

## COMFSIM – INTERAKTIVE SIMULATION DES THERMISCHEN KOMFORTS IN INNENRÄUMEN AUF HÖCHSTLEISTUNGSRECHNERN

C. van Treeck<sup>1</sup>,  
P. Wenisch<sup>1</sup>, A. Borrmann<sup>1</sup>, M. Pfaffinger<sup>1</sup>, M. Egger<sup>1</sup>, O. Wenisch<sup>2</sup>, und E. Rank<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Lehrstuhl für Bauinformatik, Technische Universität München,  
Arcisstr. 21, 80290 München, Germany, eMail: treeck@bv.tum.de

<sup>2</sup>Leibniz Rechenzentrum, Boltzmannstrasse 1, 85748 Garching, Germany

### KURZFASSUNG

Der Beitrag gibt eine Übersicht über den gegenwärtigen Stand der Entwicklungen eines "Computational Steering" Werkzeuges zur interaktiven Simulation und Bewertung des thermischen Komforts in Innenräumen. Das System besteht aus einem parallelen CFD Rechenkern, einem schnellen 3D Gittergenerator und einer integrierten VR-basierten Visualisierungskomponente. Das numerische Verfahren basiert auf einem hybriden thermischen Gitter-Boltzmann Verfahren mit Erweiterungen zur Simulation turbulenter konvektiver Raumluftströmungen. Die Nutzung von Techniken des wissenschaftlichen Höchstleistungsrechnens ermöglicht dabei interaktive Veränderungen am geometrischen Modell und den Randbedingungen zur Laufzeit bei gleichzeitiger Neuberechnung und Darstellung von Ergebnissen.

Das Modell wird gegenwärtig um ein Strahlenmodell mit schnellem Sichtbarkeitsentscheid und ein lokales thermisches Komfortmodell erweitert, das von unseren Partnern entwickelt wird. Wir demonstrieren die Anwendung anhand der Strömungssimulation des Großraumabteiles eines Zuges.

### ABSTRACT

The paper outlines the current state of the development of a 'computational steering' environment for interactive indoor thermal comfort simulation and assessment. The system consists of a parallel CFD kernel, a fast 3D mesh generator and an integrated virtual reality-based visualization component. The numerical method is based on a hybrid thermal lattice Boltzmann method with extensions for simulations of turbulent convective flows. Utilizing high-performance supercomputing facilities allows for modifying both the geometric model and the boundary conditions during runtime with immediate visualization of changes in the results.

We currently enhance our model by a radiation model with fast visibility check and integrate a local thermal comfort model developed by our partners. The application is demonstrated by turbulent convection in a train's passenger carriage.

### EINLEITUNG

Computational Fluid Dynamics (CFD) Berechnungen sind heutzutage in vielen Ingenieurbereichen bei der Produktentwicklung industrieller Standard. Auch im Bauwesen werden zunehmend hochauflösende Simulationen eingesetzt, etwa im Zusammenhang mit der zonalen Gebäudesimulation (Beausoleil-Morrison, 2000; van Treeck, 2004) oder zur Vermeidung aufwändiger Großversuche im Windkanal. Der damit verbundene Aufwand zur Erstellung numerischer Modelle und zur Auswertung und Analyse der Simulationsdaten begrenzt dabei die Anwendung auf wenige Parameterstudien und verbietet den investigativen Einsatz dieser Methoden etwa zur Formfindung oder zur Optimierung komplexer Szenarien.

Motivation für die vorgestellten Arbeiten ist es deshalb, ein integratives Werkzeug zu entwickeln, das es gestattet, sowohl die Geometrie als auch die Randbedingungen während einer CFD Simulation zu verändern, die Ergebnisse einer laufenden Simulation unmittelbar zu beobachten und eine Auswertung hinsichtlich relevanter Klimakomfortparameter vorzunehmen.

