

# Einfluss der Lufttemperatur auf die Verstimmung von Orgelpfeifen

Stephan Pitsch<sup>1</sup>, Klaus Sedlbauer<sup>1</sup>, Judit Angster<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Fraunhofer-Institut für Bauphysik, 70569 Stuttgart, Deutschland Email: pitsch@ibp.fhg.de

## Einleitung

Durch das Aufheizen von Kirchen im Winterhalbjahr kommt es beim Betrieb von Orgeln zu "Verstimmungen", d.h. zu einem störenden dissonanten bzw. schwebenden Klang. Die physikalische Erklärung für diesen Effekt ist, dass die Schallgeschwindigkeit in Luft und somit die Klangentstehung in Orgelpfeifen von der Lufttemperatur abhängig ist. Durch das Aufheizen kommt es sowohl zu einer ungleichmäßigen Temperaturverteilung im Orgelgehäuse als auch zu Unterschieden zwischen der Lufttemperatur im Orgelgehäuse und im Inneren des sich viel langsamer erwärmenden Windsystems, d.h. durch die Kernspalte der Orgelpfeifen wird kalte Luft in den vergleichsweise wärmeren Resonator eingeblasen. Ein ähnliches Problem tritt beim Intonieren einzelner Orgelpfeifen auf. Hierzu muss das Gebläse lange bei kleinem Windverbrauch und voller Drehzahl laufen und erwärmt dadurch die Luft im Windsystem. Die Pfeifen werden dann bei einer höheren Temperatur intoniert und klingen später bei normalen Temperaturverhältnissen verstimmt.

Durch Frequenz- und Temperaturmessungen in einer zweigeteilten Klimakammer am Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) sollte geklärt werden, inwieweit sich ein Unterschied zwischen der Umgebungstemperatur einer Orgelpfeife und der Temperatur der durch das Windsystem transportierten Luft auf die Temperaturverteilung im Pfeifenresonator und damit auf die Grundfrequenz der Pfeife auswirkt.

## Beschreibung des Messaufbaus

Beide Hälften der Klimakammer wurden auf eine konstante Raumtemperatur geregelt, der Kaltraum (Saugseite, Standort von Gebläse und Balg) auf  $T_{\text{ansaug}} = 0\text{ °C}$  und der Warmraum („Orgelgehäuse“, Standort der Windlade) auf  $T_{\text{raum}} = 18\text{ °C}$  (Abb. 1). Dies diente ganz bewusst zur Simulation von Extrembedingungen, die in einer Kirche auftreten können.

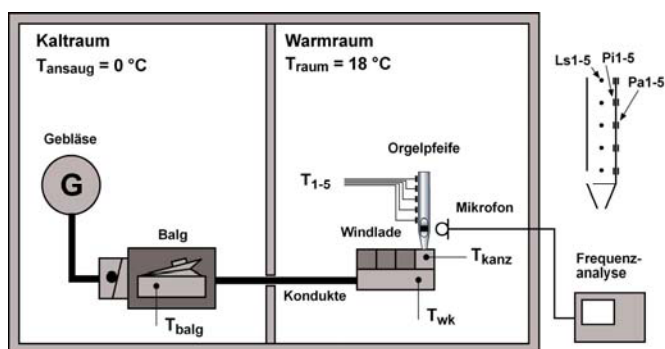


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Messaufbaus,  $T_{\text{kanz}}$  Temperatur in der Kanzelle,  $T_{\text{wk}}$  Temperatur im Windkasten

Mit der dargestellten Anordnung der Windsystemteile sollte eine zu starke Aufwärmung der zugeführten Luft in der langen und dünnwandigen Kondukte vermieden werden. Je schneller die kalte Luft vom Gebläse zur Windlade transportiert wird, desto stärker kühlt sich das Windsystem innen ab, und der Temperaturunterschied zur Umgebung der Pfeifen vergrößert sich. Das ist der Fall, wenn die Orgel gespielt wird. Um dies zu simulieren, wurde durch das Öffnen einiger Tonventile in der Modellwindlade ein dauerhafter Volumenstrom eingestellt. Die Messung der Temperatur im Pfeifenresonator erfolgte mit jeweils fünf Temperatursensoren an der Innenwand (Pi1-5), an der Außenwand (Pa1-5) und an einem dünnen Stab in der Mitte der Luftsäule des Resonators (Ls1-5). Der Pfeifenklang wurde mit einem Mikrofon am Labium aufgezeichnet und mittels einer am IBP entwickelten Software analysiert. Für die Messungen wurden eine mittelgroße Prinzipalpfeife (Pfeife 1, Länge  $L = 73,5\text{ cm}$ , Durchmesser  $d = 74\text{ mm}$ , Grundfrequenz  $f_G = 195,7\text{ Hz}$ ) und eine kleine Pfeife des gleichen Registers (Pfeife 2, Länge  $L = 13,5\text{ cm}$ , Durchmesser  $d = 18\text{ mm}$ , Grundfrequenz  $f_G = 1040\text{ Hz}$ ) verwendet.

