



**Technische Fachhochschule Berlin**  
University of Applied Sciences

Fachbereich II Mathematik - Physik – Chemie

**Masterarbeit**

von

Dipl.-Ing. Ingrid Maus

zur Erlangung

des Grades Master of Computational Engineering

- M. Eng. -

im Studiengang

CE Computational Engineering

Thema:

Numerische Simulation  
der Mensch-Raumklima-Wechselwirkung

Simulation of thermal interaction  
between human being and his environment

Betreuer/in: Prof. Dr.-Ing. Peter Bartsch  
Betreuer/in extern: Dr. rer. nat. A. Spille-Kohoff, CFX Berlin Software GmbH  
Gutachter/in: Prof. Dr. N. Kalus

Eingereicht: Berlin, den 14. April 2008

## Inhaltsverzeichnis

|     |  |     |
|-----|--|-----|
| 1   | Einleitung .....   | 5   |
| 1.1 | Motivation .....   | 5   |
| 1.2 | Ziel der Masterarbeit .....  | 7   |
| 2   | Überblick über den Stand der Technik .....   | 10  |
| 2.1 | Thermophysiologische Grundlagen .....  | 13  |
| 2.2 | ISO Standards .....  | 23  |
| 2.3 | Wärmehaushaltsmodelle .....  | 26  |
| 2.4 | Thermische Behaglichkeit .....   | 32  |
| 2.5 | Mensch-Raumklima-Wechselwirkung .....  | 48  |
| 3   | Wärmehaushaltsmodell von Tanabe .....  | 54  |
| 3.1 | Das Passive System .....   | 54  |
| 3.2 | Das Aktive System .....  | 73  |
| 3.3 | Berücksichtigung der Bekleidung .....  | 86  |
| 3.4 | Programm zur Berechnung des Wärmehaushalts des Menschen .....                                      | 95  |
| 3.5 | Ergebnisse .....   | 104 |
| 3.6 | Vergleich der Modelle Tanabe und Fiala hinsichtlich des Umgangs mit<br>der Thermoregulierung ..... | 112 |
| 4   | Behaglichkeitsberechnungen: PMV und DTS .....  | 126 |
| 4.1 | Behaglichkeitsgleichung .....  | 126 |
| 4.2 | Ergebnisse .....   | 128 |
| 5   | Simulation der Umgebung mit ANSYS CFX .....  | 134 |
| 5.1 | Grundlagen der numerischen Strömungssimulation .....   | 134 |
| 5.2 | Grundlagen der Modellierung mit Hilfe von ANSYS CFX .....  | 139 |
| 5.3 | Geometrie .....  | 140 |
| 5.4 | Vernetzung .....   | 142 |
| 5.5 | Physikalische Modelle und Randbedingungen .....  | 146 |
| 5.6 | One-Way-Kopplung mit dem Wärmehaushaltsmodell .....  | 154 |
| 5.7 | Ergebnisse der Simulation .....  | 156 |
| 5.8 | Dynamische Kopplung mit dem Wärmehaushaltsmodell .....   | 170 |
| 6   | Zusammenfassung und Ausblick .....   | 175 |
| 7   | Literaturverzeichnis .....   | 178 |
| 8   | Anlagen .....  | 186 |

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Zunächst wurde ein Überblick über den Stand der Technik hinsichtlich Behaglichkeitsimulationen und der damit zusammenhängenden Aspekte erarbeitet.

Der Schwerpunkt der Arbeit, die Programmierung des Wärmehaushaltsmodells des Menschen mit dem Tanabe 65-Knotenmodell wurde erfolgreich in Fortran implementiert. Die Thermoregulierung des Tanabemodells wurde anhand des kalibrierten Modells nach Fiala umfangreich untersucht. Zusätzlich wurde das Tanabemodell um die Thermoregulierungsgleichungen und die Zielgrößen zur Thermoregulierung nach Fiala erweitert, um eine Verbesserung des Tanabemodells zu erzielen. Beide Modelle stehen im Programmcode zur Auswahl, doch die Ergebnisse zeigen, dass eine Kombination der Modelle nicht ohne Einschränkungen möglich ist.

Für die Bestimmung der thermischen Behaglichkeit wurde der TS-Index (Thermal Sensation) nach Dusan Fiala implementiert. Dieser wurde anhand der Behaglichkeitsformel nach Fanger verifiziert. Die Ergebnisse lieferten einen zunächst kleineren Behaglichkeitsbereich, als erwartet. Doch um unterschiedliche Szenarien hinsichtlich ihrer Wirkung auf die thermische Behaglichkeit der Nutzer zu simulieren, ist das implementierte Tool ein viel versprechendes Werkzeug.

