

## Akustische Resonatoren für Ultraschall in Luft

Tobias Merkel<sup>1</sup>, Jürgen Harpain<sup>2</sup>, Norbert Gorenflo<sup>1</sup>, Jonas Stein<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Beuth Hochschule für Technik Berlin, Deutschland, Email: merkel@beuth-hochschule.de

<sup>2</sup> Fischer Elektronik GmbH & Co. KG, Lüdenscheid, Deutschland

### Zusammenfassung

Ein abgeschlossenes Luftvolumen, welches durch einen Verbindungskanal mit der umgebenden Luft korrespondiert, bildet einen akustischen Resonator mit einer ausgeprägten Resonanzfrequenz. Wenn eine akustische Welle mit hoher Amplitude zur Anregung einwirkt, lassen sich in Öffnungsnähe Luftbewegungen beobachten, die zu einem gerichteten Massestrom führen können.

Um eine technische Nutzung zu ermöglichen, ist es wünschenswert, die Resonanzfrequenz in den Ultraschallbereich zu verschieben, damit die anregenden Schallwellen durch Menschen nicht wahrnehmbar sind. Aufbauend auf Untersuchungen an Resonatoren im einstelligen Kilohertzbereich erfolgt eine Skalierung zu nichthörbaren Frequenzen.

Die damit verbundene Verkleinerung der Resonatoren erfordert besondere Herausforderungen bei der Bestimmung der akustischen und fluidischen Eigenschaften. Zum Einsatz kommt ein extra dafür entwickeltes Impedanzmessrohr für den Ultraschallbereich. Weitere zu lösende Probleme bestehen bezüglich der Anregung der Resonatoren im Ultraschallbereich, der reproduzierbaren Fertigung von Resonatoren gleicher Eigenschaften sowie der Messung der Fluidbewegung an den Öffnungen.

Unterstützt werden die Untersuchungen durch numerische Simulationen auf Grundlage der linearen Wellenakustik sowie durch fluiddynamische Berechnungen auf der Basis der Navier-Stokes-Gleichung.

### Helmholtz-Resonatoren

Ein abgegrenztes Luftvolumen, welches durch eine Öffnung in der Wand mit der Umgebung in Verbindung steht, bildet einen akustischen Resonator, auch als Helmholtz-Resonator bezeichnet [1]. Sein akustisches Verhalten kann als Feder-Masse-System beschrieben werden: Das Luftvolumen in der Öffnung (Hals) wirkt als Masse  $m$ , die periodisch gegen das eingeschlossene Luftvolumen als Feder (Nachgiebigkeit  $n$ ) agiert. Die Resonanzfrequenz ergibt sich näherungsweise aus der Beziehung  $f_{\text{res}} \sim (m \cdot n)^{-0,5}$  und wird maßgeblich durch die Geometrie des Resonators definiert [2].

Denkbar sind Resonatoren mit unterschiedlichen Formen und dennoch gleichen Resonanzfrequenzen. Daher gibt es weitere Eigenschaften, wie z.B. die Güte  $Q$ , die zur Beschreibung der Eigenschaften herangezogen werden können.

### Luftströmung

Wenn ein Schallfeld von außen auf die Öffnung eines Resonators einwirkt, welches mit seiner Resonanzfrequenz übereinstimmt, kommt es zu einer periodischen Luftbewegung durch den Hals des Resonators. Dabei unterscheiden sich die Strömungsformen von einströmender und ausströmender Luft während der jeweiligen halben Perioden einer Schwingung. Mit Experimenten lässt sich zeigen, dass mittig über der Resonatoröffnung ein gerichteter Luftstrom abweisend vom Resonator entsteht [3].

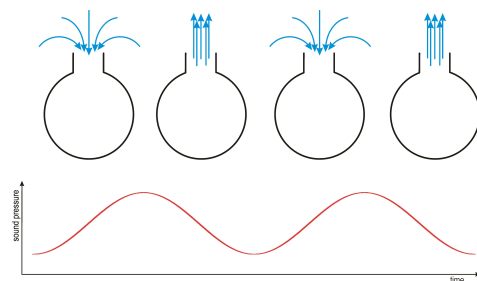


Abbildung 1: Ausbildung eines gerichteten Luftstroms an der Resonatoröffnung bei periodischer Druckänderung.

