

Einfluss des Winddrucks auf die Lautheit von Lippenorgelpfeifen

Judit Angster¹, Stephan Pitsch¹, Katrin Hoge^{1,2}, András Miklós³,

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

²TU Dresden, Institut für Akustik und Sprachkommunikation, 01062 Dresden

³Steinbeis Transfer Zentrum Angewandte Akustik, Landauer Str. 24, 70499 Stuttgart

Einleitung

Im Rahmen eines EU-Projektes wurden zahlreiche Untersuchungen zum Thema Intonation und Dimensionierung von Lippenorgelpfeifen und zur Klärung des Einflusses von Intonationsschritten auf den Pfeifenklang durchgeführt. Eine sehr wichtige Fragestellung der beteiligten Orgelbaufirmen war es, wie man die Lautheit einer Orgelpfeife beeinflussen kann und welche Rolle der Winddruck dabei spielt. Hierzu wurden im reflexionsarmen Raum des Fraunhofer-Institutes für Bauphysik (IBP) Klangmessungen bei unterschiedlichen Winddrücken vorgenommen und anschließend analysiert. Die Lautheit einer Lippenorgelpfeife wird maßgeblich durch die Anregungsleistung beeinflusst, die sich aus dem Winddruck im Pfeifenfuß, dem Volumenstrom in der Kernspalte und der Verweildauer des oszillierenden Freistrahls im Resonatorkörper zusammensetzt. **Durch die Erhöhung des Winddrucks steigen zwar sowohl die Lautheit als auch die abgestrahlte Schalleistung, gleichzeitig verändert sich aber auch die Klangfarbe der Pfeife.** Dies ist ein unerwünschter Nebeneffekt. Hier wird nun diskutiert, wie diese klanglichen Änderungen im Stationspektrum in Abhängigkeit vom Winddruck aussehen und welche Intonationsschritte einem Intonateur letztendlich die Möglichkeit bieten, die Lautheit einer Pfeife innerhalb eines Registers anzupassen, ohne ihren Klangcharakter zu verfälschen.

Druckverhältnisse in Kanzelle und Pfeifenfuß

Es ist allgemein üblich zur Beschreibung der Druckverhältnisse der Orgel den Betriebsdruck im Balg

anzugeben. Dieser Wert ist jedoch wenig aussagekräftig, da zwischen Balg und Pfeife eine Vielzahl von Windkanälen und -kästen liegt. Für die Klangerzeugung und damit auch die Lautheit der Pfeife ist ein anderer Parameter maßgeblich: der Druck im Pfeifenfuß. Dieser ist stets geringer als der Kanzellendruck, da immer nur soviel Luft in den Pfeifenfuß einströmt, wie durch die Kernspalte entweicht (inkompressible Strömung). Der Druckunterschied Δp hängt also von der Strömungsgeschwindigkeit ab, die wiederum vom Betriebsdruck beeinflusst wird. So hat eine kontinuierliche Erhöhung des Betriebsdrucks der Orgel zwar auch eine stetige Erhöhung des Drucks im Pfeifenfuß zur Folge, aber auch der Druckverlust Δp von Kanzelle zur Pfeifenfuß wird größer. In **Abb. 1** ist der Einfluss von Intonationsschritten auf den Druck im Pfeifenfuß dargestellt. Dabei beschreibt A_{KS}/A_F das Querschnittsverhältnis von Kernspalte zu Fußloch. Der Druck im Pfeifenfuß ist also auch abhängig von der Intonation: vergrößert der Intonateur das Fußloch der Pfeife, so steigt der Druck im Pfeifenfuß. Allgemein liegt ein kleines Querschnittsverhältnis bei weit mensurierten Pfeifen (z.B. Flöten), ein großes eher bei Streicher-Registern vor. Werden Kernstiche eingefügt, erhöht sich der Strömungswiderstand durch Luftverwirbelungen und der Druckunterschied zwischen Kanzelle und Fuß wird größer. Um den Orgelbaufirmen die Bestimmung des Drucks im Pfeifenfuß zu erleichtern, wurde anhand des Querschnittsverhältnisses (ohne Kernstiche) eine Hilfskurve entwickelt aus der man den Druck im Pfeifenfuß einfach ablesen kann.

