

**BAUSIM 2006:
PROTOTYP EINES PARALLELEN, INTERAKTIVEN RECHENKERNS ZUR
HYGRO-THERMISCHEN GEBÄUDESIMULATION AUF BASIS
DER LATTICE-BOLTZMANN METHODE**

Bjørn Nachtwey, Jonas Tölke, Manfred Krafczyk
Institut für Computeranwendungen im Bauingenieurwesen (CAB), TU Braunschweig,
Germany
b.nachtwey@tu-bs.de

KURZFASSUNG

Wir beschreiben die Entwicklung eines Prototyps zur hydrothermischen Gebäudesimulation zur Klimaoptimierung von Büroräumen auf Basis der Lattice Boltzmann Methode (LBM). Neben der Implementierung mit dem LB-Ansatz liegt ein wesentliches Augenmerk auf der Kopplung der verschiedenen physikalischen Einflussgrößen (Luftströmung, Temperatur und Feuchte) und der interaktiven Einflussnahme auf den Rechenverlauf, welche durch Steueralgorithmen für die klimatischen Kennwerte oder durch die Veränderung der Anordnung der Haustechnik durch den Benutzer erfolgt. Die Implementierung der Geometriemodellierung und Parametrisierung der Randbedingungen über eine Schnittstelle zu externen Modulen erlaubt eine einfache Handhabung ohne Eingriffe in den Quellcode und die Verwendung von unterschiedlichen Modellierwerkzeugen. Aufgrund der hohen physikalischen Komplexität und des daraus folgenden hohen Rechenaufwandes ist der Rechenkern mit MPI parallelisiert, um akzeptable Antwortzeiten zu erhalten.

Den Abschluss bilden aktuelle Ergebnisse und ein Ausblick auf Weiterentwicklungen.

ABSTRACT

We describe the development of a prototype for hydro-thermal building simulation based on the Lattice Boltzmann Method (LBM) with focus on the optimization of air-conditioning of open-plan offices. Besides the implementation using the LBM approach, the focus of this work is the coupling of the different physical parameters (air flow, temperature and humidity) and the online-interaction with the kernel by either controlling algorithms for the climatic parameters or by design changes done by the user of the prototype. The implementation of the modeller and the control circuits by an interface to external modules allows simple use without changes of the source code and interoperation with a large number of modelling tools. Because of the complexity and consequentially the huge computing effort we couple with a parallel kernel.

Actual results will be show and an outlook for the next improvements will be given.

EINLEITUNG

Die Komplexität und Aussagekraft von Gebäudesimulationen, insbesondere von HVAC-Systemen entwickelt sich stetig fort und es werden immer mehr physikalische Teilprobleme berücksichtigt, was zu komplexeren und damit aufwändigeren Simulationen führt. Dieser Entwicklung trägt der hier vorgestellte parallele Prototyp Rechnung. Neben der Luftströmung werden die Temperatursausbreitung und die Verteilung der Luftfeuchte simuliert und dabei jeweils ein Ansatz auf Basis der LBM verwendet.

Physikalische Grundlagen und Implementierung

Die Luftströmung wird auf einem uniformen Finite-Differenzen-Gitter mit der Lattice-Boltzmann-Methode simuliert. Diese baut auf die Boltzmann-Gleichung auf, die die Dynamik von Aufenthaltswahrscheinlichkeiten von Teilchen beschreibt. In [Frisch et al. 1987] wurde basierend auf den Lattice-Gas Gleichungen gezeigt, dass hierzu eine Reduktion der Bewegungsfreiheitsgrade auf wenige Gitterrichtungen ausreicht um die Navier-Stokes Gleichung mit Konvergenzrate zweiter Ordnung zu approximieren. Die klassische Lattice-Boltzmann Methode mit einer Kollisionszeit (Single-Relaxation-Time, STR) wurde in [Qian et al., 1992] vorgestellt. Für die Anwendung bei schwach kompressiblen Fluiden und kleinen Machzahlen stellt die Lattice-Boltzmann-Methode einen sehr effizienten [Geller et al., 2005], gut skalierenden und leicht zu parallelisierenden Löser dar. Der in diesem Dokument beschriebene Rechenkern nutzt einen D3Q19-Stern (3 Raumdimensionen, 19 Verteilungsrichtungen), eine Modifikation [Tölke, 2005] des Multi-Relaxation-Time-(MRT) Ansatzes [D'Humieres 1992, Lallemand et al., 2000, D'Humieres et al. 2003] und ist mit MPI-1 parallelisiert.

