

# Entwicklung eines Systems zur Simulation der Abstrahlung von Orgelpfeifen

Thomas Trommer<sup>1</sup>, Judit Angster<sup>1</sup>, András Miklós<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Fraunhofer Inst. Bauphysik, Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart, Deutschland, Email: Trommer@ibp.fraunhofer.de

<sup>2</sup> Steinbeis Transferzentrum Angewandte Akustik

## Einleitung

Die Qualität einer Orgel ist abhängig von ihrer Anpassung an die akustischen Eigenschaften des Raumes. Sie kann über die Dimensionierungen der Pfeifen eingestellt werden. Heutzutage wird versucht die optimale Anpassung durch den Vergleich mit Orgelpfeifen in ähnlichen Räumen oder durch den Aufbau und Betrieb einer kleinen Windlade mit einigen Probepfeifen einzuschätzen. Die Anzahl der Pfeifen und die Möglichkeiten diese zu verändern sind beschränkt.

Zur Unterstützung der Orgelbauer die Anpassung der Orgel an den Raum besser abzuschätzen, wurde am Fraunhofer IBP ein System entwickelt, mit welchem die Schallabstrahlung des Stationärklanges von Orgelpfeifen simuliert wird.

Dieses System gibt von Orgelpfeifen gewonnene Klänge wieder und bietet die Möglichkeit, diese nach einigen Regeln der Mensurierung so zu verändern, als ob die Orgelpfeife, von der die Aufnahme stammt, selbst verändert würde. Falls der Orgelbauer einen bestimmten Parameter<sup>0</sup> ändern möchte, kann er dies über die Software tun.

## Aufbau des entwickelten Systems

Das mobile System besteht aus Notebook mit Programm und Klangbibliothek, Verstärker, 2 Lautsprechern samt Stativ.



Abbildung 0: Aufbau von Lautsprechern und Stativ (links) zur Simulation der Pfeife (rechts)

Nahe den beiden Schallabstrahlenden Quellen einer Orgelpfeife [1] – Labium und offenem Ende – gemachte Aufnahmen werden von der entwickelten Software verwaltet und nach berechneter Frequenzgangskorrektur, zur Kompensation der Unzulänglichkeiten der Komponenten, wiedergegeben.

## Untersuchte Pfeifen

Die Untersuchungen erfolgten an zylindrischen, metallenen, offenen Lippenorgelpfeifen der Tonhöhen  $c^\circ$  und  $c'$

unterschiedlicher Dimensionierungen. Das Hauptaugenmerk wurde auf das Prinzipalregister gelegt, wodurch die Dimensionierungen entsprechend ausfielen. 9 Pfeifen jeder Tonlage unterscheiden sich in ihrer Mensur<sup>1</sup> wobei die Labienbreite stets  $\frac{1}{4}$  des Umfanges der Pfeife betrug. Die Mensur der  $c^\circ$  Pfeifen war im Bereich von +2 bis -6 Halbtönen (HT) bzw. +1 bis -7 HT (der  $c'$ ) gehalten. Ferner waren 9 Pfeifen jeder Tonlage bei derselben Mensur unterschiedlich labiiert<sup>2</sup>. Die Labiierung wurde im Bereich von 3.75 bis zum 4.5-Fachem des Umfanges gehalten. Zudem wurden die Pfeifen auf drei unterschiedliche Aufschnittshöhen intoniert und bei insgesamt sechs unterschiedlichen Winddrücken (55-105mmWS) untersucht.

Die Analyse erfolgte an Hand von Aufnahmen der Pfeifenklänge am Labium beziehungsweise am offenen Ende, deren Spektren, nach Resampling der Aufnahme auf die Grundfrequenz der Pfeife, über eine FFT berechnet wurden. Diese Aufnahmen können ebenfalls für eine direkte Wiedergabe durch das System genutzt werden.

## Ergebnisse der Analyse

Für die Analyse wird die Hüllkurve, als Verbindung der Amplituden der harmonischen Teiltöne, eingesetzt. Die Ergebnisse liegen dem Programm komplett vor und sind ausschnittsweise in den Bildern 1 bis 4 zusammengefasst.

