Ein Resonanzschalldämpfer mit umgelenkter Gleichströmung

M. Jüschke, D. Ronneberger

III. Physikalisches Institut, Universität Göttingen, Bürgerstr. 42–44, 37073 Göttingen

Email: m.jueschke@dpi.physik.uni-goettingen.de

Einleitung

Bei Rohrleitungen werden als passive Maßnahme zur Schallunterdrückung häufig Resonatoren seitlich am Rohr angebracht. Fließt durch das Rohr eine Gleichströmung, so kann sich die Güte der Resonatoren erheblich ändern, es kann sogar zu Schallverstärkung kommen.

In diesem Projekt wird die Gleichströmung seitlich abgeleitet, ein $\lambda/4$-Resonator liegt in der Verlängerung des ursprünglichen Rohres. Wird zusätzlich zum Schall eine Strömung durch das Rohr geleitet, so ändert sich auch hier die Güte. Unter Beachtung der Phase des transmittierten Schalls erkennt man, dass sich mit einer Dämpfung des Resonators die Transmission weiter verringern lässt.

Beobachtung

In Abb. 1 sind die beiden verwendeten Resonatoren skizziert. Die Pfeile sollen den Verlauf der Gleichströmung andeuten.

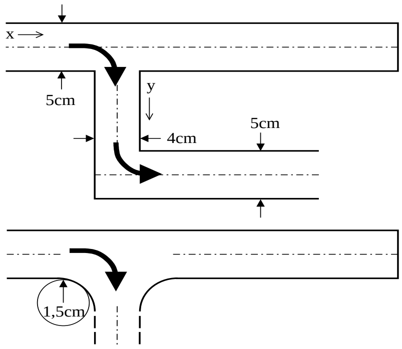

Abb. 1: Untersuchte Resonatoren.

In Abb. 2 sind die gemessenen Transmissionsfaktoren ohne Strömung dargestellt. Aufgetragen sind die Transmissionsfaktoren für Schalleinfall aus beiden Richtungen im Nyquist-Diagramm. Ohne Strömung sind sie bis auf Messunsicherheiten gleich. Die Bezugspunkte für die Messung sind dabei in der Zuleitung (x) unmittelbar vor dem Resonator und im abzweigenden Rohr (y) direkt dahinter (tatsächlich wurden die Schallfelder über das ganze Rohr verteilt gemessen und daraus die Transmissionsfaktoren so bestimmt, als wären sie an diesen Punkten gemessen). Der überdeckte Frequenzbereich geht von 50 bis 400 Hz. Höhere Moden sind nicht ausbreitungsfähig, die Betrachtung erfolgt eindimensional. Der Resonator ist $l_r = 50\,\mathrm{cm}$ lang.

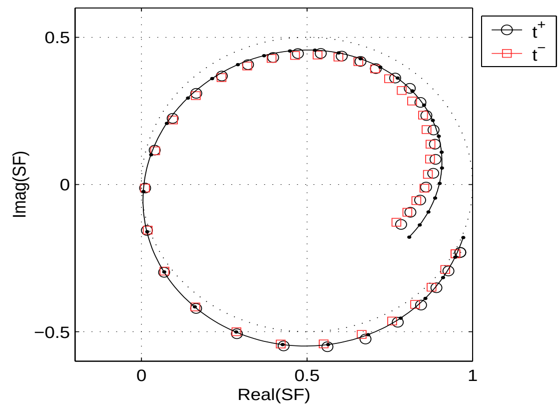

Abb. 2: Transmissionsfaktoren ohne Strömung.

Die Kurve in Abb. 2 kommt im Wesentlichen durch die Eingangsimpedanz des Resonators $Z_r = -i\varrho c \cot kl_r$ zustande, der parallel zum Rohr y geschaltet ist; hier ist bei Schalleinfall von links aus dem Rohr x die Impedanz $Z_y = \varrho c$. Die Admittanzen addieren sich, also gilt $\frac{1}{Z_x} = \frac{1}{Z_y} + \frac{1}{Z_r}$. Der Transmissionsfaktor dazu ist $t' = \frac{2Z_x}{Z_x+1}$. Die Werte von t' liegen in Abb. 2 auf dem gestrichelten Kreis. Berücksichtigt man eine Dämpfung an der Rohrwand, verläuft die Kurve mit steigender Frequenz weiter im Innern des Kreises. Wird weiter der kleinere Durchmesser des Rohres y einbezogen, an dessen Ende wieder Reflektionen auftreten, bekommt man die durchgezogene Linie als theoretische Kurve.

