

NUMERISCHE SIMULATION DES THERMISCHEN BEHAGLICHKEITSEMPFINDENS IN INNENRÄUMEN

C. van Treeck¹,
M. Pfaffinger¹, P. Wenisch¹, J. Frisch¹, Z. Yue¹, M. Egger¹, und E. Rank¹

¹Lehrstuhl für Computation in Engineering, Technische Universität München,
Arcisstr. 21, 80290 München, Germany, eMail: treeck@bv.tum.de

KURZFASSUNG

Die Arbeitsgruppe am Lehrstuhl für Computation in Engineering beschäftigt sich seit einigen Jahren mit dem Mehrskalens- und Mehrebenenproblem der numerischen Simulation des menschlichen Behaglichkeitsempfindens in Innenräumen. Dabei gelangen zonale Ansätze der energetischen Gebäudesimulation ebenso wie CFD Verfahren und Modelle zur Simulation des menschlichen Blutkreislaufes zum Einsatz.

Der Beitrag erläutert die laufenden Arbeiten im Bereich schneller interaktiver Vorabsimulation (Computational Steering). Ziel ist die Entwicklung eines Werkzeuges zur Simulation und Bewertung des thermischen Komforts in Innenräumen, das nahezu in Echtzeit betrieben werden kann. Das System besteht aus einem parallelen CFD Rechenkern, einem schnellen Gittergenerator und einer VR-basierten Visualisierungskomponente. Durch die Verwendung eines Höchstleistungsrechners sind dabei Veränderungen am geometrischen Modell und den Randbedingungen zur Laufzeit interaktiv, d.h. bei gleichzeitiger Neuberechnung und Darstellung von Ergebnissen, möglich. Das Modell wird gegenwärtig um ein thermoregulatorisches Menschmodell zur Abbildung des Blutkreislaufes und um ein thermisches Behaglichkeitsmodell erweitert.

ABSTRACT

The research group at the Chair for Computation in Engineering focuses since a few years on multi-scale and multi-level problems in the numerical simulation of indoor thermal comfort. Thereby, multi-zone approaches known from building performance simulation as well as CFD methods and human thermoregulation models are applied.

The paper summarizes the current work in the field of computational steering. We are targeting at developing a tool for indoor thermal comfort simulation and assessment which is capable of performing simulations close to real time. The system consists of a parallel CFD kernel, a fast grid generator and a VR based visualization component. Utilizing high performance computing, modifications of both the geometric model and the boundary conditions are interactively possible during runtime with immediate

visualization of changes in the results. We currently enhance the model by integrating a human thermoregulation model and a thermal comfort model.

EINLEITUNG

In den nächsten Jahren werden am Arbeitsplatz eines Ingenieurs Manycore Plattformen, d.h. Rechner, die mehrere Rechenkerne auf einem Chip vereinen, zu erschwinglichen Preisen verfügbar sein. Mit dieser Entwicklung können solche Plattformen künftig etwa für schnelle Vorabsimulationen im Bereich des Innenraumkomforts eingesetzt werden. Hierfür sind effiziente parallele Algorithmen zu entwickeln und neue Herangehensweisen bei der Planung denkbar.

Computational Fluid Dynamics (CFD) Berechnungen sind heutzutage in vielen Ingenieurbereichen bei der Produktentwicklung industrieller Standard. Ein begrenzender Faktor ist dabei nach wie vor der Kostenfaktor, den die Arbeitszeit eines Ingenieurs bei der Erstellung eines numerischen Modells darstellt. Die meiste Zeit wird dabei für die geometrische Modellierung und Vernetzung benötigt.

Motivation für die Arbeiten ist es deshalb, ein integratives Werkzeug zu entwickeln, das für schnelle Vorabsimulationen eingesetzt werden kann. Wesentlicher Vorteil der hier vorgestellten Herangehensweise ist die Vereinigung der üblicherweise getrennt ablaufenden Teilschritte Preprocessing, Simulation und Postprocessing zu *einem* kohärenten Prozeß. Sowohl die Geometrie als auch die Randbedingungen können während einer Simulation verändert werden, und Ergebnisse einer Simulation werden laufend aktualisiert, womit auch unmittelbar eine Auswertung relevanter Parameter vorgenommen werden kann.

