

# BassCADe-Subwoofersimulation

## Beispiel Bandpass-System

### Revisions History:

Version	Datum	Beschreibung
1.0	02.02.2017	1. Version (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 (TSP-Suche und -Eingabe).....	3
3. Treiber-Eignung.....	6
4. Simulation geschlossenes Gehäuse zum Vergleich.....	7
5. Simulation Bassreflex.....	8
6. Simulation geschlossener Bandpass.....	10
7. Simulation ventilerter Bandpass zum Vergleich.....	13
8. Simulationsvergleich.....	14
9. Gesamtvolumen.....	15
10. Gehäuseabmaße.....	18
11. Weitere Messungen.....	19
12. Quellen.....	20

Sollte jemand diese PDF-Datei, die in BassCADE über den jeweiligen Hilfe-Button aufrufbar ist, nicht online sondern offline aus dem Programm heraus nutzen wollen, muss sie als carsubsimulation.pdf im gleichen Verzeichnis wie die bass.exe gespeichert werden. 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 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#impress](http://www.selfmadehifi.de/hifindex.htm#impress)) an mich senden, damit ich diese Beschreibung eventuell ergänzen kann.

## 1. Einleitung

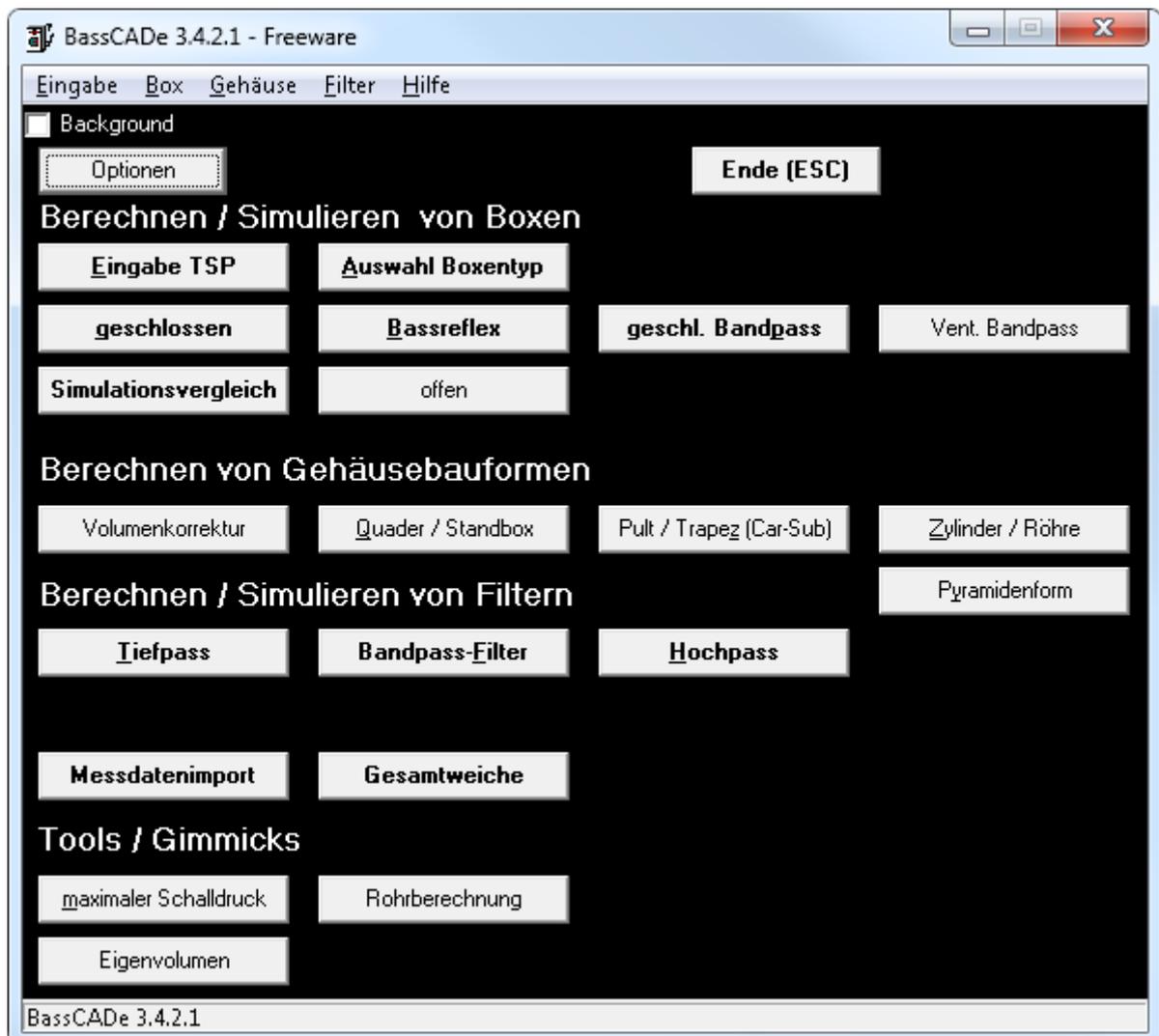
Mit BassCADE kann man einfach das Verhalten von dynamischen Lautsprechern in Volumen berechnen und simulieren.

Dieses Dokument soll dabei zeigen wie die Boxensimulation in BassCADE einfach und schnell funktioniert.

In diesem Beispiel gehe ich von einem aktiven, geschlossenem Bandpass-System aus, das in ein Car-Subwoofer-Gehäuse gebaut werden soll. Ich habe mich hierzu an das Boxenprojekt 4 von meiner Webseite [1] angelehnt.

## 2. Vorbedingungen (TSP-Suche und -Eingabe)

Nach dem Start des Programms hat man über viele Buttons direkten Zugriff auf die diversen Module. Sollte einen die Anzahl verwirren, kann man viele von ihnen im Optionsmenü (Reiter „Aussehen“) ausblenden.



Zuerst startet man in BassCADE bei einer Boxensimulation mit „Eingabe TSP“, um die relevanten Lautsprecherdaten, die Thiele-Small-Parameter (kurz TSPs) einzugeben oder auszuwählen. Nur mit diesen Werten lässt sich eine halbwegs sinnvolle Aussage zur Verwendung des jeweiligen Lautsprechers treffen. Sie bekommt man üblicherweise vom Hersteller, einige lassen sich auch mit einem Messsystem selbst aufnehmen.

Minimal nötig sind Gesamtgüte  $Q_{ts}$ , Freiluft-Resonanzfrequenz  $f_s$  und Äquivalentvolumen  $V_{as}$  für die Amplitudenverlauf-Simulation. Für Berechnungen mit genauem Absolutpegel und Innenwiderständen ist die elektrische Güte  $Q_{es}$  und evtl. die Maximalleistung  $P_{max}$  wichtig. Für alle Reflexabstimmungen (also Bassreflex und die Bandpassgehäuse) wird auch der effektive Membrandurchmesser  $d_D$  bzw. die Membranfläche  $S_D$  benötigt. Die maximale, lineare Auslenkung  $X_{max}$  ist dabei ebenso zur Abschätzung der Reflexrohre oder –Tunnel sehr hilfreich.

Grundsatz: Man sollte den Lautsprecher abhängig vom gewünschten Einbau und der Umgebung auswählen und nicht umgekehrt.

Der einfachste Weg ist, alle Daten direkt einzutippen und alles mit „OK“ zu bestätigen. Von den Tausenden mitgelieferten Datensätzen kann man auch mit „Datei öffnen“ anhand des Herstellers und Treibernamens auswählen.

Die Auswahl über die integrierte parametrische Suche ist die eleganteste Methode. Mit „LS-Suche“ erweitert sich das Fenster und rechts können alle Suchparameter vorgegeben werden. Das Ergebnis sind die UND-verknüpfte Resultate jedes Filters.

**Eingabe der Chassis-Daten**

Hersteller: Ravemaster Chassisname: VXT 104

Gesamtgüte  $Q_{ts}$ : 0,35 ? Bemerkung: 1999

elektrische Güte  $Q_{es}$ : 0,41 ?  nutze  $Q_{es}/Q_{ms}$ : +0,05%

mech. Güte  $Q_{ms}$ : 2,4 ?

