

Lineare und nichtlineare Wandschwingungen offener zylindrischer Orgelpfeifen

J. Angster, A. Miklós

Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Nobelstraße 12. D-70569 Stuttgart, Email: angster@ibp.fhg.de

Einleitung

Zu Anfang der Forschung an Pfeifenorgeln stellten sich in Bezug auf die Schwingungen der Pfeifenwand folgende Fragen: Schwingt die Pfeifenwand überhaupt mit? Welche Schwingungsformen können im Frequenzbereich des Pfeifenklanges angeregt werden? Tragen die Schwingungen zur Schallabstrahlung bei? Frühere Untersuchungen [1-4] haben bereits versucht diese Fragen zu beantworten. Weitere Lippenorgelpfeifen wurden studiert, um der Frage näher zu kommen, welchen Einfluss die Wandschwingungen auf den Pfeifenklang haben. Neue Untersuchungen weisen darauf hin, dass nicht nur lineare, sondern auch nichtlineare Wandschwingungen bei offenen zylindrischen Orgelpfeifen auftreten.

Untersuchungen von linearen Wandschwingungen

Lineare Wandschwingungen wurden an fünf nahezu gleichen Pfeifen untersucht. Der Zinn-Blei Gehalt von 3 Pfeifen war ähnlich (etwa 70% Zinn-Blei Legierung), gleichzeitig aber die Wanddicke unterschiedlich. Weitere 3 Pfeifen hatten eine ähnliche Wandstärke und einen unterschiedlichen Zinn-Blei Gehalt (eine Pfeife gehörte gleichzeitig zu beiden Gruppen).

Die Pfeifen wurden auf eine Schleiflade im reflexionsarmen Raum gestellt, und der Intonateur wurde gebeten, den Klang von allen 5 Pfeifen möglichst ähnlich einzustellen. Im stationär klingenden Zustand wurden die folgenden Messungen durchgeführt: Ein Miniatur - Beschleunigungsaufnehmer wurde auf die Vorderseite in der Nähe des Pfeifenendes geklebt (bei allen 5 Pfeifen wurde derselbe Messpunkt benutzt). So wurde die erzwungene Schwingung in einem Messpunkt erfasst, und außerdem wurde der Stationärklang mit einem Mikrofon aufgenommen.

In Abbildung 1 sind die Schwingungs- und die Klangspektren von zwei der fünf untersuchten Pfeifen dargestellt. Die großen Spitzen in den Schwingungsspektren stammen von den erzwungenen Schwingungen der Luftsäule, und die Zahlenwerte an den kleineren Spitzen sind Eigenschwingungen der Wand. Die Resonanzspitzen im höheren Frequenzbereich des Schallspektrums (~ 530 Hz und ~ 660 Hz) oberhalb der entsprechenden Teiltöne sind die Eigenresonanzfrequenzen der Luftsäule. Die Wandschwingungsmoden sind im Schallspektrum nicht enthalten. Bei den zwei unterschiedlichen Pfeifen (so wie auch bei den drei weiteren untersuchten Pfeifen) kann festgestellt werden, dass die Wandschwingungsspektren sehr unterschiedlich, die Klangspektren jedoch sehr ähnlich sind. Interessanterweise sind auch die analysierten Einschwingvorgänge sehr ähnlich, d.h. die 5 Pfeifen konnten mit objektiven Klangmessungen voneinander nicht unterschieden werden. Genauso wurden die Pfeifenklänge auch subjektiv als sehr ähnlich beurteilt.

Obwohl die Klänge der Pfeifen unterschiedlicher Materialien und Wanddicke mit Hilfe von Intonation fast gleich eingestellt werden können, wird von diesem Ergebnis nicht bestätigt, dass der Klangcharakter von den Wandschwingungen nicht beeinflusst wird, sondern dass die, von den Wandschwingungen verursachten Unterschiede mit der Änderung der Klangerregung beeinflusst werden können. Das Intonieren scheint also wichtiger zu sein als die

Wandschwingungen. Es gibt aber doch einige Effekte, die eventuell berücksichtigt werden müssen. Die Art der Wandschwingung hängt von mehreren Einflussgrößen ab. Fällt eine Wandschwingungs-Resonanz in die Nähe eines Teiltones, wird eine sehr unangenehme Schwebung auftreten. Dieses unangenehme Phänomen kann auch das Einschwingen des Klanges beeinflussen; es wäre natürlich besser, diesen Effekt zu vermeiden. Die Wandschwingungs-Eigenfrequenzen könnten mit den bekannten Materialeigenschaften gut berechnet, und die unangenehmen Effekte damit vermieden werden.

