

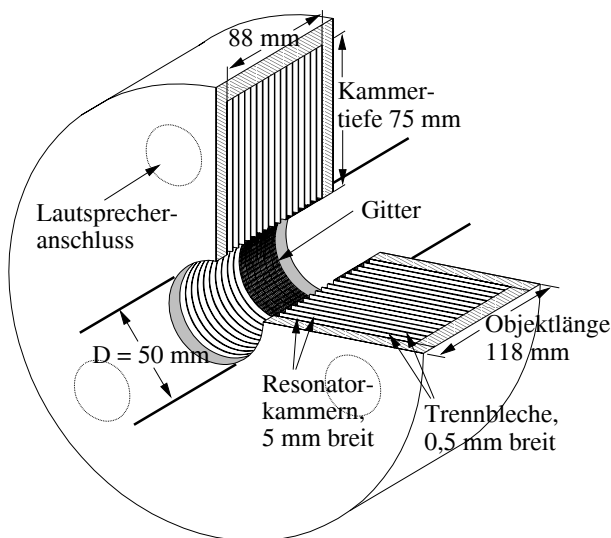
# Akustische Beeinflussung des Druckabfalls im durchströmten Rohr

Matthias Jüschke, Dirk Ronneberger

III. Physikalisches Institut, Universität Göttingen, 37075 Göttingen, Email: m.jueschke@dpi.physik.uni-goettingen.de

## Einleitung

In Rohrleitungen kann sich unerwünschter Schall ausbreiten. Dies kann mit seitlich angekoppelten Resonatoren verhindert werden. Wenn das Rohr dabei durchströmt ist, wird der Schall deutlich schlechter gedämpft. Es kann zu selbsterregten Schwingungen und zu Schallverstärkung kommen. Im Folgenden wird ein Fall betrachtet, in dem stromab laufende Schallwellen verstärkt werden. Mit der Strömung ist ein Druckgradient verbunden, der in dem Rohrabschnitt mit den angekoppelten Resonatoren durch Schalleinstrahlung deutlich anwächst.



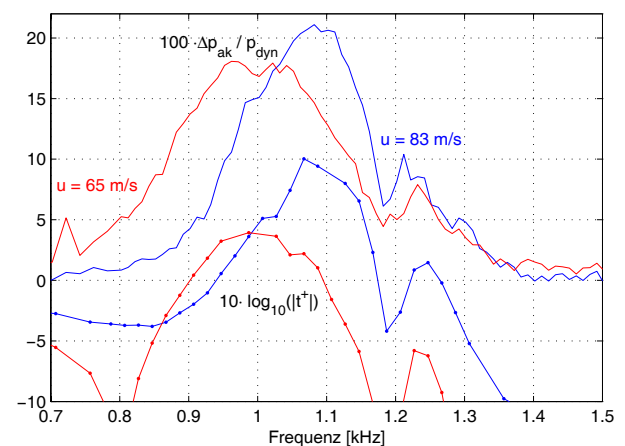
**Abbildung 1:** Perspektivische Ansicht des untersuchten, mit Resonatoren versehenen Rohrstücks.

Abb. 1 zeigt die Anordnung der Resonatoren. Ein Teil des runden Rohres mit 50 mm Durchmesser besteht an der Außenwand aus 16 Resonatoren, die 75 mm tief und 5 mm breit sind. Um die turbulente Strömung weitgehend außerhalb der Resonator-kammern zu halten, sind die Resonatoren mit einem feinmaschigen Drahtgitter abgedeckt.

In dieser Arbeit werden zwei verschiedene Schallmoden untersucht: zunächst eine radialsymmetrische, die auch schon in früheren Arbeiten betrachtet wurde [1]. Hier liegt die Resonanzfrequenz der Kammern bei 850 Hz. Bei etwas höheren Frequenzen werden die größten Effekte beobachtet. Als zweites wird die tiefste Umfangsmode  $\sim \exp(i\varphi)$  untersucht. Hier liegt die Kammerresonanz bei 1,1 kHz. Diese Mode hat bezüglich der Strömungssteuerung den Vorteil, dass der Schall (bei Frequenzen unter 4 kHz) nur im Abschnitt der Resonatoren ausbreitungsfähig ist, in den Teilrohren stromauf und stromab ist das Schallfeld dagegen evaneszent.

