

BERECHNUNG DER WÄRMESTRAHLUNGS-AUSBREITUNG FÜR DIE THERMISCHE KOMFORTANALYSE IN INNENRÄUMEN

Martin Egger¹, Michael Pfaffinger¹, Christoph van Treeck¹, und Ernst Rank¹

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

KURZFASSUNG

Auf den Klimakomfort in Innenräumen haben Luftkonvektion und Wärmestrahlung gleichermaßen einen großen Einfluss. Deshalb ist neben einer Simulation der Luftströmungen und –turbulenzen auch eine detaillierte Betrachtung der Wärmestrahlungsausbreitung und deren gegenseitige Einflussnahme notwendig. Im Forschungsprojekt COMFSIM (van Treeck et al., 2007) werden diese Simulationsverfahren in eine echtzeitfähige, interaktive 3D-Simulationsumgebung (Computational Steering Environment, CSE) (Wenisch, 2008) integriert und mit einem detaillierten Komfortmodell gekoppelt. Mit diesem Beitrag soll ein Überblick über den letzten Stand der Arbeiten zu diesem Teilprojekt in Hinblick auf die Anwendbarkeit und Implementierung der verwendeten numerischen Verfahren und Methoden zur Simulation der Strahlungsausbreitung gegeben und erste Ergebnisse vorgestellt werden.

ABSTRACT

Both air convection and thermal radiation have relevant impact on climate and comfort in indoor environments. In addition to the simulation and the evaluation of air flow and turbulences a detailed examination of the radiative heat exchange and its mutual interdependencies is necessary. In the research project COMFSIM (van Treeck et al., 2007) different simulation and comfort assessment methods will be implemented within an interactive, real time 3D simulation environment (Computational Steering Environment, CSE) (Wenisch, 2008). This contribution will provide an overview over the current work, i.e. the implementation of numerical methods for the simulation of the thermal radiation into the CSE by presenting first results of such simulations.

EINLEITUNG

Für die Berechnung des Klimakomforts in Innenräumen wird die am Lehrstuhl für Computation in Engineering entwickelte 3D-Strömungssimulationsumgebung (CSE) um Methoden zur Berechnung von Konvektion und der Wärmestrahlungsausbreitung erweitert und mit dem thermoregulatorischen Menschmodell von Fiala (Fiala, 1998) und einem Modell zur

Behaglichkeitsbewertung gekoppelt (Treeck et al., 2008). Diese Berechnungen sind größtenteils sehr aufwendig. Für eine echtzeitfähige und interaktive Anwendung müssen zum einen geeignete Methoden verwendet werden, die den Berechnungsaufwand effektiv reduzieren bzw. sich an die Lösung iterativ annähern, zum anderen muss die Software modularisiert und parallelisiert werden. Die Visualisierung des Simulationsmodells findet über eine Virtual Reality (VR) Umgebung statt, über die der Anwender interaktiv Einfluss auf eine laufende Simulation und deren Randbedingungen nehmen kann. Die Berechnung selbst findet unter Verwendung von Techniken des wissenschaftlichen Höchstleistungsrechnens auf einem leistungsfähigen Rechensystem statt und ermöglicht die unmittelbare Auswertung der Simulation mit der Visualisierung der Ergebnisse in VR.

Durch die Verwendung von iterativen Lösungsmethoden können nach jedem Iterationsschritt erste Zwischenergebnisse an die VR geliefert werden, während durch die Aufteilung in Softwaremodule die einzelnen Berechnungsverfahren unabhängig voneinander weiterarbeiten können.

Für die strömungsmechanischen Berechnungen findet das Lattice Boltzmann Verfahren (Treeck et al., 2006) Anwendung. Die verwendeten Methoden zur Berechnung und Auswertung der Strahlungsausbreitung werden im folgenden Kapitel behandelt.

