

***D. A. U.***  
***Der Akustische Untergrund***

## Ermittlung der TSP von Lautsprecherchassis

Eine Abhandlung zum Thema TSP, deren Ermittlung, Bewertung und Weiterverarbeitung in Simulationsprogrammen

**©Copyright 2021 – Urheberrechtshinweis**

Alle Inhalte dieses Dokuments, insbesondere Texte, Fotografien und Grafiken sind urheberrechtlich geschützt. Das Urheberrecht liegt, soweit nicht ausdrücklich anders gekennzeichnet, bei Rouven Wulff, Oliver Eser und Alexander Gresler. Bitte Fragen Sie uns, falls Sie die Inhalte dieses Dokuments verwenden möchten.

Die Abbildungen aus dem LIMP Handbuch unterliegen dem Urheberrecht von Dr. Ivo Mateljan, dessen Einverständnis zur Verwendung der Abbildungen in diesem Dokument vorliegt.

## Inhaltsverzeichnis

<b>Was sind TSP?</b> .....	<b>2</b>
<b>Wie komme ich an die TSP heran?</b> .....	<b>4</b>
<b>TSP messen</b> .....	<b>5</b>
<b>Aufbau eines einfachen Impedanzmesskabels</b> .....	<b>6</b>
<b>Messung mit REW</b> .....	<b>10</b>
Einrichtung.....	10
Messen.....	11
<b>Messung mit LIMP</b> .....	<b>16</b>
Einrichtung.....	16
Messen.....	18
<b>Messung mit DATS</b> .....	<b>22</b>
Einrichtung.....	22
Messen.....	25
<b>Zusammenfassung:</b> .....	<b>28</b>
<b>Gehäusesimulationen</b> .....	<b>30</b>
<b>Gehäusearten</b> .....	<b>30</b>
Bassreflex.....	30
Geschlossene Gehäuse.....	30
Geschlossen mit Hochpass (GHP).....	31
<b>WinISD</b> .....	<b>32</b>
Eingabe der TSP.....	32
Geschlossene Box.....	35
Bassreflexbox.....	37
<b>BassCADe</b> .....	<b>41</b>
Eingabe der TSP.....	41
Geschlossene Box.....	45
Bassreflexbox.....	48
<b>AJHorn</b> .....	<b>53</b>
Eingabe der TSP.....	53
Geschlossene Box.....	54
Geschlossene Box mit Hochpass (GHP).....	58
<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>63</b>
<b>Weitere Informationen</b> .....	<b>64</b>
<b>TSPCheck</b> .....	<b>64</b>
<b>Messsoftware</b> .....	<b>64</b>
<b>Simulationsprogramme</b> .....	<b>64</b>
<b>LIMP Handbuch</b> .....	<b>64</b>
<b>Teileliste für die Impedanzmessbox</b> .....	<b>64</b>
<b>Empfehlenswerte TSP-Datenbanken</b> .....	<b>65</b>

## Was sind TSP?

„TSP“ ist die Kurzform von „Thiele/Small Parameter“, benannt nach A. Neville Thiele und Richard H. Small. Sie beschreiben Kenndaten eines Lautsprecher Chassis, ähnlich wie die Leistungsdaten eines Motors. Dabei handelt es sich um Kleinsignalparameter, die das Chassis elektrisch, mechanisch und elektromechanisch beschreiben. Auch bei einem Motor ist es so, dass eine einzige Kennzahl nichts über den Motor aussagt, sondern immer der Motor als Ganzes zu betrachten ist. Die reine Motorleistung sagt noch nichts aus. Erst wenn das Drehmoment, der Hubraum, der Verbrauch usw. mit in Betracht gezogen werden, wissen wir, was der Motor zu leisten in der Lage ist. Aber wir schweifen ab...

Der für die Berechnung eines Lautsprechergehäuses benötigte Parametersatz lautet:

<b>V<sub>as</sub></b>	Äquivalentvolumen
<b>M<sub>ms</sub></b>	Bewegte Masse
<b>Q<sub>es</sub></b>	Elektrische Güte
<b>Q<sub>ts</sub></b>	Gesamtgüte
<b>R<sub>e</sub></b>	Gleichstromwiderstand
<b>L<sub>e</sub></b>	Induktivität der Schwingspule
<b>B x l</b>	Kraftfaktor
<b>X<sub>max</sub></b>	maximale Auslenkung
<b>Q<sub>ms</sub></b>	Mechanische Güte
<b>R<sub>ms</sub></b>	mechanischer Verlustwiderstand
<b>S<sub>d</sub></b>	Membranfläche
<b>C<sub>ms</sub></b>	Nachgiebigkeit der Aufhängung
<b>F<sub>ms</sub></b>	Resonanzfrequenz
<b>V<sub>d</sub></b>	Verschiebevolumen

Dennoch gibt es eine Kennzahl, die schon mal recht grob einen Hinweis darauf gibt, für welche Art Gehäuse ein Chassis geeignet ist. Dieser Wert ist „Q<sub>ts</sub>“. Dabei gilt:

Q <sub>ts</sub> < ca. 0,25	geeignet als Horntreiber
Q <sub>ts</sub> zwischen ca. 0,25 und ca. 0,40	geeignet für BR
Q <sub>ts</sub> zwischen ca. 0,40 und ca. 0,55	geeignet für CB, TML, TQWT
Q <sub>ts</sub> zwischen ca. 0,55 und ca. 0,70	geeignet für TML, TQWT, OB

Diese Grenzen sind nicht als starr zu betrachten, sondern dienen der groben Übersicht für die sinnvollste Nutzung. Die Daten des Parametersatzes werden in erster Linie durch 3 Bestandteile des Chassis bestimmt:

1. Beschaffenheit und Stärke des Antriebs
2. Nachgiebigkeit der Aufhängung
3. Masse

Wichtig zu wissen: alle Kenndaten sind voneinander abhängig! Wird ein Parameter des TSP-Satzes verändert, verändern sich alle anderen in Abhängigkeit / Konsistenz, da sie in

untrennbaren Zusammenhang stehen und über mathematische Formeln aus der jeweiligen anderen Komponente errechenbar sind.

2 Beispiele dazu:

Stellen wir uns 2 Eimer vor. Jeder Eimer fasst 10 Liter und ist jeweils mit 5 Litern gefüllt. Füllen wir nun 2 Liter von einem in den anderen Eimer, haben wir einen Eimer mit 7 Litern und einen Eimer mit nur noch 3 Litern. In der Gesamtheit haben wir aber immer noch 10 Liter. Nur die Füllmenge ist jeweils verändert.

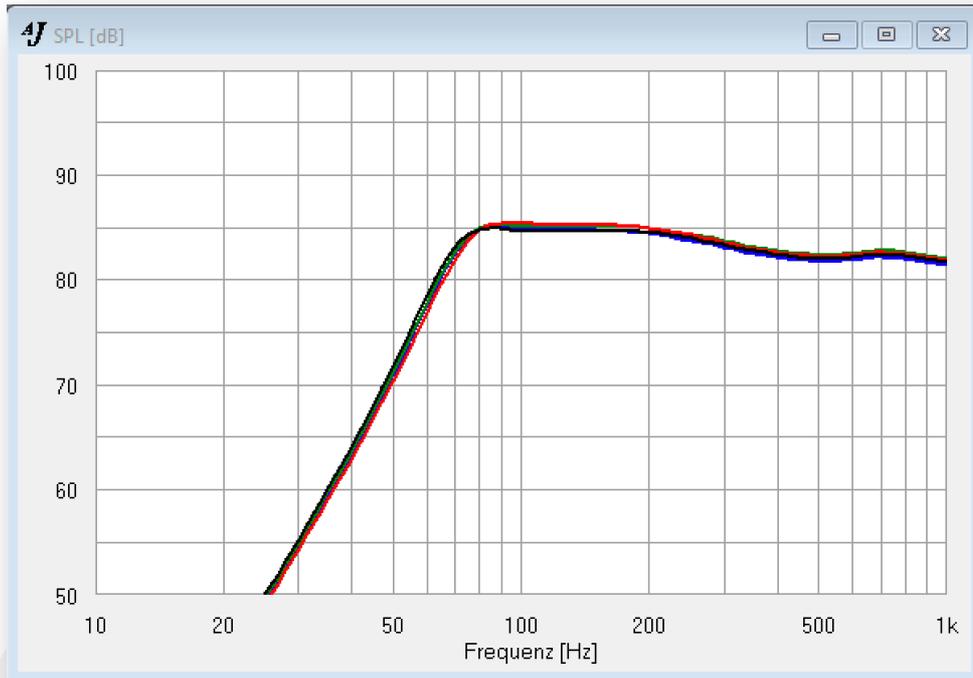
Als nächstes nehmen wir ein 10 Meter langes Seil und legen es über eine Umlenkrolle, sodass auf jeder Seite 5 Meter herunterhängen. Ziehen wir nun an dem Seil, verändern wir zwar die Länge auf jeder der beiden Seiten, am Ende ist das Seil aber immer noch 10 Meter lang.

Worauf wollen wir hinaus? Ganz einfach: man liest immer wieder, man müsse Chassis zuerst x Stunden „einspielen“, bis man das ideale Gehäuse berechnen könne. Man hofft dabei vor allem darauf, dass die Resonanzfrequenz  $F_s$  sinkt, weil dadurch eine tiefere Abstimmung und damit ein tieferer Bass erreicht werden kann. Jedoch ist es aber so, dass dabei auch automatisch aufgrund der Abhängigkeiten untereinander  $Q_{ts}$  ebenfalls sinkt,  $V_{as}$  jedoch ansteigt. Am Ende bedeutet das, dass es auf dasselbe, optimale Gehäusevolumen hinausläuft.

Im Folgenden schauen wir uns dazu 4 Parametersätze an, die unterschiedlicher nicht sein könnten. Es handelt sich dabei um 4 Exemplare desselben Treibers, jedoch aus unterschiedlicher Fertigungsserie. Sie wurden gar nicht bzw. unterschiedlich lang eingespielt:

	Einheit	Chassis 1	Chassis 2	Chassis 3	Chassis 4
$R_e$	Ohm	3,2	3,2	3,2	3,2
$F_s$	Hz	36,52	45,41	39,77	40,10
$L_e$	uH	326,28	334,37	324,85	327,63
$L_2$	uH	808,19	730,15	802,18	852,54
$R_2$	Ohm	15,13	16,45	14,89	15,41
$Q_{ts}$		0,31	0,38	0,33	0,35
$Q_{es}$		0,35	0,44	0,37	0,41
$Q_{ms}$		2,52	2,94	2,66	2,55
$M_{ms}$	g	33,80	31,82	33,05	33,53
$R_{ms}$	kg/s	3,0920	3,0936	2,9948	3,3097
$C_{ms}$	m/N	0,000562	0,000386	0,000502	0,000470
$V_{as}$	Liter	36,95	25,39	33,05	30,90
$S_d$	cm <sup>2</sup>	216,42	216,42	216,42	216,42
$B \times l$	Tm	8,437	8,107	8,250	8,169

Wir packen alle Treiber in das Simulationsprogramm AJHorn und geben dem Gehäuse ein Volumen von 5,5 Litern. Zusätzlich verpassen wir den Treibern jeweils einen Kondensator mit einem Wert von 390 $\mu$ F und simulieren damit ein geschlossenes Gehäuse mit Hochpass (GHP):



Sieh sich das mal einer an: bis auf Pixelbreite führen diese völlig unterschiedlichen Parametersätze im selben Gehäuse zu exakt derselben Abstimmung. Das macht deutlich, dass sich ein frisch aus der Verpackung genommenes Chassis exakt genauso verhält, wie eines, welches für Minuten oder gar Stunden „eingespielt“ wurde. Auch interessant ist, dass sich die TSP eines Chassis wieder den ursprünglichen Werten nähern, wenn diese für einige Zeit nicht betrieben werden. Meist reichen dafür schon wenige Stunden.

## Wie komme ich an die TSP heran?

Jeder ernstzunehmende Hersteller veröffentlicht die TSP zu seinen Chassis auf der Homepage und stellt ein Datenblatt zur Verfügung. Allerdings gibt es hier sowohl gute als auch schlechte Beispiele. Was ist damit gemeint?

Bei manch einem Hersteller hat man das Gefühl, dass die veröffentlichten Parameter bei Mondschein gewürfelt wurden. Anders kann man sich das nicht erklären. Die veröffentlichten Parameter weichen von den tatsächlichen Parametern ab und sind dabei dann noch nicht einmal konsistent und sind aufgrund der Abhängigkeiten untereinander physikalisch gar nicht möglich. Der unwissende Käufer kauft ein Chassis dann möglicherweise aufgrund der augenscheinlich besonders niedrigen Resonanzfrequenz ( $F_s$ ) und einer für seine Zwecke idealen Gesamtgüte ( $Q_{ts}$ ) und wundert sich dann, warum nicht das erhoffte Ergebnis rauskommt.

Dem kann man auf 2 Arten vorbeugen:

1. Parameter mit einem Stück Software auf Konsistenz überprüfen
2. Selbst messen

Mit dem kleinen Programm „TSPCheck“ kann ein Parametersatz auf Konsistenz geprüft werden.

Testet die Konsistenz der Thiele/Small Parameter eines Lautsprechers					
Lautsprechername (Hersteller/Typ)					
					Formel (verwende SI Einheiten)
Freiluft Resonanzfrequenz	Fs	[Hz]	52.0	51.37	$=1/(2*\pi*(Cms*Mms)^{0.5})$
Bewegte Masse (inkl. Luftlast)	Mms	[g]	6.00	5.85	$=1/((2*\pi*Fs)^2*Cms)$
Mech. Nachgiebigk. der Aufh.	Cms	[mm/N]	1.60	1.56	$=1/((2*\pi*Fs)^2*Mms)$
Abstrahlende Oberfläche	Sd	[cm²]	58.00	58.13	$=\sqrt{Vas}/(Rho*c^2*Cms)^{0.5}$
Effektiver Membrandurchmesser	Dd	[cm]	8.60	8.60	$=2*(Sd/\pi)^{0.5}$
Äquivalentes Luftvolumen	Vas	[l]	7.50	7.47	$=Rho*c^2*Cms*Sd^2$
DC-Widerstand der Schwingspule	Rdc	[Ohm]	6.50	6.47	$=Qes*BL^2/(2*\pi*Fs*Mms)$
Kraftfaktor für X < Xlin	BL	[N/A]	6.50	6.52	$=(2*\pi*Fs*Mms*Rdc/Qes)^{0.5}$
Mechanische Güte (Freiluft)	Qms	[ ]	1.600	1.634	$=2*\pi*Fs*Mms/Rms$
Elektrische Güte (Freiluft)	Qes	[ ]	0.300	0.302	$=2*\pi*Fs*Mms*Rdc/BL^2$
Mechanischer Widerstand	Rms	[kg/s]	1.20	1.23	$=2*\pi*Fs*Mms/Qms$
Wirkungsgrad (1W/1m/Halbraum)	Eta	[dB]	87.4	87.17	$=51.91+10*\log_{10}(Fs^3*Vas/Qes)$
Wirkungsgrad-Bandbreite Produkt	EBP	[Hz]	173.3	170.32	$=Fs/Qes$
Elektrische Belastbarkeit	Pel	[W]	50		$=Eta+10*\log_{10}(Pel)$
Max. SPL (Pel/1m/Halbraum)	SPL_e	[dB]	104.4		$=(H\_schwingspule-H\_luftspalt)/2$
Lineare Auslenkung	Xlin	[mm]	3.00		
Maximale Auslenkung	Xmax	[mm]	6.00		
Max. lin. SPL @ 50 Hz in CB	SPL_m	[dB]	84.2		$=20*\log_{10}(Xlin*Sd*50^2)+111.43$
Frequenz bei der SPL_m = SPL_e	F_m=e	[Hz]	159.6		$=50*10^{((SPL\_e-SPL\_m)/40)}$

Bei der Eingabe der Daten in den Eingabefeldern werden die Formeln auf der rechten Seite angewendet und der jeweils berechnete Wert ausgegeben. Kleine Abweichungen sind hier völlig in Ordnung und resultieren aus unterschiedlichen Rundungsregeln der Messprogramme. Weichen diese Parameter jedoch gänzlich voneinander ab, stimmt etwas nicht und man kann dem entsprechenden Datenblatt nicht trauen. Hier hilft dann nur eines: selbst messen!

Auch wenn die Parameter in sich konsistent sein sollten, raten wir dennoch dazu, den Parametersatz selbst zu messen. Nur so kann wirklich sichergestellt werden, dass die Parameter korrekt sind und das Endergebnis auch dem der Simulation entspricht.

## TSP messen

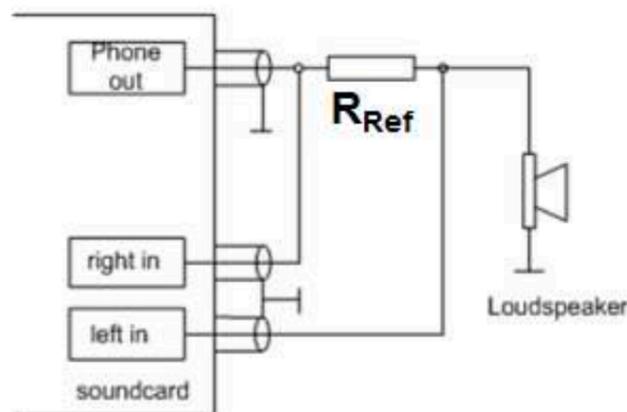
Um die TSP selbst zu messen benötigt man gar nicht so viel. Im Prinzip benötigt man ein Klinke-Klinke-Kabel und einen Widerstand, aus dem man sich ein Impedanzmesskabel baut. Zusätzlich wird eine Soundkarte mit Mikrofoneingang und separatem Kopfhörerausgang und dazu ein kostenlos erhältliches Stück Software benötigt. Eine weitere Möglichkeit ist ein Messsetup bestehend aus einer ARTA-Messbox, einem Leistungsverstärker und einer

externen Soundkarte. Im Bereich Software hat man ebenfalls eine gewisse Auswahl, wobei wir uns hier auf LIMP und REW beschränken. Auch gibt es fertige Komplettlösungen, wie zum Beispiel das Dayton Audio Test System - kurz „DATS“. Letzteres bringt eine eigene Software mit, die aber ausschließlich mit dem DATS-Gerät funktioniert. Auch diese Lösung haben wir für euch dokumentiert.

Im Folgenden zeigen wir, wie die TSP mit den verschiedenen Programmen und Messwerkzeugen gemessen werden können. Ob bei der Messung in REW und LIMP nun ein einfaches Impedanzmesskabel oder die ARTA Messbox verwendet wird ist egal. Die Messbox vereint nur die Funktion des Messkabels mit der Möglichkeit Hardware für akustische Messungen anzuschließen. Das Vorgehen ist aber in beiden Fällen gleich.

### Aufbau eines einfachen Impedanzmesskabels

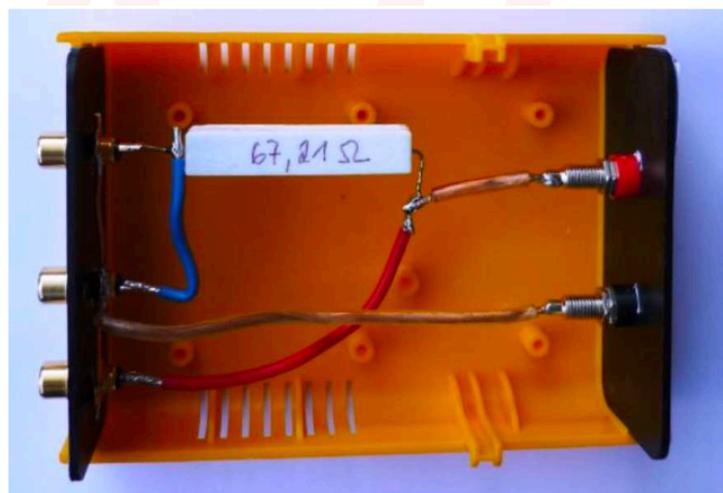
Im Handbuch zur Software „LIMP“ ist der Aufbau eines einfachen Impedanzmesskabels bebildert und beschrieben. Hierfür wird wie oben bereits erwähnt ein Klinke-Klinke-Kabel sowie ein Widerstand mit einem Wert zwischen 33 und 100 Ohm benötigt. Der Aufbau des Kabels sieht wie folgt aus (Quelle: LIMP Handbuch):



Ein solches Messkabel kann recht einfach hergestellt werden, indem man ein günstiges Klinke-Klinke-Kabel in der Mitte auseinanderschneidet und mit einem Widerstand wie dargestellt wieder zusammenlötet. Zusätzlich werden 2 Krokoklemmen benötigt, mit denen man das zu messende Chassis mit dem Messkabel verbindet. In der Praxis sieht das dann so aus:



Ja, das ist ein kleines Durcheinander und man muss ein wenig aufpassen, dass sich hier die Krokoklemmen nicht berühren und damit die Messung gestört wird. Aber: es funktioniert einwandfrei! Eine etwas elegantere Lösung wird ebenfalls im LIMP Handbuch gezeigt:



Diese Box ist die kleinere Version der ARTA-Messbox, mit der nur elektrische Messungen, nicht jedoch aber akustische Messungen ermöglicht werden. Eine Teileliste für diese Messbox befindet sich am Ende dieser Dokumentation.

An dieser Stelle möchten wir uns ganz herzlich bei Dr. Ivo Mateljan bedanken, der uns die Verwendung der Abbildungen aus dem LIMP Handbuch genehmigt hat.

Wichtig ist in beiden Fällen, dass der Widerstand genau gemessen wird. Dieser wird später in REW und LIMP benötigt, damit diese Programme eine Referenz haben, gegen die gemessen werden kann.

Unabhängig vom verwendeten Messsystem werden außerdem Gewichte benötigt, die vibrationsfrei auf der Membran des Chassis angebracht werden können. Diese Gewichte sollten bis auf 2 Nachkommastellen genau gemessen werden. Als Gewichte kommen infrage:

- Knete
- Plastic-Fermit
- Cent-Stücke
- usw.

Bei selbstklebenden Gewichten wie Knete und Plastic-Fermit ist unbedingt darauf zu achten, dass diese bei Papiermembranen durchaus Rückstände hinterlassen können. Hier ist also etwas Vorsicht geboten. Entweder man klebt das Gewicht auf die Dustcap oder von hinten auf die Membran. Nicht-selbstklebende Gewichte können vorsichtig mit einem Stück Tesa befestigt werden. In der Regel reichen Gewichte zwischen 20 und 50g um eine Resonanzverschiebung von 20-50% zu erreichen. Die Messsoftware warnt uns sogar, wenn die Verschiebung zu gering ausfällt.

Hier ein Beispiel mit einem kleinen Chassis, dessen Papiermembran beschichtet ist, worauf das Plastic-Fermit keine Rückstände hinterlässt:



Die Knete oder das Plastic-Fermit können entweder als Kugel auf der Dustcap, oder wie hier gezeigt als „Wurst“ um die Dustcap herum angebracht werden. Das Gewicht wurde mit einer Briefwaage (landläufig auch als „Kifferwaage“ bezeichnet 🤪 ) bestimmt. Eine Waage mit 2 Nachkommastellen reicht vollkommen aus.

Die Messprogramme benötigen noch einen weiteren Wert für die TSP-Messung: den Membrandurchmesser. Dieser wird von der Sickenmitte bis zur Sickenmitte gemessen. Um sich ein bisschen „Peilometrie“ zu sparen, misst man am besten von der Außenkante der Sicke bis zur Innenkante der Sicke:

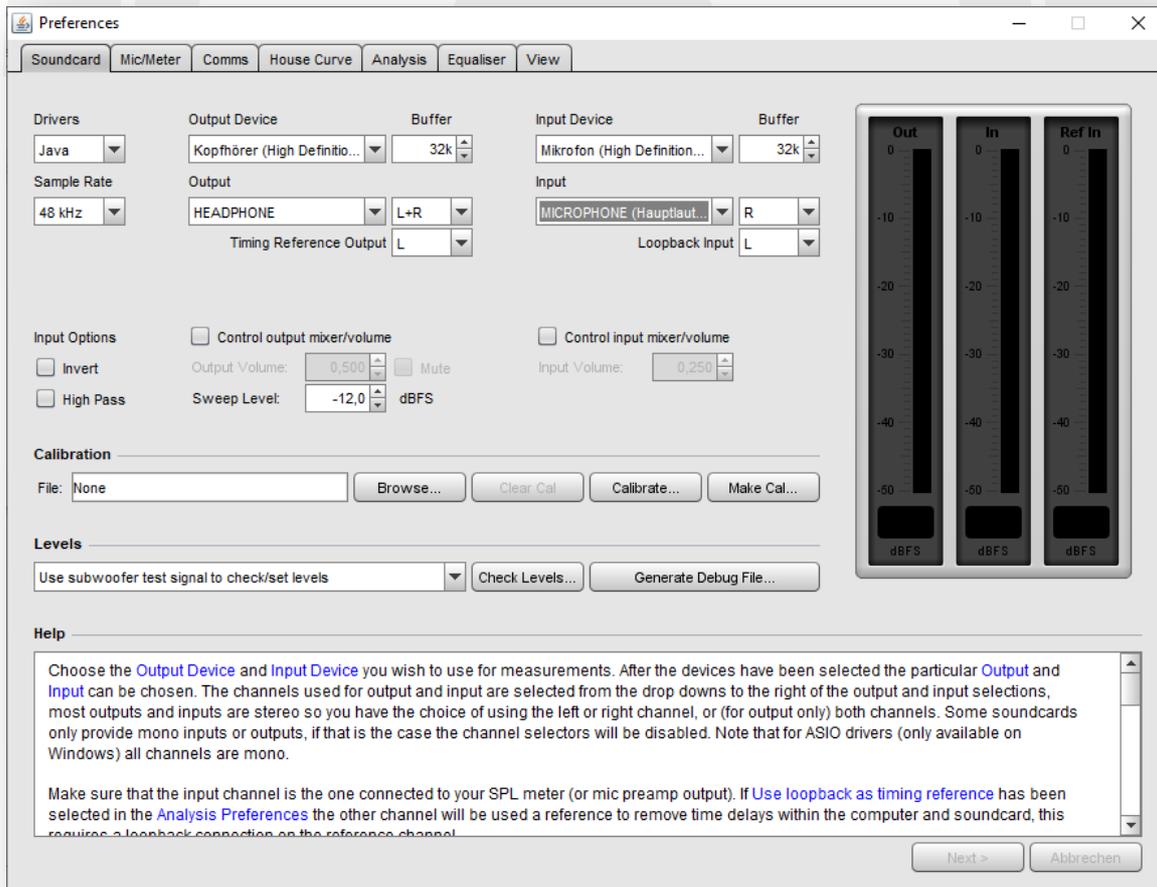
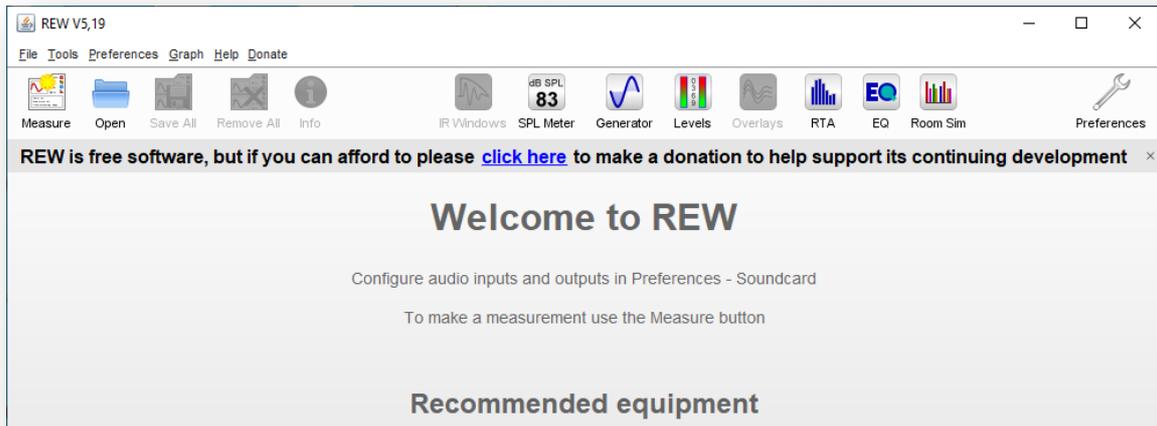


Das Chassis sollte im Idealfall in Einbauposition gemessen werden. Die Parameter unterscheiden sich aber nur unwesentlich, wenn man das Chassis auf dem Magneten liegend auf dem Tisch misst. Wichtig ist nur, dass der Untergrund stabil ist. Ein Stück Schaumstoff oder der Verpackungskarton sind nicht geeignet. Bei Chassis mit einer Polkernbohrung ist es wichtig, dass diese unbedingt frei bleibt. Entsprechend sollten solche Chassis mit kleinen Abstandhaltern aus Holz oder ähnlichem unterbaut werden, bevor die Messung gestartet wird. Das Chassis darf während der Messung nicht bewegt werden.