## Temperaturverlauf im Resonator

Zuerst wurde an der größeren Pfeife der Einfluss der Wandtemperatur auf die Temperatur der Luftsäule untersucht. Die Temperatur in Windkasten betrug  $T_{\text{wk}} = 6,5\text{ °C}$ . Abb. 2 zeigt die sich nach dem Öffnen und Schließen des Tonventils ergebenden Temperaturverläufe am ersten Messpunkt (Labium) der größeren Pfeife 1.

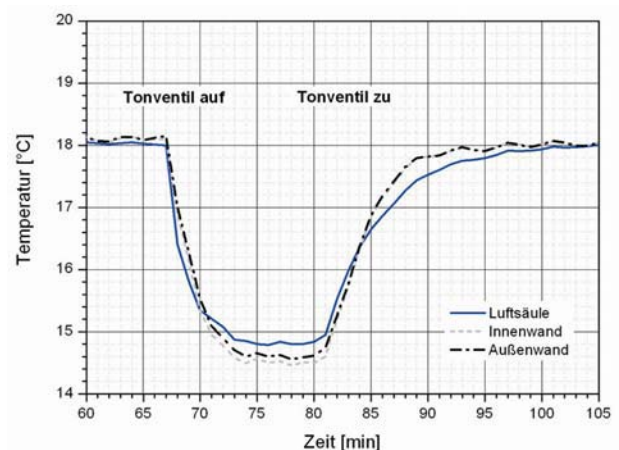


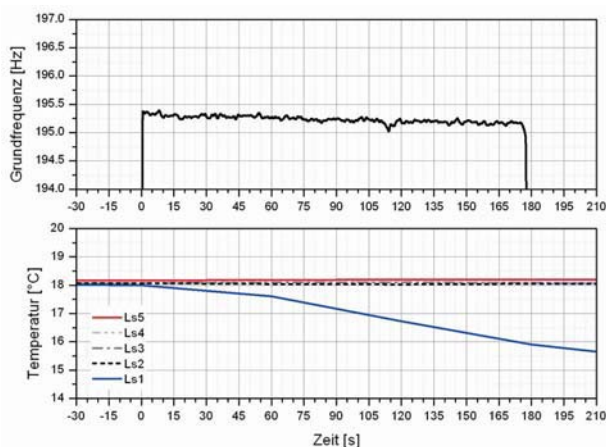
Abbildung 2: Temperaturkurven am Messpt. 1 (Labium)

Nach dem Öffnen des Tonventils wird kalte Luft aus dem Windkasten durch die Kanzelle in den Pfeifenresonator geblasen und kühlt dort die Luft ab. Nach etwa 8 Minuten stellt sich eine Temperaturdifferenz von  $\Delta T = 3\text{ °C}$  ein. Dieser Wert ist wesentlich geringer als die Temperaturdifferenz zwischen Umgebung und Windkasten, da sich die Luft auf dem Weg zwischen Windkasten und Resonator stark erwärmt. Aufgrund der hohen

Wärmeleitfähigkeit von Metall und der geringen Wandstärke (1 mm) ist der Temperaturunterschied zwischen Innen- und Außenwand verschwindend gering. Der Wärmeaustausch zwischen Pfeifenwand und Luftsäule geschieht relativ schnell. Nach dem Beginn des Einblasens kühlt sich die Pfeifenwand ohne große Verzögerung mit der Luft ab. Ab einem gewissen Punkt sinkt die Wandtemperatur unter die Luftsäulentemperatur. Diese weitere Abkühlung lässt sich durch den Einfluss des vollständig mit kalter Luft gefüllten Pfeifenfußes erklären. Nach dem Schließen des Tonventils erwärmt sich die Luftsäule nur geringfügig verzögert mit der Pfeifenwand.

### Verstimmung von Orgelpfeifen

Da für die Klangentstehung die Temperatur der Luftsäule entscheidend ist, wird ab jetzt nur diese betrachtet. Um die Verstimmung der beiden Orgelpfeifen in Abhängigkeit der Zeit und Temperatur zu ermitteln, wurde jeweils ein Klang drei Minuten lang aufgenommen und die Grundfrequenz ermittelt. **Abb. 3** zeigt das Ergebnis für die größere Pfeife 1. Die zum Zeitpunkt  $t = 0$  gemessene Grundfrequenz  $f_G^*$  der mit den Sensoren bestückten Pfeife ist mit 195,3 Hz etwas kleiner als die originale Grundfrequenz, da sich durch die Leitungen der Temperatursensoren der Rohrquerschnitt etwas verkleinert und damit die Mündungskorrektur größer wird.



