SKALEN-ADAPTIVE SIMUATION THERMISCHER BEHAGLICHKEIT IN INNENRÄUMEN

C. van Treeck[1], J. Frisch[2], S. R. Bolineni[1], S. Stratbücker[1], S. Paulke[3], I. Schweinfurth[1], R. Schwab[1], E. Rank[2] and A. Holm[1]

[1]Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP), Institutsteil Holzkirchen, Valley
[2]Lehrstuhl für Computation in Engineering, Techn. Universität München, München
[3]P+Z Engineering GmbH, München

KURZFASSUNG

Der Beitrag stellt eine Methodik vor, Simulationsmodelle zur Vorhersage thermischer Behaglichkeit in Innenräumen mit unterschiedlichem raum-zeitlichen Detaillierungsgrad miteinander zu verbinden.

Ausgehend von den Ergebnissen einer vorab durchgeführten Ganzjahressimulation werden beispielsweise verschiedene Zeitperioden identifiziert, in denen operative Raumtemperaturen einen kritischen Wert überschreiten. Das Modell wird anschließend verfeinert, indem ein Menschmodell in die Szene eingefügt wird. Mit Hilfe eines Raytracing Verfahrens wird die auf der Hautoberfläche des Manikins absorbierte kurzwellige Solarstrahlung sowie mittels eines Radiosity Modells der kurz- und langwellige diffuse Strahlungsaustausch zwischen Hautoberfläche und Umgebungsflächen berechnet. Der konvektive Wärmeübergang an der Hautoberfläche wird über Wärmeübergangskoeffizienten beschrieben, die zuvor mittels CFD Berechnungen ermittelt wurden.

Zur Simulation des menschlichen Körpers hinsichtlich Stoffwechsel und Blutkreislauf dient ein Thermoregulationsmodell, mit dem die dynamische Entwicklung von Oberflächen- und Körperkerntemperaturen als Antwort auf zeitlich veränderliche Randbedingungen nachgebildet werden kann. In diesem Zusammenhang wird das Fiala Modell in THESEUS-FE eingesetzt.

Die mittels einer gekoppelten Simulation bestimmten Hautoberflächentemperaturen werden anschließend über eine Umrechnung in Äquivalenttemperaturen lokalen Behaglichkeitswerten zugeordnet. Als Basis dienen Regressionsfunktionen, die in Versuchsreihen mittels Befragungen von Probanden am Fraunhofer Institut für Bauphysik ermittelt worden sind.

ABSTRACT

The paper addresses the scale-adaptive coupling of simulation methods for indoor thermal quality performance prediction.

Starting from results obtained by a whole-year building performance simulation, we identify periods, where operative room temperatures exceed a threshold. The model resolution is refined in space and time by inserting a multi segment thermal manikin model into the scene. A raytracing model computes the solar radiation absorbed at the manikin skin, whereas a radiosity solver calculates the diffuse short and long wave radiative heat transfer between manikin and its surroundings. Predefined heat transfer coefficients describe the convective heat transfer, which are previously computed by CFD.

We adapt a thermoregulation model to simulate metabolism and blood circulation within the human body. The model predicts the dynamic responses of the body in terms of skin and core temperatures to changing environmental conditions. We make use of the THESEUS-FE implementation of Fiala's model.

Skin temperatures resulting from a coupled simulation are transformed into equivalent temperatures and are correlated with local thermal sensation votes. The empirical correlations are obtained from experiments with test subjects involving questionnaires which have been conducted at the Fraunhofer Institute for Building Physics.

HINTERGRUND

Mit der in der Grundlagenforschung experimentell fundierten Kenntnis der physikalischen, chemisch-physiologischen und psychologischen Zusammenhänge bei der Bewertung des Innenraumklimas und seiner Auswirkungen auf den Menschen gewinnt der Bereich der numerischen Simulation zunehmend an Bedeutung.

Seitens der Industrie besteht in zahlreichen Feldern eine Nachfrage an der Integration geeigneter Modelle und Rechenverfahren sowie an einer entsprechenden Verbindung mit der Messtechnik. Trotz zunehmender Verfügbarkeit leistungsfähiger Arbeitsplatzrechner stellt die Simulation jedoch stets einen Kompromiss zwischen Genauigkeit und Rechenzeit dar.