Die Temperaturgleichung wird mit einem Boltzmann-Ansatz für Advektions-Diffusionsgleichungen mit einem D3Q7 Modell

diskretisiert [Ginzburg 2005], wobei die gleiche räumliche und zeitliche Auflösung wie bei der Strömung verwendet wird. Innerhalb der Struktur erfolgt eine rein diffusive Berechnung auf einem klassischen Finite-Differenzen Gitter mit gleicher Raumauflösung.

Die Simulation der Feuchte erfolgt auf Basis des 2. Fickschen Gesetzes mit einem Finite-Differenzen-Ansatz und nutzt die gleiche reduzierte Raumdiskretisierung wie die Temperatur in der Struktur, die Zeitdiskretisierung entspricht der Strömungs- und Temperaturrechnung. Auf eine Mehrphasen-Implementierung wurde verzichtet, da der Massenanteil der Feuchte an der Raumluft im Promille-Bereich liegt.

Koppelung der Modelle

Die Kopplung der makroskopischen Größen ist nachfolgend beschrieben. Die Berücksichtigung der Strömung findet bei Temperatur und Feuchte durch die konvektiven Anteile der Transportgleichung statt. Die Rückkoppelung der Strömung an die Temperatur erfolgt durch eine Veränderung der lokalen Schallgeschwindigkeit in den entsprechenden Termen der Kollision [Tölke, 2005]. Außerdem wird über das Gasgesetz die Druckrandbedingung modifiziert. Das Feuchtemodell bestimmt den Diffusionskoeffizienten jeweils lokal durch Auswertung des Druck- und Temperaturquotienten [Lutz, 2002, Seite 355f], eine inverse Koppelung der Strömung und Temperatur an die Feuchte findet noch nicht statt.

Interaktive Einflussnahme

Klimaaoptimierung findet im Spannungsfeld zwischen Behaglichkeitsmaßzahl, die über den Predicted Mean Vote (PMV) als einzelner Skalar bestimmt werden kann [ISO 7730:2005], den Einstellungen und Kennlinien der Klimatisierungsgeräte sowie deren Anordnung im Raum statt.

Die klassischen Simulationsansätze bilden einen iterativen Prozess aus Modellierung, Gittergenerierung, Simulation und Optimierung, wobei letztere den Prozess neu startet. Auch kleine Änderungen in der Geometrie oder den Randbedingungen erfordern den Neustart und damit in der Regel das zeitaufwändige Auskonvergieren der stationären Zustände. Außerdem sind die Randbedingungen, also die Algorithmen der HVAC-Steuerung, im Quellcode zu implementieren oder über eine dynamische Liste mit parametrisierten Kennlinien zu realisieren. Beide Ansätze können die Vielfalt der existierenden Geräte nicht abbilden und erlauben daher nur eine Anwendung auf eine beschränkte Anzahl von Situationen.

Der hier beschriebene Rechenkern bildet den Prozess vollständig ab, da das Modell in einem externen

CAD-Programm erstellt wird, und dieses die Modelldaten automatisch dem Rechenkern übergibt. Dieser generiert selbstständig oder nach Benutzervorgabe ein geeignetes Berechnungsgitter und stellt die Feld-Ergebnisse über einen Datenstrom zur Verfügung. Änderungen im CAD-Modell werden interaktiv dem Rechenkern übermittelt und modifizieren das geometrische Modell der Simulation ohne einen Neustart auszulösen, so dass die jeweils aktuellen Simulationsergebnisse die Anfangsbedingung für die Rechnung mit der veränderten Geometrie darstellt. Eine weitere Schnittstelle stellt punktuelle und integrale Messwerte als Datenstrom bereit, so dass Simulationsprogramme von Klimageräten diese auslesen und auswerten können. Werden diese an den Modellierer weitergegeben, so können über diesen analog zum echten Regelkreis in der Klimatechnik die Parameter der Randbedingungen gesteuert werden. Eine Offenlegung der Algorithmen durch die Industrie ist nicht nötig.

Der IFC-Produktmodell-Standard beinhaltet keine Objekteigenschaften, wie sie zur hygrothermischen notwendig sind, ebenso existiert keine standardisierte Beschreibung für Schnittstellen und dazugehöriger Protokolle für eine interaktive Simulation. Daher verfügen handelsübliche CAD-Programme a priori nicht über die notwendige Funktionalität, so dass das Produktmodell IFC-konform erweitert werden muss und diverse Protokolle zur Interaktion eingeführt werden müssen. Die Umsetzung erfolgt über die vorhandenen Programmierschnittstellen. Beispielhaft ist beides im Rahmen der Entwicklung des Rechenkerns für AutoDesk AutoCAD durchgeführt worden [Fahrig, 2005].