Abbildung 1 verdeutlicht diese Vorgänge: Bei Anstieg des äußeren Drucks strömt Luft ins Innere des Resonators. Wenn der Druck nach einer halben Periode wieder abnimmt, kehrt sich die Bewegungsrichtung der Luft um. Allerdings behalten die Luftpartikel aufgrund ihrer kinetischen Energie eine Vorzugsrichtung bei. Das führt dazu, dass ein effektiver, gerichteter Luftstrom oberhalb der Öffnung zu beobachten ist.

### Skalierung zu kleinen Resonatoren

Um diesen Luftstrom technisch nutzen zu können, streben wir eine Verkleinerung der Resonatoren bis in den Ultraschallbereich an. Das Ziel besteht darin, eine Resonatorgeometrie zu finden, bei der die gerichtete Luftströmung maximal wird. Da die neuen Resonatoren sehr klein sein werden – wir erwarten Abmaße im Millimeter- und Submillimeterbereich – werfen sich folgende Fragen auf:

- Ist die oben beschriebene Modellvorstellung aus Feder-Masse-Schwinger auch für kleine Resonatoren gültig?
- Wie ist die Halsgeometrie (z.B. Länge  $\leftrightarrow$  Durchmesser) für einen effektiven Luftstrom zu wählen?
- Besteht ein Zusammenhang zwischen Resonatorgüte und Luftstrom?

- Wie lassen sich die Eigenschaften der Resonatoren wie Resonanzfrequenz und Güte messtechnisch bestimmen?
- Wie lässt sich ein gerichteter Luftstrom nachweisen?

In einem Zwischenschritt [3] konnten wir an Resonatoren mit einer Frequenz von etwa 6500 Hz Strömungsgeschwindigkeiten bis zu 25 m/s in unmittelbarer Öffnungsnähe nachweisen.

### Numerische Simulation

Parallel zu experimentellen Versuchen wird das Strömungsverhalten der Resonatoren mit numerischen Mitteln untersucht [4]. Anfangs wurde das Verhalten mit der linearen Helmholtzgleichung abgebildet. Sowohl mit FEM- als auch mit BEM-Verfahren wurden die gleichen Ergebnisse erzielt. Anschließend wurde das Modell mit der nichtlinearen Navier-Stokes-Gleichung simuliert, wobei bei kleinen Amplituden die gleichen Ergebnisse erzielt wurden. Für Schallereignisse mit großen Amplituden (z.B. mit einem anregenden Druckpegel von 30 Pa) konnten Unterschiede zwischen Ein- und Ausströmvorgängen am Resonator nachgewiesen werden. Zur Ergebnisvalidierung wurde die Bernoulli-Gleichung herangezogen.

In weiteren Schritten müssen viskose Gaseigenschaften berücksichtigt werden und die thermische Interaktion zwischen Resonatorwand und Gas betrachtet werden.

### Impedanzmessrohr

Mit einem Impedanzmessrohr lässt sich die Resonanzfrequenz eines Helmholtzresonators bestimmen (Abb. 2). Für den Absorptionskoeffizienten ergibt sich bei der Re-

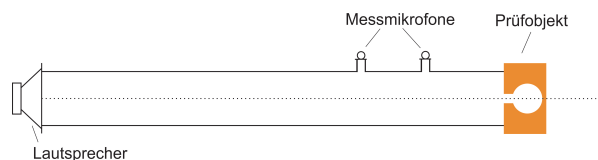


Abbildung 2: Messaufbau zur Bestimmung der Resonanzfrequenz im Kundtschen Rohr.

sonanzfrequenz ein Maximum, da durch Anregung zum Schwingen ein Teil der Schallenergie in Wärme umgesetzt wird.

Damit sich der Schall nur in horizontaler Richtung ausbreitet, muss der Durchmesser des Rohrs kleiner als die halbe Wellenlänge der interessierenden Frequenz sein. Für Messungen im unteren Ultraschallbereich ergibt sich damit ein Rohrdurchmesser von maximal 4 mm.