Aus diesem Grund wird in diesem Beitrag eine skalen-adaptive Vorgehensweise bei der Auswahl der entsprechenden Ingenieurmodelle vorgeschlagen. Wir beschränken uns in diesem Beitrag auf den Bereich Gebäudesimulation.

BEHAGLICHKEITSBEWERTUNG

Zur Bewertung des menschlichen Behaglichkeitsempfindens kommt üblicherweise ein Modell zum Einsatz, das den Prozentsatz Unzufriedener als statistisches Maß auf einer 7-Punkte Skala beschreibt (Fanger 1982). Das Modell ist in zahlreichen norma-

tiven Vorschriften definiert (ISO 7730, ASHRAE 55) und bildet den Wärmehaushalt des menschlichen Körper als Ganzes ab. Es gilt jedoch nur unter uniformen und stationären Bedingungen, d.h. Aussagen zum lokalen Empfinden können nur begrenzt; transiente Einflüsse können nicht wiedergegeben werden.

Für den Sonderfall natürlich belüfteter Gebäude finden adaptive Komfortrichtlinien Anwendung (z.B. EN 15251), die das Nutzerverhalten zur Beeinflussung des Raumklimas (etwa: Öffnen eines Fensters) berücksichtigen (de Dear & Brager 2002). Zur Auswertung ist eine Ganzjahressimulation erforderlich.

Das menschliche Temperatur- und Behaglichkeitsempfinden hängt vom thermischen Zustand des Körpers ab, der von Thermorezeptoren an der Hautoberfläche und im Körperinneren erfasst wird (Gagge 1973). Von Bedeutung sind ferner die Arbeit des Körpers, die zur Herstellung eines thermischen Gleichgewichtszustandes erforderlich ist (Berglund 1986), sowie das Feuchteempfinden (Gagge 1973).

Über Experimente mit Klimamesseinrichtungen und durch Befragungen von Versuchspersonen zum lokalen Behaglichkeitsempfinden kann Körpersegmenten über Regressionsfunktionen ein entsprechender Behaglichkeitsindex zugeordnet werden (Bohm et al. 1990, Wyon et al. 1989, Mayer 2000, ISO 14505-2:2004).

Eine besondere Herausforderung stellt dabei die Vorhersage des menschlichen Empfindens unter nichtuniformen und instationären Bedingungen dar (Strøm-Tejsen et al. 2007, Zhu et al. 2008). Als Anwendung sind in diesem Zusammenhang z.B. Methoden der Flächenkühlung (Olesen 2008) oder die "Personalized Ventilation" (Yang et al. 2008) zu nennen. Von Zhang et al. (2010) wurde beispielsweise solch ein empirisches Modell zur Bewertung der lokalen und globalen Behaglichkeit entwickelt.

Für eine detaillierte simulationsgestützte Komfortanalyse, die auch die dynamische Anpassung des Körpers auf zeitlich veränderliche Umgebungsbedingungen berücksichtigt, wären neben einem Bewertungsverfahren ein menschliches Thermoregulationsmodell, ein Verfahren zur Strömungs- und Wärmestrahlungssimulation bzw. ein zonales Verfahren zur Modellierung des Wärmeaustausches zwischen Körper und Umgebung einzusetzen.

Ein Thermoregulationsmodell simuliert dabei den menschlichen Blutkreislauf, Stoffwechsel und die Körperkern- und Hauttemperaturen. Die Regelungsmechanismen Kältezittern, Schwitzen, Gefäßverengung und –erweiterung werden empirisch modelliert. Arbeiten hierzu wurden z.B. von Fiala et al. (2001), Huizenga et al. (2001), Kato et al. (2007), Niu&Gao (2008), Sano et al. (2008), Stolwijk (1971), Streblow et al. (2008), Tanabe et al. (2002) und Zhang et al. (2008) vorgestellt.

