

Modellierung von Impedanzmessungen an Blasinstrumenten

Johannes Baumgart, Timo Grothe und Roger Grundmann

Institut für Luft- und Raumfahrttechnik, Technische Universität Dresden, 01062 Dresden

E-Mail: johannes.baumgart@tu-dresden.de

Einleitung

Der Resonator von Blasinstrumenten wird durch seine schwach gedämpften Eigenfrequenzen maßgeblich charakterisiert. Zur experimentellen Bestimmung dieser hat sich die Impedanzmesstechnik bewährt. Die Messung erfolgt üblicherweise ohne angestecktes Mundstück. Mithilfe von dreidimensionalen Finite-Elemente-Modellen ist es möglich die reale Situation inklusive der dissipativen Effekten zu erfassen. Zum Einsatz kommen hier Elemente mit quadratischer Ansatzfunktion für die Geschwindigkeit und lineare für den Druck. Hier wird ein Vergleich der Rechnungen mit realen Impedanzmessungen mithilfe der Kapilarmethode und vereinfachte Rechnungen nach der Transmission-Line-Methode vorgestellt. Es zeigen sich sehr gute Übereinstimmungen für den Frequenzbereich der tiefsten Resonanzfrequenzen.

Methode

Es gibt verschiedene Möglichkeiten die akustische Impedanz von Blasinstrumenten zu ermitteln. Experimentell ist es möglich die Erregerquelle über einen sehr hohen akustischen Widerstand von dem Untersuchungsobjekt zu entkoppeln [1]. Die Entkoppelung führt zu hohen Verlusten und somit zu einem geringen Messsignal, da jedoch der Aufbau recht einfach ist wurde diese Messmethode hier verwendet. Alternativ ist es auch möglich das eingehende und zurück reflektierte Signal mit mehreren Mikrofonen zu analysieren [3]. Neben der Messung ist ebenso die Berechnung möglich, wenn Geometrie und Materialeigenschaften bekannt sind. Bereits mit eindimensionalen Modellen wie nach Plitnik und Strong [5], lassen sich gute Übereinstimmungen erzielen. Diese Methode wurde in dieser Arbeit eingesetzt.

Die Luftbewegungen im Resonator lassen sich durch die Navier-Stokes'schen Gleichungen beschreiben. Die direkte Lösung dieser erfordert allerdings einen sehr hohen Rechenaufwand. Für kleine Bewegungsamplituden reicht es jedoch aus, das linearisierte Problem zu lösen, wodurch die konvektiven Terme entfallen. Hier wurde weiterhin die Vereinfachung gemacht die thermischen Verluste zu vernachlässigen. Dies ist auf Grund der Prandtl Zahl nahe 1 für Luft eine Vernachlässigung die weiterer Untersuchungen Bedarf. Die viskosen Ver-

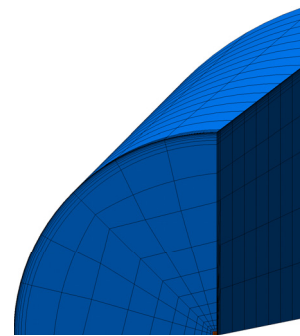


Figure 1: Finites Elemente Netz im Eintrittsbereich. Die Auflösung der viskosen Grenzschicht an der Wand ist durch entsprechend kleine Elemente gewährleistet.

luste des Fluides sind vollständig erfasst. Die Implementierung erfolgte hier im Frequenzbereich mit Taylor-Hood-Elementen als benutzerdefiniertes Element in der Finite-Elemente-Software Ansys [2, 4].

Um die viskosen Verluste korrekt zu erfassen ist das Netz nahe der Wand ausreichend fein gewählt, um die instationäre Grenzschicht aufzulösen (siehe Abbildung 1). Ebenso ist das Netz im gesamten Gebiet fein genug, um die akustische Wellenlänge zu erfassen.

Impedanzverlauf des Konus

Zur Validierung wurde in Anlehnung an Blasinstrumente ein Konus mit einer Länge von 66 cm, einem Öffnungswinkel von 0.8° Grad und einem Eintrittsradius von 9,6 mm gewählt. Um numerische Unsicherheiten bei der Erfassung von offenen Enden zu vermeiden, waren beide verschlossen. Es konnte eine sehr gute Übereinstimmung für die Lage der Resonanzfrequenzen zwischen Experiment nach Backus [1], analytischem eindimensionalem Modell [5] und der räumlichen Finite-Elemente Rechnung erreicht werden (siehe Abbildung 2). Auch die Amplitudenmaxima wurden recht gut erfasst, sind im Experiment jedoch möglicherweise durch kleine Lecks niedriger. Die beiden theoretischen Modelle stimmen sehr gut überein, wenn die thermischen Verluste vernachlässigt sind. Im analytischen Modell zeigte sich ein geringer Einfluss der thermischen Verluste.

