

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Raketenantriebe
D-74239 Hardthausen

Zoltán Faragó

www.farago.info

OPTIMIERUNG VON RESONATOR KONSTELLATIONEN ZUR UNTERDRÜCKUNG HOCHFREQUENTER BRENNKAMMERSCHWINGUNGEN

Seminarvortrag – DLR Lampoldshausen, 25. 01. 2007

und

Arbeitsbesprechung – TU München, 15. 02. 2007

- Heiß- und Kaltversuche zur Verbrennungsinstabilität
- Theoretische Überlegungen zur Brennraumakustik
- Versuchsergebnisse
 - Versuchsdurchführung
 - Optimale Winkelposition der Resonatoren
 - Einfluss der Änderung der Schallgeschwindigkeit
 - Optimale der Anzahl der Resonatoren
 - Optimaler Resonatordurchmesser
 - Optimale Längenabstufung der Resonatoren
 - Weitere Möglichkeiten der Dämpfungserhöhung der Resonatoren
 - Resonatoren mit turbulenzfördernden Elementen
 - Modeunterdrückung mit Obertönen des Resonators
- Schlussbetrachtungen

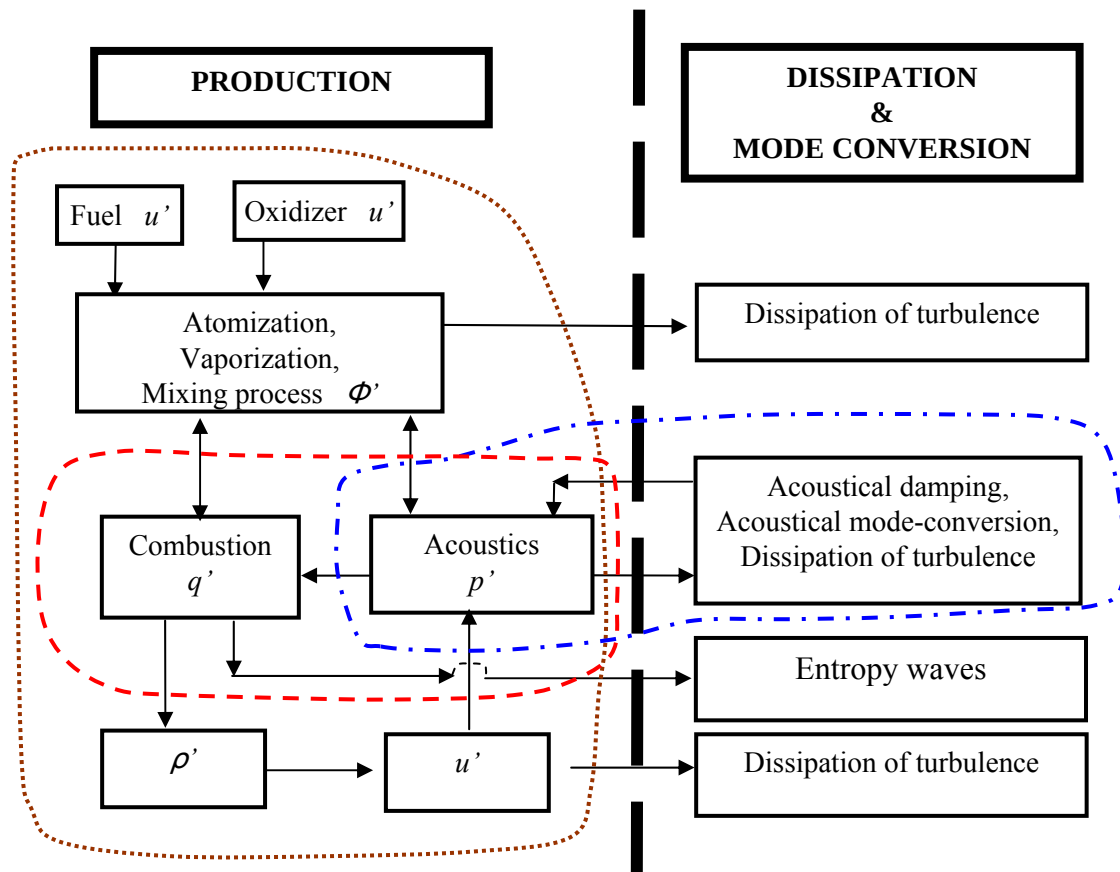
Heiß- und Kaltversuche zur Verbrennungsinstabilität

Time	Action
(ms)	Beginning of injection
0	Ignition
2100	Parasitic frequency 3000 Hz Elevation of parasitic frequency Parasitic frequency 5000 Hz
0 - 3000	
3000 – 9000	End of experiment
9000 – 9500	
9500	Intensive pressure pulsation, especially at frequencies of
	3700 Hz Mode 1T- σ
4700 - 7700	4100 Hz Mode 1T π
	4500 Hz Mode 1T+ σ

[1]

Hot fire experiment

H₂ - O₂ ; 14 g/s; $\Phi \approx 1$; 6 bar



..... Hot fire experiments

- . - . Cold flow experiments

- - - Rayleigh criterion

$$u = \bar{u} + u'$$

$$p = \bar{p} + p'$$

$$q = \bar{q} + q'$$

$$\int_t q'(t) p'(t) dt > 0$$

$$\int_t \int_V q' \cdot p' dt dV > 0$$

Heißversuche

Alle Betriebsparameter üben einen Einfluss aus:

Zu viele Parameter, schlechte Wiederholbarkeit,
Parameter können schwer voneinander getrennt werden, ...

Kaltversuche

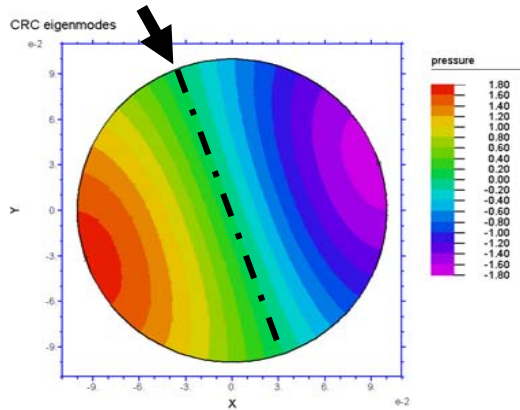
Nur die akustischen Eigenschaften werden untersucht:

Erhöhte Genauigkeit, bessere Wiederholbarkeit,
einfachere Interpretation, ...

Theoretische Überlegungen zur Brennraumakustik

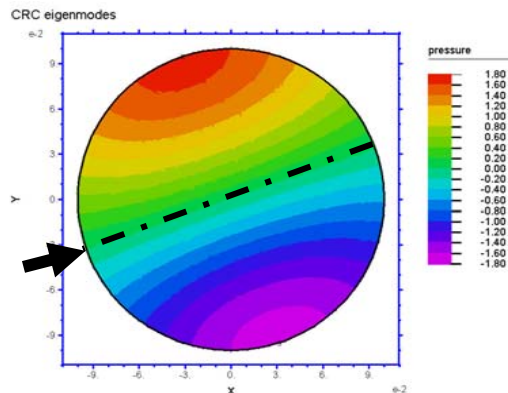
Resonanzverhalten eines gekoppelten Brennkammer-Resonator-Systems

Variante A

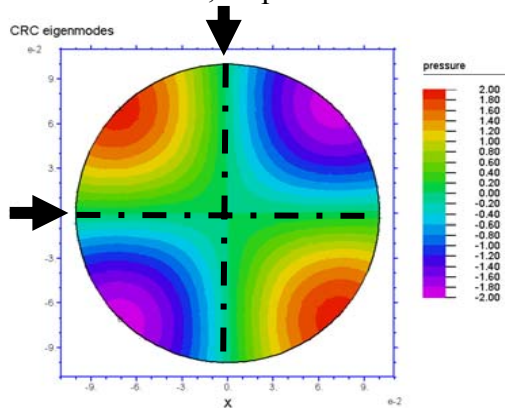


1T 999 Hz; $\Delta p' = \pm 1.8$

Variante B

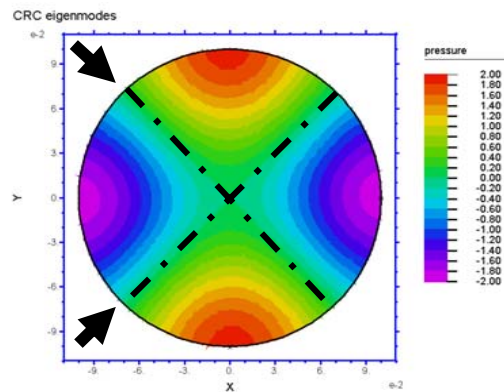


1T 999 Hz; $\Delta p' = \pm 1.8$



2T 1659 Hz

$$f_{m,n} = \frac{\alpha_{n,m} \cdot c}{2 \cdot \pi \cdot r}$$



2T 1659 Hz

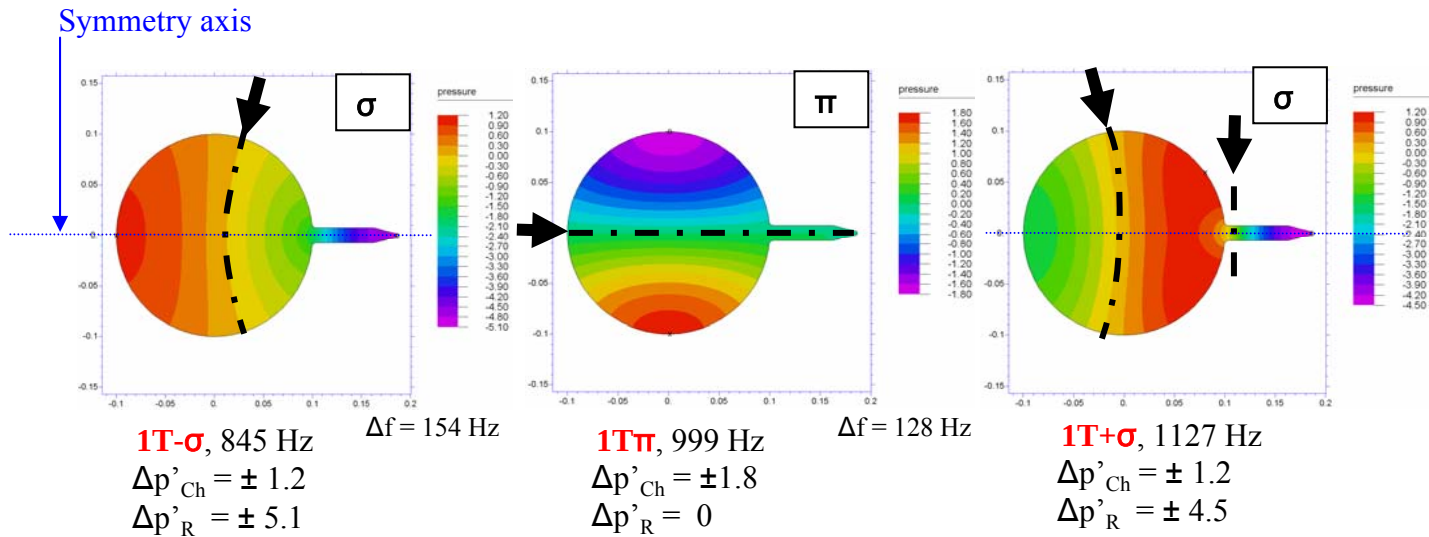
$n = 1, 2, 3 \dots$; $m - 1 = 0, 1, 2 \dots$
Order of T Order of R

Winkelverschiebung
A – B

$$\alpha = 360^\circ / (4 \cdot n)$$

n : Ordnung des
Tangentialmodes

Calculation on pressure fluctuation in a cylindrical chamber [2]



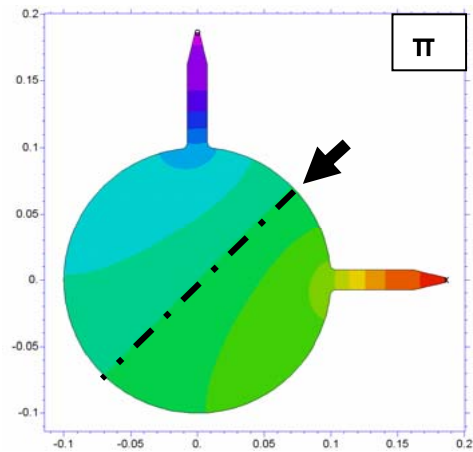
$$f_{m,n} = \frac{\alpha_{n,m} \cdot c}{2 \cdot \pi \cdot r}$$

$$f_l = \frac{(2 \cdot l - 1) \cdot c}{4 \cdot L}$$

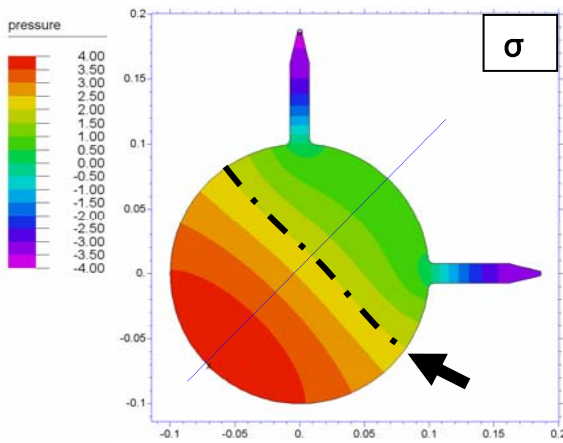
$$\frac{(2 \cdot l - 1) \cdot c}{4 \cdot L} = \frac{\alpha_{n,m} \cdot c}{2 \cdot \pi \cdot r}$$

Sigma-Mode: Die Druckverteilung ist symmetrisch bezüglich Spiegelung and der geometrischen Symmetrieachse

Pi-Mode: Die Druckverteilung ist anti-symmetrisch bezüglich Spiegelung and der geometrischen Symmetrieachse

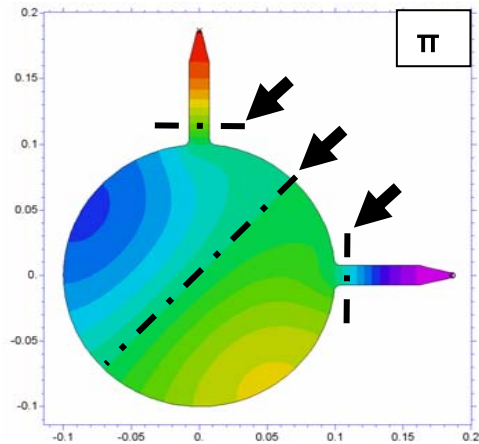


1T- π 830 Hz
 $\Delta p'_{\text{Ch}} = \pm 1.5$
 $\Delta p'_{\text{R}} = \pm 4.0$

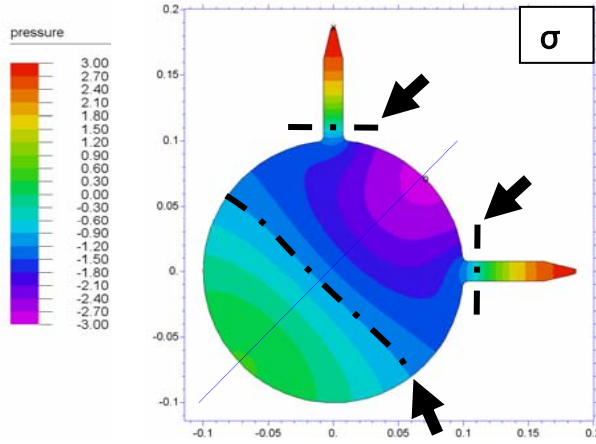


1T- σ 860 Hz
 $\Delta p'_{\text{Ch}} = \pm 1.2$
 $\Delta p'_{\text{R}} = \pm 3,6$

1 Resonator
 1T-
 845 Hz



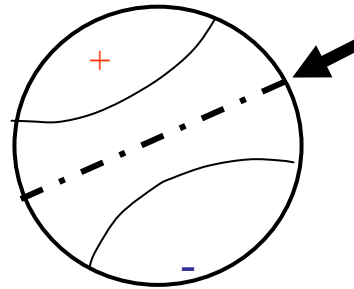
1T+ π 1111 Hz
 $\Delta p'_{\text{Ch}} = \pm 1.5$
 $\Delta p'_{\text{R}} = \pm 3.0$



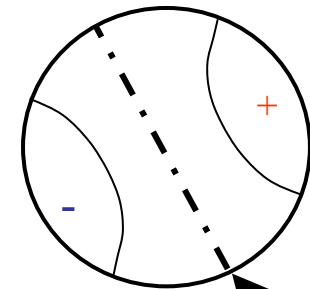
1T+ σ 1147 Hz
 $\Delta p'_{\text{Ch}} = \pm 1.8$
 $\Delta p'_{\text{R}} = \pm 3,6$

1 Resonator
 1T+
 1127 Hz

Brennkammer
ohne Resonator

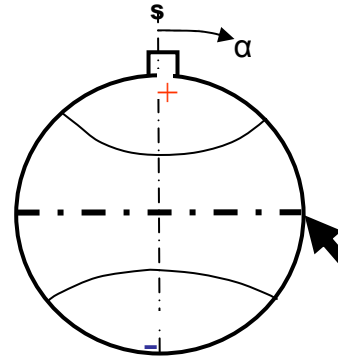


1T A

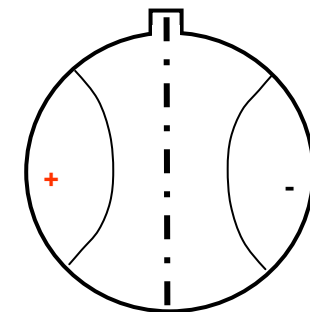


1T B

Brennkammer
mit einem Resonator
Resonatorlänge:
 $L \ll r$

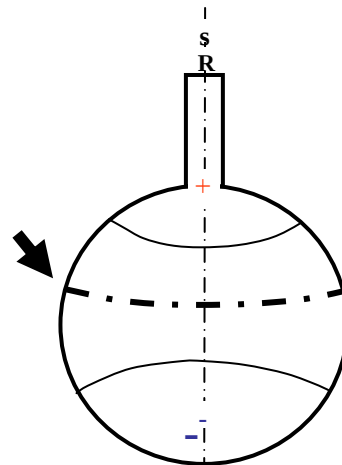


1T σ

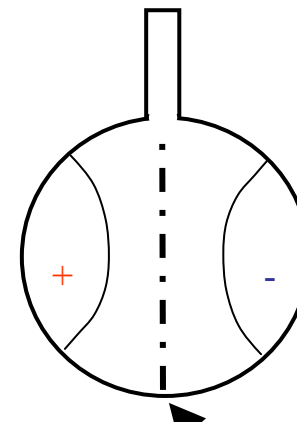


1T π

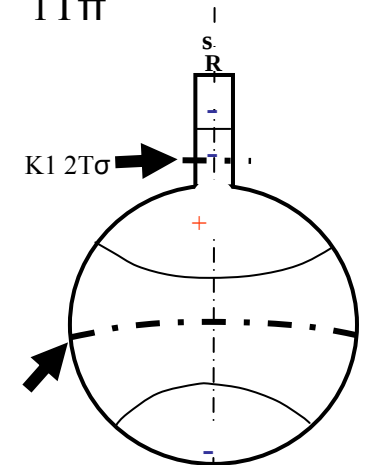
Brennkammer
mit einem Resonator
Resonatorlänge:
 $L = 0.854 \cdot r$



