

## COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS MIT OPEN-SOURCE-SOFTWARE REIF FÜR DIE HOCHSCHULE? – REIF FÜR DIE PRAXIS?

Dipl.-Ing. Philip Herrmann<sup>1</sup> und Prof. Dr.-Ing. Wolfram Haupt<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>WSP CBP Technische Ausrüstung GmbH, München, Deutschland  
<sup>2</sup>Hochschule Coburg, Coburg, Deutschland

### KURZFASSUNG

Durch Simulationsrechnungen mit CFD-Software (Computational Fluid Dynamics) lassen sich diverse Probleme aus dem Baubereich sehr detailliert analysieren.

Einem breiten Einsatz steht aber der hohe Schulungsaufwand, bis der Bediener der Software hinreichende Expertise für verlässliche Berechnungen hat, aber auch der nennenswerte finanzielle Aufwand bei Einsatz der derzeit marktführenden Produkte entgegen.

Ein Ausweg zumindest für den letzten Punkt könnte sich über eine CFD-Software bieten, die bereits seit etwa einem halben Jahrzehnt als Open-Source quelloffen und kostenfrei erhältlich ist.

Im Rahmen einer Diplomarbeit wurde untersucht, inwieweit sich dieses Simulationswerkzeug bereits heute für einen praktischen Einsatz eignet. Dazu wurden Vergleichsrechnungen mit einem validierten und mit einer kommerziellen Software berechneten Fall durchgeführt und anschließend ein praktisches Anwendungsbeispiel aus der Innenraumströmung von der Geometrierstellung über die Vernetzung und Berechnung bis zur Ergebnisdarstellung durch-exerziert.

Es konnte eine grundsätzliche Eignung der Software für die praktische Anwendung gefunden werden, und Nachteile, aber auch Vorteile gegenüber kommerziell erhältlicher CFD-Software eruiert werden.

### ABSTRACT

CFD-software (Computational Fluid Dynamics) is well-suited to analyze a lot of questions concerning buildings.

The main obstacle for a broader use of this method is the high training effort until a user has sufficient expertise for reliable simulations as well as the high price of the leading CFD-products.

A solution for at least the last topic could be provided by an open source and free of charge available CFD software, which has been around for half a decade.

In a diploma-thesis it had been investigated whether this simulation-tool is already suitable for practical application today. Calculations were compared with a validated case that had been simulated with commercial software. Additionally a practical application example had been carried out from geometry creation over grid-generation and computation to the presentation of results.

The fundamental suitability of the software for practical application could be found, and disadvantages, as well as advantages over commercially available CFD software had been investigated.

### EINLEITUNG

Simulationssoftware aus der Klasse der Computational Fluid Dynamics (CFD) ist grundsätzlich für vielfältige Fragestellungen im Baubereich anwendbar – etwa im Bereich der Innenraumströmung und thermischen Behaglichkeit, der Gebäudeumströmung oder auch zur detaillierten Analyse von Hohlräumen in Konstruktionen und Bauteilen.

Stand vor wenigen Jahren noch die Leistungsfähigkeit von erschwinglichen Rechnern einer weiteren Verbreitung dieses Werkzeugs im Weg, sind es für viele Ingenieurbüros, kleine und mittelständische Betriebe, aber auch für Hochschulen heute vor allem die hohen Kosten der kommerziellen CFD-Software, die einem häufigeren Einsatz dieser Technik entgegenstehen, was für Letztere dazu führt, dass an CFD ausgebildete Ingenieure zum "knappen Gut" werden und sich das Problem weiter verschärft.

Mit der CFD-Software "OpenFOAM" existiert – in seinen Ursprüngen bereits seit einem halben Jahrzehnt – ein quelloffenes und frei verfügbares Simulationsprogramm – genauer gesagt ein Simulations-Framework, das allerdings gegenüber den marktführenden Programmen in Umfang und insbesondere Bedienerfreundlichkeit eingeschränkt ist.