## Messung mit REW

### Einrichtung

Über den Button „Preferences“ oben rechts in der Menüleiste gelangen wir in die Einstellungen von REW. Hier müssen die Ein- und Ausgänge der Soundkarte ausgewählt werden. In diesem Beispiel wird die interne Soundkarte des Laptops verwendet.



Es gibt keinen Button zum Speichern der Einstellungen. Das Fenster kann geschlossen werden und die Einstellungen bleiben gespeichert. Eine Kalibrierung (unterer Bereich) ist für Impedanzmessungen nicht nötig.

## Messen

Über den Button „Measure“ oben links in der Menüzeile kommen wir zu den Messoptionen. Hier wechseln wir in den Reiter „Impedance“

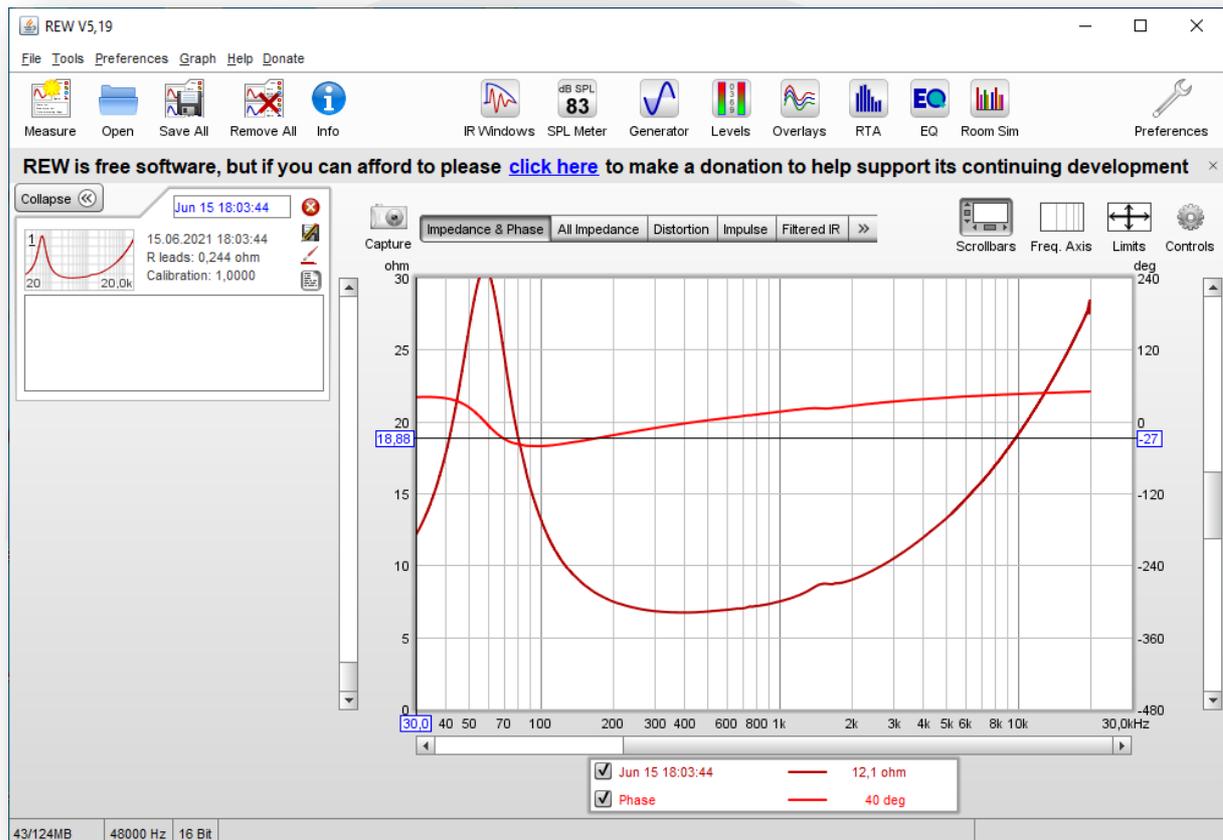


Im Feld  $R_{\text{SENSE}}$  muss der Widerstandswert eingetragen werden. In diesem Fall sind es genau 47,1 Ohm. Um eine möglichst genaue Messung zu erhalten, sollte auch das Messkabel durchgemessen werden. Der Wert ist dann im Feld  $R_{\text{LEADS}}$  einzutragen und beträgt in unserem Beispiel 0,244 Ohm.

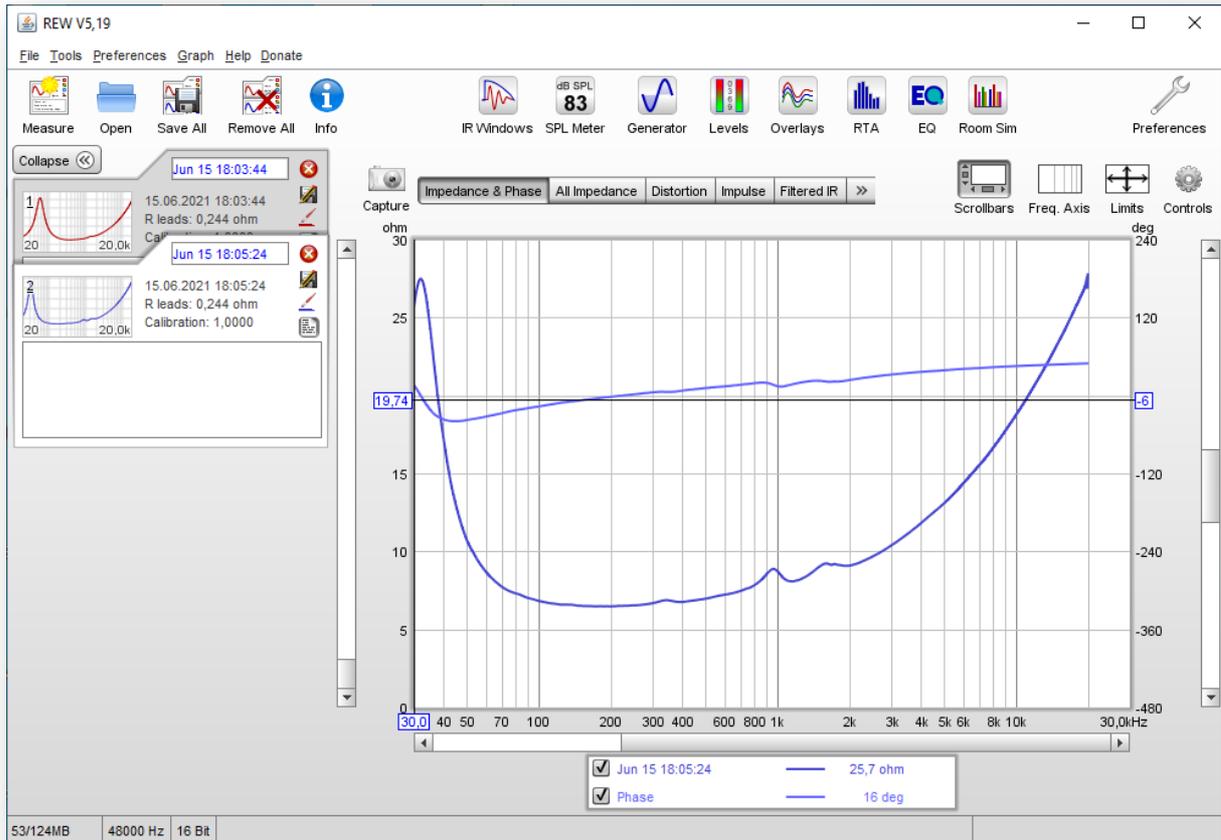
Ebenso können wir hier einstellen, welchen Frequenzbereich wir messen wollen. Ein Bereich von 20 bis 20.000 Hz kann als Standard angesehen werden.

Ein Klick auf den Button „Check Levels“ verrät uns, ob unsere Soundkarte richtig eingestellt ist. Sollte hier ein Fehler angezeigt werden, müssen sowohl Ausgangs- als auch Eingangslautstärke der Soundkarte überprüft und nachjustiert werden. Dies erfolgt über die normale Lautstärkeeinstellung des Betriebssystems.

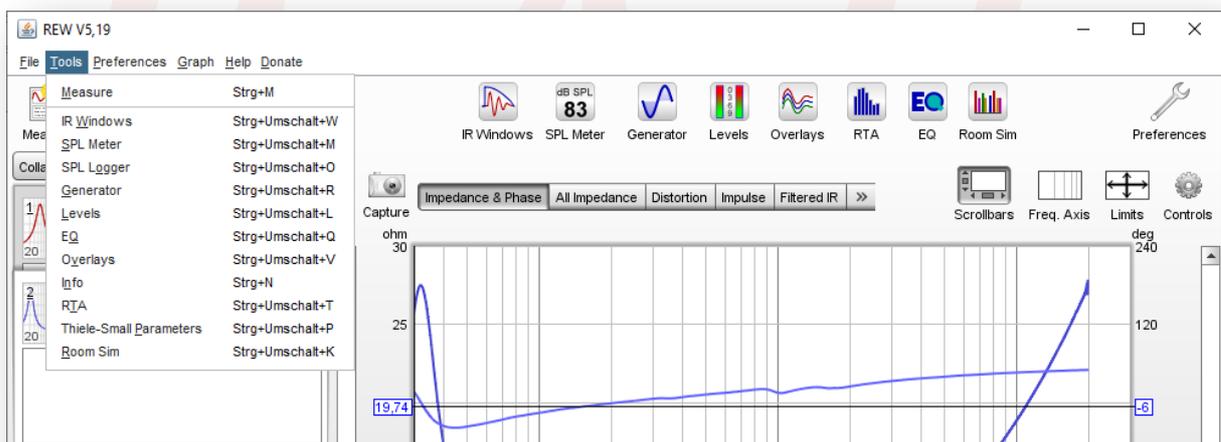
Ein letzter Check, ob Kabel und Chassis korrekt angeschlossen sind, und dann kann es auch schon los gehen. Mit einem Klick auf „Start Measuring“ führen wir zunächst eine Messung ohne Zusatzgewicht auf der Membran durch. Die Messoptionen werden automatisch geschlossen und REW zeigt uns die gemessene Impedanzkurve.



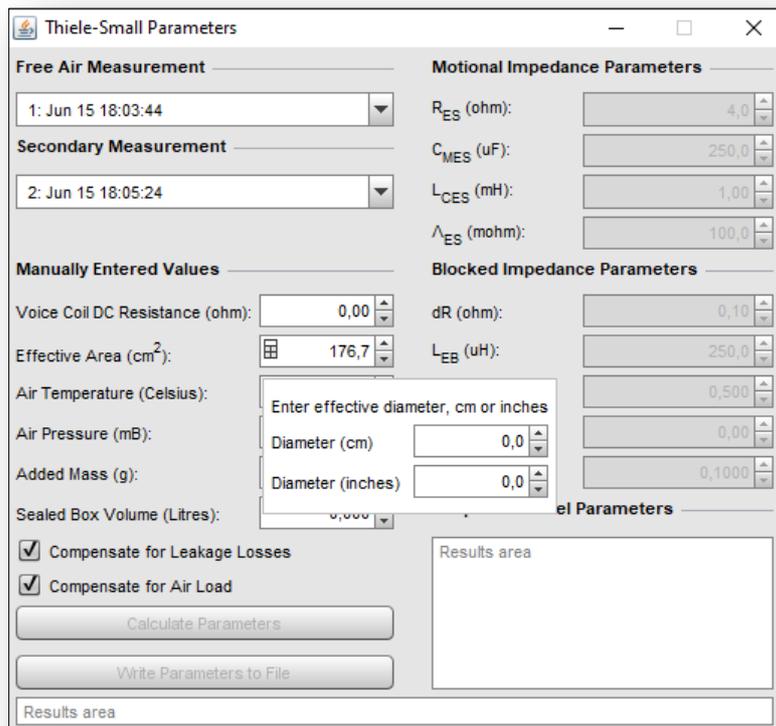
Damit ist der erste Teil der Messung geschafft! Als nächstes benötigen wir jedoch noch eine weitere Messung, damit REW uns den TSP-Satz berechnen kann. Dazu legen wir nun das abgewogene Gewicht auf die Membran und führen erneut eine Messung durch. Dazu werden einfach die oben bereits aufgeführten Schritte wiederholt. Nach Abschluss dieser zweiten Messung befinden wir uns nun wieder im Hauptfenster und sehen auf der rechten Seite 2 Kurven: eine gemessen ohne Gewicht und eine mit. Diese beiden Messungen bilden die Grundlage für die Ermittlung der TSP.



Um den TS-Parametersatz zu erhalten, gehen wir über das Menü „Tools“ und dort in den Unterpunkt „Thiele-Small Parameters“:



Wie auf dem Bild zu sehen, muss unter „Free Air Measurement“ die Messung ohne Gewicht und unter „Secondary Measurement“ die Messung mit Gewicht ausgewählt werden. Zusätzlich benötigt REW 3 Werte von uns: „Voice Coil DC Resistance“, „Effective Area (cm<sup>2</sup>)“ und „Added Mass (g)“. Im Feld „Effective Area“ befindet sich ein kleines Taschenrechner-Symbol, über welches der Membrandurchmesser eingegeben werden kann:



Einmal auf ENTER gedrückt berechnet REW daraus die Membranfläche. Im Feld „Added Mass“ wird das aufgelegte Zusatzgewicht eingegeben. Der Schwingspulenwiderstand wird mit einem Multimeter gemessen und der entsprechend gemessene Wert hier eingetragen. Es kann vorkommen, dass der eingegebene Wert für REW zu hoch ist. Dann sollte dort ein etwas niedrigerer Wert eingegeben – REW macht hier einen Vorschlag. Tests haben gezeigt, dass es gar nicht notwendig ist, hier einen ganz genauen Wert einzugeben, denn das Programm kalkuliert  $R_e$  trotzdem richtig.

Zum Abschluss klicken wir auf „Calculate Parameters“:

Thiele-Small Parameters
— □ ×

---

**Free Air Measurement**

1: Jun 15 18:03:44

**Secondary Measurement**

2: Jun 15 18:05:24

**Manually Entered Values**

Voice Coil DC Resistance (ohm): 5,60

Effective Area (cm<sup>2</sup>): 56,7

Air Temperature (Celsius): 20

Air Pressure (mB): 1013,25

Added Mass (g): 16,64

Sealed Box Volume (Litres): 0,000

Compensate for Leakage Losses

Compensate for Air Load

Calculate Parameters

Write Parameters to File

**Motional Impedance Parameters**

R<sub>ES</sub> (ohm): 28,1

C<sub>MES</sub> (uF): 227,2

L<sub>CES</sub> (mH): 33,13

Λ<sub>ES</sub> (mohm): 494,3

**Blocked Impedance Parameters**

dR (ohm): 0,73

L<sub>EB</sub> (uH): 52,2

L<sub>E</sub> (mH): 0,680

R<sub>SS</sub> (ohm): 855826,12

K<sub>E</sub> (S-H): 0,0644

**Simplified Model Parameters**

R <sub>E</sub> 6,32 ohm	L <sub>E</sub> 130,5 uH
R <sub>ES</sub> 24,31 ohm	R <sub>2</sub> 10,37 ohm
C <sub>MES</sub> 227,2 uF	L <sub>2</sub> 164,6 uH
L <sub>CES</sub> 33,13 mH	R <sub>3</sub> 1,85 ohm
	L <sub>3</sub> 271,2 uH

---

**TS parameters for measurement: Jun 15 18:03:44**

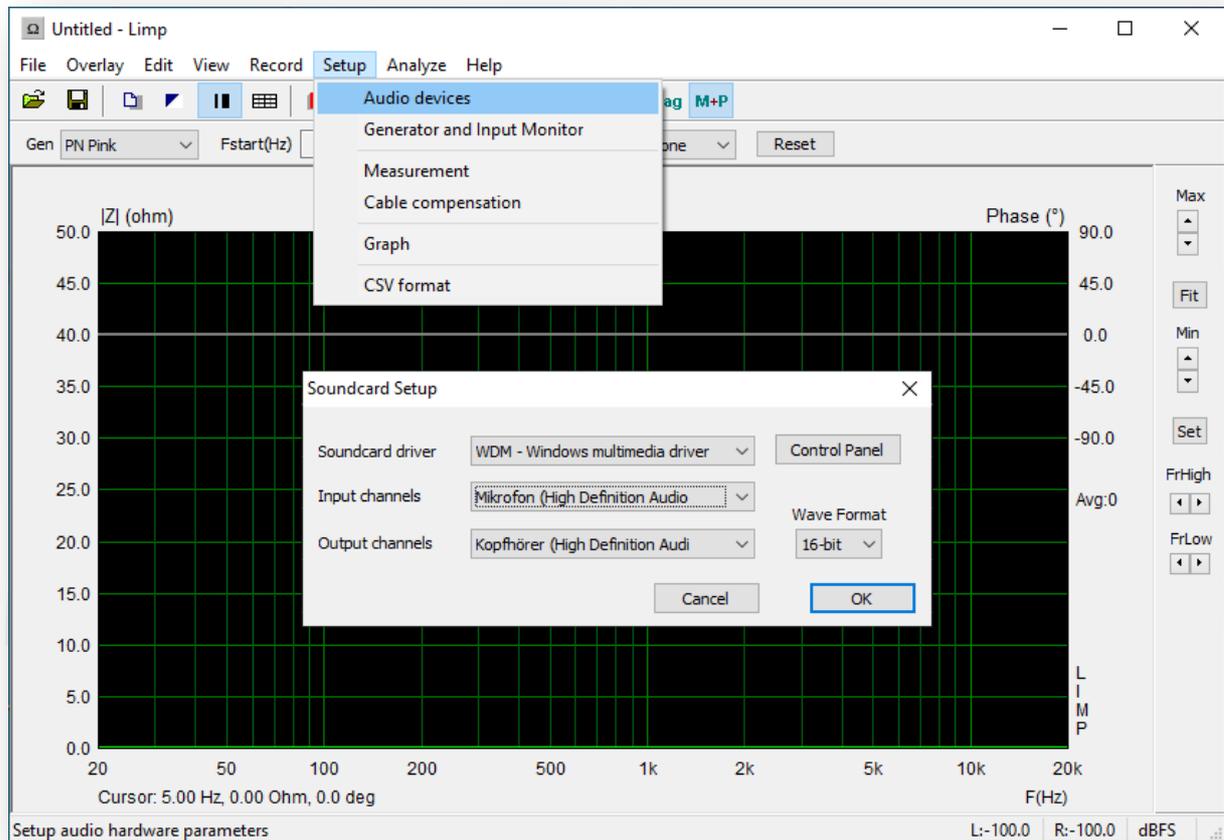
R <sub>E</sub> 6,32 ohm	f <sub>S</sub> 58,0 Hz	M <sub>MS</sub> 7,84 g
Z <sub>min</sub> 6,70 ohm	Q <sub>MS</sub> 2,013	C <sub>MS</sub> 0,960 mm/N
f <sub>min</sub> 383 Hz	Q <sub>ES</sub> 0,523	R <sub>MS</sub> 1,420 kg/s
f <sub>3</sub> 2.361 Hz	Q <sub>TS</sub> 0,415	V <sub>AS</sub> 4,38 litres
L <sub>E</sub> (f <sub>3</sub> ) 0,311 mH	F <sub>TS</sub> 139,6 Hz	BI 5,874 Tm
Dd 8,50 cm	L <sub>P</sub> 84,19 dB (1W/1m)	Eta 0,16 %
Sd 56,7 cm <sup>2</sup>	Added mass 16,64 g	

Das war's auch schon. Somit steht uns nun der komplette Parametersatz zur Verfügung, den wir für die Berechnung und Simulation eines Gehäuses nutzen können.

## Messung mit LIMP

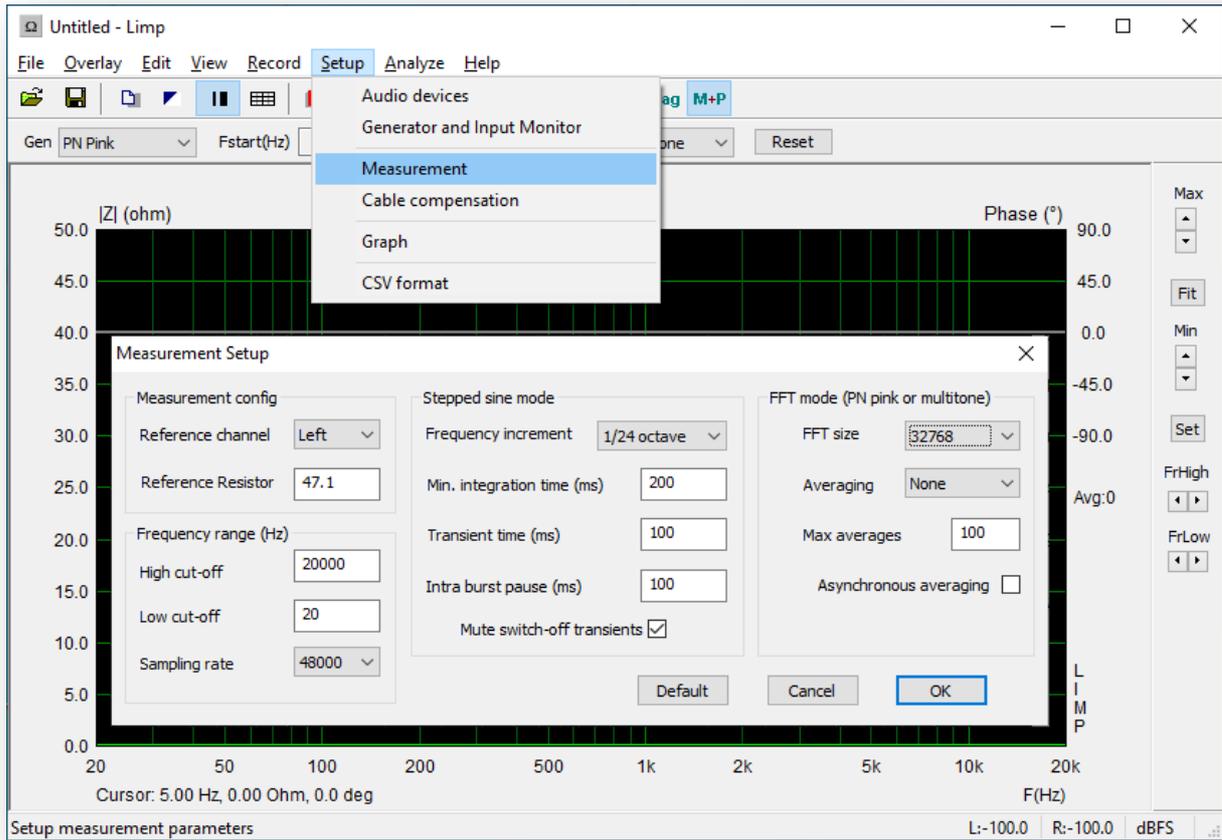
### Einrichtung

Über das Menü „Setup“ und den Unterpunkt „Audio Devices“ gelangen wir in die Einstellungen.



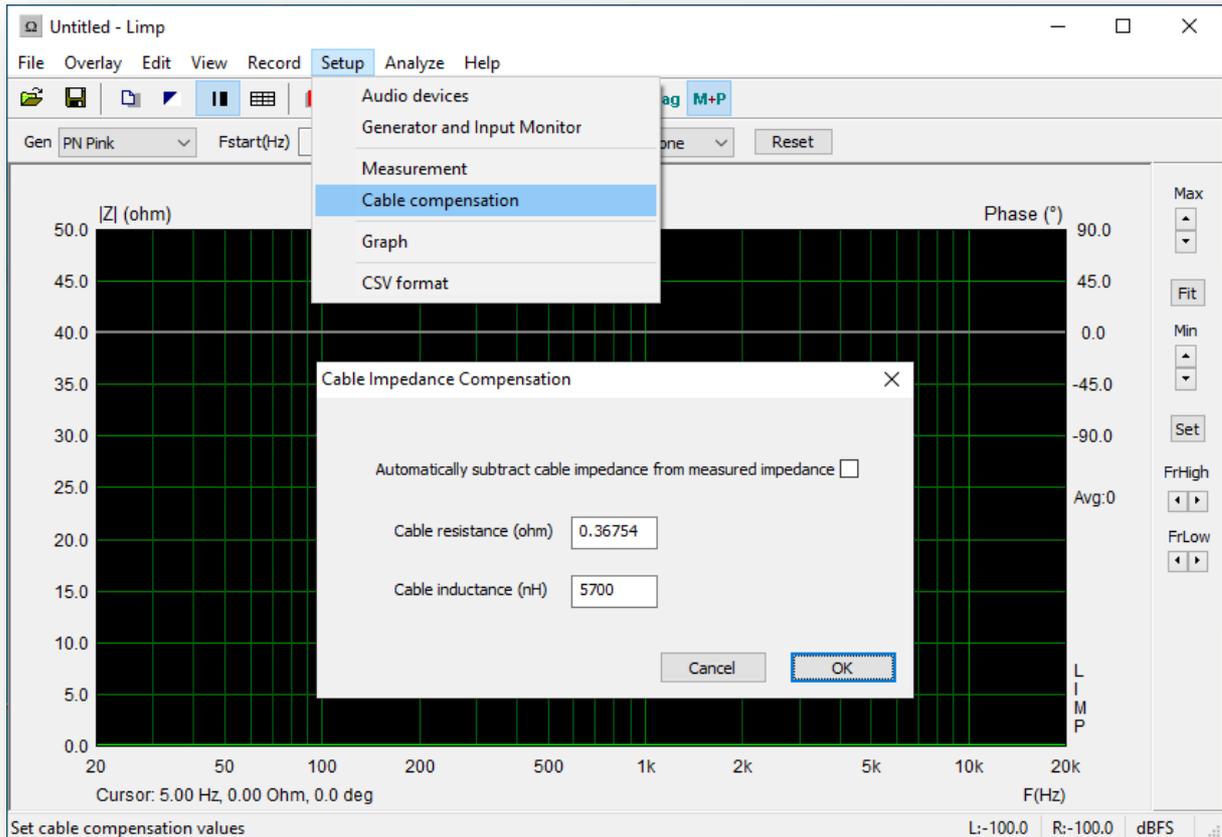
Hier wird die Soundkarte, sowie die Ein- und Ausgänge ausgewählt. Mit einem Klick auf „OK“ werden die Einstellungen gespeichert.

Ebenso im Menü „Setup“ finden wir den Unterpunkt „Measurement“.



Im Feld „Reference Resistor“ wird der Wert unseres Widerstands eingegeben. In unserem Beispiel sind das 47,1 Ohm. Über die Felder im Bereich „Frequency Range (Hz)“ kann der zu messende Bereich eingestellt werden. Ein Bereich zwischen 20 und 20.000 Hz ist als Standard anzusehen. Auch diese Einstellungen werden mit einem Klick auf „OK“ gespeichert.

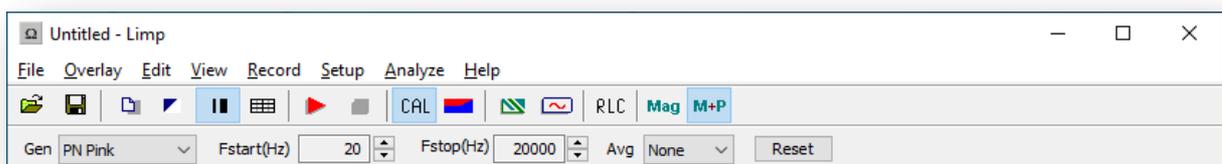
Abschließend können wir über das Menü „Setup“ und den Unterpunkt „Cable Compensation“ noch den Widerstand unseres Messkabels eingeben.