Äquivalentvolumen  $V_{as}$ : 114 l (dm<sup>3</sup>) = 0,114m<sup>3</sup> = 4,026cuft

Resonanzfrequenz  $f_s$ : 29 Hz Chassistyp ist 25 cm / 10"

DC-Widerstand  $R_e$ : 3,5 Ohm (Z= 4 Ohm)

Membrandurchmesser  $d$ : 21,2 cm = 212 mm = 8,3 In

Eigenvolumen  $V_{LS}$ : 1,75 l (dm<sup>3</sup>) = 107 Culn = 0,06 CuFt

Chassis-Induktivität  $L_e$ : 450 uH = 0,450 mH

max. RMS-Power: 180 Watt

Buttons: OK, neue Werte, Abbrechen, Hilfe, undo, Reset, Vergleich 5%

**Lautsprecher suchen**

Hersteller enthält: rave

Name enthält: 300

Kommentar enthält: 2x

Dateipfad enthält: \TSP\

global

$Q_{ts}$ : 0,25 ... 0,45

$V_{as}$  (Liter): 50 ... 100

$f_s$  (Hz): 40 ... 55

$R_e$  (Ohm): 4,5 ... 8

Durchmesser (cm): 19,5 ... 24,5

Leistung (W): 200 ...

SPL (dB): 95 ... 110

mit Datenblatt-Link  ignoriere ... : +\_ / \ "

Nr.	Hersteller	Name	$Q_{ts}$	$V_{as}$ (l)	$f_s$ (Hz)	$R_e$ (Ω)	$d$ (cm)	SPL(dB)	P(W)	Bemerk
1	Raveland	AXX 1010	0,34	21,8	36,0	3,2	20,6	86,3	200	Mivoc
2	Raveland	Compactor SPL 61	0,23	52,0	29,0	3,2	20,7	89,1	220	Mivoc
3	Ravemaster	BSW 104 II	0,19	76,6	25,0	3,2	21,0	89,7	200	
4	Ravemaster	VXT 104	0,35	114	29,0	3,5	21,2	90,2	180	1999

4 von 5174 Einträgen

Ergebnis-Tabelle  Resultat

Buttons: lese neu, Export, save, Ende

4011: D:\Tools\bass\TSP\Ravemaster\Ravemaster\_VXT104.bcd (SPL=90,2dB, EBP=70,7Hz)

Diese Suchparameter können als „Filter“ selbst auch in Konfigurationsdateien gespeichert werden.

Es sind auch bereits diverse „ADD-Filter“ im Unterverzeichnis (\filter) gespeichert. Diese Dateien können nacheinander geladen werden und der jeweilige Filterteil wie z.B. d\_Durchmesser, c\_Comment (Kommentar), Z\_Impedanz wird hinzugefügt ohne die vorherige Filtereinstellung zu löschen. Nicht angewählte Punkte werden dann nicht verändert. (daher add) Beim Laden einer Filterdatei kann man jeden Filter als ADD-Filter laden, wenn zuvor das „&“ angewählt wurde.

Ist das „&“ beim speichern ausgewählt, wird der Filter generell als ADD-Filter gespeichert, sonst als normale Filterdatei, in der alle Parameter enthalten sind.

Durch eine parametrische Suche lassen sich aber auch Vergleichstypen nicht mehr hergestellter Typen finden. Dazu werden links alle Originaldaten angegeben und der Button „Vergleich“ füllt abhängig von der angegebenen Toleranz die Filtervorgaben rechts ( $Q_{ts}$ ,  $V_{as}$ ,  $f_s$ ,  $R_e$ ,  $d$ ) aus. Mit den Pfeil-Buttons links neben „Vergleich“ kann man die Toleranzen von 0 ... 30 % in ganzzahligen Prozentschritten einstellen.

Es wird die Anzahl der gefunden, zutreffenden Lautsprecher angegeben, wenn sie nicht über 1000 liegt. Als Übersicht lassen sich diese Daten (auch hier beschränkt auf maximal 1000) dann auch in einer Tabelle darstellen oder in eine Textdatei exportieren.

Man kann auch nach anderen Parametern wie SPL, EBP,  $L_e$ ,  $Q_{es}$ ,  $Q_{ms}$ ,  $M_{ms}$ ,  $R_{ms}$ ,  $C_{ms}$ , BL oder  $X_{max}$  filtern. Möchte man dieses mit mehreren aus dieser gleichen Liste machen, muss man iterativ vorgehen, also in Schritten immer weiter verfeinern. Dazu im ersten Schritt grob z.B. mit Durchmesser, Maximalleistung und SPL eingrenzen, so dass unter 1000 Ergebnisse gefunden werden. Dann wird mit dem „save“-Button dieses Suchergebnis gespeichert. Mit der Checkbox „Resultat“ wird dann das letzte Ergebnis für neue Filterdurchgänge anstatt der gesamten Datenbank benutzt. Nun kann auch zusätzlich nach einem EBP- oder  $R_{ms}$ -Bereich gefiltert werden.

Ist ein gültiger Herstellerlink vorhanden, ist im TSP-Eingabefenster oben links „Hersteller“ unterstrichen und mit einem Doppelklick auf den unterstrichenen Text öffnet sich die Webseite.

Gleiches gilt für den direkten Datenblatt-Link ins Internet. Dort ist es dann das Label „Chassisname“ oben in der Mitte, welches das Datenblatt (Webseite, Bild, PDF) im Browser öffnet.

Mit dem Button „OK“ werden die Parameter für alle nachfolgenden Simulationen gespeichert.

### 3. Treiber-Eignung

Zur Unterstützung bei der Bewertung eines Lautsprechers wurde mit dem Modul „Auswahl Boxentyp“ eine kleine Hilfe gegeben. Hier wird anhand der Lautsprecher-Parameter abgeschätzt, wie geeignet er in Standard-Anwendungen für Subwoofer und als Tieftöner für die typischen Boxenbauformen ist.

Wird die Eignung als „schlecht“ oder „bedingt“ eingestuft, bedeutet das meist keinen oder dröhnigen Bass, bzw. ein riesiges Volumen oder andere Einschränkungen wie überlange (z.B. 80 cm) Reflexrohre.

Durch die entsprechenden Werte sieht man, dass sich dieser beispielhafte Ravemaster-Treiber für alle Standard-Boxen, also geschlossen, Bassreflex, Bandpässe irgendwie eignet.

Man kann ihn also auch in jedem System simulieren lassen, um festzustellen, was die bevorzugte Abstimmung oder Größe der Box am Ende ist.

**Tipps für Ravemaster VXT 104 (1999)**

TSPs:  $Q_{ts} = 0,35$ ,  $f_s = 29$  Hz,  $V_{as} = 114,0$  l,  $d = 21,2$  cm,  $ULV = 13,97$  l  
 EBP (Efficiency-Bandwidth-Product= $f_s/Q_{es}$ ): 70,7 Hz     $f_s/Q_{ts} = 82,9$  Hz  
 SPL= 90,2 dB(1W1m);  $P_{max} = 180$  W; =>  $SPL_{max} = 113$  dB  
 kritische obere Grenzfrequenz des Chassis : 2950 Hz  
 maximal empfehlenswerte obere Grenzfrequenz : 1623 Hz

**Empfehlungen :**

-  Eignung für geschlossenes Gehäuse : gut
-  Eignung für Bassreflexgehäuse : gut
-  Eignung für geschlossenen Bandpass : möglich
-  Eignung für ventilierten Bandpass : gut
-  Eignung für Exponentialhorn : bedingt
- Eignung für offene Box (z.B. PA) : ungeeignet
-  Eignung für Transmissionline-Systeme : bedingt
-  Free-Air-Betrieb : schlecht