### 1. Abhängigkeit von der Schallquelle:

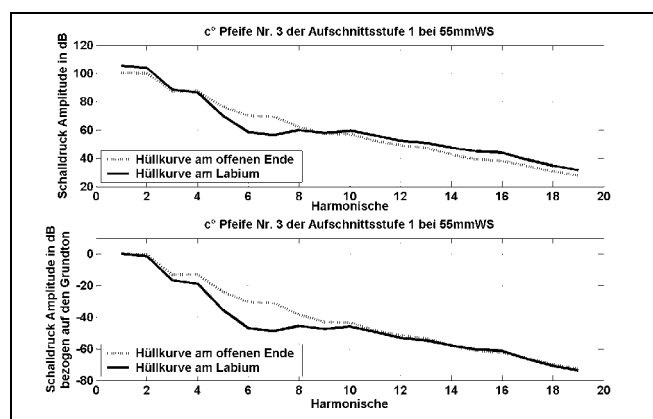


Abbildung 1: Abgesehen von dem für das Labium typischen „Einbruch“ sind die Schalldruckpegel am Labium höher (oben) und die relativen Verläufe der Amplituden der harmonischen Teiltöne der Spektren bezogen auf die Amplitude der Grundfrequenz sehr ähnlicher (unten).

<sup>0</sup> Durchmesser, Labienbreite, Aufschnittshöhe, Winddruck...

<sup>1</sup> Die Mensur beschreibt das Verhältnis von Durchmesser zu Länge einer Pfeife.

<sup>2</sup> Die Labiierung wird hier als das Verhältnis des Umfanges bezogen auf die Breite des Labiums angegeben.

2. Abhängigkeit vom Winddruck:

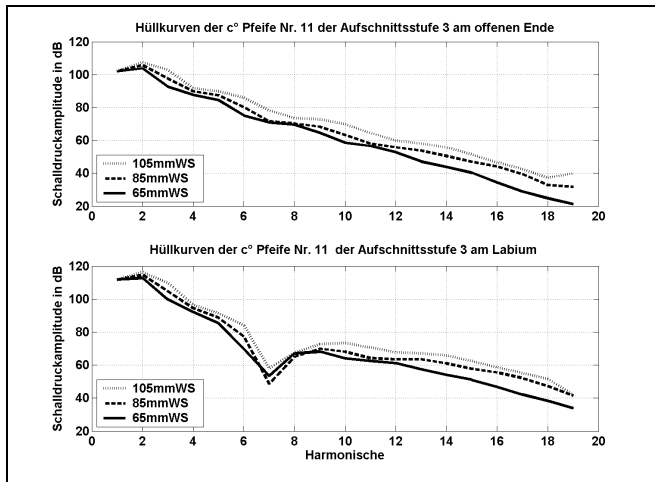


Abbildung 2: Mit zunehmendem Winddruck steigen die Amplituden der harmonischen Teiltöne. Auf die Amplitude der Grundfrequenz wirkt sich dieses nicht aus.

3. Abhängigkeit von der Labiierung:

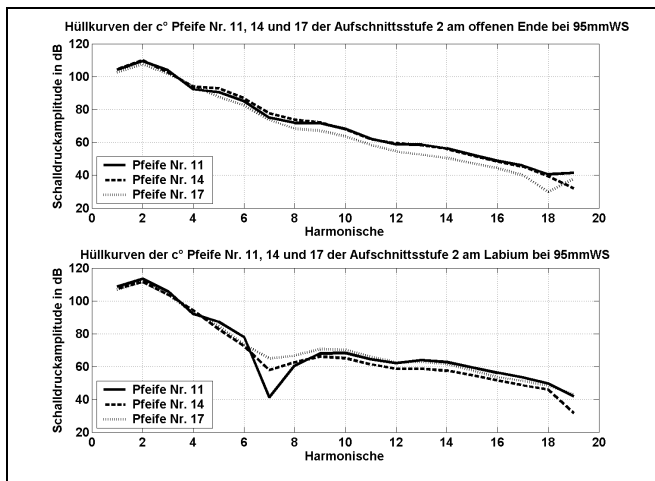


Abbildung 3: Mit Schmäler werdender Labienbreite, bei konstantem Durchmesser, nimmt die Stärke des „Einbruchs“ der Einhüllenden am Labium ab. (Labienbreite: 11>14>17) Eine Wirkung auf das Spektrum vom offenen Ende ist nicht zu beobachten.