1T - σ



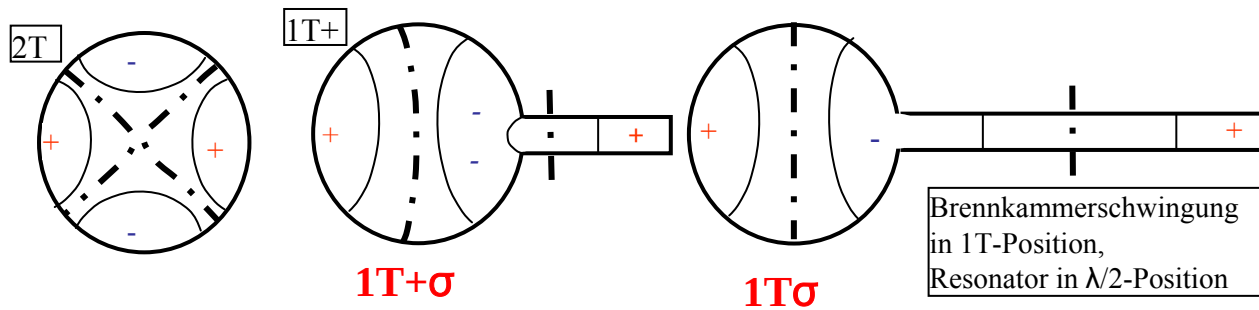
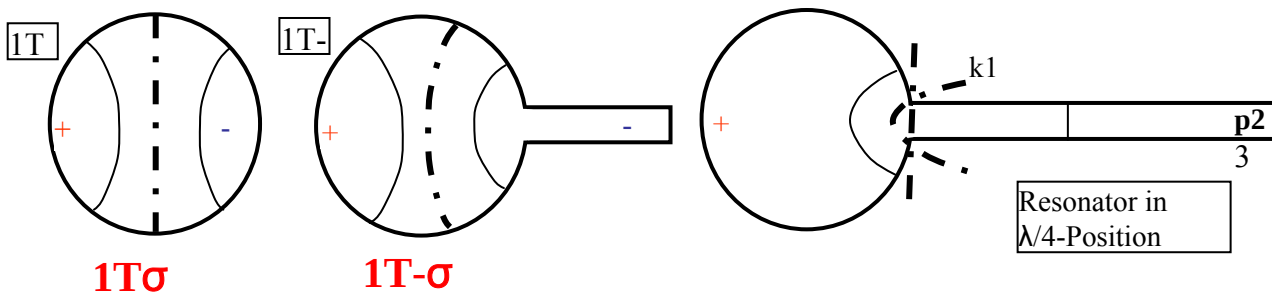
1T π

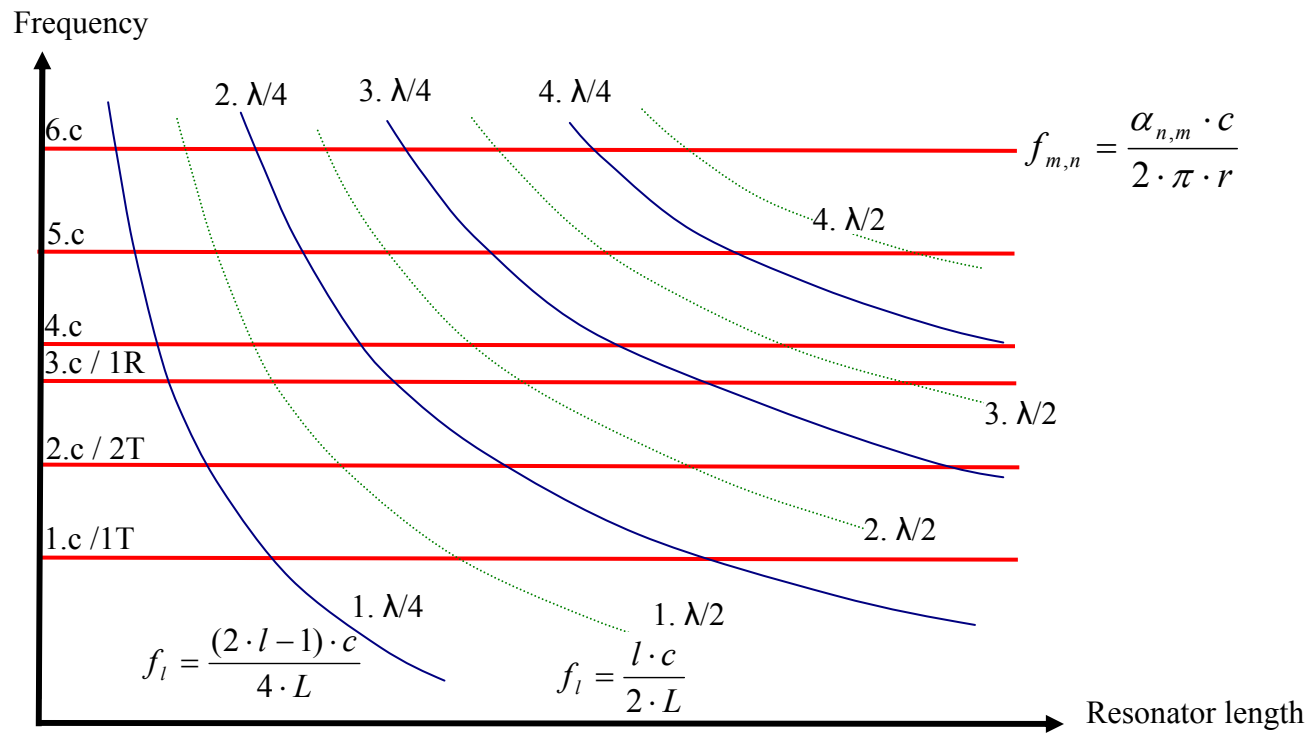


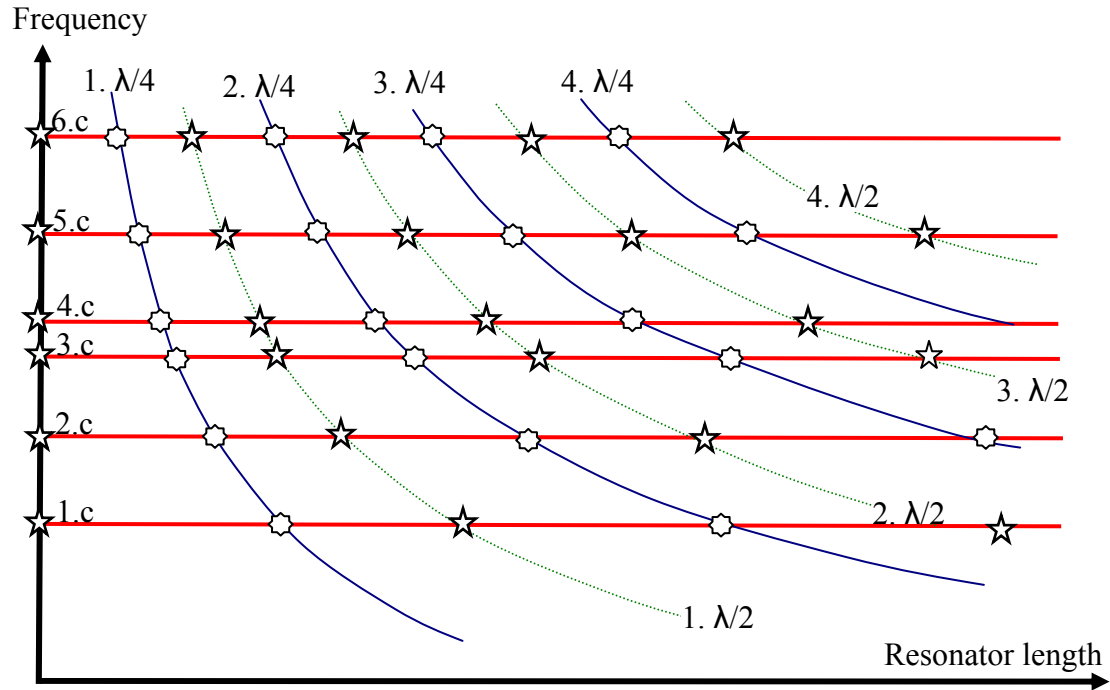
1T + σ

Brennkammer mit einem Resonator

Resonatorlänge: $L = 2 \cdot 0.854 \cdot r$

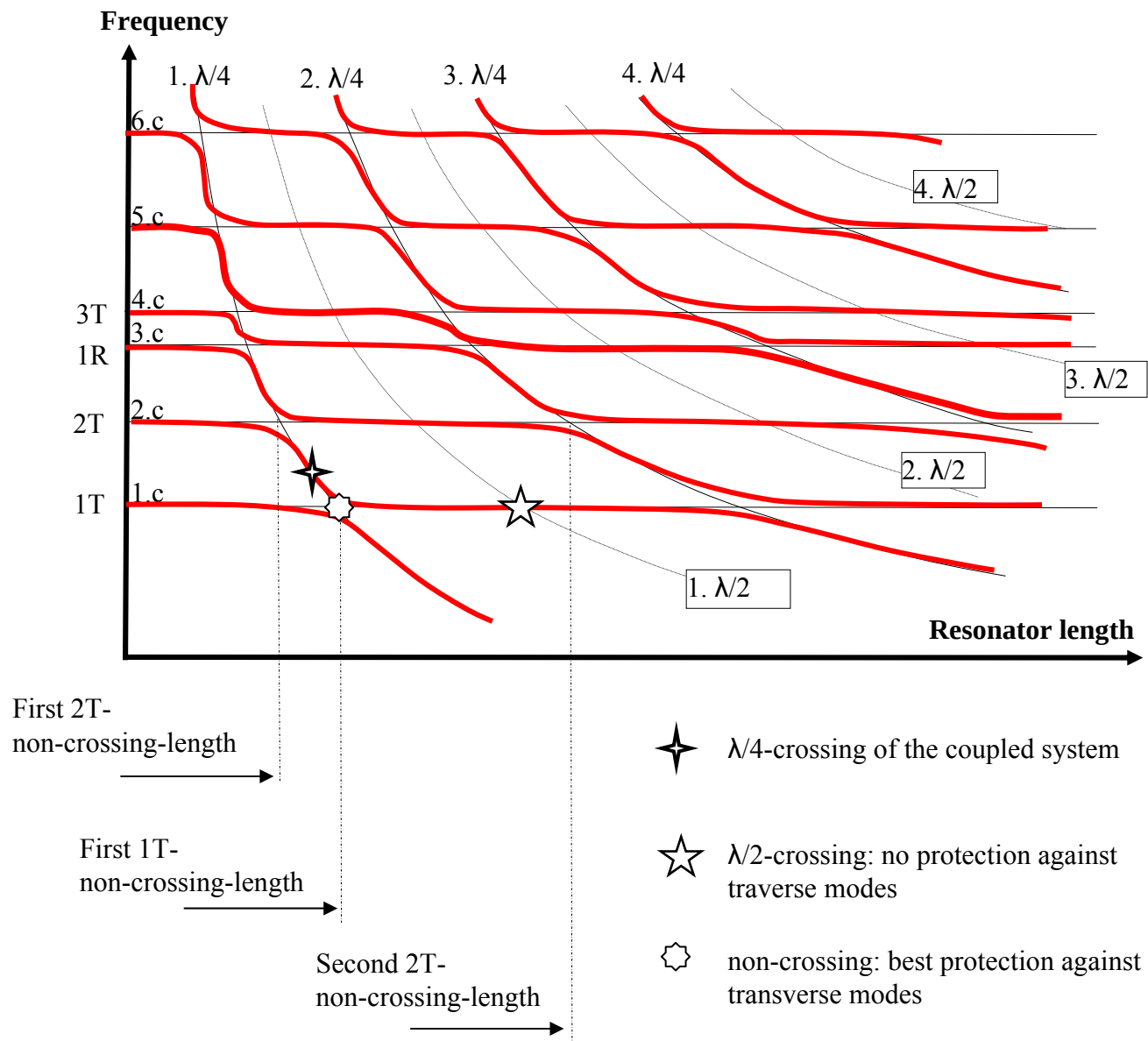




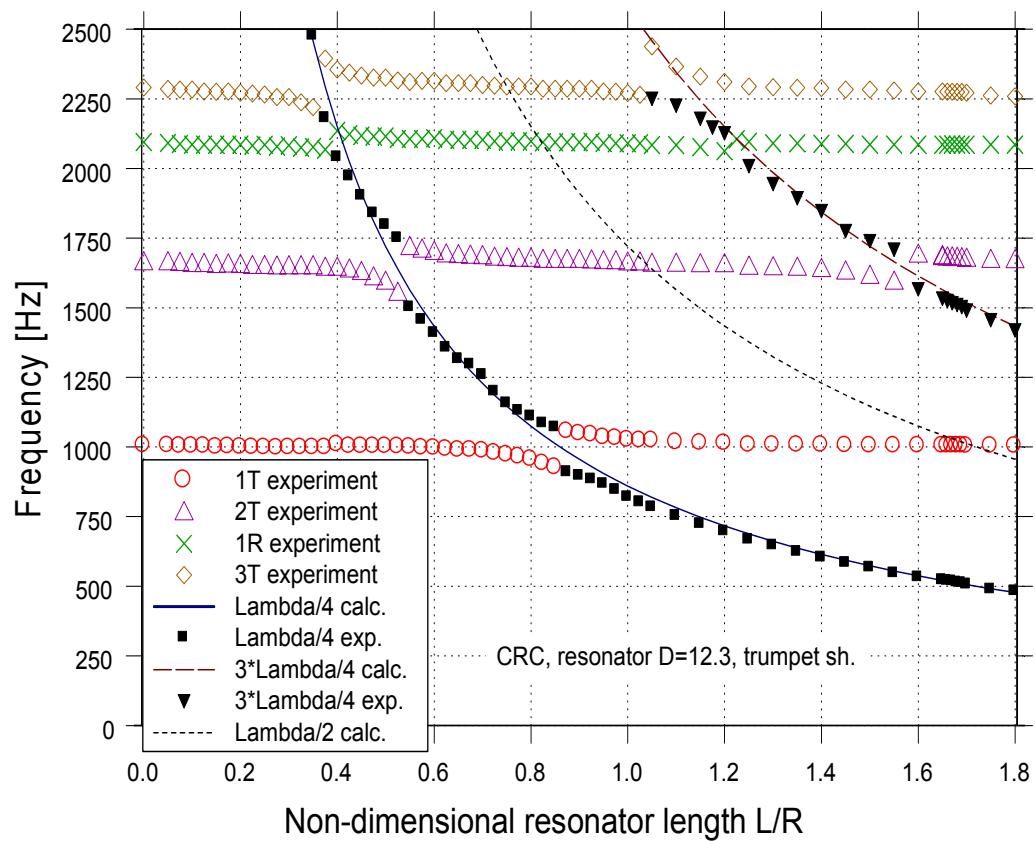


$$\text{⊛} \quad \frac{(2 \cdot l - 1) \cdot c}{4 \cdot L} = \frac{\alpha_{n,m} \cdot c}{2 \cdot \pi \cdot r}$$

$$\text{☆} \quad \frac{(2 \cdot l - 1) \cdot c}{2 \cdot L} = \frac{\alpha_{n,m} \cdot c}{2 \cdot \pi \cdot r}$$



Resonance frequency in the chamber VS resonator length



Equation A

Equation B

Change of characteristics at non-crossing

Angekoppelte Resonatoren modifizieren die Eigenschaften der akustischen Eigenmoden (Frequenz, Linienbreite, Intensität ...)

Jeder Tangentialmode tritt in zwei Varianten auf, deren Winkelverhältnis $360^\circ/(4 \cdot n)$ beträgt, mit n als Ordnung der Tangentialmodes (Sigma- und Pi-Mode, wenn Symmetrielinie vorhanden ist).

