

Thiele - Small Parameter (TSP) ermitteln mit HBX

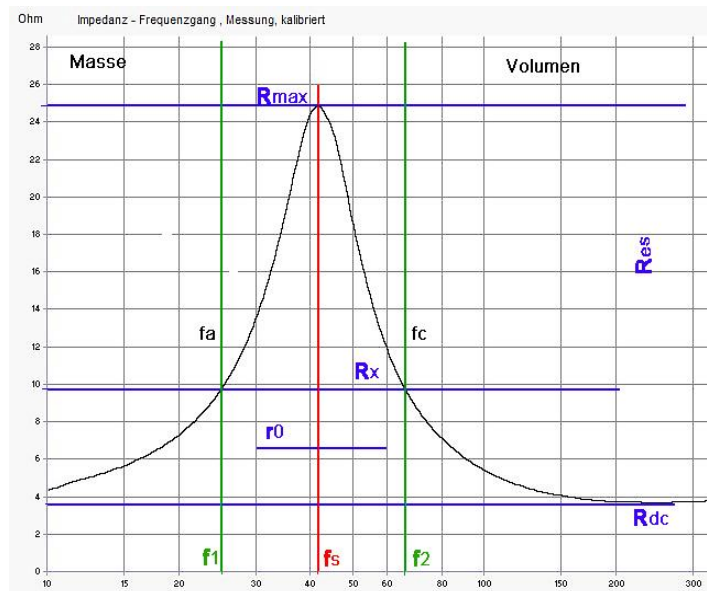
Die Thiele Small Parameter sind die Kennwerte eines einzelnen Lautsprecherchassis und geben im wesentlichen sein Verhalten bei seiner Resonanzfrequenz an. Mit Hilfe dieser ermittelten Werte können wir in einem PC-Lautsprecherboxen-Berechnungsprogramm den Amplitudengang des Lautsprechers in einem Gehäuse vorausberechnen.

Bevor wir den PC benutzen, können wir schon mit dem Meterstab den Durchmesser ermitteln und daraus die eff. Membranfläche S_d (ohne PhasePlug), sowie den Luftwiderstand M_{mr} und falls für die Volumenmethode das Volumen V_c des Chassis benötigt wird, berechnen.

Die Messungen erfolgen stets horizontal (Abstrahlrichtung, also nicht zur Decke); nach **3 Std.** wobbeln und **1 Std.** Abkühlzeit.
(Sinusleistung * Z)^{0,5} / 3 ≈ V_{wobbel}
z.B. (50 W * 8 Ω)^{0,5} / 3 ≈ 6,7 V

Danach wird der Gleichstromwiderstand R_{dc} mit dem Multimeter ermittelt.

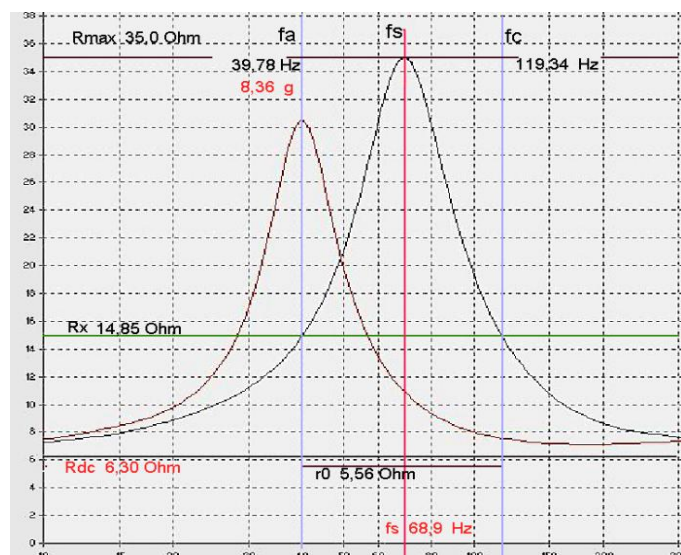
- Die TSP teilen sich in zwei Werte-Gruppen ein.
Die Werte der 1. Gruppe lassen sich bereits nach der 1. Impedanzmessung bestimmen.
 F_s , R_{max} ,
 R_x berechnen, f_1 , f_2 , ermitteln
 Q_{ms} , Q_{es} , Q_{ts} und **EBP** berechnen.



Grafik (1) Schematische Darstellung der 1. Messung

- Die Werte der 2. Gruppe lassen sich erst nach der 2. Messung mit Zusatzmasse M_a oder Testvolumen V_T , und aus den Werten der 1. Gruppe errechnen.
 M_{ms} , C_{ms} , V_{as} , **BL**, **SPL**, n_0 und L_e .