## Radialsymmetrische Beschallung

Die einfachste radialsymmetrische Schallanregung ist eine in Strömungsrichtung einfallende ebene Welle, die durch einen Lautsprecher ca. 3 Meter stromauf des Resonatorabschnitts in das Rohr eingestrahlt wird. Mit je 16 Mikrofonen in den Rohren stromauf und stromab der Resonatoren können dann die Amplituden der einfallenden bzw. der gestreuten Wellen und damit die Reflexions- und Transmissionsfaktoren bestimmt werden. Der Transmissionsfaktor in Strömungsrichtung  $t^+$  ist für die Strömungsgeschwindigkeiten  $\bar{u} = 83$  m/s und  $\bar{u} = 65$  m/s in Abb. 2 logarithmisch als Funktion der Frequenz aufgetragen. In weiteren Messungen bei den gleichen Strömungsgeschwindigkeiten wurde der Druckabfall über den Resonatorabschnitt bestimmt. Die Differenz zwischen dem Druckabfall mit Schallanregung und ohne Schall ist mit  $\Delta p_{ak}$  bezeichnet. Diese Größe ist, normiert auf den dynamischen Druck  $p_{dyn} = \frac{\rho}{2} \bar{u}^2$ , ebenfalls in Abb. 2 aufgetragen; dabei wurde die stärkere Schallanregung mittels dreier Lautsprecher an der ersten Resonator-kammer genutzt. Die beiden Messgrößen verlaufen oberhalb der Resonanzfrequenz für gleiches  $\bar{u}$  weitgehend parallel zueinander.



**Abbildung 2:** Transmissionsfaktor in Strömungsrichtung  $t^+$  und Druckabfall über die Resonatoren  $\Delta p_{ak}/p_{dyn}$  bei radialsymmetrischer Beschallung als Funktion der Frequenz.

Der Druckabfall kommt durch einen nichtlinearen Effekt zustande. Interessant ist daher, wie die betrachteten Größen  $t^+$  und  $\Delta p_{ak}$  von der Amplitude des einfallenden Schalls  $A_s$  abhängen. Es ist anzunehmen, dass die Abhängigkeit besonders groß ist, wenn das Maximum des Druckabfalls – und damit auch des Transmissionsfaktors – erreicht ist.

Abb. 3 stellt den Transmissionsfaktor  $t^+$  als Funktion der Anregungsamplitude dar. Für  $\bar{u} = 83$  m/s sind zwei Frequenzen herausgegriffen: eine nahe dem Verstärkungsma-

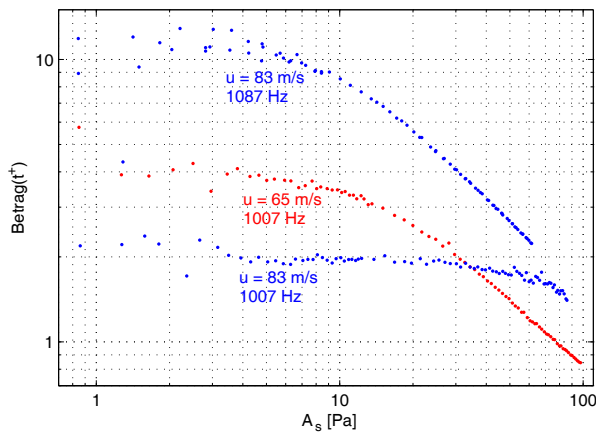


Abbildung 3: Betrag des Transmissionsfaktors  $t^+$  als Funktion der Anregungsamplitude  $A_s$ .

ximum bei 1087 Hz und zum Vergleich eine etwas tiefere Frequenz, ebenfalls im Verstärkungsbereich, bei 1007 Hz. Bei kleinen  $A_s$  liegen die Schallamplituden in der Größenordnung der turbulenten Druckschwankungen, so dass die Bestimmung von  $t^+$  sehr unsicher wird. Dennoch ist zu erkennen, dass  $t^+$  für kleine Schallamplituden konstant ist. Oberhalb einer Grenzamplitude nähert sich  $t^+(A_s)$  einem Verlauf  $\sim 1/A_s$ , d. h. die Amplitude der auslaufenden Schallwelle ( $t^+ A_s$ ) hängt dann nur noch sehr schwach von  $A_s$  ab. Die Grenzamplitude ist umso kleiner, je größer der Transmissionsfaktor bei kleinen Amplituden ist.

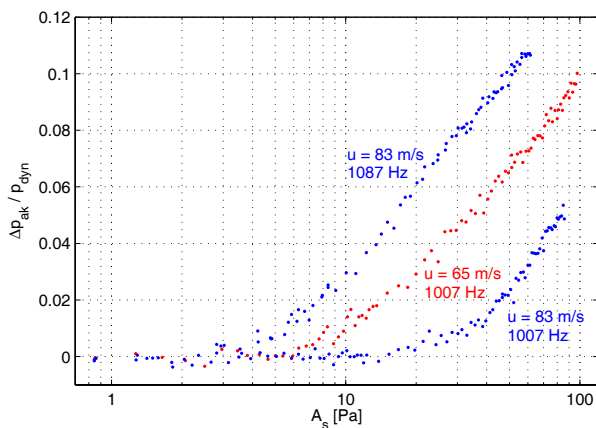


Abbildung 4: Druckabfall am Resonatorabschnitt als Funktion der Anregungsamplitude  $A_s$ .