Resonatorlängen, die die Gleichung

$$\frac{(2 \cdot l - 1) \cdot c}{4 \cdot L} = \frac{\alpha_{n,m} \cdot c}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad \text{Eigenfrequenz } \lambda/4\text{-Rohr} = \text{Eigenfrequenz Brennkammer}$$

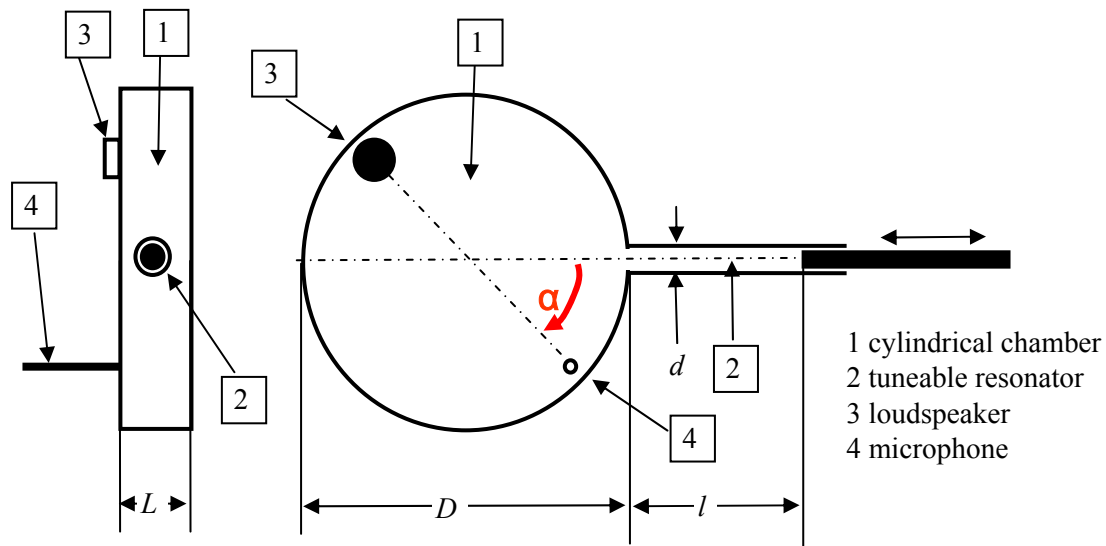
erfüllen, führen zur optimalen Unterdrückung des transversen Modes der Ordnung (n, m) in der Brennkammer (Anti-Cossing-Länge). Resonatorlängen, die die Gleichung

$$\frac{l \cdot c}{2 \cdot L} = \frac{\alpha_{n,m} \cdot c}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad \text{Eigenfrequenz } \lambda/2\text{-Rohr} = \text{Eigenfrequenz Brennkammer}$$

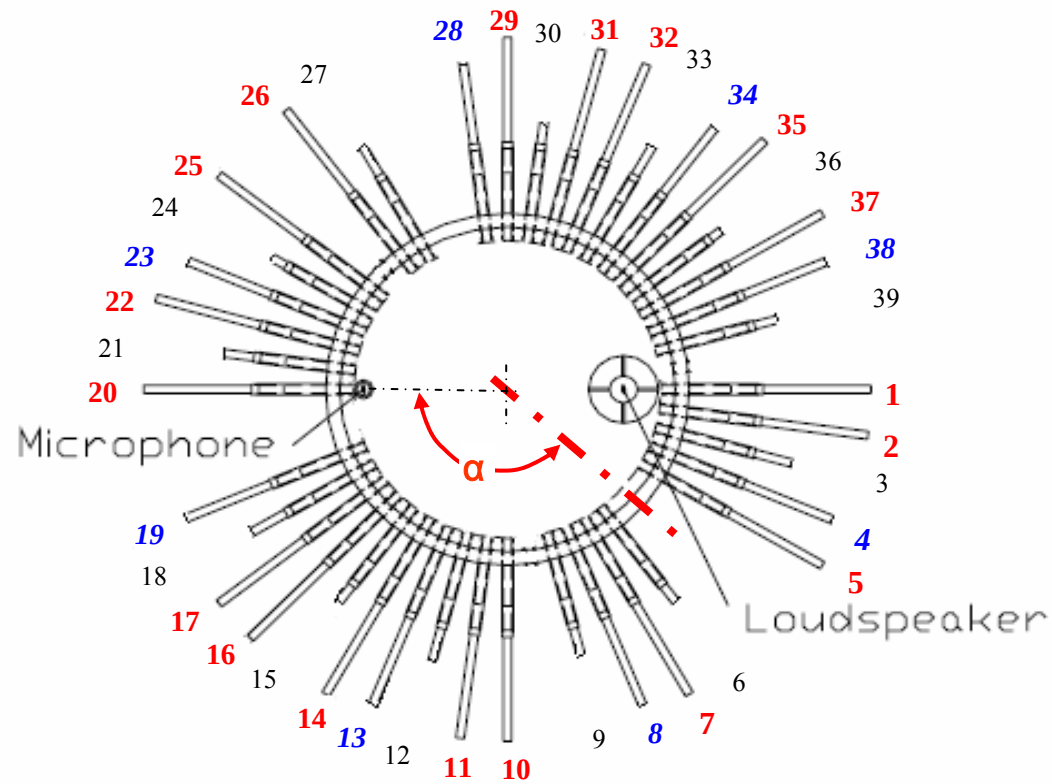
erfüllen, führen zu Druckschwingung des transversen Modes der Ordnung (n, m) die identisch ist mit der einer zylindrischen Brennkammer ohne Resonator (doppelte Anti-Cossing-Länge) [3].

Versuche

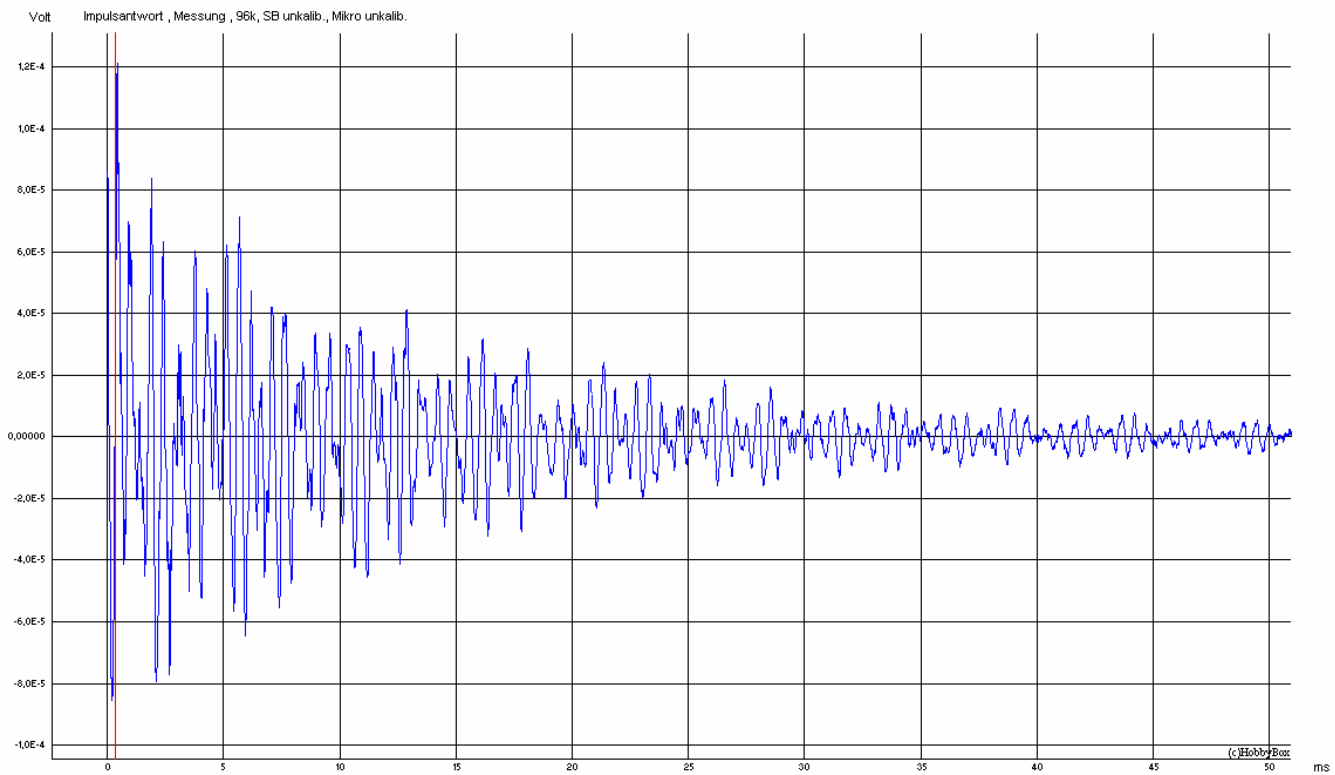
Versuchsdurchführung



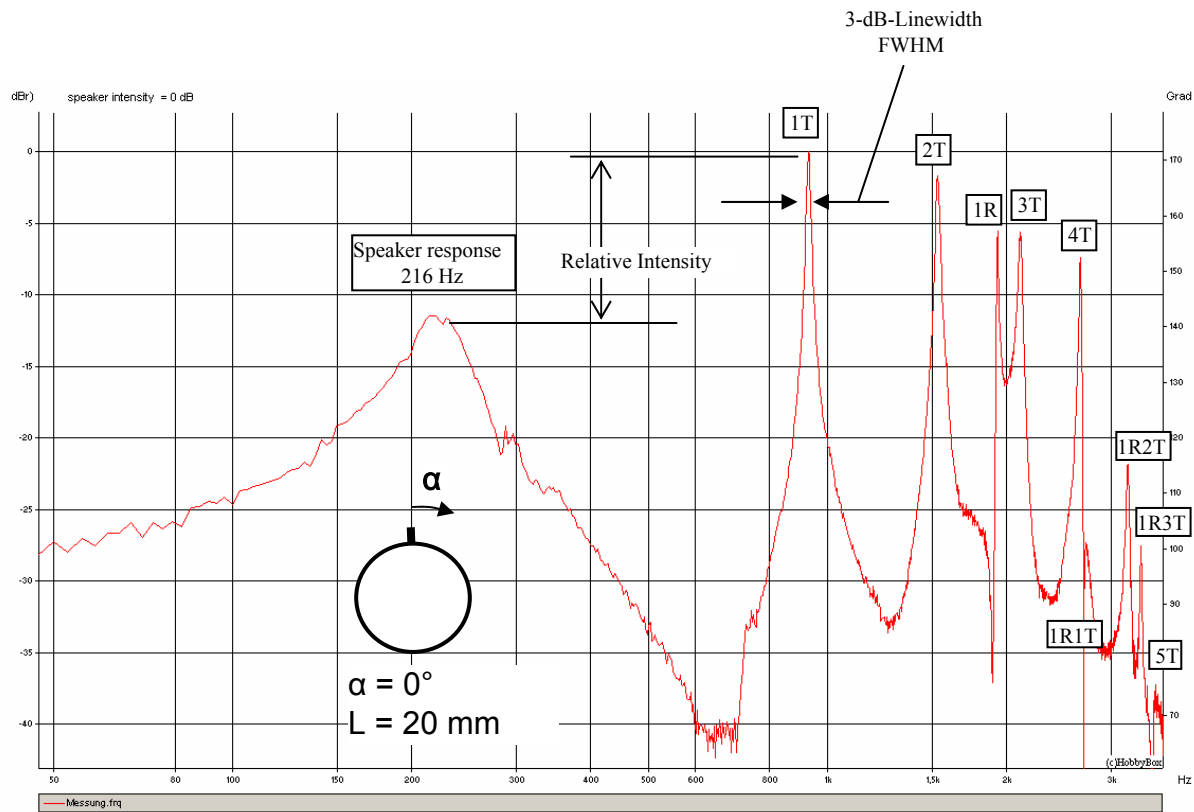
Sketch of the experimental equipment [4]



*Experiments Corresponding to EADS Project AESTUS
– Case 0490-004 as example of state of the art*



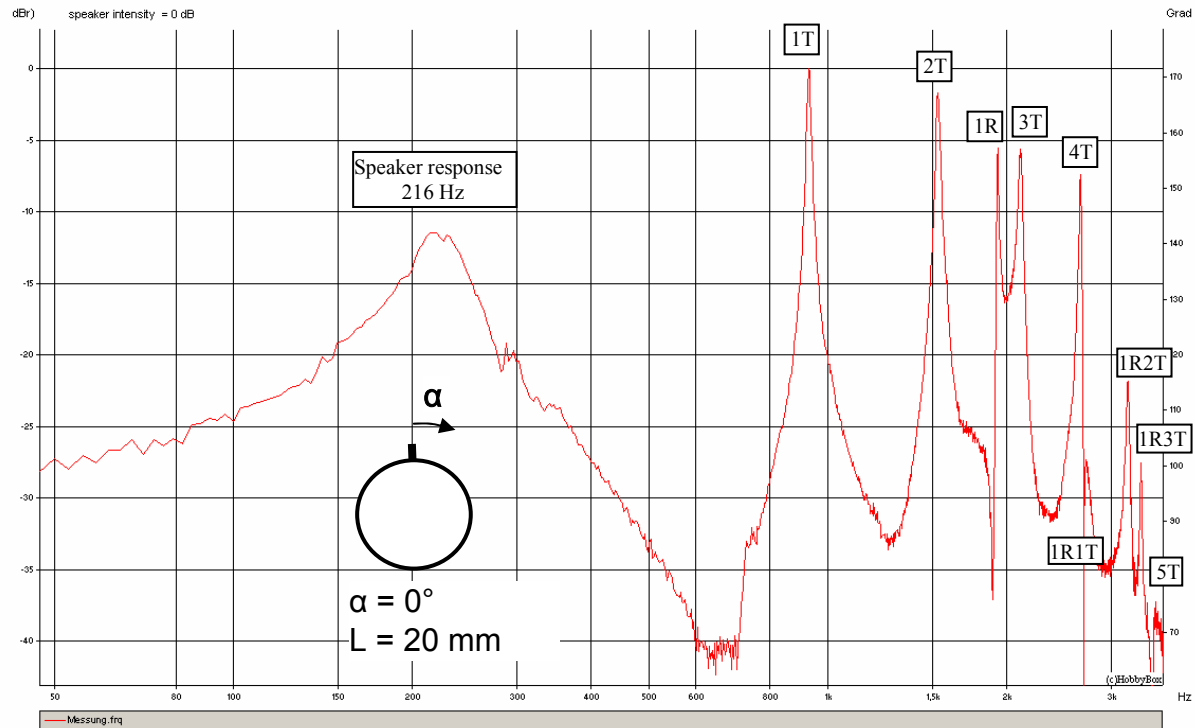
Microphone signal of decaying noise in the chamber



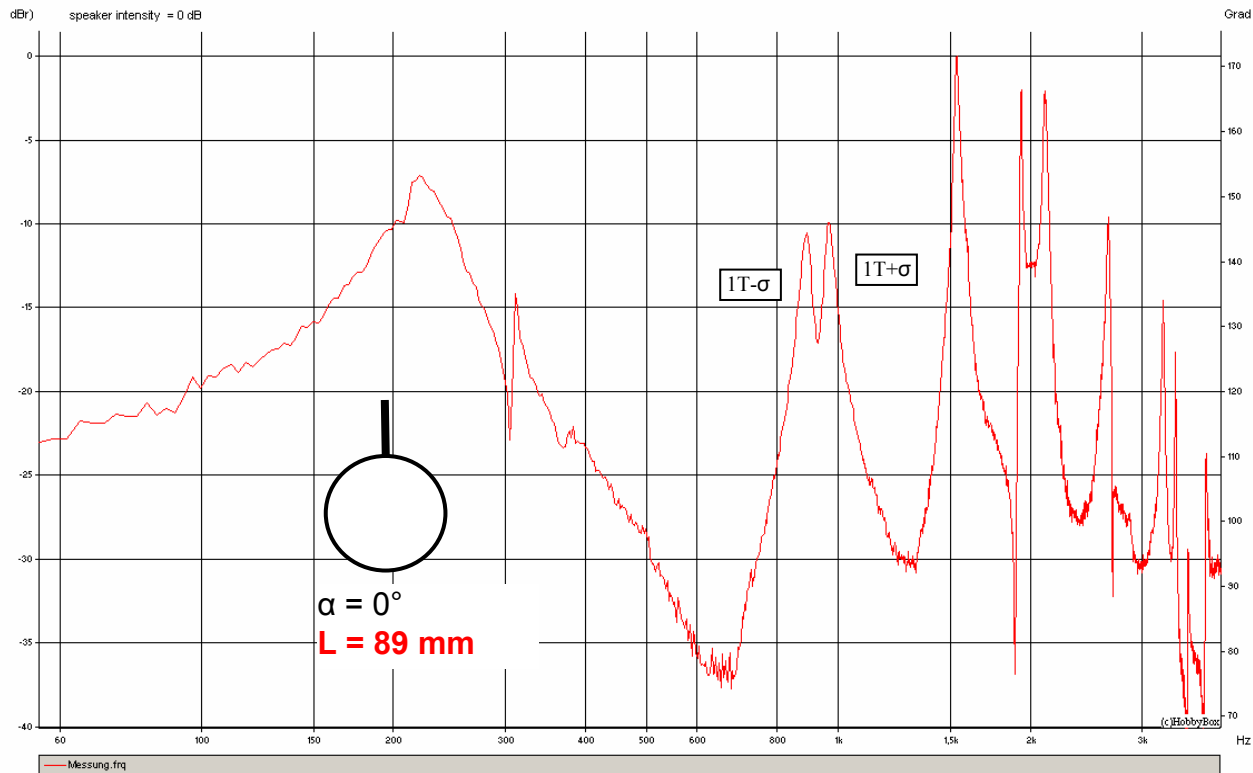
FFT analysis of microphone signal

No.	n	m	α_{nm}	Mode	Calculated frequency (Hz)	Measured frequency (Hz)
1	1	1	1.8410	1T	919	930
2	2	1	3.0541	2T	1525	1530
3	0	2	3.8318	1R	1913	1910
4	3	1	4.2013	3T	2097	2100
5	4	1	5.3175	4T	2654	2660
6	1	2	5.3320	1R1T	2661	2670
7	5	1	6.4160	5T	3203	3210
8	2	2	6.7085	1R2T	3349	3350
9	0	3	7.0155	2R	3502	3500
10	6	1	7.5018	6T	3745	3740
<i>11</i>	-	-	-	<i>1L</i>	<i>3920</i>	<i>3910</i>
12	3	2	8.0146	1R3T	4001	not found
<i>13</i>	-	-	-	<i>1L1T</i>	<i>4026</i>	<i>4010</i>
<i>14</i>	-	-	-	<i>1L2T</i>	<i>4206</i>	<i>4200</i>
15	1	3	8.5363	2R1T	4261	very weak
16	7	1	8.5781	7T	4282	not found
<i>17</i>	-	-	-	<i>1L1R</i>	<i>4362</i>	<i>very weak</i>
<i>18</i>	-	-	-	<i>1L3T</i>	<i>4446</i>	<i>4430</i>
19	4	2	9.2825	1R4T	4634	4620
<i>20</i>			-	<i>1L4T</i>	<i>4734</i>	<i>4720</i>
21	8	1	9.6475	8T	4816	4820

