

SIMULATION DES HYGROTHERMISCHEN VERHALTENS VON BAUTEILEN UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER KONVEKTION IN HOHLRÄUMEN

St. Gnoth¹, F. Hansel¹, H. Fechner² und P. Häupl²

¹ Fachbereich Architektur, Bauingenieurwesen und Versorgungstechnik
FHL - Fachhochschule Lausitz Senftenberg - Cottbus

² Institut für Bauklimatik, Fakultät Architektur
TUD - Technische Universität Dresden

KURZFASSUNG

Im Rahmen eines Forschungsprojektes wird ein anwendungsspezifischer Strömungssimulations-code (CFD-Tool) entwickelt, welcher speziell auf die Anforderung und Rahmenbedingungen der hygrothermischen Bauteilsimulation angepasst ist. Der Entwicklungsumfang richtet sich daher vordergründig auf bauphysikalische Problemstellungen an praxisnahen Baukonstruktionen.

ABSTRACT

In the context of a research project an application specific flow simulation code (CFD tool) which is adapted especially to the hygrothermal component simulation upon the request and framework condition was developed. The development perimeter therefore concentrates on the building physical problem definitions at practical structural designs.

EINFÜHRUNG

Lufthohlräume findet man in historischen sowie in modernen Baukonstruktionen mit unterschiedlichen Funktionen. In der Vergangenheit sind Lufthohlräume mehr aus praktischen Gründen zur Verbesserung der Wärmedämmeigenschaften von Wand- und Dachkonstruktionen geschaffen worden. In der modernen Architektur findet man Lufträume häufig aus bautechnischer bzw. architektonischer Sicht wieder.

Die Sanierung historischer Bausubstanz führt häufig zu denkmalpflegerischen Fragestellungen hinsichtlich der hygrischen Beurteilung derartiger Lufthohlräume. Aufgrund der heutigen raumklimatischen Anforderungen können durchströmte Lufträume auch eine schädigende Wirkung auf die Tragfestigkeit von Bauteilen hervorrufen.

Eine strömungstechnische Berücksichtigung eingeschlossener Lufträume in einzelnen Bauteilen oder in durchströmten Konstruktionen, wie beispielsweise in Wand- oder Dachkonstruktionen, lässt sich derzeit nur unter Verwendung vereinfachter Annahmen simulieren.

Zur Lösung dieser komplexen Problemstellung bietet sich die Möglichkeit zur Ankopplung eines CFD-Solvers an eine bauphysikalische Bauteilsimulation. Mit der Implementierung eines derartigen CFD-

Tools, als Applikation für das Programmpaket DELPHIN, wurde zunächst ein eigenständig lauffähiges CFD-Programmmodul entwickelt, welches in Anlehnung an den SIMPLE („*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*“)-Algorithmus die Navier-Stokes-Gleichungen löst und zusätzlich den Wärme- und Stofftransport im Luftgebiet berücksichtigt.

Im Anschluss ist eine Schnittstelle geschaffen worden, die den Datenaustausch zwischen dem CFD-Tool und der Software DELPHIN definiert. Am Beispiel eines Testprojektes: „*Eingeschlossener Lufthohlraum in einem Ziegel*“, werden erste Ergebnisse einer gekoppelten Simulation aus bauphysikalischer Sicht dargestellt und analysiert.

ANWENDUNGSSPEZIFISCHER CFD-SOLVER

Lösung der 2D Navier-Stokes-Gleichungen

Impulsgleichungen

Nachfolgend sind die Navier-Stokes-Gleichungen Gl.(1) und (2) für eine laminare inkompressible Strömung in einem 2D-Fluidgebiet aufgeführt.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(uu)}{\partial x} + \frac{\partial(vu)}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \Phi_1 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{\partial(vv)}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \Phi_1 \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] + \frac{\Phi_2 \theta}{\lambda} \quad (2)$$

Die Gleichungen sind in dimensionsloser und konservativer Schreibweise dargestellt. Gleichung (2) enthält noch zusätzlich den temperaturabhängigen Auftriebsterm A .

Dimensionslose Faktoren

Ersetzt man die in den Navier-Stokes-Gleichungen enthaltenen dimensionsbehafteten Variablen durch dimensionslose Größen, so lassen sich folgende dimensionslose Kennzahlen (*Tab.1*) bilden. Sie erlauben das Strömungsproblem entsprechend zu charakterisieren.