Zu untersuchen, inwieweit diese Einschränkungen in Praxis und Hochschul-Ausbildung relevant sind, war Ziel einer Diplomarbeit am Lehrstuhl Bauphysik der TU München.

## SIMULATIONSUMGEBUNG

OpenFOAM ist im Gegensatz zu den marktführenden CFD-Programmen wie CFX, FLUENT oder Star-CD kein dezidiertes Programm zur CFD-Berechnung, sondern eher ein "Framework" aus verschiedenen ineinandergreifenden und auf einzelne Aufgaben spezialisierten Software-Komponenten.

Bei allen CFD-Programmen werden zumindest die drei Schritte Preprocessing (die Erstellung des Berechnungsfalls mit Geometrieerzeugung, Gittergenerierung und Angabe der Randbedingungen), Solving (die eigentliche numerische Lösung nach Angabe von Startbedingungen und Abbruchkriterien) und Postprocessing (die Ergebnisauswertung und Visualisierung) unterschieden.

Das eigentliche OpenFOAM besteht dabei lediglich aus mehreren Solvern, Bibliotheken sowie einigen Konvertierungs- und Transformationsprogrammen, deren Benutzerschnittstelle darin besteht, Eingaben aus Textdateien in einer festgelegten Verzeichnisstruktur zu verarbeiten und die Berechnungsergebnisse wiederum in Form von Textdateien auszugeben.

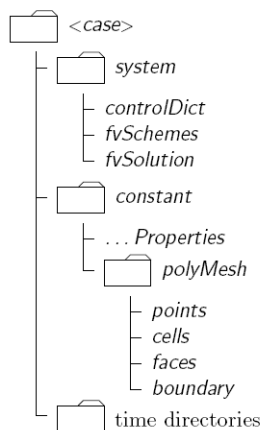


Abbildung 1: OpenFOAM-Verzeichnisstruktur

Für das Postprocessing stützt sich OpenFOAM standardmäßig auf das Visualisierungsprogramm "Paraview" der Sandia National Labs.

Beim Preprocessing gibt es einige freie sowie auch kommerzielle Programme, die Schnittstellen zu OpenFOAM besitzen mit jeweils spezifischen Vor- und Nachteilen.

Im Rahmen der Untersuchung kristallisierte sich für die kostenlose und für die kommerzielle Variante mit den Programmen Netgen bzw. CastNet jeweils eine Software(-kombination) in Verbindung mit einem

weit verbreiteten CAD-Programm (SketchUp bzw. AutoCAD) als brauchbarste Vorgehensweise heraus.

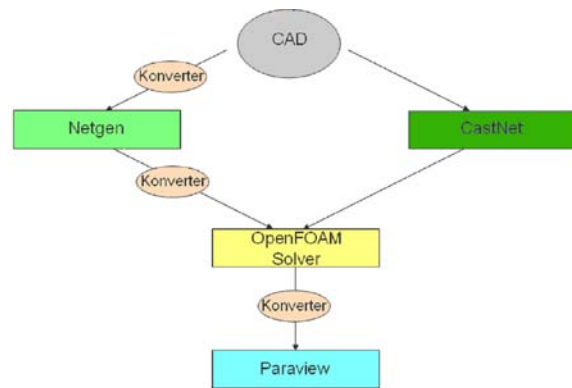


Abbildung 2: Flussdiagramm der CFD-Berechnung mit OpenFOAM

## VALIDATION

Untersucht wurde ein Fall einer Auftriebsströmung, der durch eine Messung mit der PIV-Methode (Haupt, W. 2001) sowie vielfältige Berechnungen (Zimmermann, F. 2005; Haupt, W., van Treeck, C. 2006) als hinreichend validiert angesehen werden kann.

Es handelt sich um eine Auftriebsströmung in einer Versuchsbox, die durch eine zentral unten eingebaute Heizfläche und eine oben gegenüberliegende Kühlfläche erzeugt wird und bei der im Anlauf ein "Kippen" von zunächst zwei sich ausbildenden Walzen in eine große Walze stattfindet und daher berechnet werden muss.