Optimale Winkelposition

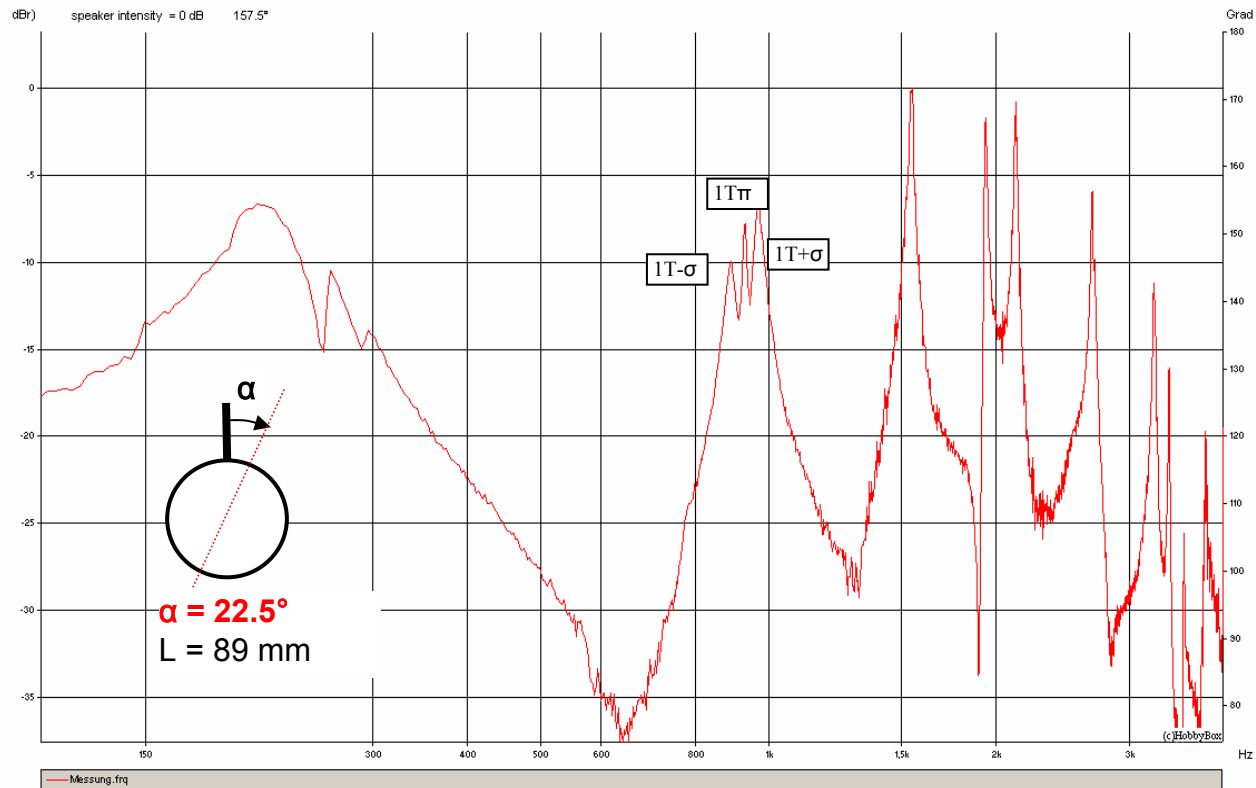


1 Resonator, Resonator length $\ll$ anti-crossing length



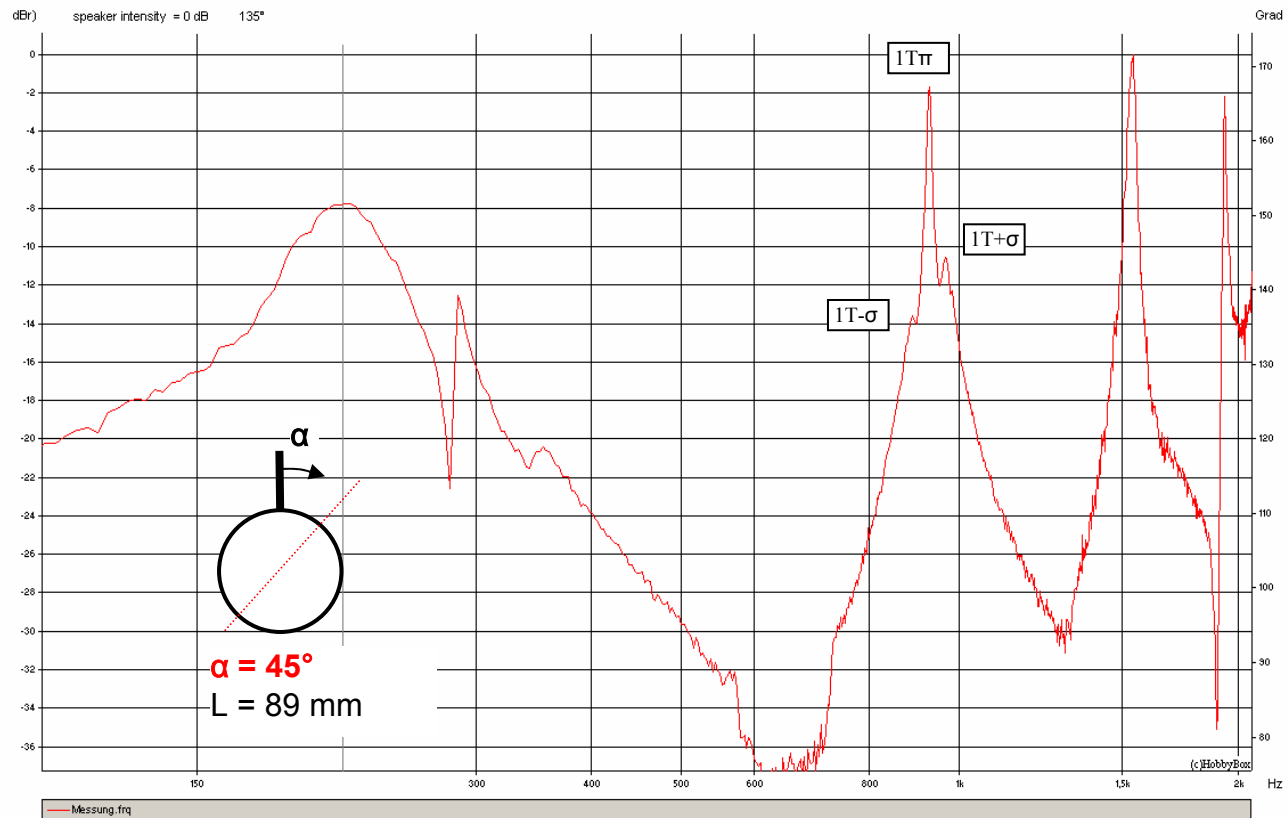
1 Resonator

Resonator length = anti-crossing length



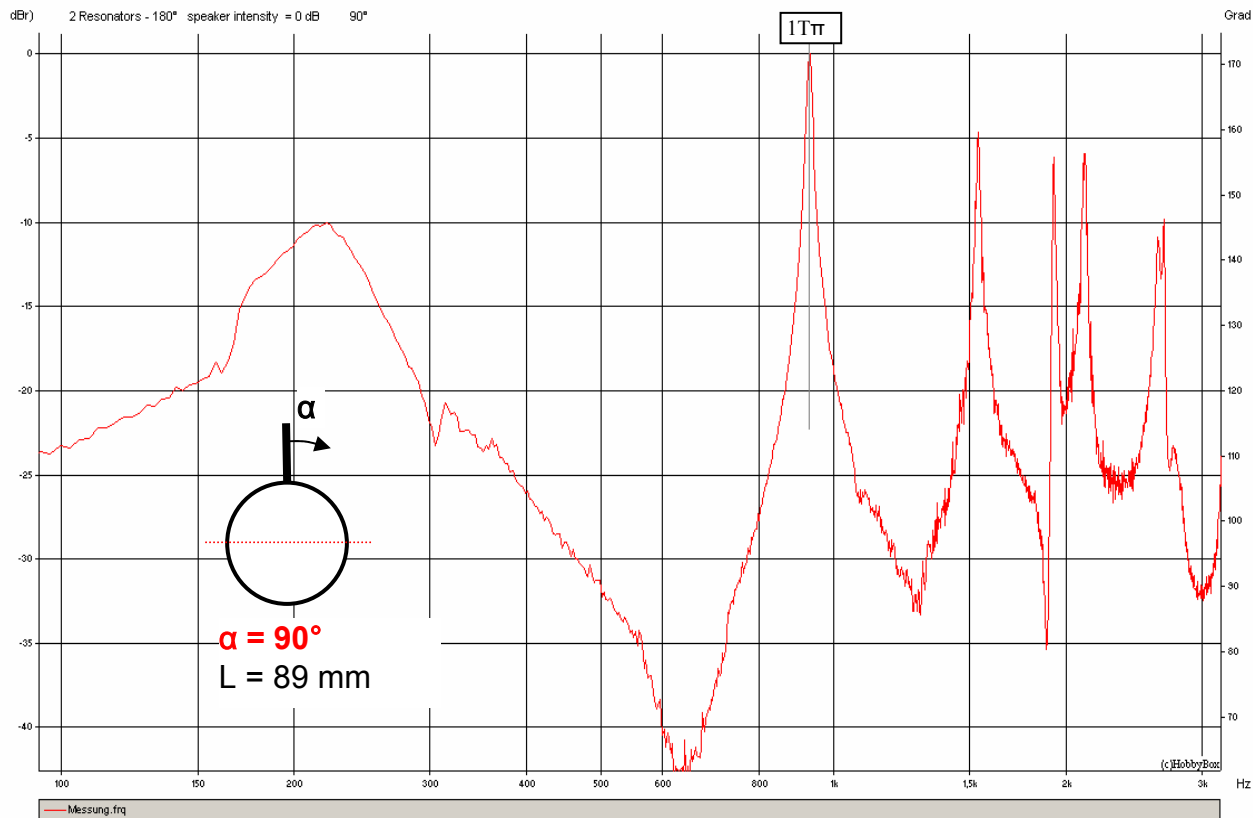
1 Resonator

Resonator length = anti-crossing length

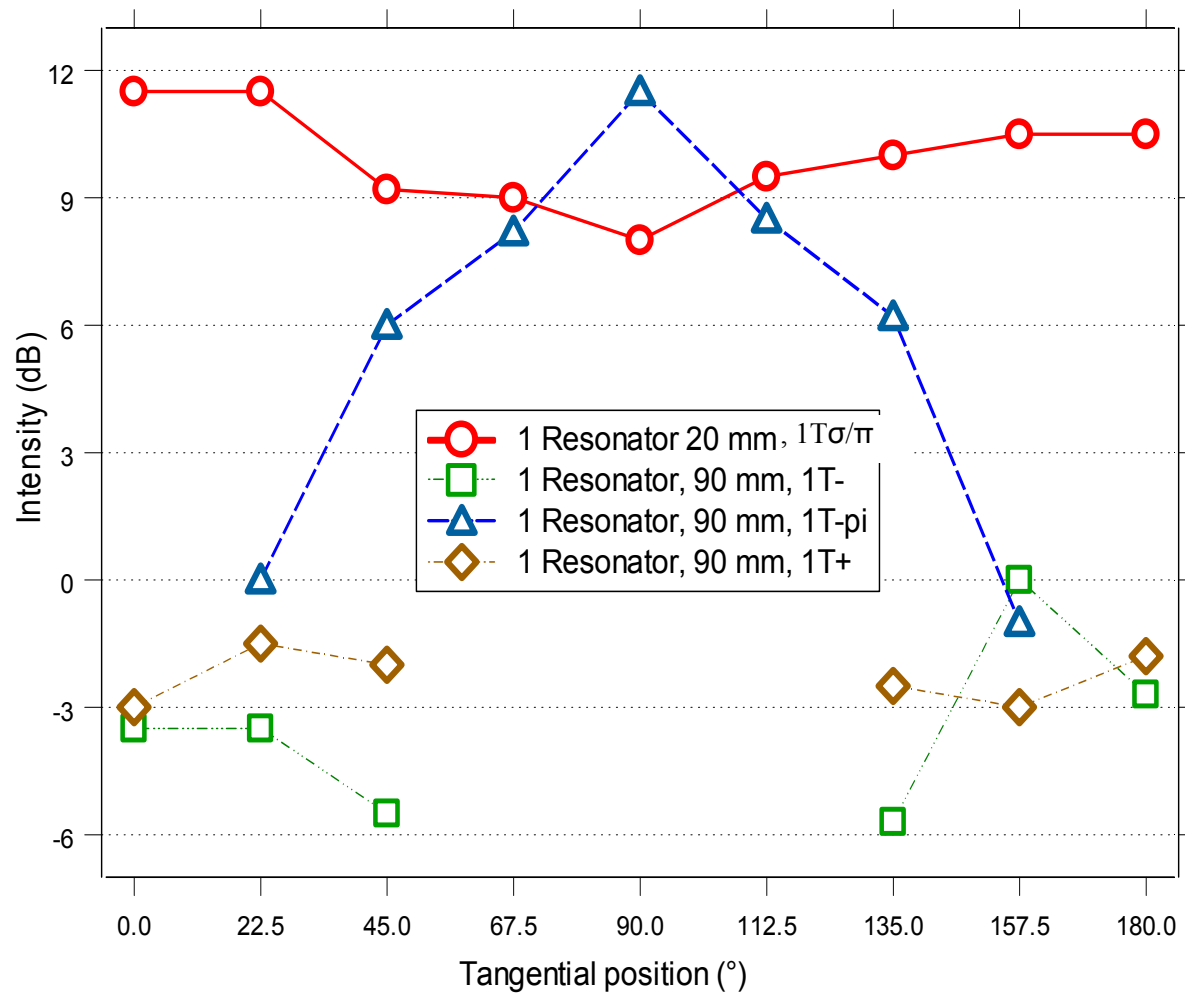


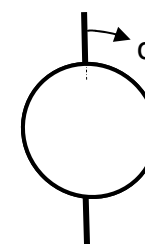
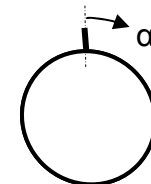
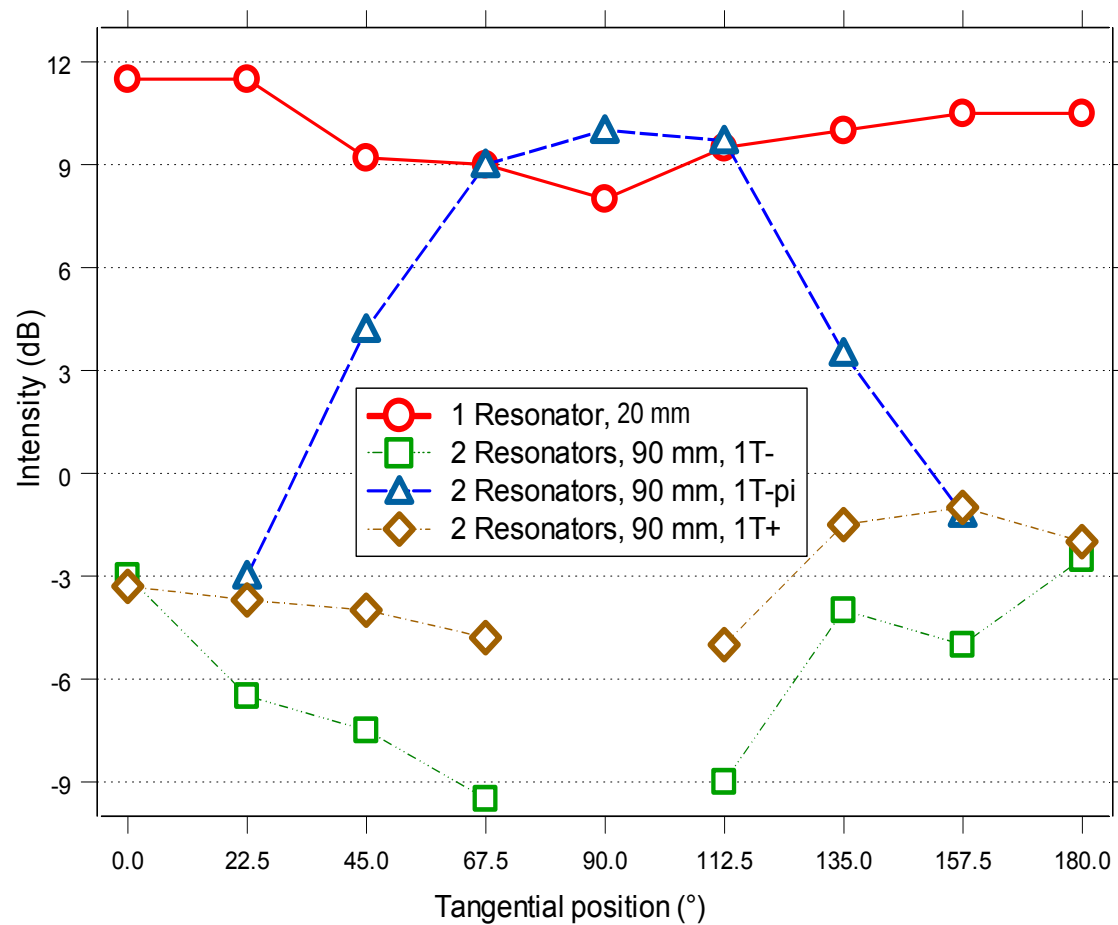
1 Resonator