Abbildung 1 zeigt die Zuordnung von lokalen Behaglichkeitswerten zu simulierten Oberflächentemperaturen eines Manikins. Das verwendete Behaglichkeitsmodell wurde von Versuchen abgeleitet, die am Fraunhofer Institut für Bauphysik durchgeführt worden sind. Die Methodik ist in (van Treeck et al. 2009) ausführlich dargestellt.

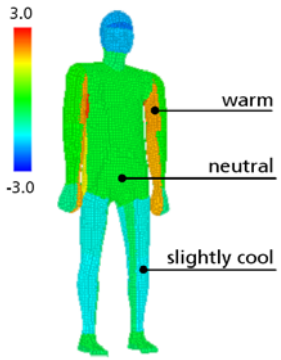

Abb. 1: Farbliche Darstellung von lokalen Behaglichkeitswerten auf der Hautoberfläche

TEILMODELLE

Zonenmodell

Zur Vorhersage von Heiz- und Kühlenergiebedarf eines Gebäudes, Heiz- und Kühlleistung der haustechnischen Anlage, sowie von Luft- und Oberflächentemperaturen wird ein dynamisches Zonenmodell verwendet.

Das Modell ist als Finite-Volumen Ansatz nach Clarke (2001) formuliert, d.h. ein Gebäudemodell wird in einzelne Kontrollvolumen zerlegt und die Forderung nach Energie- und Masseerhaltung liefert Gleichungssysteme, die unter gegebenen klimatischen Randbedingungen und dem Einfluss eines (idealisierten) regelungstechnischen Systems für einzelne Zeitschritte einer Ganzjahressimulation sukzessive gelöst werden müssen. In den Kontrollvolumen wird dabei eine homogene Temperaturverteilung angenommen. Das Modell ist in (van Treeck 2010) detailliert beschrieben.

Als Datenstruktur dient ein Hexaedermodell, wobei zwischen Luftvolumen (fluid) und Festkörpern (solid) unterschieden wird, und das Oberflächenmodell der Raumluftkörper getrennt vorliegt. Damit ist es möglich, diese Hüllflächen unabhängig von der Diskretisierung des Luftvolumens zur Berechnung der Wärmestrahlungsverteilung im Innenraum zu verwenden.

Zur Berechnung der kurzwelligen Strahlungsverteilung dient ein vereinfachtes Raytracing Schema in Verbindung mit einem detaillierten Fenstermodell. Der langwellige Strahlungsaustausch zwischen Oberflächen wird mittels eines Radiosity Verfahrens ermittelt. Die Kopplung der Lösungsverfahren geschieht explizit.

Das Zonenmodell liefert Daten, die für eine Abschätzung der thermischen Qualität eines Gebäudes, etwa zur Vorhersage von Zeiträumen, in denen Überhitzungserscheinungen zu beobachten wären, verwendet

werden kann (vorausgesetzt, es werden entsprechende Wetterdaten eingesetzt).

Thermoregulationsmodell

Um die zeitliche Änderung von Hautoberflächen- und Körperkerntemperaturen im Sinne einer dynamischen physiologischen Anpassung des menschlichen Körpers auf veränderliche thermische Umgebungsbedingungen zu simulieren, wird ein detailliertes Thermoregulationsmodell eingesetzt. Der menschliche Körper ist in der Lage, seine Körperkerntemperatur durch die vier Regelungsmechanismen Kältezittern, Schwitzen, Gefäßverengung und -erweiterung konstant zu halten (Stolwijk 1971). Wie in Abbildung 2 dargestellt, muss in diesem Fall die Wärmeübertragung zwischen Körperoberfläche und Umgebung durch Konvektion, Strahlung und ggf. Wärmeleitung berechnet werden.