**Free-Air-Einbau-Daten :** Free-Air-Volumen 500 l

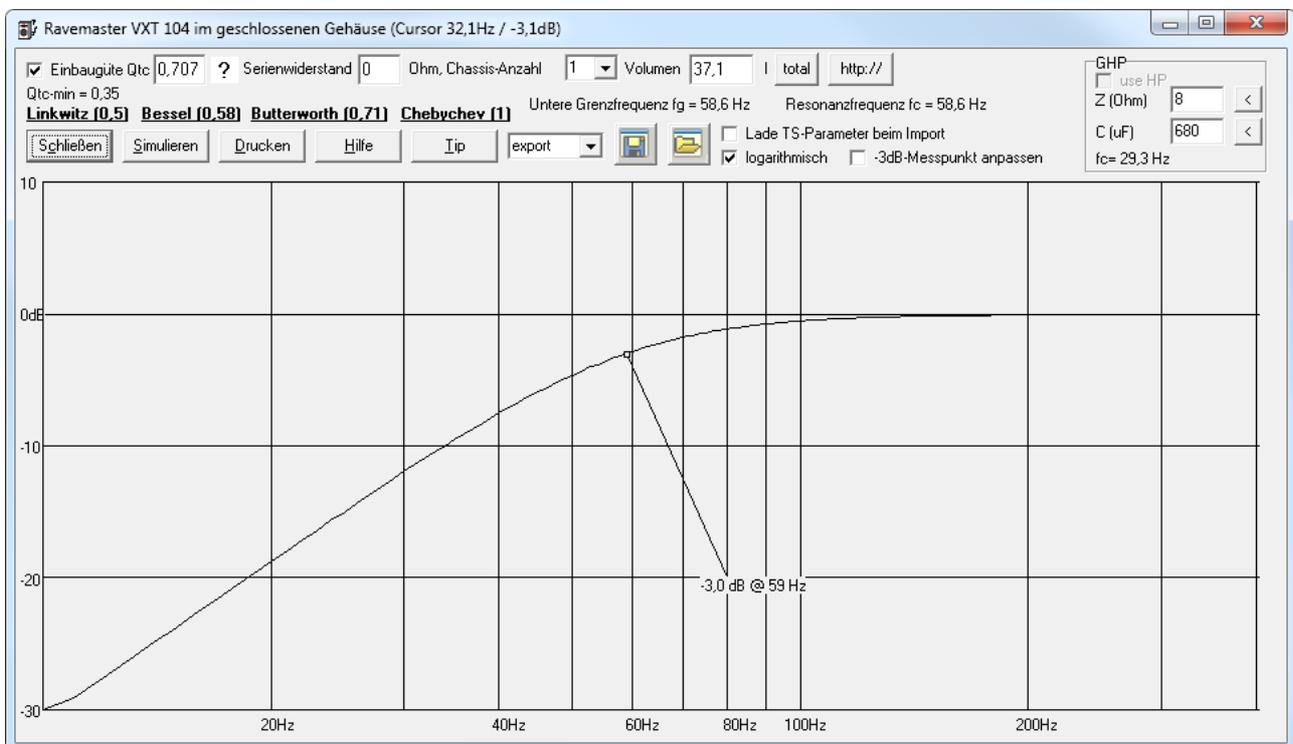
Resonanz  $f_c = 32$  Hz / untere Grenzfrequenz  $f_u = 51$  Hz / Güte  $Q_{tc} = 0,39$

Die Bewertungen sind nicht allzu ernst zu nehmen, es sind nur Richtwerte.

#### 4. Simulation geschlossenes Gehäuse zum Vergleich

Die geschlossene Abstimmung zeigt, wie zuvor schon vermutet, zu wenig Tiefgang. Eine untere Grenzfrequenz von 59 Hz ist für einen Treiber dieser Größe (25 cm) zu hoch.

Die Butterworth-Abstimmung mit einer Einbaugüte  $Q_{tc} = 0,707$  hat einen maximal flachen Amplitudenverlauf bei relativ gutem Impulsverhalten. Durch einen Klick auf eine der 4 Standard-Varianten wird, wenn es durch einen kleineren  $Q_{ts}$ -Wert möglich ist, das notwendige Volumen berechnet. Mit Entfernen des Hakens „Einbaugüte“ kann man auch das gewünschte Innenvolumen vorgeben und die Güte wird berechnet. Beide hängen direkt miteinander zusammen. Kleine Volumina ergeben größere Einbaugüten. Also prinzipiell mehr Basspegel, aber mit immer weniger Impulsivität und meist auch Tiefgang.



Bei Serienwiderstand wird bei aktiven Systemen mit 0 Ohm gerechnet, bei passiven Systemen werden Kabellängswiderstände und Spuleninnenwiderstände addiert, da sie das Verhalten beeinflussen. Sie erhöhen die Güte.

Nun exportiere ich diesen Simulationsverlauf zum Vergleich in #1. (Auswahl-Box rechts neben dem Button „Tip“)

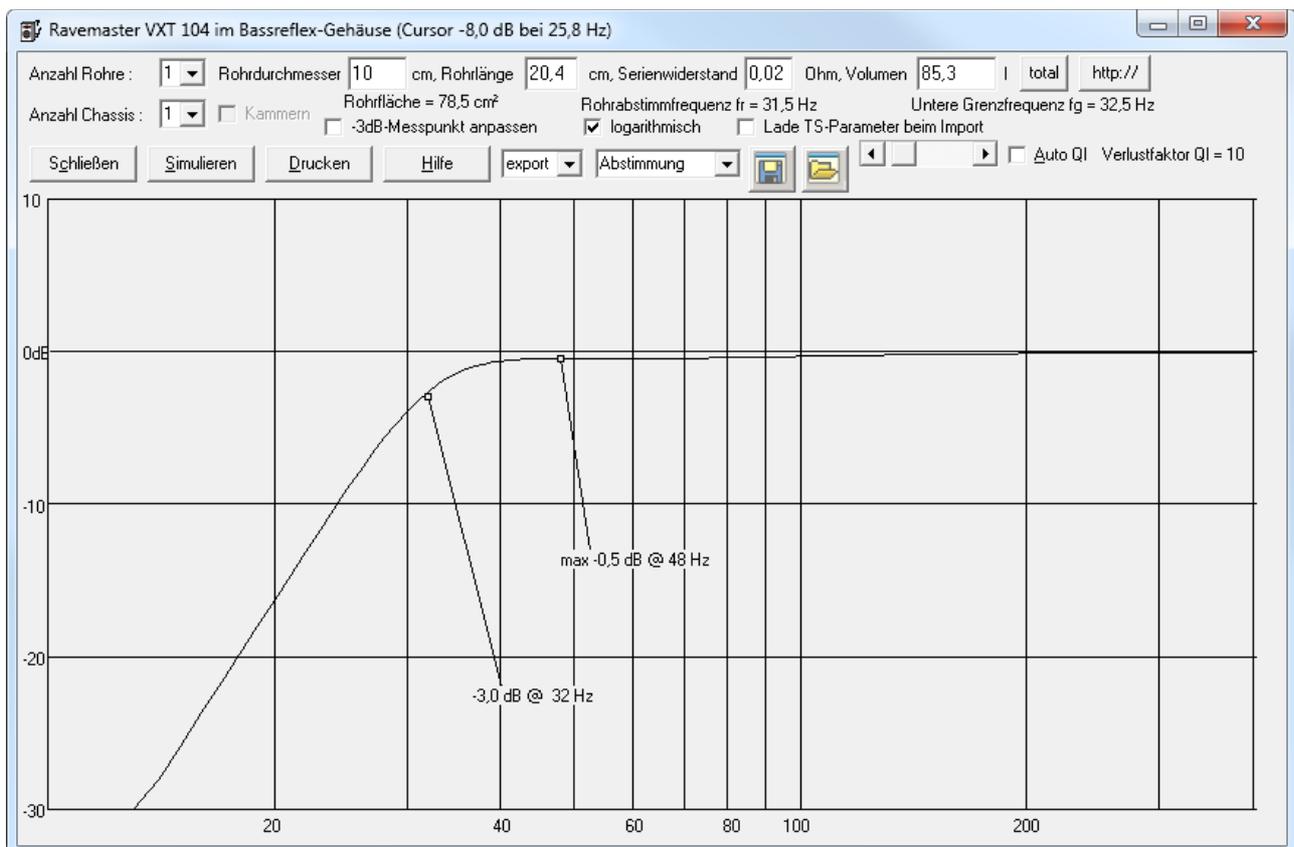
Zusätzlich speicherte ich in jedem Simulationsmodul die Abstimmung (also alle Eingabewerte und TSPs) mit einem Klick auf den Button mit dem Diskettensymbol in eine Datei. Ich nahm jedes Mal die gleiche Datei „RavemasterBP.bcdcfg“. Diese enthält dann die Abstimmungen jedes Typs, sowie die TSPs und das Simulationsergebnis aus dem zuletzt gespeicherten Modul.