	Φ_1	Φ_2	Φ_3	Φ_4
Natürliche Konvektion	Pr	Ra Pr	1	Le ⁻¹
Erzwungene Konvektion	Re ⁻¹	0	(Re Pr) ⁻¹	(ReSc) ⁻¹
Gemischte Konvektion	Re ⁻¹	Gr Re ⁻²	(Re Pr) ⁻¹	(ReSc) ⁻¹

Tab.1: Dimensionslose Koeffizienten

Druckkorrekturgleichung

Die Druckkorrekturgleichung stellt die Kopplung zwischen Druck und Geschwindigkeit her. Bildet man die Divergenz der Impulsgleichungen, so erhält man die sogenannte Poissongleichung für den Druck. Spaltet man diese Gleichung in zwei Teile auf, in einen Basis- und einem Korrekturdruck, so läßt sich die Poissongleichung wie folgt formulieren.

$$0 = \nabla^2 p'_k + \frac{\partial}{\partial t} \nabla \bar{u} \quad (3)$$

Die Lösung dieser Gleichung liefert einen korrigierten Druckwert der die im Iterationsschritt zu vor berechneten Impulsgleichungen erfüllt.

Energie- und Feuchtetransport

Mit dem Ziel, speziell bauphysikalische Problemstellungen simulieren zu können, sind die Energie- sowie die Feuchtetransportgleichung in den Solveralgorithmus integriert worden (Gl. (4) und (5)).

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial (u\theta)}{\partial x} + \frac{\partial (v\theta)}{\partial y} = \Phi_3 \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial x_v}{\partial t} + \frac{\partial (u x_v)}{\partial x} + \frac{\partial (v x_v)}{\partial y} = \Phi_4 \left(\frac{\partial^2 x_v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 x_v}{\partial y^2} \right) \quad (5)$$

Gl. (4) liefert im Fall von natürlicher oder gemischter Konvektion die dimensionslose Temperaturdifferenz zur Berechnung der Auftriebskraft in Gl.(2). Eine konvektive und diffusive Ausbreitung der absoluten Luftfeuchte im Berechnungsgebiet hat ebenfalls einen, wenn auch geringen Einfluss auf die Luftdichte. Daher wird derzeit an einer physikalischen Einbindung in die Impulsgleichungen über einen Zwischenschritt zur Berechnung der feuchten Luftdichte gearbeitet.

Diskretisierung

Die numerische Behandlung der Bilanzgleichungen erfolgt auf einem nichtversetztem Gitter (*collocated grid*), d.h. alle abhängigen Variablen werden im Zellmittelpunkt bilanziert. Die Diskretisierung der implizit formulierten Differenzialgleichungen wird nach der Methode der *Finiten Volumen* (FVM) vorgenommen. Über eine Solver-Faktor kann bezüglich der konvektiven Terme zwischen der Disk-

retisierung über Zentrale Differenzen oder einem *Upwind*-Verfahren 1. Ordnung gewichtet werden.

SIMPLE-Algorithmus

Ein weit verbreitetes, von *Patankar & Spalding*, entwickeltes Schema zur Berechnung inkompressibler, viskoser Strömungen ist der SIMPLE-Algorithmus.