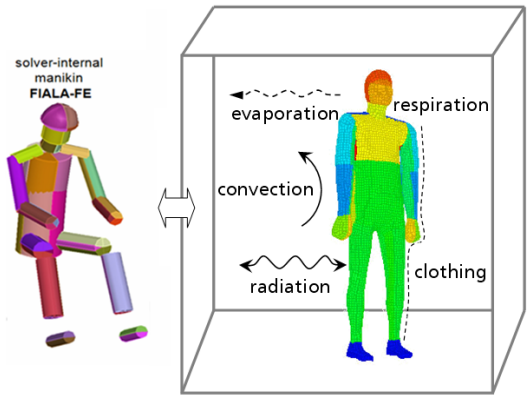

Abb. 2: Wärmeübertragung zwischen Körper und Umgebung

Ein Thermoregulationsmodell besteht aus einem aktiven regelungstechnischen System, das die Reaktion des zentralen Nervensystems als Interpretation von Signalen, die von verschiedenen Thermorezeptoren von der Haut und vom Körper empfangen werden, beschreibt, sowie einem passiven System, das die Wärmeleitung im Gewebe einschließlich Blutkreislauf und den Wärmeaustausch mit der Umgebung modelliert (Stolwijk 1971). Der Körper wird dabei in Segmente unterteilt, die ihrerseits eine konzentrische Struktur aus einzelnen Schichten und Segmenten aufweisen, womit die äußeren und inneren Hautschichten, Muskel-, Fett- und Knochenschichten dargestellt werden können (Fiala et al. 2001).

Im Rahmen dieser Arbeit findet das Modell von Fiala Anwendung, wobei das Simulationstool THESEUS-FE (2010) eingesetzt wird (Paulke 2007). THESEUS wird dabei im "ungekoppelten" Modus verwendet, und über eine schwache Kopplung mit weiteren Simulationsverfahren verbunden. Für Details sei auf die Publikation (van Treeck et al. 2009) verwiesen.

Konvektiver Wärmeübergang

Zur Beschreibung des konvektiven Wärmeübergangs zwischen Körperoberfläche und Umgebung dienen Wärmeübergangskoeffizienten, die zuvor mittels CFD für alle Oberflächensegmente des Fiala-Modells berechnet wurden – in diesem Fall 48 Patches für ein stehendes Manikinmodell, wie es in Abbildung 3 dargestellt ist. Entsprechende konvektive Wärmeübergangskoeffizienten werden u.a. auch in den Arbeiten von De Dear et al. (1997) und Fiala et al. (2001) vorgeschlagen.

Dieses Vorgehen ermöglicht es, die Zeitskalen O(Minuten bis Stunden), die im Rahmen dieser Arbeit für eine interaktive Simulationsrechnung von Interesse sind, auflösen zu können. An dieser Stelle sei auch auf die Arbeiten der Autoren im Bereich Computational Steering von CFD Simulationen unter Verwendung eines Hochleistungsrechners hingewiesen (van Treeck et al. 2007).

Gegenstand aktueller Arbeiten ist die Entwicklung eines parametrischen Modells zur situationsabhängigen Auswahl konvektiver Wärmeübergangskoeffizienten für zuvor definierte strömungsmechanische Konfigurationen in Innenräumen (z.B. Raum, Fahrzeuginnenraum, Flugzeugkabine). Die in Abbildung 3 dargestellten Simulationsergebnisse wurden mittels der Software ANSYS Fluent mit SST-kω Turbulenzmodell erhalten, wobei fünf prismatische Elemente zur Auflösung der oberflächennahen Grenzschicht verwendet wurden.

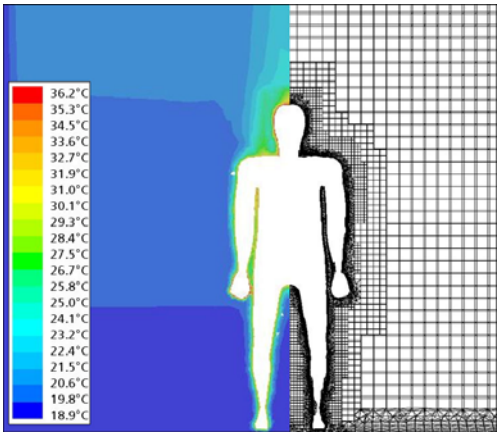

Abb. 3: CFD Modell in ANSYS Fluent

Berechnung der Wärmestrahlung

Die kurzwellige Wärmestrahlungsverteilung in Innenräumen wird mit einem vereinfachten Raytracing Verfahren berechnet. Hierfür wird zunächst der Sonnenstandsvektor bestimmt und die aus Wetterdaten ermittelte Direktstrahlung entsprechend der geometrischen Orientierung der transparenten Flächen umgerechnet. Die Strahlungstransmission durch Fenster wird mit Hilfe eines detaillierten Fenstermodells berechnet, wobei transparente Flächen in mehrere kleine Teilfacetten (z.B. hundert) zerlegt werden. Wie in Abbildung 4 gezeigt, wird für jede Teilfläche ein einfallender Strahl verfolgt, bis dieser auf eine Oberfläche auftrifft und dort absorbiert wird, etwa auf der Körperoberfläche des Manikinmodells, falls dieses verwendet wird.