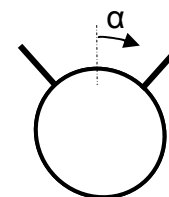
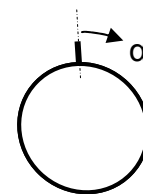
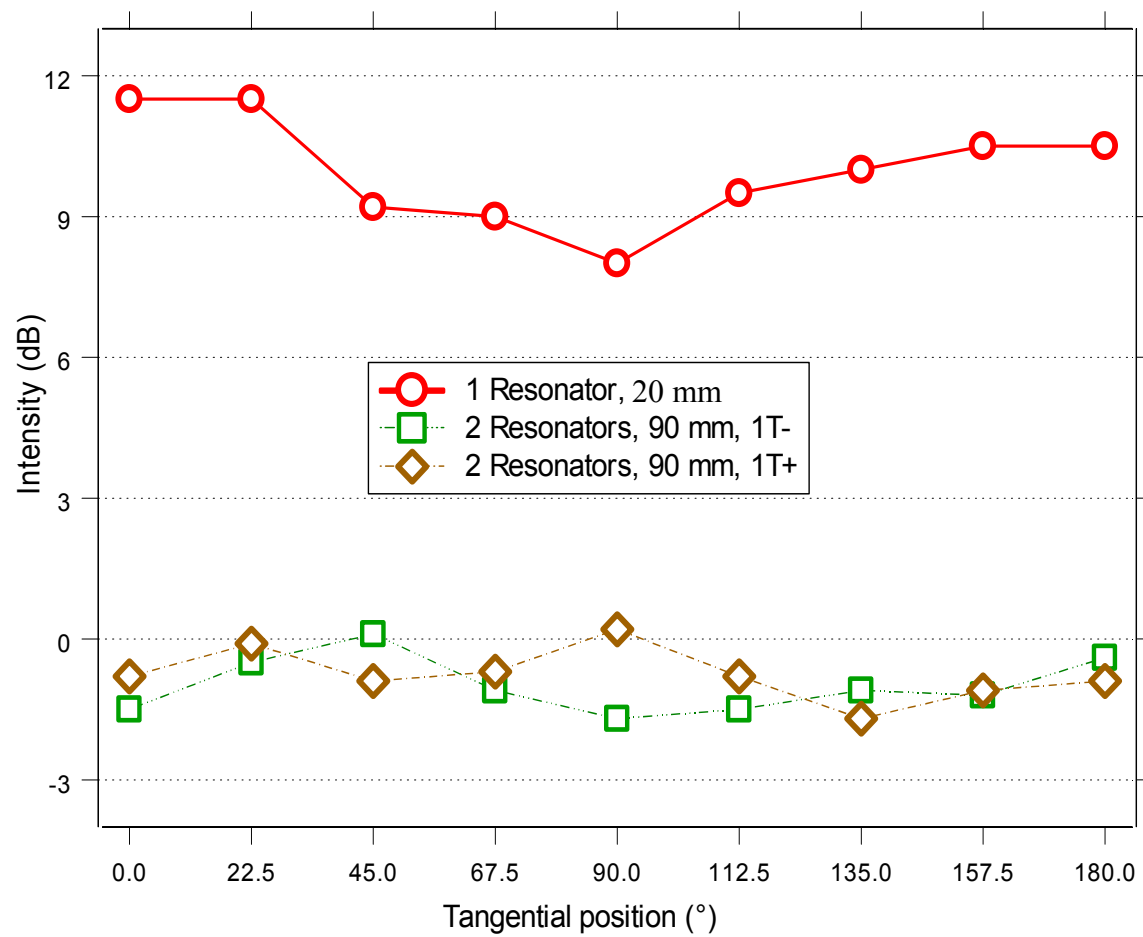
Resonator length = anti-crossing length

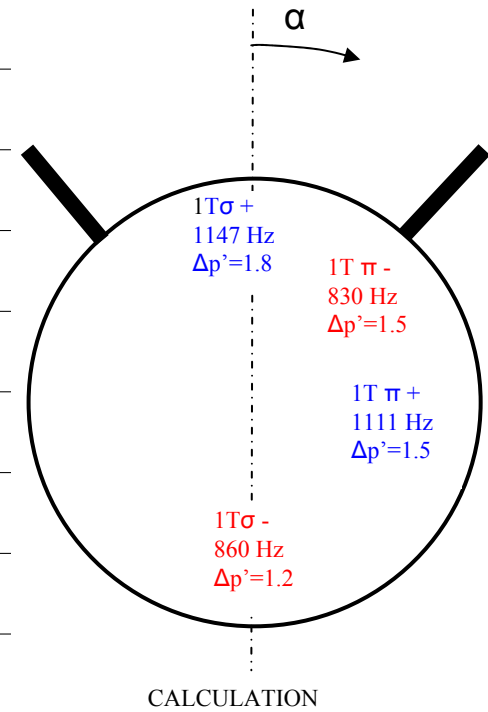
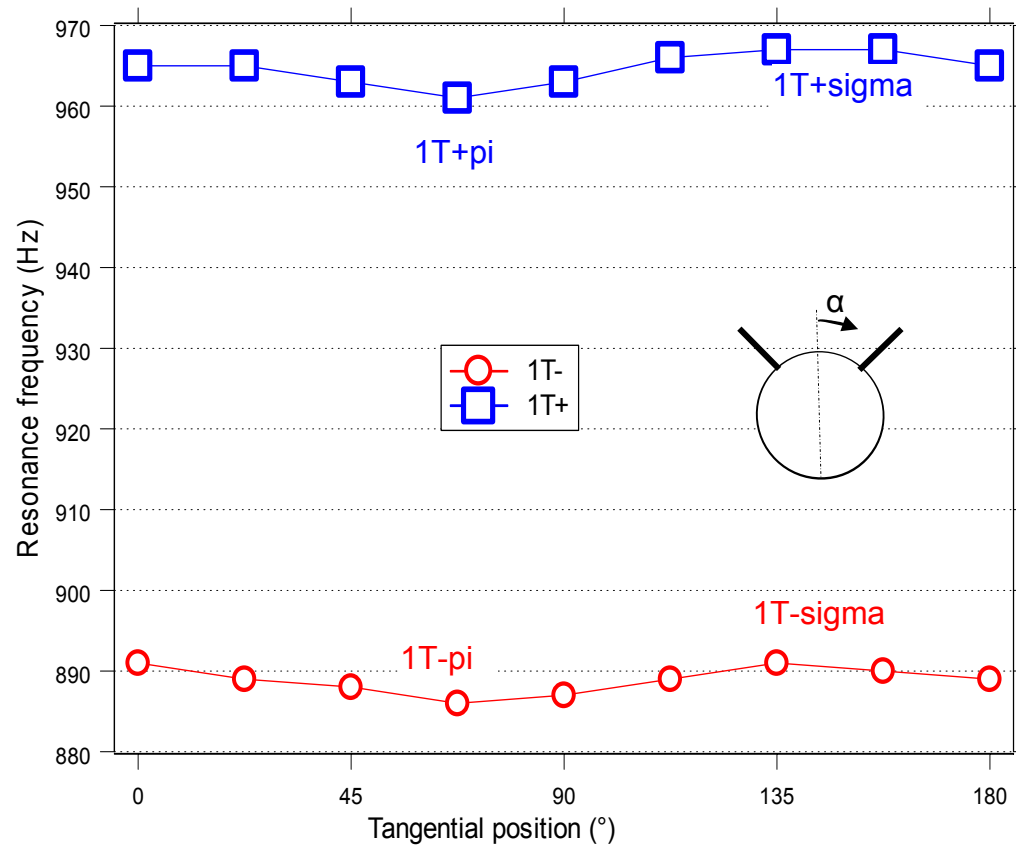


1 Resonator
Resonator length = anti-crossing length







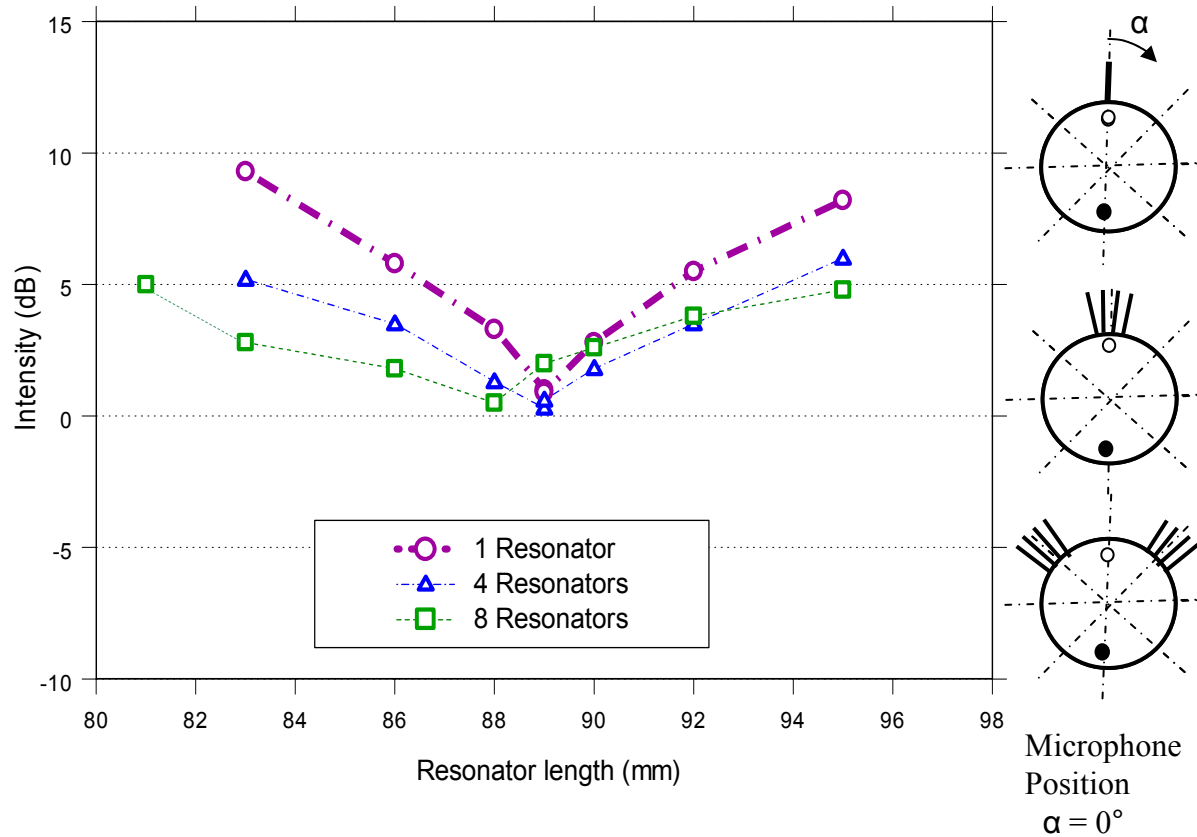


Optimale Winkelposition Zusammenfassung

Je Tangentialmode genügen zwei Resonatoren, um am ganzen Umfang der Brennkammer einen wirksamen Schutz zu bieten, wenn deren Winkelverhältnis $360^\circ/(4 \cdot n)$ beträgt, mit n als Ordnung des Tangentialmodes.

Einfluss der Änderung der Schallgeschwindigkeit

Optimale Anzahl der Resonatoren



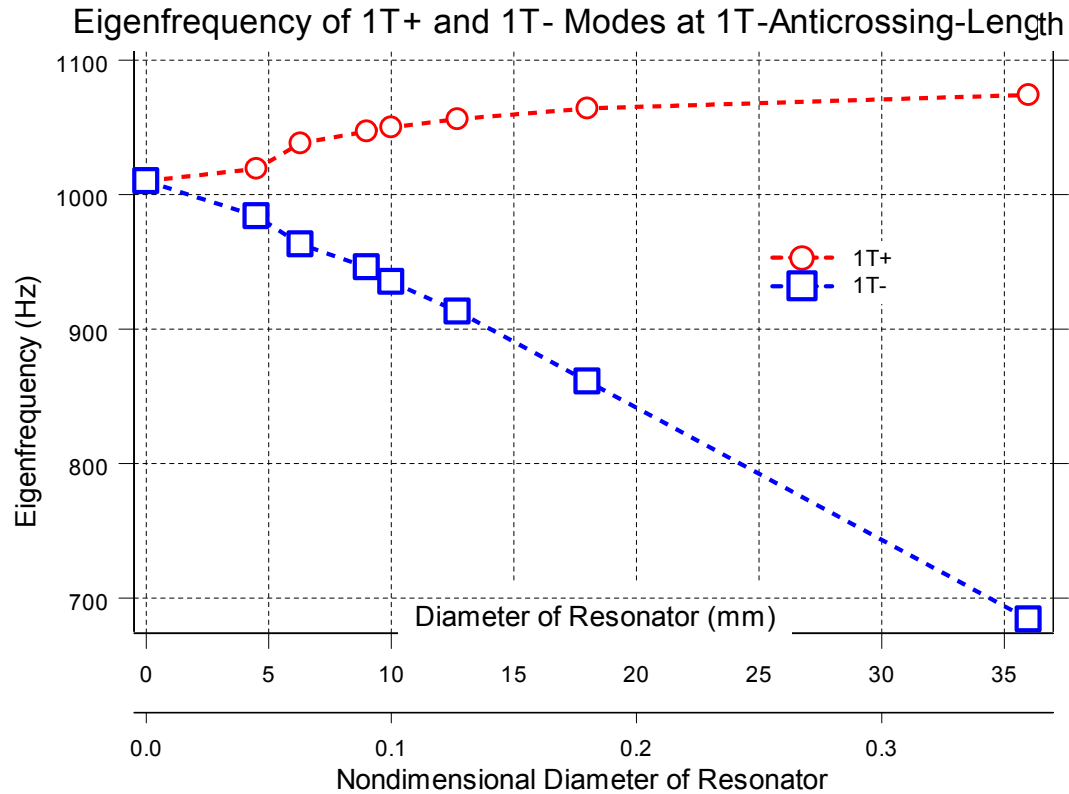
Optimale Anzahl der Resonatoren Zusammenfassung

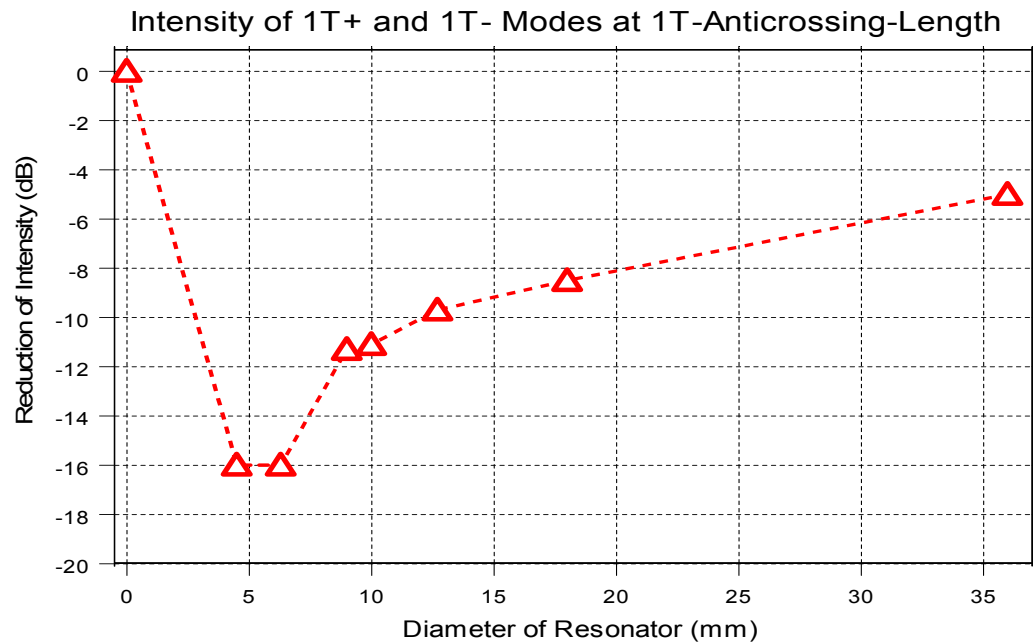
Bei optimaler Resonatorlänge wird die Schutzwirkung durch Erhöhung der Anzahl der Resonatoren nicht verbessert.

Durch Erhöhung der Anzahl der Resonatoren wird die Resonatoranordnung weniger anfällig gegen Änderung der Schallgeschwindigkeit.

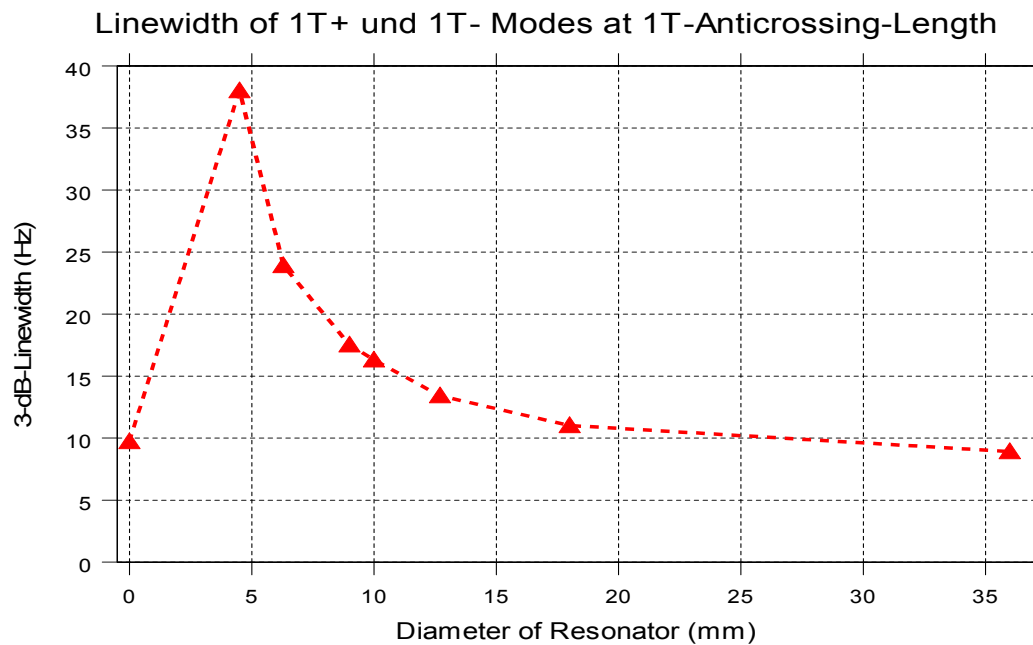
Einfluss der Änderung der Schallgeschwindigkeit

Optimaler Resonatordurchmesser





?



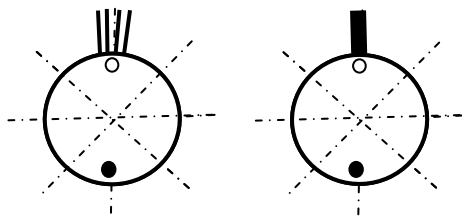
Optimaler Resonatordurchmesser

Vorläufiges Ergebnis

Zusammenfassung

Durch Erhöhung des Resonatordurchmessers wird die Resonatoranordnung weniger anfällig gegen Änderung der Schallgeschwindigkeit – dabei verringert sich die Dämpfungswirkung der Resonatoren mit Zunahme des Durchmessers.

Kleiner Resonatordurchmesser – gute Dämpfung in einem sehr schmalen Schallgeschwindigkeitsbereich.

