# SIMULATION DER THERMISCHEN BEHAGLICHKEIT

Conrad Völker und Oliver Kornadt
Lehrstuhl Bauphysik, Bauhaus-Universität Weimar, Deutschland

## KURZFASSUNG

Vorgestellt wird ein Ansatz, der eine Bewertung der thermischen Behaglichkeit auch unter komplexen, inhomogenen raumklimatischen Verhältnissen unter Berücksichtigung der menschlichen Physiologie zulässt. Dabei wird die Strömungssimulation an ein numerisches Modell (UCBerkeley Comfort Model), welches die Thermoregulation des menschlichen Körpers abbildet, gekoppelt. Mit Hilfe der Strömungssimulation können die klimatischen Bedingungen in Räumen detailliert bestimmt werden. Darauf basierend können durch das Thermoregulationsmodell die Temperaturverteilung im menschlichen Körper, die resultierende Wärmeabgabe an die Umgebung sowie die thermische Behaglichkeit bestimmt werden. Beispielhaft wird dieser Ansatz bei der Simulation der thermischen Behaglichkeit sowie des Empfindens bei Flächenkühlungen angewendet.

## ABSTRACT

An approach is introduced, which enables the assessment of thermal comfort considering the complex and inhomogenous climatic conditions in buildings as well as the human physiology. Computational fluid dynamic is linked with a numerical model representing the thermophysiological behavior of the human body (UCBerkeley Comfort Model). By dint of CFD, the climatic conditions in buildings are simulated with a detailed resolution. Basing on the simulations, the thermophysiological model is able to determine the temperature distribution of the human body, the heat flux to the environment as well as thermal comfort. The approach is used for the exemplified investigation of thermal comfort and sensation in a room equipped with a radiant cooling floor.

## EINLEITUNG

Bereits (Rubner 1887) stellte fest, dass „jeder eine besondere Meinung über die Bedeutung klimatischer Einflüsse hat, in der sich ein gutes Maß von Missverständnissen mit einem Körnchen Wahrheit findet“. Dass dieser Satz auch heute nicht viel von seiner Aktualität eingebüßt hat, verdeutlicht sich an der in der Fachliteratur vorhandenen Vielzahl unterschiedlichster Definitionen des Begriffes ‚thermische Behaglichkeit’. Diese definieren über die unterschiedlichsten Parameter die Zufriedenheit mit der Umgebung, womit sich die Komplexität dieses Begriffes begründen lässt.

Für (Richter et al., 2007) ist die thermische Behaglichkeit durch einen lediglich geringfügigen thermoregulatorischen Einsatz des Organismus zur Aufrechterhaltung der Körperkerntemperatur definiert. Außerdem muss die Wärmeabgabe des Menschen an die Umwelt anstrengungslos und nicht wahrnehmbar sein. Hinzu kommt die nicht zu unterschätzende subjektive Empfindung des Wohlbehagens. Inwieweit dieser Zustand erreicht werden kann, hängt von vielen verschiedenen Parametern ab, wobei Luft- und Strahlungstemperatur, Luftgeschwindigkeit und -feuchtigkeit, Kleidungssituation und Tätigkeitsgrad als dominierend bezeichnet werden.

Diese sechs Kriterien bilden die Grundlage für die derzeit gebräuchlichste Methode zur Bewertung der thermischen Behaglichkeit, das so genannte PMV-Modell (PMV - Predicted Mean Vote) (Fanger 1970; Fanger 1977).

Um die komplexen raumklimatischen Verhältnisse in Gebäuden unter Berücksichtigung der

- inhomogenen klimatischen Verhältnisse
- Interaktion Mensch – Raumklima
- Divergenz der Körpersegmente (Thermosensitivität, Bekleidung, Wärmeübergangskoeffizienten etc.)

detailliert zu bewerten, sind die herkömmlichen Methoden zur Bewertung der thermischen Behaglichkeit allerdings nicht immer ausreichend geeignet.

Eine Alternative bietet die Kopplung der Strömungssimulation an ein numerisches Modell, welches die Thermophysiologie des menschlichen Körpers abbildet. Mit Hilfe der Strömungssimulation können die klimatischen Bedingungen in Räumen verhältnismäßig exakt und insbesondere auch lokal bestimmt werden. Darauf basierend können durch das Thermoregulationsmodell sowohl die Temperaturverteilung im menschlichen Körper als

auch die daraus resultierende Wärmeabgabe an die Umgebung berechnet werden, was wiederum Rückschlüsse auf die thermische Behaglichkeit ermöglicht.