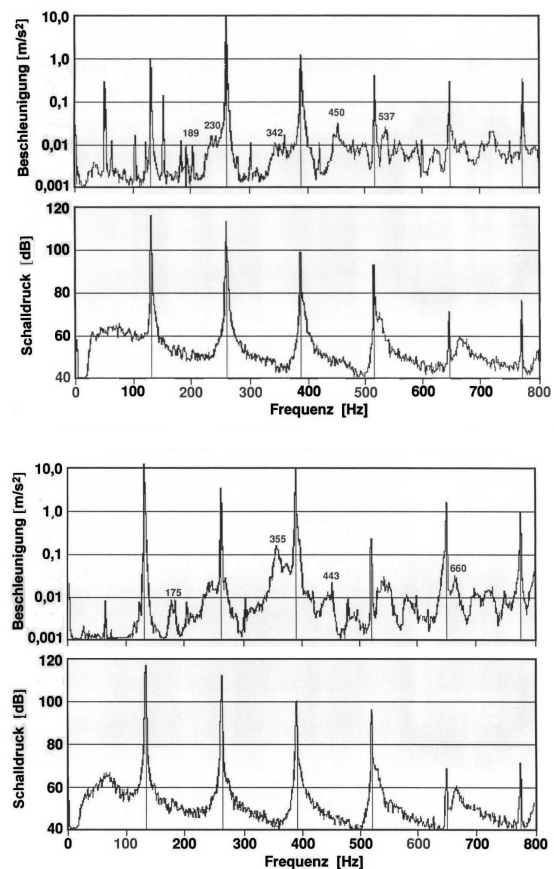


Abbildung 1: Wandschwingungs- und Klangspektrum von zwei der fünf untersuchten Pfeifen

Untersuchungen von nichtlinearen Wandschwingungen

Durch eine starke nichtlineare Kopplung zwischen Klang und Pfeifenwandschwingung können exakt in der Mitte zwischen den Teiltönen subharmonische Komponenten hervorgerufen werden. Der physikalische Mechanismus einer derartigen Interaktion wird in [5] beschrieben. Dieses Phänomen kann wie folgt nachvollzogen werden: Wenn die Pfeifenwand in Schwingung versetzt ist, wird ihr – ursprünglich kreisförmiger - Querschnitt ellipsenförmig deformiert. Da die Fläche einer Ellipse immer kleiner ist als die eines Kreises mit gleichem Umfang, wird die Querschnittsfläche der Pfeife durch eine doppelte Frequenz moduliert. Durch die Veränderung des Querschnitts ändert sich die akustische Strömung in der Pfeife – es kommt zu einer Kopplung zwischen dem Klang und der

Pfeifenwandschwingung, die die Hälfte der Klangfrequenz beträgt. Auf der anderen Seite erzeugen die Druckschwankungen des Schalls eine periodische Versteifung der Wand, was als eine zeitabhängige elastische Konstante betrachtet werden kann. Dieser Effekt führt zu einer parametrischen Instabilität der Pfeifenwand.

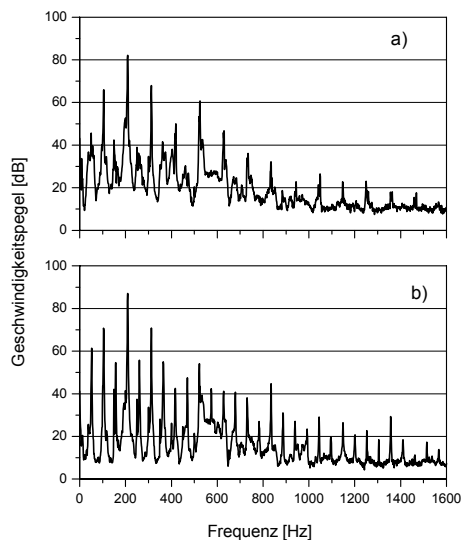


Abbildung 2: Geschwindigkeitspegel der Wandschwingung einer Salizionalpfeife 5 mm unterhalb der Körperschalltrennung, a) Pfeife mit Körperschalltrennung, b) Pfeife ohne Körperschalltrennung

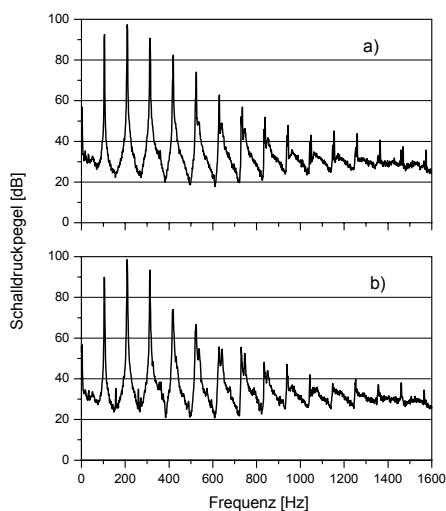


Abbildung 3: Klangspektrum der Salizionalpfeife in 3 cm Entfernung vom offenen Ende gemessen, a) Pfeife mit Körperschalltrennung, b) Pfeife ohne Körperschalltrennung