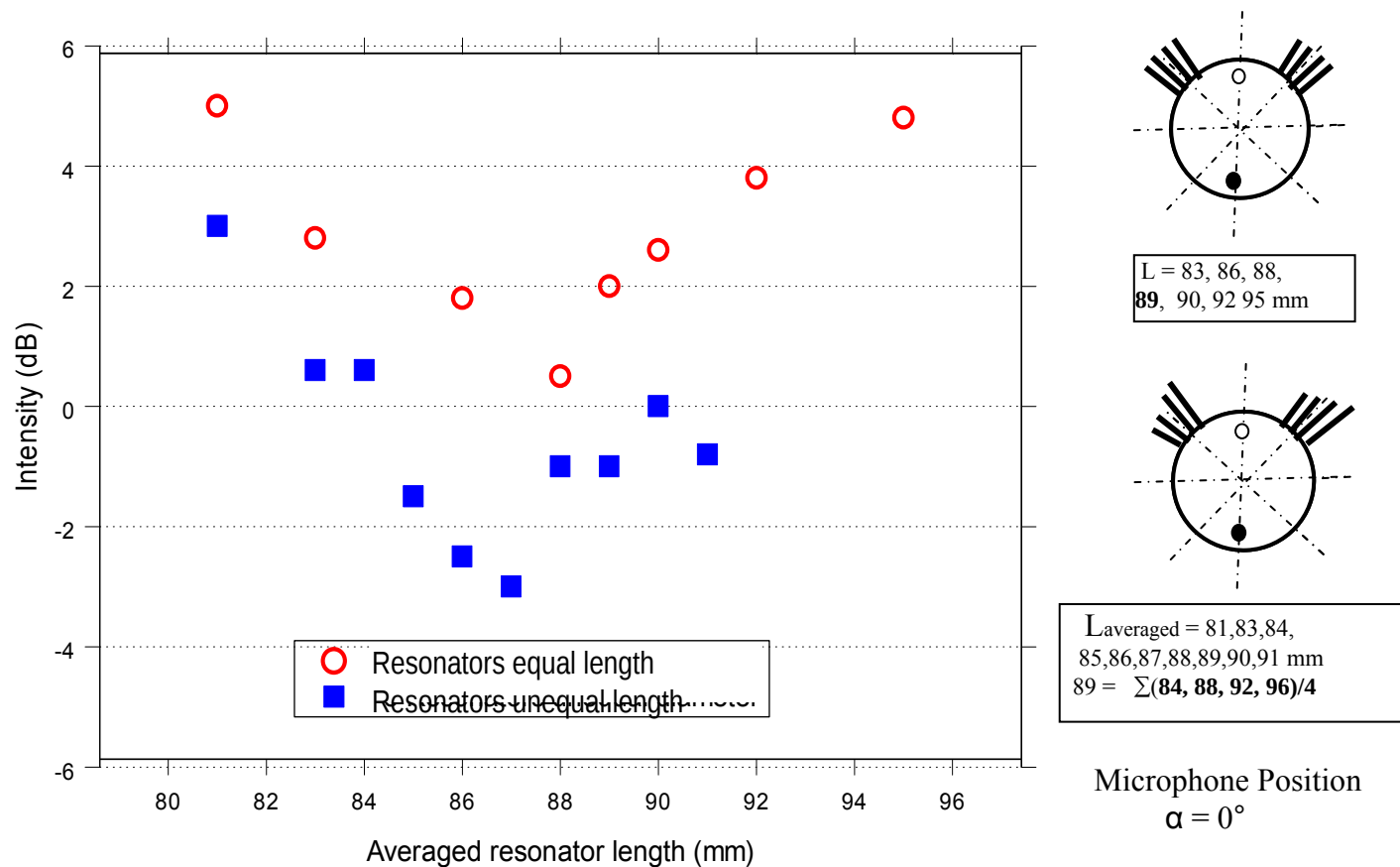


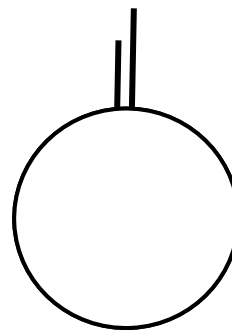
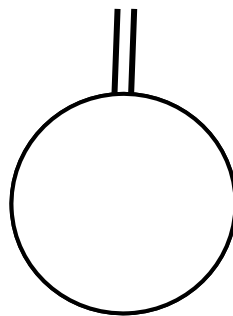
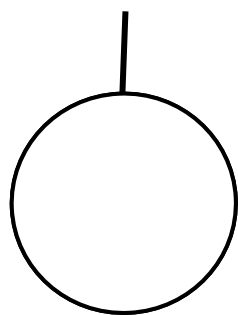
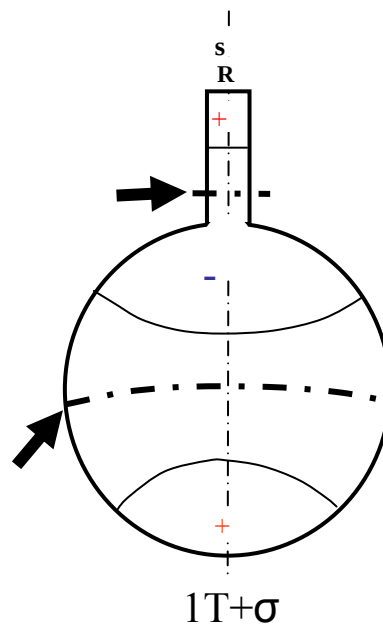
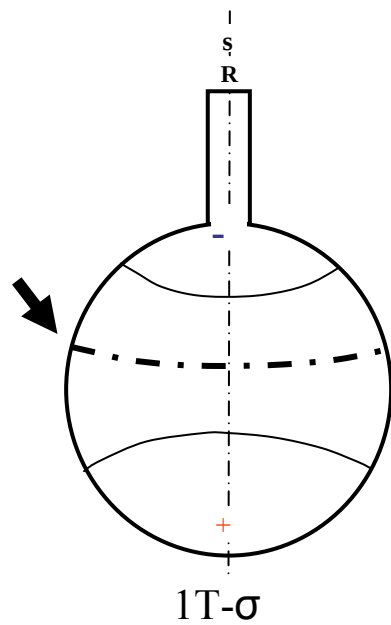
Wird ein Resonator mit großem Durchmesser durch mehrere dicht beieinander stehende Resonatoren gleicher Gesamtfläche ersetzt,

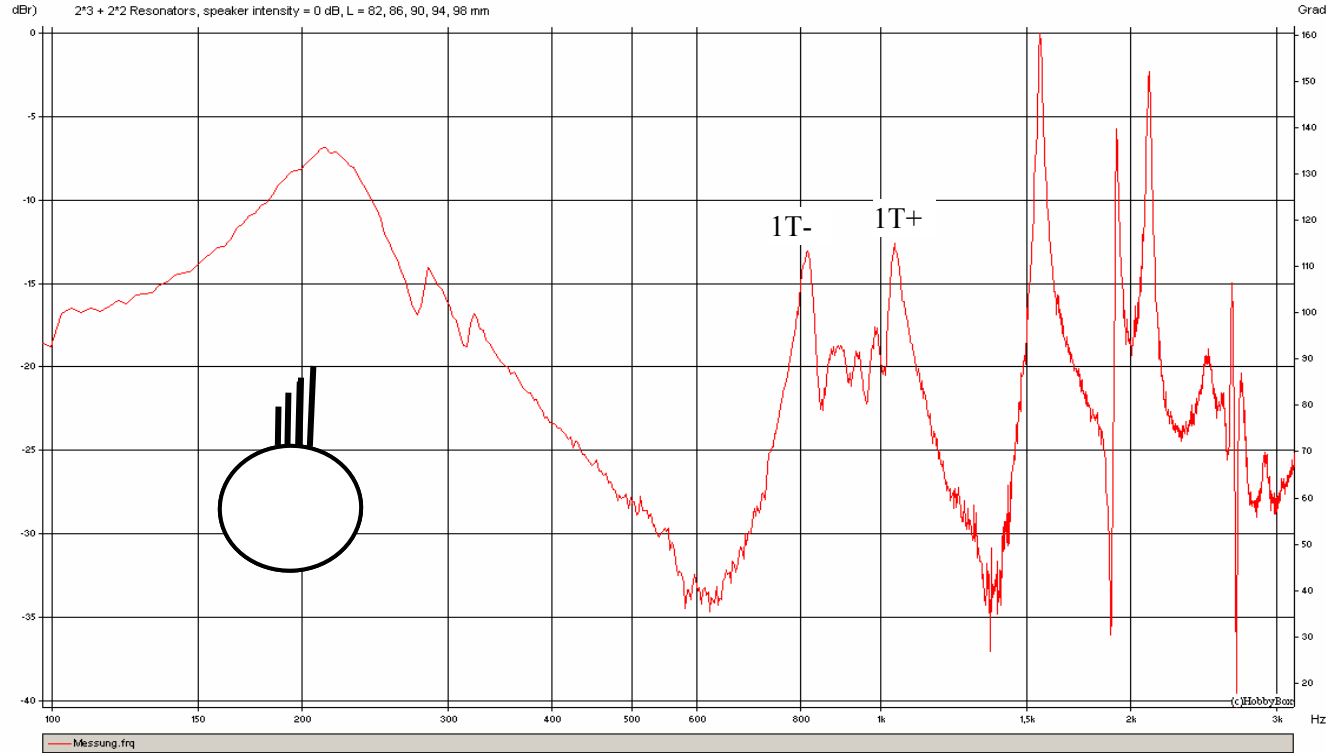
ändert sich weder die Frequenz der Moden noch die Robustheit der Brennkammer gegen Änderung der Schallgeschwindigkeit. Die Dämpfung hingegen ist kleiner bei einem Resonator mit großem Durchmesser.

Einfluss der Änderung der Schallgeschwindigkeit

Optimale Längenabstufung der Resonatoren

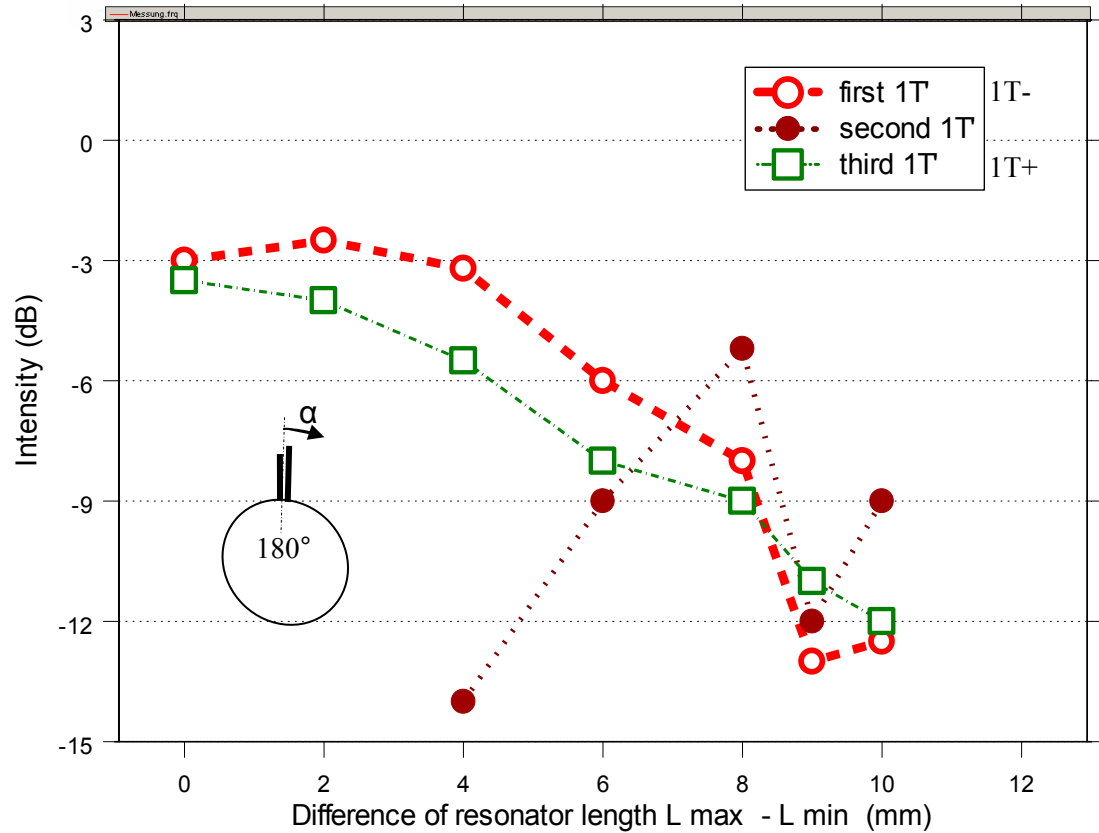
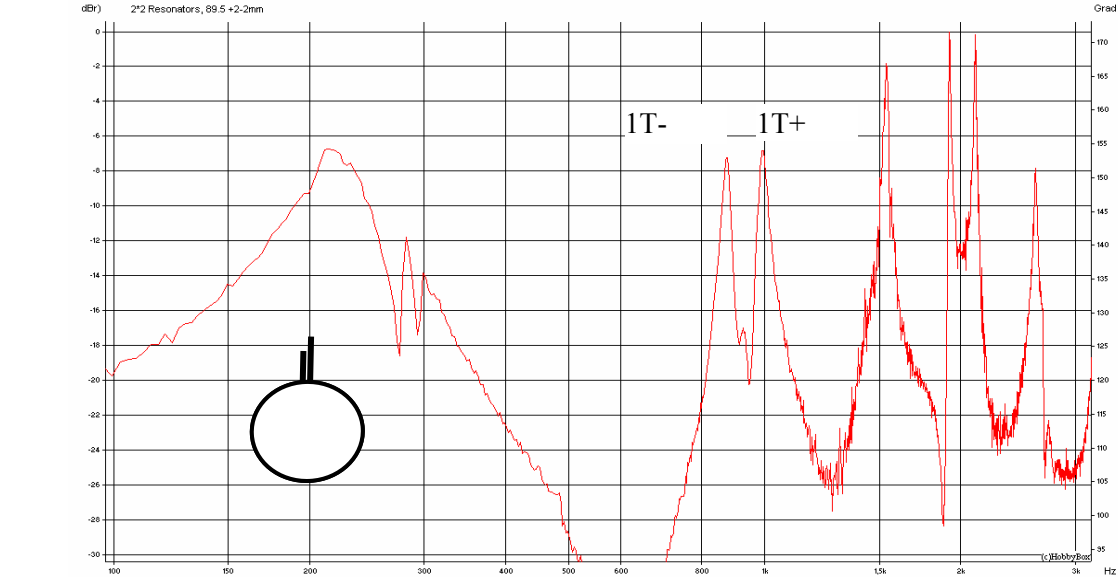




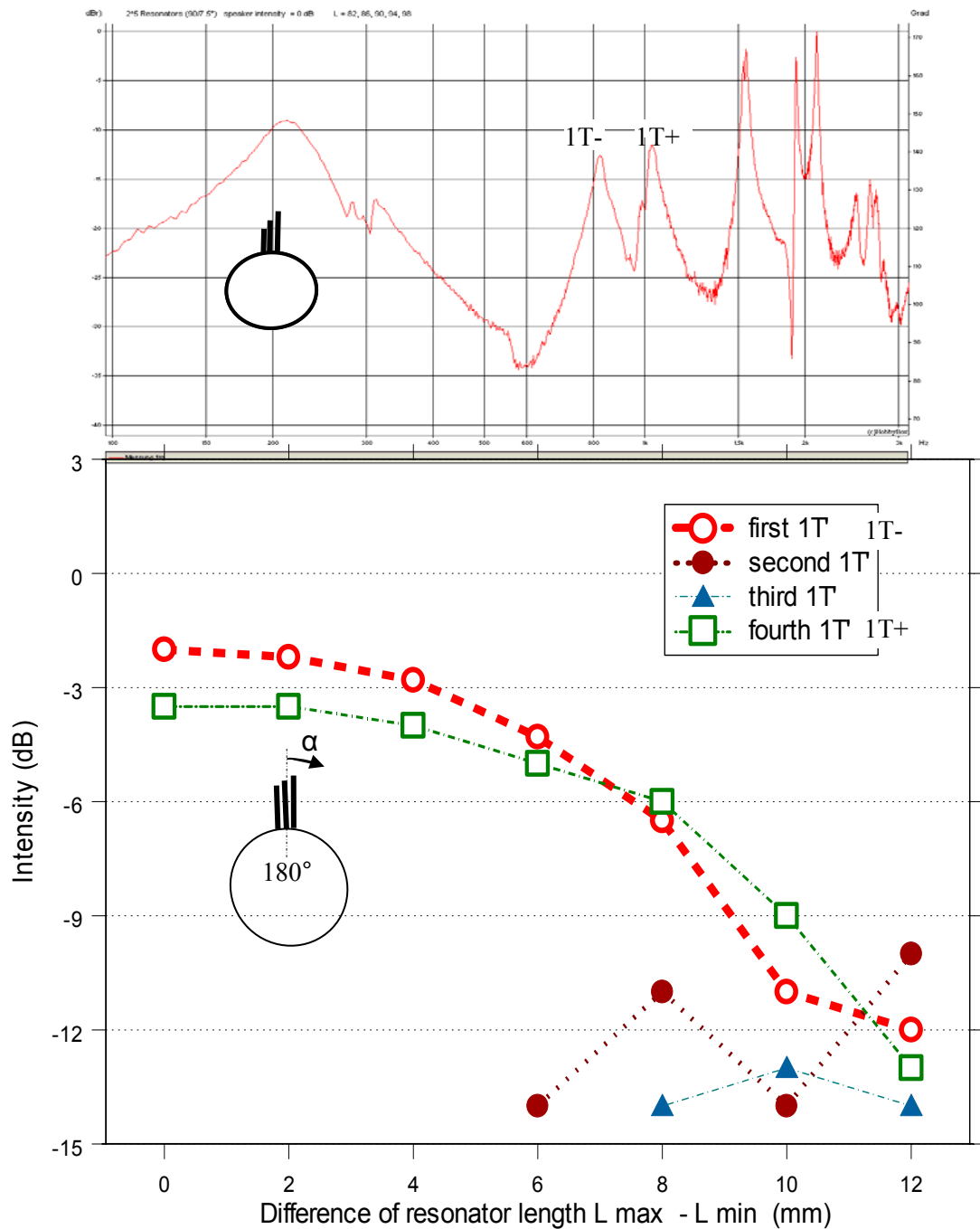


$$\begin{aligned}\sum L/4 &= L_{\text{anti-crossing}} \\ (L_{\text{max}} + L_{\text{min}})/2 &= L_{\text{anti-crossing}} \\ (L_{\text{max}} - L_{\text{min}}) &= 12 \\ (L_{\text{max}} - L_{\text{min}})/(4-1) &= 4 \text{ mm}\end{aligned}$$