4. Abhängigkeit von der Mensurierung:

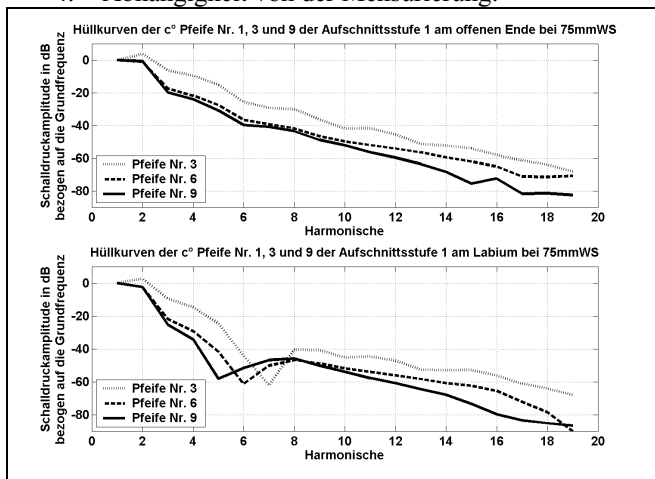


Abbildung 4: Mit wachsendem Durchmesser verschiebt sich der „Einbruch“ der Hüllkurve am Labium zu

niedrigeren Harmonischen; die Amplituden der Harmonischen sinken. (Durchmesser: 3<6<9)

Die erhaltenen Ergebnisse folgen bzw. erweitern die Kenntnis über die Wirkung der Dimensionierung von Lippenorgelpfeifen welche derzeit publiziert sind [1, 2, 3].

Interpolation von Aufnahmen

Die zu verändernde Aufnahme wird über digitale Filter in die einzelnen harmonischen Teiltöne zerlegt und einem untersuchten Pfeifenzustand A zugeordnet. Nach Wahl eines Zustandes (B) welcher mit dieser Aufnahme teilweise oder komplett angestrebt werden soll, erfolgt rechnerisch die Interpolation zwischen den beiden Zuständen. Die gefilterten Harmonischen werden mit dem Ergebnis der Interpolation gewichtet um die Wirkung der physikalischen Veränderung von Zustand A nach Zustand B auf die Aufnahme zu übertragen. Abschließend werden die gewichteten Teiltöne summiert und der Wiedergabe zu Verfügung gestellt.

Vergleich der Schallfelder: System vs. Pfeife

Mit Hilfe von akustischer Nahfeld-Holografie erfolgte eine Visualisierung der Schallfelder von offenen Pfeifen und des entwickelten Systems. Der Phasenbezug zwischen den beiden Schallquellen des Systems im Vergleich zur Orgelpfeife bleibt erhalten. Ebenfalls entsprechen die untersuchten ersten vier Harmonischen Schallfelder der Orgelpfeife denen des Systems.

Auf Grund der Komplexität der Schallfelder im Fernfeld einer offenen Pfeife wurden Richtdiagramme und Spektren einer Gedackten Pfeife mit einem Lautsprecher des Systems verglichen. Die frontal vor den Schallquellen gemessenen Spektren ähneln sich bei den dominierenden niedrigen Harmonischen. Die senkrecht zur Pfeifenlänge aufgenommenen Richtdiagramme gleichen sich bei betrachteter Grundfrequenz; bei höheren Frequenzen tritt der Unterschied in den Ausmaßen der beiden Quellen hervor, welcher sich in einen größeren Einzug beim System im Vergleich zur Pfeife bewirkt.

Fazit:

Das System ist mobil und einfach handhabbar, die Abstrahlung des Systems ähnelt der einer Orgelpfeife und an Hand der Untersuchungen können Modifikationen der physikalischen Gegebenheit von Orgelpfeifen berechnet und akustisch wiedergegeben werden.

Literatur

[1] Fletcher, Rossing: The Physics of Musical Instruments. Springer Verlag, USA. 1998  
 [2] Miklós, A; Angster, J.: Properties of the Sound of Flue Organ Pipes. Acta Acustica united with Acustica Vol.86 (2000), 611-622  
 [3] Miklós, A; Angster, J.: Sound radiation of open labial organ pipes; the effect of the size of the openings on the formant structure. Proc. ISMA 1998, Leavenworth, Washington, USA, 267-272