Dies bedeutet, dass der thermische Komfort nicht mehr nur anhand weniger stationärer Raumparameter bestimmt wird, sondern die Anwesenheit des Menschen und seine Interaktion mit der Umgebung modelliert werden kann. Im Gegensatz zu den bisherigen Ansätzen lassen sich damit die mitunter in hohem Maße instationären und heterogenen Bedingungen in einem Gebäude und ihre Auswirkungen auf das Wohlbefinden des Nutzers abbilden. Mit der Kopplung der thermophysiologischen Reaktion des Menschen an die klimatischen Bedingungen im Raum lassen sich in Zukunft neue Lösungen für ein auf die Nutzungsanforderungen abgestimmtes, thermisch behagliches Klima finden.

## METHODE

### Thermal Comfort Model

Im Rahmen dieser Untersuchung wird auf ein thermophysiologisches Modell (UCBerkeley Thermal Comfort Model) zurückgegriffen (Huizenga et al., 2001; Hoffmann et al., 2008), welches den menschlichen Körper in 16 Segmente (Kopf, Torso, rechter Oberarm, …) unterteilt. Durch diese hohe Genauigkeit sind auch die Effekte inhomogener Bedingungen, beispielsweise resultierend aus Temperaturschichtungen oder Strahlungsasymmetrien, darstellbar. Der hohe Grad an Detailliertheit ist aber auch notwendig, da Empfinden und Komfort selbst bei einheitlichen Randbedingungen für jedes Körperteil unterschiedlich sein können. Ferner wird jedes dieser Segmente in vier konzentrisch angeordnete Schichten zerlegt (Kern, Muskulatur, Fett, Haut). Der Wärme- und Feuchtigkeitstransport durch die Kleidung wird gegebenenfalls berücksichtigt (Voelker et al., 2009). Jedes Teilstück wird mit den ihm eigenen charakteristischen Parametern dargestellt. Jede Schicht eines jeden Segmentes ist an den Blutkreislauf gekoppelt, über den der konvektive Wärmeaustausch zwischen den Segmenten stattfindet. Daraus ergibt sich ein System aus einer Vielzahl nicht-linearer Differentialgleichungen, welches die Wärmebilanz des menschlichen Körpers repräsentiert.

Basierend auf der simulierten Temperaturverteilung des menschlichen Körpers ist das UCB Modell in der Lage, sowohl die thermische Behaglichkeit als auch das thermische Empfinden des Nutzers global als auch lokal zu bestimmen. Hintergrund ist die Korrelation des thermischen Empfindens mit der Hauttemperatur (Zhang et al., 2010).

### Kopplung an CFD

Nach der Eingabe des geometrischen Modells sowie der Ausgangsbedingungen werden die notwendigen Randbedingungen (Lufttemperatur, Strömungsgeschwindigkeit, etc.) mit Hilfe der numerischen Strömungssimulation für jedes der durch das thermophysiologische Modell definierten Segmente des menschlichen Körpers bestimmt. Anschließend erfolgt die Übergabe dieser Daten an das thermophysiologische Modell, welches sowohl die Temperaturverteilung im menschlichen Körper als auch die daraus resultierende Wärmeabgabe an das Raumklima bestimmt. Da diese wiederum das Raumklima beeinflusst, werden die Daten in einem iterativen Prozess an die Strömungssimulation übermittelt (Abbildung 1).

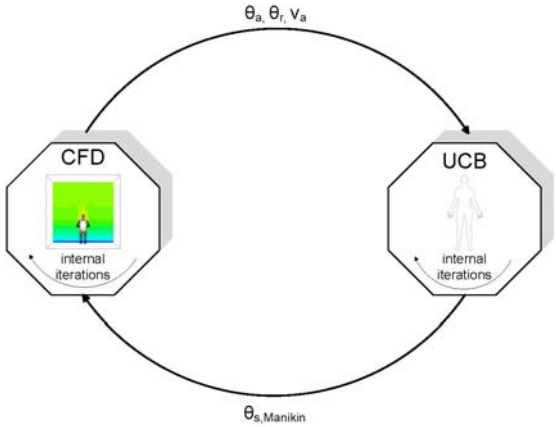


*Abbildung 1 Datenaustausch zwischen Strömungssimulation und dem thermophysiologischen Modell*

Ist das Konvergenzkriterium $\varepsilon \leq 0{,}1$ K (Gao et al., 2009) erreicht, wird durch das thermophysiologische Modell zunächst das lokale thermische Empfinden in Abhängigkeit von der lokalen sowie der global gemittelten Hauttemperatur mit Hilfe einer logistischen Funktion ermittelt. Die Bestimmung des thermischen Komforts erfolgt wiederum in Abhängigkeit des lokalen als auch des globalen Empfindens. Ein Funktionsschema der gesamten Kopplung ist in Abbildung 2 dargestellt.

