

Experimentelle Untersuchungen des aus der Kernspalte eines Pfeifenfußmodells austretenden Luftbands

H. J. Außerlechner^{2,1}, T. Trommer^{2,1}, J. Angster^{1,2}, A. Miklós³

¹ Fraunhofer-Institut für Bauphysik, 70569 Stuttgart, E-Mail: hubert.ausserlechner@ibp.fhg.de

² Universität Stuttgart, Lehrstuhl für Bauphysik, 70569 Stuttgart

³ Steinbeis Transferzentrum Angewandte Akustik, 70499 Stuttgart

Einleitung

Der Einschwingvorgang einer Lippenorgelpfeife wird im Wesentlichen durch den Schneidenton bestimmt. Ein Schneidenton entsteht, sobald ein Luftstrahl unter erhöhtem Druck aus einer Öffnung austritt und auf eine scharfe Kante mit Abmessungen ähnlich jenen der Öffnung, trifft. Je nach Größe der Austrittsgeschwindigkeit und der Entfernung zum Objekt verändert sich die Amplitude und Frequenz des Schneidentons.

Eine Untersuchung der Entstehung des Pfeifenklangs erfordert somit die Betrachtung des akustischen Signals in Abhängigkeit der beeinflussenden Parameter wie dem Druck im Pfeifenfuß, der Kernspaltenweite und der Aufschnitthöhe. Mit Hilfe eines entwickelten Pfeifenfußmodells einer c Pfeife des Prinzipal 4' Registers (eine detaillierte Beschreibung kann [2] entnommen werden) können die gewünschten Parameterwerte mit Mikrometerschrauben reproduzierbar eingestellt werden.

Durchgeführte Geschwindigkeits- und akustische Messungen zeigen eine gute Übereinstimmung mit vorhandenen Theorien, allerdings werden die theoretischen Parameterwerte anhand der Messergebnisse noch modifiziert. In weiterer Folge wird auch auf die von M. Aristide Cavaillé-Coll 1840 veröffentlichte Annahme [3], dass das Luftband seine Schwingungen wie eine frei schwingende Metallzunge, die an der Kernspalte der Pfeife angebracht wäre, ausführt, näher eingegangen.

Messsystem

Nach Entfernen des Resonators von einer Orgelpfeife bilden die restlichen Teile, wie der Pfeifenfuß, der Kern, das Unter- und das Oberlabium, das sogenannte Pfeifenfußmodell (vgl. Abbildung 1). Weiße Pfeile in Abbildung 1 definieren die mittels Mikrometerschrauben bzw. Linear- und Rotationstischen realisierbaren Bewegungsmöglichkeiten der Parameter. Die Definition des Nullpunkts des für die Messungen verwendeten Koordinatensystems entspricht dem Schnittpunkt der Achsen der Unterseite des Kerns (Kernplatte), der Innenwand des Unterlabiums und der Mittellinie der Wanddicke des Oberlabiums. Der Nullpunkt befindet sich in der Mitte der Labiumbreite $b = 60$ mm.

Alle Strömungsmessungen und akustischen Messungen sind im reflexionsarmen Raum des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik in Stuttgart durchgeführt worden. Die Windversorgungseinheit für das Pfeifenfußmodell [1], bestehend aus dem Gebläse, dem Rollventil, dem Schwimmerbalg, dem Windkanal und der Windlade, entspricht in vereinfachter Weise jenem einer Orgel.

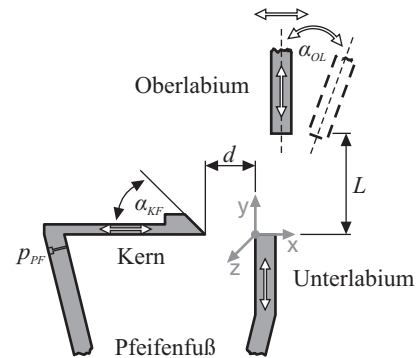


Abbildung 1: Schematische Skizze des Pfeifenfußmodells. Beschreibung der verwendeten Parameter und Definition des Nullpunkts des Koordinatensystems. Die weißen Pfeile definieren die Einstellmöglichkeiten des jeweiligen Parameters.

