

Einschwingeräusche von Labialpfeifen analysiert mit der Wavelet-Transformation

Sebastian Zschernig, Steffen Bergweiler, Reimund Gerhard-Mulhaupt, Matthias Holschneider

Universität Potsdam, Angewandte Mathematik und Angewandte Physik kondensierter Materie

e-mail: zscherni@rz.uni-potsdam.de

Einleitung

An der Universität Potsdam wurden in Zusammenarbeit mit der Alexander Schuke Potsdam Orgelbau GmbH Labialpfeifen untersucht, die sich in der Stärke der Resonatorwände unterscheiden. Bei einer Sorte ist die Wandung von konstanter Dicke (typisch modern), bei der anderen nimmt sie zum offenen Ende der Pfeife hin ab (typisch barock). Anschließend an die Untersuchung der Spektren des Klages im eingeschwingenen Zustand (vgl. [1]) wurde nunmehr der Einschwingvorgang genauer betrachtet. Aus den Ergebnissen sind Rückschlüsse für die Restaurierung historischer Orgeln zu ziehen.

Der Versuchsaufbau Die Aufnahmen der Pfeifenklänge entstanden in einer reflexionsarmen Box im Institut für Physik der Universität Potsdam. Je fünf gleichartig intonierte Pfeifen (Prinzipal c, 263 Hz) beider Sorten wurden mit ähnlichen Winddruckverläufen je 23 mal angeblasen und der Klang mit Mikrofonen in einem Abstand von etwa 7 cm am Labium bzw. offenem Ende aufgenommen und über eine Marian Marc 4 soundcard mit 48000 Hz und 16 Bit digitalisiert. Gleichzeitig wurde der Druckverlauf im Pfeifenfuß über einen Sensor im Oszilloskop erfaßt und die Daten ebenfalls an den Rechner übertragen.

Analyse von Einschwingvorgängen

Die Untersuchung von Einschwingvorgängen erfordert (sofern sie nicht auf Hörtests basiert) eine Zeit-Frequenz-Analyse des Klages. Dabei sind insbesondere Amplitudenänderungen in bestimmten Frequenzbereichen im ein- bis zweistelligen Millisekundenbereich von Interesse. Für höhere Frequenzen sind wegen der kürzeren Periodendauer Änderungen in kürzerer Zeit von Bedeutung, als für tiefe. Genau diesem Sachverhalt kommt die Wavelet-Transformation entgegen, die für höhere Frequenzen eine feinere Zeitauflösung ermöglicht. Zwar geht dies mit einer größeren Frequenzauflösung einher, aber das ist kein Nachteil, denn die Tonhöhenwahrnehmung ist sowieso logarithmisch und exakte Tonhöhenerkennung benötigt längere Klangdauern. [vgl. [2]]

Wavelet-Transformation Bei der Wavelet-Transformation wird eine Analysefunktion (das Wavelet ψ) mit dem Signal (f) gefaltet (siehe Gleichung 1).

$$\check{f}(a,b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \overline{\psi\left(\frac{x-b}{a}\right)} dx \quad (1)$$

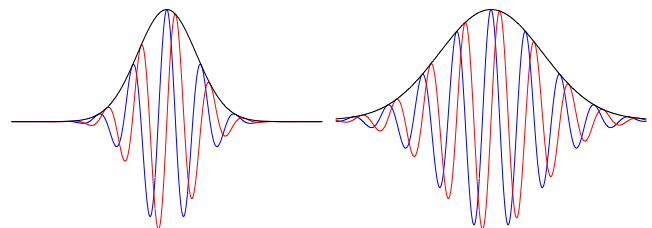
Das Wavelet enthält ein Merkmal, welches im Signal gesucht wird, im vorliegenden Falle des Morlet-Wavelets eine sinusoi-

dale Schwingung (siehe Gleichung 2). Die Wavelettransformierte (\check{f}) liefert in Abhängigkeit von a und b komplexe Werte, aus deren Beträgen man Informationen über die Energie im Signal ablesen kann. Dabei bestimmt der Parameter a , der das Wavelet staucht (bzw. dehnt), die Frequenz ($a \sim \frac{1}{f}$) und der Parameter b , der das Wavelet verschiebt, die Zeit. Die Phaseninformation der Transformierten kann u.a. zur Bestimmung von „Momentanfrequenzen“ herangezogen werden.