### Mikroklima

Für die Übergabe der durch die Strömungssimulation ermittelten Randbedingungen ist eine profunde Kenntnis der den Menschen umgebenden klimatischen Verhältnisse nötig. Diese werden durch die Wärmeabgabe des menschlichen Körpers, welche bei sitzender Tätigkeit (z.B. Büroarbeit) etwa 130 W entspricht, beeinflusst. Das Resultat ist ein Mikroklima um den Bereich des menschlichen Körpers, mit einer langsam aufsteigenden Grenzschicht, die sich in Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit vom Raumklima deutlich unterscheidet.

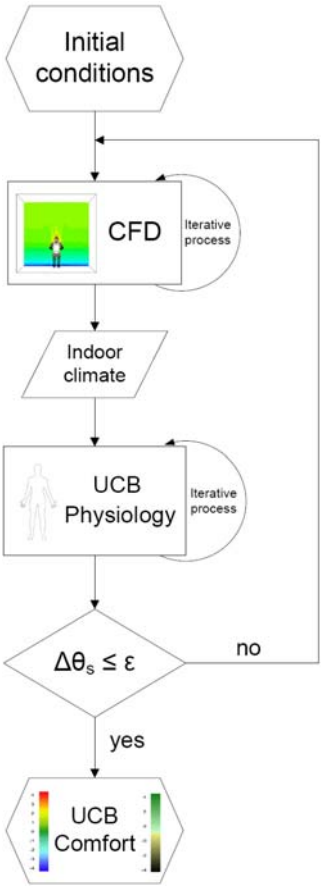


*Abbildung 2 Funktionsschema der Kopplung*

Die Grenzschichtdicke δ wurde bereits in (Murakami et al., 1997) untersucht: Unter dem Einfluß natürlicher Konvektion ist die Grenzschicht in dieser Untersuchung bezüglich der Geschwindigkeit im Fußbereich etwa 8 cm stark, mit zunehmender Höhe steigt dieser Wert allerdings auf circa 15 cm im Halsbereich an. Die thermische Grenzschicht unterscheidet sich mit 5 cm am Fuß, am Hals sind es unter den angenommen Bedingungen 19 cm.

In Abbildung 3 und 4 ist die Simulation des Strömungs- und Temperaturprofils im Bereich des menschlichen Körpers dargestellt. In der skalaren Darstellung von Abbildung 3 fällt auf, dass die Grenzschicht aufgrund der Wärmeabgabe des Menschen via Konvektion/Leitung deutlich über der Raumtemperatur liegende Temperaturen aufweist.

Dieser Temperaturgradient ist verantwortlich für einen Dichtegradienten, der im Falle der natürlichen Konvektion die Voraussetzung für den Massetransport darstellt. Die höchsten Lufttemperaturen sind im Bereich des Kopfes vorzufinden, da dieser unbekleidet ist und generell über eine verhältnismäßig hohe metabolische Aktivität verfügt.

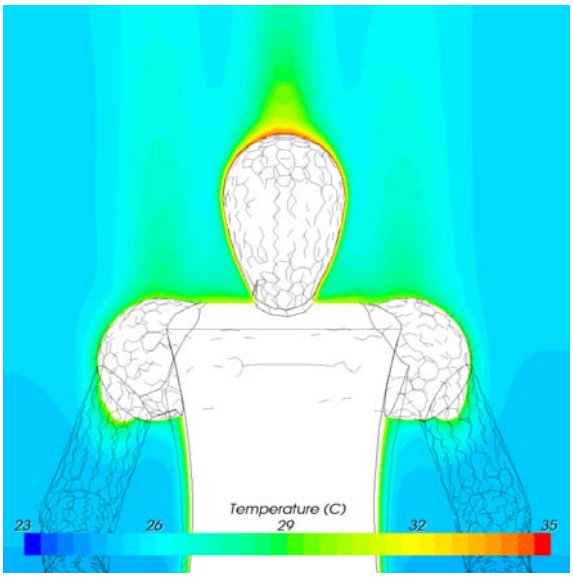


*Abbildung 3 Temperatur des Mikroklimas*

In Abbildung 4 ist die Strömungsgeschwindigkeit und -richtung des umgebenden Mikroklimas vektoriell dargestellt. Demnach werden in der Grenzschicht Strömungsgeschwindigkeiten von etwa 0,1 m/s erreicht, während im Plüm maximale Werte von bis zu 0,21 m/s vorgefunden werden können. Die Ergebnisse sind vergleichbar mit der Fachliteratur (Omori et al., 2004).