BERECHNUNG DER WÄRMESTRAHLUNGS-AUSBREITUNG

Da sich die Eigenschaften für Absorption, Emission und Reflexion von realen Oberflächen für unterschiedliche Wellenlängenbereiche stark unterscheiden (Modest, 2003), ist eine einheitliche Betrachtung von Wärmestrahlung mit den zur Verfügung stehenden Berechnungsverfahren nicht möglich. Deshalb ist eine Unterteilung des zu betrachtenden Spektrums in ein kurz- (Ultraviolettes und sichtbares Licht, von 0,1 bis 0,7 μm) und ein langwelliges Strahlungsband (Infrarotstrahlung, von 0,7 bis 100 μm) erforderlich.

Für die numerische Berechnung der Strahlungsausbreitung wird ein Facettenmodell des zu untersuchenden Raumes und allen enthaltenen Gegenständen verwendet. Die einzelnen Oberflächen des Modells

werden um Informationen zu den Materialeigenschaften (Reflexions-, Absorptionsgrad, Eigenstrahlungsanteil bzw. Oberflächentemperatur) erweitert. Für den Datentransfer wird das STL-Dateiformat verwendet, das um Kommentare mit den problemspezifischen Attributen zu jedem 3D-Körper erweitert wurde. In einem entwickelten Softwareprototyp für die Berechnung der Wärmestrahlung können diese Daten eingelesen und für die Berechnung aufbereitet werden.

Langwellige Strahlungsausbreitung

Körper emittieren abhängig von ihrer Temperatur Wärmestrahlung. Dies geschieht bis zu einer Körpertemperatur von ca. 830°C ausschließlich im langwelligen Strahlungsbereich und diffus (Modest, 2003). Zur Berechnung von Wärmestrahlung in diesem Bereich wird für das Projekt eine Kombination aus dem Gathering und Shooting Radiosity-Verfahren (Shao et al., 1993; Bekaert, 1999) verwendet.

Hierbei werden in jedem Iterationsschritt folgende Schritte wiederholt: Wähle die Facette mit dem größten reflektierten bzw. eigenen Strahlungsanteil. Berechne von allen anderen Facetten zu dieser die eintreffende Strahlungsenergie (gathering) und anschließend die Energie, die dieser Facette auf alle anderen Facetten abgibt (shooting). (Aufgrund der Reziprozität des jeweiligen Formfaktors muss dieser für jedes Facettenpaar im Berechnungsschritt nur einmal bestimmt werden.) Hierbei ist nach jedem Iterationsschritt eine Näherungslösung des Gesamtproblems gegeben und eine Visualisierung von Teilergebnissen in der Komfortsimulation möglich. Mit der Verwendung von Clustering Methoden, einer hierarchischen Unterteilung der Geometrie und der Gauß-Integration bei der Flächenbestimmung (Walton, 2002) kann der Aufwand für die Sichtbarkeits- und Formfaktorbestimmung auf ein für eine CSE-Anwendung notwendiges Maß weiter reduziert werden.

Kurzwellige Strahlungsausbreitung

Für die Berechnung der kurzwelligen Strahlungsausbreitung wird die Forward Raytracing-Methode (Akenine-Möller et al., 2002) verwendet, vereinfacht auf gerichtete Primärstrahlen mit nicht transparenten Körpern. Die von einem Körper absorbierte Energie wird hierbei hauptsächlich im langwelligen Strahlungsbereich diffus an die Umgebung abgegeben. Aufgrund des zu erwartenden geringen Restenergiebetrags von mehrfach reflektierter kurzwelliger Strahlung kann dieser näherungsweise als anteiliger Energieaufschlag auf alle sichtbaren Oberflächen gleichmäßig verteilt und bei der Berechnung der diffusen Strahlungsausbreitung mit angesetzt werden. Um eine möglichst reale Strahlungsverteilung (globale Ausleuchtung) im Modell zu erhalten, sind bei der Forward Raytracing-Methode sehr viele Strahlen von den Strahlungsquellen auszusenden und zu verfolgen. Da hierfür der Rechenaufwand sehr groß ist, müssen die Anzahl der Strahlen und die Komplexität der Szene