Der Abstand zwischen den Messmikrofonen muss ebenfalls kleiner als die halbe Wellenlänge sein. Wir haben uns für den Einsatz von Si-Chipmikrofonen SPU0410LR5H-QB [5] entschieden (Abb. 3). Bei einer Gehäusebreite von 3 mm lassen sich zwei identische Mikrofone nebeneinander so platzieren, dass die Mikrofonöffnungen mit einem

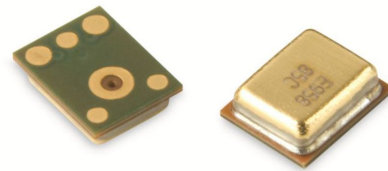


Abbildung 3: Miniatur-Mikrofone für das Impedanzmessrohr [5].

Lochdurchmesser von 0,25 mm sehr dicht nebeneinander liegen.

Die Abbildung 4 zeigt die Übertragungscharakteristik der Mikrofone. Auch wenn eine starke Frequenzabhängigkeit

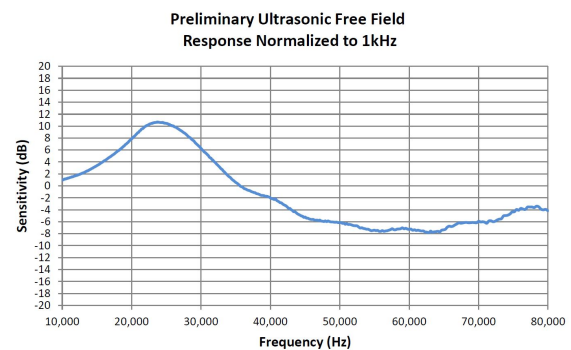


Abbildung 4: Frequenzabhängige Empfindlichkeit der Mikrofone im unteren Ultraschallbereich [5].

besteht, können die Mikrofone Schall im interessierenden Ultraschallbereich sehr gut erfassen. Über eine ohnehin notwendige Kalibrierung des Messaufbaus lassen sich die Erfassungsungenauigkeiten korrigieren.

Das Impedanzmessrohr wurde in einen Messingblock eingearbeitet (Abb. 5), eines der beiden Mikrofone ist an der Oberseite zu erkennen. Damit die Pfade von der Innenwandung des Rohrs zur Membran möglichst kurz gehalten werden, wurden die Mikrofone auf eine flexible Leiterplatte als Träger aufgelötet.

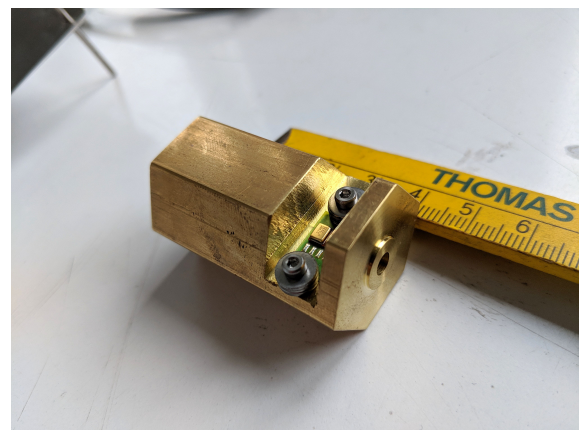
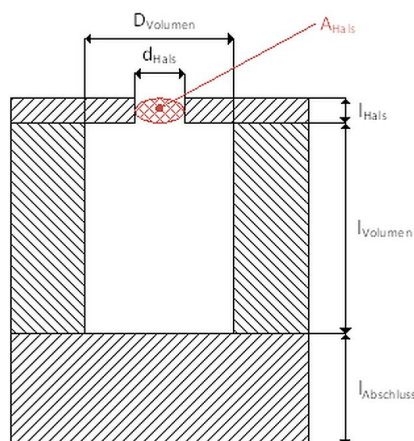


Abbildung 5: Miniaturisiertes Impedanzmessrohr, siehe auch [6].

## Resonatoren

Für eine praktische Fertigung von Resonatoren haben wir uns für einen Sandwich-Aufbau entschieden. Über eine Grundplatte wird eine gelochte Al-Platte mit einer Dicke von 1,5 mm positioniert. Für die oberste Schicht kommt eine ebenfalls gelochte dünne Abschlusschicht zum Einsatz, wobei die Löcher sehr viel kleiner sind. Es entstehen akustische Resonatoren mit den Maßen aus Abbildung 6.



