

Synchronisation gekoppelter Orgelpfeifen

Steffen Bergweiler¹, Markus Abel^{1,2}

¹ UP Transfer GmbH an der Universität Potsdam, Am Neuen Palais 10, 14469 Potsdam, Deutschland,

Email: bergweil@rz.uni-potsdam.de

² Statistische Physik / Chaostheorie, Am Neuen Palais 10, 14469 Potsdam, Deutschland

Einleitung

Zwei Orgelpfeifen die in der Grundfrequenz nur wenig differieren und auch räumlich nicht weit voneinander entfernt sind, können miteinander synchronisieren. Es kommt zur Bildung einer einzigen gemeinsamen Schwingungsfrequenz. Dieser Effekt ist dem Orgelklang abträglich und daher zu vermeiden. Bekannt ist dieses Verhalten bereits länger und wird auf der Basis von Erfahrungswerten beim Entwurf einer Orgel berücksichtigt [1, 2, 3]. Zur genaueren Überprüfung dieses Effektes wurden Messungen mit a) zwei Pfeifen und b) einer Pfeife und einem Lautsprecher durchgeführt.

Modellierung Synchronisation

Unter der Voraussetzung dass die Schallquellen für den interessierenden Frequenzbereich als Monopol betrachtet werden können und einen minimalen Abstand zueinander haben, kann das Schallfeld an einem Punkt \vec{r} im Raum aus der Überlagerung zweier Kugelschallwellen bestimmt werden.

Kopplung zweier Pfeifen

Es wurde vom Modell der Kopplung zweier selbsterregter nichtlinearer Oszillatoren ausgegangen [4]. Es sollte innerhalb des Synchronisationsbereichs ein relativer Phasenunterschied $\Delta\phi$ von $-\pi/2$ bis $+\pi/2$ durchlaufen werden. Dies beeinflusst den abgestrahlten Schalldruckpegel. Mit dieser Annahme und einer Amplitudengleichheit beider Quellen, folgt für die Summenamplitude: $A = 2A_0/r (1 + \cos \Delta\phi)$.

Kopplung von Pfeife und Lautsprecher

In diesem Falle ist von der Kopplung zwischen einem selbsterregten nichtlinearen Oszillator (Pfeife) und einem getriebenen Oszillator (Lautsprecher) auszugehen. Der relative Phasenunterschied $\Delta\phi$ läuft nun von 0 bis $+\pi$ [4]. Bei Übereinstimmung des Schalldruckpegels von Pfeife und Lautsprecher ist die Summenamplitude: $A(r) = A_0/r + A_0/r \cos \Delta\phi$.

Messung und Analyse

Für die Untersuchungen wurden gedackte Pfeifen der Firma Alexander Schuke GmbH Orgelbau GmbH [1] und ein 2-Wege Aktivlautsprecher MS 16 der Firma Behringer eingesetzt. Der gewählte Pfeifentyp bietet die Möglichkeit einer unkomplizierten Grundfrequenzveränderung durch die Einstellung der inneren Resonatorlänge. Beide Schallquellen können aufgrund ihrer Ab-

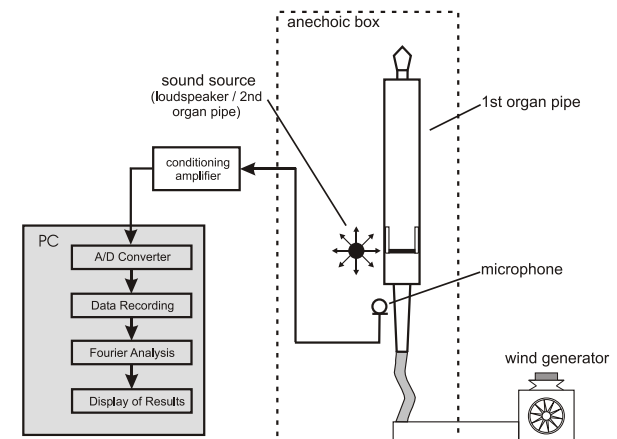


Abbildung 1: Messaufbau zur Untersuchung der Synchronisation einer Orgelpfeife mit einer zweiten Schallquelle: a) einer weiteren Orgelpfeife oder b) einem Lautsprecher.

messungen für die Frequenz des ersten Pfeifenteiltons von rund 170 Hz als Monopol betrachtet werden.