Man kann die Abstimmung auch wieder aus der Datei laden. Wurde vor dem Öffnen der Haken bei „Lade TS-Parameter beim Import“ gesetzt, werden auch die

Treiberdaten (TSPs) aus der Konfigurationsdatei gelesen und bis zum Schließen der Software verwendet. Sie werden aber nicht dauerhaft gespeichert, nur bis zum Programmende benutzt. Will man sie generell übernehmen, muss man das TSP-Eingabemodul öffnen und die Werte mit OK permanent übernehmen.

## 5. Simulation Bassreflex

Als zweite Möglichkeit ist Bassreflex in den meisten Fällen die beste Alternative bei Subwoofern. Mit einem Klick auf „Abstimmung“ und „Tip“ oder eine andere Variante kann man sich hier mit Startwerten unterstützen lassen.



Bassreflex bringt mit diesem Treiber sicher den besten Bass, das Volumen ist mit 85 l netto doch etwas viel. Nun kann man mit den Rohrmaßen und Volumen spielen und sieht direkt die Auswirkungen.

Bei vielen Car-HiFi-Bässen wird auf Kosten des Wirkungsgrades das akustische Volumen reduziert, doch dann gibt es Probleme mit zu langen Reflexrohren, die sich bei diesen Abstimmungen nicht mehr gut unterbringen lassen. Das Ergebnis sind dann die von mir unbeliebten Boom-Box-Abstimmungen.

Prinzipiell gilt für Bassreflex-Rohre das gleiche wie bei den Bandpässen unten beschrieben. Bei einem 25 cm-Subwoofer ist das hier angenommene 10 cm-Rohr aber voll ausreichend. Den minimalen Rohrdurchmesser kann man mit einem Klick auf das Label „Rohrdurchmesser“ in einem anderen Modul abschätzen, die Beschreibung dazu ist im nachfolgenden Kapitel zum geschlossenen Bandpass.

Sollte die Rohrlänge aufgrund des zu großen Rohrdurchmessers zu lang ( $> 40$  cm) werden, kann man mit dem Reflexrohrmodul evtl. etwas optimieren. Ist das Rohr in seltenen Fällen zu kurz ( $< 3$  cm), muss der Rohrdurchmesser erhöht werden. Mehr als der halbe Chassis-Durchmesser macht aber keinen Sinn, da dann die Abstimmung in der Praxis nicht mehr so wie simuliert funktionieren wird und zu viele Mitten durch die Öffnung gelangen. Fragwürdige Eingabewerte werden gelb hinterlegt. Je größer der Rohrdurchmesser, desto niedriger wird die Tuningfrequenz, also die Resonanz der Bassreflexabstimmung. Je kleiner das Reflexvolumen, desto länger muss das Reflexrohr für die gleiche Tuningfrequenz werden.

Ich exportierte den Reflex-Verlauf in #2 und speicherte die Abstimmung in die Konfigurationsdatei.

## 6. Simulation geschlossener Bandpass

Der Bandpass hat seinen Namen vom elektrischen Pendant, da er nicht nur eine untere, sondern auch eine obere Grenzfrequenz zur Abstimmung besitzt.

Dieser geschlossene Bandpass ist eine Mischung aus geschlossenem und Bassreflex-System. Die Verhältnisse sind ähnlich. Das geschlossene Volumen bestimmt wesentlich die Impulsivität und Präzision, auch hier gibt es die gleiche Einbaugüte  $Q_{tc}$ .

Leider hat die Vorgabe der Rohrdurchmesser einen großen Einfluss. Nur der Innenquerschnitt ist relevant. Je größer er, desto weniger Strömungsgeräusche gibt es, aber desto länger muss das Rohr ausfallen. Je kleiner das Reflexvolumen, desto länger muss das Rohr bei gleichem Durchmesser werden.

Mit dem Modul „Rohrberechnung“ kann man den minimalen Durchmesser bestimmen. Das sollte vor dem Simulieren des Bandpasses geschehen. Man kann dieses Fenster nicht nur über das Hauptmenü, sondern auch aus dem Bandpassmodul mit einem Klick auf das Label „Tunnel-/Rohrfläche = ...“ öffnen.

erweiterte Rohrberechnungen
X

Schließen
Hilfe
Drucken

Ravemaster VXT 104 (1999)

minimaler Rohrdurchmesser pro Chassis

LS-Durchmesser (cm)  <

max. lin. Membranauslenkung Xmax (mm) ±  <

Abstimm- Tuning-Frequenz fb (Hz)

Wellenlänge l = 4,1m, l/2= 2,06m, l/4=1,03m bei fb

Anzahl Reflexrohre

Anzahl Chassis

maximaler lin. Membranhub 11,0 mm

max. Luftverdrängung aller Chassis Vd = 0,19 l

min. Rohrinne Durchmesser 6,7 cm

**empfohlener Rohrdurchmesser 9,0 cm**

*wenn Auslenkung unbekannt, gilt annähernd:*  
*mind. 10% der Membranfläche: 17,6 cm², d=4,7 cm*  
*besser 1/5 der Membranfläche: 35,3 cm², d=6,7 cm*  
*PA-Bässe 1/3 Sd : 59 cm², d=8,7 cm*

Rohr-Tunnel-Umrechnung

vorgegebenes Rohr

Anzahl Reflexrohre

Rohrdurchmesser (cm)

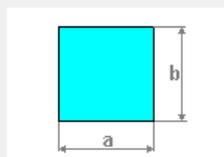
vorgegebener Tunnel

Anzahl Tunnel

Tunnelbreite a (cm)  <

Tunnelhöhe b (cm)

Tunneltyp



vorgegebener Querschnitt

gewünschter Querschnitt (qcm)

Rohrlängentransformation

Innendurchmesser (cm)

nominale Länge (cm)

beide Seiten bündig am Gehäuse  
Länge 31,7 cm

beide Seiten freistehend und offen  
Länge 33,3 cm

Rohrlängen-Umrechnung

vorgegebener Durchmesser (cm)  > gewünschter Durchmesser (cm)

vorgegebene Länge (cm)  notwendige neue Länge (cm) 60,9

Anzahl Reflexrohre  Anzahl Reflexrohre

mit Luftsäulen-Korrektur

Ich rechnete (im Bild oben links) mit generell 2 Rohren bzw. 2 Tunneln, da sich diese bei rundem Lautsprecher besser in den Ecken unterbringen lassen. Die diversen Angaben sagen, dass man dann keinesfalls unter jeweils 5 cm gehen sollte und um 6...7 cm ein guter Wert wäre. Oberhalb von 2x 9 cm sind keine Strömungsgeräusche auch bei großen Hüben zu befürchten. Je größer die Membranfläche  $S_D$  und deren Auslenkung  $X_i$  desto größer muss der Querschnitt (oder Rohrdurchmesser) werden. Deshalb werden die Strömungsgeräusche auch erst bei größeren Leistungen und Lautstärken hörbar.

Wie man im obigen Bild (Rohrlängen-Umrechnung) sieht, müssten zwei 9 cm-Rohre aber jeweils 60 cm lang sein, um die gleiche Reflex-Abstimmung wie zwei Rohre mit 6,7 cm und 32 cm Länge zu erhalten.

In der Mitte kann man errechnen, welche Innenmaße zwei rechteckige Tunnel anstatt zweier Rohre (bei gleichem Querschnitt und somit gleicher Länge) haben würden. Mit einem jeweils (2x) quadratischem Querschnitt von 6 x 6 cm ergeben sich insgesamt 72 cm<sup>2</sup>, genauso viel wie bei 2 Rohren mit 6,7 cm Durchmesser.

Die Vorgaben von 2 Rohren a 6,7 cm werden oben (Mitte) im Bandpassmodul (siehe Bild unten) ausgewählt.

Dann kann man mit den Vorgaben im Bandpassmodul (links) herumspielen. Ich wählte Kurvenform  $S=7$  (max. Pegel, geringe Welligkeit) und eine Einbaugüte  $Q_{tc}$  von 0,7, was einer Standard-Butterworth-Abstimmung (wie bei geschlossenen Boxen) entspricht.