Wichtige Einflussgrößen des Pfeifenklangs

Für das stationäre Gleichgewicht gilt: die abgestrahlte Leistung ist gleich der eingespeisten Leistung. Mit

$$W \approx p_F \cdot A_{KS} \cdot v \cdot \frac{t}{T} \quad (1)$$

kann die eingespeiste Leistung W näherungsweise angegeben werden. Dabei bezeichnet p_F den Druck im Pfeifenfuß, A_{KS} den Kernspaltenquerschnitt, v die Strömungsgeschwindigkeit in der Kernspalte, t die Verweildauer des Luftbandes im Resonator und T die Periodendauer der Luftbandschwingung, mit der die Leistung periodisch in die Pfeife eingespeist wird. Es wird sofort deutlich, dass eine Erhöhung des Drucks p_F auch eine Erhöhung der Leistung zur Folge hat. Wir wissen, dass der Druck im Pfeifenfuß durch die Intonation oder die

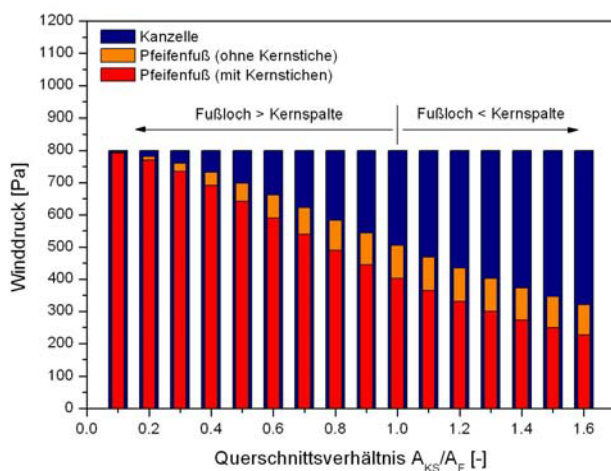


Abbildung 1: Einfluss wichtiger Intonationsschritte auf den Druck im Pfeifenfuß

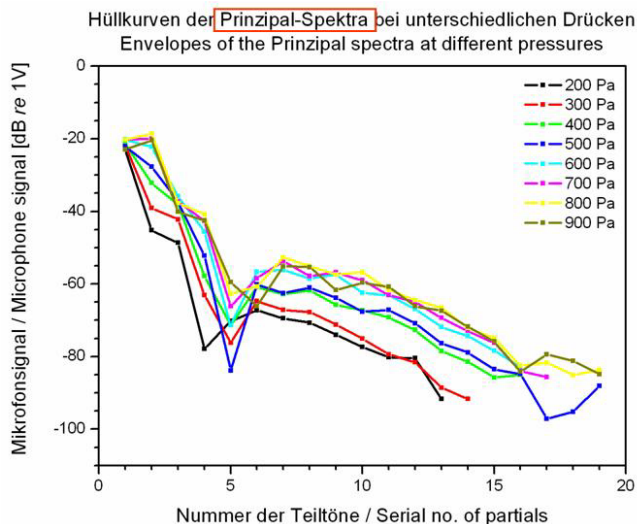


Abbildung 2: Einfluss des Winddrucks auf das Klangspektrum einer Prinzipalpfeife

Druckerhöhung im Gesamtsystem einfach realisiert werden kann, dies hat jedoch auch immer eine Änderung des Klangcharakters zur Folge. Die Auswirkungen der Änderung des Winddrucks auf das Stationärspektrum einer Pfeife kann man anhand **Abb. 2** beschreiben. Während der Pegel des Grundtons nahezu konstant bleibt, wird eine deutliche Pegelerhöhung der folgenden Teiltöne (insbesondere des 2. und 4. Teiltöne) mit steigendem Winddruck bewirkt. Auf diese Weise dominieren die angehobenen Obertöne gegenüber dem Grundton im Pfeifenklang.

Neben der abgestrahlten Leistung wird auch die Lautheit der Pfeifen durch den Winddruck beeinflusst, diese nimmt ebenfalls mit steigendem Winddruck zu.