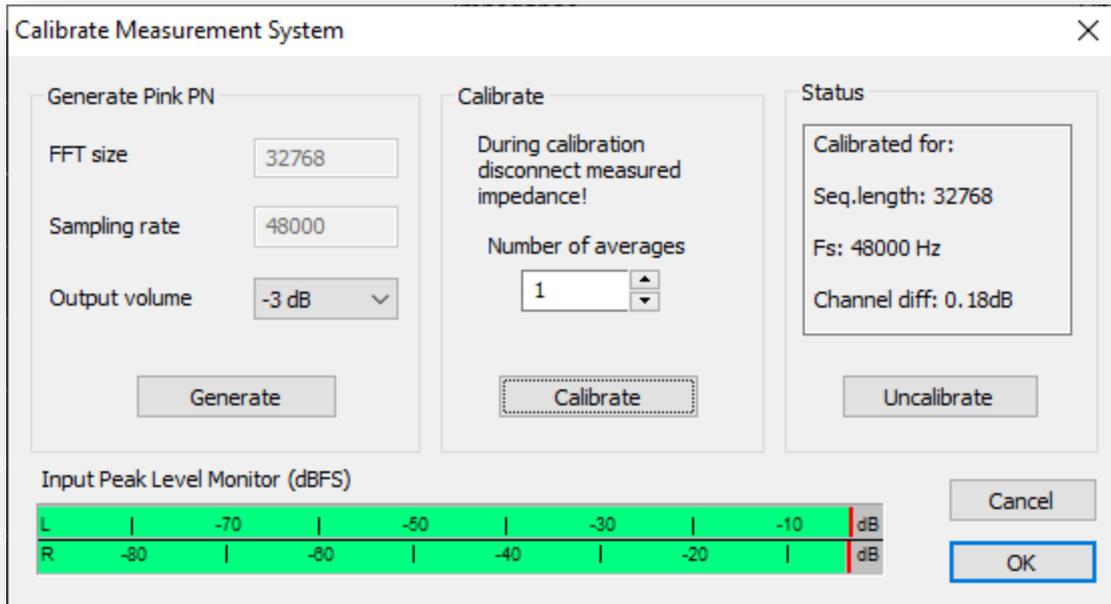
Dieser beträgt in unserem Beispiel 0,36754 Ohm. Das Fenster kann dann mit einem Klick auf „OK“ geschlossen werden.

## Messen

Für die Messung müssen wir zunächst unsere Ein- und Ausgänge gegeneinander kalibrieren. Dies passiert in REW beispielsweise automatisch während der Messung, in LIMP muss dieser Vorgang jedes Mal wiederholt werden, sobald die Software einmal geschlossen wurde. Für die Kalibrierung darf nur das Messkabel oder die Messbox angeschlossen sein. Anschließend klicken wir auf den Button „CAL“ in der Menüleiste und es wird ein Kalibrierungsfenster geöffnet.

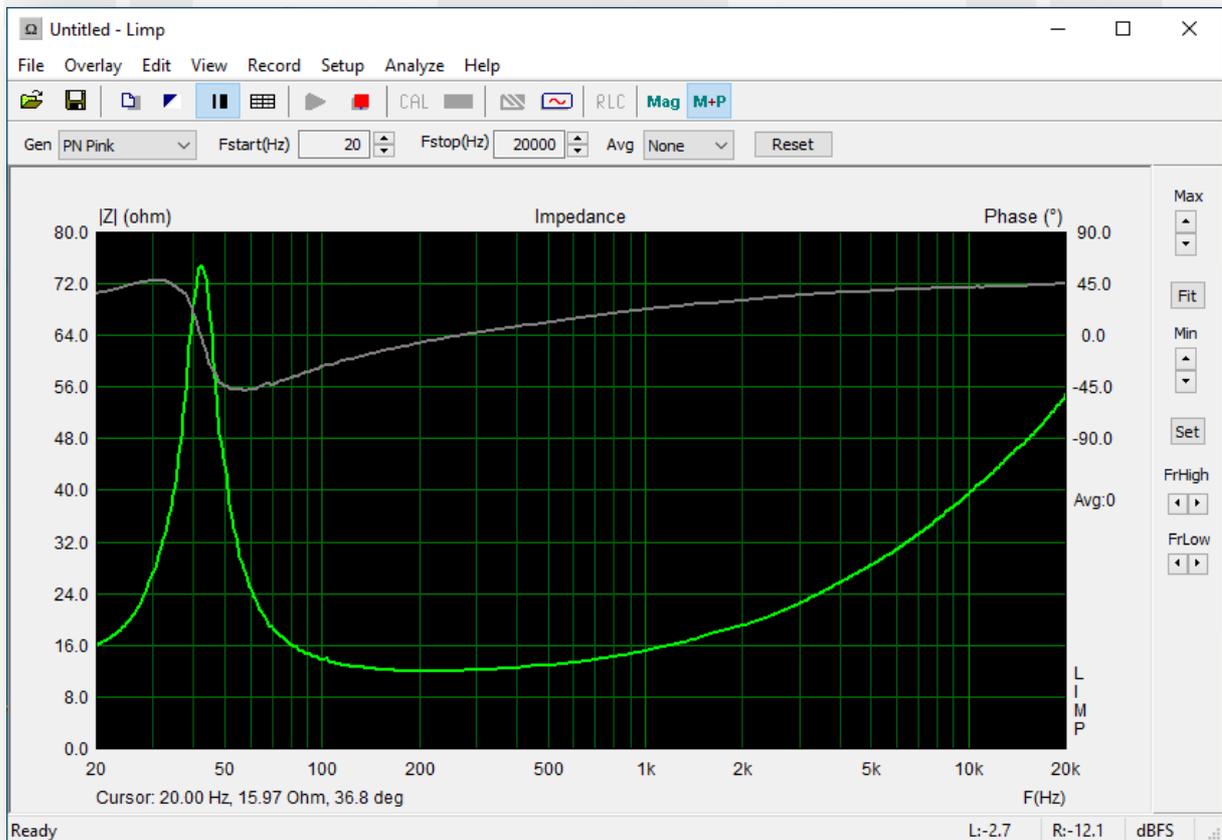


Ein Klick auf „Calibrate“ verrät uns, ob wir ein Problem mit der Lautstärke oder mit den Ein- und Ausgängen haben.

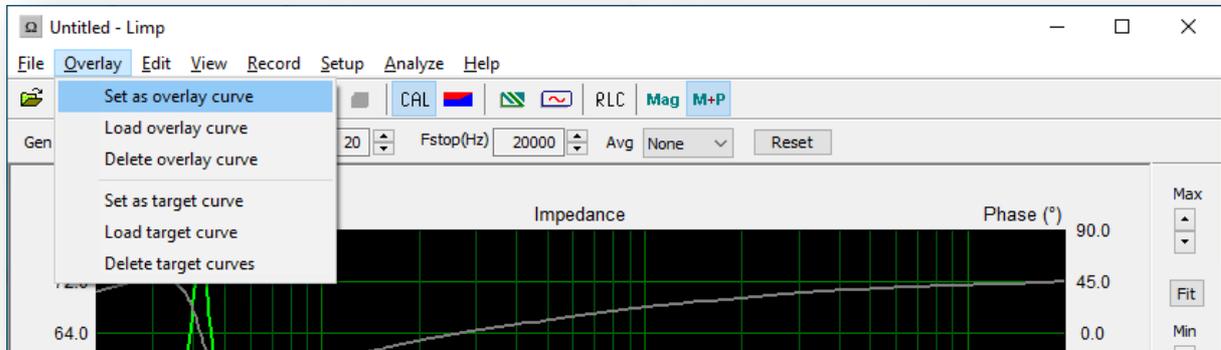


Ein Klick auf „OK“ und auch diese Einstellung wird gespeichert.

Zum Start der Impedanzmessung schließen wir das Chassis ohne Zusatzgewicht an und klicken in der Menüleiste auf den roten „Play“-Button.

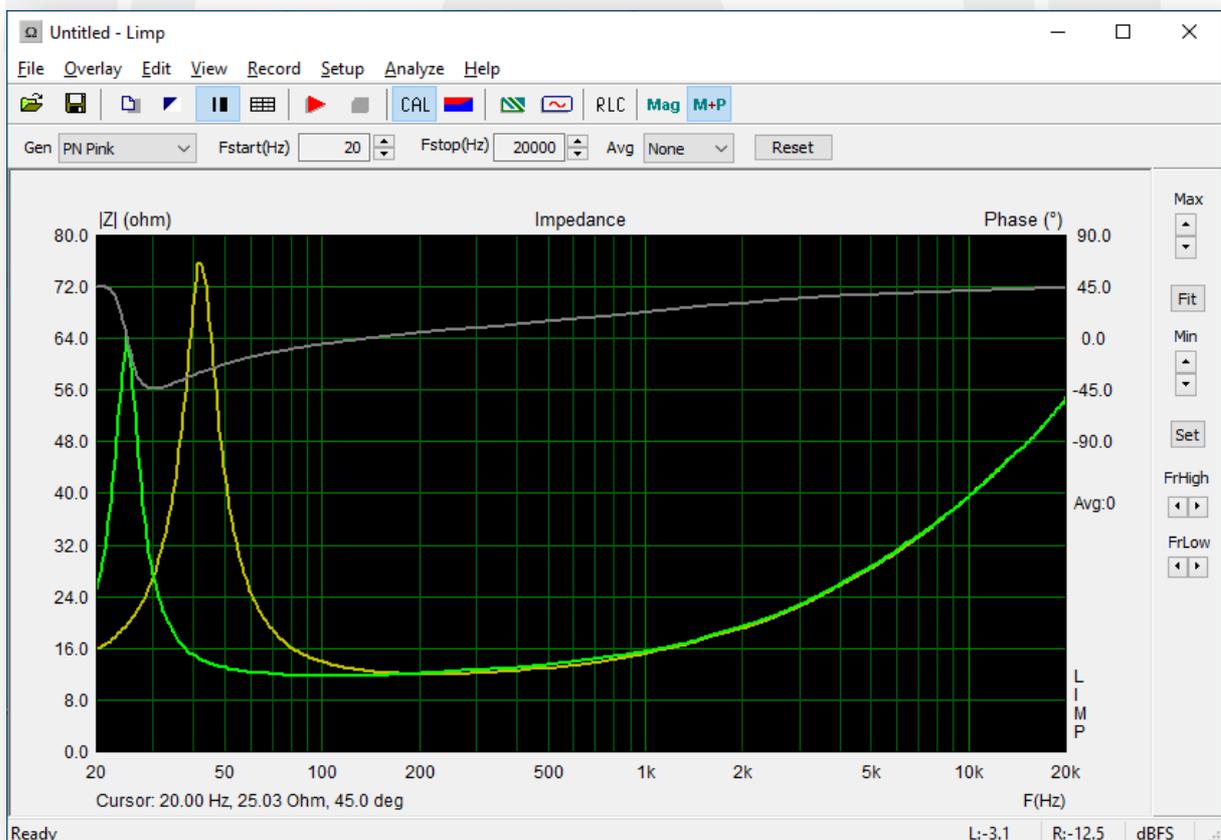


Im Messfenster wird uns dann eine Impedanzkurve angezeigt. Mit einem Klick auf den roten „Stop“-Button beenden wir die Messung. Damit LIMP die nun angezeigte Impedanzkurve als Basis für die TSP-Ermittlung heranziehen kann, müssen wir diese als „Overlay“ speichern. Dies geht über den Menüpunkt „Overlay“ und den Unterpunkt „Set as overlay curve“.



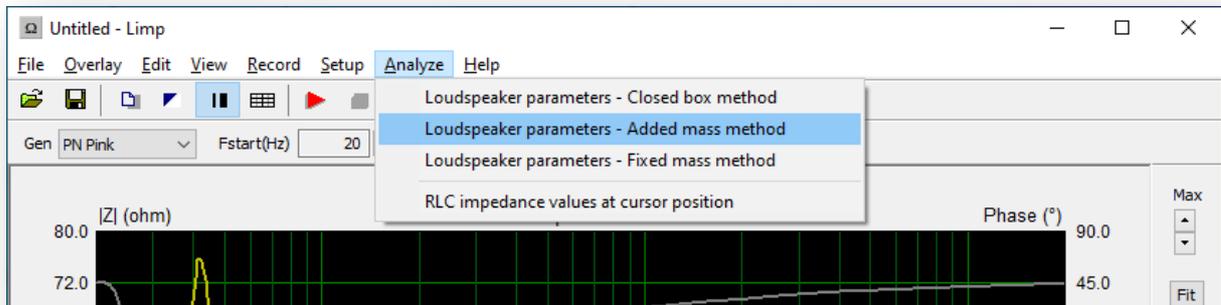
Als nächstes benötigen wir noch eine Messung mit Zusatzgewicht. Entsprechend legen wir nun das Gewicht auf die Membran und klicken wieder auf den roten „Play“-Button. Um auch diese Messung zu beenden, klicken wir auf den roten „Stop“-Button.

Unser Messfenster zeigt nun 2 Kurven:

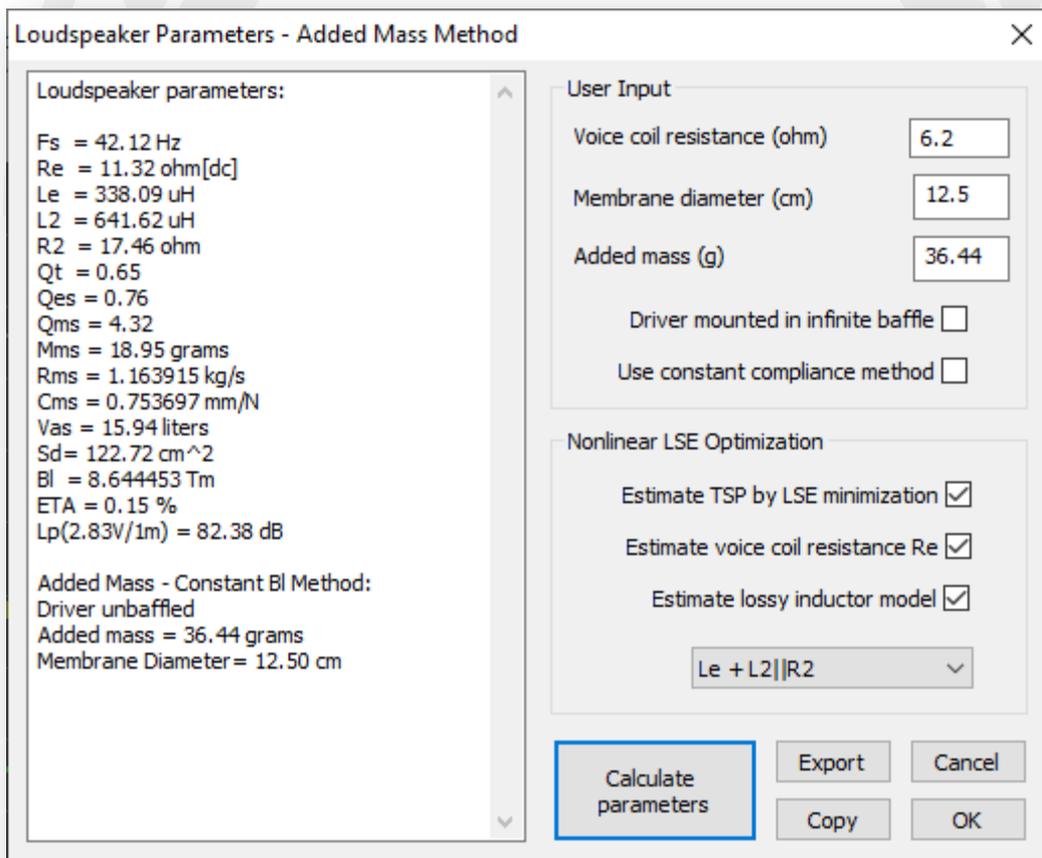


Die gelbe Kurve repräsentiert dabei die Messung ohne Zusatzgewicht, die grüne die Messung mit.

Als nächstes öffnen wir das Menü „Analyze“ und wählen dort den Unterpunkt „Loudspeaker parameters – Added mass method“.



In diesem Fenster geben wir den „Membrane diameter (cm)“, also unseren Membrandurchmesser in cm und im Feld „Added mass (g)“ unser Zusatzgewicht ein. Ebenso sollten alle Häkchen im Bereich „Nonlinear LSE Optimization“ angehakt sein.

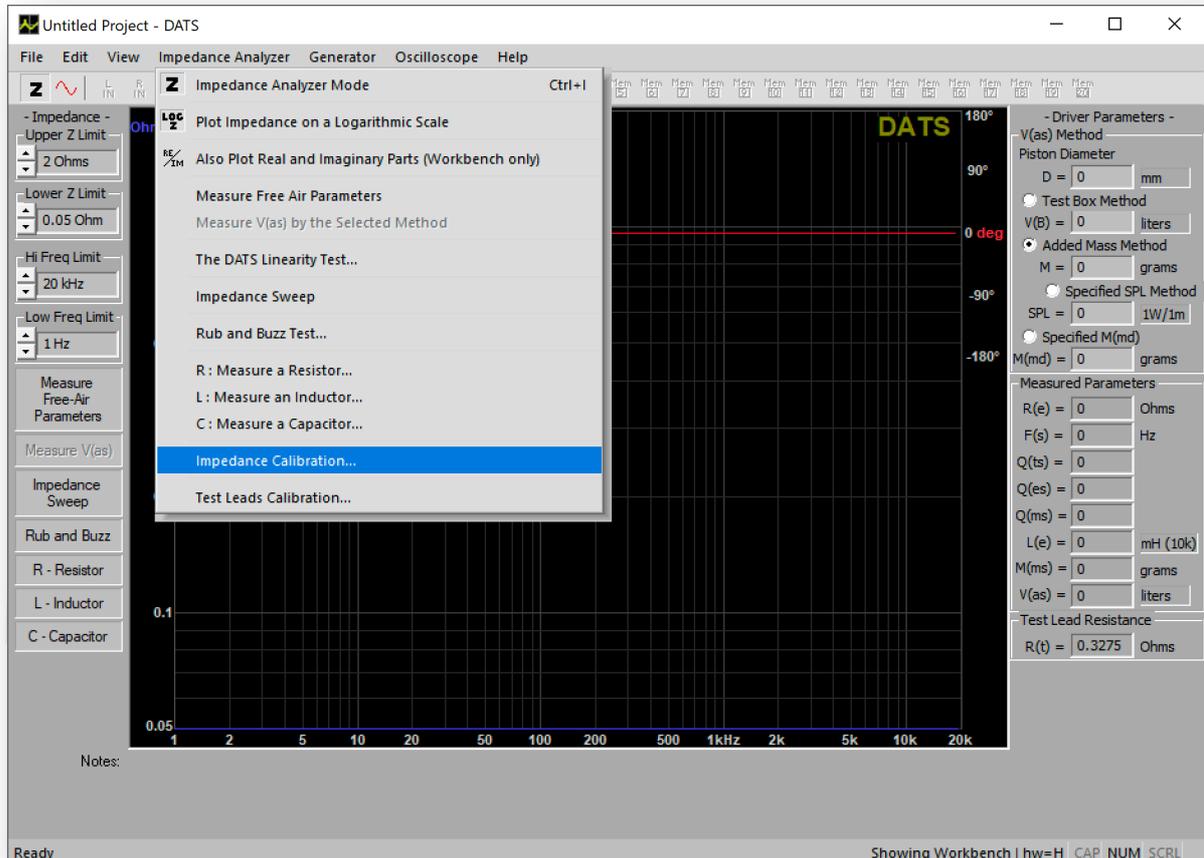


Mit einem Klick auf „Calculate Parameters“ erhalten wir den Parametersatz, den wir dann für Gehäusesimulationen nutzen können.

## Messung mit DATS

### Einrichtung

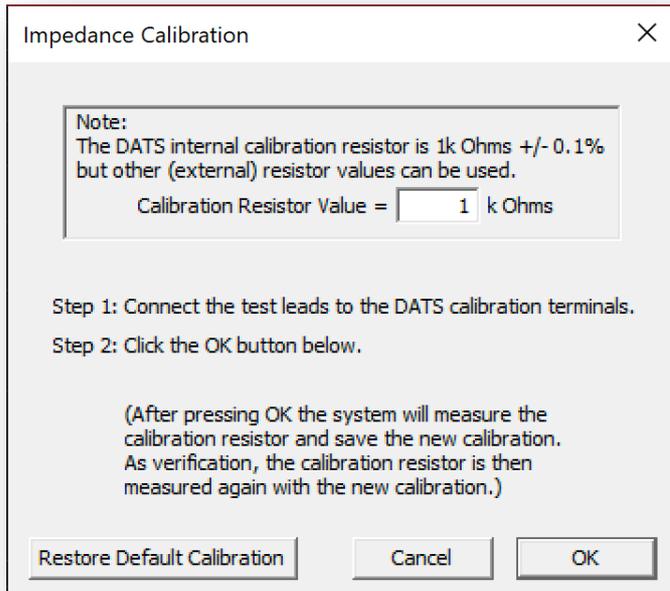
Um DATS einzurichten, gehen wir zunächst in das Menü „Impedance Analyzer“ und wählen dort den Punkt „Impedance Calibration...“ aus.



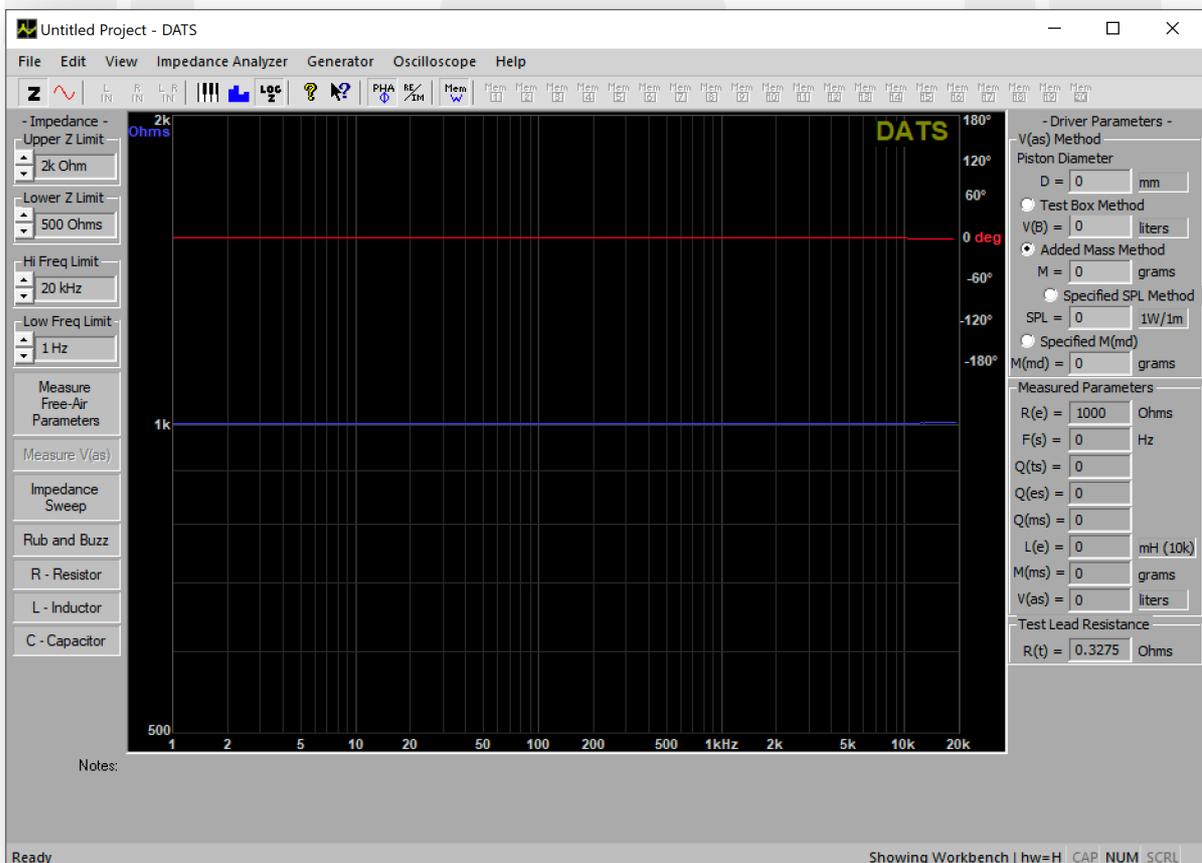
Je nach DATS-Version unterscheidet sich der nächste Schritt:

Bei DATS V1 und V2 liegt ein Referenzwiderstand bei, der für die Einrichtung zwischen die beiden Krokokklemmen geklemmt wird. In der DATS V3 Messbox ist der Widerstand in das Gehäuse integriert und kann über die beiden Kontakte außen am Gehäuse abgegriffen werden.

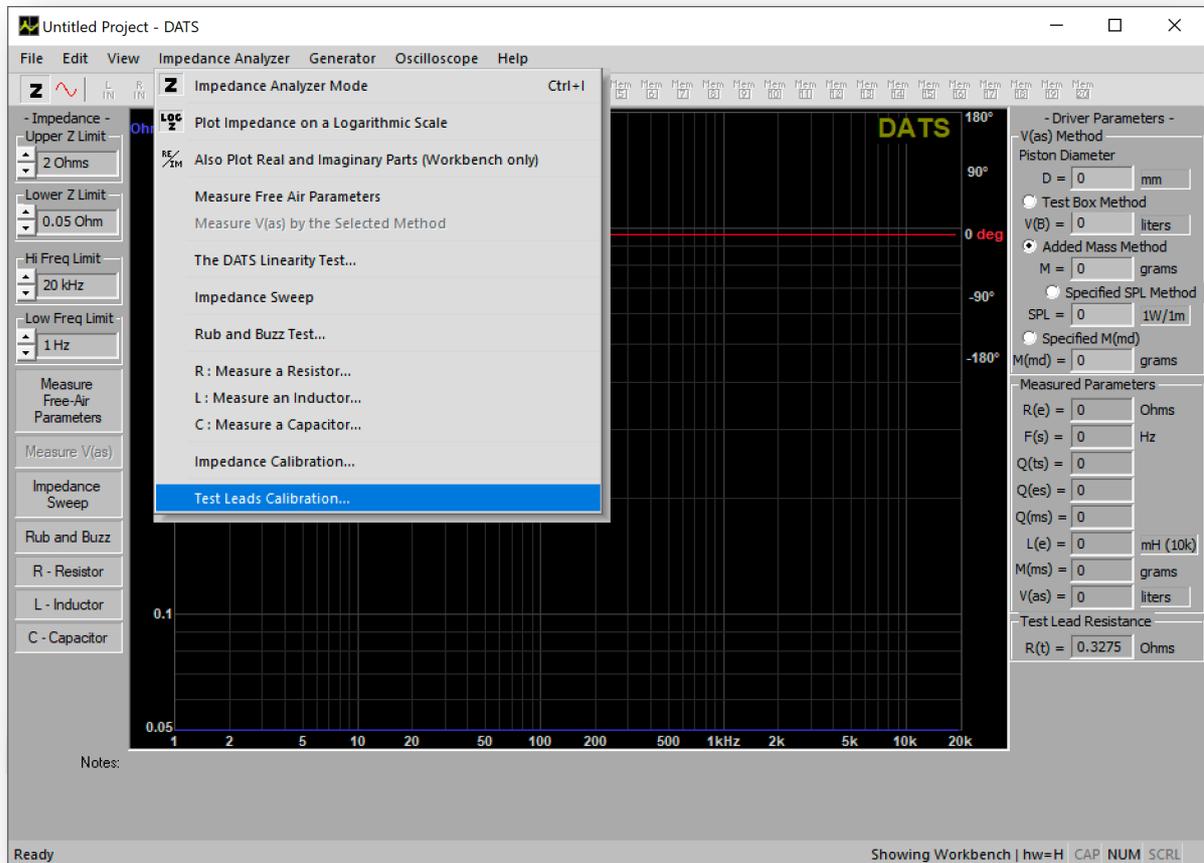
Im Feld „Calibrator Resistor Value“ wird der Wert des Widerstands eingegeben, der dem jeweiligen Gerät beigelegt oder in diesem Verbaut ist. Normalerweise müsste das 1 kOhm sein und dieser Wert sollte auch bereits in dem Feld eingegeben sein.