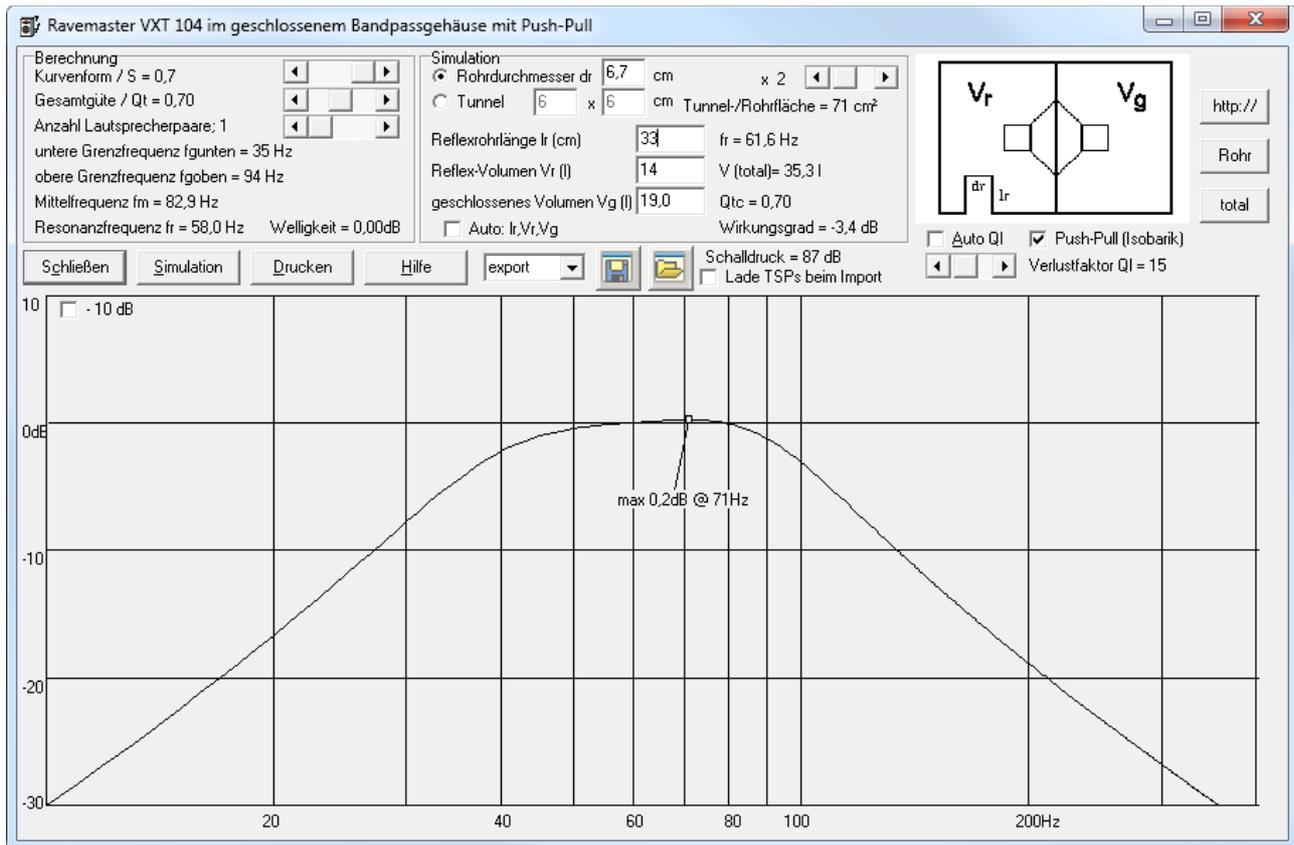
Um die Volumen zu verkleinern, nutzte ich die Push-Pull-Variante (Isobarik-Prinzip), die zwei Treiber anstatt eines Lautsprechers verwendet.

Laut Berechnung müsste jedes Rohr dann 39 cm lang sein. Nun kann man in der Mitte direkt die Volumen und Rohrmaße ändern und sehen, wie sich der Schalldruckverlauf entsprechend ändern würde. Dazu den Haken bei „Auto  $I_r$ ,  $V_r$ ,  $V_g$ “ entfernen, wenn Abstimmungsänderungen im Detail auf der rechten Seite gewünscht sind.

Ich reduzierte die Rohrlänge (von 39 auf 33 cm) etwas und vergrößerte minimal das Reflexvolumen von 13,7 l auf 14 l.

Das Ergebnis liegt bei 38 Hz (-3 dB), -8dB bei ca. 30 Hz. Die Tuning-Frequenz liegt mit 62 Hz relativ hoch und ein Check im Rohrmodul zeigt ein Minimum von 5,8 cm und eine Empfehlung von 7,7 cm. Ist also noch OK. (Insbesondere da man Strömungsgeräusche im Kofferraum kaum hört.)

Beim Bewegen der Maus über die Simulation werden die aktuellen Cursorpositionen (horizontal Frequenz und vertikal Pegel) im Fenstertitel angezeigt. Wird dabei die linke Maustaste gedrückt, wird nur die horizontale Position zur Bestimmung der Frequenz verwendet, es wird dann der Pegel der Simulation (Abstimmung) angegeben.



Eine Unbekannte in jeder Simulation mit einem Rohr oder Tunnel ist der Verlustfaktor (eigentlich eine Verlustgüte)  $Q_l$ . Typisch liegt der Wert zwischen 10 und 15. Er kann vor allem bei großen Gehäusevolumen aber auch kleiner werden und die Reflexabstimmung abschwächen. Als Vorgabe versucht BassCADE, diesen Wert volumenabhängig abzuschätzen. Man kann nach dem deaktivieren des Hakens „Auto  $Q_l$ “ auch mit diesem Wert im Bereich 1...100 spielen, um sich Veränderungen anzuzeigen.

Das zeigt teilweise auch, wie anfällig die Reflexabstimmung ist.

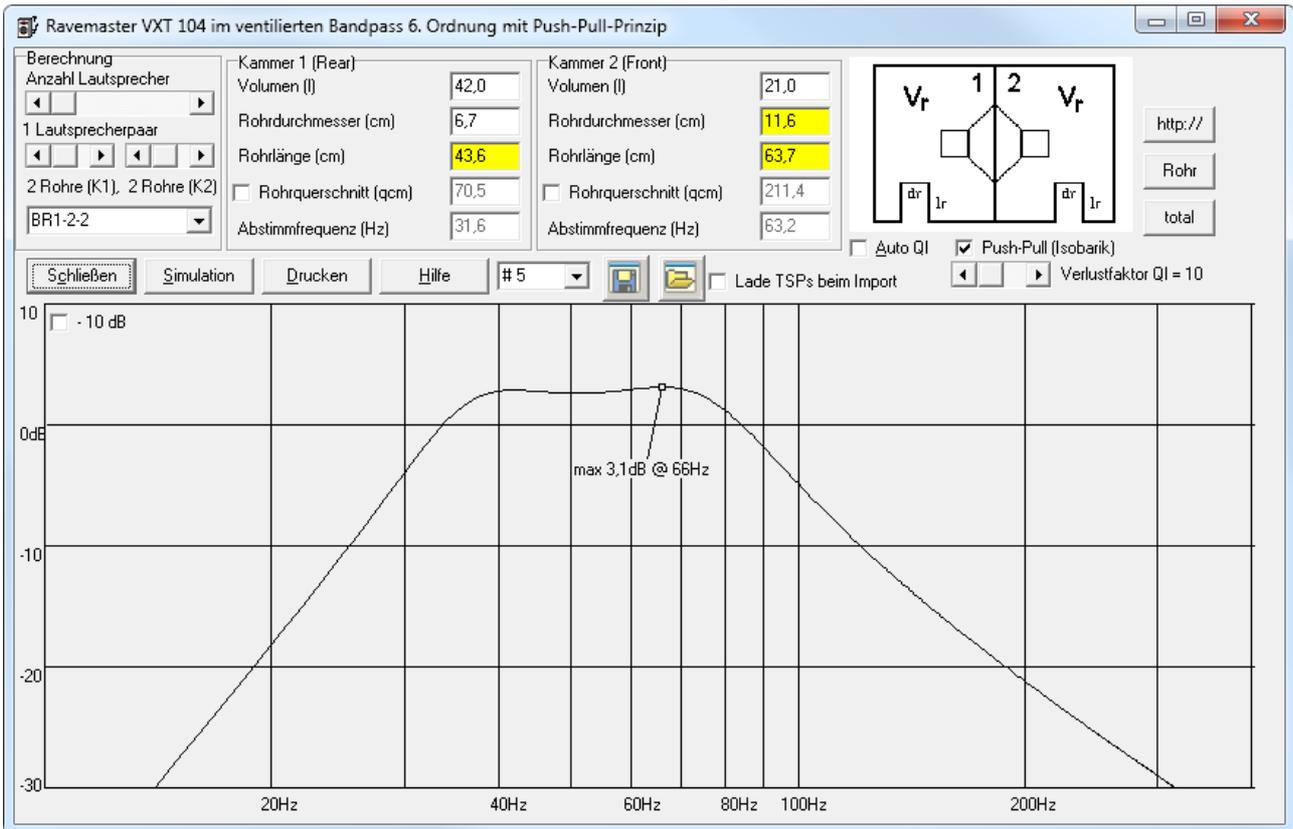
Diese Bandpass-Konfiguration wurde in die bcdcfg-Datei gespeichert und der Frequenzverlauf in #4 exportiert.