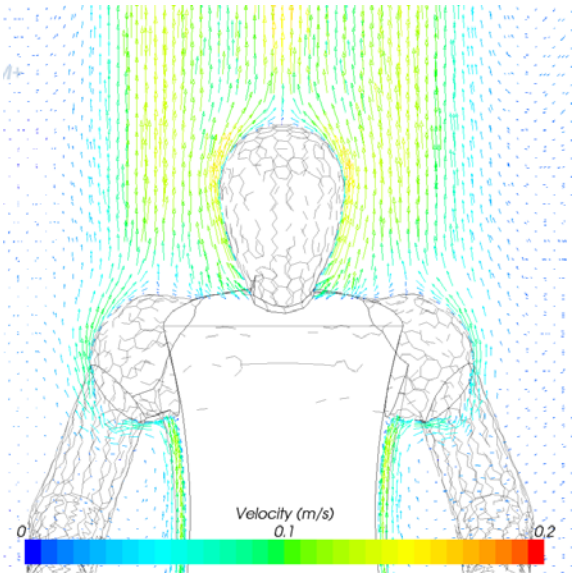


*Abbildung 4 Strömungsverhältnisse im Mikroklima*

Es wird ersichtlich, dass sich die klimatischen Bedingungen mit zunehmender Entfernung vom Körper dem eigentlichen Raumklima annähern. Das den Menschen umgebende Mikroklima ist jedoch abhängig von den jeweiligen Randbedingungen. Mangels besserer Kenntnisse werden allerdings häufig pauschale Werte angenommen (Gao et al., 2006; Gao et al., 2009).

In Abbildung 5 ist der simulierte Verlauf der Lufttemperatur in der den menschlichen Körper umgebenden Grenzschicht dargestellt. Die abgebildeten Funktionen basieren auf approximierten Punktwolken, die mit Hilfe der Strömungssimulation für die Grenzschicht des gesamten Körpers bestimmt wurden. Im vorliegenden Fall wurden Raumlufttemperaturen von 10 - 30°C simuliert, da die Raumtemperatur nicht nur den Kurvenverlauf, sondern auch die Oberflächentemperatur des Körpers beeinflusst.

Während die mittlere Oberflächentemperatur eines mit 0,8 clo bekleideten Menschen etwa 21,7°C bei einer Raumtemperatur von 10°C entspricht, ergibt die Simulation mit dem thermophysiologischen Modell etwa 32,7°C bei 30°C Raumtemperatur. Diese Werte sind allerdings stark abhängig vom jeweiligen Körpersegment.

Generell ist zu erkennen, dass sich die Lufttemperatur erwartungsgemäß mit zunehmender Entfernung vom Körper der Raumlufttemperatur nähert. Bei einer Raumtemperatur von 22°C (Oberflächentemperatur des Menschen 28,4°C) entspricht der Anstieg der approximmierten Funktion im Abstand von 10 cm lediglich -0,02 K/cm, was auf Ende der Grenzschicht hinweist

Allerdings ist auch festzustellen, dass die Charakteristik der Grenzschicht stark von der Körperposition sowie dem Körpersegment abhängig ist (Murakami 2002; Murakami 2004). Berücksichtigt man zusätzlich die Atmung, sind wiederum andere Ergebnisse feststellbar (Gao et al., 2004). Weitere, detailliertere Untersuchungen sind daher nötig.

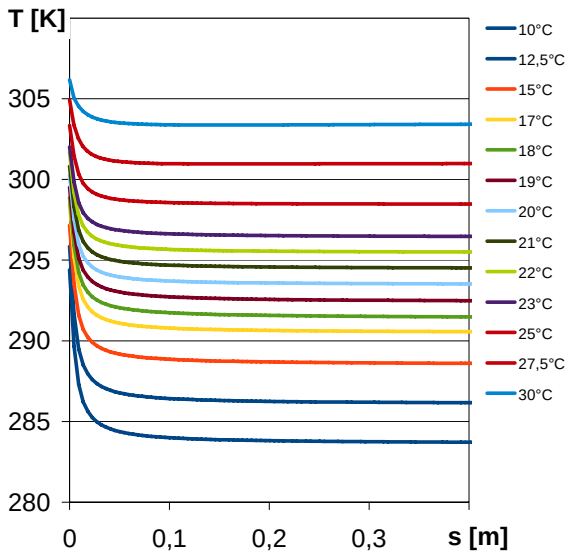


*Abbildung 5 Simulation der Grenzschicht – Abnahme der Lufttemperatur mit zunehmender Entfernung vom menschlichen Körper bei unterschiedlichen Raumtemperaturen*

## SIMULATION

### Geometrie & Gittergenerierung

Grundlage der Simulation ist die Eingabe eines Geometriemodells und der entsprechenden Gittergenerierung. Dafür wurde eine einfache, beispielhafte Raumgeometrie (3 m x 3 m x 3 m) ausgewählt (Abbildung 6).