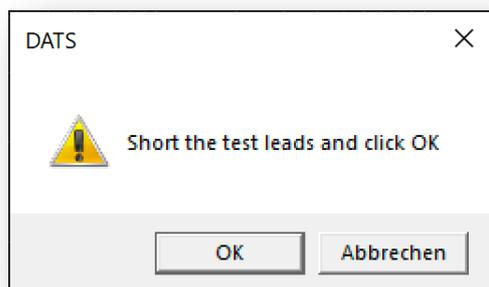
Mit einem Klick auf „OK“ wird die Kalibrierung gestartet. Das Fenster schließt sich automatisch und nach wenigen Sekunden wird der gemessene Widerstand im Hauptfenster auf der rechten Seite im Feld „R(e)“ angezeigt. Der Wert sollte nicht zu stark von dem zuvor eingegebenen Wert abweichen. In diesem Fall liegt der gemessene Wert bei genau 1000 Ohm:



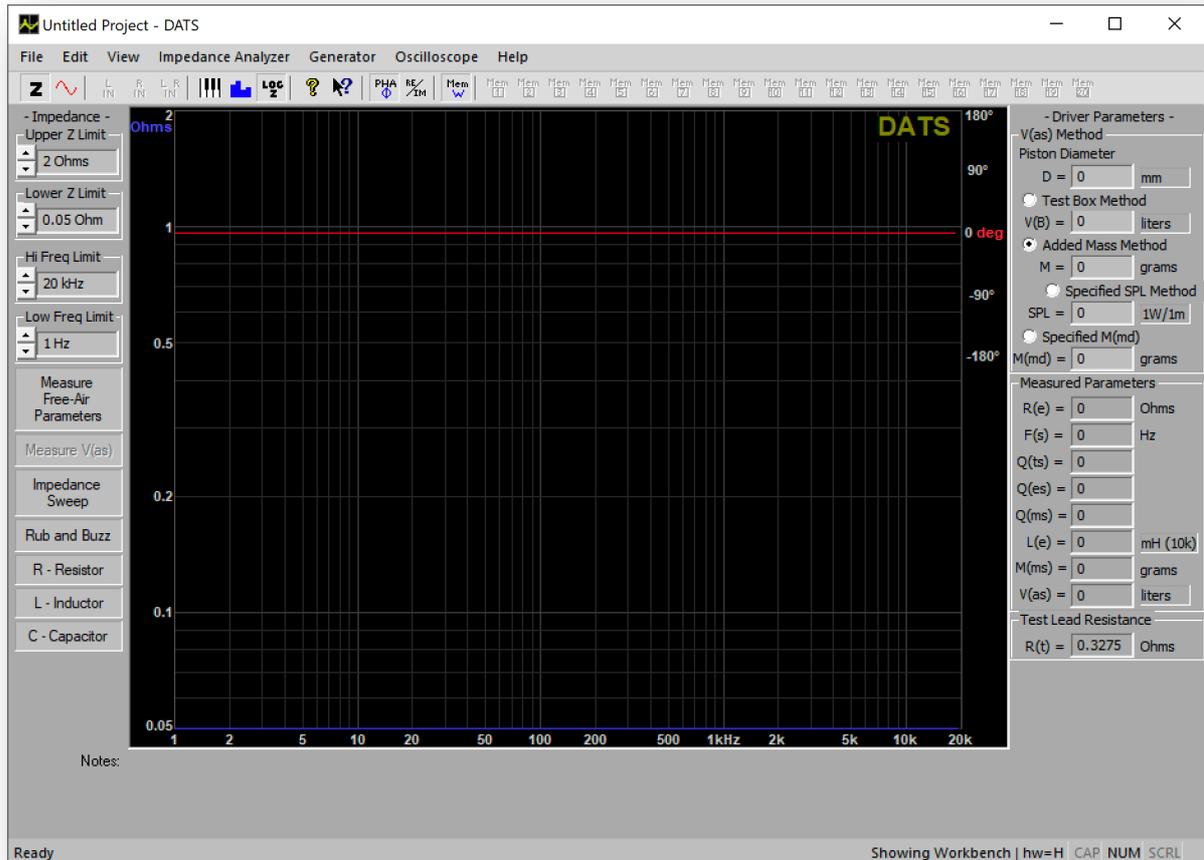
Als nächstes muss noch der Kabelwiderstand gemessen werden. Dafür werden die beiden Krokoklemmen miteinander verbunden und über das Menü „Impedance Analyzer“ der Menüpunkt „Test Leads Calibration...“ ausgewählt.



Die Messung beginnt mit einem Klick auf „OK“.



Danach wird der gemessene Wert im Feld „R(t)“ auf der rechten Seite des Hauptfensters angezeigt.

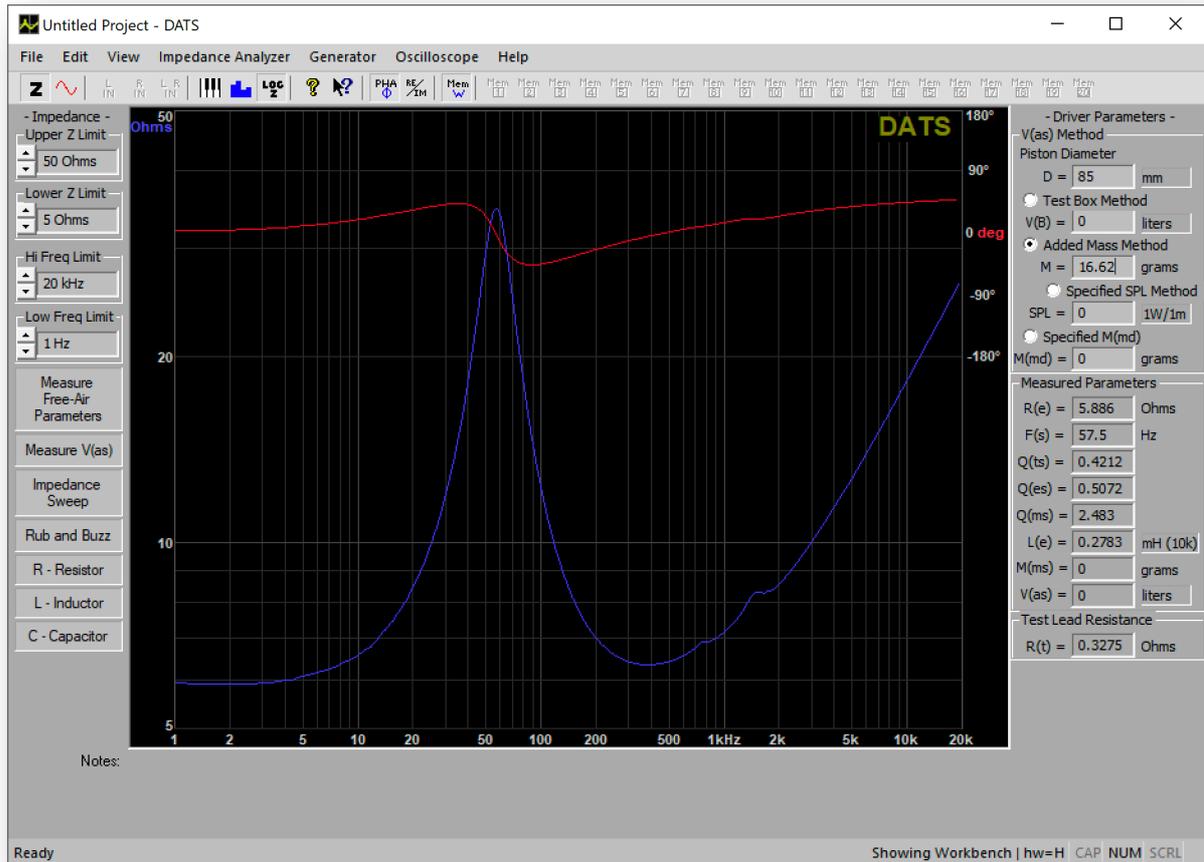


Damit ist DATS startklar.

## Messen

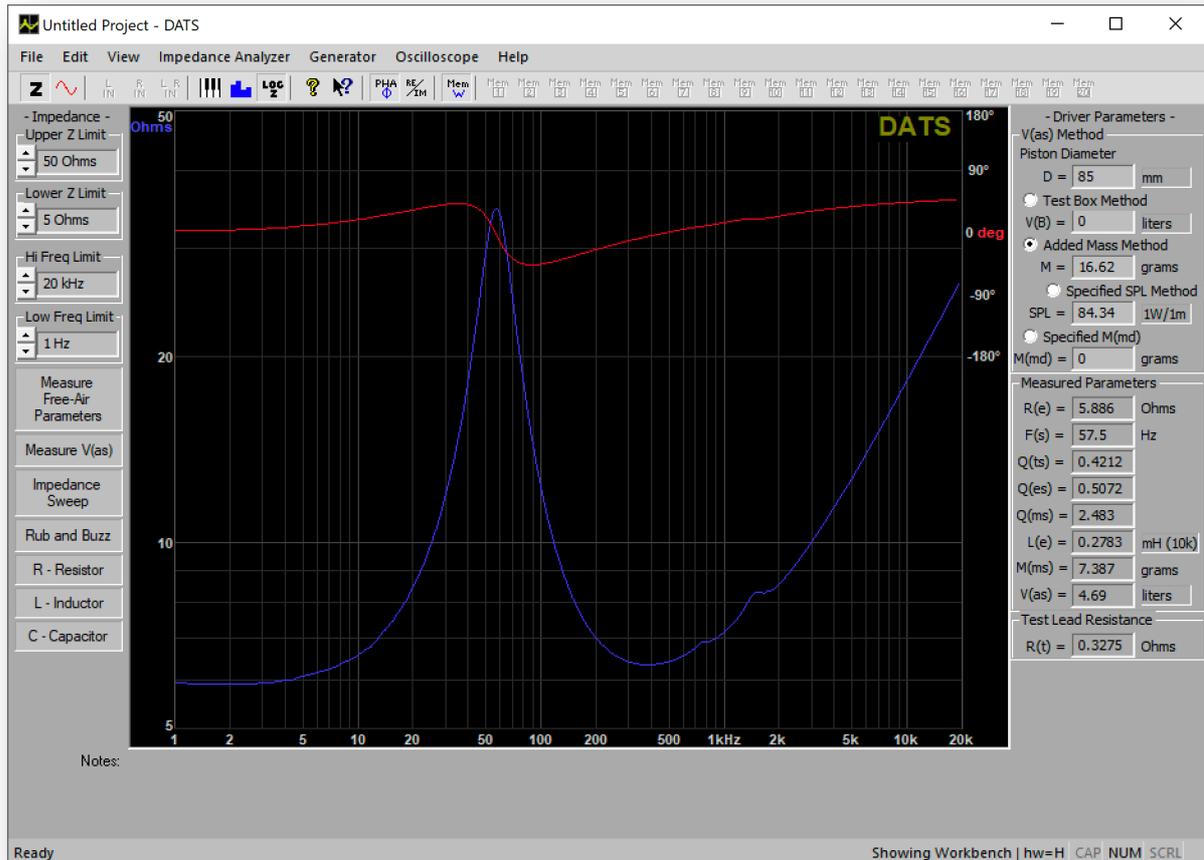
Als nächstes können wir das Chassis ohne Zusatzgewicht mit DATS verbinden. Links im Hauptfenster befindet sich der Button „Measure Free-Air Parameters“, mit dem die Messung gestartet wird. Nach einem kurzen Sweep erhalten wir schon den ersten Teil der TSP. Diese werden in den Feldern auf der rechten Seite angezeigt:





Der Rest der Parameter wird ermittelt, indem wir auf den Button „Measure V(as)“ auf der linken Seite des Programmfensters klicken.

D. A. U.



Damit ist die Messung der Parameter in DATS abgeschlossen und wir können diese Daten in ein Simulationsprogramm unserer Wahl eingeben.

### Zusammenfassung:

Egal mit welchem Messsetup oder Software gemessen wird: die Ermittlung der TSP erfolgt im Prinzip immer über dieselben Schritte. Wenn die Programme wie beschrieben bedient werden können wir auch sicher sein, dass die Parameter korrekt sind. Vorausgesetzt, unsere Einstellungen passen. Die ausgegebenen Parameter sind in jedem Fall konsistent.

Ein entsprechendes Messsetup muss auch nicht teuer sein: ein einfaches Impedanzmesskabel ist für den Gegenwert einer Packung Eier herzustellen. Die einfache Messbox ist ein wenig komfortabler und kostet ca. 10 €. Ganz einfach zu bedienen ist DATS. Diese All-In-One Lösung bestehend aus einer Messbox und dazu passender Software ist vom Komfort her kaum zu schlagen. Dazu kann man sich wirklich zu 100% sicher sein, dass die Ergebnisse korrekt sind.

Eine Empfehlung? Wer nur einmalig daran interessiert ist die TSP eines Chassis zu ermitteln, fährt mit dem Impedanzmesskabel am besten. Es ist schnell hergestellt und kostet wenig. REW und LIMP sind einigermaßen einfach zu bedienen und man kommt schnell zu einem Ergebnis. Das aber auch nur, wenn Hardware-seitig alles in Ordnung ist. Dasselbe gilt für die Messbox: sie ist günstig, einfach aufzubauen und kann sowohl mit LIMP als auch REW verwendet werden. Die Messbox wäre dann empfehlenswert, wenn hin und wieder mal eine

Impedanzmessung ansteht. Nicht gezeigt haben wir, dass man mit den genannten Programmen auch Kondensatoren, Spulen und Widerstände messen kann. Entsprechend können wir diese auch als RLC-Meter nutzen und somit noch wesentlich mehr machen, als „nur“ TSP zu messen. Mit einer selbst gebauten Lösung ist die Fehlersuche allerdings unter Umständen nicht ganz einfach und zeitaufwändig.

DATS hat ganz klar die Nase vorn, wenn es um die Einrichtung und Bedienbarkeit geht. Die Fehlersuche ist hier wesentlich einfacher, denn entweder funktioniert das Gerät oder nicht. Aufbaufehler können ausgeschlossen werden. Auch DATS kann als RLC-Meter verwendet werden und damit steht es REW und LIMP in nichts nach. Zwar kostet DATS um die 160€, jedoch erkaufte man sich damit ein wirklich rundes Gesamtpaket. Die Investition lohnt sich, sobald man nicht nur ein einziges Mal messen möchte.



## Gehäusesimulationen

Die Messung der TS-Parameter ist der wichtigste Schritt in Richtung Gehäusesimulation. Erst mit diesen ist eine Simulation überhaupt möglich. In den nächsten Abschnitten wollen wir auf 3 Gehäusearten und deren Simulation eingehen und zeigen diese anhand von 3 Simulationsprogrammen.

Für die Simulation verwenden wir:

- WinISD (Freeware) für CB und BR
- BassCADe (Freeware) für CB und BR
- AJHorn 7 (Demo) für CB und GHP

WinISD und BassCADe können kein GHP simulieren, weshalb wir hier AJHorn 7 zeigen. Die Demo-Version von AJHorn ist im Funktionsumfang sehr eingeschränkt und nur recht umständlich auszutricksen. Entsprechend simulieren wir im Folgenden damit lediglich ein geschlossenes Gehäuse und GHP. Wer tiefer in die Simulation mit AJHorn einsteigen möchte, wird im WWW fündig.

## Gehäusearten

Ungeachtet der Tatsache, dass es recht viele verschiedene Arten und Funktionsprinzipien von Lautsprechergehäusen gibt, beschränken wir uns in dieser Abhandlung nur auf die beiden am häufigsten zur Anwendung kommenden Arten. Das sind erstens Bassreflex Gehäuse und zweitens geschlossene Gehäuse.

### Bassreflex

Anders als beim geschlossenen Gehäuse wird bei Bassreflex Lautsprechern der vom Chassis nach hinten abgestrahlte Schall genutzt, um den Wirkungsgrad des Lautsprechers im Bereich seiner Resonanzfrequenz zu erhöhen. Dies erfolgt über ein nach außen offenes, auf eine bestimmte Frequenz abgestimmtes Rohr, einen sogenannten Resonator. Im Bereich dieser Abstimmfrequenz erfolgt die Schallabstrahlung zum größten Teil durch den Resonator. Die Membran des Chassis hingegen strahlt bei dieser Frequenz nur wenig Schall ab. Daraus resultiert, dass der Lautsprecher bei theoretisch identischem Hub einen höheren Pegel abstrahlt.

#### Dimensionierung der Portfläche

Als Faustregel gilt hier in etwa, den Membrandurchmesser in Zoll als Rohrdurchmesser in Zentimeter zu nehmen. Da Bassreflexrohre nicht in jeder beliebigen Größe angeboten werden, reicht es nach obiger Faustformel vollkommen aus, den nächstgelegenen Wert zu wählen. So passt beispielsweise zu einem 8 Zoll Chassis ein 7 cm Port.

### Geschlossene Gehäuse

Beim geschlossenen Gehäuse bleibt der vom Chassis rückseitig abgestrahlte Schall ungenutzt. Da das rückwärtige Volumen wie eine Feder auf das auslenkende Chassis wirkt, erhöhen diese

Kräfte die Resonanzfrequenz deutlich. Unterhalb dieser Resonanzfrequenz findet keine nennenswerte Schallabstrahlung mehr statt.

Als „ideal“ wird bei einer geschlossenen Box eine  $Q_{tc}$  von 0,707 angesehen, weil es den besten Kompromiss zwischen Präzision und Bassausbeute darstellt, jedoch oft auch überbewertet wird. In Hinsicht auf die Präzision läge das theoretische Ideal bei einer  $Q_{tc}$  von 0,5. Dies führt dazu, dass der Schalldruckpegel im Bass nach unten etwas früher, dafür aber flacher fällt und das benötigte Volumen steigt. Umgekehrt verhält es sich bei einer höheren Einbaugüte.

### **Geschlossen mit Hochpass (GHP)**

Ein GHP Gehäuse ist im Grunde genommen nichts anderes als ein zu kleines geschlossenes Gehäuse. Ein „ideales“  $Q_{tc}$  kann nicht genannt werden, da die optimale Abstimmung durch den kompletten TSP Satz beeinflusst wird. Werte für  $Q_{tc}$  von etwa 0,9 – 1,1 können als Ausgangsbasis für Simulationen genutzt und dann optimiert werden. Um den durch das zu kleine Gehäuse entstehenden, zu lauten Oberbass abzuschwächen, wird dem Tieftöner ein Hochpasskondensator (Hochpass 1. Ordnung) vorgeschaltet. Positiver Nebeneffekt ist eine Erweiterung des Pegels zu tiefen Frequenzen hin. Unterhalb seiner Grenzfrequenz fällt der Schalldruck jedoch steil ab und ähnelt dem einer Bassreflex Abstimmung.

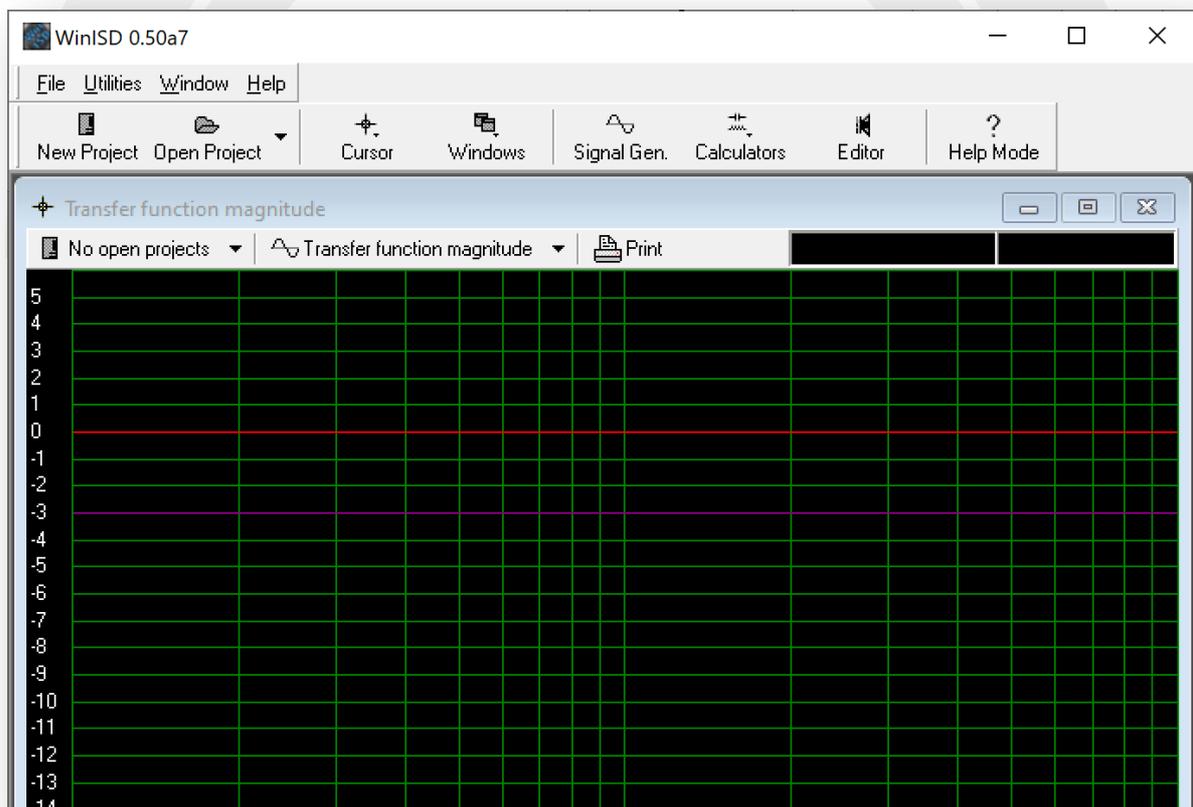
**D. A. U.**

## WinISD

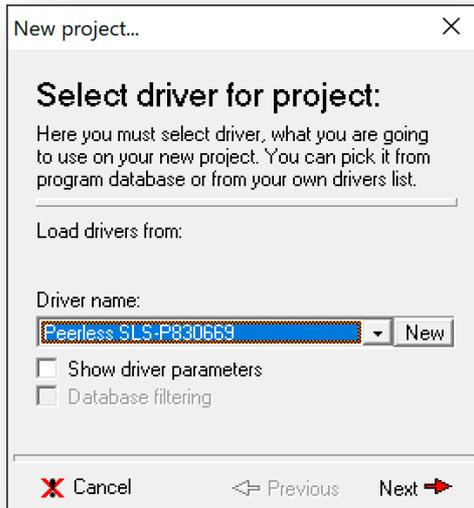
WinISD von linearteam.org ist ein Freeware-Tool zur Gehäusesimulation. Es ist recht einfach aufgebaut und bringt neben der Simulation von geschlossenen und ventilierten (BR und BP) Gehäusen weitere sehr nützliche Funktionen mit, wie zum Beispiel die Simulation von Passivmembranen und der Möglichkeit, aktive Filter z.B.: für Subwoofersimulationen zu setzen. In diesem Abschnitt wollen wir uns jedoch auf die Eingabe der TSP, der Simulation einer Bassreflexbox sowie einer geschlossenen Box beschränken. Bei der hier gezeigten Version handelt es sich um die Alpha-Version aus dem Jahr 2004, da diese ein wenig übersichtlicher gestaltet ist als die ganz aktuelle Version. Im Funktionsumfang unterscheiden sich die beiden nicht. Hier ist es der persönliche Geschmack, der darüber entscheidet, welche Version einem mehr zusagt.

### Eingabe der TSP

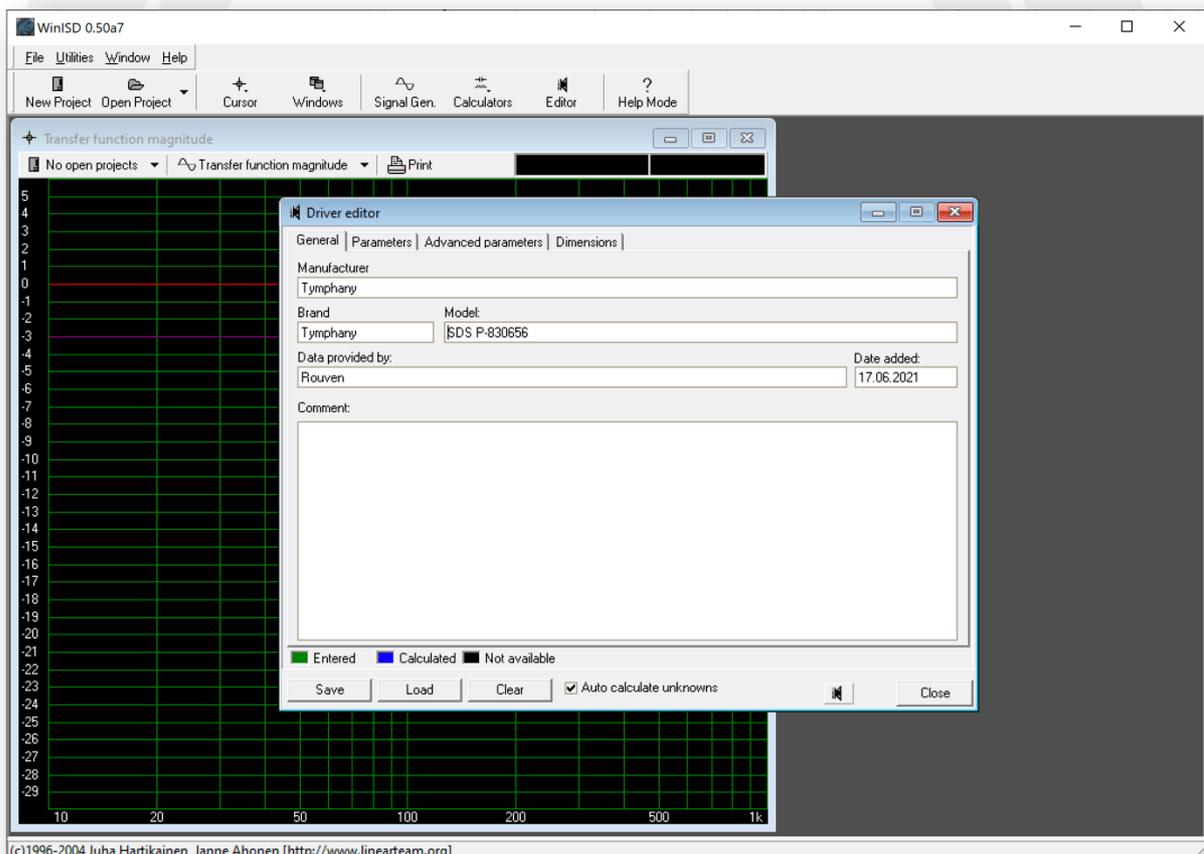
Wir beginnen mit einem Klick auf den Button „New Projekt“ in der Menüleiste.



Es öffnet sich ein Fenster, in dem wir im Dropdown schon einen ganzen Haufen an mitgelieferten Chassis finden. Hier finden wir später auch die Chassis wieder, die wir selbst eingegeben haben.