Hier (Grafik 2) eine Resonanzverschiebung mit Zusatzmasse. f_a ist hier f_1 .



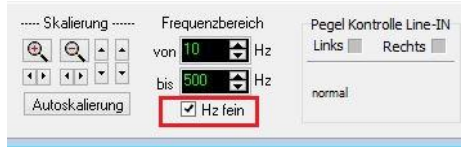
Die Ermittlung der TSP Werte stützt sich physikalisch auf ein Kleinsignalmodell, deshalb sind die Messungen bei möglichst kleinen Pegeln durchzuführen. Kleiner Pegel ist hier relativ und bedeutet, daß es darauf ankommt, daß das Lautsprecherchassis innerhalb seines linearen verzerrungsfreien Bereiches und somit einem homogenen Magnetfeld arbeitet. Das erreicht man, wenn man nur soweit einpegelt, daß kaum eine Membranbewegung sichtbar ist.

Messspannung (Tru RMS) bei 300 Hz
am 8,0 Ω Festwiderstand auf 0,100 V einpegeln.

Li : 100,08 mVeff

Re : 821,93 mVeff

Probleme bei der Ermittlung der TSP

- Sollte die Resonanzfrequenz (f_s) nicht richtig erkannt werden, so kann das an dem induktiv bedingten starken Impedanzanstieg bei den hohen Frequenzen liegen. Lege in solch einem Fall die Anfangsmessfrequenz etwas vor f_s , ca. $0,4 \cdot f_s$, und die Endmessfrequenz auf ca. $4 \cdot f_s$ fest.
 - Für eine korrekte Erkennung der Resonanzfrequenz f_s darf die Anfangsmessfrequenz auch nicht zu tief festgelegt werden. So sollte die Anfangsfrequenz bei einer Mitteltönermessung z.B. nicht auf 50 Hz, sondern je nach Chassis z.B. auf 300 Hz eingestellt werden.
 - Bei Verwendung eines Chassis mit PhasePlug ist darauf zu achten, daß die Zusatzmasse [Knetmasse] nicht am PhasePlug anhaftet und somit die Bewegung einschränkt oder gar verhindert.
 - Wenn die gemessene Impedanzkurve rau und zackig erscheint, so kann der Pegel zu gering -, der verwendete Vorwiderstand zu hoch gewählt [soll zwischen 47Ω und 68Ω] -, die Messzeit pro Messwert zu kurz sein, die Zusatzmasse ist locker geworden und vibriert mit oder je nach Ort auch Vibrationen durch Fahrzeuge z.B. LKW, Bauarbeiten
 - Bei der Messung mit der Zusatzmasse [M_a] muß sich eine tiefere Resonanzfrequenz [f_a] gegenüber der 1. Messung des gleichen Chassis ergeben. Verändere in diesem Fall die Zusatzmasse und wiederhole nur die 2. Messung so lange, bis f_a gleich f_1 ist.
 - Bei der Messung mit Volumen [V_T] muß sich eine höhere Resonanzfrequenz [f_c] gegenüber der 1. Messung des gleichen Chassis ergeben. Verändere in diesem Fall das Volumen und wiederhole nur die 2. Messung so lange, bis f_c gleich f_2 ist. Je kleiner das Testvolumen, um so höher ist die Resonanzfrequenzerhöhung [f_c]. Auch hier ist es ideal, wenn f_c gleich f_2 ist.
 - Achtung, bei der Volumenmethode wirken sich auch kleine Undichtigkeiten bei der Ankopplung des Chassis am Testgehäuse negativ auf die Genauigkeit aus.
 - Sollte die Ursache in der Asymmetrie der Resonanzkurve liegen, so wähle eine höhere Auflösung des Messrasters [z.B. 48tel Oktave], sowie eine größere Messzeit [z.B. 700 ms] im Menu [Einstellungen / Impedanz] und versuche eine bessere Pegelaussteuerung.
 - Eine schöne runde Resonanzkurvenform ist wichtig für eine hohe Genauigkeit der TSP. Dies kann man, kurz vor dem Maximum mit der aktivierten Option " [✓] Hz fein " erreichen. Nach dem überschreiten des Höhepunktes kann man diese Option wieder deaktivieren.
- 
- Die Induktivität der Schwingspule L_e ist frequenzabhängig und kann bei negativen Phasenwerten nicht angezeigt werden.
 - Die Berechnung der TSP Werte reagiert äußerst sensibel auf kleinste Änderungen in der Messkette. Deshalb keine Bewegung im Raum, keine Vibrationen, kein Luftzug und auch keine Musik.
 - Wenn wir Vergleichsmessungen durchführen, messen wir immer bei gleichen Pegeln und in gleicher mechanischer Anordnung des Lautsprechers, bzw. unter gleichen atmosphärischen Bedingungen.
 - Auch die Spitzenprogramme weisen untereinander beim Vergleich, wenn auch nur geringe, Differenzen auf.
 - Unterschiede zwischen einem mathematischen und einem gemessenem Ergebnis von ein paar Prozent sind bei allen Messsystemen keine Seltenheit. [Übergangswiderstände, Nachkommastellen, veränderte atmosphärische Bedingungen ...].
- Am Ende ist es aber entscheidend wie sich diese leicht unterschiedlichen TSP auf die Simulationsberechnung einer Lautsprecherbox auswirken und da kann man beruhigt feststellen, dass diese Differenzen in der Praxis kaum eine Rolle spielen.