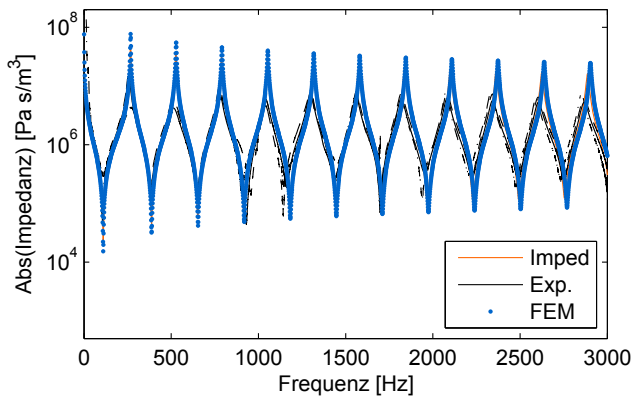


Figure 2: Impedanz eines geschlossenen Konus. Vergleich von Experiment, analytischem Modell und Finite-Elemente Rechnung.

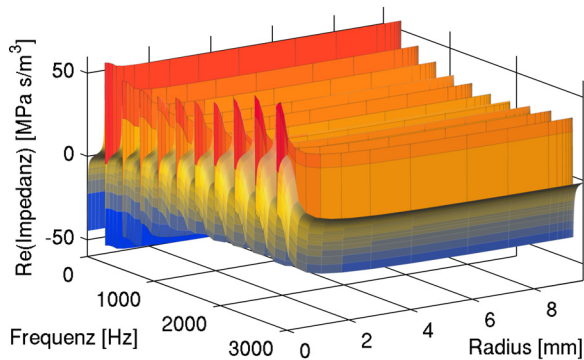


Figure 3: Impedanz als Funktion der Frequenz und des Abstandes von der Erregerquelle auf der Eintrittsfläche.

Räumliche Effekte im Eintrittsbereich

Bei der angewendeten experimentellen Messmethode wird ein Mikrophon nahe der Erregerstelle platziert. Die Frage stellt sich wie weit die Messstelle von der Erregerstelle entfernt sein muss, um Nahfeldeffekte des sich bildenden Freistrahls zu vermeiden? Die Auswertung der Impedanz über Frequenz und radialem Abstand vom Zentrum, wo sich die Erregerstelle befindet, geben hier Aufschluss. Für die hier vorgestellte Situation ist bereits nach etwa 1 Millimeter die Störung abgeklungen (siehe Abbildung 3).

Impedanz vom geschlossenen Fagott

Als Beispiel einer realistischen Geometrie wurde ein Fagott analysiert. Auch hier waren alle Tonlöcher sowie Aus- und Eintritt verschlossen. Die Impedanzminima stimmen hier sehr gut zwischen Finite-Elemente-Modell und analytischer Abschätzung überein (siehe Abbildung 4). Im höheren Frequenzbereich kommt es zu Abweichungen bei den Maxima.

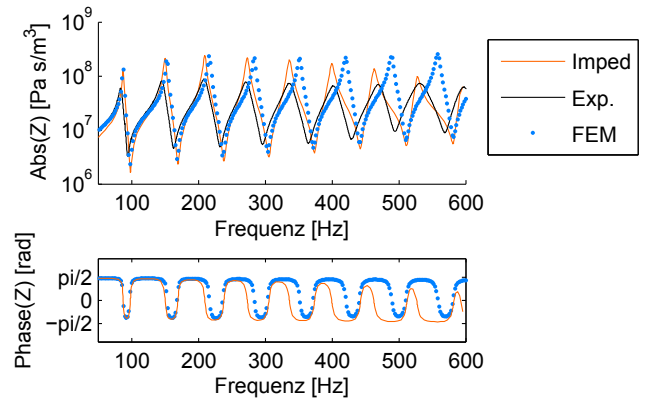


Figure 4: Impedanz eines vollständig geschlossenen Fagotts.

Zusammenfassung

Die numerische Behandlung des visko-akustischen Problems konnte erfolgreich für geschlossene Blasinstrumente validiert werden. Bei der Impedanzmessung hat das lokal induzierte Geschwindigkeitsfeld nur auf sehr kleinen Distanzen (ca. 1 mm) Einfluss auf die gemessene Impedanz. Die Berechnung realer Querschnittsverläufe ist möglich.

Danksagung

Das Projekt wird gefördert vom Bundeswirtschaftsministerium durch die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) "Otto von Guericke" e.V.

References

- [1] John Backus. Input impedance curves for the reed woodwind instruments. *Journal of the Acoustical Society of America*, 56(4):1266–1279, 1974.
- [2] Johannes Baumgart, Mario Fleischer, and Axel Voigt. Fluid-structure interaction in the hair bundle modelled by the finite-element method. In *USNC-TAM*, 2010.
- [3] Paul Dickens, John Smith, and Joe Wolfe. Improved precision in measurements of acoustic impedance spectra using resonance-free calibration loads and controlled error distribution. *Journal of the Acoustical Society of America*, 121(3):1471–1481, 2007.
- [4] Ansys Inc. *Ansys ver.11*. www.ansys.com, 2007.
- [5] George R. Plitnik and William J. Strong. Numerical method for calculating input impedances of the oboe. *Journal of the Acoustical Society of America*, 65(3):816–825, 1979.