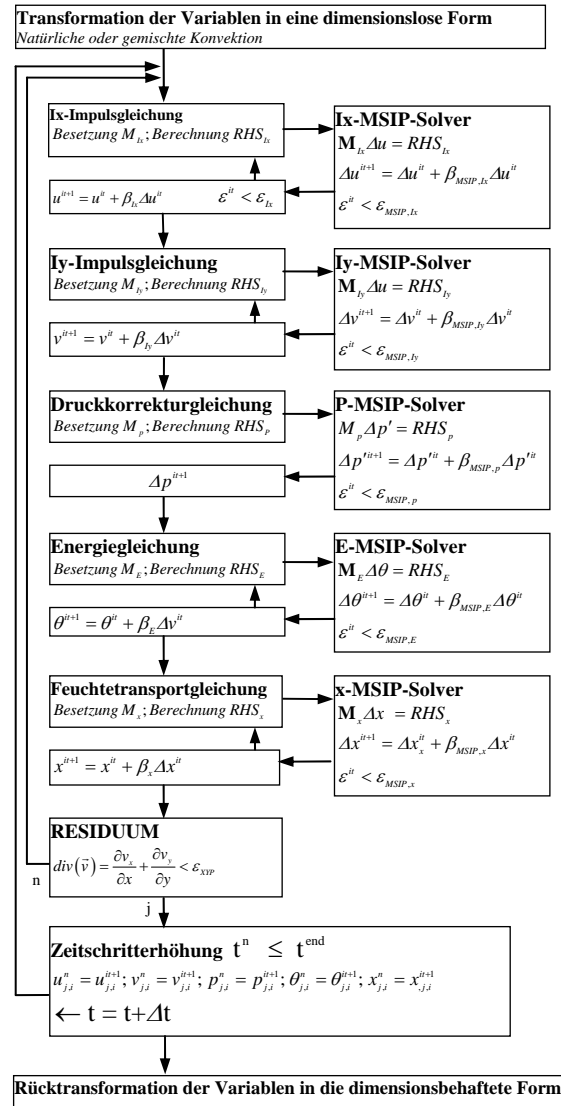


Abb.1: Programmstruktur des CFD-Tool-Solvers

In Anlehnung am SIMPLE-Algorithmus wurde der CFD-Tool-Solver-Algorithmus (*Abb.1*) implementiert. Als Verfahren zur Lösung der einzelnen partiellen Differentialgleichungen kommt das Newton-Verfahren zur Anwendung. Als iterativer Gleichungslöser wird der von *Schneider und Zedan* entwickelte MSIP-Algorithmus (*modifying strongly implicit procedure*) mehrfach eingesetzt.

Randbedingungen

Die Auswahl bzw. der Einfluss der Randbedingungen auf die CFD-Simulation ist von der bauphysikalischen Bewertungssituation abhängig. Prinzipiell

werden zwei Problemfälle unterschieden: ein eingeschlossener und ein durchströmter Luftraum. Damit verbunden ist die richtige Einbindung der entsprechenden Randbedingungen in die Numerik.

Eingeschlossener Luftraum

Bei einem derartigen Luftraum wird die Strömung allein durch einen Dichteunterschied der eingeschlossenen Luft induziert. Hierzu wird die Oberflächentemperatur und die absolute Porenluftfeuchte von den luftraumumgebenden Randzellen an das CFD-Tool übergeben.

Durchströmter Luftraum

Ein Hohlraum der über kleine sich im Mauerwerk befindliche Luftkanäle mit Inneraum- oder direkt von Außenluft durchspült wird, stellt ein aus thermodynamischer als auch von bauphysikalischer Seite her sehr komplexen Bewertungszustand dar. Als Randbedingung besteht hier die Möglichkeit eine Luftströmung über eine Druckdifferenz zwischen dem Ein- und Austritt zu definieren oder direkt die Luftgeschwindigkeiten bzw. Luftmassenströme vorzugeben.

Strahlung

Zur Berücksichtigung des langwelligen Strahlungsaustausches zwischen den Oberflächen eines Lufthohlraumes ist ein *SurfaceToSurface*-Modell integriert worden. Das Medium Luft wird als diatherm betrachtet. Die ausgesendete Energiestromdichte für jedes diskretisierte Flächenelement lässt sich mit folgender Gleichung (6) beschreiben.

$$\hat{s}_{j \rightarrow i} = \underbrace{\varepsilon_i}_{RHS} \cdot \hat{e}_{sw,i} + \underbrace{(1 - \varepsilon_i)}_R \sum_{k=1}^N \underbrace{\hat{s}_k}_{S} \underbrace{\varphi_{j,k}}_{\Phi} \quad (6)$$

Form man Gleichung (6) um, so erhält man in Matrix-Schreibweise folgendes zu lösendes lineares Gleichungssystem (7).

$$(E - R\Phi)S = RHS \quad (7)$$

Die Einstrahlmatrix Φ für einen vollständig umschlossenen Hohlraum wird über eine geometrieabhängige Integrationsroutine berechnet. Dazu werden die von der Diskretisierung vorgegebenen Teilflächen nochmals unterteilt und darüber numerisch integriert. Bei den rechteckigen Geometrien einer 2D-Simulation existieren nur zwei Flächenorientierungen (senkrecht und parallel zueinander ausgerichtete Linienquellen).