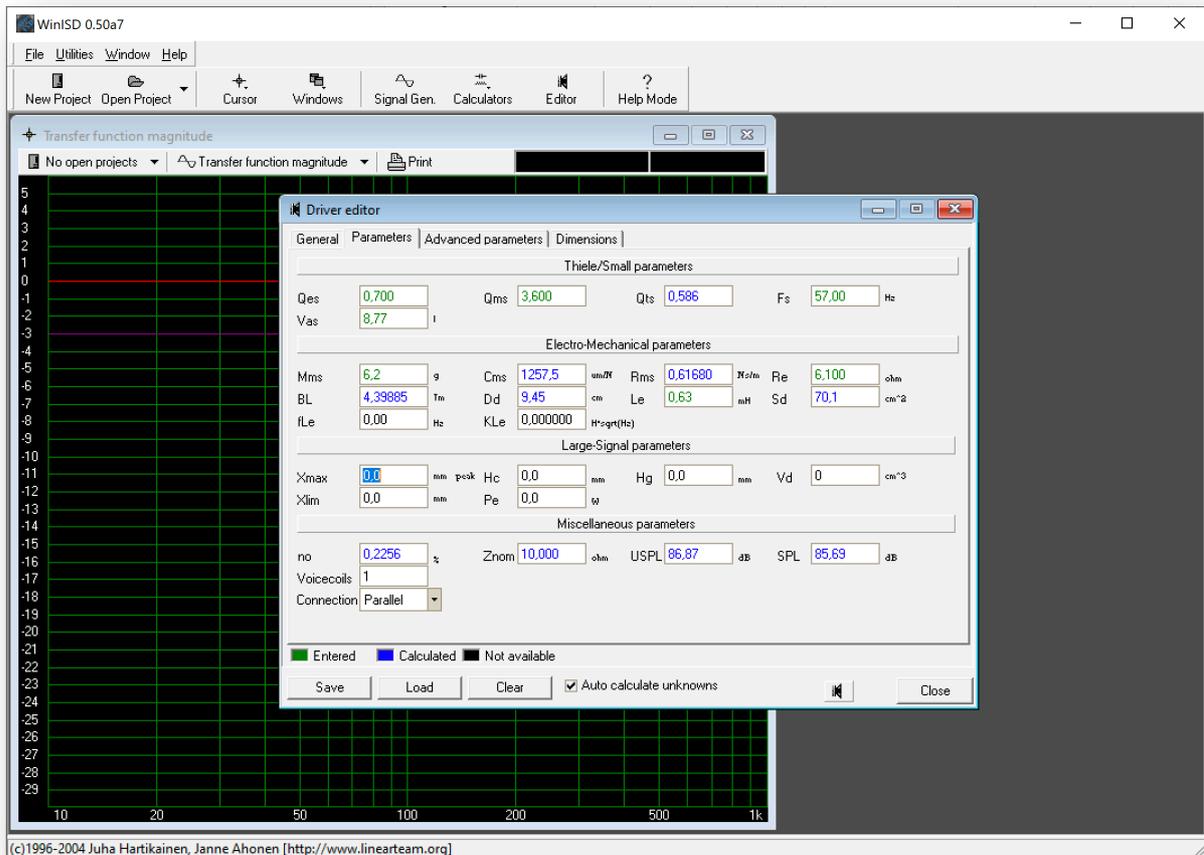


Um ein neues Chassis anzulegen, klicken wir auf den Button „New“. Als nächstes öffnet sich ein Eingabefenster, in dem wir alle Daten zu unserem zu simulierenden Chassis eingeben können.



Im Reiter „General“ können wir das Chassis beschreiben. WinISD möchte den Hersteller, die Marke und das Modell wissen. Mit diesen Daten können wir unser Chassis später in der Auswahlliste wiederfinden.

Nach der Eingabe dieser Daten gehen wir in den Reiter „Parameters“:



Hier kommen nun unsere gemessenen TSP zum Einsatz. Wichtig zu wissen: WinISD berechnet wie TSPCheck einige Parameter bei der Eingabe anderer Parameter von selbst. Diese automatisch berechneten Felder sollten nicht mit den eigenen Werten überschrieben werden. Wenn die berechneten Werte überschrieben werden, meckert WinISD jedes Mal bei der Erstellung einer Simulation, dass die Daten nicht konsistent sind. Zwar kann dann trotzdem simuliert werden, jedoch ist diese Fehlermeldung recht nervig. Es gibt keinen Grund, die Daten zu überschreiben. Wenn die berechneten Werte leicht von den gemessenen abweichen, ist das vollkommen in Ordnung. Dabei handelt es sich maximal um Rundungsfehler. Sollten die errechneten Werte komplett daneben liegen, sind die Parameter nicht konsistent und es liegt ein Fehler vor. WinISD kann mit dieser Funktion auch prima anstelle von TSPCheck verwendet werden. Zu den automatisch berechneten Werten gehören

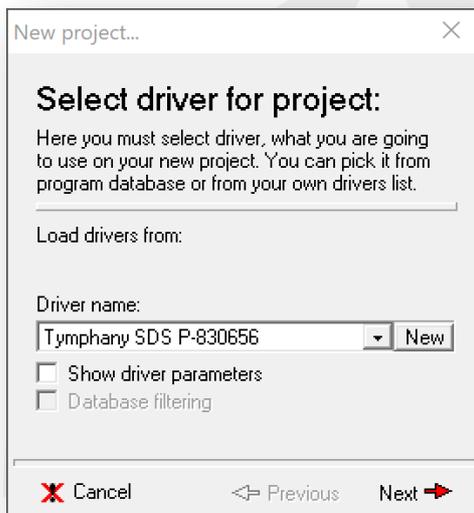
- $Q_{ts}$
- $C_{ms}$
- $R_{ms}$
- BL
- $D_d$
- $S_d$

Zu erkennen ist dies an der blauen Einfärbung der Werte. Zu beachten ist auch, dass WinISD nicht alle Parameter benötigt, für die Eingabefelder zur Verfügung gestellt werden, um eine Simulation anzustellen. Es reichen die Werte aus, die uns REW, LIMP oder DATS ausgeben.

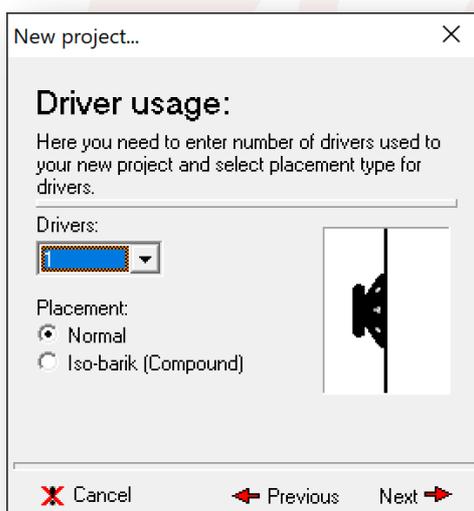
Um das Chassis mit seinen Parametern zu speichern, klicken wir auf „Save“. Danach müssen wir nur noch einen Speicherort angeben und damit haben wir das Chassis zur Verwendung in WinISD angelegt. Das Fenster wird automatisch geschlossen und wir befinden uns wieder im Hauptfenster.

### Geschlossene Box

Über den Button „Create New Projekt“ in der Menüleiste gelangen wir wieder in die Chassisauswahl. Dort wählen wir unser angelegtes Chassis aus und klicken auf „Next“

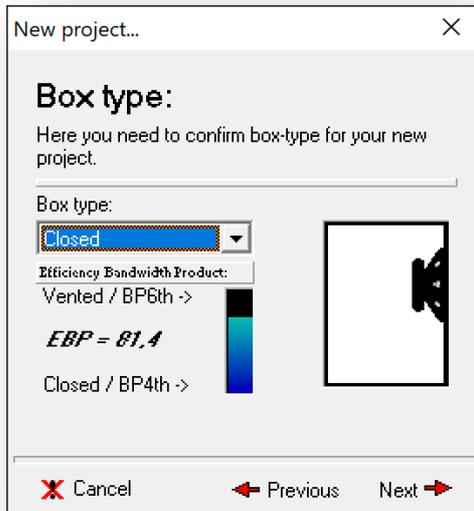


Als nächstes möchte WinISD wissen, wie viele Treiber wir in einer Box simulieren wollen und wie diese angeordnet sind.

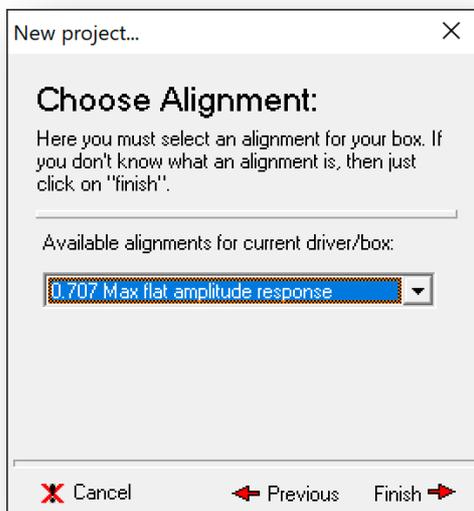


Hier wählen wir „1“ und „Normal“ aus. Weiter geht's mit einem Klick auf „Next“.

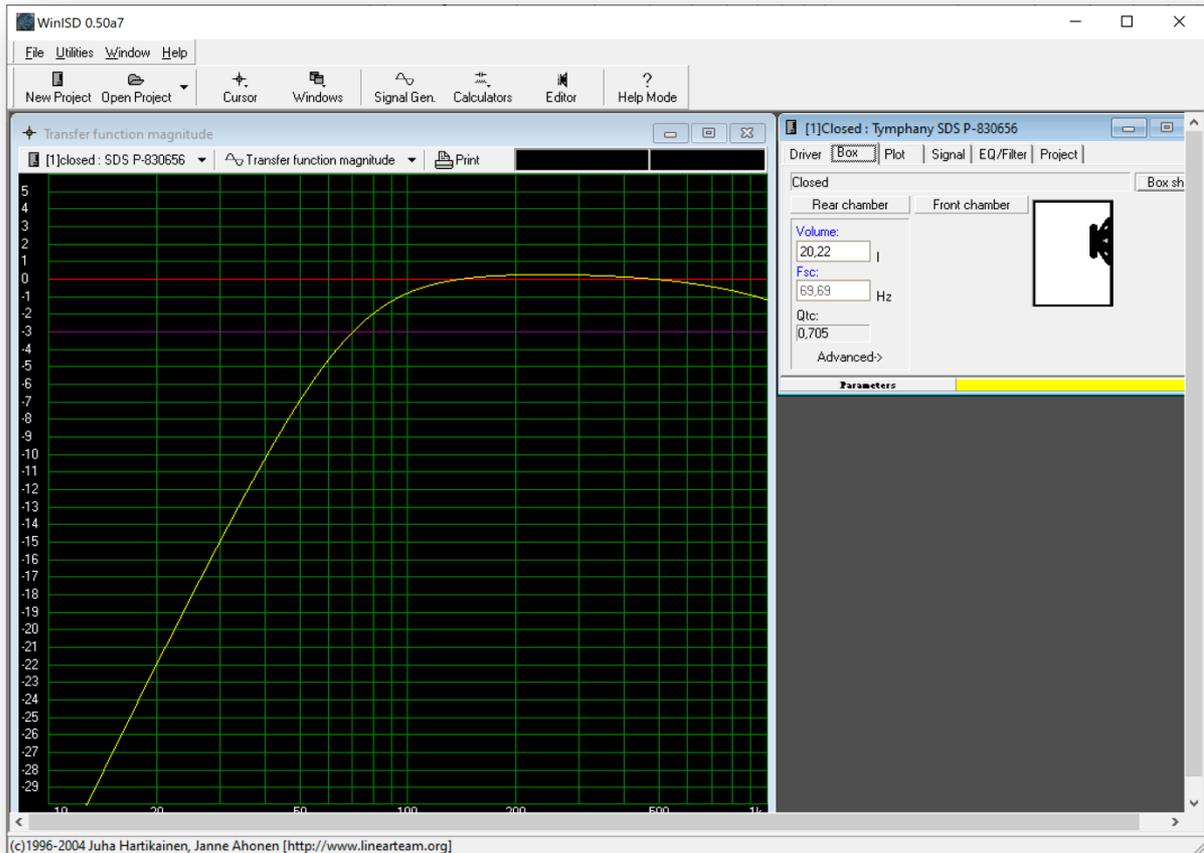
Im nächsten Fenster macht uns WinISD aufgrund des TSP-Satzes einen Vorschlag, was für einer Gehäuseart wir simulieren sollten.



Dies ist nur ein Vorschlag – wir können hier trotzdem auch jede andere Gehäuseart auswählen. Hier wählen wir „Closed“ aus, um eine geschlossene Box zu simulieren und klicken wieder auf „Next“. Dann möchte das Programm noch wissen, welche Einbaugüte  $Q_{tc}$  wir bevorzugen. Was wir hier auswählen, ist nicht unbedingt wichtig, denn mit der Abstimmung spielen wir während der Simulation.



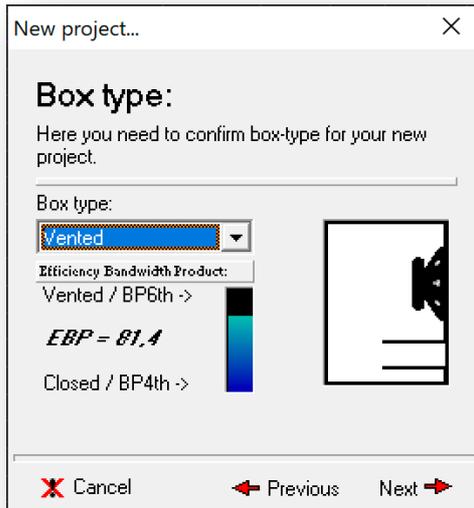
Wir lassen den standardmäßig ausgewählten Wert von 0,707 stehen und klicken auf „Finish“.



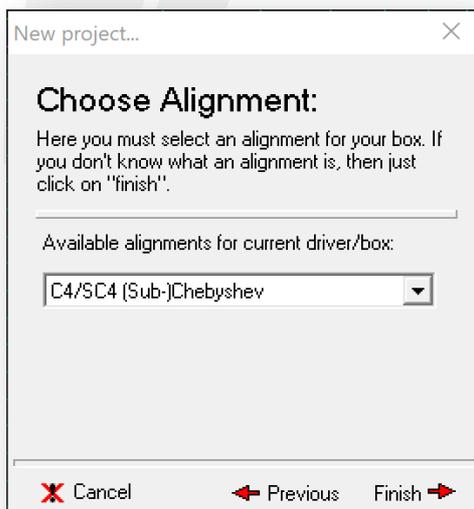
Das war es auch schon! WinISD gibt einen Graphen aus, der uns das Verhalten im Bass zeigt. Unter dem Punkt „Box“ finden wir das für diese Abstimmung benötigte Volumen und die Einbaugüte  $Q_{tc}$ . Wenn wir jetzt mit dem Volumen spielen, sehen wir gleich, wie sich das Verhalten im Bass und die Einbaugüte verändern. Praktisch: WinISD zeigt anhand der roten und lila Linien im Graphen an, wo der -3dB Punkt unseres simulierten Lautsprechers liegt. Mehr brauchen wir nicht.

### Bassreflexbox

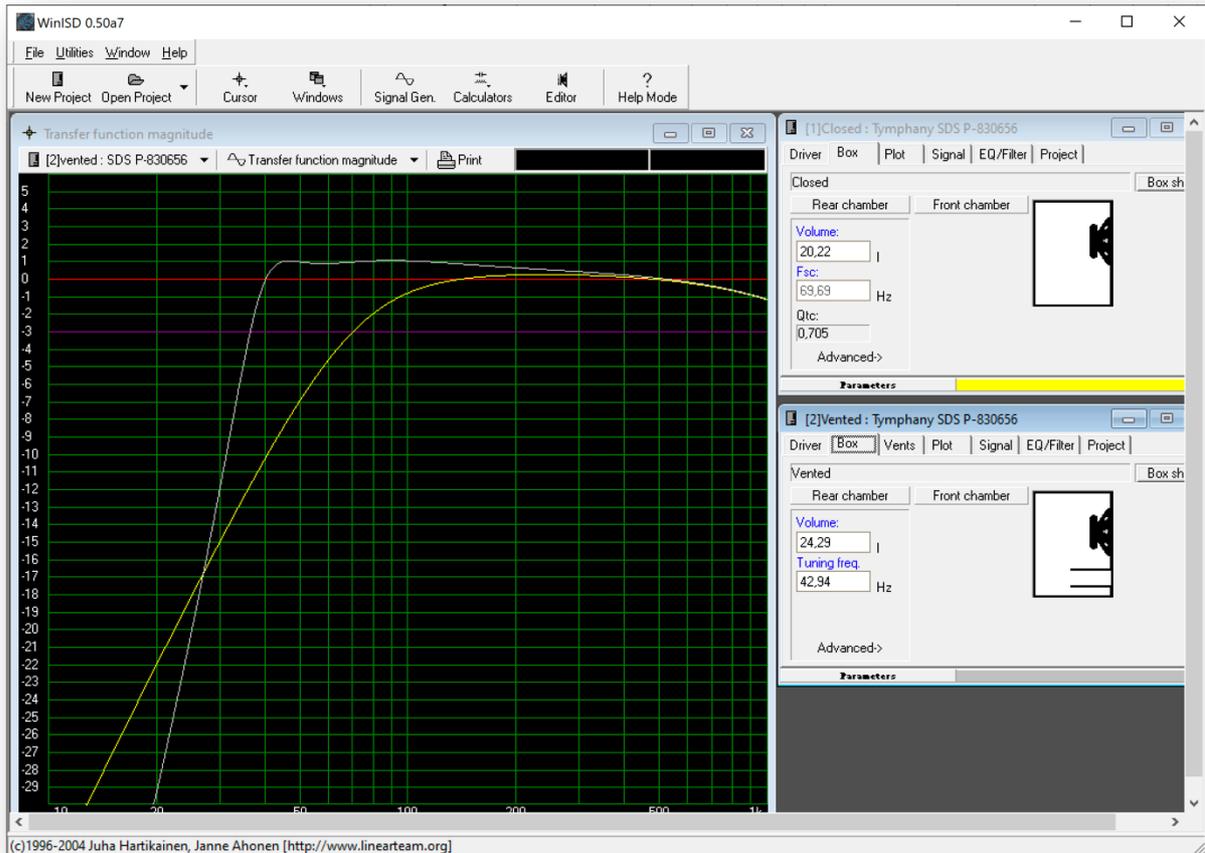
Bei einer Bassreflexbox gehen wir zunächst genauso vor, wie beim geschlossenen Gehäuse, nur dass wir im Fenster nach der Eingabe der Anzahl und der Anordnung der Chassis „Vented“ auswählen.



Nach einem Klick auf „Next“ möchte WinISD nun von uns wissen, welche Abstimmung wir bevorzugen. Genau wie bei der geschlossenen Box ist es nicht wirklich wichtig, was wir hier auswählen, denn die Abstimmung verändern wir während der Simulation.

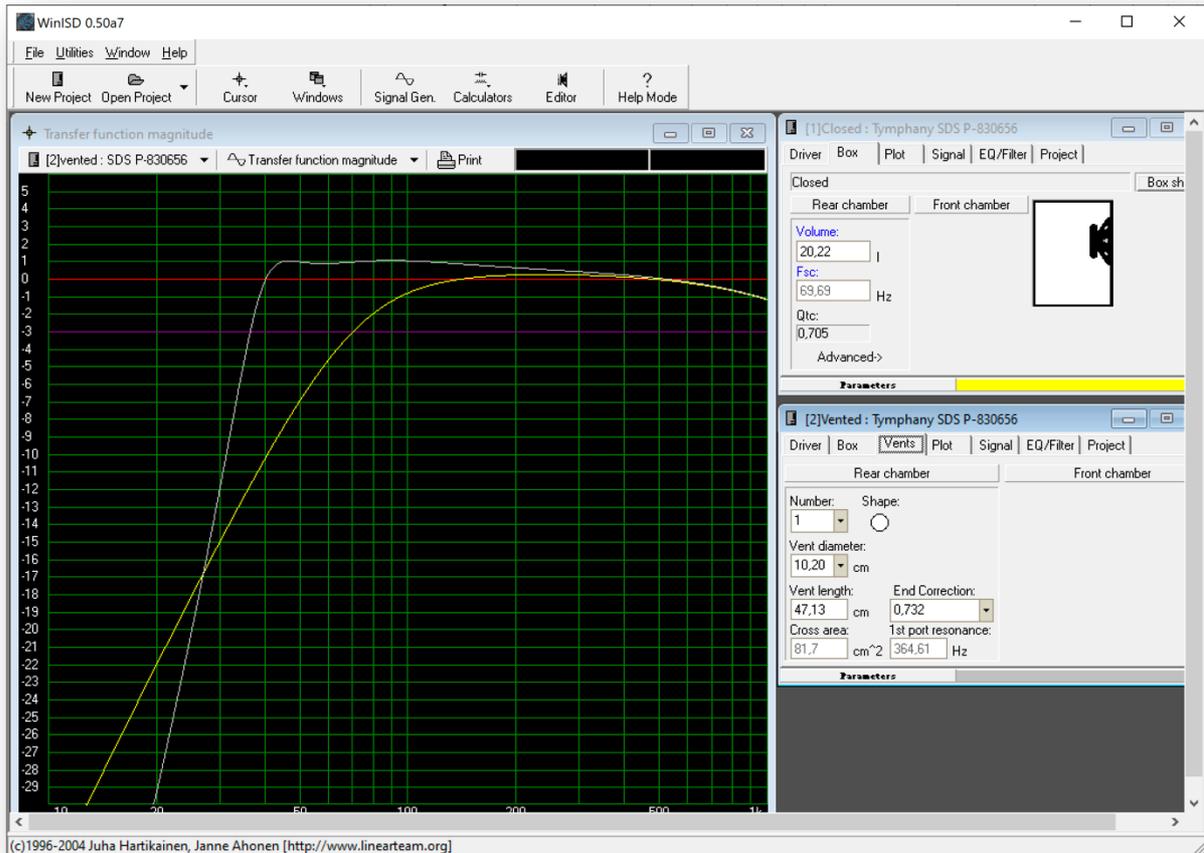


Hier bleibt also auch wieder der standardmäßig vorausgewählte Wert stehen und wir klicken auf „Finish“.



Wie schon zuvor erhalten wir einen Graphen und uns wird das Volumen sowie die Abstimmfrequenz angezeigt. Mit diesen Werten können wir spielen, bis uns die Abstimmung gefällt.

Bei einer Bassreflexbox interessiert uns noch ein weiterer Reiter: Vents



Hier können wir eingeben, wie viele Ports wir verbauen möchten und welchen Durchmesser diese haben sollen. Ein Klick auf den Kreis unter „Shape“ erlaubt es uns, die Form des Ports zu verändern. In Abhängigkeit der unter „Box“ eingegebenen Abstimmfrequenz erhalten wir dann auch die Länge des Ports in cm. Ändern wir hier die Länge, ändert sich automatisch auch die Abstimmfrequenz. Das Feld „Cross Area“ zeigt uns außerdem an, wie groß die Portfläche bei dem eingegebenen Durchmesser bzw. Portmaßen (bei eckigem Port) ist.

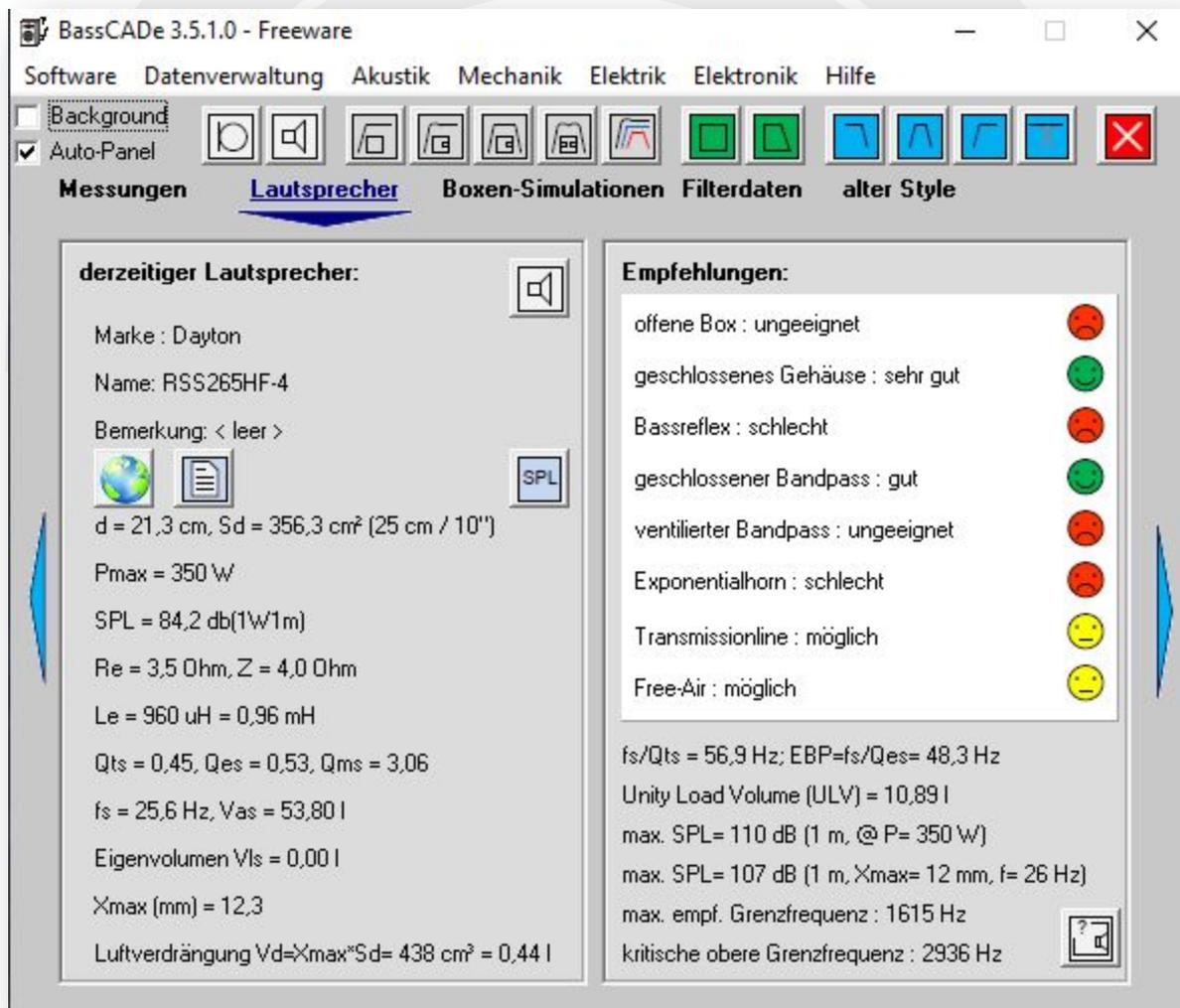
Die Daten im Reiter „Vents“ geben auch einen Hinweis darauf, ob es denn sinnvoll ist, das simulierte Chassis in ein Bassreflexgehäuse zu packen. Zwar mag eine Bassreflexabstimmung von den TSP her passen, wenn aber der Port mit ausreichend großer Portfläche so lang würde, dass er nicht mehr ins Gehäuse passt, bringt uns das herzlich wenig.

## BassCADe

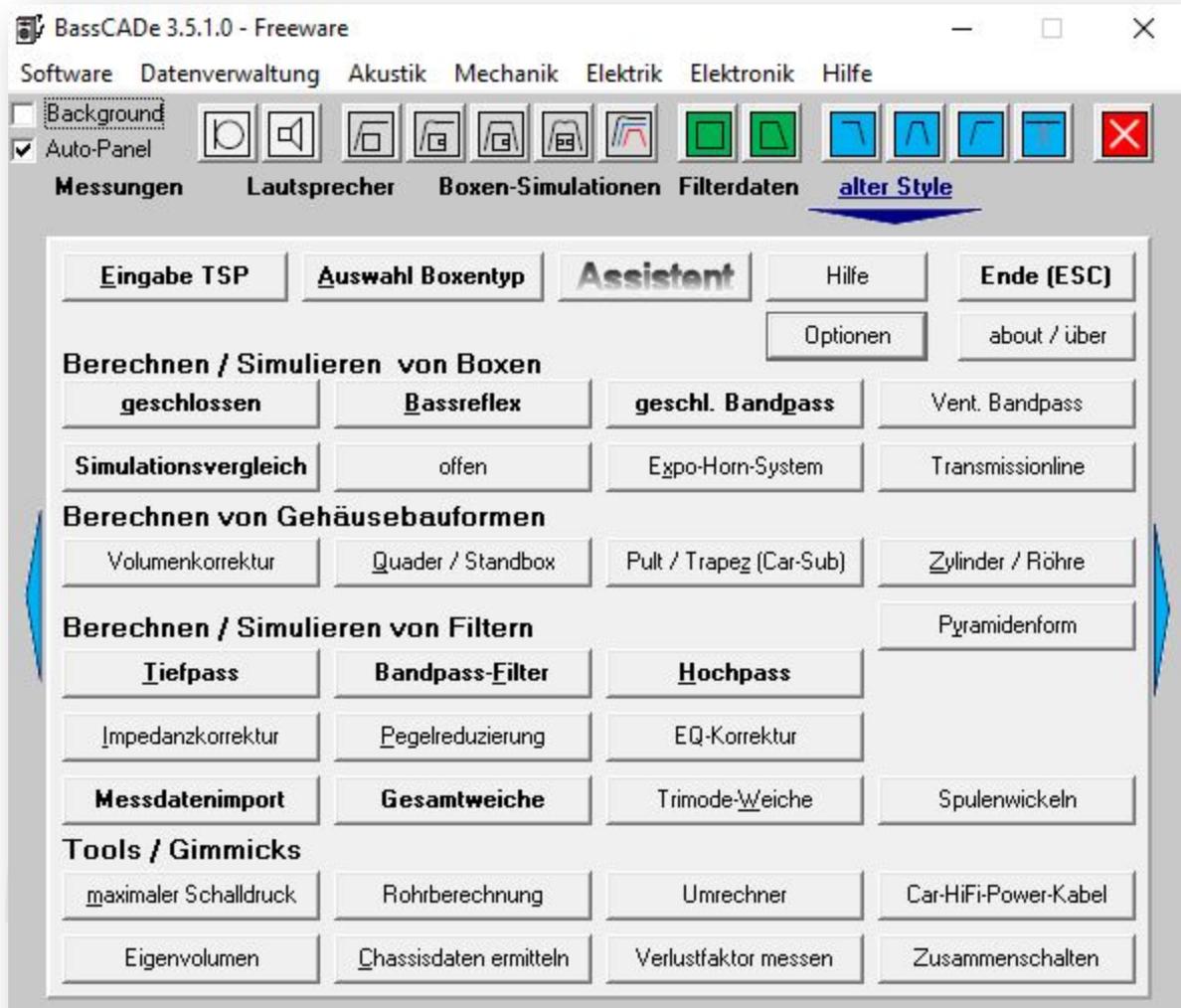
BassCADe ist ein von K. Föllner geschriebenes Simulationsprogramm, welches als Freeware angeboten wird. Neben den typischen Simulationsmöglichkeiten für verschiedene Gehäusearten bietet BassCADe auch noch einige nützliche Zusatzfunktionen wie Schalldruckrechner oder Rechner für kubische oder trapezförmige Gehäuse inkl. Zuschnittsliste. Die Bedienung ist sehr intuitiv und sollte auch Anfänger nicht vor allzu große Probleme stellen.