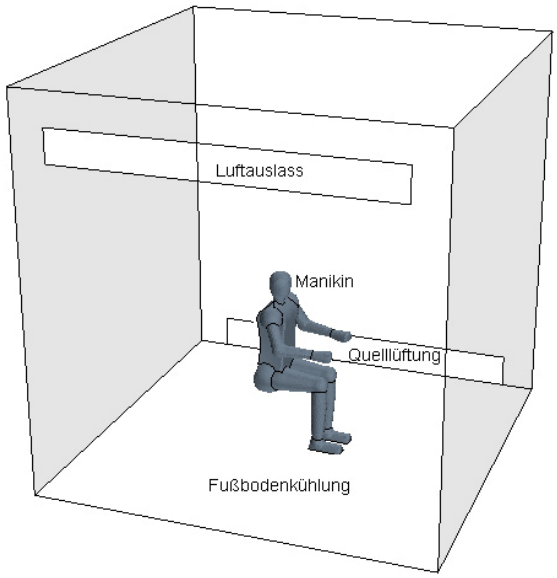


*Abbildung 6 Geometrie des simulierten Raumes*

In der Mitte des Raumes ist eine menschliche Geometrie platziert, deren Maße in etwa einem durchschnittlichen Europäer nach (Neufert 2005) entsprechen. Es wurde eine sitzende Position gewählt, die ausgestreckten Arme stellen eine Arbeitshaltung am Schreibtisch dar. Die Geometrie der Haare sowie der Bekleidung wurde nicht modelliert, da deren Einfluss auf die Strömungssimulation vernachlässigbar klein ist. Der Einfluss der Kleidung auf den Wärmestrom von der Oberfläche der menschlichen Geometrie zur Umgebung wird allerdings durch das thermophysiologische Modell berücksichtigt. Auch auf Einrichtungsgegenstände wird verzichtet, da diese Strömungen und Temperatur des menschlichen Mikroklimas nur bedingt beeinflussen und außerdem nur schwierig allgemeingültigen Positionen zugeordnet werden können.

Von der Qualität des Gitters hängt die Genauigkeit der Simulation ab. Die Gittergenerierung erfolgt mittels Polyederzellen. In Erwartung hoher Gradienten ist das Gitter aus Gründen der Genauigkeit um den Bereich des menschlichen Körpers detaillierter. Dabei wurde auf ein auf 25 % verfeinertes, strukturiertes Gitter zurückgegriffen, wobei manikinnahe Schichten mit Prismen (Expansionkoeffizient 1,5) zur akuraten Model-

lierung des Wärmeübergangs sowie der Turbulenz versehen wurden (Abbildung 7).

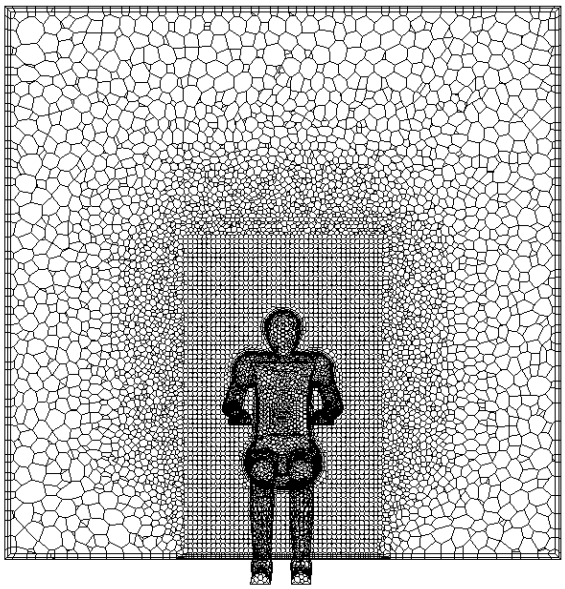

*Abbildung 7 Gittergenerierung*

**Randbedingungen**

Für die Simulation ist ein Lufteinlass in Form einer Quelllüftung (v=0,1 m/s, A=1,25 m², n=16 $h^{-1}$) im unteren Bereich der Seitenwand vorgesehen. Ein kongruenter Auslass befindet sich deckennah auf der gegenüberliegenden Seite. Da die Kühlung des Raumes allein von der Flächenkühlung übernommen wird, ist eine zusätzliche Kühlung der einströmenden Luft (θ=26°C) nicht vorgesehen.

Um Kondensationseffekte zu vermeiden, wird in den Simulationen die Oberflächentemperatur der gekühlten Fläche mit 19°C angesetzt. Die restlichen Flächen weisen eine Temperatur von 26°C auf. Es wird davon ausgegangen, dass die Oberflächentemperaturen gleichförmig sind.