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, 2007). Der Lehrstuhl arbeitet dabei u.a. eng mit dem Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP) in Holzkirchen zusammen, das Projektpartner in COMFSIM ist.

BEDEUTUNG FÜR DAS BAUWESEN

Im Bauwesen werden Komponenten der technischen Gebäudeausrüstung üblicherweise anhand gegebener Entwurfsgrößen ausgelegt, um den Heiz- bzw. Kühlenergiebedarf eines Gebäudes zu decken und somit operative Raumtemperaturen auf einem definierten Niveau halten zu können. Dieses Niveau wird anhand von Komfortzonen festgelegt, die in verschiedenen Standards wie z.B. ISO 7730 beschrieben sind.

Lokale Effekte, wie z.B. Strahlungsasymmetrien etc., werden in frühen Entwurfsphasen dabei nur unzureichend berücksichtigt. Diese sind aber von enormer Bedeutung, gerade wenn nachhaltige, energieeffiziente Energiekonzepte durch die Interaktion zwischen wärme-/kälteerzeugendem System, Gebäudehülle und (thermisch aktiven) Komponenten zu lokalen Abhängigkeiten führen. Ist eine Anlage fertig dimensioniert und ausgeschrieben, so sind bauliche Korrekturen zur Beseitigung lokaler Unzulänglichkeiten zu späteren Bauphasen nur noch unter hohen Kosten realisierbar.

Aus diesem Grund wird ein erhebliches Potential für ein Werkzeug im Bereich der Planung erkannt, das bereits während einer frühen Entwurfsphase ergänzende Aussagen über die Luftführung und lokale Effekte des Behaglichkeitsempfindens gestattet.

SIMULATION DES BEHAGLICHKEITSEMPFINDENS

Das menschliche Temperatur- und Behaglichkeitsempfinden hängt vom thermischen Zustand des Körpers ab, der wiederum durch Thermorezeptoren in Abhängigkeit von Haut- und Körperkerntemperaturen erfaßt wird (Fanger 1982, Gagge 1973, Stolwijk 1971). Dieser thermische Zustand resultiert dabei aus einer Vielzahl thermophysikalischer und regulatorischer Prozesse.

Das häufig eingesetzte Behaglichkeitsmodell nach ISO 7730 von Fanger (1982) betrachtet die stationäre Energiebilanz des Körpers als Gesamtsystem und leitet als statistisches Maß das *Predicted Mean Vote (PMV)* von den Umgebungsbedingungen ab, falls die Bilanz im Ungleichgewicht ist. Der PMV Index kann in einen Prozentsatz Unzufriedener (PPD) umgerechnet werden; beide Indizes können in einer Simulation als Feldgrößen dargestellt werden. Das Modell ist dabei nur in uniformen, homogenen und stationären Umgebungen nahe thermischer Neutralität einsetzbar. ISO 7730 nennt deshalb ferner Toleranzwerte für lokale Bedingungen wie z.B. Grenzwerte bzgl. Strahlungsasymmetrien und Zugerscheinungen.

Ist man an lokalen ergonomischen Umgebungsbedingungen (vgl. ISO 14505) interessiert, so müssen diese auf empirischem Wege über Messungen und Untersuchungen mit Testpersonen gewonnen werden. Das "Wissen" steckt hierbei in Regressionsfunk-

tionen, die je nach Modell für jedes Körpersegment einen Zusammenhang zwischen Oberflächentemperaturen, thermischem Empfinden und dessen Bewertung herstellen. Im Bereich der lokalen Bewertung besteht dabei nach wie vor hoher Forschungsbedarf, um diese Korrelationen zu gewinnen.

Ein detailliertes *numerisches* Modell besteht aus folgenden Komponenten: einem Strömungs- und Wärmestrahlungslöser, einem thermischen Manikin zur Modellierung des Wärmetransports zwischen Körper und Umgebung unter Berücksichtigung physikalischer und physiologischer Eigenschaften (passives System) und einem (aktiven) thermoregulatorischen System, das über Sollwertabweichungen (Stolwijk 1971) Quellterme für das passive System liefert (z.B. Schweißproduktion, Muskelzittern).