Erklärungen der Indices, Abkürzungen zu TSP:

D_d	:	Membran-Durchmesser des Chassis (von Mitte Sicke zu Mitte Sicke)	cm
d	:	Durchmesser der Staubschutzkalotte , bzw. des PhasePlug	cm
h	:	Höhe von der tiefsten Stelle der Staubschutzkappe bis oberen Rand der Sicke	cm
S_d	:	Effektive Membranfläche (von Mitte Sicke zu Mitte Sicke, ohne PhasePlug)	cm ²
V_c	:	Volumen des Chassi in cm ³ / 1000 = Liter (ohne PhasePlug)	Liter
R_{dc}	:	Gleichstrom-Widerstand [auch R_e bezeichnet], gemessen mit dem Multimeter	Ω
R_{max}	:	Maximale Impedanz der Resonanzkurve bei f_s	Ω
R_x	:	geometrisch mittlere Impedanz (R_{dc} * R_{max}) ^{0,5} ; Bezugswiderstand für f₁ und f₂	Ω
R_{es}	:	Differenz von R_{max} zu R_{dc}	Ω
r₀	:	Verhältnis von R_{max} / R_{dc}	
R_G	:	serieller Gesamt-widerstand (von Verstärker, Kabel, Spule, - etc. und Chassi)	Ω
Z	:	Nennimpedanz nach DIN, meisten 4 Ω und 8 Ω, (≈1,25 * R_{dc})	Ω
f_s	:	Freiluft-Resonanzfrequenz am Höhepunkt R_{max}	Hz
f₁	:	Untere Bezugsfrequenz am Schnittpunkt R_x	Hz
f₂	:	Obere Bezugsfrequenz am Schnittpunkt R_x	Hz
f_a	:	Erreichte untere Frequenz mit Masse (Knete) Ideal wenn = f₁	Hz
f_c	:	Erreichte obere Frequenz mit Luft-Volumen-Box Ideal wenn = f₂	Hz
Q_{ms}	:	Mechanische Güte des Chassis	
Q_{es}	:	Elektr. Güte des Chassis (nur Chassi alleine)	
Q'_{es}	:	Elektr. Güte des Chassis (mit allen seriellen Widerständen, incl. Kabel, Spulen, ect.)	
Q_{ts}	:	Gesamtgüte des Chassis	
Q'_{ts}	:	Gesamtgüte des Chassis (mit allen seriellen Widerständen, incl. Kabel, Spulen, ect.)	
Q_{TC}	:	Gesamtgüte einer geschlossenen Lautsprecherbox z.B. 0,5; 0,6; 0,71 ; 0,84; 1,0;	
M_{ms}	:	Schwingende Gesamt-Masse vom Chassi incl. M_{mr}	g
M_{mr}	:	Mitschwingende Luftmasse am Chassi	g
M_{md}	:	Schwingende Gesamt-Masse vom Chassi ohne M_{mr}	g
M_a	:	Bei der 2. Messung verwendete Zusatzmasse (z.B. Knete)	g
M_c	:	Bei der 2. Messung verwendete Luft-Feder-"Gewicht" (closed Box)	g
ρ	:	[Rho] statische Luftdichte [Temperatur, Feuchte und Druck abhängig]	g / L
c	:	Schallgeschwindigkeit, temperaturabhängig zum aktuellen Messzeitpunkt	m/s
V_T	:	Testvolumen der Messbox besteht aus V_c + V_D + V_B - V_{S1} - V_{S2} ...	Liter
		Chassi (V_c), Deckel (V_D), Box (V_B), — Stein1 (V_{S1}), — Stein2 (V_{S2}), ...	
C_{ms}	:	Nachgiebigkeit der Membranaufhängung in mm/Newton	mm/N
K	:	Der Kehrwert von C_{ms} , Nachgiebigkeit	N/mm
V_{as}	:	Äquivalentes Luftvolumen	Liter
V_B	:	Gehäusevolumen	Liter
α	:	[Alpha] Verhältnis von V_{as} zu V_B	
ω	:	[Omega] Kreisfrequenz $2 * \pi * f_s$	Hz
BL	:	Kraftfaktor bzw. Antriebsfaktor des Chassis in Tesla-Meter (bzw. N/A)	Tm
R_{ms}	:	Mechanischer Widerstand,	kg/s
U_{mes}	:	Messspannung (TSPs werden mit 0,100 Volt durchgeführt)	V
I_{mes}	:	Messstrom in Amperé	A
F	:	Kraft in Newton ; Masse * Beschleunigung	N
M	:	Masse; ist unabhängig von der Erdanziehung	kg
N	:	Newton, 1 kg Erdanziehung ≈ 9,807 N; Kraft F = 1 N ≈ 101,97 g	kg*m/s ²
η₀	:	[Eta] Referenzwirkungsgrad in Prozent	%
SPL	:	Mittlerer Schalldruck bezogen auf 1,0 m Abstand und 2,828 V	dB
L_e	:	Induktivität der Schwingspule des Chassis (ist frequenzabhängig)	mH
EBP	:	Effizienz-Bandbreiten Produkt " ist der Bauart-Eignungsfaktor für die Boxen "	Hz
X_{max}	:	die maximale lineare Auslenkung der Membrane (einfacher Hub) + / -	mm
V_d	:	Verschiebevolumen aus Membranfläche S_d und maximaler Auslenkung X_{max} P-P	Liter
^0,5	:	Wurzel aus ()	