Bevor mit der Simulation begonnen werden konnte, musste ein geeigneter Solver ausgewählt werden. Die Anforderungen an diesen stellten sich wie folgt dar:

- dreidimensionaler Berechnungsfall
- instationäre Berechnung
- inkompressibles Fluidverhalten
- turbulente Strömung
- Boussinesq-Auftriebsmodell

Bei den Solvern, die sich im Standard-Umfang von OpenFOAM befinden, gibt es keinen, der alle oben genannten Punkte beinhaltet. Daher wurde ein bestehender Solver, der um eine Bibliothek des Boussinesq-Modells ergänzt wurde, verwendet.

Sowohl die Bibliothek als auch ein entsprechend programmierter Solver ließen sich durch Recherche im Internet auffinden. Dieser arbeitet mit dem Standard-k-ε Turbulenzmodell und greift auf bereits in OpenFOAM definierte Wandfunktionen zu.

Unter Verwendung eines derart angepassten Solvers konnten die Referenzwerte (Geschwindigkeitsfelder, Temperatur- und Druckverteilungen) des Falles gut reproduziert werden.

Im Rahmen der viermonatigen Bearbeitungszeit konnte sich der im Umgang mit CAD-Programmen erfahrene Diplomand mit leichten Hilfestellungen weitgehend selbständig in die erfolgreiche Simulation von Auftriebsströmungen in Innenräumen einarbeiten.

Die größten Anfangsschwierigkeiten stellten sich bereits in den ersten Schritten des Preprocessing – bestanden also vor allem darin, eigene dreidimensionale Modelle zu erstellen, zu vernetzen und parametrieren um sie anschließend zu simulieren. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass OpenFOAM selbst keine benutzerfreundlichen integrierten Werkzeuge zur Geometrie- und Gittererzeugung sowie zur Eingabe der nötigen Modellparameter und Kontrolle der Modellierung zur Verfügung stellt. Wollte man allein mit OpenFOAM ein dreidimensionales Objekt simulieren, geschähe die Modellierung mittels Erzeugung einer Textdatei, in der sich die Knoten und Kanten des Objekts wiederfinden würden.

So mussten als einer der ersten Schritte der Arbeit Programme identifiziert werden, die im Bereich des Preprocessing möglichst einfach und effizient miteinander zusammenspielen oder deren Ergebnisse zumindest nach Einsatz von Konvertern harmonisieren – wenn möglich unter der Prämisse einer kostenfreien Variante.

Durch Recherche im Internet und in der Literatur ließen sich geeignete Tools finden, die die Formate der Dateien konvertieren und verarbeiten konnten. Konkret wurde wie oben angeführt das Geometrieformat STL mit dem Preprocessor Netgen in der Version 4 verwendet, welches nach der Gittererzeugung wiederum für OpenFOAM konvertiert werden konnte. Deutlich einfacher und effizienter war der Umgang mit CastNet, welches sowohl eine direkte CAD-Schnittstelle als auch einen für OpenFOAM kompatiblen Export für die Gittererzeugung mit sich bringt.

Während der Simulation brach zudem das Programm ab, da die Ergebnisse zum Zeitpunkt des „Kippens der Walze“ zu stark divergierten. Abhilfe konnte hier durch die eine kurzzeitige Anhebung der Toleranzgrenze der k-Werte geschaffen werden, die danach wieder herabgesetzt wurde.

Aus der Warte des CFD-erfahrenen Betreuers kann die Einarbeitungszeit des Diplomanden als ähnlich lange angesehen werden, wie sie für die Einarbeitung in die kommerziellen CFD-Lösungen zu erwarten gewesen wäre. Der Verlauf der Diplomarbeit und die brauchbaren Resultate der Validationsrechnungen durch einen relativ unerfahrenen Benutzer sprechen durchaus für einen Einsatz von OpenFOAM in der Lehre.