Der diffuse kurzwellige sowie der diffuse langwellige Strahlungsaustausch zwischen Oberflächen wird mit einem Radiosity Verfahren bestimmt (Modest 2003), wobei das von Walton (2002) vorgeschlagene Integrationsverfahren zur Bestimmung der Sichtfaktoren Anwendung findet. Für Details und eine Konvergenzstudie wird auf (van Treeck 2010) verwiesen.

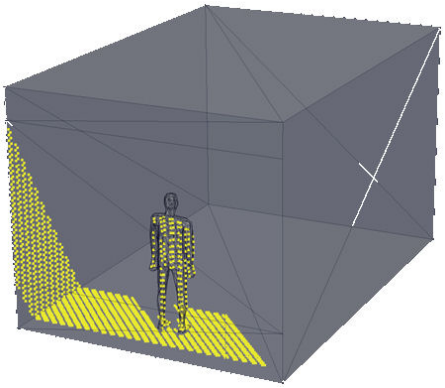

Abb. 4: Strahlverfolgung mittels Raytracing

MODELLINTEGRATION

Für die Kommunikation zwischen den einzelnen Komponenten (Zonenmodell, FIALA-FE, Behaglichkeitsbewertung) dient eine Softwareschnittstelle (van Treeck & Frisch 2009). THESEUS wird dabei über eine Datei-basierte Schnittstelle angesteuert und im "ungekoppelten" Modus ausgeführt. Die Skript-basierte Kontrolle ermöglicht das Starten, Stoppen und Fortführen einer Simulation, wobei THESEUS eine adaptive Zeitschrittweitensteuerung zulässt und das Postprozessing-Intervall der Softwareschnittstelle variabel und somit unabhängig von der Schrittweite des Lösers einstellbar ist.

Das Softwareinterface kann gegenwärtig auf zwei Arten betrieben werden. Im gekoppelten Modus fungiert die in Abbildung 5 dargestellte grafische Benutzeroberfläche (GUI) als Monitor zur Darstellung des thermischen Zustands des Manikins. Randbedingungen werden bidirektional zwischen den im Batch-Betrieb ausgeführten Solvern ausgetauscht.

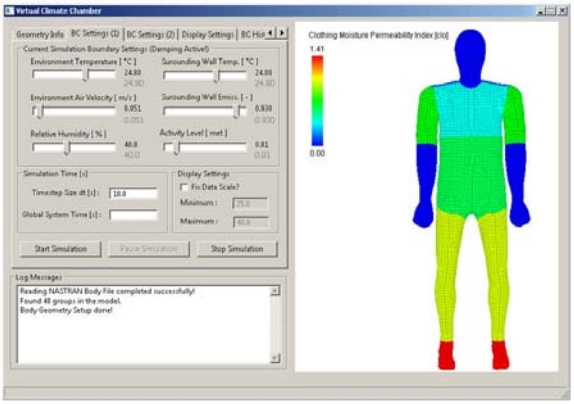

Abb. 5: Grafische Benutzerschnittstelle (Frisch 2008, van Treeck et al. 2009)

Im ungekoppelten Modus dient die GUI als interaktives Simulationswerkzeug (Computational Steering), das eine sehr schnelle Antwortzeit aufweist (Simulation in Echtzeit). Der Wärmeübergang zwischen Körper und Umgebung wird in diesem Fall ausschließlich über vordefinierte Wärmeübergangskoeffizienten beschrieben. Das interaktive Simulationsmodell gestattet zur Laufzeit die Änderung der Parameter Position (sitzend, stehend), Bekleidungsart, Aktivitätsgrad, sowie die Anpassung der thermischen Umgebungsrandbedingungen.

