

Einfluss unterschiedlicher Strömungsbedingungen im Fuß einer Holzpfeife auf deren Klang

Stephan Pitsch¹, András Miklós², Judit Angster¹

¹Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart, Deutschland Email: pitsch@ibp.fhg.de

²Steinbeis Transfer Zentrum für Angewandte Akustik, Stuttgart, Deutschland

Einleitung

Im Klang von Lippenorgelpfeifen sind neben dem eigentlichen "Ton" auch Strömungsgeräusche hörbar. Deren Anteil ist bei Holzpfeifen deutlich größer als bei Metallpfeifen und kann unter Umständen störend sein. Über die Gestaltung der Strömungsführung im Fuß von Holzpfeifen und deren Einfluss auf den Klang wird deshalb im Orgelbau viel diskutiert. Richter [1] beschreibt eine Vielzahl von verschiedenen Geometrien und deren theoretisch zu erwartende Auswirkung auf die Strömung (z.B. das Geschwindigkeitsprofil in der Kernspalte). Um auch quantitative Aussagen machen zu können, wurden an einigen Fußgeometrien einer Versuchspfeife (vgl. Abb. 1) Geschwindigkeitsmessungen, Strömungssimulationen sowie akustische Analysen durchgeführt. Sehr weit verbreitet ist Geometrie (2) mit leerer Windkammer, kurzem Fußrohr und einer Regulierungsschraube für die Luftzufuhr. Die anderen Fußformen wurden ausgewählt, um folgendes zu untersuchen: (1) das Strömungsgeräusch ohne Schraube, (3) die Strömungsberuhigung durch eine Vergrößerung des Abstandes zwischen Schraube und Windkammer, (4) eine möglichst kurze Laufstrecke zur Kernspalte, (5) den Effekt einer separaten Pufferzone direkt vor der Kernspalte, (6) den Effekt einer durch ein Wabenelement strömungsberuhigten Anströmzone vor der Kernspalte.

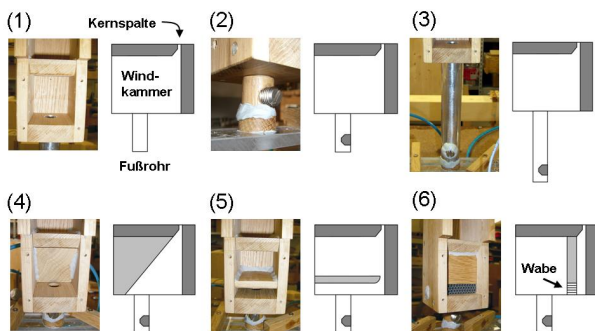


Abbildung 1: Pfeifenfußgeometrien, (1) leere Windkammer, (2) mit Regulierungsschraube, (3) langer Fuß, (4) diagonale Umlenkung, (5) 2 Kammern mit horizontaler Trennung, (6) 2 Kammern mit vertikaler Trennung und Honigwabe.

Strömungstechnische Messungen

Bei der Versuchspfeife handelte es sich um eine offene Holzpfeife (a_0 , 220 Hz). Die Luftversorgung erfolgte durch ein Laborwindsystem mit Gebläse, Puffervolumen (stillgelegter Balg), Kanal und Windlade mit einer Versuchskanzelle, auf der sich die Pfeife befand. Der Druck wurde in der Windkammer der Pfeife gemessen und durch einen Frequenzumrichter am Gebläse konstant auf 250 Pa eingestellt. Für die Messung des Geschwindigkeitsprofils längs der Kernspalte (z-Richtung) stand ein Hitzdrahtanemometer zur

Verfügung, das in einem Abstand $y = 1\text{ mm}$ über der Kernspalte und immer in deren Mitte positioniert wurde. Das Oberlabium der Pfeife wurde für diese Messungen entfernt, so dass sich ein nicht schwingender Freistrahл einstellte. Aus den Schwankungen u' und der mittleren Geschwindigkeit u_{mean} wurde der Turbulenzgrad Tu errechnet. Die resultierenden Profile sind in Abb. 2a,b dargestellt.

$$Tu = \frac{\sqrt{u'^2}}{u_{\text{mean}}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (1)$$