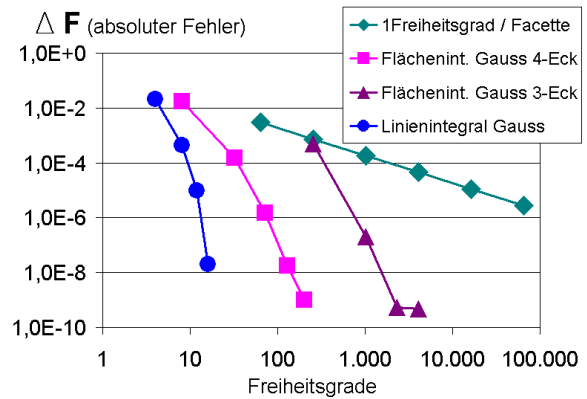


Abbildung 1: Vergleich unterschiedlicher Ansätze zur Formfaktorbestimmung am Beispiel zweier ebener, paralleler Rechtecke.

erheblich reduziert werden. Ansätze hierfür sind die Bildung von Strahlenbündeln (Fröhlich, 1993) kombiniert mit stochastischen Annahmen zur Strahlungsverteilung und die Unterteilung des Systems mittels Hüllkörper bzw. Hierarchien (Jacob, 1995). Da die Berechnung für jedes Strahlenbündel unabhängig voneinander abläuft, kann dieser Aufwand sehr gut parallelisiert und hinsichtlich des Computational Steering-Konzepts beschleunigt werden.

ERGEBNISSE

Neben der Erstellung von einfachen Benchmarks und der Aufbereitung der Geometrie wurden verschiedene Verfahren zur Berechnung der langwelligen Strahlungsausbreitung mit der Radiosity-Methode implementiert und miteinander verglichen. Das Hauptaugenmerk lag dabei auf der effizienten Berechnung der Formfaktoren (FF), vorerst ohne Sichtbarkeitsentscheid.

Abbildung 1 zeigt die Ergebnisse von verschiedenen Ansätzen zur FF-Bestimmung am Beispiel zweier ebener, paralleler Rechteckflächen. Gezeigt wird die Differenz von analytisch zu numerisch ermittelten Formfaktor (absoluter Fehler ΔF) über die Anzahl der Freiheitsgrade im doppellogarithmischen Maßstab. Die Methode mit einem Freiheitsgrad pro Facette berechnet den Faktor über den *Mittelpunkt* einer Facette. Eine Steigerung der Genauigkeit erreicht man dabei nur mit einer feineren Unterteilung der Flächen. Die Verwendung der *Gauß-Quadratur* für die Berechnung der FF mittels Linien- und Flächenintegral zeigte in Bezug auf den absoluten Fehler und die Rechenzeit ein schnelleres Konvergenzverhalten. Bei einer geringeren Anzahl an Gesamtfreiheitsgraden können die FF hinreichend genau und schnell bestimmt werden. Dabei ist es unerheblich, wie homogen das Modell hinsichtlich Facettengröße unterteilt ist. Die Gauß-Quadratur berechnet das Flächenintegral mithilfe von gewichteten Stützstellen, die über die Facette nichtuniform verteilt liegen. Eine

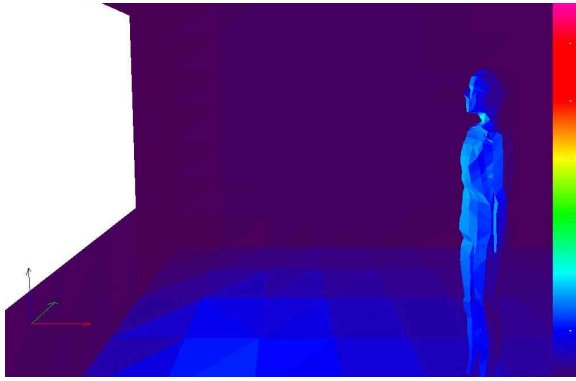


Abbildung 2: Benchmark mit Dummy (1537 Facetten) in Raum (736 Facetten) vor Fenster (diffuse Strahlungsquelle mit konst. Strahldichte, 128 Facetten). Lösung mit Radiosity-Methode im Softwareprototyp.

größere Genauigkeit erhält man hier auch über eine Erhöhung der Stützstellenanzahl.

