

SIMULATIONSSOFTWARE ZUR BERECHNUNG DER LOKALEN BEHAGLICHKEIT IN EINEM RAUM

Sabine Hoffmann¹, Oliver Kornadt¹, Ed Arens², Hui Zhang², Charlie Huizenga²

¹Professur Bauphysik, Bauhaus-Universität Weimar

²Center for the Built Environment, University of California, Berkeley,

KURZFASSUNG

Die thermische Behaglichkeit in einem Raum wird bisher meist mit globalen Parametern wie PMV (predicted mean vote) und PPD (predicted percentage of dissatisfied) (Fanger 1970) beurteilt. Hierbei werden für die entscheidenden Raumparameter Lufttemperatur, Luftfeuchte, Strahlungstemperatur der Umgebungsflächen und Luftgeschwindigkeit Mittelwerte des Raumes angenommen.

Zwar werden die so erhaltenen Größen PMV und PPD in der DIN EN ISO 7730:2005 ergänzt durch eine Zugluftbeurteilung und durch die Berücksichtigung vertikaler Temperaturunterschiede, Fußbodentemperaturen und Strahlungsasymmetrien; die tatsächliche Temperaturschichtung und das Strömungsprofil der Luft um die einzelnen Körperteile herum wird jedoch bei Behaglichkeitsbewertungen raumklimatischer Verhältnisse nur selten berücksichtigt (z.B. Richter 2003).

Der Vergleich verschiedener bestehender globaler Behaglichkeitsmodelle (neben DIN EN ISO 7730:2005 auch ASHRAE Standard 55 und erweitertes PMV nach Mayer (Mayer 1998)) ergab weiteren Forschungsbedarf insbesondere in Bezug auf den sommerlichen Wärmeschutz frei belüfteter Gebäude (Hellwig et al. 2006). Ebenso fließt in den üblichen globalen Behaglichkeitsmodellen die unterschiedliche Sensitivität der einzelnen Körperteile nur in geringem Maße in die Beurteilung des thermischen Komforts ein. Diese Kenntnis ist jedoch Voraussetzung für eine detailliertere Betrachtung lokaler (Un-)Behaglichkeit.

Die Automobil- und Flugzeugindustrie nutzt bereits seit längerer Zeit numerische Methoden zur optimalen Klimatisierung von Fahrer- und Fahrgastplätzen. Der Großteil dieser Modelle basiert auf einer mathematischen Beschreibung der maßgeblichen physiologischen Vorgänge im menschlichen Körper (Stolwijk 1971), häufig kombiniert mit der lokalen Berechnung der Randbedingungen durch CFD (z.B. Maué et al. 1997, Tanabe et al. 2004). Neue Ansätze der rechenleistungsintensiven Kopplung von Strahlungsmodellen, Strömungssimulation und thermischem Komfort auf Höchstleistungsrechnern werden aktuell entwickelt (van Treeck et al. 2007).

Stolwijk's Ansatz zur Modellierung der physiologischen Vorgänge unterteilt den menschlichen Körper in verschiedene Körperteile (Kopf, Brust, Arme, Hände etc.), wobei jedes Körperteil vier Schichten (Kern, Muskel, Fett, Haut) aufweist. Der Blutkreislauf verbindet die einzelnen Schichten und Körperteile miteinander. Die für die einzelnen Schichten berechneten Temperaturen werden mit empirischen Temperaturen des so genannten neutralen Zustands verglichen. Ergibt sich eine Abweichung zwischen berechneten Temperaturen und so genannter Setpoint Temperatur, wird die Wärmebilanz des Körpers ausgeglichen, indem Regelungsmechanismen wie Schwitzen, Zittern, Gefäßerweiterung oder -verengung aktiviert werden.

Neben diesem, den meisten Applikationen zugrunde gelegten Ansatz, wurden in der Vergangenheit verschiedene andere multisegmentale Physiologiemodelle entwickelt. (Wissler 1964) stellt dabei das detaillierteste Modell mit insgesamt 225 betrachteten Körperteilen dar. Als reines Physiologiemodell fand es wenig Beachtung im ingenieurtechnischen Bereich. (Gagge 1967) entwickelte ein einfaches 2-Knoten-Modell, das aus zwei konzentrischen Zylindern (innerer Kernzylinder und äußerer Hautzylinder) besteht. Dabei werden Stolwijk's Regulierungsmechanismen benutzt und mit einer Vorhersage von Empfindung und Behaglichkeit verbunden.

(Fiala 2001) beschreibt einen neuen Ansatz mit der Besonderheit, dass er explizit für den Einsatz im Bereich der Gebäudebehaglichkeit entwickelt wurde und das physiologische Modell an die thermische Behaglichkeit angekoppelt wurde. Diese Kopplung basiert auf diversen empirischen Untersuchungsergebnissen aus der Literatur und wurde über Regression an die Messergebnisse angepasst.

