

Einfluss der Stimmvorrichtung labialer Orgelpfeifen auf den Formantenaufbau des stationären Klanges

Stephan Pitsch, Judit Angster, András Miklós
Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart; Email: pitsch@ibp.fhg.de

Einleitung

Für Orgelbauer ist es eine interessante Frage, welchen Einfluss Stimmvorrichtungen auf den Pfeifenklang haben. Am IBP wurde die Schallabstrahlung von Lippenorgelpfeifen gleicher Tonhöhe (Prinzipal 4', g, 196 Hz) mit verschiedenen Stimmvorrichtungen untersucht. Das offene Ende der ersten Pfeife war auf Ton geschnitten, die zweite Pfeife war mit einer Stimmrolle, die dritte Pfeife mit einem Stimmfenster (Expression) versehen. Gemessen wurden die Stationärspektren am oberen Ende der Pfeife und am Pfeifenmund. Alle drei Pfeifen wurden aus dem gleichen Wandmaterial (Zink-Blei-Legierung) mit identischer Labiumbreite und Aufschnitthöhe hergestellt. Das Schallfeld einer Lippenpfeife kann als Interferenzfeld zweier einfacher kohärenter Schallquellen beschrieben werden, die sich am oberen Ende der Pfeife und am Pfeifenmund befinden. Akustisch gesehen strahlen die Schallquellen bei ungeraden Teiltönen phasengleich und bei geraden Teiltönen gegenphasig ab. Es besteht bisher die Annahme [1,2], dass der akustische Fluss an beiden Pfeifenenden und damit die Stärke der Schallquellen exakt gleich ist, da der abgestrahlte Schalldruck nicht von der Größe der Öffnung abhängt. Die Folge wäre, dass sich die geraden Teiltöne auf einer Ebene durch den Mittelpunkt der Pfeife und senkrecht zu ihrer Achse völlig auslöschen würden. Die Messergebnisse widersprechen jedoch diesen Annahmen. Es zeigte sich, dass die Stationärspektren von Pfeifenmund und offenem Ende nicht identisch sind, sondern große Unterschiede aufweisen. Der abgestrahlte Schalldruck ist von der Öffnungsgröße abhängig. Eine theoretische Erklärung des akustischen Verhaltens einer labialen Pfeife wird gegeben.

Experimentelle Untersuchungen

Messaufbau

Die Messungen wurden in einem reflexionsarmen Raum durchgeführt (Abbildung 1). Das Schallfeld der Pfeife kann hier als Interferenzfeld zwei einfacher Schallquellen betrachtet werden [3].

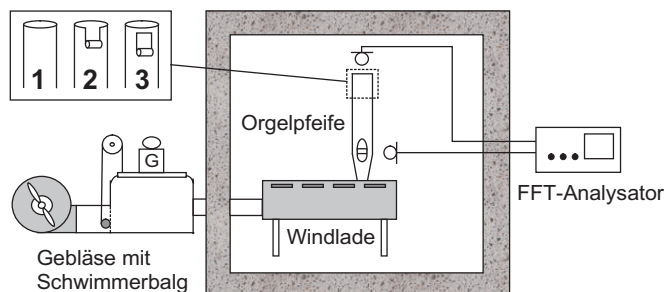


Abbildung 1: Messaufbau, Pfeife (1) auf Ton geschnitten, (2) mit Stimmrolle, (3) mit Expression

Die Pfeifen mit verschiedenen Stimmvorrichtungen wurden alle an der gleichen Position auf einer Versuchswindlade gemessen. Die Schalldruckpegel wurden gleichzeitig mit zwei B&K 4165 Kondensatormikrofonen in 5 cm Abstand von der jeweiligen Öffnung, d.h. außerhalb des Bereichs der Mündungskorrektur, gemessen [4]. Um Einblasgeräusche zu vermeiden, befand sich das

untere Mikrofon etwas unterhalb der Kernspalte. Die Stationärspektren lieferte ein Zweikanal-Frequenzanalysator (HP 35670A). Der Winddruck war auf etwa 700 Pa eingestellt.

Messergebnisse

Die Stationärspektren der auf Ton geschnittenen Pfeife (1) weisen einen unterschiedlichen Formantenaufbau auf (Abbildung 2). Die Amplitude der Teiltöne am offenen Ende fallen allmählich ab, während am Pfeifenmund ein deutliches Minimum beim 5. Teilton auftritt. Bei etwa 3100 Hz (16. Teilton) zeigt sich am offenen Ende ein Minimum. Die Frequenz entspricht etwa der Grenzfrequenz zur ersten transversalen Schwingungsmode im Pfeifenrohr.