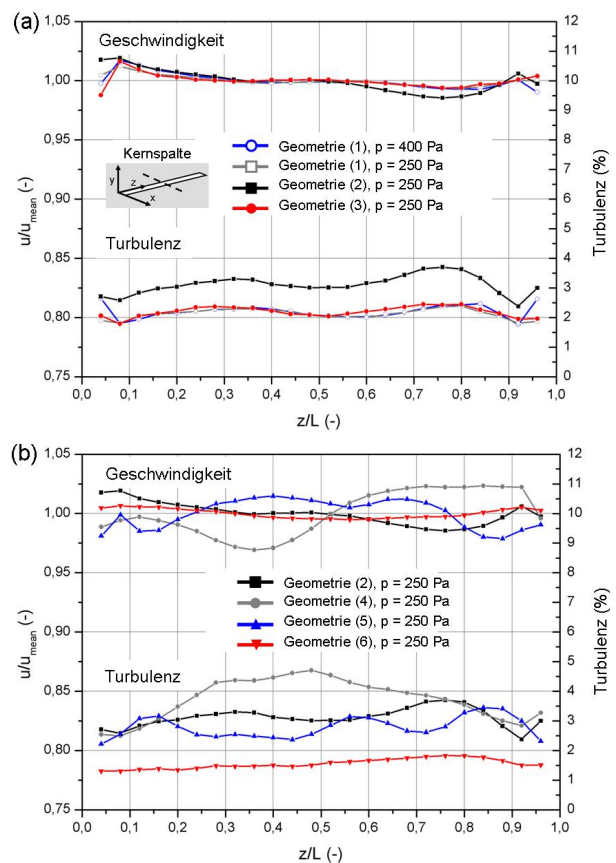


Abbildung 2: Dimensionslose Geschwindigkeitsprofile und Turbulenz längs der Kernspalte, mittl. Strömungsgeschwindigkeit $u_{\text{mean}} = 37.5\text{ m/s}$, Kernspaltenmasse $2 \times 50\text{ mm}$.

Akustische Analyse

Für die akustischen Messungen wurde das Oberlabium (bzw. Frontplatte) der Pfeife wieder angebracht und eine Kernspaltenweite von 1 mm eingestellt. Der Klang wurde mit einem Kondensatormikrofon direkt am Pfeifenmund, aber unterhalb der Kernspaltenebene aufgezeichnet, um eine direkte Anströmung zu vermeiden. Die Berechnung der Stationärspektren des Pfeifenklanges und der Einschwingvorgänge erfolgte in MATLAB. Abb. 3 zeigt einen Vergleich der Einschwingvorgänge der Geometrien (2), (3) und (4). Der Resonator wurde in einer weiteren Untersuchung

mit Absorbermaterial ausgefüllt und die Schneidentöne untersucht. Abb. 4 zeigt exemplarisch den Vergleich zwischen Schneidentonspektrum und Pfeifenklang von Geometrie (6).

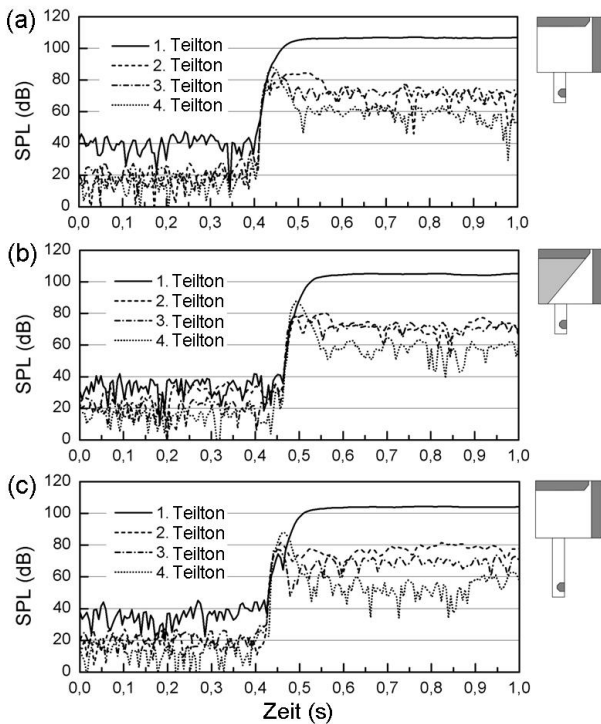


Abbildung 3: Einschwingvorgang im Vergleich: (a) Geometrie (2), (b) Geometrie (4), (c) Geometrie (3).

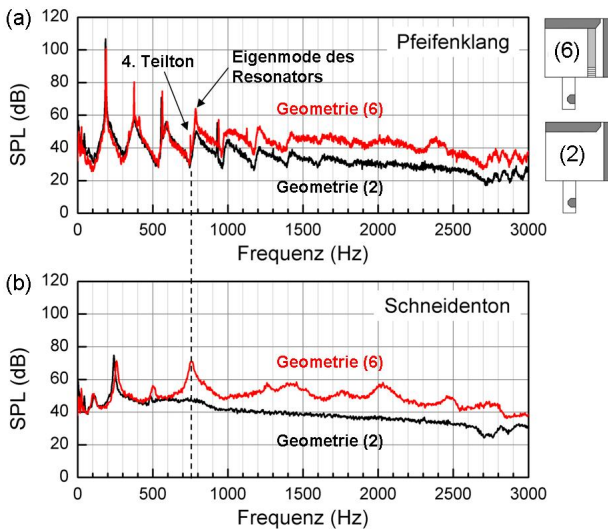


Abbildung 4: Stationärspektrum des Pfeifenklanges (a) und Schneidentones (b) für Geometrie (2) und (6).

