Experimentelle Untersuchung der Luftströmung an kleinen akustischen Resonatoren

Tobias Merkel
Beuth Hochschule für Technik Berlin
merkel@beuth-hochschule.de

Einleitung

Ein abgegrenztes Luftvolumen, welches durch eine Öffnung in der Wand mit der Umgebung in Verbindung steht, bildet einen akustischen Resonator, auch als Helmoltz-Resonator bezeichnet [1]. Sein akustisches Verhalten kann als Feder-Masse-System beschrieben werden: Das Luftvolumen in der Öffnung (Hals) wirkt als Masse, die periodisch gegen das eingeschlossene Luftvolumen als Feder agiert. Die Resonanzfrequenz ergibt sich näherungsweise aus der Beziehung $fres \sim (m \cdot n)^{-0,5}$ ($n \cdots$ Nachgiebigkeit) und wird maßgeblich durch die Geometrie des Resonators definiert [2]. Diese Modellvorstellung lässt sich anwenden, wenn die räumlichen Dimensionen des Resonators deutlich kleiner als die Wellenlänge $dim_{xyz} \ll \lambda_{res}$ ist.

Luftströmung an der Mündung

Wenn auf einen Helmholtz-Resonator eine Schallwelle mit der Resonanzfrequenz f_{res} von außen einwirkt, kommt es zu einer periodischen Luftbewegung im Hals. Dabei strömt bei Zunahme des Schalldrucks Luft in den Resonator herein. Die korrespondierende Druckabnahme kehrt die Strömungsrichtung im Hals um, wobei jetzt die kinetische Energie der Luftpartikel ein Richtungsausbildung der Strömung bewirkt (siehe Abb. 1). Einfach nach-

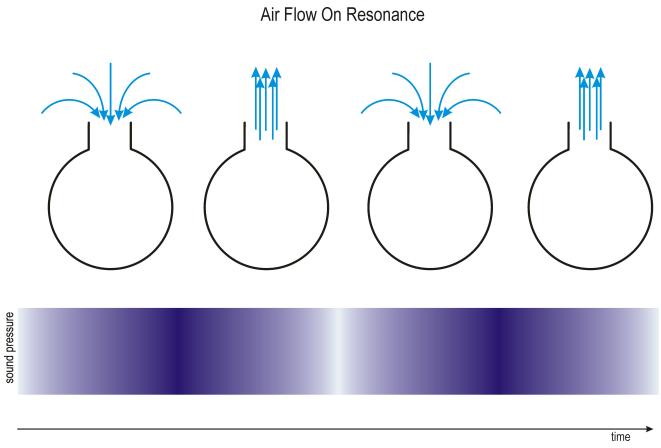

Abbildung 1: Ausbildung einer gerichteten Luftströmung an der Resonatormündung.

zuvollziehende Experimente zeigen, dass z.B. mit einem Kugelresonator mit einer $f_{res} \approx 500\ Hz$ und einem Volumen von 120 cm^3 bei einem äußeren Schallpegel von 120 dB ein gerichteter Luftstrom erzeugt werden kann, der eine Kerze zum Verlöschen bringt.

Kleine Resonatoren

Der Gegenstand unserer Untersuchungen ist die Ausbildung von Luftströmungen an deutlich kleineren Resonatoren mit den Abmessungen gemäß Abbildung 2, die aus Aluminium gedreht worden sind. Als variable Größe

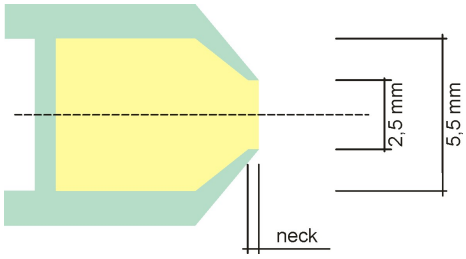

Abbildung 2: Geometrie der untersuchten Resonatoren.

diente die Halslänge l_n (...neck). Mittels eines Kolbens konnte das Volumen so angepasst werden, dass mit einer einheitlichen Resonanzfrequenz von $f_{res} = 6800\ Hz$ für alle untersuchten Resonatoren gearbeitet werden konnte. Die Tiefe des Hohlraums von der Mündung bis zur Kolbenrückwand variierte dabei zwischen $4.6 \cdots 5.8\ mm$.