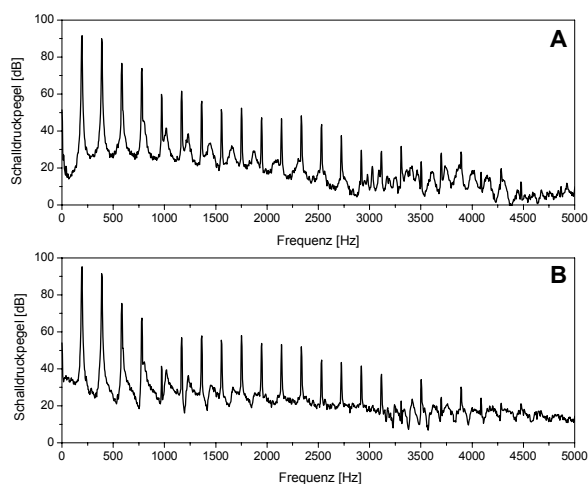


Abbildung 2: Stationärspektren der auf Ton geschnittenen Pfeife, (A) am offenen Ende, (B) am Pfeifenmund

Ein ähnliches Verhalten zeigt die Pfeife mit Stimmrolle (2). Das Minimum an der Stimmrolle verschiebt sich zum 15. Teilton. Insgesamt sind die 10.-15. Teiltöne schwächer als bei der auf Ton geschnittenen Pfeife (Abbildung 3).

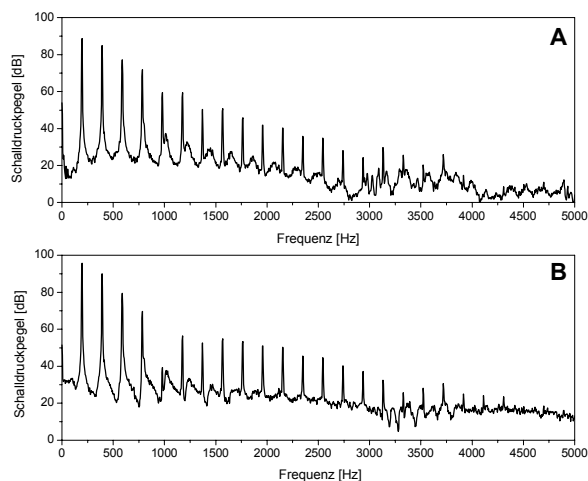


Abbildung 3: Stationärspektren der Pfeife mit Stimmrolle, (A) am offenen Ende, (B) am Pfeifenmund

Die Pfeife mit Expression (3) unterscheidet sich sehr von den anderen beiden (Abbildung 4). Das Spektrum an der Expression weist zwei Minima auf, beim 8. und 15. Teilton, während der Verlauf der Teiltöne am Pfeifenmund bis auf ein kleines Minimum beim 5. Teilton fast regelmäßig ist.

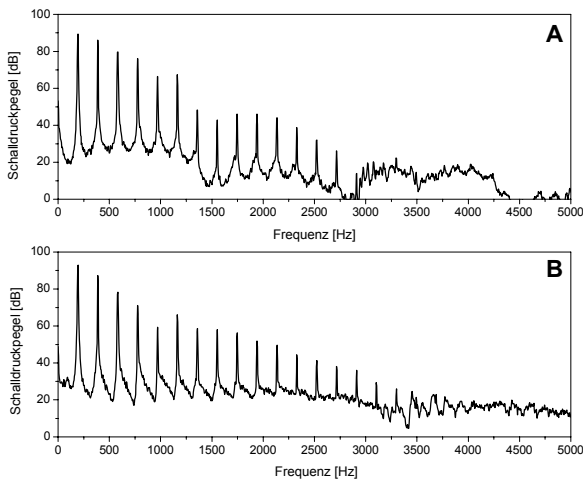


Abbildung 4: Stationärspektren der Pfeife mit Expression, (A) an der Expression, (B) am Pfeifenmund

Die Amplitude des 5. und 6. Teiltönen ist deutlich größer als bei der auf Ton geschnittenen Pfeife, was einen deutlich hörbaren Einfluss auf die Klangfarbe hat.

Theoretische Betrachtungen

Modelliert man die Pfeife mit zwei einfachen kugelförmigen Schallquellen, die sich am offenen Ende und am Pfeifenmund befinden, kann der Schalldruck im Abstand r von einer der Quellen folgendermaßen angegeben werden:

$$|p| = \frac{\rho c}{4\pi} \frac{k}{\sqrt{1+k^2 a^2}} \frac{|q|}{r} \quad (1)$$

Hierbei sind $|p|$, ρ , c , k , a und $|q|$ die Amplitude des Schalldrucks gemessen im Abstand r zur Quelle, die Luftdichte, die Schallgeschwindigkeit, die Wellenzahl, der Radius der Schallquelle (entspricht dem äquivalenten Radius der Pfeifenöffnung) und der akustische Fluss an der Quellenoberfläche. Als Randbedingung kann man annehmen, dass die akustische Impedanz an den Enden der Pfeife gleich der Abstrahlimpedanz ist.