### Eingabe der TSP

In der aktuellen Version werden die grundlegenden Funktionen als Symbol auf den Buttons dargestellt:



Wer damit noch nicht allzu viel anfangen kann, der klickt einfach auf „alter Style“ und erhält ein Fenster mit beschrifteten Buttons:



Um die TSP eingeben zu können, klicken wir zuerst auf das Lautsprechersymbol bzw. im alten Style auf „Eingabe TSP“. Daraufhin öffnet sich ein weiteres Fenster, welches nach den TSPs und der Beschreibung des Chassis verlangt:

**Eingabe der Chassis-Daten** [X]

Hersteller:  Chassisname:

Gesamtgüte Qts:  ? Bemerkung:

elektrische Güte Qes:  ? ?  nutze Qes/Qms: +0,39%

mech. Güte Qms:  ? ? alte Werte

Äquivalentvolumen Vas:  l (dm³) = 0,054m³ = 1,900cuft

Resonanzfrequenz fs:  Hz Chassistyp ist 25 cm / 10"

DC-Widerstand Re:  Ohm (Z = 4 Ohm)

Membrandurchmesser d:  cm = 213 mm = 8,4 In

Eigenvolumen VLS:  l (=dm³) = 0 CuIn = 0,00 CuFt

Chassis-Induktivität Le:  uH = 0,960 mH

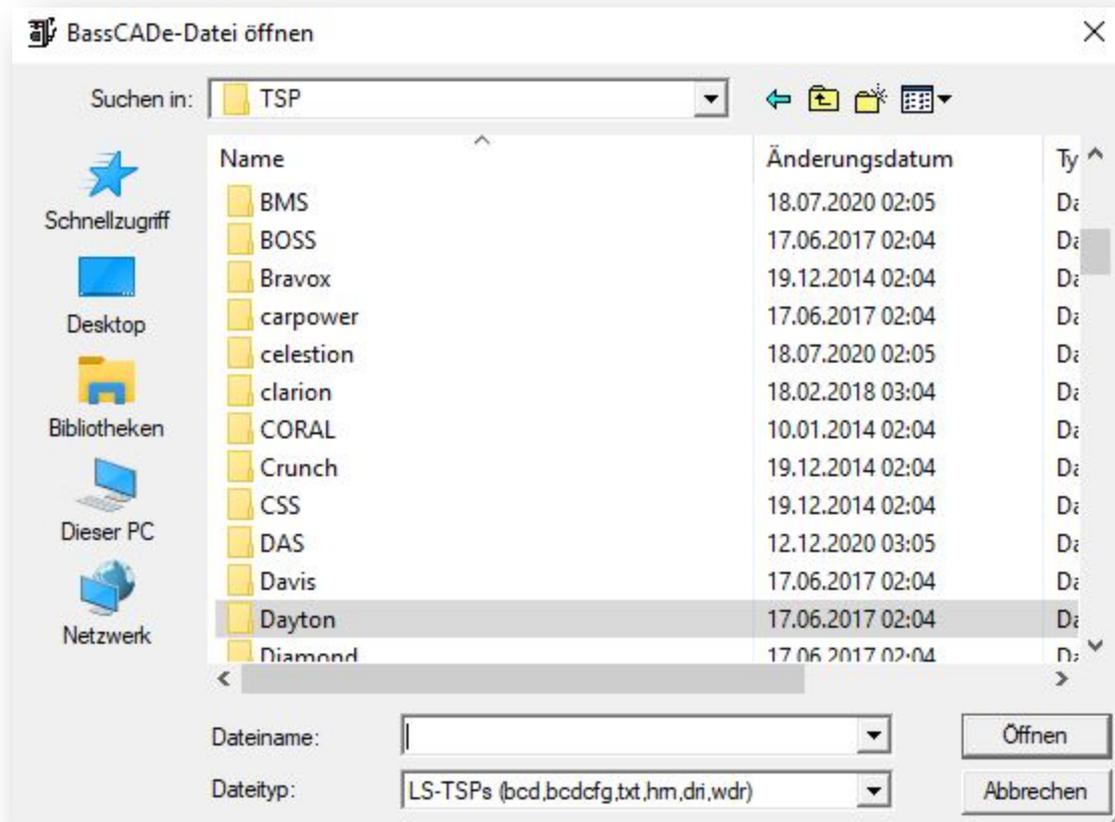
max. RMS-Power:  Watt

> Xmax (mm):  Vd = 438 cm³ Vergleich 5%

Vorgaben^

mechanische Güte Qms = 2,98	Bxl = 11,59 N/A(Tm) = 116 kGm
Kenschalldruck SPL = 84,2 dB/1m1W	Wirkungsgrad = 0,167 %
Sd = 356,3 cm² = 0,0356 m² = 55,2 Sqln	Membranmasse Mms = 128,779 g
Bandbreiteprodukt EBP = 48,3 Hz	mech. Nachgiebigkeit Cms = 0,300 mm/N
elektr. Kapazität Cmes = 941,4 µF	mech. Verluste Rms = 6,769 kg/s

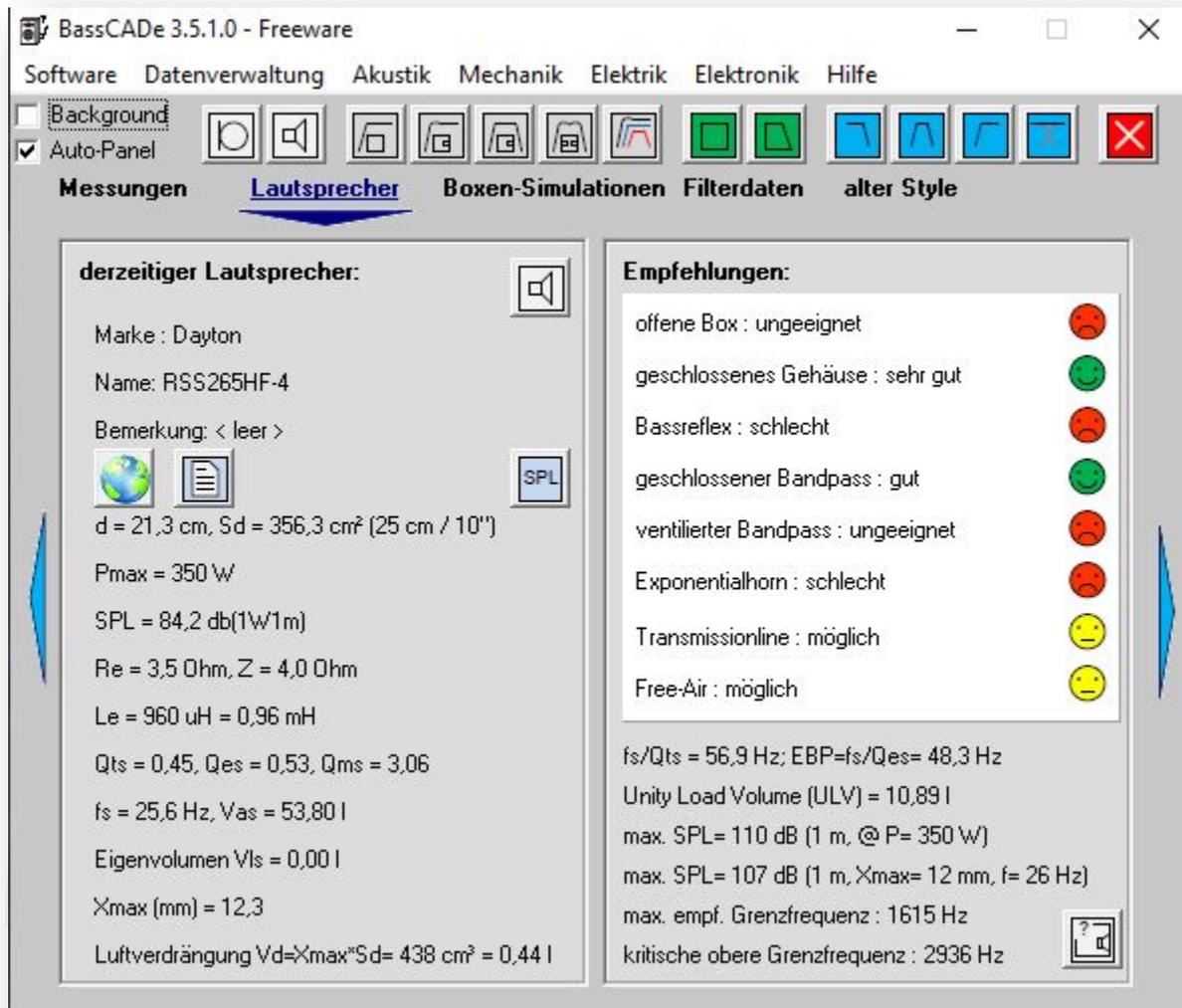
Auch nach einem Neustart ist automatisch das letzte verwendete Chassis bereits geladen. Um ein anderes Chassis zu wählen, kann man nun die einzelnen Felder überschreiben und anschließend speichern oder man öffnet den Button mit der grünen Karteikarte, wohinter sich eine Datenbank mit zurzeit über 5000 Chassis verbirgt:



Der Großteil der bereits hinterlegten Chassis stammt aus dem Car-HiFi-Bereich, da dieses Programm ursprünglich dafür geschrieben wurde. Inzwischen sind aber auch jede Menge PA- und HiFi-Chassis enthalten.

Gibt man die TSP selbst ein, müssen nicht alle Felder gefüllt werden. Es genügt zum Beispiel die Gesamtgüte  $Q_{ts}$  und BassCADe errechnet daraus  $Q_{es}$  und  $Q_{ms}$ , wenn man auf das Fragezeichen hinter dem Eingabefeld klickt. Besser ist es aber natürlich, gemessene Daten für die Simulation zu verwenden.

Unterhalb der Eingabefelder werden automatisch weitere Parameter berechnet, welche für die Simulation aber nur nebensächlich sind. Unter der Lupe mit dem kleinen Chassissymbol kann man zudem die komplette Datenbank nach einzelnen Parametern durchsuchen, um so für bestimmte Projekte passende Chassis zu finden. Hat man nun alle nötigen Daten eingegeben, kann man diesen Parametersatz mit Klick auf den grünen Button mit Häkchen übernehmen und landet wieder im Startfenster.

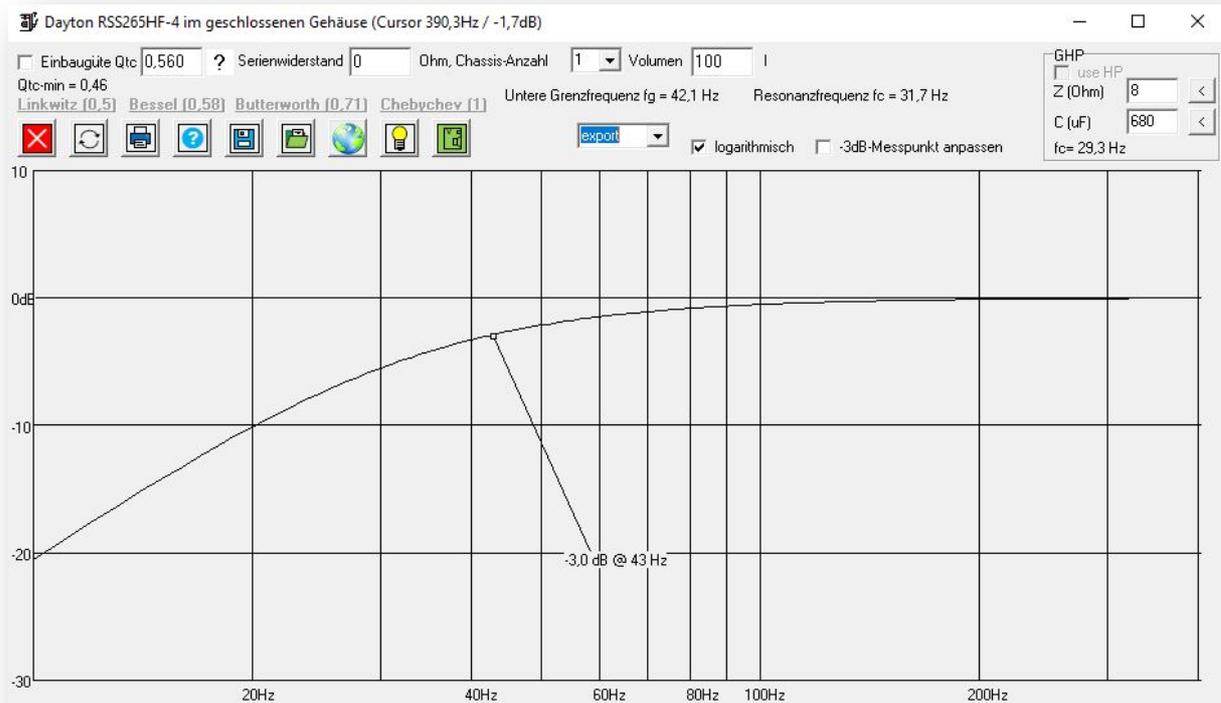


Hier hat man nun links noch einmal die Chassisdaten in der Zusammenfassung und rechts schon einmal eine Empfehlung für die Eignung in verschiedenen Gehäusearten. Unser Beispielchassis ist laut BassCADE besonders für geschlossene Gehäuse, jedoch weniger für Bassreflex geeignet.

### Geschlossene Box

Um nun eine Simulation für eine geschlossene Box zu starten, klicken wir auf das dritte Symbol von links, bei welchem ein geschlossenes Quadrat und der typische Amplitudenverlauf einer geschlossenen Box dargestellt ist. Alternativ kann man in den alten Style wechseln und einfach auf „geschlossen“ klicken.

Nun öffnet sich ein weiteres Eingabefenster:

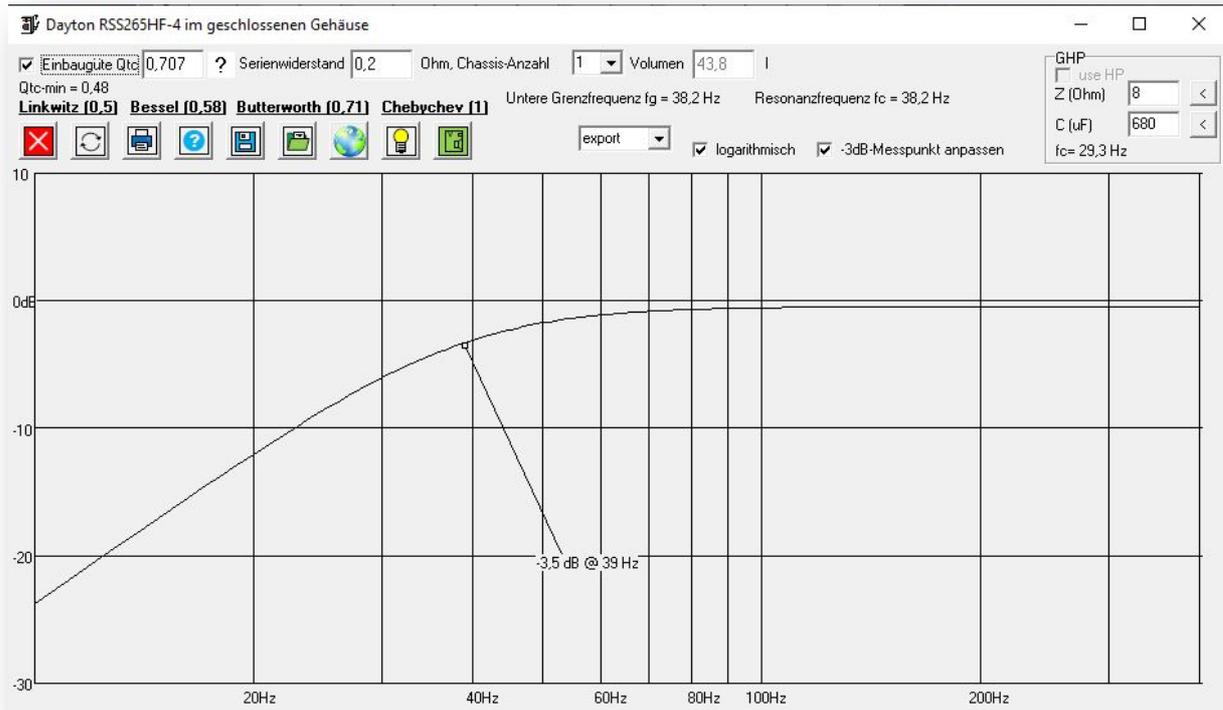


BassCADe hat auch hier noch die Eingaben der letzten Simulation hinterlegt. Am oberen Bildrand kann man nun entweder anhand der gewünschten Einbaugüte das dafür erforderliche Volumen errechnen lassen (dafür das kleine Feld vor „Einbaugüte“ aktivieren) oder man gibt selbst ein, wie viel Volumen man zur Verfügung hat und bekommt dafür vom Programm die Einbaugüte genannt.

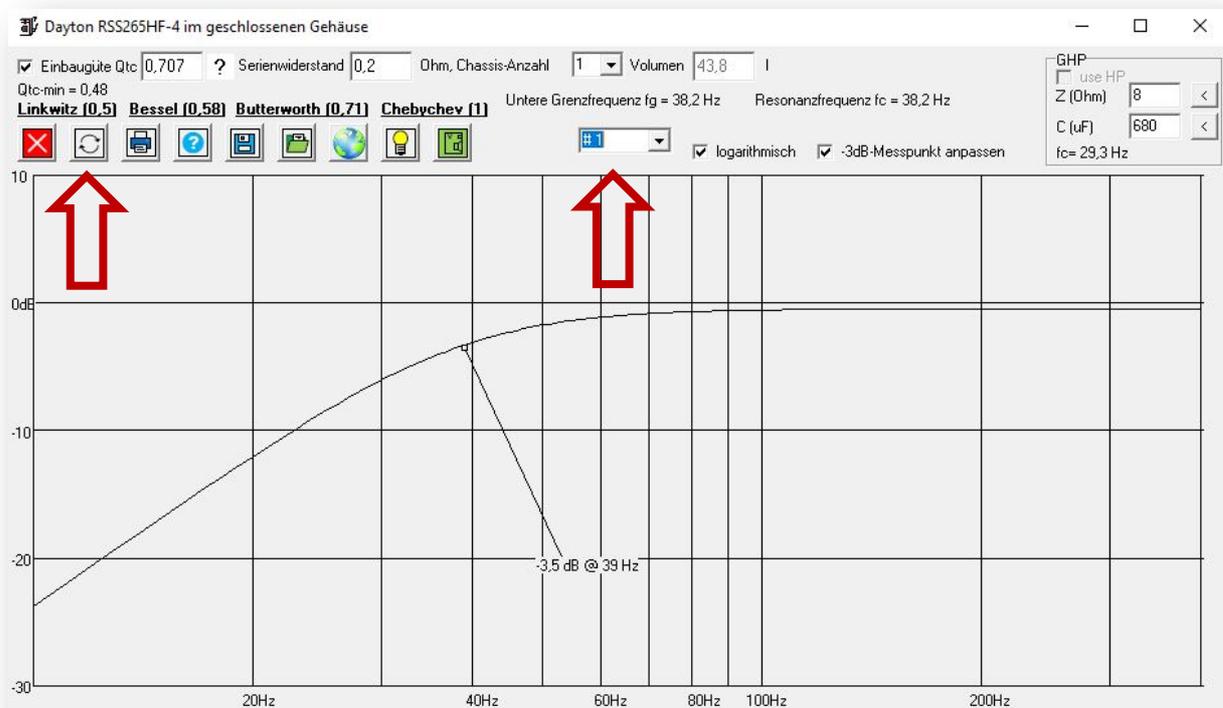
Wir lassen uns in dem Beispiel ein Gehäuse mit Einbaugüte 0,707 errechnen, was für einen maximal tiefreichenden, linearen Verlauf sorgt. Dies können wir direkt eingeben, oder alternativ mit einem Klick auf „Butterworth (0.71)“ erreichen.

Nicht vergessen sollte man bei Gehäusesimulationen den Serienwiderstand, welcher sich zwangsläufig bei Lautsprechern ergibt. Bei passiven Lautsprechern kann man hier mit 0,8-1 Ohm rechnen, je nachdem wie die Weiche ausfallen wird. Bei Aktiven (Subwoofern) genügt ein Serienwiderstand von etwa 0,2 Ohm.

Da dieser Widerstand den Wirkungsgrad etwas drückt, aktivieren wir auch noch den Haken bei „-3dB Messpunkt anpassen“. Das Programm errechnet umgehend das dafür nötige Volumen, in unserem Fall knapp 44 Liter mit einer unteren Grenzfrequenz von etwa 39Hz.



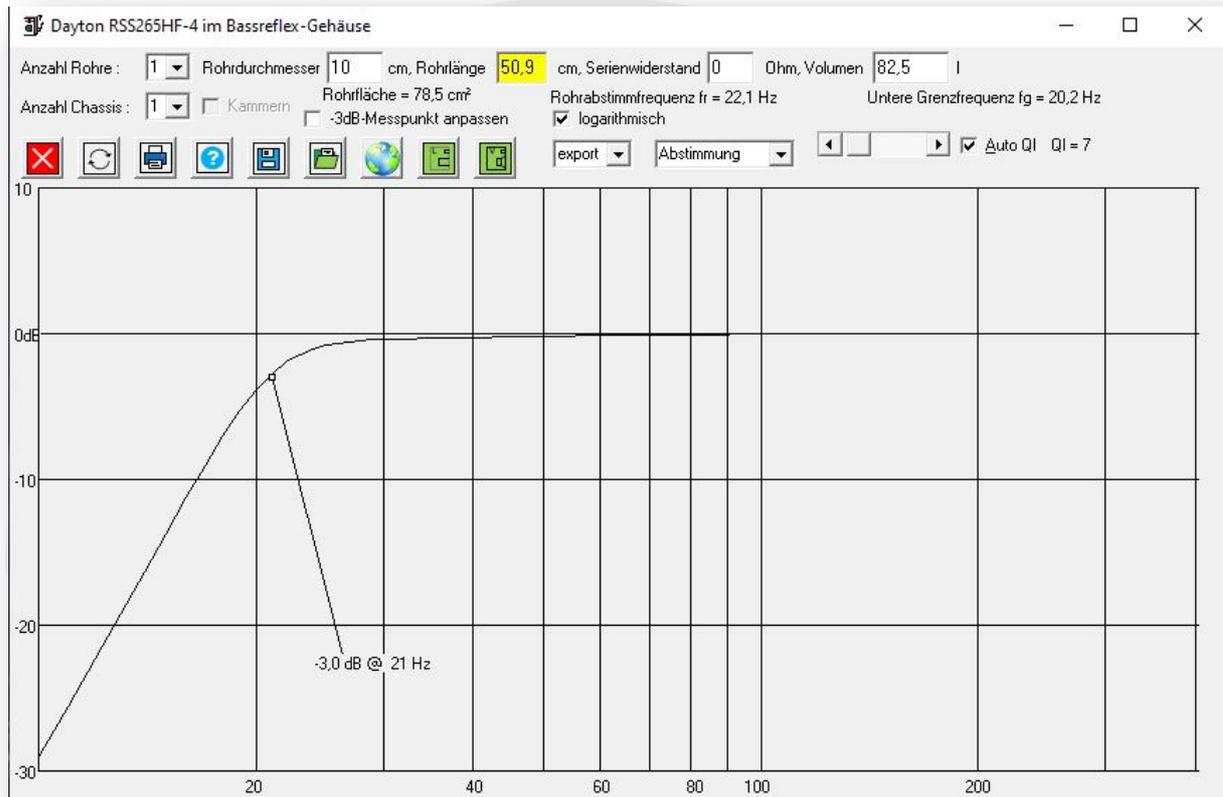
Um das Ergebnis nun mit anderen Simulationen vergleichen zu können, wählen wir im Dropdown-Menü „export“ noch einen Speicherplatz und aktualisieren die Simulation mit Klick auf die beiden Kreispile.



Die Simulation für ein geschlossenes Gehäuse ist damit abgeschlossen und wir beenden diese mit Klick auf den roten Button mit dem Kreuz.

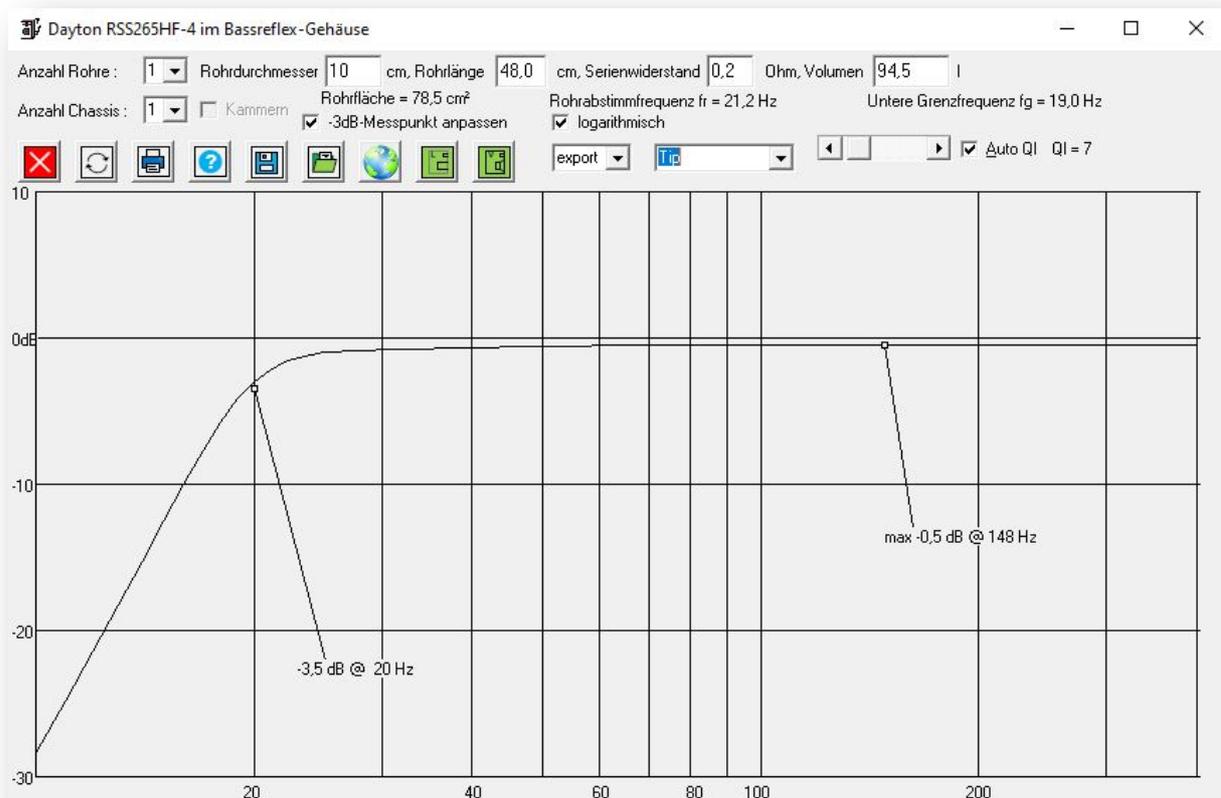
## Bassreflexbox

Um ein BR-Gehäuse zu simulieren, klicken wir entsprechend auf den vierten Butten von links im Startfenster, bei dem im kleinen Quadrat noch ein angedeuteter BR-Kanal gezeichnet ist. Im alten Style heißt dieser Button logischerweise „Bassreflex“. Danach öffnet sich wiederum ein neues Fenster:



Auch hier gibt es bereits hinterlegte Daten. Empfehlenswert ist gleich zu Anfang wieder den Serienwiderstand einzugeben und das -3dB Messpunkt anpassen Feld zu aktivieren. Außerdem sollte man sich auch gleich Gedanken über den Rohrdurchmesser machen.

