

# Temperaturgradienten in einer Pfeifenorgel: Simulation und Messung

Stephan Pitsch<sup>1,2</sup>, Sture Holmberg<sup>2</sup>, Judit Angster<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart, Deutschland Email: pitsch@ibp.fhg.de

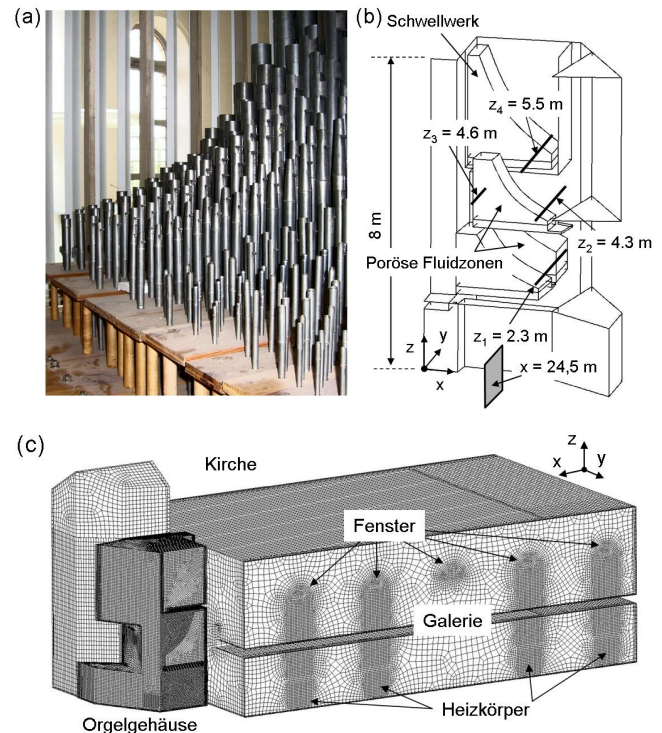
<sup>2</sup>KTH Königlich Technische Hochschule, Institut für Architektur und Bauwesen, Fluid- und Klimatechnik, Marinens Väg 30, 13640 Haninge, Schweden

## Einleitung

Die Tonhöhe bzw. Frequenz von Orgelpfeifen hängt stark von deren Umgebungstemperatur ab. Eine ungleichmäßige Temperaturverteilung im Orgelgehäuse kann deshalb zu störenden Verstimmungen der Orgel führen. Dies geschieht vor allem im Winter beim schnellen Beheizen der Kirche vor einer Veranstaltung. Vom Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) wurden bereits Untersuchungen zur Verstimmung von Orgelpfeifen durchgeführt [1] und ein einfaches Ventilationsssystem im Orgelgehäuse der St. Martinskirche Oberesslingen getestet [2], das den Verstimmungseffekt jedoch nicht im geforderten Maße verringern konnte. Deshalb wurde für die St. Martinskirche und deren Orgel ein Computermodell zur Simulation der Konvektionsströmungen und Temperaturverteilung entwickelt. Mit dessen Hilfe wurde die Wirkung von verschiedenen Ventilationsystemen auf die Temperaturverhältnisse im Orgelgehäuse untersucht und der für einen Ausgleich der Temperaturgradienten erforderliche Volumenstrom abgeschätzt. Für die Simulationen stand ein Notebook mit 4 GB RAM und 2,5 GHz Prozessor zur Verfügung, sowie das kommerzielle Softwarepaket FLUENT (Berechnung mittels Finite Volumen-Methode und Postprocessing) und GAMBIT (Netzgenerierung).

## Geometrische Modellierung

Der Innenraum der St. Martinskirche ist ca. 13,5 m breit, 26 m lang und 8 m hoch (Altarraum 11,5m). Das Volumen beträgt 2660 m<sup>3</sup>. Die Orgel befindet sich in einem separaten Abteil mit zwei zum Kirchenraum offenen Seitenflächen. Die Hauptfront ist durch ein Holzspalier verkleidet. Die Orgel besteht aus vier Werken und insgesamt 1800 Pfeifen, das Volumen des Orgelgehäuses beträgt ca. 100 m<sup>3</sup>. Acht Gliederheizkörper unter den Fenstern und eine Fußbodenheizfläche im Altarraum bilden das Heizungssystem der Kirche. Bei der Modellierung wurden nur die für das Strömungsbild entscheidenden Einrichtungskomponenten berücksichtigt: eine Galerie, das Holzspalier zwischen Altarraum und Orgel, die Stimmgänge (große begehbare Zwischenböden) in der Orgel und die vier Orgelwerke. Die Modellierung einzelner Orgelpfeifen war nicht möglich, doch da die Strömungseigenschaften eines eng mit Pfeifen bestückten Orgelwerkes mit denen eines anisotropen porösen Materials beschrieben werden können, wurden die vier Werke durch große Fluidzonen mit entsprechenden Abmessungen und Porositäten ersetzt (**Abb. 1**). Das Modellnetz wurde mit Hilfe von Skalierfunktionen erstellt, d.h. Bereiche mit hohen zu erwartenden Temperatur- oder Druckgradienten wurden feiner aufgelöst. Die gesamte Netzgröße betrug maximal 1,5 Millionen Zellen mit Seitenlängen von 0,016 m bis 0,5 m.



