

Ein integrierter Ansatz zur interaktiven dreidimensionalen Simulation gekoppelter thermischer Prozesse

Von der Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig
zur Erlangung des Grades
eines Doktoringenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von

Sebastian Bindick

aus Mettingen

Eingereicht am	28. Oktober 2010
Disputation am	16. Dezember 2010

Berichterstatter	Prof. Dr.-Ing. habil. Manfred Krafczyk Prof. Dr.-Ing. Markus König
------------------	---

Braunschweig 2011

Berichte aus der Bauinformatik

Sebastian Bindick

Ein integrierter Ansatz zur interaktiven dreidimensionalen Simulation gekoppelter thermischer Prozesse

Shaker Verlag
Aachen 2011

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2010

Copyright Shaker Verlag 2011

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-9856-2

ISSN 1612-6262

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Arbeit ist im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für rechnergestützte Modellierung im Bauingenieurwesen der Technischen Universität Braunschweig, sowie während meines Forschungsaufenthalts am Calit2 der University of California in San Diego, entstanden.

Mein ganz besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. habil. M. Krafczyk, der mir mit seiner Anregung zu dieser Arbeit ein weites Betätigungsfeld eröffnete, das mir großen Freiraum für meinen Forschungsdrang ließ, mich gleichzeitig aber auch immer wieder zwang, mich auf das Wesentliche zu beschränken. Für den Einsatz als zweiter Berichterstatter danke ich Prof. Dr.-Ing. M. König. Ihm sowie Prof. Dr.-Ing. D. Dinkler und Prof. Dr.-Ing. D. Hosser danke ich für die freundliche Bereitschaft, die Aufgabe als Prüfer und den Vorsitz der Prüfungskommission zu übernehmen.

Danken möchte ich auch Prof. Dr. F. Küster für die Möglichkeit ein Forschungssemester bei ihm am Calit2 in San Diego zu verbringen, sowie dem DAAD für die finanzielle Förderung dieses Aufenthalts.

Die Unterstützung aller Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen des Instituts für rechnergestützte Modellierung im Bauingenieurwesen war besonders wertvoll während der Erstellung der vorliegenden Arbeit. Ein besonderer Dank geht an meine Kollegen Christian Janßen und Maik Stiebler, die mir bei kleinen und größeren numerischen Problemstellungen zur Seite gestanden haben. Ein gleichzeitiger Dank geht auch an meinen Kollegen Jan Linxweiler für die vielen fruchtbaren Diskussionen zu Themen der Softwareentwicklung und seine Unterstützung bei der GPU-Programmierung.

Nicht zuletzt danke ich meinen Eltern, die mir mein Studium ermöglicht und mir beim Erreichen meiner Ziele immer Rückhalt gegeben haben.

Ganz speziell gilt mein Dank meiner Freundin Saskia. Sie hat unzählige Korrekturen durchgeführt und mir als wichtige Gesprächspartnerin gedient. Während der Zeit hat sie in besonderem Maße Verständnis und Geduld aufgebracht und mich in schwierigen Phasen immer wieder neu motiviert.

Braunschweig, Oktober 2010

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit werden neuartige Ansätze zur interaktiven Simulation thermischer Transportprozesse vorgestellt, wie sie für Ingenieur Anwendungen insbesondere im Bauingenieurwesen typisch sind. Besonderer Fokus wird hierbei auf die Strahlungs-Struktur-Wechselwirkung gelegt, die für viele bauphysikalische Fragestellungen von großer Bedeutung ist.

Zur Lösung des Wärmestrahlungsproblems wird ein numerischer Ansatz basierend auf der hierarchischen Radiosity-Methode entwickelt, die den Strahlungsaustausch zwischen diffusen Oberflächen in einer abgeschlossenen Umgebung simuliert. Durch die Verwendung von optimierten Kd-Bäumen zur Speicherung der an der Strahlung beteiligten Objekte und der Verwendung eines adaptiven hierarchischen Ansatzes zur Berechnung des Strahlungsaustausches wird deren Komplexität deutlich reduziert. Die Strahlungssimulation ist direkt an die Berechnung der Wärmeleitung in der Struktur gekoppelt. Hierbei wird der Energietransport in wärmeleitenden Materialien für instationäre Temperaturfelder mit einem Finite-Differenzen-Verfahren (FDM) berechnet. Dieses wird aufgrund seiner besonderen Struktur effizient zur parallelen Berechnung auf Grafikkarten (GPUs) implementiert, um die typische Laufzeit um mehr als eine Größenordnung zu reduzieren.