Das Gleichungssystem (7) wird mit Hilfe der Gauß-Eliminierung gelöst und danach die Nettowärmestromdichte $\dot{q}_{j,Str.}$ (W/m^2) Gl. (8) berechnet.

$$\dot{q}_{j,Str.} = \frac{\varepsilon_i}{(1 - \varepsilon_i)} (\hat{e}_{sw,i} - \hat{s}_j) \quad (8)$$

Mit der zusätzlichen Strahlungswärmestrom-Randbedingung werden, als derzeitigen Kompromiss, die von DELPHIN an das CFD-Tool übergebenen Oberflächentemperaturen korrigiert. Physikalisch ist es exakt diese Temperaturen iterativ zwischen beiden Programmen zu berechnen, was jedoch mit sehr hohem Simulationzeitaufwand verbunden wäre.

GEKOPPELTE BAUTEILSIMULATION

Schnittstelle DELPHIN-CFD-Tool

In der nachfolgenden Grafik (Abb.2) ist die Organisationsstruktur zur Kopplung beider Programmcodes schematisch dargestellt.

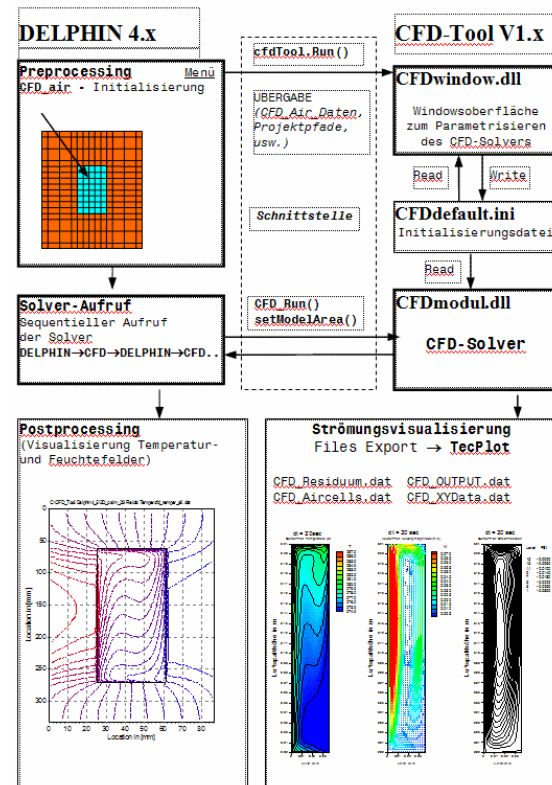


Abb.2: Schnittstelle zwischen dem Softwarepaket DELPHIN und dem CFD-Tool

Aus Gründen der Softwarewartung ist das CFD-Tool in zwei Programmmodule unterteilt worden. Das CFD-Parametrisierungs-Window und der CFD-Solver werden in Form von *.dll*-Files (*dynamic link library-file*) zur Verfügung gestellt. Die *CFDWindows.dll* beinhaltet die Windowsoberfläche mit der sämtliche solverspezifische Einstellung und Auswahlmöglichkeiten vorgenommen werden können und die *CFDmodul.dll* enthält den separaten Lösungsalgorithmus. Um eine Entkopplung beider

Programm-module herzustellen werden mit dem Schliessen des Fensters alle Solverparameter in eine Initialisierungsdatei (*CFDdefault.ini*) abgespeichert, aus der sich der Solver vor Beginn alle erforderlichen Kennwerte einliest.

Datenaustausch

Im Bezug auf Kopplungsvarianten zwischen dem Programmcode DELPHIN und dem CFD-Tool haben sich zwei wesentliche Möglichkeiten herauskristallisiert. Eine andere Variante, die vorerst in diesem Projekt umgesetzt worden ist, besteht darin, dass das Luftgebiet weiterhin Bestandteil des DELPHIN-Diskretisationsgebietes bleibt, aber über einen Rückkopplungswert konvektiver Einfluss auf den von DELPHIN berechneten gekoppelten Wärme- und Feuchtetransport ausgeübt wird. Als Über-gabewerte dienen hierzu die Luftmassestromdichten für alle Ränder einer Luftzelle. Diese Variante setzt voraus, dass das Fluidgebiet Bestandteil von DELPHIN ist und demnach auch innerhalb des Projektes mit diskretisiert wird.