**Abbildung 1:** (a) Orgelpfeifen in einem Werk, (b) Modell des Orgelgehäuses mit Höhe  $z_{1-4}$  der Temperaturmesspunkte, (c) Geometrisches Modell mit Netz

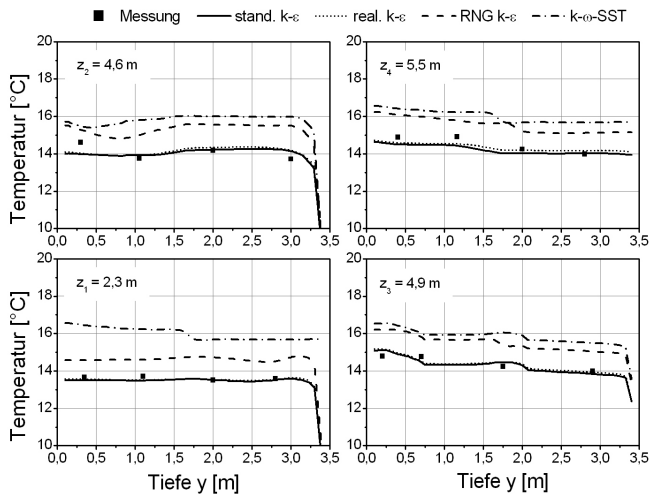
## Numerische Modellierung

Für die Berechnung wurden die Kontinuitäts-, Energie-, und Impuls-Gleichungen in ihrer inkompressiblen, stationären und konservativen Form verwendet. Die Berücksichtigung von Auftriebseffekten erfolgte durch das ideale Gasgesetz. Für die Turbulenzmodellierung wurden vier Alternativen [3] untersucht: das Standard k- $\epsilon$ , Realizable k- $\epsilon$ , RNG k- $\epsilon$  und k- $\omega$ -SST Modell. Die porösen Fluidzonen (Orgelpfeifen) wurden durch einen Quellterm (Senke) in den Impulsgleichungen modelliert. Die Strömung durch ein Gebiet mit Orgelpfeifen erfährt einen Druckverlust. Die in dem Quellterm enthaltenen Druckverlustkoeffizienten wurden in einer separaten 2D-Studie anhand der Geometrie eines realistischen Orgelwerkes berechnet.

## Simulationsergebnisse

Zur Validierung des Computermodells wurden Temperaturmessungen verwendet, die nach dem Einschalten der Kirchenheizung an 16 Punkten in vier verschiedenen Höhen innerhalb des Orgelgehäuses (Abb. 1b) durchgeführt worden waren [2]. **Abb.2** zeigt einen Vergleich der simulierten und gemessenen Temperaturen für verschiedene Turbulenzmo-

delle. Das klassische k- $\epsilon$  Modell zeigte sowohl eine gute Übereinstimmung mit den Messungen als auch den stabilsten Iterationsverlauf und wurde deshalb für alle weiteren Berechnungen verwendet.



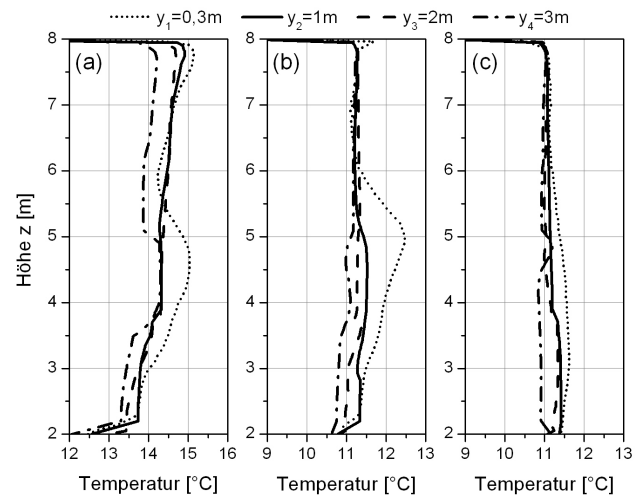
**Abbildung 2:** Vergleich der Simulationsergebnisse von verschiedenen Turbulenzmodellen mit Messungen