Beachtet werden soll hier insbesondere, dass bei Berücksichtigung der Dämpfung in der Resonanz der Ursprung des Koordinatensystems nicht erreicht wird, also etwas Schall transmittiert wird. Die Transmissionsfaktoren haben in der Resonanz einen positiven Realteil.

Wenn das Rohrsystem durchströmt ist so ändert sich das Transmissionsverhalten insbesondere in der Resonanz (s. Abb. 3). Der Ursprung des Koordinatensystems wird sowohl von dem Transmissionsfaktor in Strömungsrichtung als (t^+) auch dem entgegengesetzten (t^-) umschlossen. Dies entspricht einem negativen Realteil der Eingangsimpedanz des Resonators in der Resonanz. Zudem sind t^+ und t^- nicht mehr gleich. Durch eine Bedämpfung des Resonators könnte man also in der Resonanz einen der Transmissionsfaktoren beliebig verringern[1].

Werden die Kanten für die umgelenkte Gleichströmung abgerundet, wie in Abb. 1 unten skizziert, so ändert sich insbesondere das Transmissionsverhalten für t^+, siehe Abb. 4: In der Resonanz ist der Transmissions-

[1] H. Preckel, D. Ronneberger: *Ausnutzung strömungsbedingter negativer Impedanzen bei der Konstruktion eines akustischen Filters hoher Güte*, DAGA 94, S. 665–668 (1994)

faktor nicht mehr negativ, während sich t^- nur wenig geändert hat.

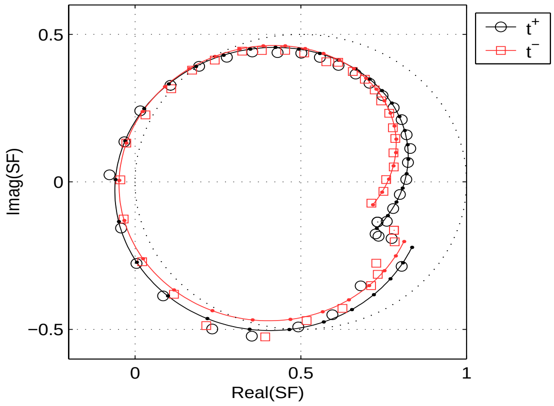

Abb. 3: Transmissionsfaktoren mit Strömung Ma$=\frac{\tilde{u}_x}{c}=0{,}1$.

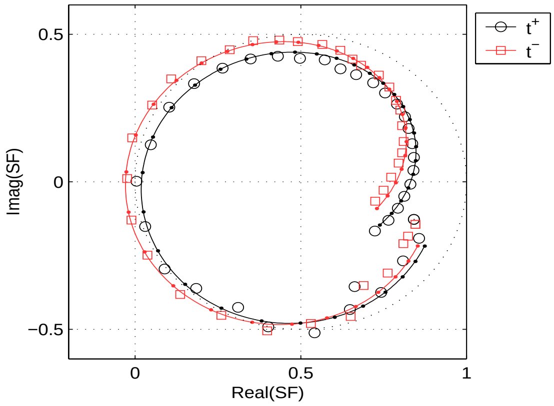

Abb. 4: Mit Strömung und gerundetem Anschluss.

mathematische Beschreibung

Zur theoretischen Beschreibung wird die *Entropiewellentheorie* verwendet, die für dieses Problem bei Jüschke[2] ausführlich dargestellt wird.