Die vorgestellten Arbeiten resultieren aus einer Reihe abgeschlossener Forschungsprojekte (vgl. etwa Wenisch, 2005) und einer langjährigen Zusammenarbeit mit dem Industriepartner SIEMENS AG, Corporate Technology, und werden gegenwärtig in dem von der *Bayerischen Forschungsförderung* geförderten Projekt COMFSIM fortgesetzt (van Treeck, 2006). In diesem Zusammenhang wird weiterhin von unserem Partner, dem Fraunhofer Institut für Bauphysik (Holzkirchen), ein neuartiges lokales Klimakomfortmodell entwickelt, das von uns in die Plattform integriert wird.

### NUMERISCHES VERFAHREN

Physikalischer Anwendungsbereich ist die Simulation turbulenter konvektiver Luftströmungen in Innenräumen Boussinesq-inkompressibler Newtonscher Fluide.

Das numerische Verfahren basiert auf der Lattice Boltzmann Methode (LBM), einem effizienten Verfahren, das zur Lösung zahlreicher Strömungs- und

Transportvorgänge eingesetzt werden kann, siehe z.B. (van Treec, 2004) und die Referenzen darin. Im Gegensatz zu klassischen Verfahren, die auf einer Diskretisierung der hydrodynamischen Grundgleichungen (Navier-Stokes Gleichungen) beruhen, verwenden LBM Methoden der statistischen Physik. Ausgehend von der Boltzmann Gleichung berechnen LBM auf der Mesoskala die Advektion und lokale Kollision eines Ensembles von Partikelverteilungsfunktionen mit linearisiertem Kollisionsoperator.

Durch die Diskretisierung der Boltzmann Gleichung hinsichtlich des mikroskopischen Geschwindigkeitsraumes und durch die Wahl eines expliziten Finite Differenzen (FD) Verfahrens erster Ordnung in Raum und Zeit entsteht ein verhältnismäßig einfaches Entwicklungsschema, das gewisse Vorteile seitens der Generierung eines numerischen Rechengitters und einer effizienten Implementation bietet, insbesondere hinsichtlich Vektorisierung auf Höchstleistungsrechnern (Wenisch, 2006).

Es kann dabei gezeigt werden, dass die Lattice Boltzmann Gleichung bei der Wahl geeigneter Randbedingungen eine quadratische Konvergenzrate aufweist und dass die Genauigkeit des oben genannten FD Verfahrens bezüglich der makroskopischen Momente von zweiter Ordnung ist, wobei das Verfahren auf kleine Mach und Knudsenzahlen beschränkt ist.

Wir verwenden eine spezielle Variante des Verfahrens, das so genannte Multiple Relaxation Time (MRT) Modell von (d'Humières et al., 2002), das u.a. durch einen Zugewinn an numerischer Stabilität gekennzeichnet ist. Für die Simulation konvektiver Strömungen verwenden wir das von (Lallemand et al., 2003) vorgeschlagene hybride thermische Modell, das um ein Feinstruktur Turbulenzmodell erweitert wurde (van Treec, 2005). Es wurden ferner Validierungsrechnungen bzgl. freier Konvektionsströmungen in 2D und 3D durchgeführt; es wird auf (van Treec, 2005) verwiesen.

## COMPUTATIONAL STEERING SYSTEM

Computational Steering (CS) steht für "Interagieren mit der Simulation selbst" (Mulder et al., 1999). Man sollte den Term deshalb nicht als "Monitoring" einer Simulation missverstehen, denn CS bedeutet mehr als den iterativen Einsatz von Preprozessor, Simulationsprogramm und Postprozessor.

Interaktivität bedeutet in vorliegendem Zusammenhang sowohl die Veränderung von Randbedingungen, als auch das Hinzufügen, Entfernen, Transformieren, Skalieren und Verschieben geometrischer Objekte während einer Simulation, wie zum Beispiel aktiver Heizelemente oder passiver Strömungshindernisse.