Der normierte Druckabfall ist in Abb. 4 ebenfalls in Abhängigkeit von der Schallamplitude aufgetragen (wegen der ineffektiveren Beschallung durch eine ebene Welle ist er hier kleiner als in Abb. 2). Oberhalb einer Grenzamplitude wächst der Druckabfall etwa logarithmisch mit der Schallamplitude an. Ein quantitativer Vergleich der Grenzamplituden in den Abbn. 3 und 4 ist zwar aufgrund der Messunsicherheit bei kleinen Amplituden nicht möglich, qualitativ stimmen sie aber überein.

### Versuche mit einer höheren Mode

Um eine höhere Mode anzuregen, werden am stromaufseitigen Resonator drei Lautsprecher angebracht, die mit

einem Phasenversatz von je  $120^\circ$  betrieben werden. Dabei wird kein Schall in die hartwandigen Rohre abgestrahlt.

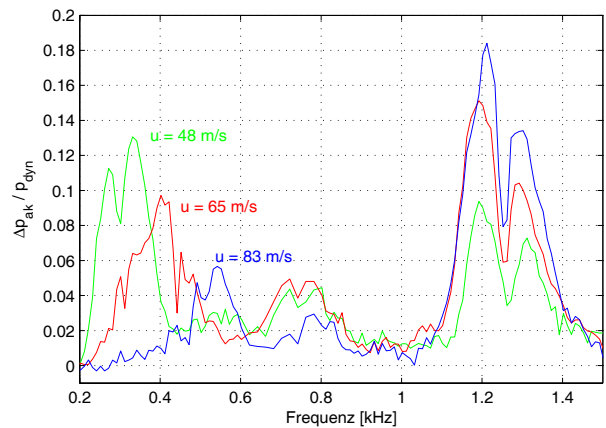


Abbildung 5: Normierter Druckabfall über die Resonatoren bei der Anregung einer höheren Mode für verschiedene Strömungsgeschwindigkeiten.

Abb. 5 zeigt den auf den Staudruck normierten, durch Schall verursachten Druckabfall über den Resonatorabschnitt als Funktion der Frequenz für zwei verschiedene Strömungsgeschwindigkeiten. Bei 1,2 kHz und bei 1,3 kHz sind Maxima im Druckabfall zu sehen. Ein weiteres Maximum liegt bei tiefen Frequenzen, die proportional zur Strömungsgeschwindigkeit gemäß  $f_{\max} = \bar{u}/(15,6 \text{ cm})$  anwachsen. Die Schallamplitude wurde in diesem Aufbau nicht bestimmt, da der Einbau entsprechender Mikrofone die Strömung und das Schallfeld zu stark gestört hätten. Der Druckabfall skaliert ähnlich wie im Fall ebenen Schalleinfalls mit der Amplitude [2]; die gezeigten Messergebnisse sind bei großen Amplituden gewonnen.

Wir halten es für unwahrscheinlich, dass der Schalldruck die maßgebliche Größe für die zu Grunde liegende strömungsakustische Instabilität und den resultierenden vergrößerten statischen Druckabfall ist, u. a. da der Schalldruck bei dem tieffrequenten Druckabfall sehr gering ist. Stattdessen vermuten wir, dass die akustische Auslenkung entscheidend ist: Schallsynchron wird hier die wandnahe Strömung bei einer Auslenkung zur Wand abgebremst und bei einer Auslenkung zur Rohrmitte beschleunigt. Wenn der so in Resonatornähe entstehende Wechselimpuls in das Rohrrinnere diffundiert und sich gleichphasig mit dem Schall überlagert, kann es zu einer Verstärkung des Schalls kommen. Die Impulsabgabe der Gleichströmungskomponente führt zu dem statischen Druckabfall.

### Literatur

- [1] Michael Brandes: *Schallverstärkung in Strömungskanälen mit resonanzartiger Wandauskleidung*. Dissertation, Universität Göttingen, 1997
- [2] Matthias Jüschke: *Akustische Beeinflussung einer Instabilität in Kanälen mit überströmten Resonatoren*. Dissertation, Universität Göttingen, 2006