*Tabelle 1*
*Numerische Methoden & Randbedingungen*

| | |
|---|---|
| Turbulenzmodell | k-ω |
| Algorithmus | coupled flow |
| Walls | θ=26°C bzw. $\theta_{Boden}$=19°C |
| Mesh | Polyhedral & Prism Layer (~500.000) |
| Inlet | v=0,1m/s, A=1,25m²; θ=26°C |
| Manikin | Oberflächentemperatur der 16 Segmente entsprechend der Kopplung<br>Bekleidung: 0,8 clo<br>Aktivität: 1,2 met<br>Luftfeuchtigkeit: 50 % |

Es werden lediglich sensible, also 'trockene' Lasten, berücksichtigt. Die Simulation der Luftfeuchtigkeit wird vernachlässigt, da der Einfluss auf die thermische Behaglichkeit in gewissen Grenzen als gering betrachtet werden kann. Auch auf die Simulation der Atmung wird verzichtet, da der Atemzyklus nur instationär sinnvoll betrachtet werden kann.

**Simulation**

Im ersten Schritt wird, nach der Eingabe der Initialtemperaturen an der Oberfläche der menschlichen Geometrie, das durch die Flächenkühlung konditionierte Innenraumklima durch die Strömungssimulation bestimmt. Die iterative Näherungslösung der Erhaltungssätze von Impuls, Masse und Energie ('Navier-Stokes'-Gleichung) wird durch den CFD-Code StarCCM+ umgesetzt. Zur Beschreibung turbulenter Luftströmungen wird, wie in (Cropper et al., 2009), auf das Zwei-Gleichungs-Modell k-ω zurückgegriffen. Da die Strömungsbedingungen als zeitlich konstant betrachtet werden können, wurde der stationäre Fall simuliert. Durch seine explizite Eignung für Auftriebsströmungen wurde das 'coupled flow model', welches Massen- und Impulssatz gleichzeitig löst, verwendet (CD-adapco 2005).

**Ergebnis**

In Abbildung 8 ist das Temperaturprofil der Simulation dargestellt. Auch hier ist die Grenzschicht, ein Resultat der konvektiven Wärmeabgabe des menschlichen Körpers, deutlich erkennbar. Die Lüftung ist deutlich in der rechten unteren Ecke an der mit einer Temperatur von 26°C einströmenden Luft zu identifizieren. Die Quelllüftung sorgt – trotz der verhältnismäßig warmen Temperatur – für eine Verteilung der Kühllast der Fußbodenkühlung. Die vertikale Temperaturschichtung zwischen Knöchelhöhe (0,1 m) und Kopfhöhe (1,1 m) fällt aufgrund der mischenden Lüftung relativ gering aus, sodass die normativen Vorgaben nach DIN EN ISO 7730 eingehalten werden.

Das sich im Beispielraum einstellende Strömungsprofil ist in Abbildung 9 dargestellt. In diesem Fall wird der Strömungsverlauf (Streamlines) zur menschlichen Geometrie (backward) bzw. von Menschen weg (forward) gezeigt. Dabei wird offensichtlich, dass die hier beispielhaft angeordnete Lüftung eine hohe Luftqualität sicherstellen kann. Der Nutzer wird aus dem in Fußbodennähe angebrachten Lufteinlass direkt mit Frischluft versorgt. Aufgrund der niedrigen Geschwindigkeit (<0,1 m/s) sind keine Zugerscheinungen zu erwarten.

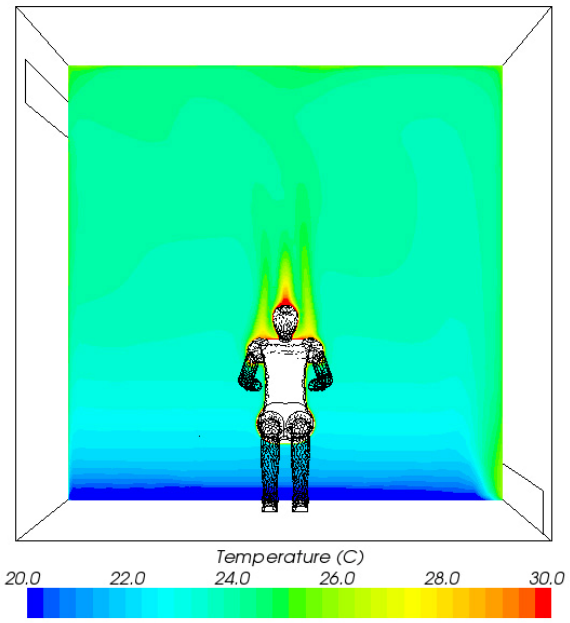


*Abbildung 8 Temperaturprofil mit Fußbodenkühlung und Quelllüftung*

Die verbrauchte und aufgrund der Wärmeabgabe des Menschen aufsteigende Luft wird direkt über den in Deckennähe angeordneten Auslass abtransportiert. Wie in Abbildung 4 sind auch hier im Bereich der den menschlichen Körper umgebenden Grenzschicht Strömungsgeschwindigkeiten von etwa 0,1 m/s festzustellen. Im Plüm werden durch den zusätzlichen Impuls der in den Raum einströmenden Luft Geschwindigkeiten von etwa 0,3 m/s erreicht (Abbildung 9).