Mit einem Klick auf den Button „total“ kommt man mit dem Modul „Volumenberechnung“ (siehe Kapitel „Gesamtvolumen“ dem Gehäuse wieder einen Schritt näher.

### 7. Simulation ventilierter Bandpass zum Vergleich

Zur Vollständigkeit wurde auch gleich der ventilerte Bandpass mit simuliert. Auch er benötigt viel Volumen. Der Versuch es mit Push-Pull zu halbieren, zeigt dann aber schon ziemlich lange Reflexrohre oder –Tunnel.

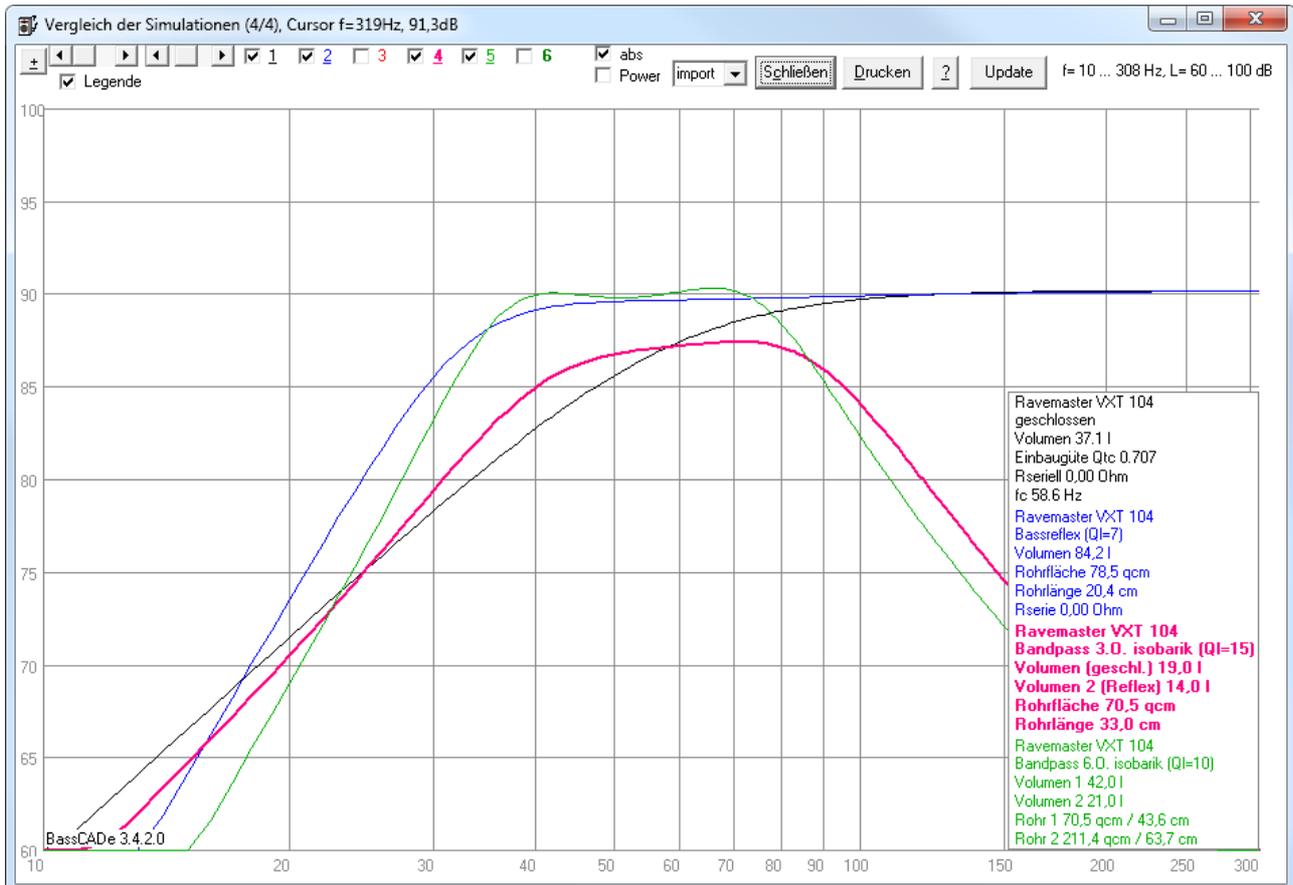
Konkrete Berechnungsvorgaben ähnlich zu Bassreflex oder geschlossene Bandpässe sind mir für ventilerte Bandpässe nicht bekannt. Mit einigen Vorgabemöglichkeiten (Auswahl links z.B. BR1-2-2) habe ich es dennoch versucht.



Auch diese Simulation wurde in #5 exportiert und als Konfiguration in einer Datei gespeichert.

## 8. Simulationsvergleich

Im Modul Simulationsvergleich lassen sich dann bis zu 6 verschiedene Verläufe gleichzeitig anzeigen. Die jeweilige Farbe und die Strichstärke lassen sich bei den Optionen ändern. Die entsprechenden Simulationen müssen nur vorher durchgeführt und gespeichert (RAM-export) worden sein.



Hier sieht man mit Absolutpegeln (dazu den Haken bei „abs“ setzen), dass Bassreflex den besten Tiefbass bringt und durch die Push-Pull-Abstimmung beim geschlossenen Bandpass einige Dezibel verlorengehen. Dafür hat er durch die 2 Treiber aber auch die doppelte Belastbarkeit, so dass man damit auch wieder auf die 90 dB erreicht. Diese dargestellten Pegel ergeben sich jetzt bei jeweils 1 Watt pro Box.