Die Formeln sind mit einem Taschenrechner TI30 erstellt. Andere Taschenrechner und Tabellenkalkulationsprogramme haben gegebenenfalls eine andere Eingabenreihenfolge.

c = Schallgeschwindigkeit bei 21° ≈ 344,00 m/s .

p : zum Messzeitpunkt aktuelle Luftdichte
Die statische Luftdichte, ergibt sich aus der **Temperatur °**, **relativer Luftfeuchtigkeit %** und dem **Luftdruck mBar**. Die durchschnittliche Bezugsdichte aus 20 °C, 50 % relative Luftfeuchtigkeit und 986 mBar ist rund **1,18 g/Liter**. 1 milli-Bar = 100 Pascal = 1 hPa

Schallgeschwindigkeit und Luftdichte bei Normaldruck auf Meereshöhe 1013,25 mBar

m/s	339,89	341,07	342,25	343,42	344,59	345,76	346,92	348,01	349,23	350,38	351,53
	340,48	341,66	342,83	344,00	345,17	346,34	347,46	348,62	349,80	350,95	
Feuchte	14°	16°	18°	20°	22°	24°	26°	28°	30°	32°	34°
20 %	1,2316	1,2234	1,2155	1,2076	1,1998	1,1923	1,1848	1,1775	1,1705	1,1638	1,1567
25 %	1,2322	1,2241	1,2162	1,2084	1,2008	1,1933	1,1860	1,1789	1,1720	1,1652	1,1586
30 %	1,2328	1,2248	1,2170	1,2093	1,2017	1,1944	1,1872	1,1803	1,1735	1,1668	1,1605
35 %	1,2334	1,2255	1,2178	1,2102	1,2027	1,1955	1,1884	1,1816	1,1750	1,1685	1,1624
40 %	1,2340	1,2262	1,2185	1,2110	1,2037	1,1966	1,1896	1,1830	1,1765	1,1706	1,1642
45 %	1,2346	1,2268	1,2193	1,2119	1,2046	1,1977	1,1909	1,1844	1,1781	1,1719	1,1661
50 %	1,2352	1,2275	1,2201	1,2127	1,2056	1,1988	1,1921	1,1857	1,1796	1,1736	1,1680
55 %	1,2358	1,2282	1,2208	1,2136	1,2066	1,1999	1,1933	1,1871	1,1811	1,1753	1,1699
60 %	1,2364	1,2289	1,2216	1,2145	1,2075	1,2010	1,1945	1,1884	1,1826	1,1770	1,1719
65 %	1,2370	1,2296	1,2224	1,2153	1,2085	1,2020	1,1957	1,1898	1,1841	1,1787	1,1736
70 %	1,2376	1,2302	1,2232	1,2162	1,2095	1,2031	1,1970	1,1912	1,1857	1,1804	1,1755
75 %	1,2382	1,2309	1,2239	1,2171	1,2105	1,2042	1,1982	1,1925	1,1872	1,1821	1,1774
80 %	1,2389	1,2316	1,2247	1,2179	1,2114	1,2053	1,1994	1,1939	1,1887	1,1837	1,1793