**Abbildung 6:** Querschnitt eines Resonators

Halsdurchmesser  $d_{\text{Hals}} = 300 \mu\text{m}$

Volumendurchmesser  $D_{\text{Vol}} = 600 \mu\text{m}$

Halslänge  $l_{\text{Hals}} = 75 \mu\text{m}$

Volumenlänge  $l_{\text{Vol}} = 1,5 \text{ mm}$

Der Durchmesser des Halses lässt sich in der Fertigung variieren, so dass die Möglichkeit besteht, darüber die Resonanzfrequenz auf einen gewünschten Wert zu fixieren.

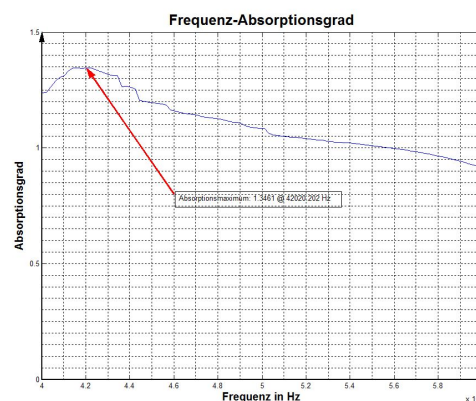
Der Sandwich-Aufbau wurde bisher lediglich mechanisch unter Druck fixiert. Das Ziel ist es, mehrere identische Resonatoren in einer Ebene aufzubauen, die alle exakt die gleiche Resonanzfrequenz haben und gleichzeitig mit einer akustischen Welle zum Schwingen angeregt werden können.

### Erste Messergebnisse

Die Sandwich-Struktur wurde mit einem Stempel gegen die Öffnung des Impedanzmessrohres gepresst, so dass die Resonatoröffnung mittig das Messrohr abschließt. Die Messung des Absorptionskoeffizienten zeigt, dass der Resonator eine Resonanzfrequenz bei 42 kHz aufweist (Abb. 7). Diese Messung wurde noch ohne vorherige Kalibrierung der Mikrofonanordnung durchgeführt, so dass – anders als dargestellt – ein dem Absorptionsgrad ähnlicher Wert erfasst wurde, der eine erste Beurteilung der Funktion des Messrohres erlaubt.

### Ausblick

Das Ziel, akustische Resonatoren im Ultraschallbereich zu fertigen, die eine gerichtete Luftströmung bei akusti-



**Abbildung 7:** Erste Messergebnisse für einem Resonator mit dem noch nicht kalibrierten Impedanzmessrohr.

scher Anregung erzeugen, macht noch umfangreiche Untersuchungen erforderlich:

- Die numerische Simulation muss so weit entwickelt werden, dass sich das Strömungsverhalten an der Resonatoröffnung abbilden lässt.
- Mit den Simulationsergebnissen muss eine gut geeignete Geometrie insbesondere der Halsöffnung gefunden werden.
- Diese Geometrie muss reproduzierbar zu fertigen sein. Verschiedene Fertigungsverfahren müssen auf Eignung untersucht werden.
- Ein Messverfahren muss gefunden werden, um die angestrebte Luftströmung nachzuweisen.

### Dank

Das Projekt wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie im Rahmen des Programms „Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand“ (ZIM) gefördert.

### Literatur

- [1] Hermann von Helmholtz. *Die Lehre von den Tonempfindungen*. Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig, 1913.
- [2] Lawrence E. Kinsler et. al. *Fundamentals of Acoustics*. John Wiley & Sons, Inc., 1999.
- [3] Tobias Merkel. *Experimentelle Untersuchung der Luftströmung an kleinen akustischen Resonatoren*. DAGA Aachen, 2016.
- [4] Norbert Gorenflo u. a. *Berechnung von Luftströmungen an Helmholtzresonatoren bei Resonanzfrequenzen*. DAGA Rostock, 2019.
- [5] Knowles Electronics. [www.knowles.com](http://www.knowles.com), 2013.
- [6] Jonas Stein u. a. *Impedanzmessrohr für Ultraschall*. DAGA Rostock, 2019.