Neben den modernen numerischen Ansätzen zur Lösung des physikalischen Problems werden auch Methoden des Computational Steering angewendet, die eine direkte Interaktion mit dem Simulationssystem zur Laufzeit (d.h. ohne die laufende Simulation zu unterbrechen) erlauben. Hierbei können innerhalb eines CAD-basierten virtuellen Entwurfsraumes komplexe Problemstellungen nicht nur transient simuliert werden, vielmehr es ist es möglich, das Systemverhalten interaktiv zu optimieren. Die Konstruktion des Gebäudemodells, sowie die Vorgabe von zusätzlichen bauteilspezifischen Parametern, wie Randbedingungen und Materialkennwerte, werden über das CAD-Werkzeug vorgegeben und können ebenfalls interaktiv verändert wer-

den. Die Visualisierung der in jedem Zeitschritt anfallenden Simulationsergebnisse erfolgt verteilt innerhalb einer Tiled-Display-Umgebung bestehend aus vielen zusammengeschalteten Bildschirmen, die von einem Rendercluster angesteuert werden. Dieser verteilte Renderansatz erlaubt eine schnelle Ausgabe und Manipulation großer Datenmengen und stellt eine ideale Plattform für kooperative Planungsprozesse dar.

Der vorgestellte Prototyp wurde an Systemen, zu denen eine analytische Lösung existiert, validiert. Hierbei konnte gezeigt werden, dass die implementierten numerischen Verfahren für die Ankopplung der Strahlung an die Temperaturdynamik der Struktur asymptotisch die korrekte Lösung liefern. Außerdem zeigen mehrere bauphysikalische Anwendungsbeispiele mögliche Einsatzgebiete.

Abstract

In this thesis new approaches for interactive thermal simulations are presented which are applicable to several fields in civil engineering. For many problems in building physics heat transfer processes usually involve radiative heat transfer and heat conduction. For this reason the main focus of this work lies on the interaction of radiation and structure. To solve the complex radiative exchange between gray, diffuse surfaces in 3d domains an approach based on the hierarchical radiosity method is presented. The radiosity method is accelerated by using space partitioning techniques based on optimized kd-trees and an adaptive subdivision scheme of the surfaces. This approach decreases the complexity of the radiation problem considerably. The coupled transport of energy in heat conducting materials for transient temperature fields is calculated by a finite difference method. Since this approach requires substantial CPU time and memory, a GPU parallelization of the 3D finite difference scheme is implemented which accelerates the computational speed by more than one order of magnitude.

Furthermore computational steering techniques are applied, providing mechanisms for integrating modeling, simulation, data analysis, visualization and post-processing in a single environment including an interactive analyzation of the simulation results. Here a virtual interactive design space based on a CAD software is developed. Within such a system the user can interactively modify the geometry, boundary conditions and other parameters of the running simulation and explores the results immediately. For the large amounts of data processed during simulation paired with the requirement for immediate-mode and interactive visualization, a cluster-oriented rendering approach is presented. Here the simulation results are visualized on a tiled display system scaling to hundreds of mega pixels in resolution. This approach allows a group of planners and engineers to collaboratively optimize buildings at run-time with instantaneous updates to the simulation and visualization in a digital workspace.

In several validations it is shown that the presented software-prototype achieves high accuracy with only small deviations between analytical reference solutions and the simulation results. Finally some sample applications show the capability of this approach for complex scenarios in civil engineering.

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	xi
Abkürzungsverzeichnis	xiii
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Gliederung der Arbeit	2
2 Grundlagen der Wärmeübertragung	5
2.1 Begriffe, Größen, Transportgesetze	5
2.2 Wärmestrahlung	7
2.2.1 Strahlungsphysikalische Größen	9
2.2.2 Emission von Strahlung	13
2.2.3 Strahlungsaustausch	15
2.2.4 Strahlungseigenschaften realer Körper	19
2.3 Wärmeleitung	23
2.3.1 Das Fouriersche Gesetz der Wärmeleitung	23
2.3.2 Die Fouriersche Differentialgleichung für das Temperaturfeld	24
2.3.3 Zeitliche und örtliche Randbedingungen	27
2.3.4 Lösungsmethoden der Wärmeleitungsgleichung	31
3 Eine hierarchische Datenstruktur für Gebäudemodelle	33
3.1 Gebäudedatenmodellierung	35
3.1.1 Das IFC-Bauwerksmodell	36
3.2 Aufbau der entwickelten Datenstruktur auf Basis des IFC	41
3.3 Kd-Bäume zur Speicherung von Oberflächennetzen	44
3.3.1 Heuristische Verfahren zur Optimierung von Kd-Bäumen	46
3.3.2 Konstruktion von Kd-Bäumen	48