Ziel der Masterarbeit, die Wirkung des Menschen auf das Raumklima und die Wahrnehmung des Raumklimas durch den Nutzer bezüglich seiner thermischen Behaglichkeit zu simulieren, wurde ebenfalls erfolgreich umgesetzt. Die Lufttemperatur, die Luftfeuchtigkeit sowie die Geschwindigkeit der anströmenden Luft dienten dem Programm als Eingangsbedingungen zur Berechnung des Wärmehaushaltes des Menschen sowie der thermischen Behaglichkeit. Das Wärmehaushaltsmodell des Menschen liefert als Ergebnis die Wärmeflüsse sowie die Verdampfungsrate. Diese wurden in der Umgebungssimulation als Randbedingung auf den Menschen geprägt. Es wurde eine One-Way-Kopplung realisiert.

Das Ziel der Simulation war es, den Unterschied zwischen natürlicher und erzwungener Konvektion jeweils für einen unbedeckten und einen mit 1 clo bedeckten Menschen herauszuarbeiten. Hierfür wurden vier Szenarien untersucht.

Die Fragen zur dynamischen Kopplung konnten in dieser Arbeit nicht abschließend geklärt werden. Zur Lösung dieser noch vorhandenen Problematik wären künftig weitergehende Untersuchungen erforderlich.

Abschließend wird ein Ausblick auf weiterführende Entwicklungen zur Simulation der thermischen Behaglichkeit sowie zu weiteren alternativen Vorgehensweisen und Varianten angerissen.

Beispielsweise sind noch weitere Untersuchungen zur Auswahl der physikalischen Modelle für die Strahlung oder für die Turbulenz erforderlich, welche an geeigneten Validierungsfällen zu verifizieren wären.

In der vorliegenden Betrachtung wurde die Strömung als Mehrkomponentenströmung berechnet. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, über die Mehrstoffströmung hinaus eine Mehrphasenströmung zu simulieren, mit dem Ziel, z.B. den entstandenen Feuchtefilm auf der Hautoberfläche, das Kondenswasser an den Wänden bzw. kalte Oberflächen oder die Nebelbildung im Raum sichtbar zu machen.

Ein weiterer Aspekt an Forschungsbedarf besteht auf dem Gebiet der Behaglichkeitssimulation. Das im Rahmen dieser Masterarbeit vorgestellte Wärmehaushaltsmodell basiert auf einem standardisierten Menschen; die Menschen besitzen jedoch individuelle Merkmale und Eigenschaften.

Einerseits berücksichtigt der standardisierte Mensch möglicherweise nicht die Merkmale des heutigen Durchschnitts hinsichtlich der Körpergröße und des Körperumfangs. Aktuelle Forschungsergebnisse für Deutschland zeigen, dass die Menschen immer größer und kräftiger werden.

Die Verwendung eines Standardmenschen birgt auch andere Gefahren in sich. Beispielsweise ältere Menschen oder auch Übergewichtige folgen anderen Gesetzmäßigkeiten in ihrer Thermoregulierung. Darüber hinaus spielen soziale und ethnische Hintergründe, die Volkszugehörigkeit und das Geschlecht eine - bis heute nicht umfassend geklärte - Rolle für das Wärmehaushaltsmodell.

So besteht noch viel Handlungsbedarf hinsichtlich der Entwicklung des individualisierten Menschen mit individuellem aktivem und passivem System.

Auch für Simulationsanwendungen sind noch weitergehende Überlegungen zur dynamischen Behaglichkeitssimulationen, zur dynamischen Kopplung der Modelle oder das Einbinden von vielen Menschen in einem Raum erforderlich.

Die Behaglichkeitssimulation zusammen mit dem Wärmehaushaltsmodell an die CFX-Strömungssimulation zu koppeln ist ein sehr aufwändiges Berechnungsverfahren. Falls man – zur Vereinfachung - die Wirkung des Menschen auf den Strömungsraum vernachlässigen möchte, besteht z.B. folgende Möglichkeit: Man könnte hierzu eine Strömungssimulation ohne den Menschen durchführen und im Postprocessing den Menschen mit dem Ziel einbinden, die Behaglichkeit des Menschen unter den gegebenen Umgebungsbedingungen angeben zu können. Damit kann dann die Wirkung des Raumes hinsichtlich der Behaglichkeit ihres Nutzers auf einfache Weise berechnet werden. Da hierbei die menscheninduzierte Auswirkung auf die Strömung vernachlässigt wird, kann jedoch für den Fall, dass mehrere Menschen den Raum nutzen, diese Vereinfachung nicht angewendet werden.