Sensoren

Zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit standen uns zwei unterschiedliche Hitzdraht-Anenometer zur Verfügung (Abb. 3). Das Messprinzip beruht darauf, dass

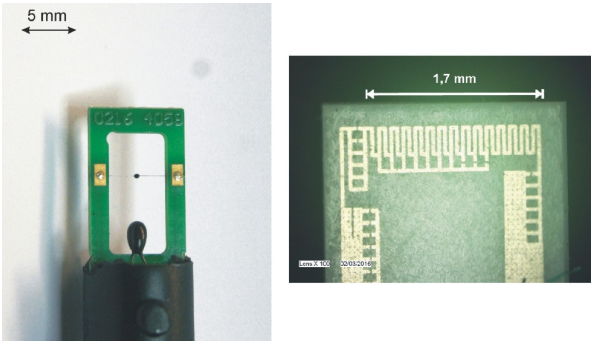

Abbildung 3: Hitzdraht-Anenometer: Testo405 (links) und TROTEC TA300.

ein Draht mit einem elektrischen Strom erwärmt wird. Ein Luftstrom führt zu einer Kühlung dieses Drahtes. Der nötige Strom, der die ursprüngliche Temperatur des Drahtes wieder herstellt, gibt ein Maß für den zu messenden Luftstrom.

Das Testo405 arbeitet mit einem frei gespannten Draht, der radial (in die Bildebene hinein) umströmt wird. Die räumliche Auflösung in zwei Raumdimensionen ist sehr

hoch, in Richtung des gespannten Drahtes kann nur stark verfälscht gemessen werden.

Das TROTEC TA300 besteht aus einem Sensorchip, auf dessen einer Seite ein Hitzdraht als meanderförmiger Leiterzug aufgebracht ist. Die zu messende Strömungsrichtung verläuft parallel zum Chip (von rechts nach links in Abb. 3). Auch dieser Sensor kann in nur zwei Raumdimensionen fein auflösen. Er ist weiterhin abhängig von der Anströmrichtung, da der tragende Chip den Luftstrom von der Rückseite abschirmen kann.

Der zu messende Luftstrom hat einen Durchmesser von nur ca. 2 mm. Damit wird der Draht des Testo405 immer nur teilweise umströmt und liefert systematisch zu kleine Messwerte (ungefähr 45% im Vergleich zum TA300). Daher wurden die hier angeführten Ergebnisse mit dem TROTEC TA300 aufgenommen, auch wenn weitere Fehler durch eine nicht optimale Anströmungsrichtung damit in Kauf genommen wurden. Prinzipbedingt können die Sensoren nur den Betrag der Strömungsgeschwindigkeit erfassen.

Messergebnisse

Für die folgenden Messergebnisse wurde der Sensorkopf radial über der Resonatoröffnung in einem definiertem Mündungsabstand h bewegt.

Der Einfluss der Halslänge l_n auf die Ausbildung von Luftströmung ist in Abbildung 4 zu erkennen. Je kürzer

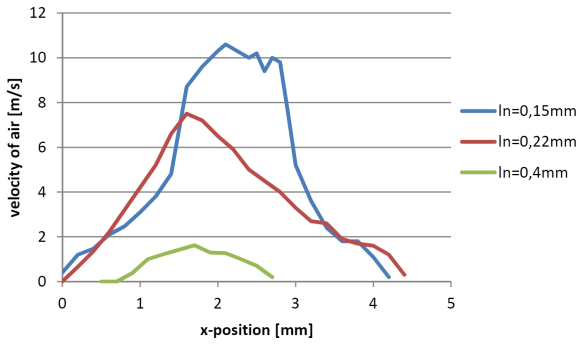

Abbildung 4: Luftströmung an Resonatoren mit unterschiedlicher Halslänge l_n (SPL = 133 dB, f_{res} = 6800 Hz, Mündungsabstand $h = 1$ mm)

der Hals ist, desto stärker ist der entstehende Luftstrom. Dabei sind die größten Geschwindigkeiten über einer radialen Ausdehnung zu messen, die geringfügig kleiner als der Öffnungsdurchmesser von $2,5$ mm des Resonators ist.

Die untersuchten Resonatoren wurden parallel dazu in einem Impedanzmessrohr vermessen und der Reflexionsfaktor bestimmt. Aus dieser Messungen lassen sich Aussagen zur Güte der Resonatoren treffen [3]. Die Ergebnisse zeigen, dass die Güte Q – anders als erwartet – bei Resonatoren mit großer Luftströmung geringer ausfällt.

Mit zunehmendem Abstand h von der Resonatoröffnung nimmt die Strömungsgeschwindigkeit ab (Abb. 5). Eine Aufweitung des Radius mit zunehmender Höhe ist nicht zu erkennen, auch wenn das aufgrund des Masseerhaltungsgesetzes zu erwarten wäre. Deutlich zu erkennen

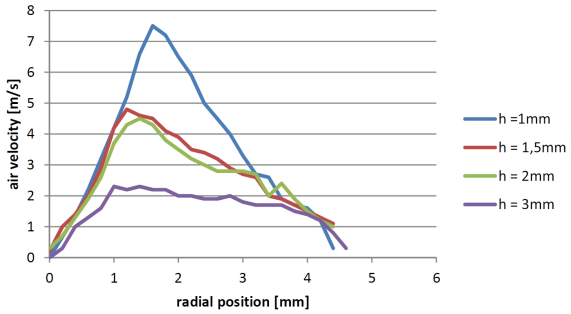

Abbildung 5: Luftströmung in Abhängigkeit der Höhe h (SPL = 133 dB, f_{res} = 6800 Hz, Halslänge $l_n = 220\mu m$)

sind die Unsymmetrien, die wir auf einen fehlerhaften Anstromwinkel des Sensors zurückführen.