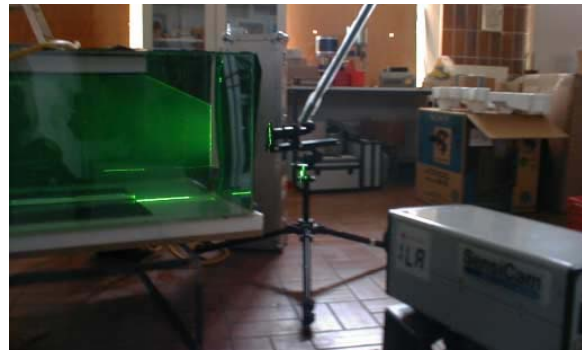


Abbildung 3: Durchführung der PIV-Messung

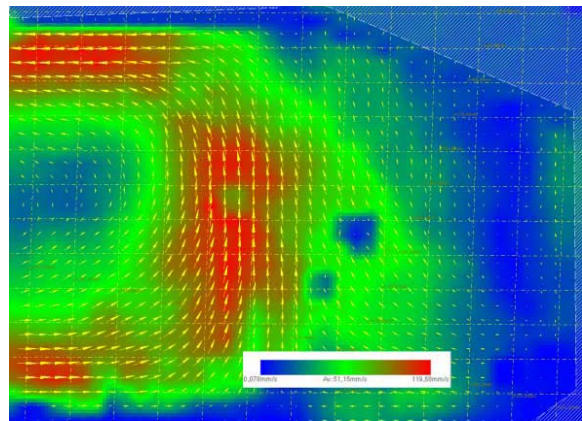


Abbildung 4: Geschwindigkeitsvektoren rechte Hälfte des Versuchsaufbaus – PIV-Messung

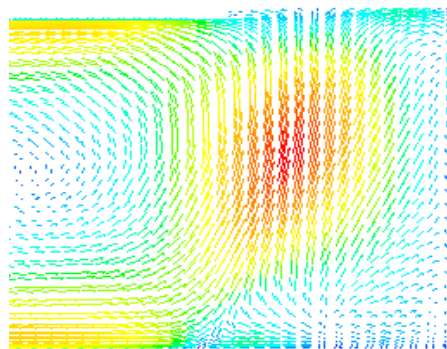


Abbildung 5: Geschwindigkeitsvektoren rechte Hälfte des Versuchsaufbaus – FLUENT-Berechnung

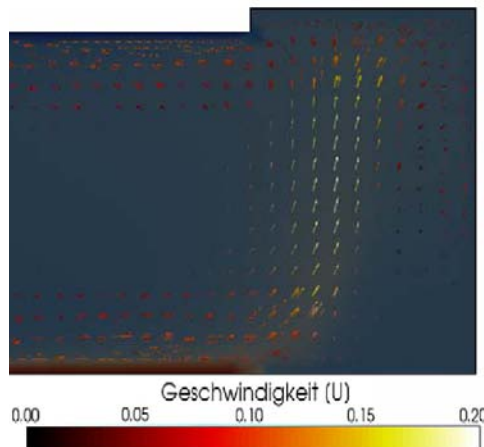


Abbildung 6: Geschwindigkeitsvektoren rechte Hälfte des Versuchsaufbaus – OpenFOAM-Berechnung