Für das Zonenmodell wurde ebenfalls eine einfache grafische Oberfläche entwickelt.

BEISPIEL

Folgendes Beispiel demonstriert die Anwendung am Beispiel Gebäudesimulation. Eine zunächst durchgeführte Ganzjahressimulation mit dem Zonenmodell gibt, die Verwendung geeigneter Wetterdaten vorausgesetzt, Aufschluss über Perioden, in denen Behaglichkeitskriterien, etwa die Überschreitungshäufigkeit von Raumtemperaturen, verletzt werden.

Für das in Abbildung 6 exemplarisch dargestellte Simulationsergebnis wurde das Benchmark Beispiel 13 (schwere Bauart) aus der Norm VDI 6020 (2001) verwendet. Hierbei wird ein Testraum betrachtet, der adiabatisch mit weiteren Räumen verbunden ist und eine große Fensteröffnung aufweist.

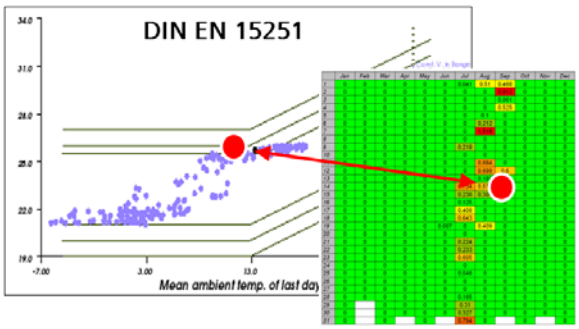

Abb. 6: Operative Raumtemperaturen im adaptiven Komfortdiagramm der EN 15251 und farbliche Darstellung der Überschreitung der Grenzen einer Komfortkategorie in einer kalenderbasierten Ansicht

Die zonale Simulation liefert Werte für Raum- und Oberflächentemperaturen in einer stündlichen (oder feineren) Auflösung als Eingabedaten für eine erste Behaglichkeitsanalyse. Für den Fall eines natürlich belüfteten Gebäudes (vgl. de Dear et al. 2002) kann beispielsweise ein adaptives Komfortdiagramm, z.B. nach EN 15251 (2007), zur Bewertung der thermischen Qualität angewendet werden. In Abbildung 6 sind die operativen Raumtemperaturen gegen die exponentiell gewichtete laufende Außentemperatur aufgetragen. Eine kalenderbasierte Ansicht ermöglicht es dabei, das zeitliche Auftreten von Werten, die eine definierte Komfortkategorie verletzen, entsprechend zu lokalisieren (grün = keine Abweichung; rot = Überschreitung).

Das Modell gibt dabei jedoch definitionsgemäß keinen Aufschluss über lokale oder zeitabhängige, dynamische Effekte. Um diese zu erfassen, muss das Modell verfeinert werden. Es wird an dieser Stelle angemerkt, dass normative Vorschriften wie beispielsweise ISO 7730 (2005) auch Hinweise zur Abschätzung lokaler thermischer Behaglichkeit geben, die im Gebäudesimulationsbereich üblicherweise für die Bewertung ausreichend sind. Für andere Konfigurationen, etwa Fahrzeug- oder Flugzeuginnenräume, die durch eine Vielzahl lokaler Effekte gekennzeichnet sind, sind diese Vorschriften jedoch nur sehr begrenzt anwendbar.

Mit der Auswahl eines Zeitschrittes aus vorgenannter Simulation wird die Auflösung verfeinert, indem das Manikinmodell in die Szene eingefügt und eine Kopplung der oben beschriebenen Modelle vorgenommen wird.