Es wird von der Erhaltung der Masse und der Energie sowie dem idealen Gasgesetz ausgegangen. Eine weitere Gleichung ist noch zur vollständigen Beschreibung nötig. Hier wird der Impulsfluss betrachtet, der die gleiche Einheit wie der Druck hat. Der Wechseldruck kann also auch als Wechselimpulsfluss interpretiert werden. Dieser muss aus der x- in die y-Richtung übergehen. Im Detail ist dies bei vorhandener Gleichströmung ein komplizierter Vorgang; bei der Umlenkung der Strömung treten Verluste auf. In einem allgemeinen Ansatz hängt der Schalldruck im Resonator auch von der Wechselschnelle in der Zuleitung $\tilde{u}_x$ und dem abzweigenden Rohr $\tilde{u}_y$ ab:

$$\tilde{p}_R = \tilde{p}_x - \xi_{x1}\tilde{u}_x - \xi_{y1}\tilde{u}_y = \tilde{p}_y + \xi_{x2}\tilde{u}_x + \xi_{y2}\tilde{u}_y$$

Die ξ sind freie Parameter, die nicht theoretisch bestimmt sondern durch eine Messung angepasst werden müssen. Die Ergebnisse für beide Varianten sind in Tab. 1 aufgelistet.

Die Spalte „verlustfrei“ gibt theoretische Werte wieder, die nach einer verlustfreien (oder isentrope) Theorie – also ohne Verlust an kinetischer und potentieller Energie sowohl in der Gleichströmung als auch in der akustischen Wechselströmung – zu erwarten wären. Der untere Wert dieser Spalte kommt durch das Querschnittsverhältnis der Rohre zustande. In den Abbildungen 3 und 4 sind die durchgezogenen Kurven mit diesen Parametern berechnet. Die Machzahl ist 0,1 und mit der Strömungsgeschwindigkeit u_x gebildet.

	glatt	kantig	verlustfrei
ξ_{x1}[Ma ϱc]	-0,99	-1,05	-1
ξ_{y1}[Ma ϱc]	0,16	0,23	0
ξ_{x2}[Ma ϱc]	-0,06	0,52	0
ξ_{y2}[Ma ϱc]	0,95	0,61	1,56

Tab. 1: Werte der freien Parameter.

Interpretation

Zur Beschreibung der negativen Transmissionsfaktoren in der Resonanz sind die Faktoren ξ_{y1} und ξ_{x2} notwendig. Eine verlustfreie Theorie kann diese Impedanzen nicht vorhersagen. ξ_{x1} scheint nach den bisherigen Messungen gut mit dieser isentropen Theorie übereinzustimmen: beim Aufstauen der Strömung vor dem Resonator können nur wenig Energieverluste aufgetreten sein. Der Faktor, der die Änderung zwischen den Messobjekten charakterisiert ist ξ_{x2}, also der Druckabfall im Rohr y, der durch den Schallfluss im Rohr x gesteuert wird. Es ist nicht zu erwarten, dass in diesem Bereich die Werte mit den Vorhersagen übereinstimmen, da an dieser Stelle weitere, hier nicht dargestellte Terme auftreten, die für den Druckabfall in der Gleichströmung über dem Messobjekt sorgen. Dies gilt insbesondere für ξ_{y2}.

Um Vorhersagen im Hinblick auf Anwendungen erstellen zu können sind drei oder vier freie Parameter recht zahlreich. Allerdings werden durch die Gleichungen zahlreiche verschiedene Geometrien von Resonatoren mit im Prinzip eindimensionaler Schallausbreitung beschrieben, die diese Anzahl an Parametern rechtfertigt.

Anschaulich kann man das Verhalten in der Resonanz (jedenfalls für t^+) verstehen wenn man den Schall als Modulation der Gleichströmung auffasst. In der Phase, zu der die Strömung auf den Resonator gerichtet ist, vergrößert sich der Bereich, in dem die Gleichströmung im abzweigenden Rohr y abgelöst ist und damit der Gleichströmungswiderstand. Dadurch ist die Gleichströmungsgeschwindigkeit zu dieser Phase kleiner. Bei der entgegengesetzten Phase ist sie entsprechend größer. Die so im Rohr y entstehende Schallwelle ist entgegengesetzt zu einer, die durch Dämpfung im Resonator resultieren würde und entspricht somit der negativen Impedanz. Bei der abgerundeten Verzweigung ist der Bereich der abgelösten Strömung kleiner oder nicht vorhanden, daher kann der Gleichströmungswiderstand auch nicht variiert werden – der Transmissionsfaktor ist positiv.

[2] Matthias Jüschke: *Einfluss der Strömungsgeometrie auf das akustische Verhalten eines angeströmten Resonators*, Diplomarbeit, Göttingen 2001, `http://www.physik3.gwdg.de/~matthias/diplom.pdf`