p_{H0}	Normaldruck auf Meereshöhe	1013,25 mBar	0 m Höhe	Faktor 1,0
Luftdruck über Barometer bzw.		1006,64 mb		0,993
p_{H125} Luftdruck über Höhenmeter *		1000,08 mb	0125 m Höhe	0,987
		993,98 mb		0,981
p_{H250}		987,92 mb	0250 m Höhe	0,975
		981,31 mb		0,968
p_{H375}		974,75 mb	0375 m Höhe	0,962
		968,65 mb		0,956
p_{H500}		962,59 mb	0500 m Höhe	0,950
		955,98 mb		0,943
p_{H625}		949,42 mb	0625 m Höhe	0,937
		943,32 mb		0,931
p_{H750}		937,26 mb	0750 m Höhe	0,925
		930,65 mb		0,918
p_{H875}		924,08 mb	0875 m Höhe	0,912
		917,98 mb		0,906
p_{H1000}		911,93 mb	1000 m Höhe	0,900
		905,32 mb		0,893
p_{H1125}		898,75 mb	1125 m Höhe	0,887
		892,65 mb		0,881
p_{H1250}		886,59 mb	1250 m Höhe	0,875
		879,98 mb		0,868
p_{H1375}		873,42 mb	1375 m Höhe	0,862
		867,32 mb		0,856
p_{H1500}		861,26 mb	1500 m Höhe	0,850

Beispiel:

gemessene Temperatur: **26 °**, relative Feuchtigkeit: **30 %** angezeigter Luftdruck : **986 mB**
Neuer Wert: aus der Tabelle **1,1872 g/L * (986 mB / 1013,25 mB) ≈ p 1,155 g/L**

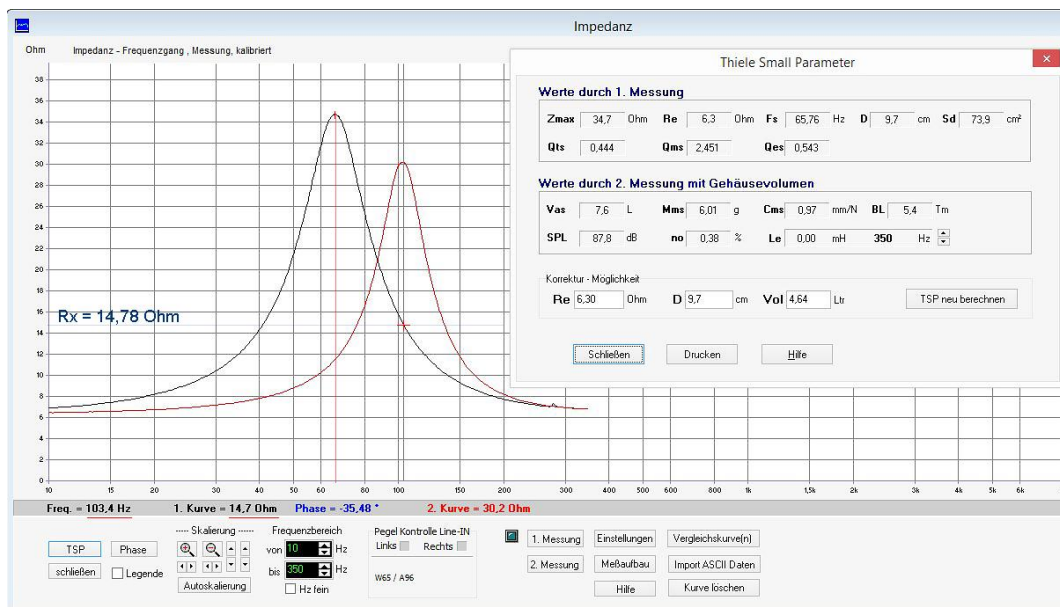
Angezeigter Luftdruck durch Barometer oder z.B. App vom nationalen Wetterdienst