Validierung und Anwendungsbeispiel

Die Validierung der Temperatur- und Feuchte-Simulation erfolgt anhand generischer Beispiele.

Die Simulation der Temperatur- und Feuchteverteilung in einem Passagierraum eines Verkehrsflugzeuges zeigt das Potential der gekoppelten Modelle zur Optimierung des „Trockene Luft-Problems“.

Zusammenfassung und Ausblick

Der vorgestellte Prototyp erlaubt eine für den Nutzer einfach handhabbare hygrothermische Simulation von geschlossenen Räumen mit interaktiver Einflussnahme zur Auslegung der Klimaanlage.

Für eine umfassende Beschreibung der Mikroklimatisierung von geschlossenen Räumen muss das Feuchte-Modell noch um Kondensation und Evaporation erweitert werden. Die Ansätze für Strömungs- und Temperaturrechnung sind um Terme zur Berücksichtigung der Feuchte zu erweitern um die beidseitige Koppelung der Modelle zu erreichen.

Da die Temperaturverteilung und -ausbreitung stark von der Wärmestrahlung beeinflusst wird, soll ein Modell zur Strahlungsausbreitung integriert werden.

LITERATUR

Bejan, A., 1995: Convective Heat Transfer, Book, John Wiley & Sons Inc., ISBN 0-471-57972-6.

ISO 7730:2005, DIN, 2005 Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit (ISO 7730:2005); Deutsche Fassung EN ISO 7730:2005

D'Humieres, D., 1992: Rarefied Gas Dynamics: Theory and Simulations, Prog. Astronaut. Aeronaut. 159, edited by B. D. Shizgal and D. P. Weaver, AIAA, Washington, D.C.

D'Humieres, D., Ginzburg, I., Krafczyk, M., Lallemand, P. and Luo, L.-S., 2002. Multiple-relaxation-time lattice Boltzmann models in three dimensions, Phil. Trans. R. Soc. Lond. A, Volume 360, pages 437 – 451.

Fahrig, T., Krafczyk, M. and Tölke, J., 2005: Agent-based Measuring, Control and Regulation Techniques for HVAC-Systems Simulations, Konferenzbeitrag zur Building Simulation 2005 Conference (Montreal / Canada).

Frisch, U. et al., 1987: Lattice Gas Hydrodynamics in Two and Three Dimensions, Complex Systems 1: 649-707.

Geller, S., Krafczyk, M., Tölke, J., Turek, S. and Hron, J., 2005. Benchmark computations based on Lattice-Boltzmann, Finite Element und Finite Volume Methods for laminar flows, Computers and Fluids, in press.

Ginzburg, I., 2005: Equilibrium-type and Link-type Lattice Boltzmann models for generic advection and anisotropic-dispersion equation, Advances in Water Resour., 28:1171--1195.

Krafczyk, M., 2001. Gitter-Boltzmann-Methoden: Von der Theorie zur Anwendung, Habilitation, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der TU München.

Lallemand, P. and Luo, L.-S., 2000: Theory of the lattice Boltzmann method: dispersion, dissipation, isotropy, Galilean invariance and stability, Physical Review E, Volume 61, pages 6811 – 6817.

Lallemand, P. and Luo, L.-S., 2003: Theory of the lattice Boltzmann method: Acoustic and thermal properties in two and three dimensions, Physical Review E, Volume 68, pages 036706-1 – 25.

Lutz, Jenisch, Klopfer, Freymuth, Krampf und Petzold, 2002, Lehrbuch der Bauphysik, 5. Auflage, B.G. Teubner.

Qian, Y.H., d'Humieres, D. and Lallemand, P., 1992: Lattice BGK models for Navier-Stokes equation. Europhys. Lett, vol. 17: p. 479.

Tölke, J., 2005: A thermal model based on the lattice Boltzmann method for low Mach number compressible flows, accepted for publication in Journal of Computational and Theoretical Nanoscience.

Van Treeck, Ch., Rank, E., Krafczyk, M., Tölke, J. and Nachtwey, B. Extension of a hybrid thermal LBE scheme for Large-Eddy simulations of turbulent convective flows, Computers and Fluids, in press.