Im folgenden Versuch wurde die maximale Strömungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit des anregenden Schalldrucks ermittelt (Abb. 6). Zu erkennen ist ein annähernd

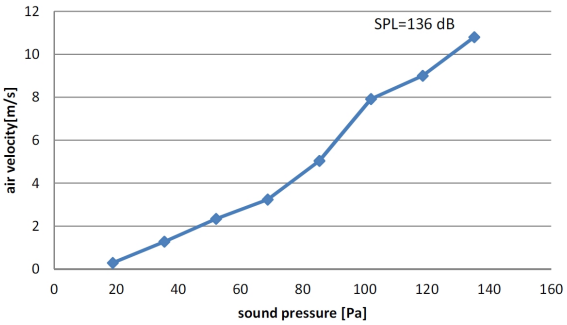

Abbildung 6: Luftströmung in Abhängigkeit vom anregenden Schalldruck (Höhe $h = 1$ mm, Halslänge $l_n = 150\mu m$, f_{res} = 6800 Hz)

linearer Zusammenhang. Dieses entspricht nicht den Erwartungen und ist für turbulente Strömungsvorgänge äußerst ungewöhnlich.

Aus einem bekannten Strömungsprofil lässt sich das bewegte Luftvolumen berechnen. Die hier vorgestellten Messungen beinhalten viele Unsicherheiten, sind aber aufgrund des Messprinzips eher zu gering. Dennoch soll das bewegte Luftvolumen abgeschätzt werden: Der Volumenstrom ergibt sich aus

$$\dot{V} = \bar{v} \cdot A$$

(mit $\bar{v} \cdots$ mittlere Strömungsgeschwindigkeit und $A \cdots$ durchströmte Fläche). Für unseren strömungsstärksten Resonator erhalten wir bei einer gedachten Fläche in der Größe der Resonatoröffnung ($\emptyset = 2,5$ mm) bei einem Schalldruck von 137 dB einen Volumenstrom von $\dot{V} = 83$ cm^3/s.

Die „ausgeblasene“ Luftmenge lässt sich alternativ nach dem Rückstoßprinzip ermitteln. Die Rückstoßkraft F_r ergibt sich aus

$$F_r = \dot{m} \cdot \bar{v} = \dot{V} \cdot \rho \cdot \bar{v}$$

(mit $\rho \cdots$ Luftdichte). Zur Ermittlung dieser Kraft wurde der Resonator auf einer Feinwaage platziert und akustisch angeregt. Die so ermittelte Kraft betrug nur etwa 1/10 der erwarteten Kraft. Wir begründen dieses Ergebnis damit, dass die „ausgeblasene“ Luft natürlich auch angesaugt werden muss. Aufgrund der relativ flachen Oberfläche des Resonators erfolgt das Ansaugen entgegengesetzt gerichtet und kompensiert den Rückstoß großteilig.

Zusammenfassung

An kleinen akustischen Resonatoren treten bei akustischer Anregung gerichtete Luftströmungen in Mündungsnähe auf. Diese lassen sich messtechnisch mit Hitzdrahtanenometern erfassen, auch wenn dabei mit größeren Messfehlern zu rechnen ist.

- Je kürzer die Halslänge des Resonators ist, desto stärker kommt es zu einer gerichteten Luftströmung. Die höchsten gemessene Geschwindigkeit lag bei $v = 25\ m/s$ ($f_{res} = 6800\ Hz$, SPL=137 dB).
- Messungen des Reflexionsfaktors der Resonatoren im Impedanzmessrohr ergeben keine Korrelation mit deren Strömungsverhalten.
- Es wurde ein annähernd proportionaler Zusammenhang zwischen Strömungsgeschwindigkeit und anregendem Schalldruck ermittelt.
- Die angewendeten Messmethoden ergeben prinzipbedingt keine zu großen Messwerte und verbergen große Messfehler.

Ob andere Messprinzipien wie Laserdoppleranenometrie (LDA) oder Particle Image Velocimetry (PIV) verlässlichere Messergebnisse liefern und geeignet sind, lokal begrenzte Luftbewegungen an den Mündungen der Resonatoren zu erfassen, werden zukünftige Untersuchungen zeigen.

Literatur

[1] Herman von Helmholtz. *Die Lehre von den Tonempfindungen.* Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig, 1913.

[2] Lawrence E. Kinsler et. al. *Fondamentals of Acoustics.* John Wiley & Sons, Inc., 1999.

[3] T. Merkel. *Untersuchungen an hochfrequenten akustischen Resonatoren und Vergleich mit numerischer Simulation.* DAGA Nürnberg, 2015.