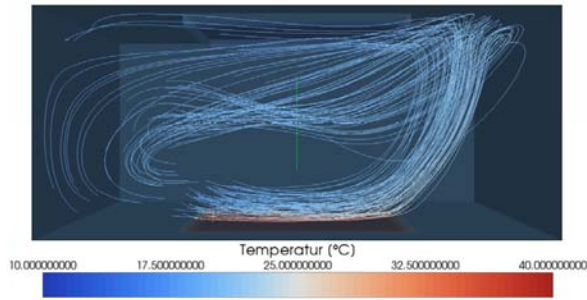


Abbildung 7: Stromlinien Open-FOAM-Berechnung

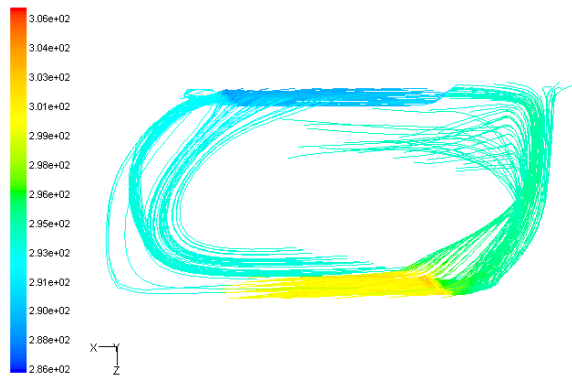


Abbildung 8: Stromlinien FLUENT-Berechnung

## ANWENDUNGSFALL PRAXIS

Nach erfolgreicher Validation wurde der modifizierte Solver mit Boussinesq-Auftriebsströmungsmodell auf einen realistischen Fall aus der Praxis angewendet – ein verglastes Atrium mit einer Höhe von ca. 21 Metern und einer zentral angeordneten Eingangstür ohne Windfang, einem nach rechts versetzten Empfangstresen sowie zwei an den beiden Seiten angeordneten Fahrstuhlschächten für den Winterfall. Da bei dem gewählten Fall Zugluft bemängelt und punktuell Luftgeschwindigkeiten deutlich über 1 m/s gemessen wurden, wurde durch Ansatz der berechneten Lufttemperaturen und -geschwindigkeiten ein „Draught Rating“ nach DIN EN ISO 7730 (2006) durchgeführt.

Die dafür anzusetzende Gleichung lautet wie folgt:

$$DR = (34 - t_{a,l}) \cdot (\bar{v}_{a,l} - 0,05)^{0,62} (0,37 \cdot \bar{v}_{a,l} \cdot Tu + 3,14)$$

Für  $\bar{v}_{a,l} < 0,05 \text{ ms}^{-1}$  ist  $\bar{v}_{a,l} = 0,05 \text{ ms}^{-1}$

Für  $DR > 100 \%$  ist  $DR = 100 \%$ .

Dabei ist

- $t_{a,l}$  die lokale Lufttemperatur in Grad Celsius, 20 °C bis 26 °C;
- $\bar{v}_{a,l}$  die lokale mittlere Luftgeschwindigkeit in Meter je Sekunde,  $< 0,5 \text{ ms}^{-1}$ ;
- $Tu$  der lokale Turbulenzgrad (%), in Prozent, 10 % bis 60 %, falls der Wert nicht bekannt ist, darf 40 % verwendet werden.

Da die bemängelten Verhältnisse nur in der Winterzeit auftreten, sind die Rahmenbedingungen

der Simulation auf diese Periode angepasst worden, was sich auf die Oberflächentemperaturen der Umfassungsflächen und die Temperatur der einströmenden Luft auswirkte.

Die Berechnung wurde anhand zweier Modelle mit unterschiedlichen Abstraktionsgraden durchgeführt, wobei diesen jeweils eine periodische Öffnung mit anschließender Schließung der Eingangstür unterstellt wurde, und alternativ die Tür geschlossen blieb. Somit ergaben sich für beide Modelle und Varianten vier Ergebnisse, die jedoch alle die gleiche Aussage zuließen: Durch die Undichtheiten in der Nähe der Fahrstuhlschächte stellen sich in dem Atrium unbehagliche Luftgeschwindigkeiten in Höhe von 1,50 m über dem Fußboden ein. Insbesondere für die am Empfangstresen sitzenden Angestellten stellt dies eine Beeinträchtigung der Behaglichkeit dar.

Als Lösungsansatz wurde eine Abschottung der Flächen in der Umgebung der Fahrstuhlschächte simuliert. Das Ergebnis zeigt erwartungsgemäß einen gravierenden Rückgang der Luftgeschwindigkeiten und damit verbunden weniger prozentuale Unzufriedene bezüglich des „draught rating“.