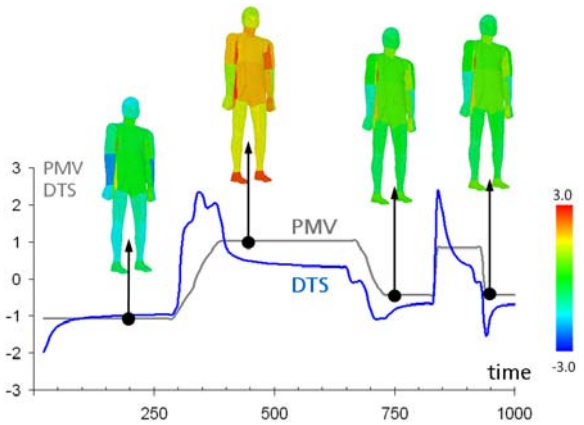

Abb. 7: Visualisierung des lokalen thermischen Behaglichkeitsempfindens auf der Oberfläche des Manikinmodells und Darstellung der globalen Parameter PMV und DTS

Abbildung 7 zeigt die zeitliche Entwicklung des lokalen thermischen Behaglichkeitsempfindens. Die ermittelten Hautoberflächentemperaturen wurden dabei in Äquivalenttemperaturen umgerechnet und über am Fraunhofer IBP experimentell gefundene Zusammenhänge dem lokalen Behaglichkeitsempfinden zugeordnet. Zur Darstellung dient die 7-Punkt ASHRAE Skala (2004). Das Diagramm stellt weiterhin die Werte PMV (nach ISO 7730) und DTS, d.h. den Dynamic Thermal Sensation Index nach Fiala (2001), dar, die für den Körper als Ganzes formuliert sind. Der PMV Index drückt die Zufriedenheit einer Personengruppe mit dem Umgebungsklima aus, die nach Fanger (1982) statistisch mit dem Ungleichgewicht in der Energiebilanz des menschlichen Körpers als Ganzes korreliert werden kann.

AUSBLICK

Der Einsatz von Simulationsverfahren zur Bewertung der thermischen Behaglichkeit in Innenräumen stellt stets einen Kompromiss zwischen Modellauflösung, Genauigkeit und Rechenzeit dar. Es empfiehlt sich somit ein skalen-adaptives Vorgehen bei der Auswahl der entsprechenden Modelle und Simulationsverfahren, um eine Balance zwischen physikalisch erforderlicher und vom Rechenaufwand praktikabler raum-zeitlicher Auflösung zu erreichen.

Aus diesem Grund wird gegenwärtig ein Middlewarekonzept zur Kopplung der beschriebenen Ingenieurmodelle und Simulationsverfahren entwickelt. Einen Schwerpunkt bilden dabei die Anbindung von CFD, sowie die Integration von weiteren Behaglichkeitsbewertungsalgorithmen.

DANKSAGUNG

Gefördert im Rahmen der internen Programme der Fraunhofer Gesellschaft (FhG), Fördernummer Attract 692 239. Teile der Vorarbeiten wurden durch die Bayerische Forschungsstiftung (BFS) im Rahmen des Förderprojektes COMFSIM gefördert, AZ 630/04. Die Autoren danken FhG und BFS; ferner P+Z Engineering für die Überlassung einer Softwarelizenz für ihr Produkt THESEUS-FE.

REFERENZEN

ASHRAE (2004). Standard 55: Thermal Environmental Cond. for Human Occupancy. Atlanta.

Berglund L.G. and Cunningham D.J. (1986). Parameters of human discomfort in warm environments. ASHRAE Transactions, 92(2B):732–746, 1986.

Bohm M., Browen M., Holmer I., Nilsson P.V. and Noren O. (1990). Evaluation of vehicle climate with a thermal manikin. Technical report, Swedish Institute of Agricultural Engineering.

Clarke J. (2001). Energy simulation in building design (2nd). Butterworth-Heinemann.

de Dear R.J., Arens E., Hui Z., & Oguro M. (1997). Convective and radiative heat transfer coefficients for individual human body segments. Int J Biometeorology, 40, 141–156.

de Dear R.J. and Brager G.S. (2002). Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55. Energy and Buildings 34: 549-561.

EN ISO 14505-2 (2004). Ergonomics of the thermal environment - Evaluation of thermal environments in vehicles. Beuth Verlag.

EN 15251 (2007). Indoor env. input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting, and acoustics. Beuth.

EN ISO 7730 (2005). Ergonomics of the thermal environment. Beuth Verlag.

Fanger, P. (1982). Thermal comfort. R.E. Krieger.

