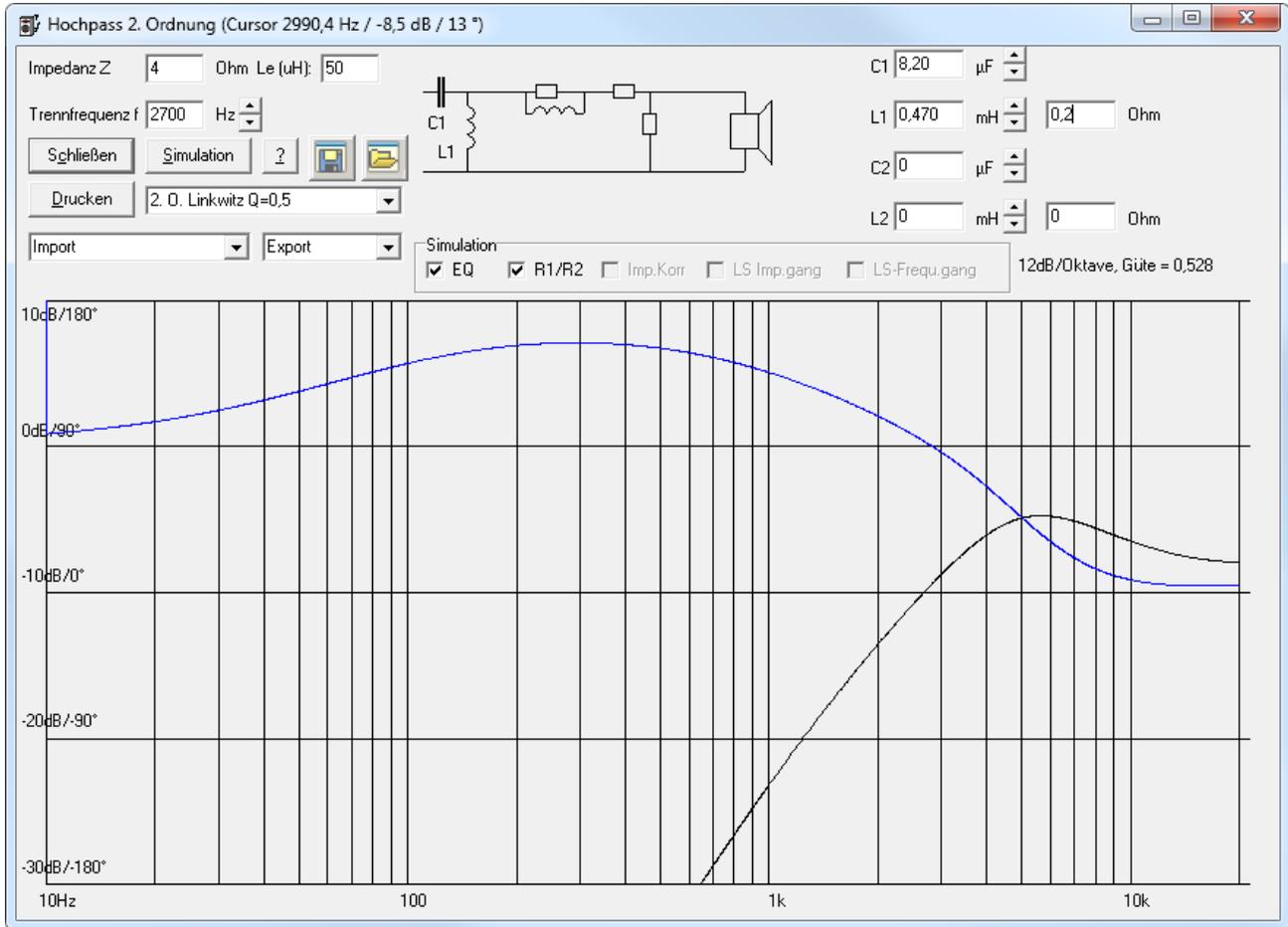
Am Ende exportiert man die Ergebnisse in das HP-Modul.



Den Lautsprechernamen im Titel kann man hier ignorieren, da die Werte nicht von diesem übernommen wurden.

## 8. Hochtöner am Hochpass

Mit einem Klick auf das Bild, kann man sich den Aufbau des Weichenzweigs, der gerade simuliert wird, genau ansehen.



## 9. Gesamtweiche

In diesem Teil wird die Simulation immer ungenauer, das betrifft insbesondere Filter, die ohne Messungen entwickelt wurden. Abstände der Schallquellen zueinander und der unterschiedliche Versatz, da die Membranen bzw. die Schallquellen nicht in einer Ebene liegen, ergeben Phasenabweichungen, die die Schalladditionen stark beeinflussen. Ab Version 3.4.3 wurde die Distanz für jeden Weichenzweig veränderbar implementiert. Beim Abstand von jeweils 0 mm (als Referenz in 1 m Entfernung) wird keine Korrektur diesbezüglich durchgeführt, sonst die virtuelle Phasenverschiebung berechnet, die vor allem bei höheren Frequenzen immer größere Bedeutung erlangt. Für jeden Weichenzweig kann diese Position zwischen -50 cm und +150 cm in Millimeterschritten festgelegt werden.

Diese Abstandsberechnung darf nur benutzt werden, wenn keine Messdaten mit simuliert werden, da diese Informationen dann schon enthalten sind.

Bild folgt...

Ein Doppelklick auf den jeweiligen Text bei Pegel oder Abstand setzt den Wert zurück auf 0.

## 10. Quellen

- [01] monacor Datenblatt DM104/4: [www.monacor.de/index.php?id=...](http://www.monacor.de/index.php?id=...)
- [02] monacor Messung DM104/4: [www.monacor.de/index.php?id=...](http://www.monacor.de/index.php?id=...)
- [03] selfmadehifi-Boxen-Projekt 8: [www.selfmadehifi.de/proj8.htm](http://www.selfmadehifi.de/proj8.htm)
- [04] Room-Equation-Wizard: [www.roomeqwizard.com](http://www.roomeqwizard.com)
- [05] Audio Measurement and Analysis Software ARTA: [www.artalabs.hr](http://www.artalabs.hr)