die Werte in den Formeln sind immer in den Ergebnis-Einheiten einzusetzen

<u>Wichtige Formeln und Tabellen:</u>			Beispiel	
D_d	=	$(S_d * 4 / \pi)^{0,5}$	=	9,7 cm
S_d	=	$D_d^2 * \pi / 4$	=	73,90 cm ²
R_{dc}	=	Multimeter	=	6,30 Ω
R_{max}	=		=	34,70 Ω
R_x	=	$(R_{max} * R_{dc})^{0,5}$	=	14,785 Ω
R_{es}	=	$R_{max} - R_{dc}$	=	28,40 Ω
r_0	=	R_{max} / R_{dc}	=	5,508
f_s	=	$1 / (2 * \pi * (C_{ms} * M_{ms})^{0,5}) * 10^3$	=	65,75 Hz $(f_1 * f_2)^{0,5}$
f_1	=	f_s^2 / f_2	=	41,81 Hz
f_2	=	f_s^2 / f_1	=	103,42 Hz
f_a	=	$f_s / ((\rho * V_{as} / M_{ms}) + 1)^{0,5}$	=	41,75 Hz
f_c	=	$f_s * ((\rho * V_{as} / M_{ms}) + 1)^{0,5}$	=	103,66 Hz
Q_{ms}	=	$f_s * (R_{max} / R_{dc})^{0,5} / (f_2 - f_1)$	=	2,504 -
Q_{es}	=	$Q_{ms} / ((R_{max} / R_{dc}) - 1)$	=	0,555 -
Q_{ts}	=	$(Q_{es} * Q_{ms}) / (Q_{es} + Q_{ms})$	=	0,455 -
M_{ms}	=	$1 / ((2 * \pi * f_s)^2 * C_{ms}) * 10^6$	=	6,01 g = $M_{md} + M_{mr}$
M_{mr}	=	$0,575 * S_d^{1,5} / 1000$	=	0,37 g
M_{md}	=	$M_a / ((f_s / f_a)^2 - 1)$	=	5,64 g
M_a	=	$M_{ms} * ((f_s / f_a)^2 - 1)$	=	8,85 g
M_c	=	$M_{ms} * ((f_2 / f_s)^2 - 1)$	=	8,92 g
K	=	$(2 * \pi * f_s)^2 * M_{ms} / 10^6$	=	1,025713 N/mm
C_{ms}	=	$1 / ((2 * \pi * f_s)^2 * M_{ms}) * 10^6$	=	0,975 mm/N
V_{as-p}	=	$((f_s / f_1)^2 - 1) * M_{ms}$	=	8,865 Liter
V_{as}	=	$\rho * c^2 * S_d^2 * C_{ms} / 10^8$	=	7,492 Liter * $\rho = V_{as-p}$
V_T	≈	$(V_{as} / (1 + (f_s / f_1)^2)) * 2 + M_{mr}$	≈	4,691 Liter $(M_c + M_{mr}) / 2$
R_{ms}	=	$(2 * \pi * f_s * M_{ms} / Q_{ms}) / 1000$	=	0,992 kg/s
BL	=	$((2 * \pi * f_s * R_{dc} * M_{ms}) / (Q_{es} * 10^3))^{0,5}$	=	5,63 Tm
η_0	=	$((4 * \pi^2 / c^3) * f_s^3 * V_{as} / Q_{es}) / 10$	=	0,38 %
SPL	=	$\eta_0^{\log} * 10 + 92$ dB	=	87,77 dB
X_{max}	=	Meßschieber	=	+ / - 5,5 mm
V_d	=	$S_d * X_{max} * 2 / 10^4$	=	0,081 Liter

Testvolumen V_T ermitteln: Maße in cm

V_C	=	Chassi	$[\pi * h / 12 * (D_d * d + D_d^2 + d^2)] / 1000$	=	Liter
V_{PP}	=	– PhasePlug	$[d^2 * \pi / 4 * h / 3]$	/ 1000 =	– Liter
V_D	=	Deckel	$[D^2 * \pi / 4 * H]$	/ 1000 =	+ Liter
V_B	=	TSP-Box	$[L * B * H]$	/ 1000 =	+ Liter
V_S	=	– "Steine" je nach Form und Anzahl		=	– Liter
V_T	=	Gesamtvolumen $V_C - V_{PP} + V_D + V_B - V_{S1} - V_{S2} \dots$		=	Liter



(Grafik 3) Hier sehen wir eine Resonanzverschiebung mit Volumen. f_c ist hier f_2 .

p	=	zum Zeitpunkt der Messung	$\approx$	1,185	g/L
c	=	zum Zeitpunkt der Messung	$\approx$	344,59	m/s

(Grafik 4) sind verschiedene Deckel, Test-Boxen, "Steine" und eine Spannvorrichtung zu sehen.