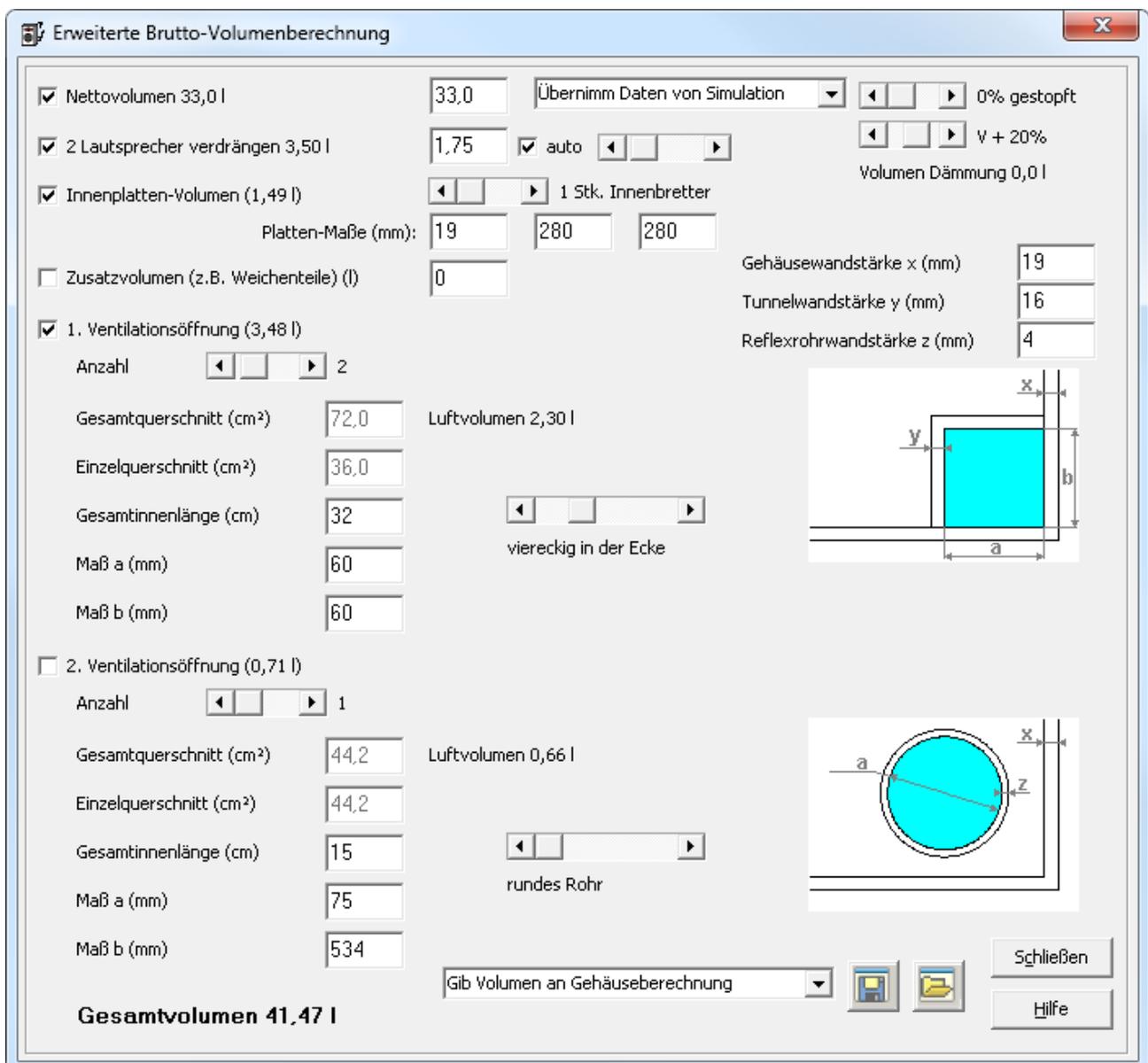
Auch der ventilerte Bandpass schlägt sich gut, die Überhöhungen beider Reflexabstimmungen kompensiert die Verluste des Push-Pull-Prinzips. Er dürfte bei jeweils Maximalleistung in dieser Abstimmung bei Standardbässen am lautesten sein.

Resümee: Wenn es laut und tief gehen soll, dann ist auch viel Volumen nötig. Das gilt generell, nicht nur bei diesem Treiber.

Je komplexer die Abstimmung, desto anfälliger wird das System für FehlAbstimmungen. Da bei der Herstellung Toleranzen entstehen, kann das Ergebnis bei Bandpassen stärker variieren als bei geschlossenen Systemen.

### 9. Gesamtvolumen

Die 19l geschlossen und 14l Reflex-Volumen sind die rein akustischen Arbeitswerte. Also die Innenvolumen, die das Chassis für das Arbeiten selbst benötigt. Da kommen nun aber noch einige Liter hinzu. Durch den direkten Klick im Simulationsmodul mit dem Button „total“ öffnet sich das neue Modul gleich mit den korrekten Startwerten. Hat man das Modul über das Hauptmenü geöffnet, kann man hier unter „Übernimm Daten von Simulation“ sich ebenfalls gleich viele der nötigen Felder ausfüllen lassen.



Das akustische Volumen könnte durch Dämmmaterial etwas verringert werden. Faustregel 20 % bei kompletter Füllung. Dies entsteht durch die veränderte

Schallgeschwindigkeit und Dichte als in Luft. Da die Luftbewegung selbst behindert wird, ist das nur bei geschlossenen Abstimmungen wirklich empfehlenswert, bei Reflexabstimmungen muss man hierbei aufpassen. Ich ignoriere in dieser Beschreibung mal diese Methode. (Man kann die Einsparung in % und den Anteil des gestopften Volumens mit den Schiebereglern oben rechts einstellen.)

Die Lautsprecher selbst besitzen auch ein eigenes Volumen, das der akustischen Abstimmung verlorengeht. Oftmals ist dieses Volumen nicht bekannt, dann kann man es durch die Lautsprechermaße im Modul „Eigenvolumen“ berechnen oder zumindest abschätzen.

Dieses Volumen hängt auch von der Einbauweise ab. Typischerweise liegt es zwischen 0,5 und 10 Litern. Ist dieses Volumen nicht klein (also z.B. < 5 %) gegenüber dem Innenvolumen der Box, sollte es mit betrachtet werden.

Berechnung des Eigenvolumens eines Lautsprecherchassis

**V = 2,63 Liter**

Hinter-Front-Montage des Lautsprechers
  Korb nach außen (Car-HiFi-Show-Woofer)

Schließen	Korbdurchmesser d1 (mm)	322	<input checked="" type="checkbox"/>	Plattendicke Schallwand f (mm)	19
Hilfe	<input type="checkbox"/> Membrandurchmesser d2 (mm)	260	<	Korbbefestigung w (mm)	10
übernehmen	Schwingspuldurchmesser d3 (mm)	50		Membrankegelhöhe x (mm)	60
←	Magnetdurchmesser d4 (mm)	120		Magnetstärke y (mm)	40
Drucken	Magnetringdurchmesser d5 (mm)	140	<input type="checkbox"/>	Magnetringbreite z (mm)	0
4	Seitenstege, mit Länge s (mm)	135	<input checked="" type="checkbox"/>		
http://	Dicke x Breite (mm)	5		20	

Gesamteinbautiefe dt = w + x + y = 110 mm

Das Bild stammt nicht von dem in diesem Projekt verwendeten Treiber.

Bei Reflexabstimmungen gehen durch das Rohr bzw. den/die Tunnel ebenfalls Volumen verloren, sowohl durch das Innere (die Luftsäule) als auch den umgebenen Aufbau (Wand der Reflexkonstruktion). Deshalb hier Wandstärken des Gehäuses und der Tunnel/Rohr angeben.

Zusammen kommen bei den Volumen dann:

- Akustisch 33 l (14 l+19 l)
- Lautsprecherverdrängung 2 Chassis mit je 1,75 l = 3,5 l
- Innenplatte ca. 28x28 cm (damit Lautsprecher angeschraubt werden können)
- 1 Tunnelvolumen 3,48 l gesamt (mit zwei Holzseiten) davon 2,3 l Luft

Ich nahm Anpassungen bei den Tunneln vor, dessen Position man wählen kann. Mit den Ports in der Ecke hat man weniger Raumverluste.