Fiala's Ansatz greift die Notwendigkeit auf, auch im Bereich der thermischen Behaglichkeit von Gebäuden detailliertere Betrachtungen zur menschlichen Reaktion auf Umgebungsbedingungen durchzuführen. Im Unterschied zu definierten Sitzplätzen in einem Kfz oder Flugzeug war im (Wohn-)Baubereich die Annahme von gemittelten Temperaturen bisher unter anderem auch deshalb gerechtfertigt, da sich dort im Allgemeinen kein fester Aufenthaltsort in einem Raum bestimmen lässt. Im Zeitalter der PC-

Arbeitsplätze muss im Bereich des Büro- und Verwaltungsbaus jedoch häufig von stationären Aufenthaltsorten ausgegangen werden, an denen sich die Mitarbeiter häufig während der gesamten Arbeitszeit in derselben Position aufhalten. Diese Situation erfordert eine genauere Betrachtung der thermischen Behaglichkeit an einem konkreten Aufenthaltsort.

Insbesondere sommerliche Hitzeperioden führen häufig zu thermisch unbehaglichen Verhältnissen sowohl in Bürogebäuden wie auch im Bereich des Wohnungsbaus. Hier empfiehlt sich die Betrachtung des thermischen Komforts unter Verwendung innovativer (Hoffmann 2007) und lokaler (Gao et al. 2006) Raumkonditionierungsmaßnahmen.

Eine detaillierte und in vielen Bereichen validierte Simulationssoftware zur Berechnung des lokalen Warm-/Kalttempfindens und zur Beurteilung der lokalen und globalen Behaglichkeitsempfindung wurde an der University of California, Berkeley, entwickelt. Das Programm besteht aus drei Hauptbereichen:

- Physikalische Randbedingungen wie umgebende Lufttemperatur, Luftfeuchte und Luftgeschwindigkeit für jedes Körperteil sowie eine detaillierte Berechnung der Einstrahlzahlen (view factors) für jedes Körperteil mit sämtlichen Einzeloberflächen im Raum (inkl. Heiz- und Kühlflächen), solare Einstrahlung in den Raum durch transparente Bauteile.
- Thermophysiologisches Modell eines Menschen, das gegenüber dem Basismodell von Stolwijk erweitert wurde und die individuelle Physiognomie (Größe, Umfang, Körperfett) berücksichtigt (Zhang et al. 2001), den Wärmeaustausch durch das Blutgefäßsystem als Gegenstromwärmetauscher (Arterie – Vene) darstellt, und den sensiblen und latenten Wärmetransport durch die Kleidungsschicht berechnet.
- Komfortmodell (Zhang 2003) basierend auf empirischen Untersuchungen an Testpersonen. Das Komfortmodell korreliert Hautoberflächentemperaturen mit dem entsprechenden Temperatur- und Behaglichkeitsempfinden. Die im thermophysiologischen Modell berechneten Hauttemperaturen (Arens et al. 2006) determinieren sowohl den lokalen Komfortlevel wie auch das globale Empfinden der Umgebungsverhältnisse.

Diese drei Bereiche wurden in dem Softwaretool UCB Comfort zusammengefasst und speziell für den Innenraum von Gebäuden angepasst. Die Raumgeometrie lässt sich ebenso einfach eingeben wie der solare Eintrag, die Temperatur der Raumbegrenzungsflächen und die lokalen Temperatur- und Strömungsverhältnisse.

Im Physiologiemodell sind die Körperschichten (Kern, Muskel, Fett, Haut) untereinander über Wär-

meileitung verbunden. Der Aktivitätsgrad (metabolic rate) wird als Wärmeproduktion in den Muskelschichten umgesetzt. Der Wärmeaustausch des Menschen mit der Umgebung, der durch die Atmung erfolgt, wird im Kern von Brust und Bauch entsprechend der Atemrate und der Temperaturdifferenz berücksichtigt. An der Hautoberfläche findet neben konvektivem und strahlungsbedingtem Wärmeübergang auch evaporative Wärmeabgabe über Schwitzen Berücksichtigung. Das UCB Comfort Modell ermöglicht die Auswahl verschiedener Kleidungsschichten mit unterschiedlichen Permeabilitäten, die das Körperteil entweder partiell oder komplett bedecken können. Der Blutkreislauf transportiert Wärme zwischen den einzelnen Schichten.

Die Wärmetransportgleichungen der einzelnen Knoten (16 Körperteile à 4 Schichten + 1 Bluttemperatur) werden als Finite-Differenzen Modell umgesetzt. In jedem Zeitschritt wird die Wärmebilanz der einzelnen Körper-Knotenpunkte aufgestellt und die Temperaturen des neuen Zeitschritts berechnet. Transiente Probleme lassen sich näherungsweise durch sich diskret ändernde Randbedingungen, die in verschiedenen Phasen definiert werden, darstellen.