Die Wirkung der vorgeschlagenen Lösung konnte durch Messungen bei geschlossenen Türen und heruntergelassenen Brandschutztoren zumindest punktuell verifiziert werden.

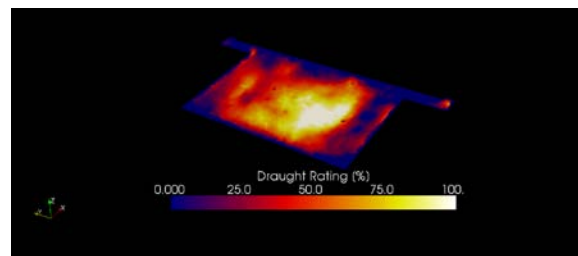


Abbildung 9 Draught Rating, Ausgangsfall

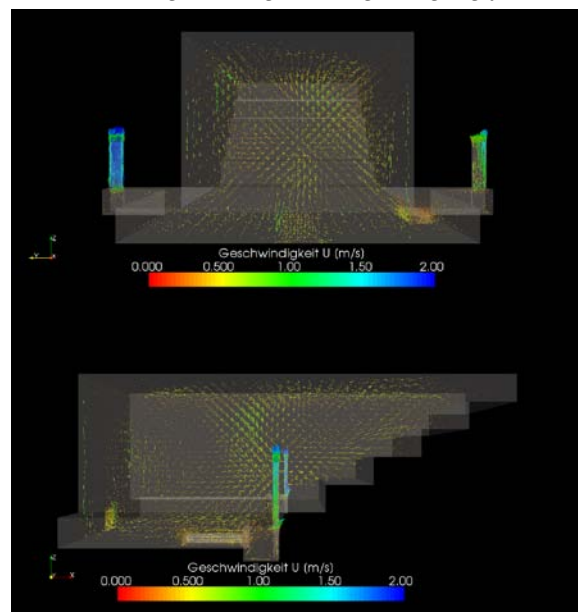


Abbildung 10 Geschwindigkeitsvektoren Ausgangsfall

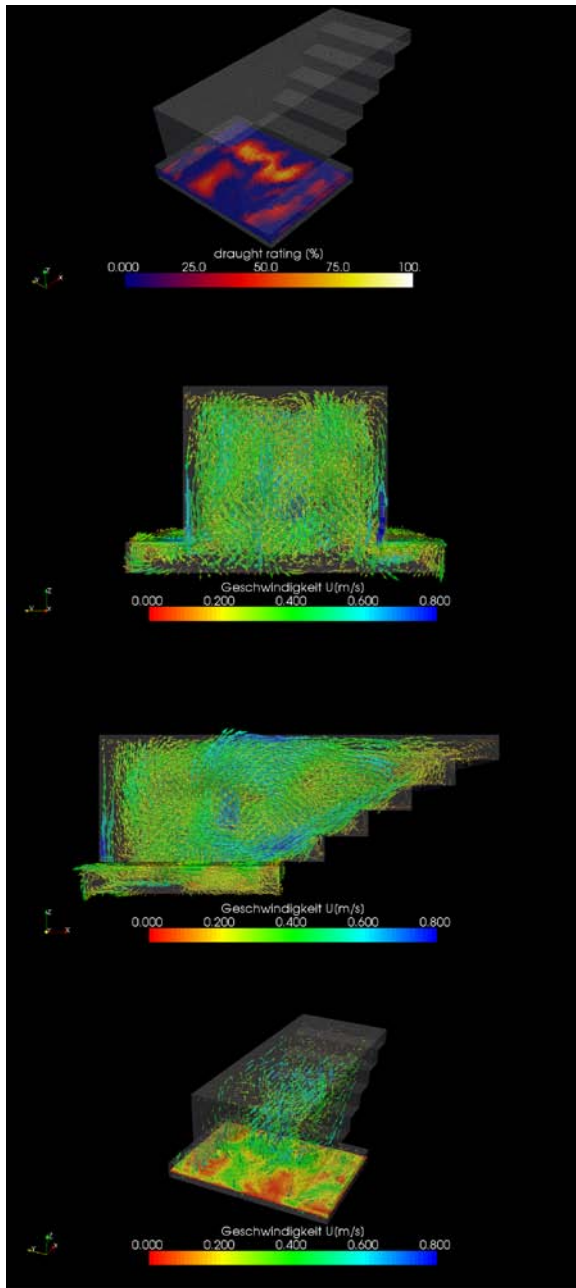


Abbildung 11 Lösungsvorschlag (Abschottung)

## EINSATZ IN DER LEHRE

Ausgehend von den relativ guten gemachten Erfahrungen wird überlegt, OpenFOAM zukünftig in Veranstaltungen für fortgeschrittene Studierende der Physikalischen Technik einzusetzen. Da diese über relativ gute C- bzw. C++-Kenntnisse verfügen, scheint für diese sogar ein vertiefter Einstieg in das eigentliche Framework möglich und zumutbar.

Dass sich Spezifika des Lösers durch Studium des Quellcodes erschließen lassen, ist dabei ein durchaus nicht zu unterschätzender Vorteil des Einsatzes von OpenFOAM gegenüber kommerziellen CFD-Tools.

CAD zur Geometrie-Erzeugung als der erste Schritt des Preprocessing ist in diesem Studiengang hingegen nicht im Pflichtprogramm, so dass im Rahmen des erstellten Curriculums in den entsprechenden Übungen von vorgegebenen Geometriemodellen ausgegangen wird und zur Erzeugung derselben auf CAD-Programme, die in Wahlveranstaltungen vorgestellt und eingeübt werden, lediglich verwiesen wird. Für die Gittergenerierung und Festlegung von Randbedingungen und Parametern laufen derzeit Verhandlungen mit dem Hersteller des o.g. kommerziellen Tools, mit dem