Aufgrund der nichtlinearen Kopplung können sowohl Wand als auch Luftsäule bei der halben Klangfrequenz schwingen. Im reflexionsarmen Raum des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik (IBP) in Stuttgart wurde ein solcher Effekt an einer sehr dünnwandigen Pfeife beobachtet. Die Wandschwingungen wurden mit Hilfe eines Laservibrometers (Polytec, OFV 3000) gemessen, der Pfeifenklang wurde mit einem Mikrofon (B&K 4165) aufgenommen. Die Geschwindigkeits- und Klangspektren wurden mit dem 2-kanaligen FFT Analysator (HP 35670A) aufgezeichnet. Bei dieser Pfeife, die sonst in einer Kirchenorgel steht, werden die nichtlinearen Schwin-

gungen mit Hilfe von Kunststoff-Klebeband gedämpft, das in einer Entfernung von ca. einem Drittel der Pfeifenlänge vom Pfeifenmund aus um die Pfeife gewickelt ist. Entfernt man das Klebeband, steigen die nichtlinearen Schwingungen rapide an. In den Abbildungen 2a und 2b ist dies deutlich zu erkennen. Jedoch sind in den entsprechenden Klangspektren nur kleinere Veränderungen wahrnehmbar (Abb. 3). Abweichungen können auf der einen Seite bei den höheren Tönen festgestellt werden. Auf der anderen Seite können zwischen dem Grundton und dem 2. Teilton und zwischen dem 2. und 3. Teilton sehr schwache subharmonische Komponenten beobachtet werden.

Zusammenfassung

Die Messungen an Wandschwingungen von 5 nahezu gleichen labialen Orgelpfeifen unterschiedlicher Materialzusammensetzung oder Wandstärke zeigten, dass die Wandschwingung im Bereich der tieferen Teiltöne keinen Schall abstrahlen kann. Dies kann damit erklärt werden, dass hier die Schallwellenlänge viel größer, als der Umfang des Pfeifenresonators ist (akustischer Kurzschluss). Ein direkter Einfluss der Wandschwingungen auf den Klang konnte nicht nachgewiesen werden. Würden jedoch solche Effekte auftreten, könnten sie, wie die Untersuchungen zeigten, mit Intonation ausgeglichen werden. Tritt eine starke Kopplung zwischen einer Wandschwingungsmode und einem Teilton auf, kann die Teiltonfrequenz durch die Schwingungsmode beeinflusst werden. Deswegen sollten in der Praxis die Schwingungsmoden nicht in der Nähe der Teiltonfrequenzen erscheinen. Ist die Pfeifenwand zu dünn, können nichtlineare Wandschwingungen auftreten, wobei im Wandschwingungsspektrum subharmonische Komponente enthalten sind. Beim Erklängen der Pfeife tritt dieser Effekt entweder auf oder nicht, wie es bei einer Instabilität zu erwarten ist. Letztendlich können solche nichtlinearen Wandschwingungen die subharmonischen Komponenten sehr deutlich verstärken. Dieser Effekt muss auf jeden Fall vermieden werden.

Referenzen

- [1] Backus, J.; Hundley, T.C.: Wall vibrations in flue organ pipes and their effect on tone. *J. Acoust. Soc. Am.* 39 (1965), p. 936-945.
- [2] Angster, J.; Paál, G.; Garen, W.; Miklós, A.: The Effect of Wall Vibrations on the Timbre of Organ Pipes. 16th International Congress on Acoustics and 135th Meeting of Acoust. Soc. Amer., Seattle, Vol.2 (1998), p. 753-754.
- [3] Angster, J.; Pitsch, S.; Miklós, A.: Intensivkurs für Orgel- und Kirchenakustik. Regelmäßige Veranstaltung am Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP) in Stuttgart. Home page: <http://www.ibp.fhg.de/rata/>
- [4] Angster, J.; Bork, I.; Miklós, A.; Wogram, K.: The investigation of the vibrations of an open cylindrical organ flue pipe. 9th FASE Symposium and 10th Hungarian Conference on Acoustics, Balatonfüred (1991).
- [5] Mironov, M.A.: Parametric Instability of a Circular Shell Propagating a Korteweg Wave. *Acoustical Physics* 41, (1995), p. 707-711.