Ergebnisse und Diskussion

Strömungsmessungen

Unter Zuhilfenahme eines Hitzdrahtanemometers (Hitzdrahtdurchmesser $10\ \mu\text{m}$) werden Strömungsmessungen durchgeführt. Direkt an der Kernspalte, die y -Höhe des Drahtes beträgt ca. $0,5$ mm, ergibt sich eine rechteckförmige Geschwindigkeitsverteilung. Die Werte ihrer y -Komponenten $u_y(x, 0, 5)$ können laut [5] mit $u_y(x, 0, 5) = U_0 \text{sech}^2(x^n)$ [m/s] mathematisch beschrieben werden; U_0 beschreibt die maximale Geschwindigkeit, x die aktuelle x -Position und n einen Fit Exponenten, der die Steilheit der Flanken bestimmt. Für die Kernspaltenweiten $d = 0,5$ mm, $0,9$ mm, $1,3$ mm, $1,7$ mm und $2,1$ mm gilt $n = 2, 4, 6, 8, 10$ und 12 . Im Gegensatz zum idealen Rechteckprofil, welches im Bereich der Kernspalte 0 bis $-d$ die maximale Geschwindigkeit aufweist, treten beim gemessenen Profil abgerundete Kanten und eine leichte Erhöhung der Geschwindigkeitswerte auf. Diese Erhöhungen rühren von der Einschnürung des aus der Kernspalte austretenden Luftbandes her. Die Kontraktion tritt hauptsächlich auf der Seite des Kerns auf und beträgt $\mu = 0,78$. Neben der Kontraktion ist aus den gemessenen Geschwindigkeitsdaten auch ersichtlich, dass der arithmetische Mittelwert der maximalen Austrittsgeschwindigkeiten der unterschiedlichen Kernspaltenweiten einen konstanten Wert aufweist. Ferner gilt der Zusammenhang $u_y(x, y) \sim p_{PF}^{1/2}$.

Für unterschiedliche Distanzen zur Kernspalte ($y = 5$ mm bis 25 mm) korrelieren die gemessenen Geschwindigkeitsprofile am besten mit Gaußschen Fit Kurven. Aus diesen ermittelten Daten ergibt sich für den Impulsstrom $\dot{I} = \text{konstant}$. Anhand der Messdaten kann die daraus resultierende Bedingung $A(y)^2 / w(y) = \text{konstant}$ überprüft werden ($A(y)$ definiert die eingeschlossene Fläche und

$w(y)$ die $1/e^2$ -Breite des Gauß Profils). Mit Hilfe der x -Werte der Geschwindigkeitsmaxima berechnet sich der Austrittswinkel des Luftbands zu $\theta_{Strahl} = (25,2 \pm 0,03)^\circ$.

Akustische Messungen

Eine Analyse der akustischen Spektren des Schneidentons zeigt, dass mehrere Schalldruckpegelmaxima (Schneidentonmoden) auftreten. Die Schalldruckpegel und ihre Frequenzen weisen zudem zeitliche Schwankungen auf. Da die x -Position des Oberlabiums den Schalldruckpegel des Schneidentons wesentlich beeinflusst, wird das Oberlabium an jener Stelle platziert, an der der Schalldruckpegel der ersten Schneidentonmode sein Maximum besitzt. Aufgrund des linearen Zusammenhangs dieser x -Werte mit jenen der Aufschnitthöhe L lässt sich äquivalent zur freien Ausströmung der Strahlaustrittswinkel berechnen. Der Winkelwert $\theta_{Strahl} = (24,5 \pm 0,84)^\circ$ korreliert sehr gut mit jenem des Freistrahls. Des Weiteren zeigt sich, dass der maximale Schalldruckpegel der ersten Schneidentonmode beim Maximum der Geschwindigkeitsprofile des austretenden Luftbands entsteht. Eine mathematische Beschreibung der Frequenzen der Moden kann u. a. mit der Annahme einer Rückkopplungsschleife erfolgen. Ein Teilchen des Luftbands benötigt eine gewisse Zeit τ_1 , um von der Kernspalte zum Oberlabium zu gelangen. Das dort erzeugte akustische Signal benötigt wiederum die Zeit τ_2 um zurück zur Kernspalte zu gelangen und einen Einfluss auf das Luftband auszuüben. Aus der Beziehung $f = 1/(\tau_1 + \tau_2)$ ergeben sich die Frequenzverhältnisse $f_2 / f_1 = 2,47$ und $f_3 / f_1 = 4,26$.