Zur Messung des Kopplungsverhaltens wurden beide Schallquellen seitlich nebeneinander positioniert (Abb. 1). Dabei wurde eine der Pfeifen in ihrer Frequenz *nicht* verändert während a) die andere Pfeife bzw. b) der Lautsprecher durchgestimmt wurde. Der abgestrahlte Schalldruck wurde mit einem Kondensatormikrofon in der horizontalen Labiumsebene, mittig zwischen beiden Quellen, in 10 cm Abstand vom Labium erfasst. Das Zeitsignal wurde mit einer Abtastfrequenz von 44.1 kHz bei 16 bit Auflösung mitgeschnitten. Die Spektren in Abbildung 2 und 4 sind durch eine gefensterte Fouriertransformation aus je 10 s Zeitsignal entstanden. Dies ergibt eine Frequenzauflösung von 0.1 Hz. Es wurde jeweils achtfach gemittelt. Aus diesen Spektren wurde der Verlauf der Amplitude des ersten Teiltons in Abhängigkeit von der Verstimmung Δf mittels eines Suchalgorithmus ausgelesen (\leftrightarrow Abb.: 3 und 5).

Ergebnisse

Im Folgenden wird das Symbol f für die ungekoppelt ermittelten Frequenzen genutzt und ν als Frequenzwert unter dem Einfluss der Kopplung verstanden.

Synchronisation zweier Pfeifen

Abbildung 2 zeigt die Ergebnisse für unterschiedliche Verstimmungswerte Δf . Liegen diese im Betrag oberhalb von 2 Hz ist eine Schwebung mit deutlich ausgeprägten

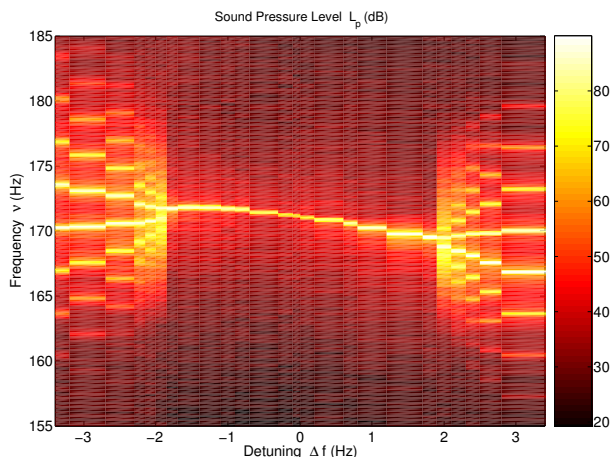


Abbildung 2: Verlauf von Grundfrequenz und Pegel des ersten Teiltons zweier gekoppelter Orgelpfeifen in Abhängigkeit von der Verstimmung Δf . Dargestellt ist der Frequenzbereich des ersten Teiltons.

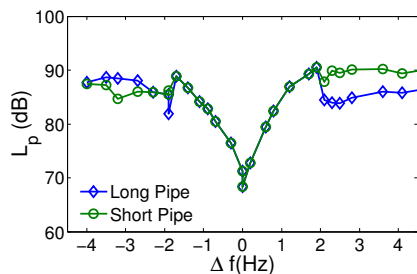


Abbildung 3: Verlauf des Schalldruckpegels L_p des ersten Teiltons zweier gekoppelter Orgelpfeifen in Abhängigkeit von der Verstimmung Δf .

Seitenbändern erkennbar. Für geringere Frequenzunterschiede kommt es zur Synchronisation, der Ausbildung einer gemeinsamen Oszillationsfrequenz. Ein Schwankung des Schalldruckpegels innerhalb des Synchronisationsbereiches ist erkennbar und wird in Abbildung 3 heraus gelöst dargestellt. Die Pegelzunahme von rund 3 dB am Rande und die deutlich Abnahme um etwa -20 dB für den Verstimmungswert $\Delta f = 0$ stellen eine gute Übereinstimmung mit der Theorie dar.