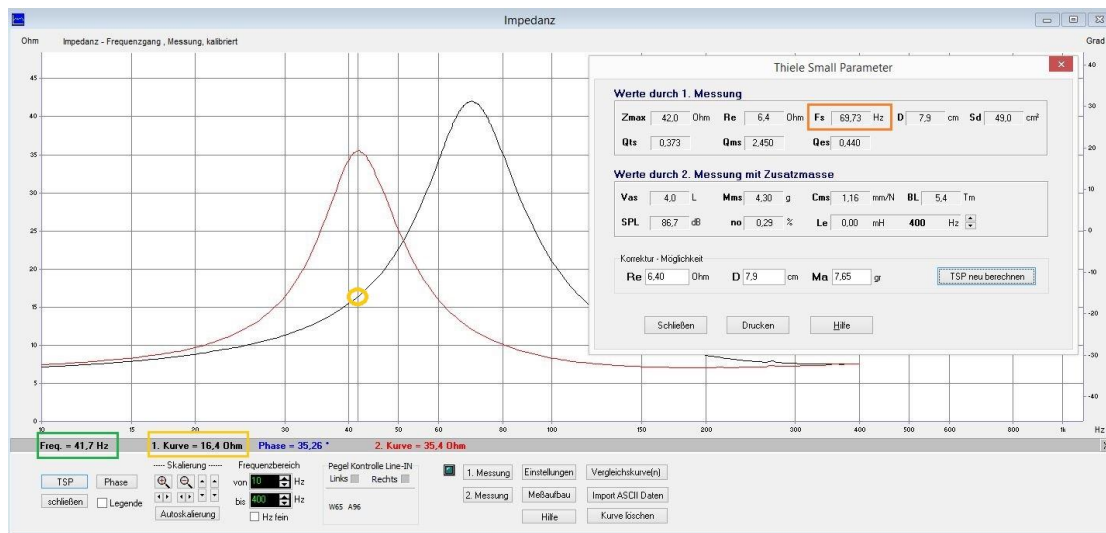
die Werte in den Formeln sind immer in den Ergebnis-Einheiten einzusetzen

Wichtige Formeln und Tabellen:

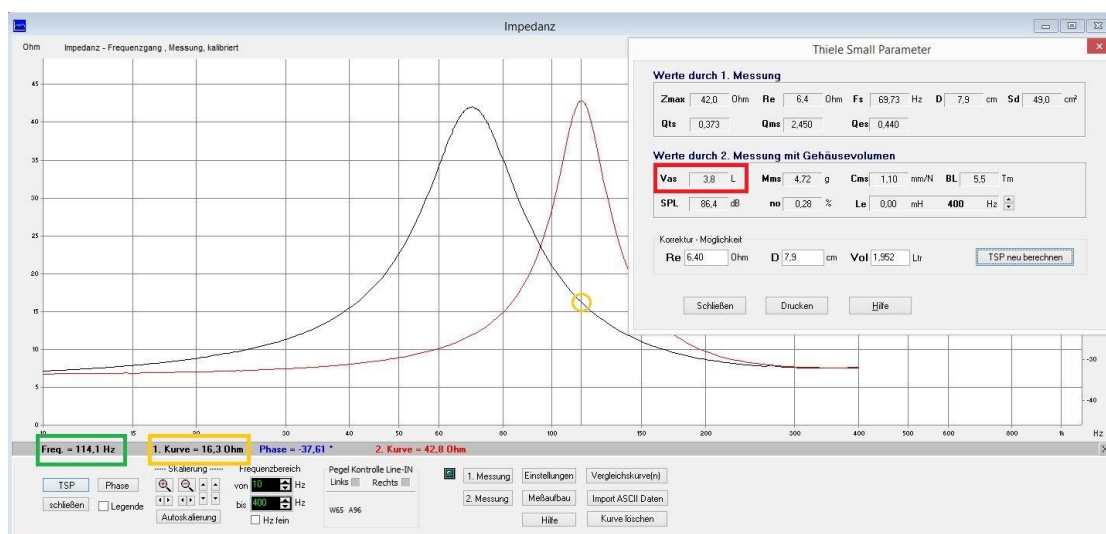
am Beispiel

H. TB W4-1320 SIF

D_d	=	$(S_d * 4 / \pi)^{0,5}$	=	7,9	cm	
S_d	=	$D_d^2 * \pi / 4$	=	49	cm ²	T. 48 - H. 57cm ²
R_{dc}	=	Multimeter	=	6,40	Ω	T. 6,2 - H. 6,3
R_{max}	=	U_{mess} / I_{mess}	=	42,0	Ω	H. 36
R_x	=	$(R_{max} * R_{dc})^{0,5}$	=	16,40	Ω	
R_{es}	=	$R_{max} - R_{dc}$	=	35,6	Ω	
r_0	=	R_{max} / R_{dc}	=	6,56		
f_s	=	$1 / (2 * \pi * (C_{ms} * M_{ms})^{0,5}) * 10^3$	=	68,68	Hz	T.59 - H. 75
f_1	=	f_s^2 / f_2	=	41,71	Hz	
f_2	=	f_s^2 / f_1	=	113,1	Hz	
f_a	=	$f_s / ((V_{as-p} / M_{ms}) + 1)^{0,5}$	=	41,70	Hz	
f_c	=	$f_s * ((V_{as-p} / M_{ms}) + 1)^{0,5}$	=	113,08	Hz	
M_{ms}	=	$1 / ((2 * \pi * f_s)^2 * C_{ms}) * 10^6$	=	4,629	g	T. 4,0 - H. 3,9
M_{mr}	=	$(0,575 * S_d^{1,5}) / 1000$	=	0,20	g	
M_d	=	$M_a / ((f_s / f_a)^2 - 1)$	=	4,61	g	$M_{ms} - M_{mr}$
M_a	=	$M_{md} * ((f_s / f_a)^2 - 1)$	=	7,89	g	
Q_{ms}	=	$f_s * (R_{max} / R_{dc})^{0,5} / (f_2 - f_1)$	=	2,465	-	T. 1,7 - H. 2,2
Q_{es}	=	$Q_{ms} / ((R_{max} / R_{dc}) - 1)$	=	0,444	-	T. 033 - H. 0,45
Q_{ts}	=	$(Q_{es} * Q_{ms}) / (Q_{es} + Q_{ms})$	=	0,376	-	
R_{ms}	=	$(2 * \pi * f_s * M_{ms} / Q_{ms}) / 1000$	=	0,809	kg/s	
BL	=	$((2 * \pi * f_s * R_{dc} * M_{ms}) / (Q_{es} * 10^3))^{0,5}$	=	5,37	T*m	T.5,3 - H.4,8
η_0	=	$((4 * \pi^2 / c^3) * f_s^3 * V_{as} / Q_{es}) / 10$	=	0,276	%	
SPL	=	$\eta_0^{log} * 10 + 92 \text{ dB}$	=	86,41	dB	
L_e	=	LCR-Multimeter	=	0,292	mH	T. 0,33 - H. 0,024
K	=	$(2 * \pi * f_s)^2 * M_{ms} / 10^6$	=	0,862	N/mm	
C_{ms}	=	$1 / ((2 * \pi * f_s)^2 * M_{ms}) * 10^6$	=	1,16	mm/N	T. 1,18 - H. --
V_{as-p}	=	$((f_s / f_1)^2 - 1) * M_{ms}$	=	7,93	Liter	?
V_{as-d}	=	$1,42 * S_d^2 * C_{ms} / 10^3$	=	3,955	Liter	T. 5,9 - H. 6,9
V_{as}	=	$\rho * c^2 * S_d^2 * C_{ms} / 10^8$	=	3,919	Liter	$* \pi^{0,5} = 6,95$
V_T	≈	$V_{as} / 2$	≈	1,96	Liter	
X_{max}	=	Meßschieber	=	+ / - 3	mm	
V_d	=	$S_d * X_{max} * 2 / 10^4$	=	0,029	Liter	



TB W4-1320 SIF mit M_a 7,65 g



TangBand W4-1320 SIF in Volumenbox 1,952 Liter gemessen

ρ = zum Zeitpunkt der Messung 1,185 g/L
 c = zum Zeitpunkt der Messung 22°C 344,59 m/s

T = Ergebnis von Bernd Timmermann (Hobby HiFi),
 Chassi-Nachgiebigkeit von H = Ergebnis des Herstellers

V_{as-d} Formel aus "Lautsprecherbau" V. Dickason Formel = $1,42 * S_d^{^2} * C_{ms} / 10^{^3}$ = 3,955 Liter

V_{as} Formel aus "Lautsprecher-Messtechnik" zeigt = $\rho * c^{^2} * S_d^{^2} * C_{ms} / 10^{^8}$ = 3,919 L an.
 a) $\approx$ 2 % weniger wie HBX im oberen Bild 4,0 Liter
 c) $\approx$ 3 % mehr wie HBX im unteren Bild 3,8 Liter

V_{as-p} Mit dieser Formel stimmen f_a , f_c und M_a ; = $((f_s / f_1)^{^2} - 1) * M_{ms}$ = 7,93 Liter

V_T Angaben deuten nur die benötigte zirka Größe des Test-Volumen an.

bevorzugte Bauart

geschlossenes Gehäuse	[Q_{ts} 0,45 - 0,85]	EBP	= 40 - 75
TQWT-Gehäuse	[Q_{ts} 0,35 - 0,65]	EBP	= 60 - 90
Bassreflex Gehäuse	[Q_{ts} 0,25 - 0,45]	EBP	= 75 - 150
Horn-Gehäuse	[Q_{ts} 0,15 - 0,30]	EBP	= 120 - 240