Mit Hilfe dieses Softwaretools lassen sich konkrete Problemstellungen insbesondere im Bereich von Büroarbeitsplätzen untersuchen. Das Physiologiemodell berechnet die thermische Reaktion des Menschen auf gegebene Randbedingungen. Das Komfortmodell gibt Aufschluss über die Behaglichkeit an dem betrachteten Arbeitsplatz. Auf Grundlage dieses Wissens lassen sich gezielte Maßnahmen zur Verbesserung des thermischen Komforts wie lokale Warm- oder Kaltluftventilation und einzelnen Kühl- oder Heizflächen eruieren.

ABSTRACT

The consideration of local comfort and discomfort in buildings becomes more important with the increasing number of computer work places where office workers remain in more or less the same position over the whole day. In order to provide a thermally sound and comfortable environment it is necessary to consider non-uniform characteristics of the environment, such as temperature stratification, radiation asymmetry created by radiant cooled floors or ceilings, and air movement around body parts. Based on Stolwijk's physiological model a software tool was developed to calculate human responses on the thermal environment. The UCB Comfort model allows for further investigation in sensation and comfort of occupants and the development of local conditioning systems.

LITERATUR

- Arens, E., Zhang, H. (2006). "The skin's role in human thermoregulation and comfort." *Thermal and Moisture Transport in Fibrous Materials*.
- Bischof, W., Hellwig, R. T., Brasche, S. (2007). *Thermischer Komfort – die extraphysikalischen Aspekte*. 12. Bauklimatisches Symposium, Dresden, Technische Universität Dresden.
- Fanger, P. O. (1970). "Thermal Comfort: Analysis and applications in environmental engineering." Copenhagen, Danish Technical Press
- Fiala, D., Lomas, K. J., Stohrer, M. (2001). Computer prediction of human thermoregulatory and temperature responses to a wide range of environmental conditions. *International Journal of Biometeorology* 45 (3), 143-159.
- Gagge, A. P., Stolwijk, J. A. J., Hardy, J. D. (1967). "Comfort and thermal sensations and associated physiological responses at various ambient temperatures." *Environmental Research*(1), 1-20.
- Gao, N., Niu, J., Zhang, H. (2006). "Coupling CFD and human body thermoregulation model for the assessment of personalized ventilation." *HVAC&Research* 12 (3), 497-518.
- Hellwig, R. T., Bischof, W. (2006). "Gültigkeit thermischer Behaglichkeitsmodelle." In: *Bauphysik*, Februar 2004, H. 2, S. 131 - 136
- Hoffmann, S.: *Numerische und experimentelle Untersuchung von Phasenübergangsmaterialien zur Reduktion hoher sommerlicher Raumtemperaturen*, Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar, 2007
- Hoffmann, S. et al.: A Numerical model to predict human thermal sensation and comfort in buildings, 4th International Building Physics Conference, Istanbul 2009 (Abstract akzeptiert)
- Maué, J., Wahl, D., Currell, J. (1997). *Computation of the thermal environment in passenger compartments and evaluation of thermal comfort. Comfort in the automotive industry: recent developments and achievements*, Bologna, Associazione Tecnica dell'Automobile, Sezione Emilia-Romagna.
- Mayer, E. (1998). "Ist die bisherige Zuordnung von PMV und PPD noch richtig?" In: *Luft- und Kältetechnik* (12), S. 575-577.
- Richter, W. (2003). "Handbuch der thermischen Behaglichkeit - Heizperiode." Dortmund.
- Stolwijk, J. A. J. (1971). *A mathematical model of physiological temperature regulation in man*. Washington, D.C.
- Tanabe, S. (2004). Prediction of indoor thermal comfort in vehicle by a numerical thermoregulation model and CFD. *RoomVent*, Coimbra, Portugal.
- van Treeck, C., Wenisch, P., Borrmann, A., Pfaffinger, M., Wenisch, O., Rank, E. (2007). "ComfSim - Interaktive Simulation des thermischen Komforts in Innenräumen auf Höchstleistungsrechnern." *Bauphysik* 29 (1), S.2-7.
- Wissler, E. H. (1964). "A mathematical model of the human thermal system." *Bulletin of Mathematical Biology* 26 (2), 147-166.
- Zhang, H. (2003). "Human thermal sensation and comfort in transient and non-uniform thermal environments." University of California, Berkeley. PhD Thesis.
- Zhang, H., Huizenga, C., Arens, E., Yu, T. (2001). "Considering individual physiological differences in a human thermal model." *Journal of Thermal Biology* 26 (4-5), 401- 408.