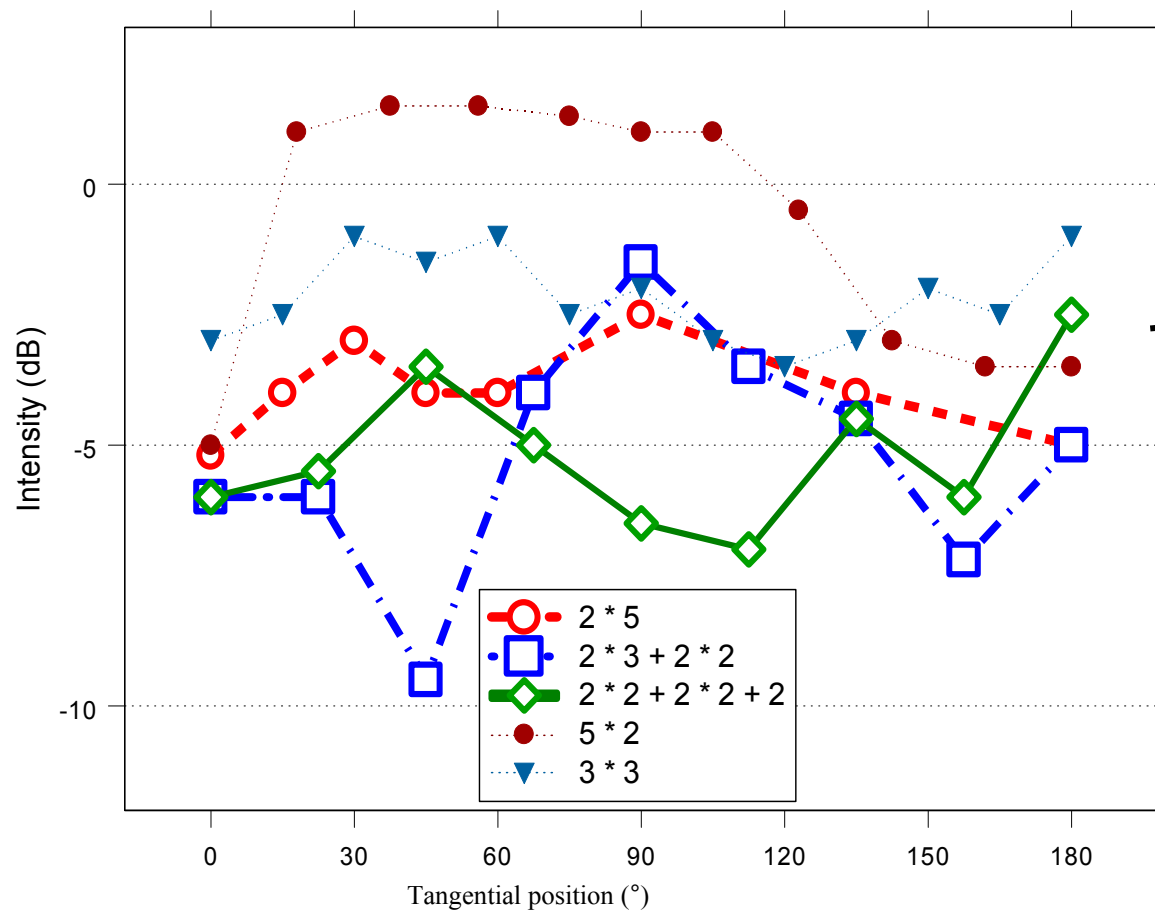
4 mm Längenabstufung ist nicht optimal. Optimal wäre $\Delta L > 4 \text{ mm}$.



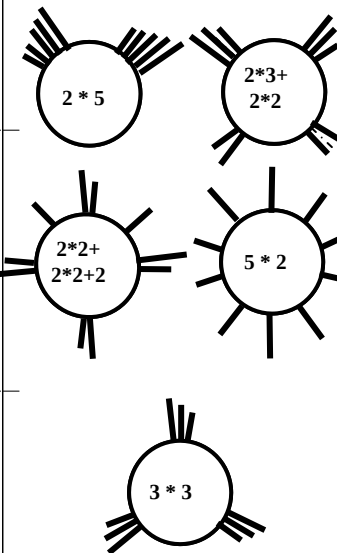
$$(L_{\max} + L_{\min})/2 = L_{\text{anti-crossing}}$$



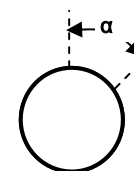
$$\sum L/3 = L_{\text{anti-crossing}}$$

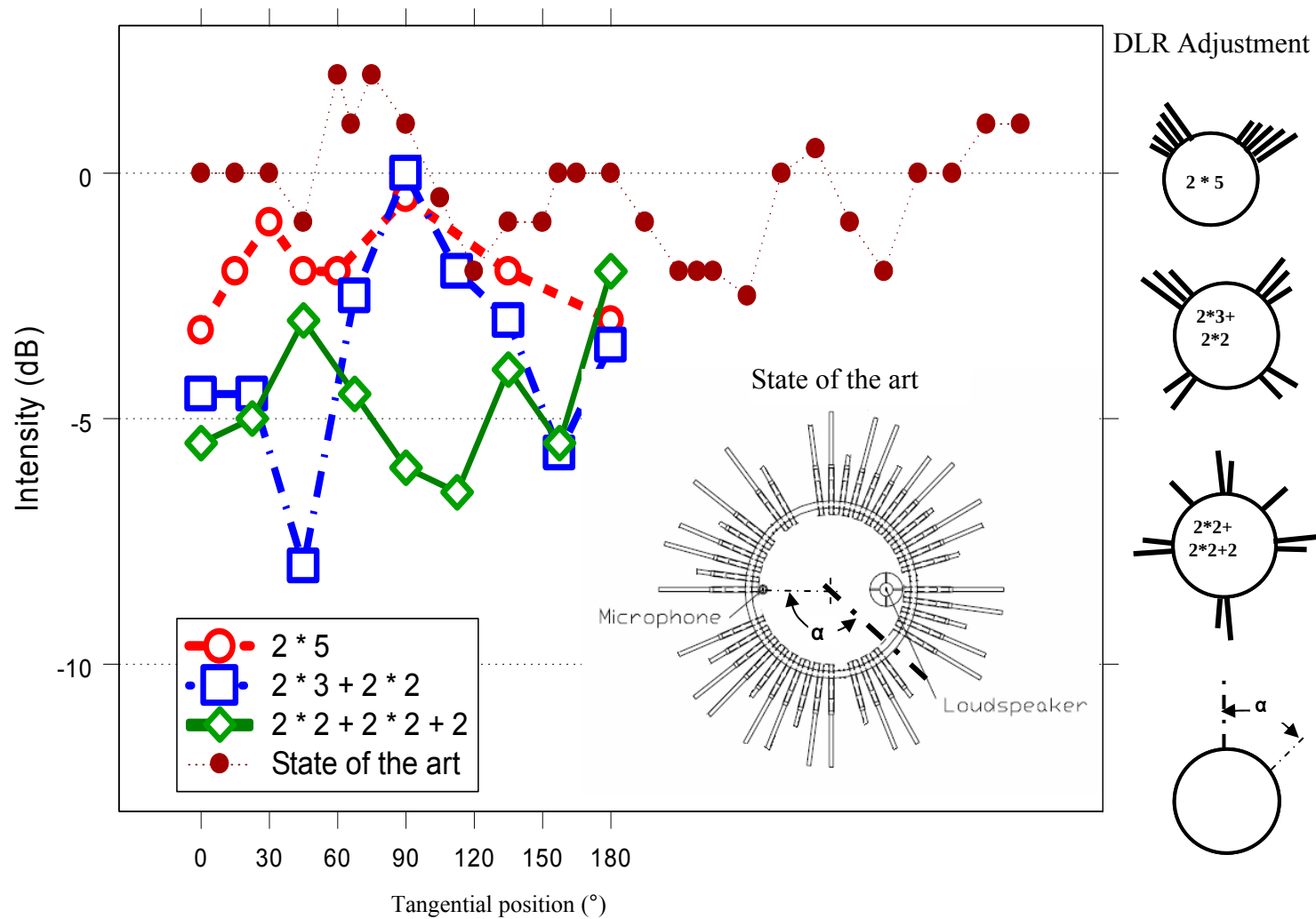


$L = 82, 86, \underline{90}, 94, 98$



$L = 82, \underline{90}, 98$





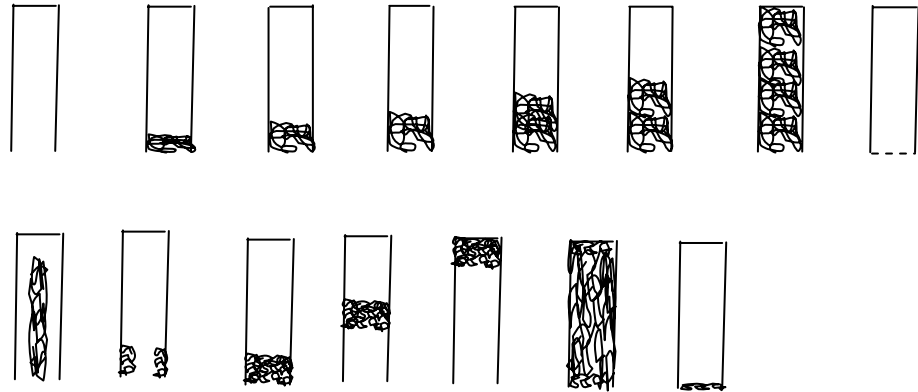
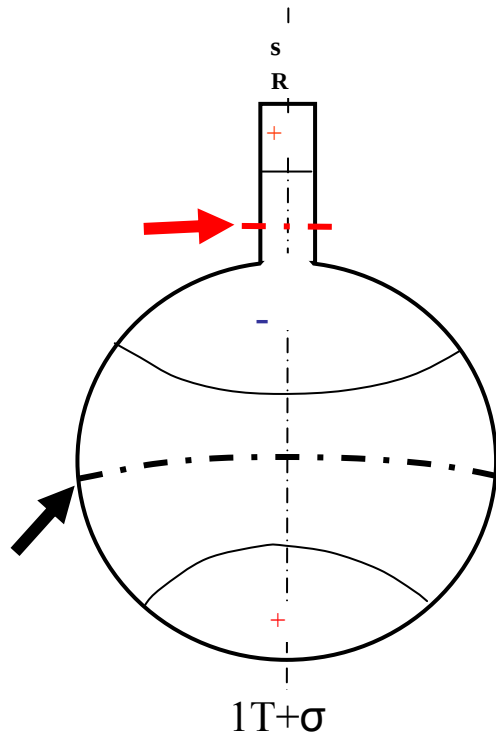
Optimale Längenabstufung Zusammenfassung

Durch Kombination der optimierten Winkelanordnung und der Längenabstufung, beziehungsweise durch sinnvolle Gruppenbildung der Resonatoren kann man die Dämpfungswirkung der Resonatoren erhöhen und gleichzeitig die Brennkammer gegen Änderung der Schallgeschwindigkeit unempfindlicher machen.

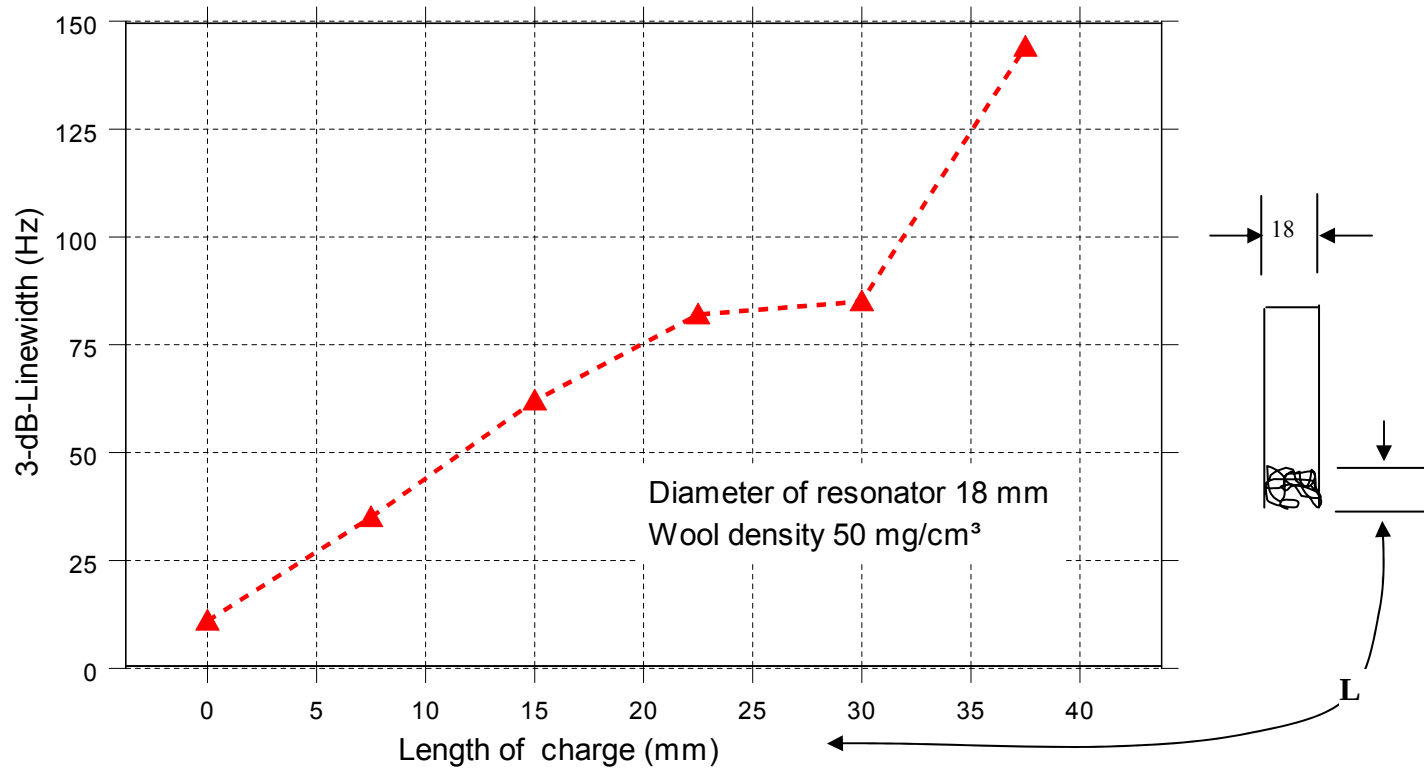
Eine möglichst gleichmäßige Anordnung der Resonatoren am Umfang der Brennkammer ist nicht optimal. Ein Tangentialmode kann mit zwei Resonatorengruppen optimal unterdrückt werden, deren Winkelverhältnis $360^\circ/(4 \cdot n)$ beträgt, mit n als Ordnung der Tangentialmodes.

Weitere Möglichkeiten der Dämpfungserhöhung der Resonatoren

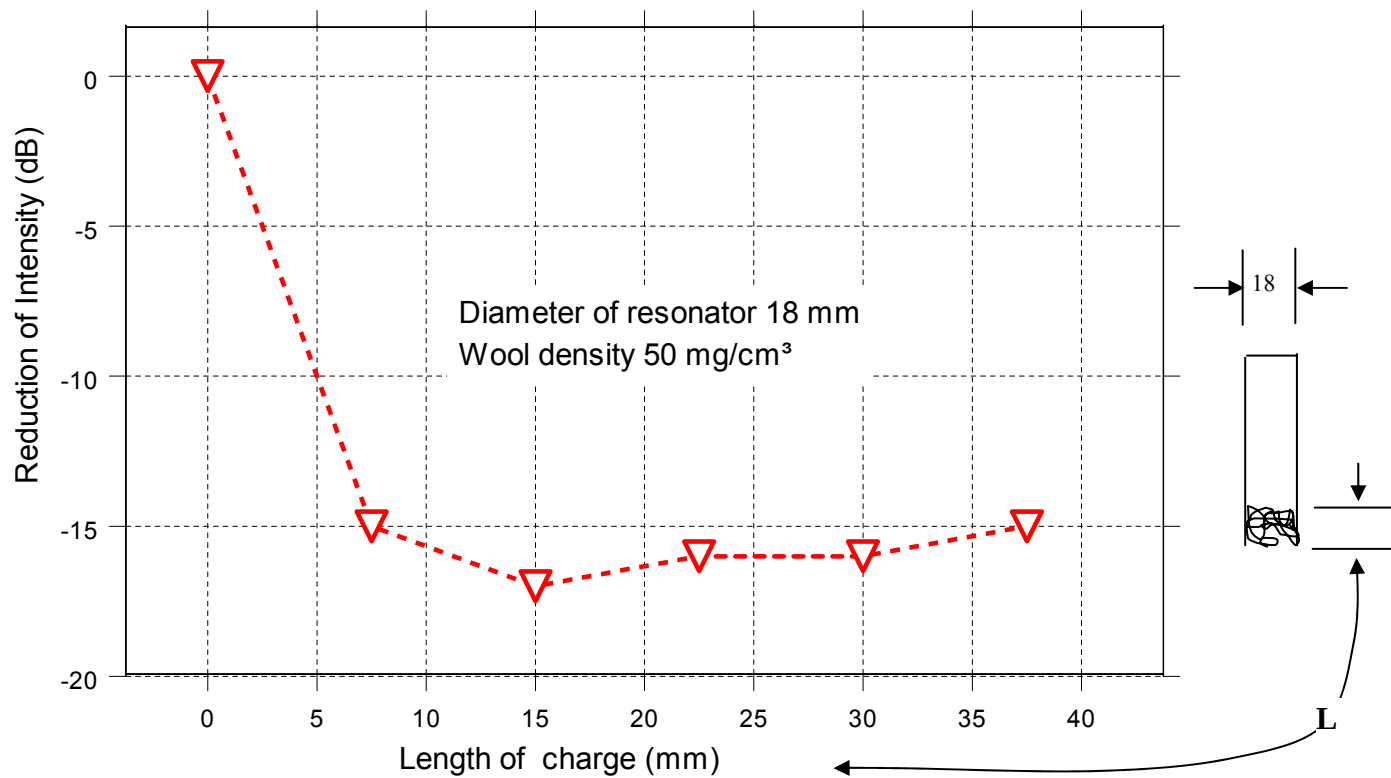
Resonatoren mit turbulenzfördernden Elementen