Voraussetzung für die Verwendung der Gauß-Quadratur ist das Vorhandensein eines entsprechend aufbereiteten Modells, da mit steigender Anzahl an Facetten der Aufwand bei der Gauß-Integration zu- und die Zeit- und Rechenerparnis abnehmen. Bei sehr fein aufgelösten Szenen müssen mittels Patching- und Clustering-Methoden Regionen von benachbarten Facetten mit ähnlichen Eigenschaften gebildet werden, um die Gesamtzahl der Freiheitsgrade zu reduzieren. Damit können in Hinblick auf die CSE-Anwendung parallel zur iterativen Berechnung der Strömungssimulation möglichst schnell erste Ergebnisse ermittelt und ausgetauscht werden. Ziel ist parallel dazu Strahlungsberechnungen mit unterschiedlichen Auflösungsgraden zu starten, die mit zunehmender Simulationszeit sukzessiv genauere Ergebnisse liefern bis vom Anwender die Szene verändert wird und die Berechnung wieder neu gestartet werden muss.

AUSBLICK

Die Arbeiten zum Teilprojekt der Wärmestrahlungsberechnung beschränken sich zurzeit auf die Implementierung der Radiosity-Methode zur Berechnung der langwelligen Strahlungsausbreitung (Abbildung 2). Hierfür sind hinsichtlich der Sichtbarkeitsprüfung mittels Hierarchien und Optimierung noch Restarbeiten durchzuführen. Als nächstes wird für die Sichtbarkeitsprüfung eine Octree-basierte Szenenunterteilung eingeführt, die zugleich auch Grundlage für die Strahlverfolgung bei der Berechnung der kurzwelligen Strahlungsausbreitung mittels Forward Raytracing-Methode dient. Ein ähnliches Octree-basiertes Verfahren wird bereits bei der Diskretisierung des Strömungsgebietes eingesetzt.

Als Ergebnis liefert eine Wärmestrahlungsberechnung über beide Wellenlängenbereiche für jede Fa-

cette die jeweilige Strahlungsenergiedichte (Energie pro Flächeneinheit). Diese Ergebnisse dienen im Weiteren als Randwerte für die Berechnung der Luftkonvektion und für das thermoregulatorische Menschmodell und müssen bei jedem Iterationsschritt mit den parallel laufenden Berechnungsmodulen und an die VR ausgetauscht werden.

LITERATUR

- Akenine-Möller, T. Haines, E. 2002. Real-Time Rendering. B&T. USA.
- Bekaert, P. 1999. Hierarchical and Stochastic Algorithms for Radiosity. PhD thesis. Computer Graphics Research Group. K.U.Leuven.
- Fiala D. 1998. Dyn. Sim. des menschl. Wärmehaushalts und der therm. Behaglichkeit, Diss., De Monfort Univ. Leicester, HFT Stuttgart, Bd 41.
- Fröhlich, B. 1993. Ray Tracing mit Strahlenbündeln. PhD thesis. Technische Univ. Braunschweig.
- Jacob, P. 1995. Raytracing mit BSP-Volumen - Ein globales, phy.-basiertes Beleuchtungsmodell. PhD thesis. Informatik. Uni. Kaiserslautern.
- Modest, M.F. 2003. Radiative Heat Transfer. Academic Press. USA.
- Shao, M., Badler, N. 1993. A Gathering and Shooting Progressive Refinement Radiosity Method. Technical Report. Dep. of Computer and Information Science. Univ. of Pennsylvania. USA.
- 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.
- 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. 2008. Numerische Simulation des thermischen Behaglichkeitsempfindens in Innenräumen. Konferenzbeitrag. Bausim 2008. Kassel.
- Walton, G. N. 2002. Calculation of obstructed view factors by adaptive integration. Technical Report. Building and Fire Research Laboratory. National institute of standards and technology. Gaithersburg. USA.
- Wenisch, P. 2008. Comp. Steering of CFD Simulations on Teraflop Supercomputers, Diss., TUM.