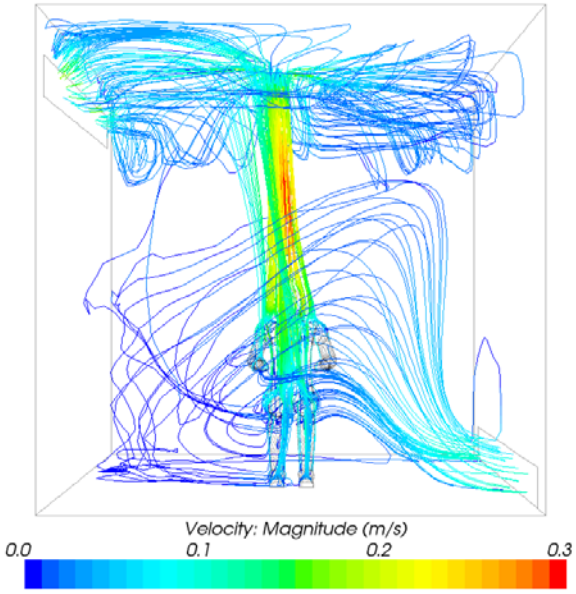


*Abbildung 9 Strömungsgeschwindigkeit & Streamlines*

Die Auswertung der Behaglichkeit erfolgt, ähnlich der im anfänglich erwähnten PMV-Modell verwendeten Einteilung, auf einer Skala von -4 (sehr unkomfortabel) bis +4 (sehr komfortabel). Die Untersuchung der thermischen Behaglichkeit der einzelnen Körperpartien ist in Abbildung 10 veranschaulicht. Demnach befinden sich alle Körperteile in einem weitgehend behaglichen Zustand. Unterschiede, die durch die inhomogenen Bedingungen (einströmende Luft) hervorgerufen werden können, sind auf Grund der niedrigen Geschwindigkeit nicht zu beobachten. Der aufgrund der hohen Thermosensitivität für die globale Behaglichkeit wichtige Kopf wird als *komfortabel* eingestuft. Die Füße hingegen können lediglich als *noch komfortabel* bezeichnet werden. Global betrachtet wird der Wert 0,9 erreicht, was als *noch komfortabel* empfunden wird.

Das thermische Empfinden hingegen wird auf einer Skala von -4 (sehr kalt) bis +4 (sehr warm) dargestellt, im Unterschied zur Behaglichkeit ist die Zielgröße folglich 0. In der Beispielsimulation entspricht das thermische Empfinden 0,38, ein aus Sicht des thermischen Empfindens *neutraler* Wert.

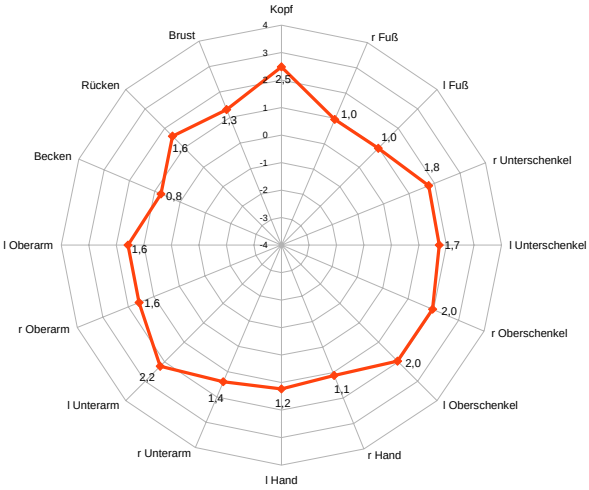


*Abbildung 10 Lokale thermische Behaglichkeit*

## ZUSAMMENFASSUNG

Es wurde eine Methode zur Bewertung der thermischen Behaglichkeit und Empfindung vorgestellt, bei der die numerische Strömungssimulation an ein thermophysiologisches Modell gekoppelt wird. Dabei werden in einem ersten Schritt die raumklimatischen Bedingungen mit Hilfe der Strömungssimulation detailliert bestimmt. Diese Randbedingungen dienen als Input für ein so genanntes thermophysiologisches Modell. Im vorliegenden Fall wird auf das an der UC Berkeley entwickelte Modell zurückgegriffen. Dieses simuliert die Wärmeabgabe des menschlichen Körpers sowie die daraus resultierende Verteilung der Oberflächen-, Haut- und Kerntemperaturen. In einem iterativen Verfahren dienen die so gewonnenen Ergebnisse als Randbedingung in einer erneuten CFD-Simulation.