Ferner wird ein Modell für das thermische Empfinden und zur Bewertung der Behaglichkeit benötigt. Folgende Abbildung zeigt die numerische Kopplung, die zwischen den Systemen vorzunehmen ist.

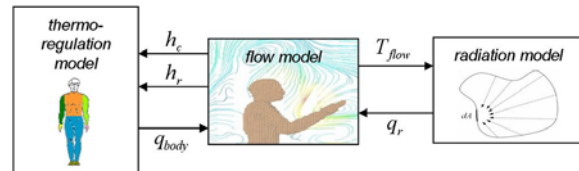


Abb. 1 Numerische Kopplung der Komponenten

COMPUTATIONAL STEERING SYSTEM

Mit dem Ziel, schnelle Vorabsimulationen zu realisieren, wurde in der Arbeitsgruppe in den vergangenen Jahren ein Computational Steering System zur Simulation von Luftströmungen entwickelt, vgl. (Wenisch 2008). Zur Definition des Begriffes Computational Steering vgl. auch (Mulder 1999).

Das System besteht aus einem thermischen Lattice-Boltzmann Verfahren (van Treeck 2006), einem 3D Gittergenerator (Wenisch 2008) und einer integrierten VR-basierten Visualisierungskomponente. Änderungen an Randbedingungen und Geometrie werden mit dem Simulationsserver des Rechenkerns kommuniziert und das Rechengelände neuvernetzt. Da die Ergebnisse unmittelbar zurückgeliefert werden, ist ein interaktives Arbeiten nahezu in Echtzeit möglich. Auch bei der im interaktiven Betrieb (je nach verfügbarer Hardware) zwangsläufig stark reduzierten Auflösung sind qualitative Aussagen zur Luftführung möglich. Optimierte Szenarien können anschließend bei höherer Auflösung im Detail simuliert werden.

Die Softwarekomponente des Gittergenerators ist in der Lage, komplexe Facettenmodelle (STL Format) in Sekundenbruchteilen zu vernetzen. Das numerische Modell benötigt dabei ein uniformes kartesisches Gitter. Das Vorgehen ist z.B. in (Wenisch 2008 und van Treeck 2006) beschrieben.

Um ein Komfortmodell in die Computational Steering (CS) Umgebung zu integrieren, beschäftigen sich laufende Arbeiten mit der Entwicklung eines parametrischen Manikin-Modells (Yue 2008), der Implementierung räumlicher Interpolationsschemata, der Entwicklung eines 2-Band Strahlungslösers und der Anbindung des thermoregulatorischen Menschmodells von (Fiala 1998) mit geeigneten Regressionsfunktionen zur Behaglichkeitsbewertung (gemeinsam mit Projektpartnern).

MANIKIN MODELL

Als Schnittstelle zur Kopplung des thermischen Manikins mit den Verfahren gem. Abb. 1 und zur Integration in das CS System dient ein objektorientiertes, parametrisches Modell. Zur Wahrung der Kompatibilität wurde die Unterteilung des Segmentmodells in Anlehnung an das passive Menschmodell der Arbeit von Fiala (1998) vorgenommen. Zusammenhängende Komponenten (etwa die Arme) können in Abhängigkeit ihrer Freiheitsgrade im VR System transformiert werden. Ein Armature Modell beschreibt dabei die topologischen Zusammenhänge der einzelnen Körperteile und wurde nach dem H-ANIM Standard ISO/IEC FCD 19774:200x mit Hilfe der Software Blender definiert. Die geometrischen Teilmodelle, vgl. Abb. 2, wurden unter Verwendung des NASA Man-Systems Integration Standards (NASA 1995) einschließlich Verbindungsgelenken in CAD modelliert und an die Besonderheiten des Fiala Modells angepaßt. Es stehen dabei verschiedene Geometrien und Auflösungen zur Verfügung, das Modell unterstützt ferner die Beschreibung von Bewegungsabläufen des Manikins. Gegenwärtig arbeitet die Gruppe an der Weiterentwicklung und Integration der Einzelbausteine in das Computational Steering System.