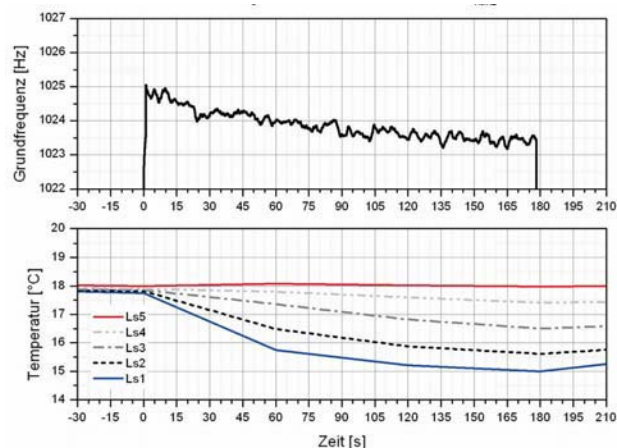
**Abbildung 3:** Pfeife 1, Frequenzänderung (oben) und Temperatur der Luftsäule (unten)

Die Änderung der Grundfrequenz beträgt selbst nach drei Minuten nur etwa 0,25 Hz (-2,2 cent). Der Temperaturverlauf im Resonator an den einzelnen Messpunkten zeigt deutlich, dass die eingeblasene kalte Luft keinen Einfluss auf die Temperatur im größten Teil der Luftsäule hat. Strömungstechnisch betrachtet ist schon etwa 20 s nach Öffnen des Tonventils eine Luftmenge in den Resonator geströmt, die ungefähr dem Volumen der Luftsäule entspricht. Aufgrund der großen Wandoberfläche erwärmt sich die aus der Kernspalte strömende Luft allerdings sehr schnell und besitzt nur am Labium (Messpunkt Ls 1) eine geringere Temperatur als die Umgebung. **Abb. 4** zeigt die Messergebnisse für die kleinere Pfeife 2 ( $f_G^* = 1025$  Hz, bei dieser kleinen Pfeife ist die Zunahme der Mündungskorrektur durch das Einbringen der Temperatursensoren wesentlich größer). Aufgrund des kleinen Luftvolumens im Resonator und der kleinen

Wandoberfläche kann sich ein deutliches Temperaturgefälle im Resonator einstellen. Die Frequenzänderung des Grundtons beträgt hier knapp 2 Hz.

### Zusammenfassung

Durch das Einblasen von kalter Luft in eine sich in wärmerer Umgebung befindenden Orgelpfeife entsteht in ihrem Resonator ein Temperaturgefälle, das stark von dessen Volumen, Wandoberfläche und der vorgegebenen Temperaturdifferenz zwischen Windlade und Umgebung abhängt. Die größte Änderung der Grundfrequenz (fast 2 Hz oder -3,4 cent) wurde bei der kleineren Versuchspfeife nach ca. 3 Minuten Spieldauer gemessen.



**Abbildung 4:** Pfeife 2, Frequenzänderung (oben) und Temperatur der Luftsäule (unten)

Das menschliche Gehör kann Frequenzunterschiede im Bereich unter 500 Hz erst ab 0,3-3 Hz, und über 500 Hz ab etwa 3,5 % (5,9 cent) der Grundfrequenz (das entspricht ca. 3,5 Hz bei der kleineren Pfeife) auflösen [1]. Die gemessenen Frequenzänderungen sind somit für sich alleine gesehen nicht hörbar, zumal die Spieldauer einer Pfeife in der Regel kleiner als 3 Minuten ist und die Verstimmung der Pfeife noch geringer ausfällt als die angegebenen Werte. Jedoch können sie beim Zusammenklang mit anderen Pfeifen in Form von Schwebungen unangenehm auffallen. Einen deutlich größeren Einfluss auf die Verstimmung einer Orgel hat es, wenn sich die Umgebungstemperatur der Orgelpfeifen ändert. Dies kann z.B. im Winter beim Aufheizen der Kirche oder im Sommer in Kirchen mit schlecht isolierten Dächern auftreten. Am IBP werden derzeit Untersuchungen der Temperaturverhältnisse in Orgeln durchgeführt. Das Ziel ist die Entwicklung von Klimasystemen [2], die für eine gleichmäßigere Temperaturverteilung in der Orgel sorgen und damit deren Verstimmung verringern.

### Literatur

- [1] Tarnóczy, T.: Einführung in die musikalische Akustik. Akadémiai Kiadó Budapest (1991), 168.
- [2] K. Sedlbauer, J. Angster: Vorrichtung zur Beeinflussung des Orgelwinds. Patentnummer: DE10 2004 063 359A1, FPL-Fallnummer: 04F45598-IBP (2006)