Fiala, D., Lomas, K., & Stohrer, M. (2001). Computer prediction of human thermoregulatory and temperature response to a wide range of env. conditions. Int J Biometeorol, 45, 143–159.

Frisch, J. (2008). Diploma thesis, TU München.

Gagge, A. (1973). Rational temp. indices of man's thermal env. and their use with a 2-node model of his temp. reg.. Fed. Proc., 32, 1572–1582.

Gordon R. (1974). The response of human thermoregulatory system in the cold. PhD thesis, Univ. of California, St. Barbara, CA.

Huizenga, C., Hui, Z., & Arens, E. (2001). A model of human physiol. and comfort for assesing complex thermal env. Bldg and Env, 36, 691–699.

Kato, S., Nagano, H., & Yang, L. (2007). A CFD manikin with a thermo physiology model. Roomvent 2007, Helsinki.

Mayer E. (2000). Manfitted measurement of thermal climate by a dummy representing suit for simulation of human heatloss (DRESSMAN). In Healthy Buildings, volume 2, pages 551–556, Washington DC.

Modest, M.F. (2003). Radiative Heat Transfer. Academic Press, USA, 2nd ed.

Niu, J., & Gao, N. (2008). Personalized vent. for commercial aircraft cabins, IndoorAir 2008, Denmark.

Olesen B.W. (2008). Radiant floor cooling systems. ASHRAE Journal, 9:16–22.

Paulke, S. (2007). FE-based implementation of Fiala's thermal manikin in THESEUS-FE. EUROSIM 2007.

Sano, J., et al. (2008). Evaluation of thermal env. in vehicles by CFD coupled with num. thermoreg. model JOS. IndoorAir2008, Copenhagen.

Stolwijk, J., A mathematical model of phys. temp. regulation in man. (1971), CR-1855, NASA.

Streblow, R., Müller, D., & Gores, I. (2008). A coupled simulation of the therm. environment and thermal comfort with an adapted Tanabe model. IndoorAir 2008, Denmark.

Strøm-Tejsen, P., et al. (2007). Ass. of the thermal env. in a simulated aircraft cabin using thermal manikin exposure. Roomvent2007, Helsinki.

Tanabe, S.-I., K.K., Nakano, J., & Ozeki, Y. (2002). Eval. of thermal comfort using comb. multi-node thermoregulation (65MN) and radiation models and CFD. Energy and Buildings, 34, 637–646.

THESEUS-FE (2010). Theory manual, release 3.0, http://www.theseus-fe.de.

van Treeck, C., Frisch, J., Pfaffinger, M., Rank, E., Paulke, S., Schweinfurth, I., Schwab, R., Hellwig R. and Holm, A. (2009). Integrated thermal comfort analysis using a parametric manikin model for interactive simulation, J Building Performance Simulation, 2(4): 233-250.

van Treeck, C., Wenisch, P., Borrmann, A., Pfaffinger, M., Wenisch, O., Rank, E. (2007). ComfSim. Bauphysik, 29(1), 2–7.

van Treeck, C. (2010). Habilitation thesis, Technische Universität München.

VDI 6020 (2001). Requirements on meth. for calc. of thermal and energy sim. of bldg and plants.

Walton, G. N. 2002. Calculation of obstructed view factors by adaptive integration. Tech. Rep. NIST, USA.

Wyon D.P., Larsson S., Forsgren B. and Lundgren I. (1989). Standard procedures for assessing vehicle climate with a thermal manikin. SAE technical paper 890049, pp. 1-11.

Yang, B., Melikov, A., and Sekhar, C. (2008). Cooling effect of ceiling mounted personalized vent. systems. IndoorAir2008, Copenhagen.

Zhang H., Arens E., Huizenga C. & Han T. (2010). Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments, Parts I-III. J Bldg and Environment, 45, 380–410.

Zhang, Y., & Yang, T. (2008). Sim. of Human Thermal Resp. in Confined Space. IndoorAir 2008, Denmark.

Zhu, S., et al. (2008). Development of a computational thermal manikin applicable in a non-uniform thermal environment (Part 2). ASHRAE HVAC&R Research, 14 (4), 545–564.