sich die restlichen Schritte des Preprocessing und die Solver-Steuerung über eine grafische Benutzerschnittstelle realisieren lassen. Für den Einsatz in größeren Gruppen wird dies als Voraussetzung angesehen, um eine Betreuung bei Übungen zu gewährleisten.

Sollten die Verhandlungen nicht zum Ziel kommen, wird weiterhin der Einsatz von OpenFOAM bei Diplom- und Bachelorarbeiten unter Benutzung der kostenfreien Tools angestrebt.

## FAZIT

OpenFOAM hat nicht nur im Rahmen des beschriebenen Projekts seine Tauglichkeit als ernsthaftes CFD-Tool bewiesen und stellt bereits mit den kostenfreien Zusatzprogrammen für Pre- und Postprocessing ein halbwegs komfortabel nutzbares CFD-Werkzeug sowohl für die Hochschulausbildung als auch zur Anwendung in der Praxis dar.

Durch verhältnismäßig preisgünstige kommerzielle Zusatzprogramme kann die Benutzerschnittstelle so gestaltet werden, dass sie vom Bedienkomfort vergleichbar zu kommerziellen CFD-Programmen wird.

Spätestens damit steht dem Einsatz an Hochschulen und in der Praxis nichts mehr entgegen.

## LITERATUR

- Haupt, W. 2001: Zur Simulation von auftriebsinduzierten Innenraumströmungen. Dissertation Universität Kassel, 2001
- Zimmermann, F. 2005: CFD - nützliches Planungswerkzeug oder bunte Bilder? HLH 56 (2005), H. 10, S. 54-57
- Haupt, W., van Treeck, C. 2006: Experimentelle und numerische Untersuchungen von Auftriebsströmungen im Übergangsbereich. Proceedings BauSIM, 2006
- Herrmann, P. 2009: Raumströmungssimulation mit OpenFOAM. Diplomarbeit Lehrstuhl für Bauphysik, TU München, 2009