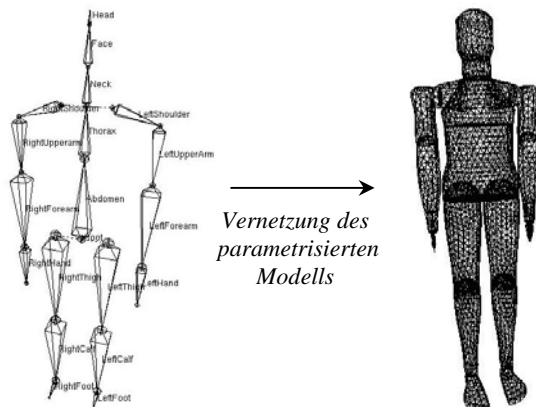


Abb. 2 Parametrisiertes Manikin Modell (Yue 2008)

BEISPIEL UND AUSBLICK

Potentielle Anwendungsszenarien ergeben sich in zahlreichen Bereichen. Abb. 3 zeigt als mögliche Anwendung die Untersuchung der Luftführung in einem Operationssaal (Wenisch 2008). Hierbei soll ein gefilterter, keimarmer Luftstrom möglichst ohne

Kontaminierung durch Wirbelablösung oder Vermischung in Richtung Operationssitus geführt werden.

Neben der Luftqualität ist auch das Behaglichkeitsempfinden von Patient und Operateuren von Interesse. Das Bild zeigt zum gegenwärtigen Zeitpunkt eine isotherme Simulation, da die Integration des Komfortmodells Gegenstand aktueller Arbeiten ist.

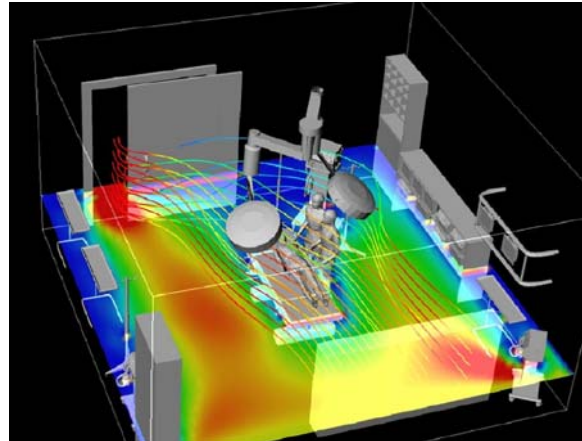


Abb. 3 OP Reinraumszenario (Wenisch 2008)

LITERATUR

- Fanger P.O. 1982. Thermal comfort, Robert E. Krieger, Malabar.
- Fiala D. 1998. Dyn. Sim. des menschl. Wärmehaushalts und der therm. Behaglichkeit, Diss., De Monfort Univ. Leicester, HFT Stuttgart, Bd 41.
- Gagge A. 1973. Rational temp. indices of man's thermal env. and their use with a 2-node model of his temp. reg. Fed. Proc., 32: 1572-1582.
- Mulder J.D., van Wijk J.J., van Liere R. 1999. A survey of computational steering environments. Future Gener. Comput. Syst., 15(1): 119-129.
- NASA. 1995. Man-systems integration standards (Rev. B), Vol. I, sec. 3: Anthropometry and Biomechanics, <http://msis.jsc.nasa.gov>.
- Stolwijk J.A.J. 1971. A mathematical model of physiol. temp. reg. in man, Tech. report, NASA CR-1855. Washington D.C.
- van Treeck C., Wenisch P., Borrmann A., Pfaffinger M., Wenisch O. and Rank E. 2007. COMFSIM – Interakt. Sim. d. therm. Komf. in Innenräumen auf Höchstleistg.rechn., Bauphysik, 29 (1): 2-7.
- van Treeck C., Rank E., Krafczyk M., Tölke J., Nachtwey B. 2006. Ext. of a hybrid thermal LBE scheme for Large-Eddy sim. of turb. conv. flows, Comp. and Fluids, 35: 863-871.
- Wenisch P. 2008. Comp. Steering of CFD Sim. on Teraflop Supercomputers, Diss., TUM.
- Yue Z. 2008. A computational human model for thermal comfort sim. Masters thesis, TUM.