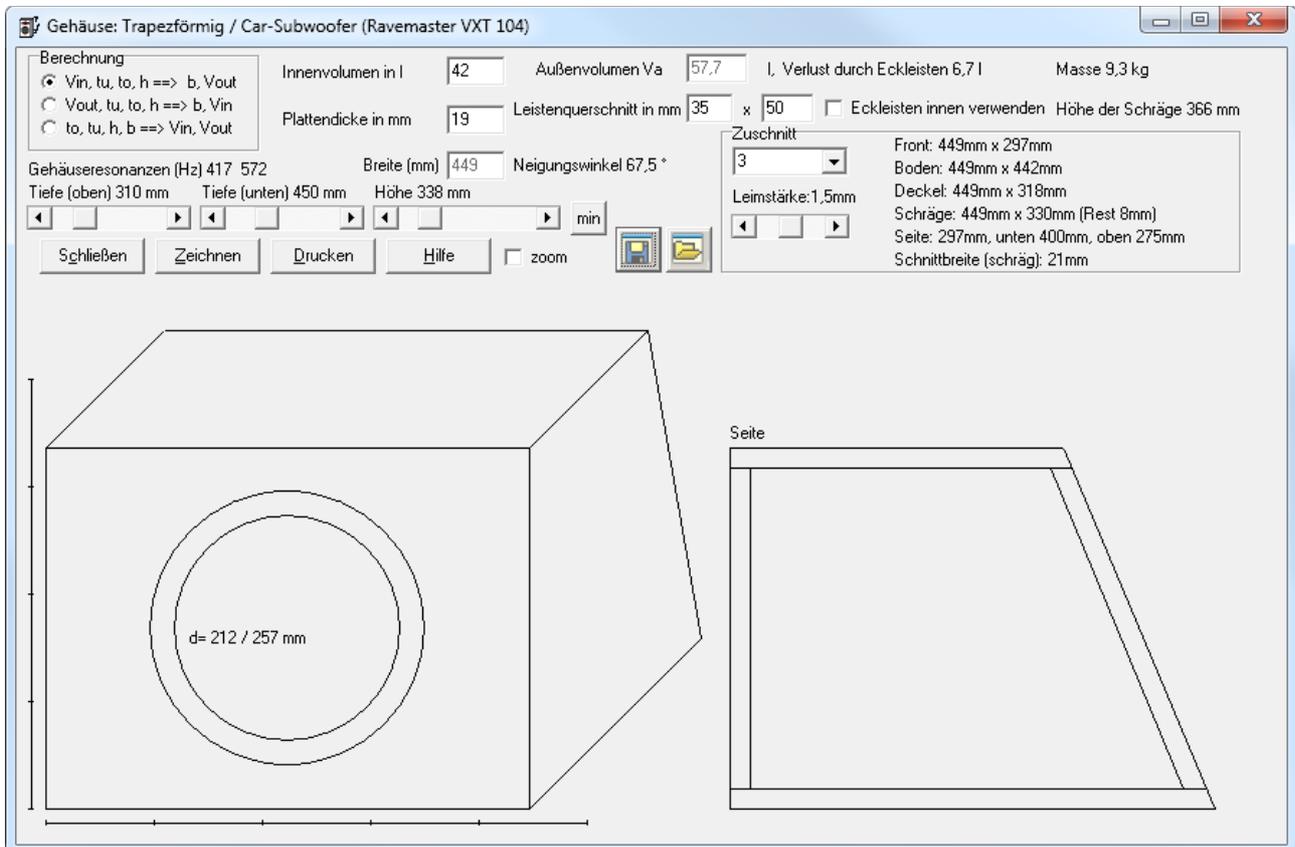
Das ergibt dann insgesamt ein 41,5 l Innenvolumen für die Box. (also fast 26 % mehr als die reine Simulation suggeriert).

Mit einem Klick auf „Gib Volumen an Gehäuseberechnung“ kann man dieses Volumen, sowie Plattendicke direkt übernehmen.

Je größer die Box, desto dicker sollten die Platten sein. Aber auch die Art des Materials, also bestimmte Holzarten, Spanplatte, MDF oder Multiplex / Sperrholz, beeinflusst die minimale Plattendicke. Bei sehr großen Boxen (Richtwert: freie Kantenlänge ohne Befestigung von mehr als 50 cm), sind zusätzlich Verstrebungen nötig, um die Plattenschwingungen zu minimieren.

## 10. Gehäuseabmaße

Ich rundete das Volumen auf, passte die Höhe und die Tiefen (Schräge) an den vorhandenen Platz im Fahrzeug an.



Da ich noch Platz hatte, vergrößerte ich das geschlossene Volumen später etwas, damit wurde die Kiste mit ca. 49 cm etwas (5 cm) breiter.

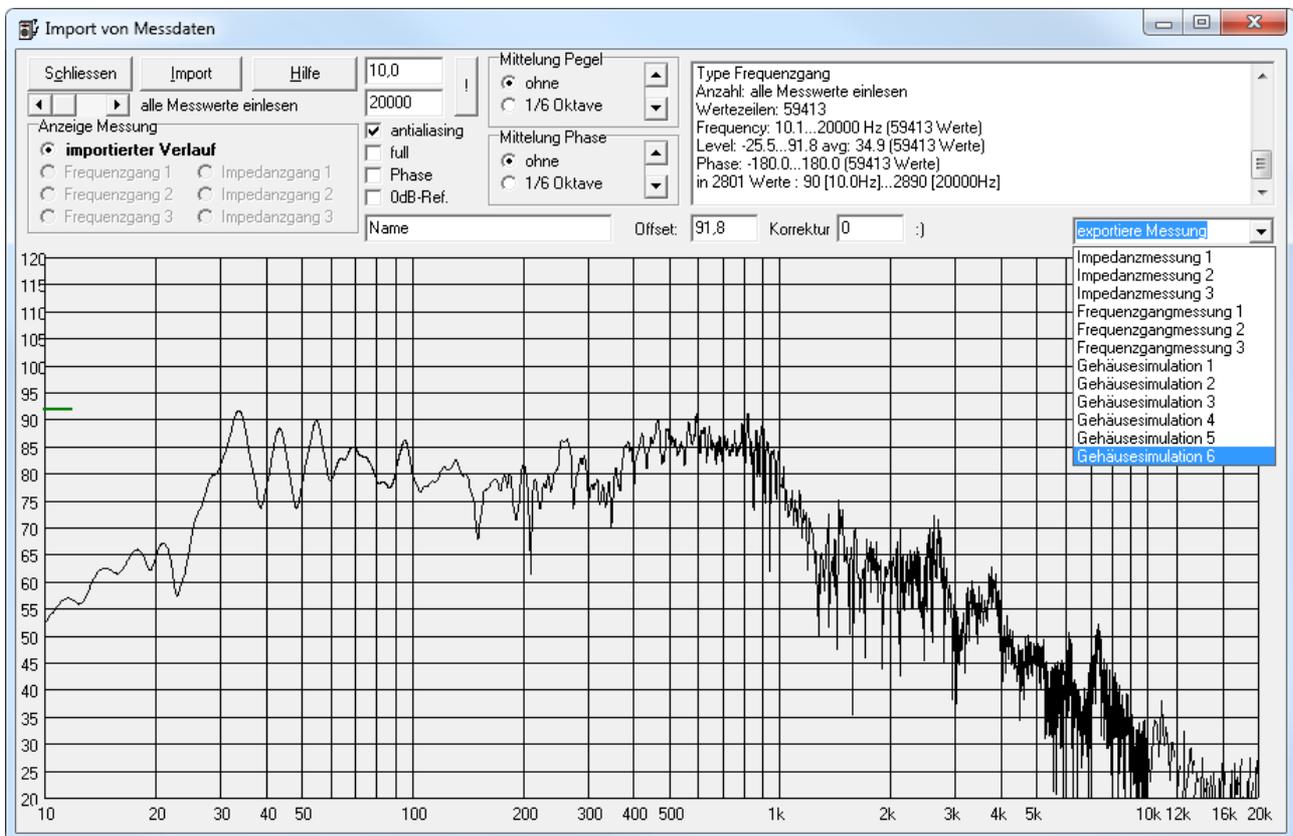
Natürlich sind die Berechnungen bei dieser Gehäusekonstruktion in der Praxis aufwändiger, da die beiden Tunnel durch das geschlossene Volumen hindurch gehen.

## 11. Weitere Messungen

Am Ende des Aufbaus sollte man durch entsprechende Messungen des Impedanzverlaufs und eventuell des Frequenzgangs ein Teil der Simulationen überprüft werden. Mit zwei Impedanzmessungen kann man auch den zuvor nur abgeschätzten Verlustfaktor  $Q_i$  nachträglich bestimmen.

Das Messen von Schalldrücken im Bassbereich ist aber extrem raumabhängig und somit fehlerträchtig.

Als Messsoftware verwende ich den Room-Equation Wizard (REW [02]), 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.



Der importierte Frequenzgang lässt sich auch in eine Boxensimulation (z.B. #6) exportieren und danach mit der Simulation im Menü „Simulationsvergleich“ direkt mit den Simulationen vergleichen.

## 12.Quellen

- [01] Beschreibung Boxenprojekt 4 auf [www.selfmadehifi.de/proj4.htm](http://www.selfmadehifi.de/proj4.htm)
- [02] Room-Equation-Wizard: [www.roomeqwizard.com/](http://www.roomeqwizard.com/)