Natürlich steigt auch die Grundtonfrequenz bei Erhöhung des Drucks, allerdings liegen diese Änderungen unter 0.3 % pro ± 10 mmWS Druckänderung, da der Resonator besonders bei engen Pfeifen die Grundtonfrequenz stabil hält.

Nachdem der Einfluss des Winddrucks auf die spektralen Eigenschaften der Pfeife und damit auch ihren Klangcharakter erklärt wurde, gilt es, auch die Auswirkungen der Luftbandschwingung in der Kernspalte zu beschreiben. Nach (1) spielt auch die Verweildauer t eine wichtige Rolle bei der Leistungseinspeisung in den Resonator. Um den Einfluss deutlich zu machen werden nun in einem rechnerischen Experiment verschiedene Anregungen bei gleichbleibender Strömungsgeschwindigkeit v und variabler Verweildauer t simuliert. Drei mit dieser Anregung berechnete Spektren für eine definierte Frequenz sind in **Abb. 3** beispielhaft dargestellt. Die Verweildauer des Luftbandes im Resonator bestimmt die Form des Spektrums und hat damit großen Einfluss auf den Klangcharakter der Pfeife. Je kürzer der Luftstrom im Resonator verweilt, desto mehr Obertöne weist das zugehörige Spektrum auf, wird eine lange Dauer realisiert, ergibt sich ein grundtöniges Spektrum mit wenig Obertönen aber höherer Amplitude. Auch die Lautheit der Pfeife ist direkt abhängig von der Anzahl der Obertöne im Spektrum. Je mehr Obertöne die Pfeife aufweist und je höher der Grundton liegt

(Frequenzempfindlichkeit des Ohres), umso lauter spielt die Pfeife. Auch dieser Zusammenhang ist in **Abb. 3** gut ablesbar.

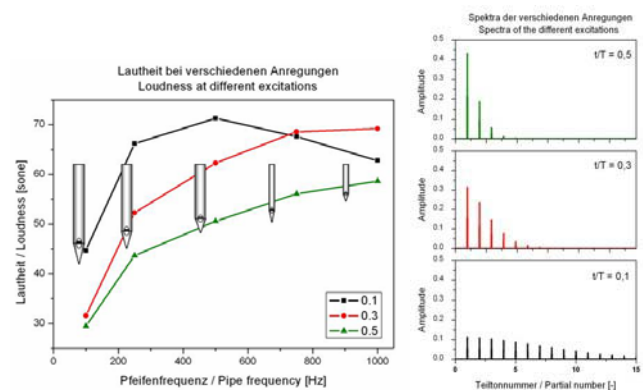


Abbildung 3: Ergebnisse der Computer Simulation: Spektren an einer definierten Frequenz und Lautheit in Abhängigkeit von Anregung und Grundtonfrequenz

Zusammenfassung

Zusammenfassend können wir feststellen: der Winddruck im Pfeifenfuß hängt vom Betriebsdruck und dem Verhältnis der Querschnitte Kernspalte zu Fußloch ab. Die abgestrahlte Schallleistung ist abhängig von der Anregungsleistung und wird damit durch den Druck im Pfeifenfuß, den Volumenstrom $Q = A_{KS} \cdot v$ und den Zeitverlauf des Luftbandes innerhalb des Resonators beeinflusst.

Maßnahmen zur Erhöhung der Schallleistung sind gegeben durch entweder

- die Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit in der Kernspalte (realisierbar durch Druckerhöhung oder Vergrößerung des Fußloches),
- die Vergrößerung des Kernspaltenquerschnitts, oder
- die Verlängerung der Einströmung in den Resonator

Da sich eine Erhöhung des Winddrucks unmittelbar auf den Klangcharakter der Pfeife auswirkt, muss eine Anpassung durch Intonationsschritte und geschicktes Wählen der veränderlichen Parameter vorgenommen werden. So ist es ungünstig die Pfeifen nahe der Grenze zum Überblasen zu konzipieren, da damit der Spielraum des Intonateurs deutlich eingeschränkt wird.

Literatur

- [1] Miklos, A.; Angster, J.: Properties of the Sound of Flue Organ Pipes; *Acustica/Acta Acustica*, 86, S.611-622; 2000

Acknowledgement

This research is supported by the European Commission (Contract No: EUCRAFT 017712) and by 10 European organ builder firms.