Diskussion der Messergebnisse

Die im Vergleich von Geometrie (1) und (2) durch die Regulierungsschraube generierten Turbulenzen verdoppelten sich im Geschwindigkeitsprofil von 2% auf knapp 4%. Im Schneidentonspektrum äußerte sich dies durch eine Anhebung des Strömungsgeräusches um bis zu 5 dB im Frequenzbereich 150-750 Hz. Im Pfeifenklangspektrum erhöhte sich der Grundgeräuschpegel ebenfalls um etwa 3-5 dB. Diese Effekte ließen sich durch eine Vergrößerung des Abstandes zwischen Schraube und Windkammer wieder rückgängig machen. Dabei zeigte sich jedoch auch eine sehr deutliche Verlangsamung des Grundtonaufbaues (Abb. 3c)

im Einschwingvorgang. Die größten Unregelmäßigkeiten im Geschwindigkeitsprofil und Turbulenzen zeigten sich bei Geometrie (4) mit direkter Strömungsführung zur Kernspalte. Im Vergleich zu Geometrie (2) bauten sich hier - bei gleicher Einschwingzeit des Grundtones - die oberen Teiltöne schneller auf. Das flachste Geschwindigkeitsprofil bei niedrigster Turbulenz, und der schnellste Einschwingvorgang wurden bei Geometrie (6) mit Honigwabe erreicht. Allerdings war hier ein sehr starkes Anströmgeräusch mit tonaler Komponente hörbar (Abb. 4), das nur mit einer Auslenkung des Luftbandes durch Absenken des vorderen Fußdeckels reduziert werden konnte. Tabelle 1 zeigt alle Messergebnisse im Überblick.

Tabelle 3: Zusammenfassung der Messergebnisse

Parameter	Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4	Fall 5	Fall 6	Fall 6*
Pfeifenfußgeometrie							
max. Profilvarianz (%)	1,2	2	2	3	1,8	0,5	--
max. Turbulenz (%)	2,5	3,7	2,2	4,7	3,5	1,8	--
Schneidentonkomponenten (> 50 dB)	1	1	1	1	1	6	3
Strömungsgeräusch (dB) im Pfeifenklang	30	33	33	33	33	45	40
Tonales Geräusch im Pfeifenklangspektrum	nein	nein	nein	nein	nein	ja	nein
Aufbauereihenfolge der Teiltöne	gleich	gleich	höherer Teilton zuerst	höherer Teilton zuerst	höherer Teilton zuerst	gleich	gleich
Aufbauzeit des ersten Teilton (ms)	120	127	177	123	133	150	113
Anzahl der Teiltöne (> Strömungsgeräusch)	4	3	6	6	6	6	8

Zusammenfassung

Die von der Regulierungsschraube erzeugten Turbulenzen sind im Schneidenton und Pfeifenklang nachweisbar. Ein größerer Abstand zwischen Schraube und Windkammer wird empfohlen. Die Ursache für das starke Geräusch im Schneidenton bei Geometrie (6) ist noch nicht geklärt, es wird aber vermutet, dass die Interaktion eines konstanten Geschwindigkeitsprofils mit dem Oberlabium ein stärkeres Geräusch verursacht als ein ungleichmäßiges Profil. Hierzu sind weitere Untersuchungen notwendig.

Danksagung

Diese Arbeiten fanden im Rahmen des EU-Projektes zur Förderung kleiner und mittelständischer Unternehmen statt. Unser Dank gilt den Partnerfirmen: Werkstatt für Orgelbau Mühleisen, Deutschland Manufacture d' Orgues Muhleisen (Frankreich), Flentrop Orgelbouw (Niederlande), Schumacher Orgelbau (Belgien), Blancafort Orgueners de Montserrat (Spanien), Oficina e Escola de Organaria (Portugal), Famiglia Artigiana Fratelli Ruffatti (Italien), Johannes Klais Orgelbau (Deutschland), Organ Work Manufakture of Pecs (Ungarn) und Orgelmakerij Boogaard (Niederlande).

Literatur

[1] Richter, A.: Strömungsmechanische Aspekte bei Orgelpfeifen. Die Hausorgel. Mitteilungen aus dem Arbeitskreis Hausorgel in der Gesellschaft der Orgelfreunde e.V. (GdO), Heft 20, 2009, S. 43-49.