Der hohe Grad an Interaktivität wird dabei durch das Zusammenwirken folgender Komponenten bewirkt:

- Schneller 3D Gittergenerator. Die Softwarekomponente verwendet raumpartitionierende Datenstrukturen und ist in der Lage, komplexe Facettenmodelle (STL Format) in Sekundenbruchteilen zu vernetzen. Das Verfahren ist herkömmlichen Vernetzungsarten, wie sie etwa bei Finite Volumen basierten Ansätzen eingesetzt werden, weit überlegen. Das numerische Modell benötigt dabei ein uniformes kartesisches Gitter. Das Vorgehen ist in (Wenisch, 2005) beschrieben.
- Integrierte VR Visualisierungskomponente basierend auf der OpenInventor Bibliothek von Mercury. Das Modul unterstützt diverse Hardware wie z.B. passive und aktive stereoskopische Visualisierungsgeräte und verschiedene VR Umgebungen mit einzelnen und mehreren Screens.
- Effiziente Kommunikationsschnittstelle zwischen Rechenkern und Visualisierung.
- Erweiterungen zur Unterstützung kollaborativen Entwerfens, wobei mehrere Visualisierungsclients an- und abgekoppelt werden können.
- Paralleler Rechenkern. Es werden ein optimiertes nicht-thermisches Lattice Boltzmann BGK Modell und das beschriebene hybride thermische MRT Modell unterstützt, beide mit algebraischem Turbulenzmodell.

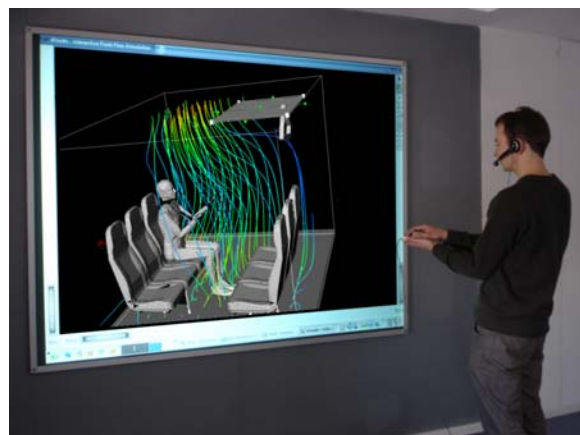


Abb. 1 Prinzip: Interaktion mit C. Steering System

Abb. 1 zeigt das Prinzip des am Lehrstuhl installierten stereoskopischen Visualisierungssystems während einer laufenden interaktiven Simulation. Änderungen an der Szene werden an den Supercomputer am Leibniz Rechenzentrum (Vektorparallelrechner HITACHI SR8000-F1) übermittelt, das Gebiet wird neu vernetzt, berechnet, die Ergebnisse zurückgesendet und in der VR Umgebung ausgewertet. Mit der am neuen Bundeshöchstleistungsrechner (HLRB II, SGI Altix 4700 mit bis zu 69 TFlop/s) Mitte 2006 in Garching zur Verfügung stehenden Rechenkapazität werden diese komplexen Simulationen dabei erstmalig "in Echtzeit" möglich sein.

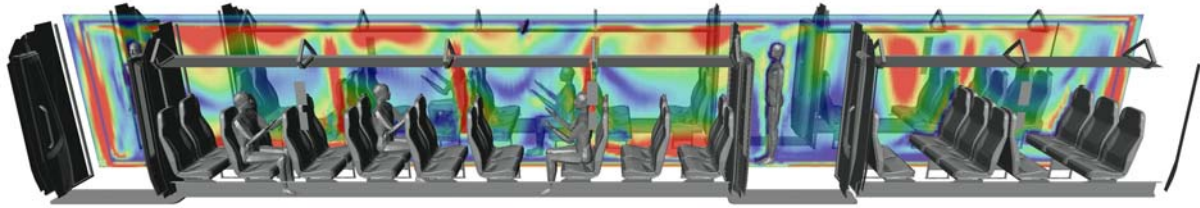


Abb. 2 Turbulente Konvektion im Großraumabteil eines Zuges, gemittelt Geschwindigkeitsfeld.  
In Kooperation mit SIEMENS AG, Corporate Technology.