Nun kann man entweder das gewünschte Gehäusevolumen eingeben, oder man öffnet das Drop-Down-Menü „Abstimmung“ und wählt eine der Möglichkeiten. „Tip“ erzielt dabei in der Regel die linearsten Ergebnisse.



Das Programm nennt, neben dem Amplitudenverlauf, auch die Rohrabstimmfrequenz (21,2 Hz), welche sich Chassisunabhängig von Gehäuse- und Rohrdimension errechnet, und die untere Grenzfrequenz. Unser Chassis macht in dem Gehäuse also linear Bass bis in die 20Hz Region. Warum aber hat nun BassCADE unseren Bass in der Übersicht als ungeeignet für BR erklärt?

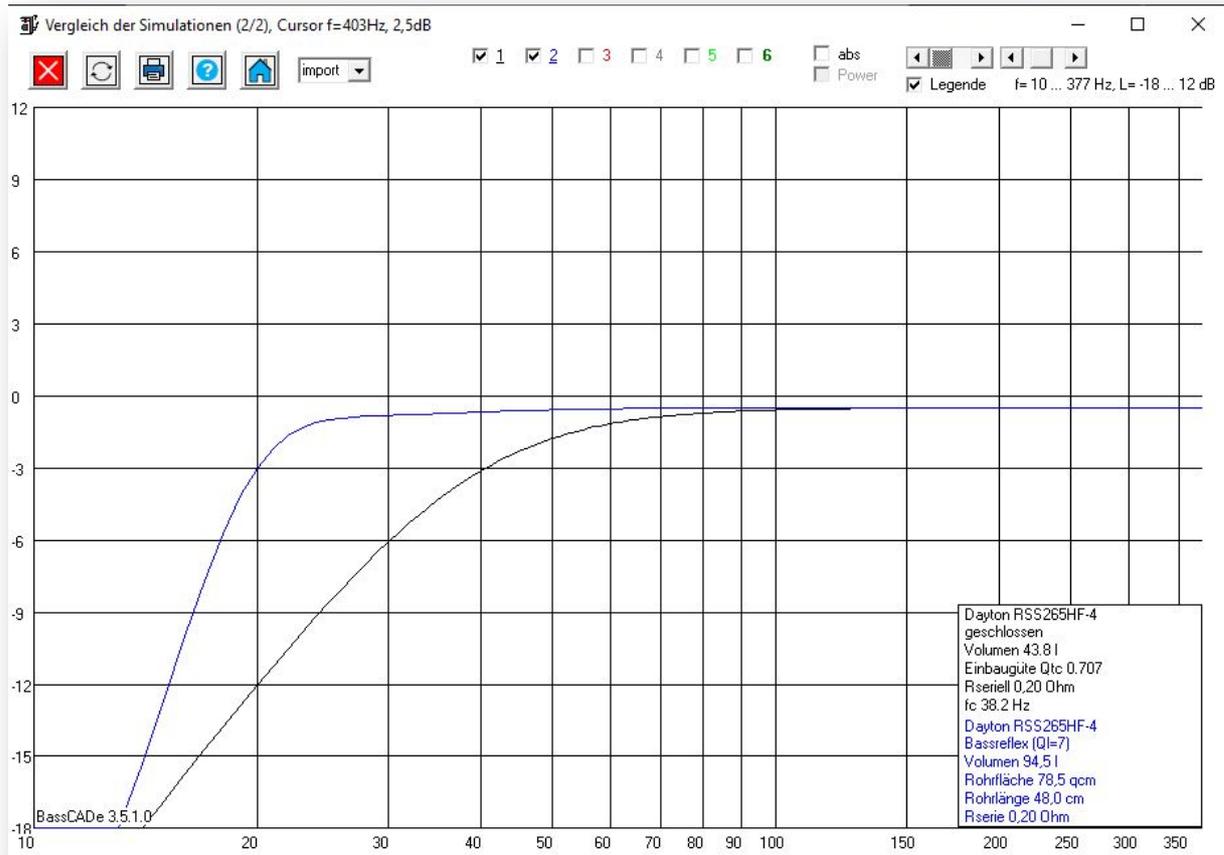
Das liegt zum einen an dem für einen 10"er sehr großen Gehäuse mit fast 100L und zum anderen am recht langen Reflexkanal, der für die extrem tiefe Abstimmung nötig ist. Außerdem liegt bei unserem Beispielchassis die Gesamtgüte mit 0,45 in einem für Bassreflex nicht mehr ganz optimalen Bereich.

Wir wollen nun das geschlossene Gehäuse aus dem ersten Beispiel mit der BR-Simulation vergleichen, also wählen wir unter „export“ den Speicherplatz #2 und aktualisieren wieder mit den beiden Pfeilen.

Nach dem Schließen des Simulationsfensters, sind nun beide Varianten unter „Boxen-Simulation“ aufgelistet:

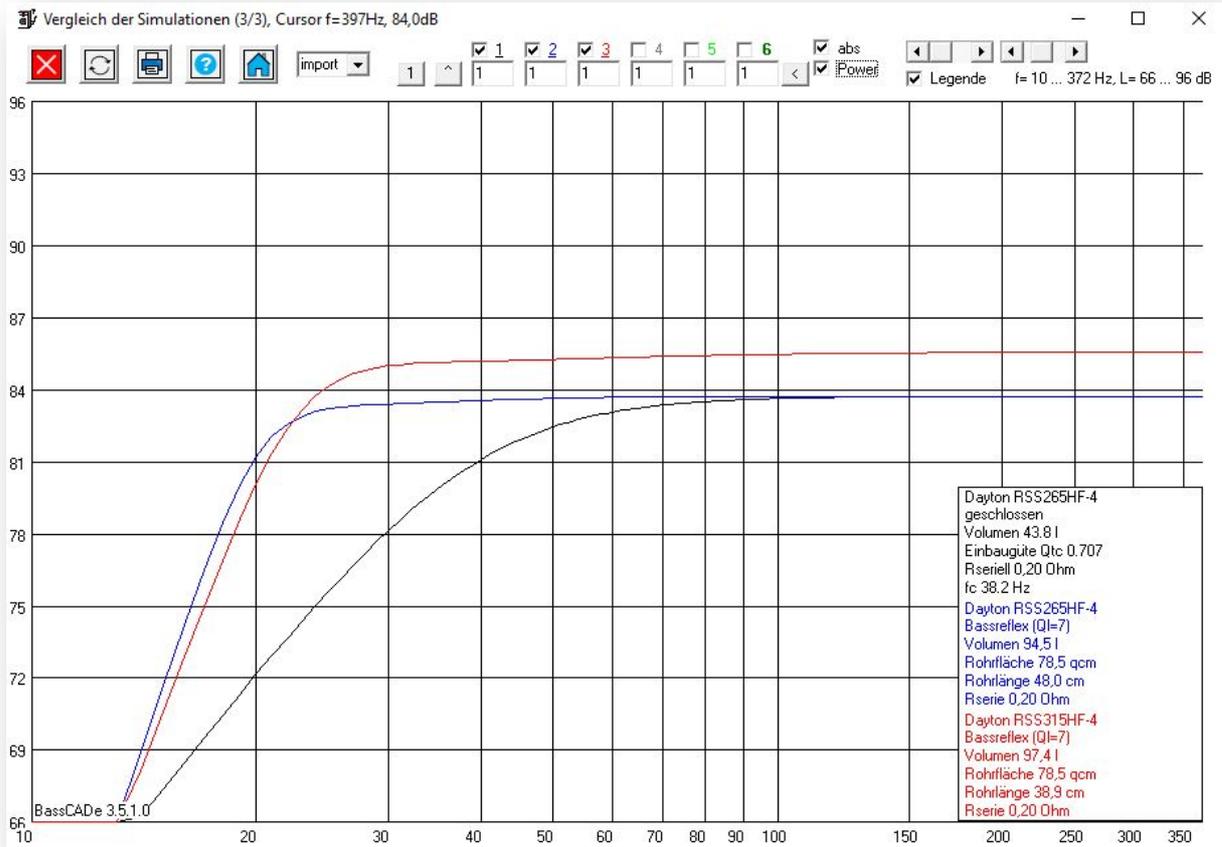


Klickt man nun auf den Button mit den drei Amplitudengängen rechts neben „Übersicht aller Boxen-Simulationen:“, erscheint die Vergleichsübersicht:



Wir sehen nun beide Frequenzgänge im direkten Vergleich und rechts unten auch noch einmal die Beschreibung beider Varianten. Sollte das Anzeigefenster zu klein sein, kann man die Darstellung mit den beiden Scrollbars oben erweitern. Schön zu erkennen ist, dass die BR-Variante natürlich deutlich mehr Tiefgang bietet. Dafür wird aber auch mehr als das doppelte Volumen fällig und in vielen Wohnzimmern dürfte die geschlossene Variante deutlich besser funktionieren. Einzig als reiner Heimkino-Bass würde ich die BR-Variante in Erwägung ziehen.

Wenn man verschiedene Chassis simuliert, ist es auch interessant, wie sich diese im Wirkungsgrad gegenseitig unterscheiden. Dafür habe ich den 12" Bass der gleichen Serie geladen und auf Speicherplatz #3 simuliert. Damit auch der Wirkungsgrad angezeigt wird, muss man noch das Häkchen bei „abs“ setzen. Unter „Power“ kann man dazu noch verschieden hohe Leistungen der Verstärker angeben. Wir belassen es im Beispiel aber bei jeweils 1 Watt:



Der 12" Bass braucht erstaunlicherweise in diesem Fall fast genau das gleiche Volumen in BR wie der 10"er und ist dabei etwa 2dB lauter. Da man die Physik aber nicht überlisten kann, ist dabei gleichzeitig die untere Grenzfrequenz etwas höher als beim kleineren Bass (f3 23Hz vs. 19Hz).

## AJHorn

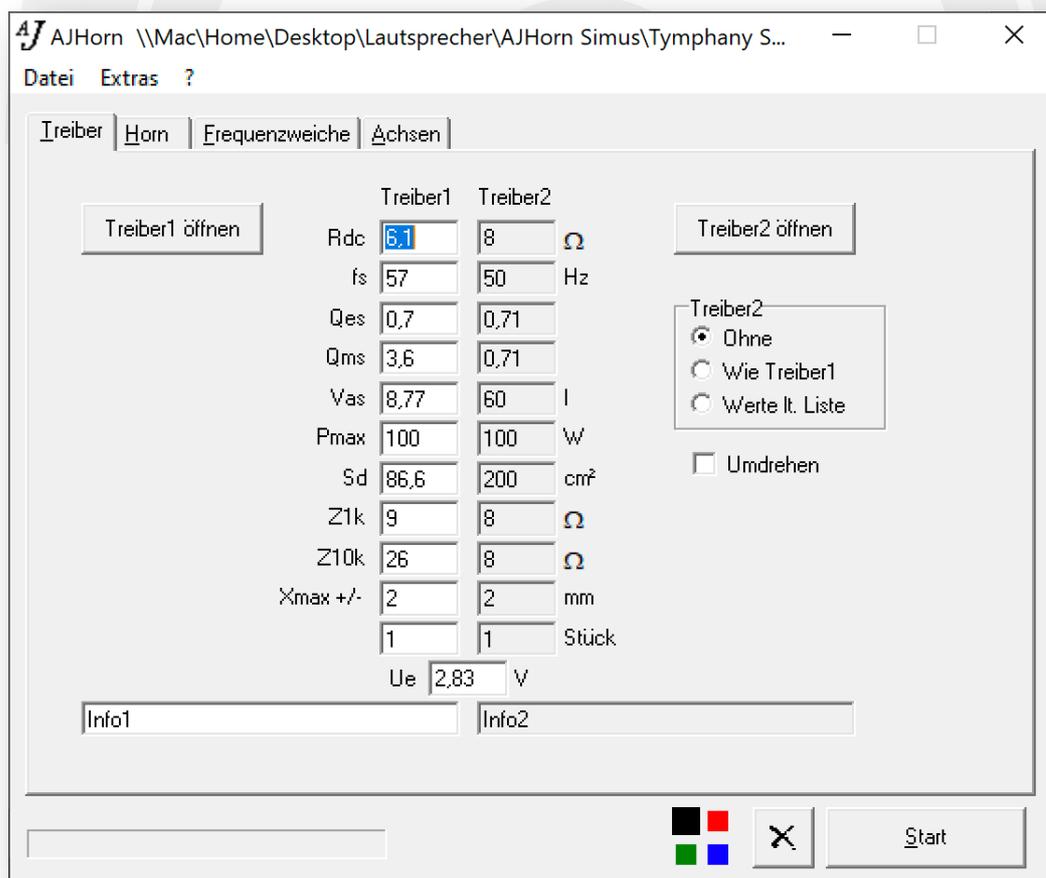
AJHorn von Armin Jost ist das Schweizer Taschenmesser unter den Simulationsprogrammen. Es gibt eigentlich nichts, was AJHorn nicht kann. Wie der Name schon vermuten lässt, wurde das Programm ursprünglich entwickelt, um damit Hörner jeder Art zu simulieren. In der aktuellen Version kann fast jede Gehäuseart simuliert werden. Ausnahmen bilden Exoten wie DCBR (Dual Chamber Bass Reflex) oder auch Bandpässe höherer Ordnung (mehr als 2 Kammern).

Für die Simulation verwenden wir hier die Demoversion von AJHorn 7. Diese ist im Funktionsumfang sehr beschränkt und wir können keine Simulationen oder Chassis speichern.

Der eingeschränkte Funktionsumfang soll uns aber nicht stören, denn sowohl CB als auch GHP können mit den uns zur Verfügung gestellten Funktionen wunderbar und weitestgehend ohne Einschränkungen simuliert werden.

## Eingabe der TSP

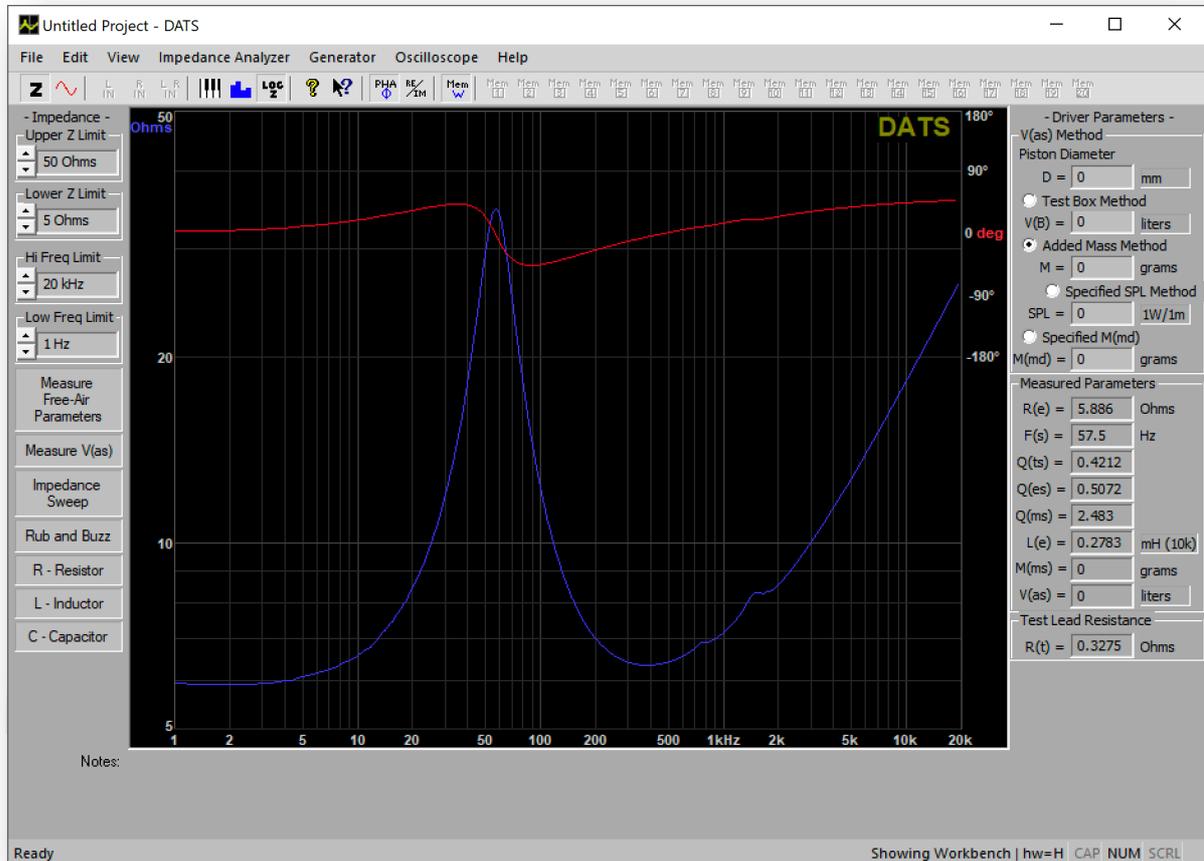
Die TSP können im Reiter „Treiber“ eingegeben werden:



Neben den uns bekannten TSP möchte AJHorn zwei weitere Daten von uns haben: Z1k und Z10k. Diese beiden Werte sind nicht Bestandteil des offiziellen Parametersatzes und auch

keines der Messprogramme hat uns diese Werte ausgegeben. Woher bekommen wir diese Angaben?

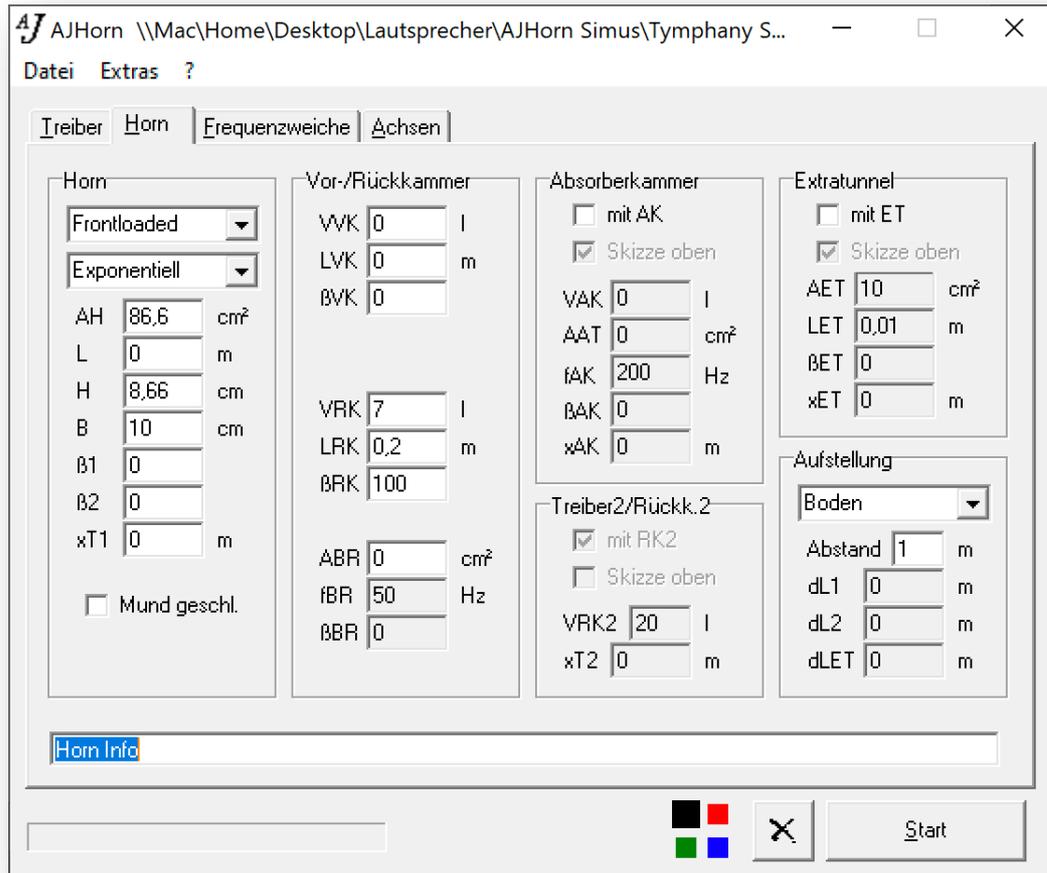
Schauen wir uns noch einmal die Impedanzmessung unseres Chassis an:



Wir sehen eine Impedanzkurve, die sich über einen Bereich zwischen 20 und 20.000 Hz erstreckt. Und genau hier können wir ablesen, was AJHorn von uns wissen möchte: die Impedanz bei 1 kHz und die Impedanz bei 10 kHz. Die Angaben müssen nicht aufs Milliohm genau sein. AJHorn braucht diese Werte aber, um den theoretischen Verlauf zu höheren Frequenzen hin besser simulieren zu können.

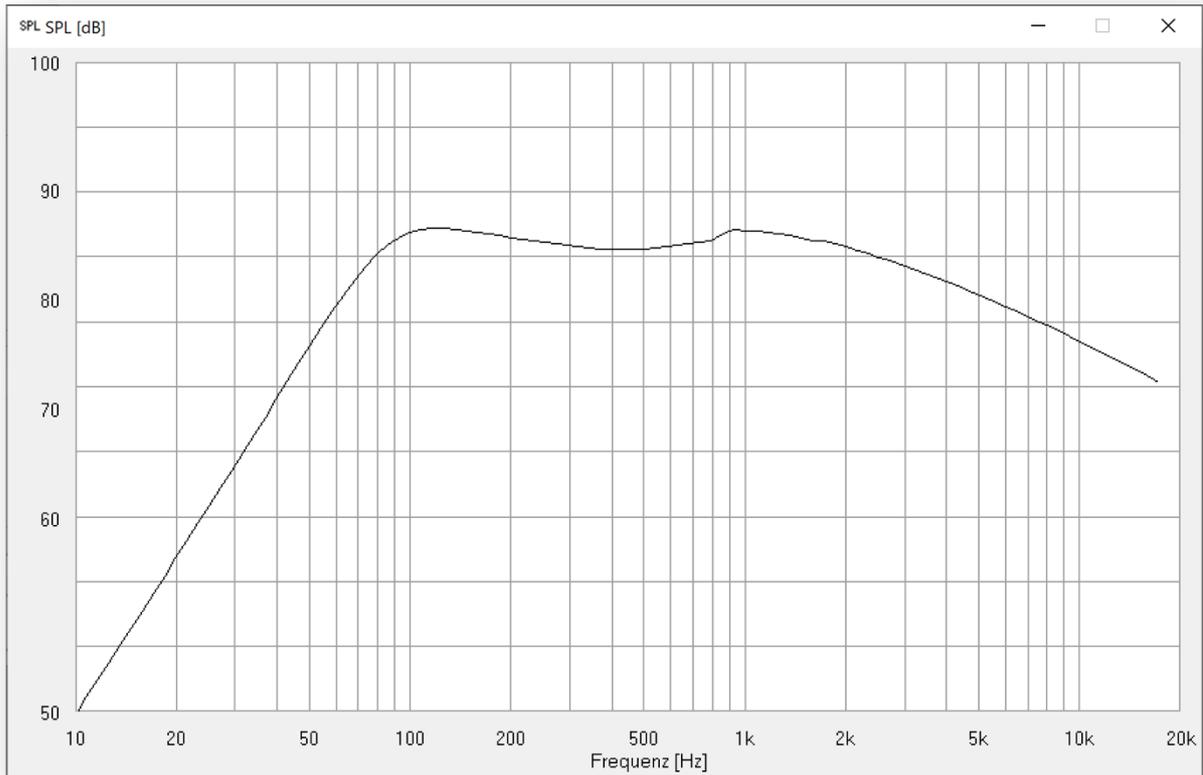
### Geschlossene Box

Um eine geschlossene Box simulieren zu können, wechseln wir in den Reiter „Horn“. Dort sind folgende Werte einzugeben:



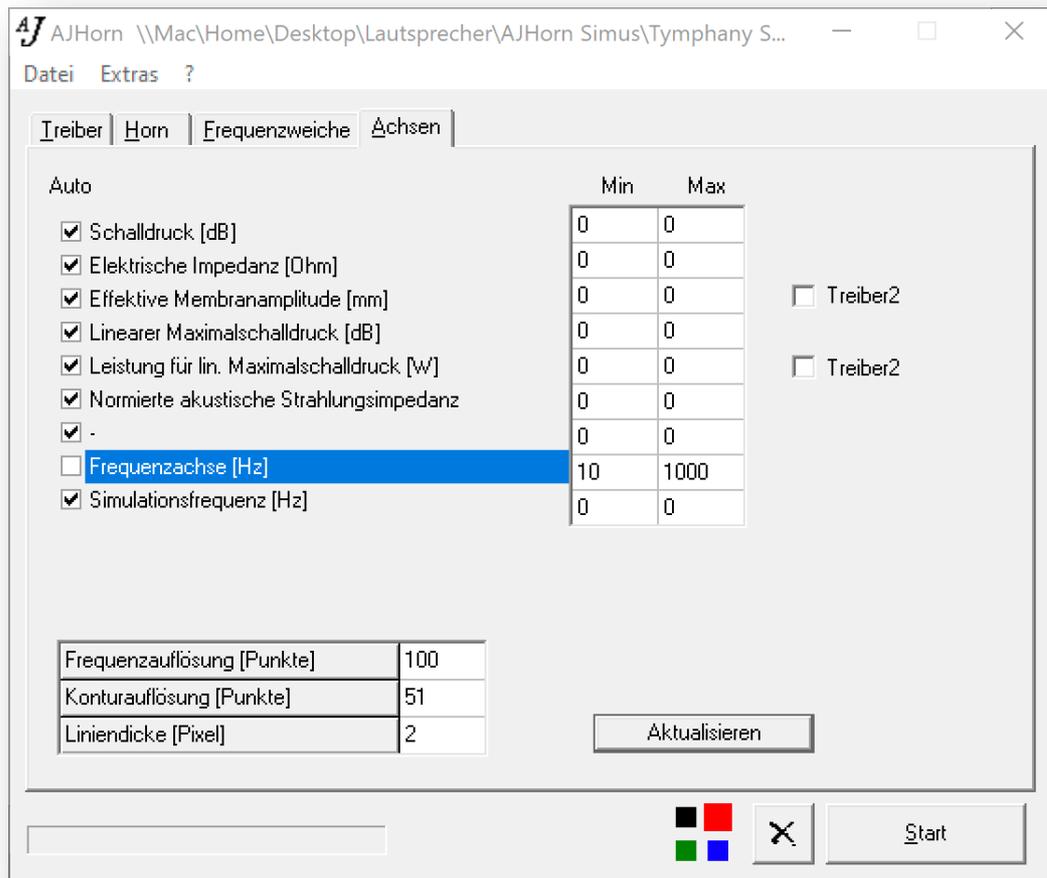
- AH** Membranfläche  $S_d$
- H** 1/10 Membranfläche
- B** 10
- VRK** Zu simulierendes Volumen
- $\beta$ RK** 100

Unter „Aufstellung“ wählen wir zudem den Wert „Boden“ aus, da wir ja nicht wissen wollen, wie sich der Lautsprecher freistehend verhält. Mit einem Klick auf „Start“ wird die Simulation gestartet. Doch vorher weist uns AJHorn nochmals auf die Einschränkungen der Demoversion hin, was wir mit „OK“ bestätigen. Daraufhin erhalten wir folgende Kurve:

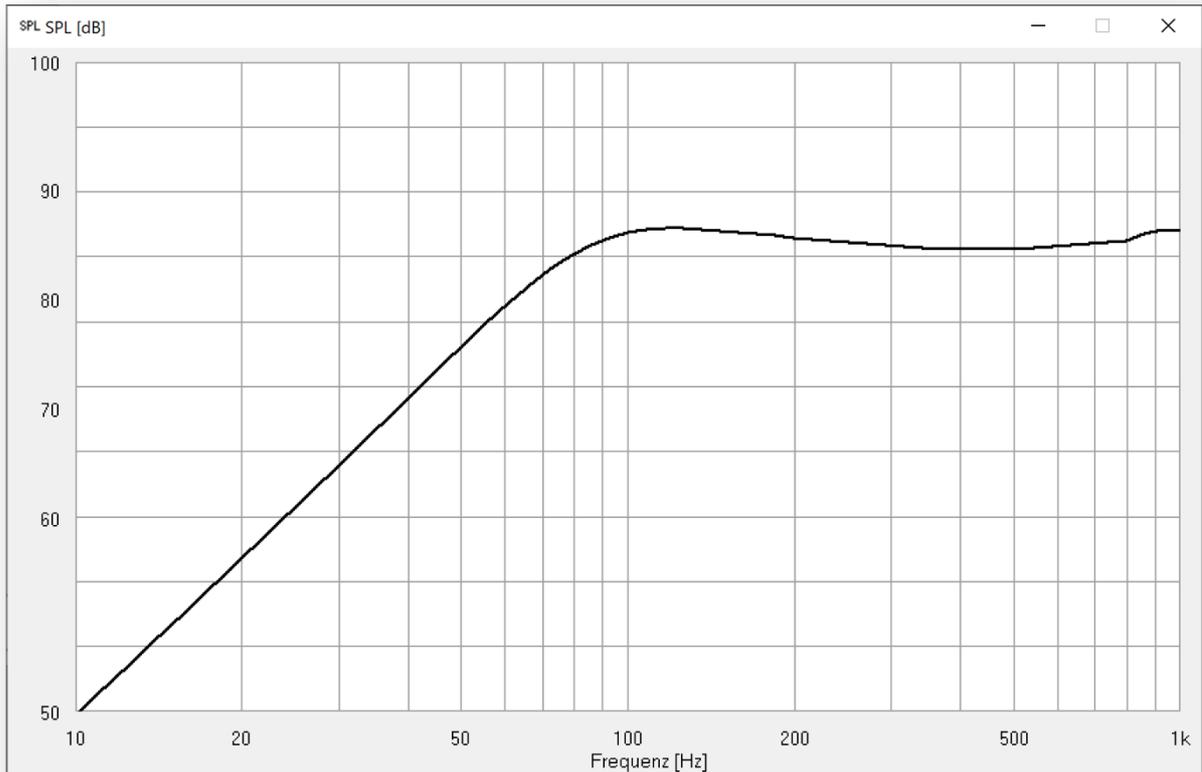


Das sieht schon mal gar nicht so schlecht aus. Die Darstellung hingegen ist noch nicht ganz so optimal, da uns ja nur der untere Frequenzbereich interessiert. Etwas anderes können wir anhand der TSP ohnehin nicht simulieren, daher wechseln wir in den Reiter „Achsen“.