Visualisierung

Anhand einer Hochgeschwindigkeitskamera und eines Nebelfluids kann das ausströmende Luftband sichtbar gemacht werden. Abbildung 2 zeigt den austretenden Freistrahls aus der Kernspalte des Pfeifenfußmodells. Eine schematische Skizze der Modellposition ist für eine bessere Übersichtlichkeit zusätzlich eingezeichnet.

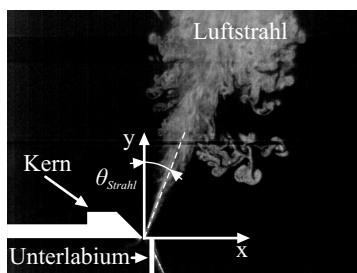


Abbildung 2: Schematische Skizze des Pfeifenfußmodells und Foto des ausgebildeten Freistrahls nach $t = 21,627$ ms.

Aus diesen Aufnahmen ergibt sich der Wert des Austrittswinkels zu $\theta_{Strahl} \approx 22^\circ$. Aufgrund der schwierig zu justierenden Kameraposition ist eine geringe Abweichung von den Ergebnissen der Geschwindigkeits- und akustischen Messungen gegeben. Die Visualisierungen des Schneidentons zeigen neben einer unterschiedlichen Wirbelablösung an der Oberlabiumkante, dass die Annahme das Luftband als schwingende Metallzunge zu betrachten [3] berechtigt ist. Für die Frequenzberechnung wird dieser Luftbandbalken wie in Abbildung 3 angenommen.

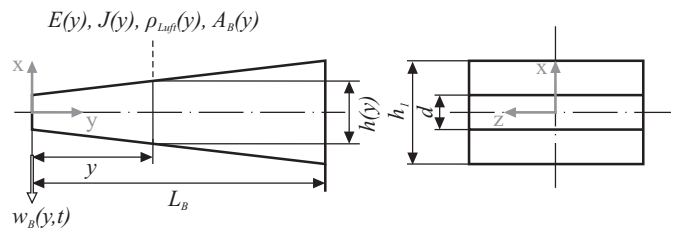


Abbildung 3: Darstellung des Luftbands als Biegebalken. Die Parameterwerte liefern die Ergebnisse der Strömungs- und akustischen Messungen (lokaler Elastizitätsmodul $E(y)$, axiales Flächenträgheitsmoment $J(y)$, Dichte der Luft $\rho_{Luft}(y)$, Querschnittsfläche $A_B(y)$, Verschiebung des Balkens in x -Richtung $w_B(y,t)$ und die Abmessungen des Balkens.

Die allgemeine partielle Differentialgleichung für die Balkenschwingung mit der Auslenkung $w_B(y,t)$ lautet somit

$$\frac{\partial^2}{\partial y^2} \left[E(y)J(y) \frac{\partial^2 w_B(y,t)}{\partial y^2} \right] + \rho_{Luft} A_B(y) \frac{\partial^2 w_B(y,t)}{\partial t^2} = 0. \quad [-] \quad (1)$$

Um die Querschnittsänderung zu berücksichtigen ($b = konst.$) kann mit

$$h(y) = d \left[1 + \left(1 - \frac{h_l}{d} \right) \frac{y}{L_B} \right] \quad [m] \quad (2)$$

das Flächenträgheitsmoment und die Querschnittsfläche allgemein formuliert werden. Die mathematische Berechnungsmethode der Differential Transformation [4] liefert die für die Frequenzverhältnisse der ersten drei Schwingungsmoden die Werte $f_2 / f_1 = 2,28$ und $f_3 / f_1 = 4,11$.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG, GZ: SE 1561/1-1) für die Finanzierung dieser Arbeit.

Literatur

- [1] H. Außerlechner, J. Angster, A. Miklós, „Development of an adjustable pipe foot model of a labial organ pipe“, Acoustics'08 Paris, pp. 760-763
- [2] H. J. Außerlechner, T. Trommer, J. Angster, A. Miklós, „Experimental Jet Velocity and Edge Tone Investigations on a Foot Model of an Organ Pipe“, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 126, No. 2, August 2009, pp. 878-886
- [3] Cavallé-Coll A., „Sämtliche theoretischen Arbeiten“, Christoph Glatter-Götz, Schwarzach 1982
- [4] Ho S. H. et al., „Analysis of general elastically end restrained non-uniform beams using differential transform“, App. Math. Mod. 22 (1998), pp. 219-234
- [5] Nolle A. W., „Sinuous instability of a planar air jet: Propagation parameters and acoustic excitation“, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 103, No. 6, pp. 3690-3705 June 1998