Synchronisation von Pfeife und Lautsprecher

Die Synchronisation der Orgelpfeife durch einen Lautsprecher zeigt in Abb. 4 einen qualitativ anderen Verlauf, da nun keine gegenseitige Beeinflussung erfolgt sondern der Lautsprecher die Orgelpfeife synchronisiert. Die Vermutung eines relativen Phasenunterschiedes $\Delta\phi$ zwischen beiden Schallquellen von 0 bis $+\pi$ wird von Abb. 5 und der darin ersichtlichen maximale Pegelzunahme von ca. 6 dB und Pegelabnahme um rund -15 dB gut bestätigt.

Zusammenfassung

Ein starker Einfluss der Synchronisation auf die Schallabstrahlung wurde beobachtet. Abhängig von der Verstimmung der Schallquellen kommt es zu einem gewissen

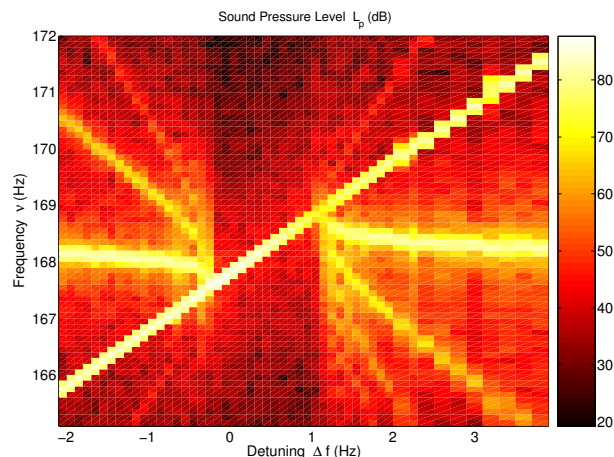


Abbildung 4: Verlauf von Grundfrequenz und Pegel des ersten Teiltons einer Orgelpfeifen bei Kopplung mit einem Lautsprecher in Abhängigkeit von der Verstimmung Δf . Dargestellt ist der Frequenzbereich des ersten Teiltons.

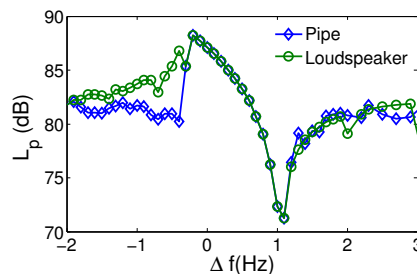


Abbildung 5: Verlauf des Schalldruckpegels L_p des ersten Teiltons einer Orgelpfeifen bei Kopplung mit einem Lautsprecher in Abhängigkeit von der Verstimmung Δf .

Pegelgewinn bis zu nahezu vollständiger Auslöschung der Signale.

Literatur

- [1] Alexander Schuke Potsdam Orgelbau GmbH, <http://www.schuke.com>.
- [2] Angster, J., Angster, J., and Miklós, A., Coupling between simultaneously sounded organ pipes, *AES Preprint 94th Convention Berlin*, (1993).
- [3] Stanzial, D., Bonsi, D., and Gonzales, D., Nonlinear modelling of the Mitnahme-Effekt in coupled organ pipes, *International symposium on musical acoustics (ISMA), Perugia, Italy*, 2001, pp. 333–337.
- [4] Pikovsky, A., Rosenblum, M., and Kurths, J., *Synchronization—A Universal Concept in Nonlinear Science*, Springer, Berlin, 2001.
- [5] Bergweiler, S., *Körperoszillation und Schallabstrahlung akustischer Wellenleiter unter Berücksichtigung von Wandungseinflüssen und Kopplungseffekten*; Inst. Physik, Universität Potsdam, 2006, <http://opus.kobv.de/ubp/volltexte/2006/656/>