**D. A. U.**



Hier nehmen wir das Häkchen bei „Frequenzachse (Hz)“ raus und geben in der Spalte „Min“ den Wert „10“ und in der Spalte „Max“ den Wert „1000“ an. Damit wird die Simulation auf diesen Frequenzbereich beschränkt. Im Feld „Liniendicke (Pixel)“ geben wir „2“ ein, um eine etwas dickere Kurve zu erhalten. Klicken wir auf „Aktualisieren“, erhalten wir folgende Kurve:



Damit ist die Simulation einer geschlossenen Box auch schon abgeschlossen.

### **Geschlossene Box mit Hochpass (GHP)**

Wie der Name schon impliziert, handelt es sich bei GHP ebenfalls um ein geschlossenes Gehäuse, jedoch wird dem Chassis zusätzlich ein Hochpass in Form eines Kondensators verpasst. Der Vorteil dieser Beschaltung ist, dass man meist mit einem wesentlich kleineren Gehäuse auskommt jedoch ohne an Tiefgang zu verlieren. Im Gegenteil: oft ist es möglich, den Bassbereich ein wenig nach unten zu erweitern, allerdings geht das zu Lasten des Wirkungsgrades.

In AJHorn können wir alles so lassen, wie wir es für die Simulation einer geschlossenen Box eingestellt haben. Zusätzlich gehen wir nun noch in den Reiter „Frequenzweiche“ und geben einen beliebigen Wert für den Kondensator ein:

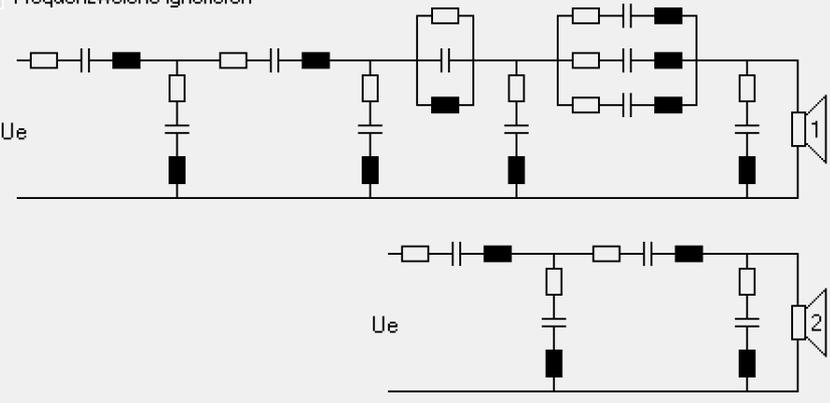
AJHorn \\Mac\Home\Desktop\Lautsprecher\AJHorn Simus\Tymphany S... - □ ×

Datei Extras ?

Treiber | Horn | **Frequenzweiche** | Achsen

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
R [Ohm]														
C [uF]	560													
L [mH]														

Frequenzweiche ignorieren



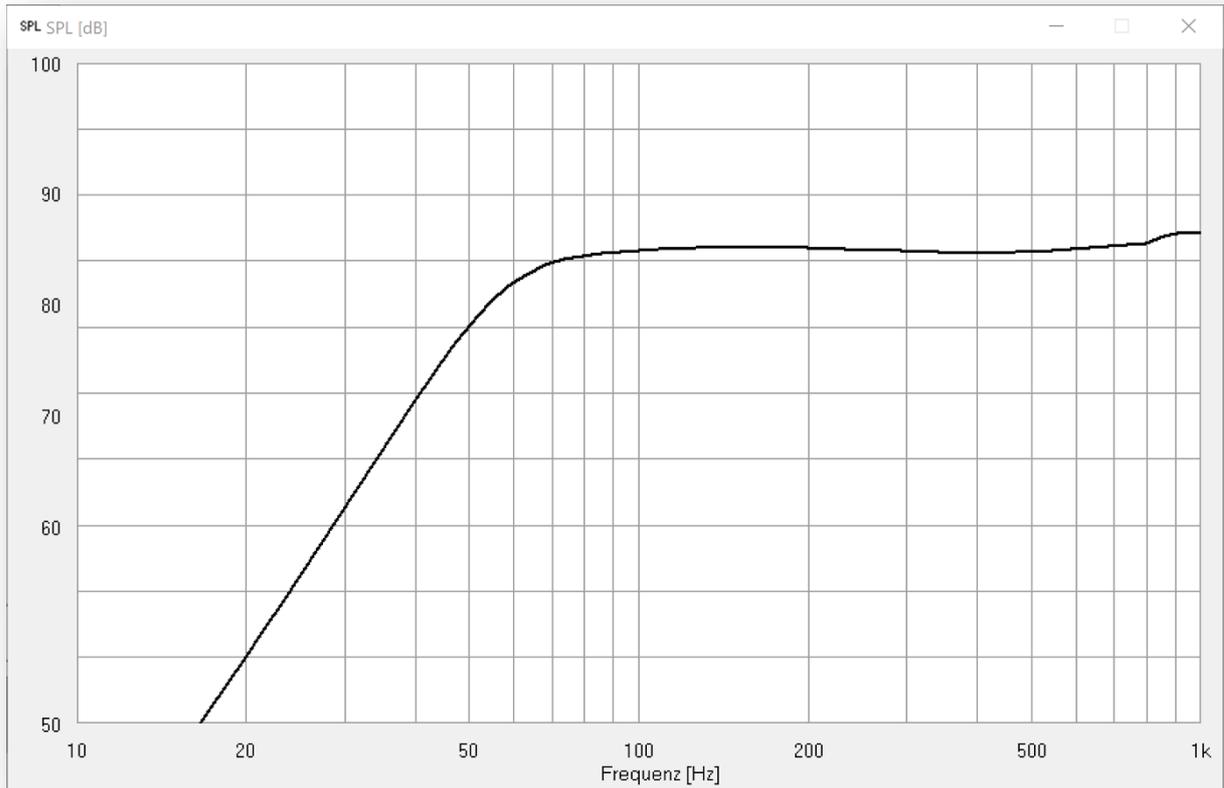
Ue

Ue

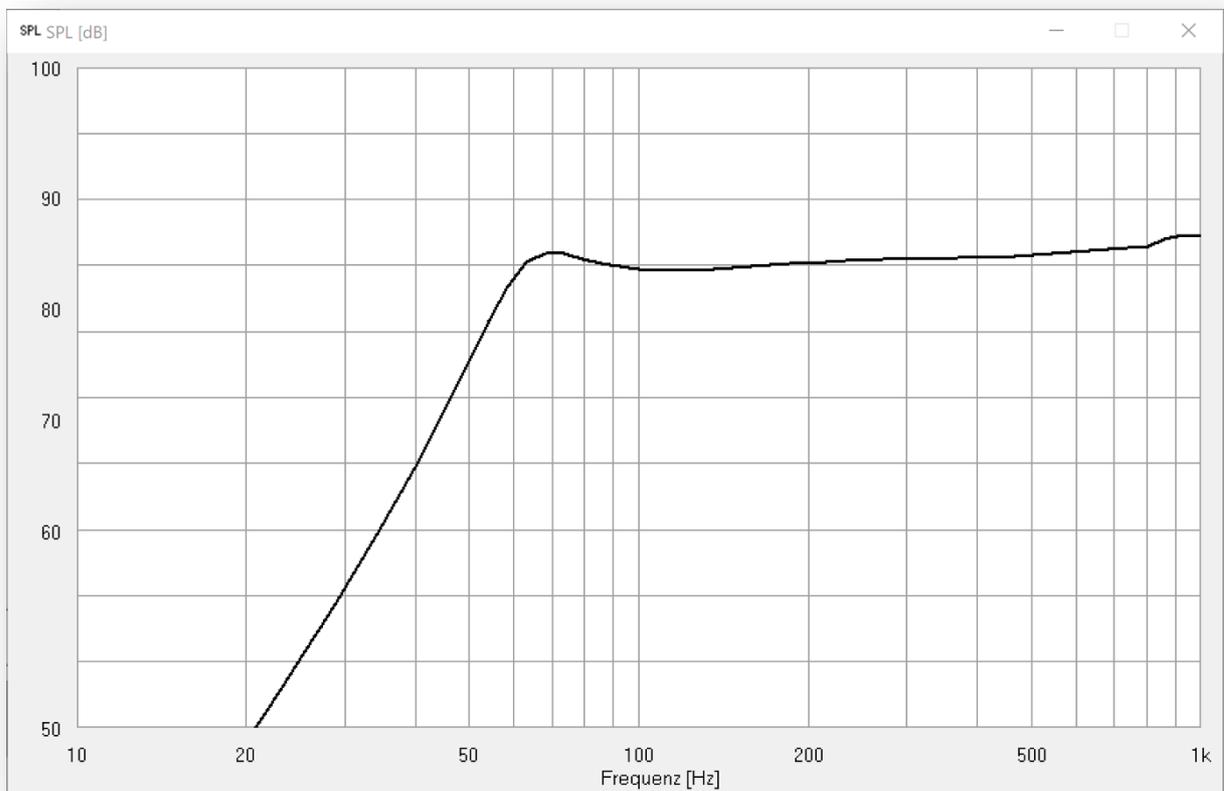
Start

Der eingeebene Wert ist zunächst einmal egal und jeder geht hier anders vor. Mit einem Klick auf „Start“ erhalten wir nun folgende Kurve:

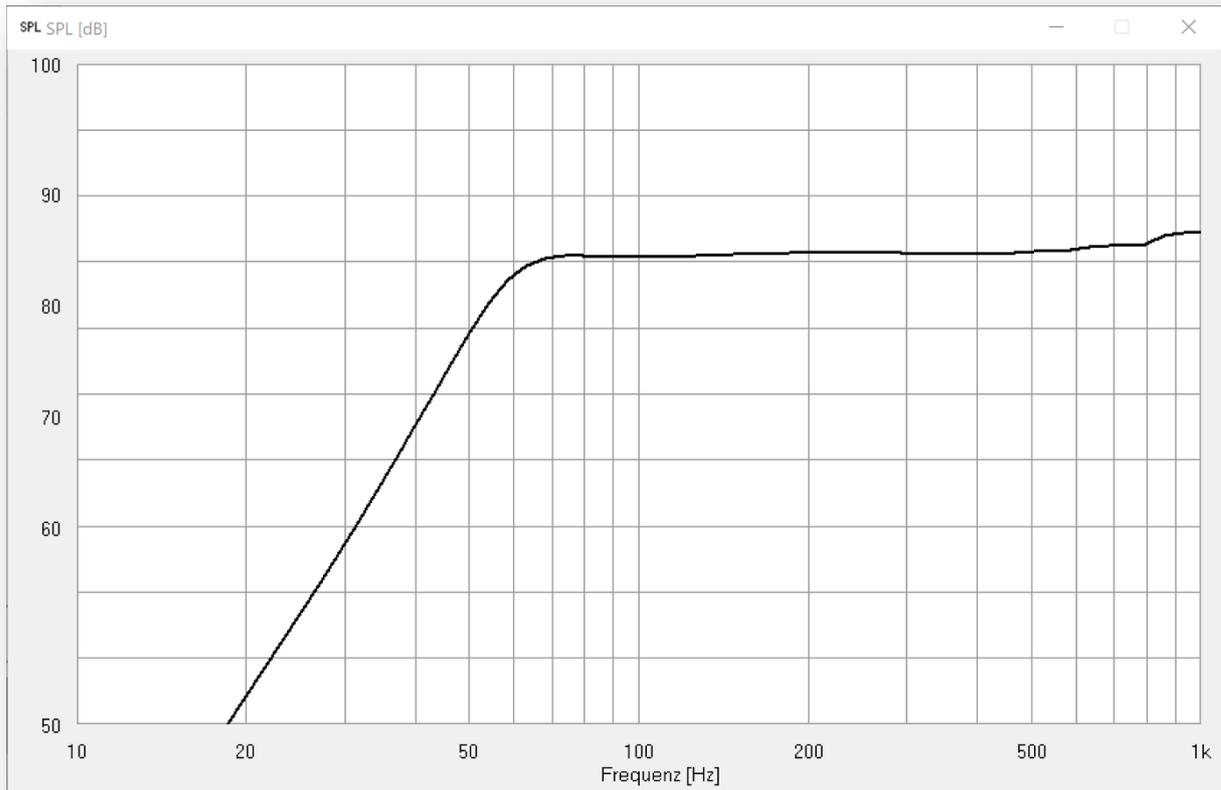
D. A. U.



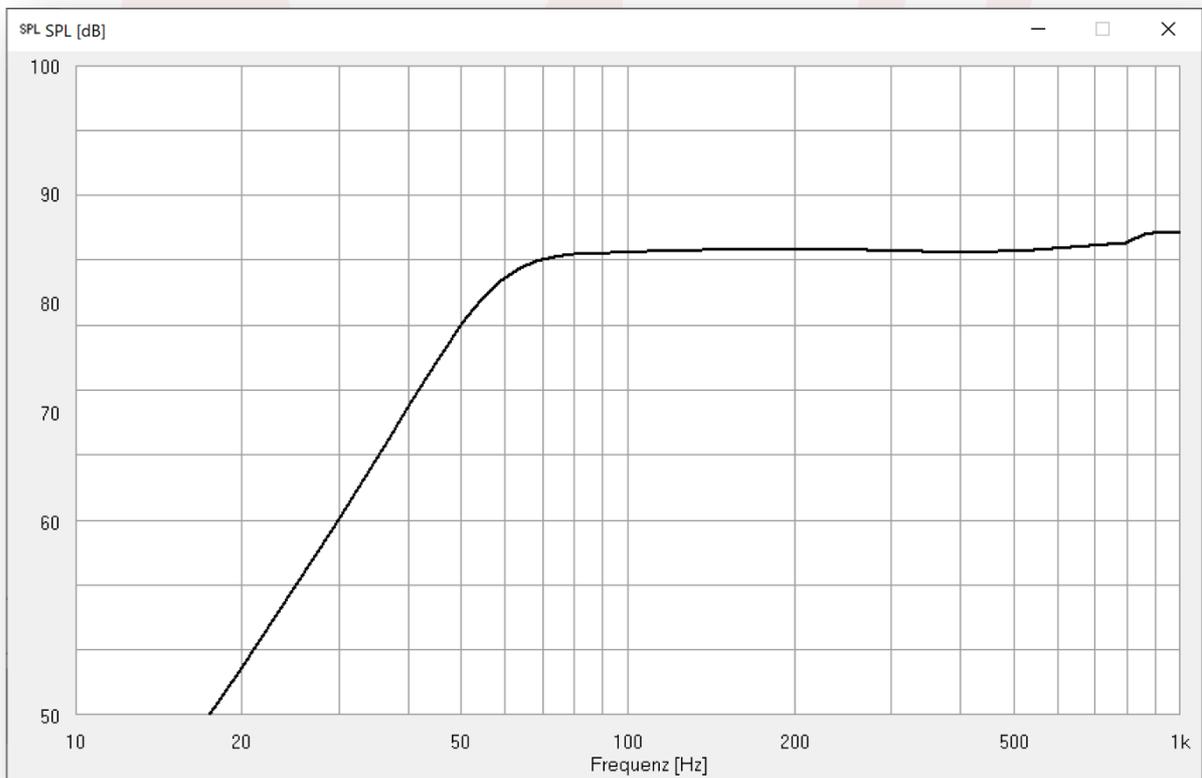
Verkleinern wir den Wert testhalber mal auf 270 $\mu$ F:



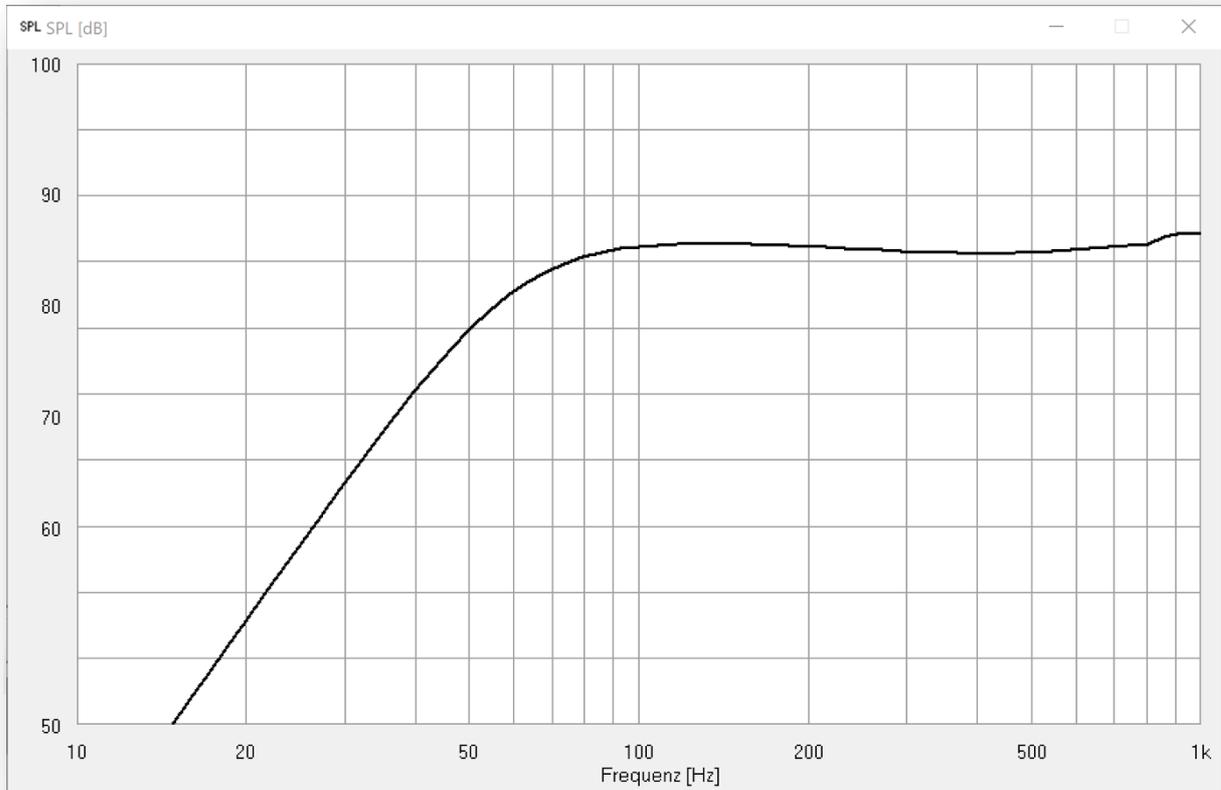
Dieser Wert ist zu klein. Entsprechend müssen wir ihn wieder erhöhen. 390 $\mu$ F?



Geht das noch ein wenig besser? 470 $\mu$ F vielleicht?



Das sieht gut aus. Ob einem der Verlauf mit  $390\mu\text{F}$  oder  $470\mu\text{F}$  besser gefällt, muss jeder für sich entscheiden. Man kann mit dem Kondensatorwert spielen, bis das Ergebnis zufriedenstellend ist. Bei jedem Treiber wird es einen Punkt geben, ab dem die Kurve nicht mehr schöner, sondern nach unten nur noch flacher abfällt. Geben der Vollständigkeit halber einmal  $820\mu\text{F}$  ein:



Wie wir sehen, stellt sich nur noch ein flacherer Abfall ein. An der Stelle könnte man nun noch ein wenig mit dem Volumen spielen. Dabei ist jedoch darauf zu beachten, dass sich bei einer Volumenänderung auch der ideale Kondensatorwert ändern kann.

---

## Zusammenfassung

Mit diesem Kapitel ist nun auch das Thema „Simulationen“ abgeschlossen. Natürlich gibt es noch viele weitere Gehäusearten, über die es sich zu schreiben lohnen würde. Dieses Dokument soll jedoch nur der Einstieg in die Welt der TSP-Messungen und der Simulationen sein.

Wie wir im Verlauf gesehen haben, ist es recht einfach an die für eine Gehäuseberechnung benötigten Daten zu gelangen und Simulationsprogramme mit eben diesen zu füttern. Was vor noch nicht allzu langer Zeit nur mit viel Aufwand und einem Blatt Papier, Bleistift und Taschenrechner bewaffnet möglich war, ist heute schon fast ein Kinderspiel. Die Kosten sind überschaubar und man erspart sich am Ende das Bauen von Testgehäusen und viel Frust.

Wir hoffen, dass wir euch damit ein wenig die Angst und die Scheu vor diesem Thema genommen haben und freuen uns auf einen weiterhin tollen und konstruktiven Austausch.

Ihr findet uns wie gewohnt auf unserer Homepage:

<https://www.der-akustische-untergrund.de>

Ebenso sind wir auf Facebook vertreten:

<https://www.facebook.com/groups/304972859996029>

Ein paar unserer Mitglieder betreiben darüber hinaus noch eigene Homepages mit Bauvorschlägen, Fakten und Grundlagen zum Lautsprecherbau und weiteren nützlichen Informationen:

Alex: <https://www.donhighend.de>

Gazza: <https://www.gazza-diy-audio.de>

Rouven: <https://www.roul-diy.de>

## Weitere Informationen

### TSPCheck

Das kleine Programm „TSPCheck“ kann hier heruntergeladen werden:

<https://hifi-selbstbau.de/index.php/downloads/summary/26-software/46-tspcheck>

Um es auf modernen Rechnern ans Laufen zu bekommen, wird die Datei „MSVMVM50.DLL“ benötigt, die in älteren Windows-Versionen enthalten war. Google ist hier unser Freund. Nach dem Download wird die Datei einfach in denselben Ordner kopiert, in dem sich auch die TSPCheck.exe befindet.

### Messsoftware

REW: <https://www.roomeqwizard.com/>

LIMP: <https://www.artalabs.hr/download.htm>

DATS: <https://www.daytonaudio.com/product/1650/dats-v3-computer-based-audio-component-test-system>

Die DATS Software kann nur mit der DATS Messbox verwendet werden. Das System kann beispielsweise über Variant Hifi bezogen werden:

<https://www.variant-hifi.de/produkt/messequipment/dats-v3-audio-test-system-1562.html>

### Simulationsprogramme

WinISD: <http://www.linearteam.org/>

BassCADe: <http://www.selfmadehifi.de/basscad.htm>

AJHorn 7: <http://www.aj-systems.de/download.htm>

### LIMP Handbuch

Im LIMP Handbuch ist die Funktion des Programms sowie alle technischen Hintergründe in allen Details beschrieben. Auch sind dort Informationen darüber zu finden, wie LIMP als RLC-Meter eingesetzt werden kann: <https://www.artalabs.hr/support.htm>

### Teilleiste für die Impedanzmessbox

Wie weiter oben bereits beschrieben, gibt es neben dem Impedanzmesskabel die Möglichkeit, dieselbe Schaltung in einer kleinen Box aufzubauen. Der Aufbau gleicht entsprechend dem des Impedanzmesskabels, jedoch sieht eine solche Box ein wenig schöner aus und Kurzschlüsse mit den Krokoklemmen sind ausgeschlossen. Auch ist diese Box ein wenig komfortabler zu nutzen und für knapp 10€ sicherlich eine gute Investition. Der Aufwand eine solche Box zu bauen hält sich in Grenzen und ist für diejenigen empfehlenswert, die nicht nur einmal mit REW und LIMP messen wollen.

Für den Bau der Box werden folgende Teile benötigt:

Bezeichnung	Reichelt-Teilenummer	Menge
Kleingehäuse	EUROBOX	1
Cinch-Buchse	LUM BTO1 SW	3
Polklemme Rot	PK 4 RT	1
Polklemme Schwarz	PK 4 SW	1
Widerstand 47 Ohm	VIT KHS17AKB-47R	1

Eine Anleitung für den Aufbau dieser Box gibt es nicht, jedoch ist diese im LIMP Handbuch ausreichend genau beschrieben, sodass jeder, der halbwegs mit einem Lötkolben und einem Akkuschauber umgehen kann, diese zu bauen in der Lage ist.

### Empfehlenswerte TSP-Datenbanken

Natürlich ist es immer wichtig, die TSP des zu verbauenden Chassis selbst zu messen. Jedoch muss man sich nicht jedes für einen persönlich interessante Chassis kaufen um festzustellen, ob dieses auch für das erdachte Projekt passend ist. Auf folgenden Seiten werden TSP-Sätze zur Verfügung gestellt, dessen Qualität nicht zu bemängeln ist:

Dibirama: <https://www.dibirama.altervista.org/le-prove.html>

HiFi-Compass: <https://hificompass.com/en/speakers/measurements/>

Nedlab: [http://nedlab.com/wp/?page\\_id=38](http://nedlab.com/wp/?page_id=38)

Loudspeaker Database: <http://www.loudspeakerdatabase.com/>

Petoindominique: <https://www.petoindominique.fr/php/lienhp.php>

Weitere Links findet ihr auf der Homepage unseres Mitglieds Alex unter <https://www.donhighend.de>

Auf der rechten Seite ist im Bereich „Datenbanken“ eine wirklich gute Sammlung an TSP-Datenbanken zu finden.