Für die Untersuchung der Einschwingvorgänge hinsichtlich Energieauf- und -abbau in bestimmten Zeit-Frequenz-Bereichen stellte sich die Transformation mit dem Parameter $\sigma = 1.5$ (siehe Abbildung 1) für das Morlet-Wavelet als geeignet heraus.

$$\psi^{Morlet} = e^{\frac{-x^2}{2\sigma^2}} \cdot e^{ix} \quad (2)$$

Abbildung 1:



Der Parameter σ bestimmt über die Breite der Hüllkurve (Gaußglocke) die Schwingungszahl und somit die Flankensteilheit des Filters, den das Morlet-Wavelet darstellt. [Der Parameter a hingegen, der das ganze Wavelet dehnt (bzw. staucht) ändert nicht die Schwingungszahl, sondern die Frequenz des Wavelets.]

Links das Morlet-Wavelet mit $\sigma = 0.85$ (wenige Schwingungen - sehr geringe Flankensteilheit, sehr feine Zeitauflösung), rechts mit $\sigma = 1.5$ (mehr Schwingungen, größere, aber immer noch relativ geringe Flankensteilheit und somit feine Zeitauflösung).

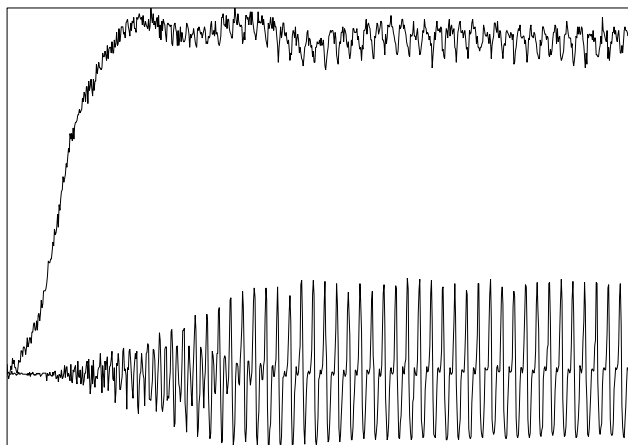
Für die Berechnung der Wavelet-Transformierten wurden numerische Programme eingesetzt, die am Institut für Mathematik der Universität Potsdam entwickelt werden. Für weitere Rechnungen wurde vor allem Scilab benutzt.

Beispiel In den Abbildungen 2 und 3 sind Darstellungen des Klageinsatzes einer Pfeife im Zeit- und im Zeit-Frequenz-Bereich gegeben.

Vergleich der Pfeifensorten

Aus den Beträgen der Transformierten aller Aufnahmen wurden sowohl für die einzelnen Pfeifen als auch für beide

Abbildung 2:



Kurven von Winddruck (im Pfeifenfuß) und Klang (am Labium) über 200 ms

Pfeifensorten Mittelwerte und die mittlere Abweichung davon berechnet und ausgewertet. Beispielsweise wurden Energieverläufe in den Frequenzbereichen einzelner Teiltöne und in bestimmten Frequenz-Zeit-Bereichen untersucht.

Frequenzschwankungen wurden zunächst nicht berücksichtigt.

Ergebnisse Die Ergebnisse für den am Labium abgestrahlten Klanganteil sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

TT parallelwandige:

- 1
- 2 deutliches Anfangsmaximum
- 3
- 4 Anfangsmaximum (später als beim 2. Teilton)
- 7-17

ausgedünnte Pfeifen:

- Aufbau braucht im Mittel etwas länger bei höherer Variabilität
- kaum ausgeprägt bei höherer Variabilität
- bedeutend stärkere Variabilität sowie langsamerer Anstieg
- nicht ausgeprägt
- höhere Frequenzen bleiben länger stärker im Klang vertreten