3.3.3	Effiziente Traversierung	53
3.3.4	Schnittpunkttest	55
3.3.5	Benchmark des Kd-Baums	58
3.4	Gittergenerierung	60
3.4.1	Punkt-in-Polyeder-Test	61
3.4.2	Füllalgorithmus	63
4	Simulation thermischer Transportvorgänge	65
4.1	Simulation thermischer Strahlung mit der Radiosity-Methode	66
4.1.1	Die klassische Radiosity-Methode	67
4.1.2	Berechnung der Formfaktoren	70
4.1.3	Die hierarchische Radiosity-Methode	76
4.2	Simulation der Wärmeleitung mit Finite-Differenzen	81
4.2.1	Der FDM-Ansatz	81
4.2.2	Diskretisierung der Randbedingungen	83
4.2.3	Kopplung von Bauteilen	85
4.2.4	Verteilte Berechnung auf Grafikkarten mit CUDA	91
5	Eine interaktive Simulationsumgebung	97
5.1	Computational Steering	99
5.2	Ein virtueller Entwurfsraum auf Basis von AutoCAD	101
5.2.1	Allgemeines zu AutoCAD Architecture	102
5.2.2	Die Programmierschnittstellen von AutoCAD	104
5.2.3	Entwickelte Funktionen des Konstruktionsraums	107
5.3	Verteilte Visualisierung auf Tiled-Display-Systemen	112
5.3.1	Die CGLX Architektur	113
5.3.2	Anbindung des Simulationsframeworks an CGLX	115
5.3.3	Benchmark der verteilten Simulationsumgebung	117
6	Validierung und Anwendungen	119
6.1	Validierung	119
6.1.1	Strahlung zwischen rechteckigen Platten	119
6.1.2	Strahlung zwischen Zylinder und Platte	122

6.1.3	Strahlung zwischen Kugel und differentiell ebenelement	125
6.1.4	Wärmeleitung in mehrschichtigen Bauteilen	126
6.1.5	Kopplung Strahlung und Wärmeleitung	129
6.2	Anwendungsbeispiele	130
6.2.1	Thermische Komfort-Simulation in einem Großraumbüro	130
6.2.2	Sonnenstrahlung auf ein Stadtmodell	131
6.2.3	Sonneneinstrahlung auf einen offenporigen Asphalt	132
6.2.4	Temperaturverteilung an einem Wohnhaus	133
6.2.5	Thermische Untersuchung einer Doppelfassade	137
7	Zusammenfassung und Ausblick	139
7.1	Zusammenfassung	139
7.2	Ausblick	140
	Literaturverzeichnis	143

Symbolverzeichnis

Größe	Einheit	Bedeutung
a	m^2/s	Temperaturleitfähigkeit
α	–	Absorptionsgrad
α_{WF}	$W/(m^2K)$	Wärmeübergangskoeffizient
B	W/m^2	ausgehende Strahlungsstromdichte (Radiosity)
β	°	Zenitwinkel
c_0	m/s	Lichtgeschwindigkeit
c	$kJ/(KgK)$	Spezifische Wärmekapazität
$d\omega$	–	Raumwinkel
Δt	–	Zeitschrittweite
$\Delta x, \Delta y, \Delta z$	–	Gitterabstand in die jeweilige Richtung
E	W/m^2	Eigenstrahlung
ϵ	–	Emissionsgrad
F_{ij}	–	Formfaktor, Sichtfaktor
h	$J \cdot s$	Planckkonstante
k	J/K	Boltzmannkonstante
L	W/m^2	Strahldichte
Λ	μm	Wellenlänge
λ	$W/(Km)$	Wärmeleitfähigkeit
$M(\Lambda, T)$	W	Spektrale spezifische Ausstrahlung
$M(T)$	W	Spezifische Ausstrahlung
ϕ	°	Azimutwinkel
Φ	W/m^2	Strahlungsfluss
ϱ	kg/m^3	Dichte
ρ	–	Reflexionsgrad
σ	$W/(m^2 K^4)$	Stefan-Boltzmann-Konstante
t	s	Zeit
T	$^{\circ}C, ^{\circ}K$	Temperatur
τ	–	Transmissionsgrad
$\dot{q}$	W/m^2	Wärmestromdichte, Wärmeflussdichte
$\dot{Q}$	W	Wärmestrom
$\dot{W}$	W/m^2	Leistungsdichte

Abkürzungsverzeichnis

AABB	Axis-Aligned Bounding Boxes
AEC	Architecture, Engineering und Construction
API	Application Programming Interface
ARX	AutoCAD Runtime Extension
ATC	Automatic Termination Criterion
BIM	Building Information Modeling
B-REP	Boundary Representation
BSP	Binary Space Partitioning
BVH	Bounding-Volume-Hierarchien
CAD	Computer Aided Design
CGLX	Cross-platform cluster Graphic Library
CPU	Central Processing Unit
CUDA	Compute Unified Device Architecture
DIN	Deutsche Industrie-Norm
FDM	Finite-Differenzen-Methode
FEM	Finite-Elemente-Methode
GPGPU	General Purpose Computation on Graphics Processing Unit
GPU	Graphics Processing Unit
IFC	Industry Foundation Classes
ISO	International Organization for Standardization
LBM	Lattice-Boltzmann-Methode
OB	Oriented Bounding Box
OMF	Object Modeling Framework
RAM	Random-Access-Memory
SAH	Surface Area Heuristic
SIMD	Single Instruction Multiple Data
SM	Streaming Multiprozessor
SP	Streaming Prozessor
STEP	Standard for the Exchange of Product model data
UML	Unified Modeling Language
XML	Extensible Markup Language