## ANWENDUNGSBEISPIEL

Abb. 2 zeigt freie Konvektion im Großraumabteil eines Zuges als Anwendungsbeispiel. Der Auftrieb wird von Heizkörpern erzeugt, die seitlich neben den Sitzen angeordnet sind. Das Modell besitzt 40 Millionen Freiheitsgrade und wurde auf einem parallelen Linuxcluster simuliert (Vernetzungszeit Gesamtmodell: 1.5 Sekunden, Rechenzeit: mehrere Stunden).

In Abb. 1 zeigt hingegen die interaktive Simulation auf dem Bundeshöchstleistungsrechner anhand eines zuvor gewählten Ausschnittes aus dem komplexen Beispiel. In Abb. 1 wird dabei beispielsweise die optimale Position von Belüftungsdüsen untersucht.

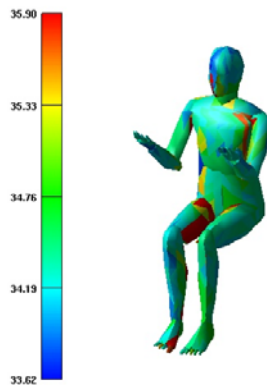


Abb. 3 Resultierende Oberflächentemperaturen

Ziel der laufenden Arbeiten im Projekt COMFSIM ist es deshalb, gemeinsam mit Partnern ein neuartiges lokales Behaglichkeitsmodell zu entwickeln und zu integrieren, um die etablierten (statistischen) Bewertungsmethoden für den Körper als Ganzes (PPD, PMV) auf einzelne Körperpartien zu übertragen.

Abb. 3 zeigt erste Ergebnisse einer Studie, der Berechnung von resultierenden Oberflächentemperaturen (RST) auf der triangulierten Oberfläche eines numerischen Dummies unter der Annahme eines konstanten emittierten konvektiven Wärmestromes. Für Details der Studie bzgl. Versuchsaufbau, Messung, Simulation und Auswertung vgl. (Cenic, 2005).

## ZUSAMMENFASSUNG

Der Beitrag reflektiert den gegenwärtigen Stand der Entwicklungen eines interaktiven Computational

Steering Systems zur lokalen Behaglichkeitsanalyse in Innenräumen. Das Modell wird gegenwärtig um ein Strahlenmodell mit schnellem Sichtbarkeitsentscheid und ein lokales thermisches Komfortmodell erweitert, das in Zusammenarbeit mit unseren Partnern entwickelt wird.

## LITERATUR

- Beausoleil-Morrison I. 2000. The adaptive coupling of heat and air flow modelling within dynamic whole building simulation, PhD thesis, University of Strathclyde, Glasgow.
- Cenic N. 2005. Development of thermal comfort temperature sensors using CFD simulation based on LB methods, Master thesis, TU München.
- d'Humières D., Ginzburg I., Krafczyk M., Lallemand P., Luo L.-S. 2002. Multiple-relaxation-time lattice Boltzmann models in three dimensions, Phil. Trans. R. Soc. Lond. A, **360**, 437-451.
- Lallemand P., Luo L.-S. 2003. Theory of the lattice Boltzmann method: Acoustic and thermal properties in two and three dimensions, Phys. Rev. E, **68**, 036706.
- Mulder J.D., van Wijk J.J., van Lier R. 1999. A survey of computational steering environments. Future Gener. Comput. Syst., **15**(1):119-129.
- van Treeck C. 2004. Gebäudemodell-basierte Simulation von Raumluftrömungen. Dissertation, TU München.
- van Treeck C., Rank E., Krafczyk M., Toelke J., Nachtwey B. 2005. Extension of a hybrid thermal LBE scheme for Large-Eddy simulations of turbulent convective flows, Computers and Fluids, in press.
- van Treeck C., Rank E. 2006. ComfSim - Interaktive Strömungssimulation und lokale Komfortanalyse in Innenräumen. In: Bayerische Forschungstiftung (Hrsg), Jahresbericht 2005, S.66, München.
- Wenisch P., van Treeck C., Bormann A., Rank E., Wenisch O. 2005. Comp. steering on distributed systems: indoor comfort sim. as a case study of interactive CFD on supercomputers, subm. to Int. J. Parallel, Emergent and Distr. Systems.