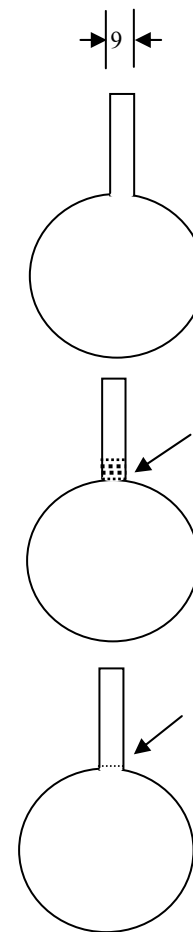
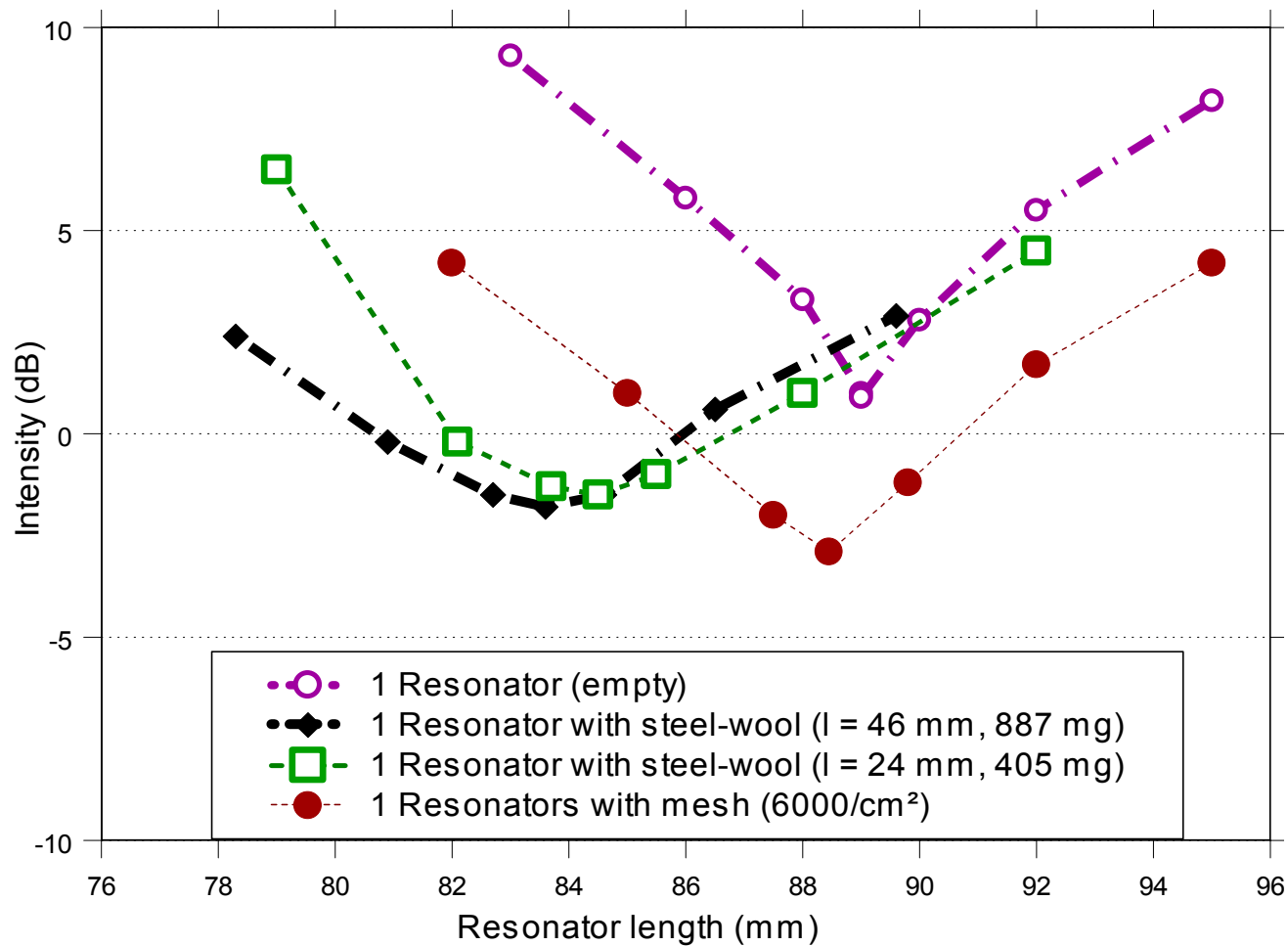


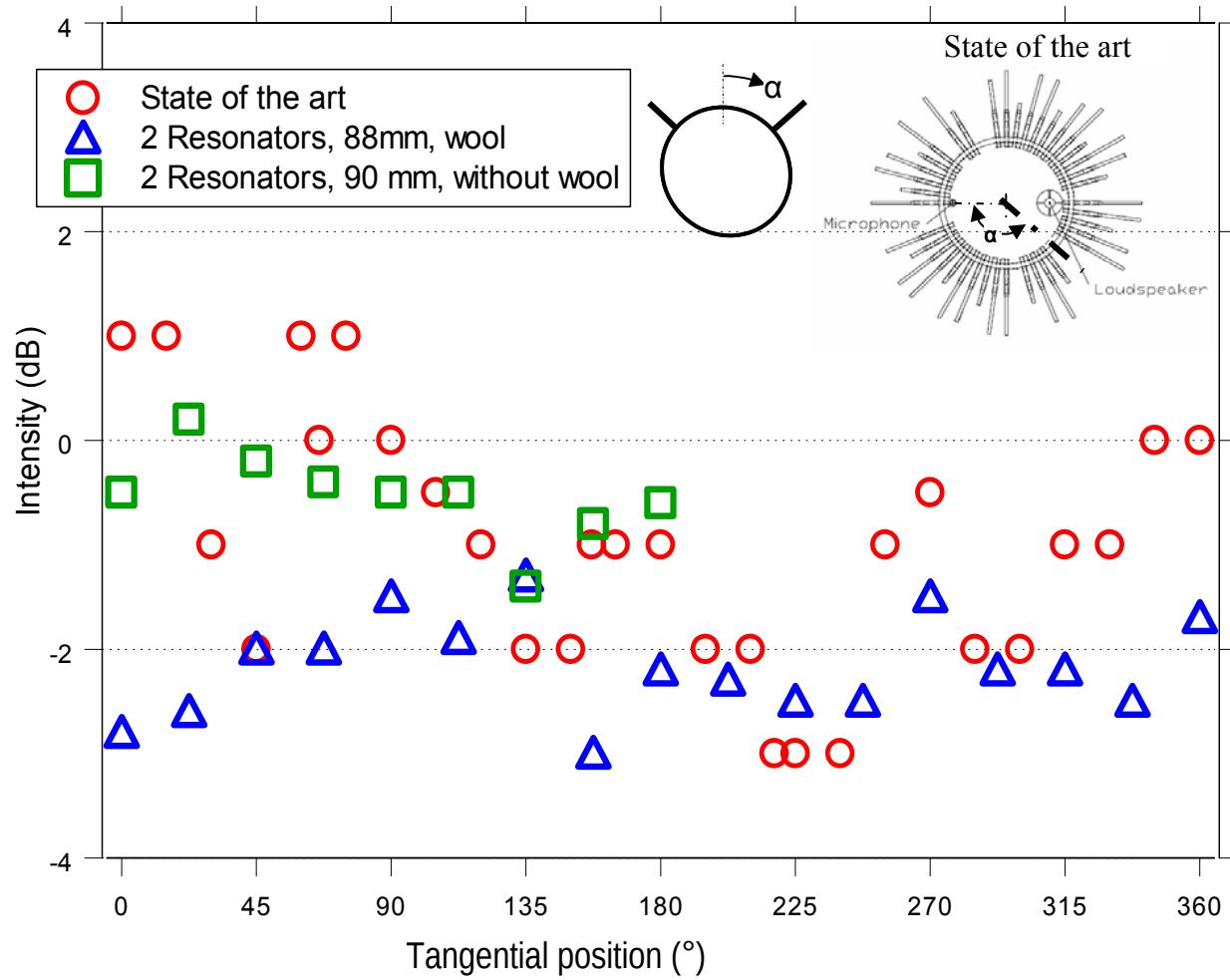
Linewidth of 1T+ and 1T- Modes at 1T-Anticrossing



Intensity change of 1T+ and 1T- Modes at 1T-Anticrossing







Turbulenzfördernde Elemente Zusammenfassung

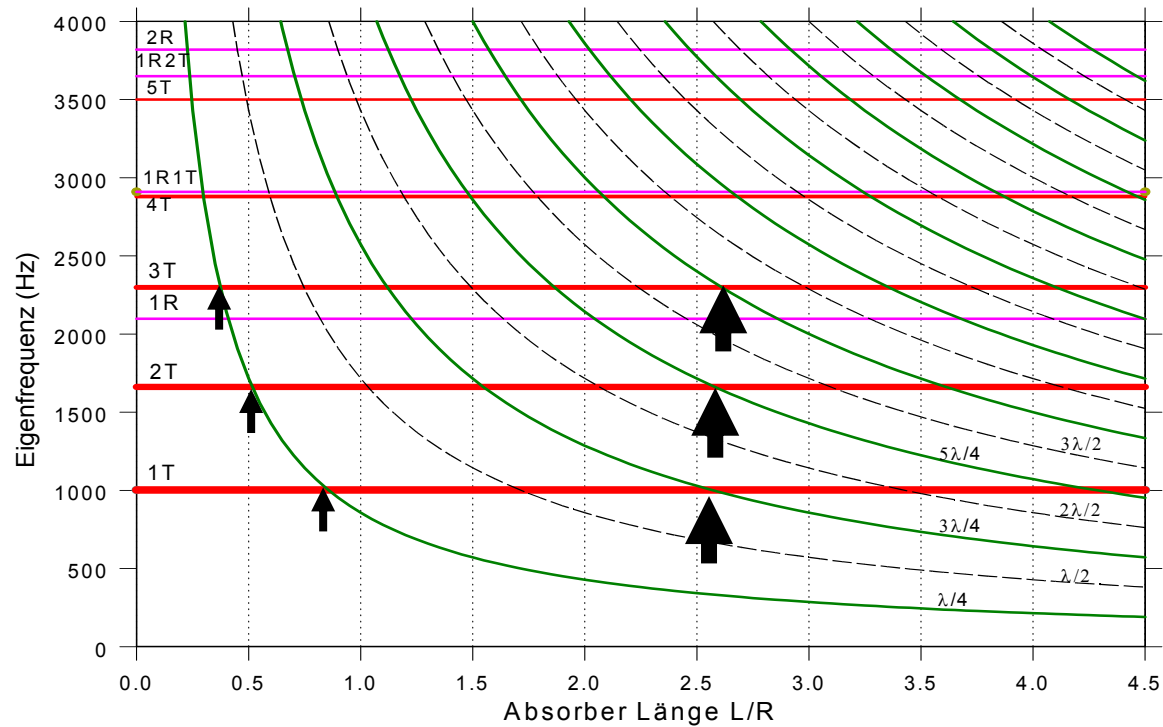
Durch turbulenzfördernde Elemente kann man die Dämpfungswirkung der Resonatoren erhöhen.

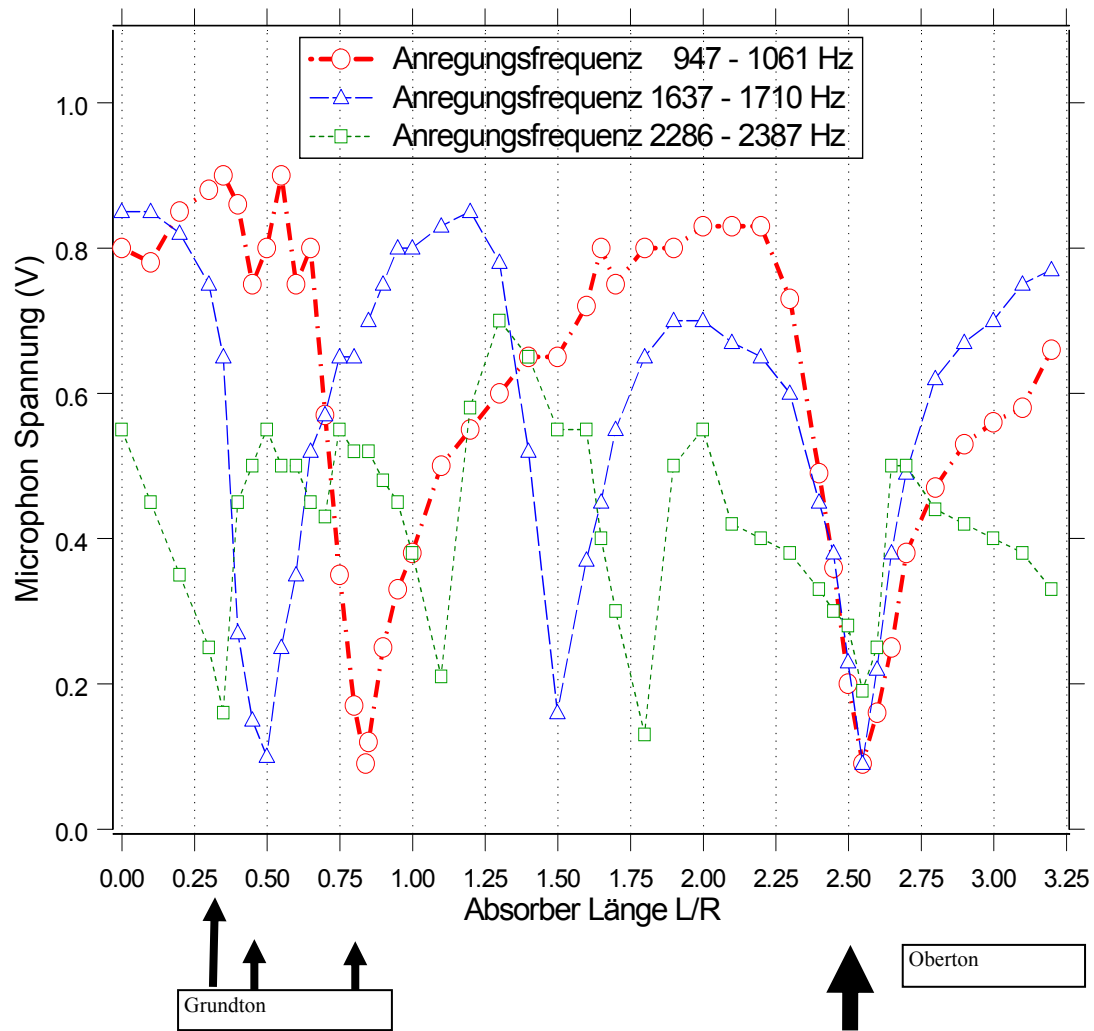
Bei turbulenzfördernden Elementen kann der Durchmesser der Resonatoren erhöht werden, wodurch die Robustheit gegen Änderung der Schallgeschwindigkeit verbessert wird, ohne Einbuße an akustischer Dämpfung.

Bei Erhöhung des Resonatordurchmessers und Anwendung turbulenzfördernder Elemente kann die Intensität der Druckschwankung in der Brennkammer um mehr als eine Zehnerpotenz reduziert werden.

Weitere Möglichkeiten der Dämpfungserhöhung der Resonatoren

Modeunterdrückung mit Obertönen des Resonators





Modeunterdrückung mit Obertonschwingung des Resonators Zusammenfassung

Bei der dreifachen Anti-Crossing-Länge des ersten Tangentialmodes werden drei Tangentialmoden gleichzeitig unterdrückt:

der erste Oberton des $\lambda/4$ -Rohres unterdrückt den 1T-Mode,
der zweite Oberton unterdrückt 2T,
der dritte Oberton unterdrückt 3T.

Bei diesem Verfahren werden bei der Unterdrückung des 1T-Modes die Moden 2T und 3T nicht verstärkt, da keine Modeumwandlung von 1T nach 2T und von 1T nach 3T stattfindet.

Schlussfolgerungen

Durch Kombination der geschilderten Maßnahmen kann die Anzahl der benötigten Resonatoren wesentlich reduziert und gleichzeitig die Dämpfungswirkung des Resonatorringes deutlich erhöht werden. Ferner wird dabei die Abhängigkeit der Modeunterdrückung von der Änderung der Schallgeschwindigkeit verringert.

DLR Patentanmeldungen

- Z. Faragó: Verfahren zur Einstellung der akustischen Eigenschaften einer Brennkammer; EP06117462.9
- Z. Faragó: Verfahren zur Dämpfungserhöhung durch ein Kapillarrohr im Resonator; EP06121964.8
- Z. Faragó: Verfahren zur Modeunterdrückung mit einem Oberton eines Resonators; DE 10 2006 007 711.3
- Z. Faragó, A. Michy: Optimale Resonatoranordnung; EP07100923.7
- Z. Faragó: Verfahren zur Dämpfungserhöhung durch Turbulenzerhöhung im Resonator; DE 10 2006 053 277.5

Referenzen

- [1] B. Knapp, M. Oschwald, S. Anders: Untersuchung der tangentialen Moden von hochfrequenten Verbrennungsinstabilitäten in Raketenbrennkammern; DGLR – Jahrestagung 2005, Paper No. 189, September 2005
- [2] M. Oschwald: Numerical Determination of Eigen frequencies and Admittances for Multi Cavity Resonator Configuration, DLR-LA-HF-RP-018
- [3] Z. Faragó, S. Markgraf: Damping characteristics of combustion chambers coupled with acoustic elements, DLR-LA-HF-RP-020
- [4] Z. Faragó, M. Oschwald: Resonance Frequencies and Damping in Combustion Chambers with Quarter Wave Cavities; 6th Symposium on Launcher Technologies, November 8th to 11th, 2005, Munich



School Lab