$$Z_{e,m} = \frac{\rho c}{S_{e,m}} (\theta_{e,m} + i\chi_{e,m}) = \frac{p_{e,m}}{q_{e,m}} \quad (2)$$

Die Indizes e und m bezeichnen das offene Ende der Pfeife und den Pfeifenmund. $S_{e,m}$ ist die Querschnittsfläche der entsprechenden Öffnung. θ und χ sind Real- und Imaginärteil der Abstrahlfunktion eines offenen Rohrendes und können abgeschätzt werden [5] als:

$$\theta_{e,m} \cong \frac{1}{2} k^2 a_{e,m}^2 \quad \chi_{e,m} \cong \frac{8}{3\pi} k a_{e,m} \quad (3)$$

Es bietet sich nun an, statt den Impedanzen die komplexen Reflektionsfaktoren $R_{e,m}$ an den Enden zu verwenden. $Z_0 = \rho c/S$ ist die Wellenimpedanz des Pfeifenrohres mit der Querschnittsfläche S . Der Phasenwinkel an einem offenen Ende ist etwas kleiner als π und kann definiert werden als $\Psi_{e,m} = \pi - \varphi_{e,m}$.

$$R_{e,m} = |R_{e,m}| e^{i\Psi_{e,m}} = \frac{Z_{e,m} - Z_0}{Z_{e,m} + Z_0} \quad (4)$$

Der Betrag des Reflexionsfaktors ist mehr oder weniger unabhängig von der Öffnungsfläche, während der Phasenwinkel umgekehrt proportional zu ihr ist. Mit (3) und (4) lässt sich aus (2) der akustische Fluss $|q|$ berechnen. Setzt man diesen in (1) ein, ergibt sich folgende Gleichung für den Schalldruck p im Abstand r von der Schallquelle:

$$|p(r)| = \frac{AS}{4\pi} \frac{\sqrt{\left(\frac{1}{\sqrt{|R_{e,m}|}} - \sqrt{|R_{e,m}|}\right)^2 + 4 \cos^2\left(\frac{\varphi_{e,m}}{2}\right)}}{\sqrt{1+k^2 a_{e,m}^2}} \frac{k}{r} \quad (5)$$

Mit A ist die Amplitude der ebenen Welle im Pfeifenrohr bezeichnet. Mit Hilfe von (2-4) kann der Näherungswert des Ausdrucks unter der Wurzel in (5) bestimmt werden:

$$4 \left(\frac{S}{S_{e,m}} \theta_{e,m}\right)^2 + 4 \cos^2\left(\frac{S}{S_{e,m}} \chi_{e,m}\right) \quad (6)$$

Das Spektrum nimmt den Minimumwert dort an, wo das Argument der Kosinus-Funktion den Wert von $\pi/2$ erreicht. Ist die Oberfläche S_m kleiner, tritt das Spektrum-Minimum bei tieferer Frequenz auf.

Zusammenfassung

Die akustischen Messungen an drei gleichen Prinzipal Orgelpfeifen mit verschiedenen Stimmvorrichtungen zeigten, dass die stationären Klangspektren am offenen Ende und am Pfeifenmund bei jeder der drei Pfeifen verschieden sind. Beim Pfeifenmund, also der kleineren Öffnung, zeigte sich ein deutliches Minimum beim 5. Teilton, welches im Spektrum der oberen größeren Öffnung fehlt. Das direkt an der Expression gemessene Klangspektrum weist jedoch ebenfalls ein Minimum auf, was darauf hindeutet, dass die Expression unabhängig vom Rohrende als eigenständige kleine Öffnung betrachtet werden muss. Je kleiner die Öffnung ist, um so mehr wandert das Minimum in der Formantstruktur hin zu einer kleineren Frequenz. Ebenfalls unberührt von der Öffnungsgröße bleibt das Minimum bei etwa 3100 Hz, welches bei allen Messungen zu beobachten ist. Es tritt etwa bei der Grenzfrequenz zur ersten transversalen Schwingungsmode im Pfeifenrohr auf.

Danksagung

Diese Forschungsarbeit wird von der Europäischen Gemeinschaft im Rahmen eines CRAFT-Projekts (Cooperative Research Action For Technology) unterstützt.

Referenzen

- [1] Fletcher, N.H. und Rossing, T.D.: *The Physics of Musical Instruments* (Springer, New York, 1991), 482.
- [2] Coltman, J.W.: *Sound radiation from the mouth of an organ pipe* (J. Acoust. Soc. Am. 46), 477.
- [3] Kümmel, J.: *Raumakustische Probleme bei der Aufstellung von Orgelpfeifen*, Diplomarbeit (Universität Stuttgart, 1994).
- [4] Miklós, A. und Angster, J., *Sound of flue organ pipes* (Akustica, acta acustica 86, 2000), 611-622.
- [5] Morse, P.M. und Ingard, K.U.: *Theoretical Acoustics* (Princeton University Press, Princeton, 1986), 384.