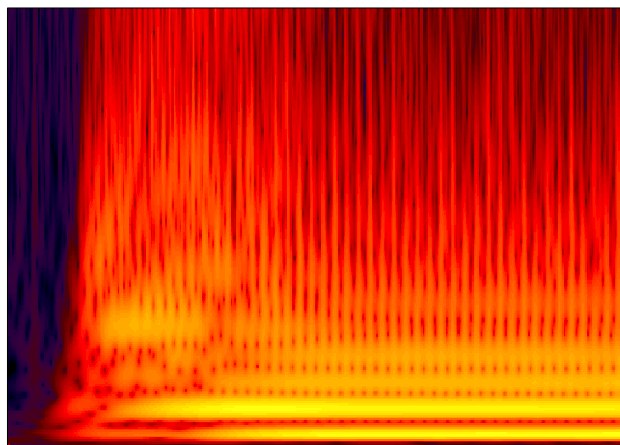
Tabelle 1: Zusammenfassung des Vergleichs

Für den eingeschwungenen Zustand war schon bekannt, daß bei den parallelwandigen Pfeifen der 3. und 4. Teilton und bei den ausgedünnten alle Teiltöne vom 7. an aufwärts (mit Ausnahme des 8. Teiltönen, der gleich stark ist) stärker im Gesamtklang vertreten sind (vgl. [1]).

Ausblick

Interessant erscheint eine Untersuchung von Einschwingvorgängen von Orgelpfeifen in Abhängigkeit vom Winddruckverlauf (und von Bauart und Intonation), denn differenzierter Anschlag an einer mechanischen Traktur ermöglicht es dem Organisten durch eine Beeinflussung des Druckverlaufs

Abbildung 3:



Betrag der Wavelettransformierten der Mikrofonaufnahme vom offenen Pfeifenende über 200 ms und 133-4604 Hz (entspricht den ersten 17 Teiltönen)

[Zeit ($\sim b$): horizontale Achse. Frequenz ($\sim \frac{1}{a}$): vertikale Achse (lineare Einteilung, tiefe Frequenzen unten, hohe oben). Den logarithmisierten Werten des Betrages der Transformierten wurden Farben (dunkel – kleine Werte, hell – große Werte) zugeordnet.]

Zunächst sind vor allem Frequenzen um den 7. und den 5. Teilton (bzw. die 7. und 5. Rohrresonanz) im Klang ausgeprägt, dann schwingen der 2. Teilton und schließlich der Grundton und die anderen Obertöne ein. Die vertikalen hellen Streifen zeigen die Schwebungen in der Grundfrequenz, die zwischen allen Harmonischen bestehen.

zu artikulieren. Diese Möglichkeit zur musikalischen Gestaltung könnte gezielt optimiert werden. (vgl. auch [3])

Möglich wären auch genauere Untersuchungen zu Frequenzverläufen und die Erstellung und Durchführung von Hörtests zur Bewertung gewisser Klangunterschiede, auch zur Bedeutung von Einschwingvorgang und stationärem Klang. Dazu wäre auch das Erzeugen von Klängen mit bestimmten Merkmalen mit der inversen Wavelet-Transformation denkbar.

Danksagungen Dank gebührt dem International Helmholtz Institute for Supercomputational Physics; Detlef Zscherpel (Alexander Schuke Potsdam Orgelbau GmbH); Michael Wegener, Axel Mellinger und Michail Kuleš, Universität Potsdam.

Literatur

- [1] Bergweiler, Steffen: Klangliche Unterschiede zwischen nominell baugleichen Labialpfeifen aus parallelwandigen oder ausgedünnten Metallplatten. In: Fortschritte der Akustik. Tagungsband der DAGA 2003 in Aachen. 2003, 530-531
- [2] Reuter, Christoph: Der Einschwingvorgang nichtperkussiver Musikinstrumente. Frankfurt am Main u.a. [Lang] 1995
- [3] Nolle, A.W.; Finch, T.L.: Starting transients of flue organ pipes in relation to pressure rise time. In: JASA **91** 4, Pt. 1, (April 1992), 2190-2202