Um die Temperaturgradienten in dem sehr hohen Orgelgehäuse möglichst gut auszugleichen, wurde ein Ventilationsystem mit zwei unabhängigen Rohrleitungen und Gebläsen entworfen. Als Diffusoren dienten Weitwurfdüsen, modelliert als Kreisöffnungen mit konstantem Geschwindigkeitsprofil [4]. Der erste Strang erzeugte einen senkrecht nach unten gerichteten und direkt hinter dem Spalier angeordneten Luftschleier, mit Ansaugung von kalter Luft im Bodenbereich des Orgelgehäuses. Der Luftschleier war notwendig, um durch das Spalier einströmende Warmluft aus dem Kirchenraum abzukühlen. Der zweite Strang diente zur Belüftung des Schwellwerkes (in sich geschlossenes Orgelwerk mit beweglichen Frontklappen zur Steuerung der Lautstärke), das sich ganz oben in der Orgel befand (Abb. 1b). Warme Luft wurde innerhalb des Werkes abgesaugt und durch mehrere Düsen im mittleren Bereich der Orgel ausgeblasen. Die Anforderung an das Umluftsystem war, den maximalen Temperaturunterschied im Orgelgehäuse von 1,6 °C (gemessen nach 4-stündiger Heizdauer) trotz eingeschalteter Kirchenheizung auf 0,5 °C (Originalzustand vor dem Heizen) abzusinken. Dies konnte nur durch zusätzliche Abdeckung des Spaliers mit einem feinmaschigen Windschutznetz erzielt werden. Die notwendigen Luftwechselraten waren  $N=8/h$  (bezogen auf das Orgelvolumen von 100 m<sup>3</sup>) im Luftschleier und  $N=3/h$  im zweiten Strang. **Abb. 3** zeigt die Wirkung des Umluftsystems auf die Temperaturverteilung in Ebene  $x=24,5m$  (Abb. 1b) für zwei verschiedene Luftwechselraten im Luftschleierstrang. Gradient  $y_1=0,3m$  liegt direkt hinter dem Spalier, noch außerhalb der Pfeifenregionen.

## Zusammenfassung

Mit dem neu entwickelten Computermodell konnten die im Orgelgehäuse der St. Martinskirche in Oberesslingen gemessenen Temperaturen gut nachgebildet werden. Die geforderte Temperaturverteilung ließ sich innerhalb der Pfeifenregionen mit einer Kombination aus einem zweigeteilten

Umluftsystem mit Weitwurfdüsen und einem feinmaschigen Windschutznetz als Abschirmung des Orgelgehäuses vom Kirchenraum erreichen. Da die Orgel sehr hoch ist, war eine große Luftwechselrate von insgesamt 11/h für den Ausgleich der vertikalen Gradienten notwendig. Inwieweit die Ausblasgeschwindigkeiten die Funktion der Orgelpfeifen beeinträchtigen könnten, muss noch untersucht werden. Ein nächster Schritt wäre nun der Bau eines solchen Ventilationsystems und Testmessungen vor Ort.



**Abbildung 3:** Vertikale Temperaturgradienten in den Tiefen  $y_{1-4}$ , (a) ohne Ventilation, (b) mit Ventilation Luftwechselrate  $N=4+3/h$  (c) mit Ventilation  $N=8+3/h$

## Danksagung

Die Computersimulationen wurden in der Abteilung Fluid- und Klimatechnik, Königlich Technische Hochschule Stockholm (Schweden) durchgeführt und durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) finanziert. Die zur Validierung verwendeten Messungen waren Teil eines Fraunhofer-internen Forschungsprojektes (Projekt 603066 INNO Windsysteme Kirchenorgel). Wir danken der Gemeinde der St. Martinskirche in Oberesslingen und der Orgelbaufirma Mühleisen in Leonberg für die gute Zusammenarbeit.

## Literatur

- [1] Pitsch, S., Sedlbauer, K., Angster, J.: Einfluss der Lufttemperatur auf die Verstimmung von Orgelpfeifen. Fortschritte der Akustik – DAGA 2007, Stuttgart. DEGA Berlin 2007.
- [2] Pitsch, S., Jezerkowsky, M., Dubovski, Z., Angster, J.: Klimasysteme zur Lufttemperierung in Kirchenorgeln. Fortschritte der Akustik – DAGA 2008, Berlin. DEGA Berlin 2008.
- [3] Chen, Q.: Comparison of different k- $\epsilon$  models for indoor-air computations. Numerical Heat Transfer Part B, Fundamentals, 28, 353-369, 1995.
- [4] Srebric, J., Chen, Q.: Simplified numerical models for complex air supply diffusers. Int. J. HVAC & R Res., 8, 277-294, 2002.