Als weitere Rückgabedaten werden die aus dem Temperaturfeld (CFD-Tool) berechneten spezifischen und ortsabhängigen Wärmeübergangskoeffizienten übergeben. Diese beinhalten den konvektiven und einen Strahlungsanteil.

Testsimulationen

Als Testsimulation ist ein Ziegel mit eingeschlossenen Luftraum gewählt worden. Der Ziegel wird mit einem konstanten Temperatur-/ Feuchtegradienten von 20°C (50%r.F) zu 5°C (80%r.F) beaufschlagt. Zusätzlich ist der linke Bereich des Ziegels mit 99.5% Porenluftfeuchte initialisiert worden.

Wie in der mittleren Grafik von *Abb. 3* erkennbar ist, induziert der Temperaturgradient eine Konvektionszelle. In der linken Grafik (*Abb. 3*) wird das Verhalten der relative Luftfeuchte dargestellt. Es wird deutlich, dass aufgrund der Konvektion der linke Bereich abzutrocknen beginnt, wodurch am rechten Randbereich aufgrund der niedrigen Temperaturen Kondensationserscheinungen auftreten. Diese führen dazu, dass der rechte Bereich Feuchte anlagert bzw. der Baustoff ortsabhängig die Kondensatfeuchte bis in tiefere Schichten auf nimmt.

Die rechte Grafik von *Abb. 3* verdeutlicht nochmals den konvektiven Feuchtetransport über den Luftraum. Der Wassergehalt (w in Vol%) an der rechten Ziegelinnenoberfläche steigt im oberen Bereich bis in den überhygroskopischen Bereich von 4.5 Vol%. Die Grenze des hygroskopischen Feuchtebereiches liegt bei dem verwendeten Ziegel bei 1Vol%.

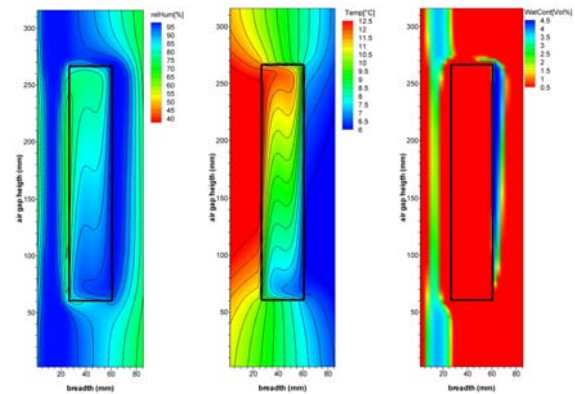


Abb.3: Simulation des gekoppelten Wärme-/Feuchte- und Lufttransportes in einem Ziegel mit eingeschlossenen Hohlraum

AUSBLICK

Als Unterstützung bzw. zur Validierung der Simulation existiert im bauphysikalischen Prüffeld der FHL ein Labormessstand zur experimentellen Untersuchung eines in einer innengedämmten Außenwand befindlichen Holzbalkenkopfes der weiter aufgerüstet wird. Zwei noch laufende Feldmessungen in Senftenberg (Brandenburg) liefern umfangreiches Datenmaterial, dass zur vergleichenden Beurteilung mit der numerischen Bauteilsimulation genutzt werden soll.

DANKSAGUNG

Dank gilt hier dem BMBF, das die in Kooperation mit dem Institut für Bauklimatik der TU-Dresden durchzuführenden Arbeiten mit finanziellen Mitteln unterstützt.

LITERATUR

- Date, A.: Introduction to Computational Fluid Dynamics, Cambriges Press 2005
- Jischa, M.: Konvektiver Impuls-, Wärme- und Stoffaustausch, Vieweg Braunschweig 1982
- St. Gnoth, K. Jurk, P. Strangfeld: Hygrothermsiches Verhalten eingebetteter Holzbalkenköpfe im innengedämmten Außenmauerwerk. In: Bauphysik 27 (2005), H. 2, S. 117-128.
- St. Gnoth, P. Häupl, H. Stopp, P. Strangfeld: Interior insulation of worth preserving facades with embedded wooden beam heads aided by heating pipes, Proceedings of the International Building Physics Conference, Netherlands, S. 477-484