Nachdem das Konvergenzkriterium erreicht ist, kann sowohl die thermische Behaglichkeit als auch das thermische Empfinden bestimmt werden.

Dieses Verfahren wurde auf die Untersuchung des den menschlichen Körper umgebenden Mikroklimas angewendet. Beispielhaft wurden weiterhin die raumklimatischen Verhältnisse im Fall einer Fußbodenkühlung simuliert. Dabei konnte im vorliegenden Fall festgestellt werden, dass der Einbau einer Quelllüftung für eine gleichmäßige Verteilung der Kühllast der aus konvektiver Sicht benachteiligten Fußbodenkühlung sorgt. Eine die thermische Behaglichkeit beeinträchtigende vertikale Temperaturschichtung konnte demzufolge nicht festgestellt werden. Da allerdings nur ein exemplarischer Fall untersucht wurde, sind weitere, umfangreichere Untersuchungen notwendig.

Abschließend ist festzustellen, dass sich das vorgestellte Verfahren zur Untersuchung der thermischen Behaglichkeit unter Berücksichtigung inhomogener klimatischer Bedingungen sowie der menschlichen Physiologie eignet.

## DANKSAGUNG

Diese Publikation ist im Rahmen des Forschungsprojektes „Methoden und Baustoffe zur nutzerorientierten Bausanierung“, welches vom Bundesministerium Bildung und Forschung (BMBF) gefördert wird, entstanden. Dank gilt weiterhin dem Center for the Built Environment der UC Berkeley.

## LITERATUR

CD-adapco 2005. STAR-CCM+ Version 3.06.006.

Cropper, P. C., Yang, T., Cook, M. J., Fiala, D. & Yousaf, R. 2009. Simulating the effect of complex indoor environmental conditions on human thermal comfort. Building Simulation 2009, Glasgow, Scotland.

Fanger, P. O. 1970. Thermal Comfort: Analysis and applications in environmental engineering. Copenhagen: Danish Technical Press.

Fanger, P. O. 1977. Local discomfort to the human body caused by non-uniform thermal environments. The annals of occupational hygiene 20 (3): 285-291.

Gao, N. & Niu, J. 2004. CFD study on micro-environment around human body and personalized ventilation. Building and Environment 39 (7): 795-805.

Gao, N., Niu, J. & Zhang, H. 2006. Coupling CFD and human body thermoregulation model for the assessment of personalized ventilation. HVAC&R Research 12 (3): 497-518.

Gao, N. P., Niu, J. & Zhang, H. 2009. Coupling outer-body airflow and inner-body thermoregulation models to predict thermal comfort in nonuniform environments. Building Simulation, Glasgow, Scotland.

Hoffmann, S., Kornadt, O., Arens, E., Zhang, H. & Huizenga, C. 2008. Simulationssoftware zur Berechnung der lokalen Behaglichkeit in einem Raum. BauSim, Kassel.

Huizenga, C., Hui, Z. & Arens, E. 2001. A model of human physiology and comfort for assessing complex thermal environments. Building and Environment 36: 691-699.

Murakami, S. 2002. CFD study on the micro-climate around the human body with inhalation and exhalation. Roomvent 2002, Copenhagen, Denmark.

Murakami, S. 2004. Analysis and design of micro-climate around the human body with respiration by CFD. Indoor Air 14 (7): 144-156.

Murakami, S., Kato, S. & Zeng, J. 1997. Flow and temperature fields around human body with various room air distribution. CFD study on computational thermal manikin - Part 1. ASHRAE Transactions 103 (1): 3-15.

Neufert, E. 2005. Bauentwurfslehre. Wiesbaden, Germany: Vieweg+Teubner Verlag.

Omori, T., Yang, J. H., Kato, S. & Murakami, K. 2004. Coupled simulation of convection and radiation on thermal environment around an accurately shaped human body. Roomvent2004, Coimbra, Portugal.

Richter, W., Gritzki, R., Knorr, M., Müller, I., Perschk, A. & Rösler, M. 2007. Thermische Behaglichkeit unter sommerlichen Bedingungen bei Berücksichtigung verschiedener Raumkühlungsverfahren. Abschlussbericht. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.

Rubner, M. 1887. Biologische Gesetze. Marburg.

Voelker, C., Hoffmann, S., Kornadt, O., Arens, E., Zhang, H. & Huizenga, C. 2009. Heat and moisture transfer through clothing. Proceedings of Building Simulation, Glasgow, Scotland, 27th-30th July 2009.

Zhang, H., Arens, E., Huizenga, C. & Han, T. 2010. Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments: Part I: Local sensation of individual body parts. Building and Environment 45 (2): 380-388.