

GEKOPPELTE SIMULATION DER THERMISCHEN UMGEBUNG UND DES THERMISCHEN KOMFORTS MIT EINEM ERWEITERTEN TANABE MODELL

Rita Streblow¹, Dirk Müller¹ und Ingo Gores²

¹E.ON Energieforschungszentrum, RWTH Aachen, Deutschland

²Airbus Germany GmbH, Hamburg, Deutschland

Email: rita.streblow@eonerc.rwth-aachen.de

KURZFASSUNG

Thermische Umgebungsbedingungen in Räumen und Fahrzeuginnenräumen zeigen sehr komplexe Strukturen und Asymmetrien. Zur Bewertung des thermischen Komforts sind somit Modelle notwendig, die eine instationäre lokale Auflösung der Umgebung ermöglichen. Hierfür wurde das physiologische Tanabe Modell in der objektorientierten Programmiersprache Modelica integriert. Für eine Überführung der physiologischen Größen in eine Komfortbewertung wurde das Modell um ein psychologisches Modell basierend auf dem Zhang Modell erweitert. Das Gesamtmodell wird in einem Optimierungsprozess anhand umfangreicher eigener experimenteller Daten kalibriert. Detailinformationen der Umgebungsbedingungen können dabei einer Kopplung zwischen dem 1D Komfortmodell und einer 3D Strömungssimulation in ANSYS CFX entnommen werden.

ABSTRACT

Thermal ambient conditions in rooms and inside cabins and vehicles show very complex and asymmetrical structures. For an evaluation of the thermal comfort models are necessary, which allow a transient and local resolution of the environment. The Tanabe model has this ability and is chosen for an implementation in the object oriented programming language Modelica. For the conversion of the physiological results of the Tanabe model a psychological model based on the Zhang model is appended. The whole model is calibrated to a large experimental database in an optimization process. A coupling between the 1D-comfort simulation and a three dimensional flow simulation using the commercial flow solver ANSYS CFX gives detailed information of the ambient conditions.

EINLEITUNG

Physiologische Komfortmodelle geben eine mathematische Beschreibung der menschlichen Reaktionen auf ihre thermische Umgebung. Die Modelle können als eine Erweiterung einer Wärmebilanzgleichung angesehen werden, mit dem Ziel einen Komfortindex zu erhalten. Der Begriff

thermisches Modell ist normalerweise mit einer dynamischen numerischen Simulation des menschlichen Körpers und seinem Antwortverhalten verbunden, unter Berücksichtigung des passiven und aktiven Systems. Der Unterschied der Modelle liegt in der Auflösung des passiven und aktiven Systems. Das passive System umfasst die menschliche Physiologie. Hier reicht die Bandbreite vom Einknotenmodell über Mehrknotenmodelle bis hin zum hoch aufgelösten FEM-Modell. Das aktive System umfasst die Kontrollmechanismen der Vasomotorik, sowie das Kältezittern und Schwitzen. Auch hier variiert der Detailgrad. Ein einfacher Ansatz für die Vasomotorik ist z.B. die Verschiebung des Verhältnisses zwischen Kern und Hülle. In höher auflösenden Modellen wird demgegenüber der Blutfluss variiert.

In umfangreichen experimentellen Untersuchungen hat sich gezeigt, dass Probanden in ihrer Bewertung des thermischen Komforts eine klare Unterscheidung für mehrere Körpersegmente treffen können. Die lokale thermische Bewertung korreliert dabei sehr gut mit den Strömungsstrukturen, die ein transientes und komplexes Verhalten zeigen. Basierend auf diesen Ergebnissen wurde das Tanabe Modell als Basismodell für ein optimiertes Komfortmodell gewählt.

BASISMODELLE

Physiologisches Modell

Das Tanabe-Modell (Tanabe et al. 2002) unterteilt den menschlichen Körper in 16 Segmente (Kopf, Bauch, Rücken, Arme, Hände, Ober- und Unterschenkel, Füße) mit jeweils vier Schichten, bestehend aus Kern, Muskel, Fett und Haut. Alle Knoten sind über den zentralen Blutknoten miteinander verbunden. Abbildung 1 zeigt das in Modelica implementierte Modell in der graphischen Oberfläche von dymola. Das Modell ist über Konnektoren für Lufttemperatur, -feuchte, -geschwindigkeit und operative Temperatur mit der Umgebung verbunden.

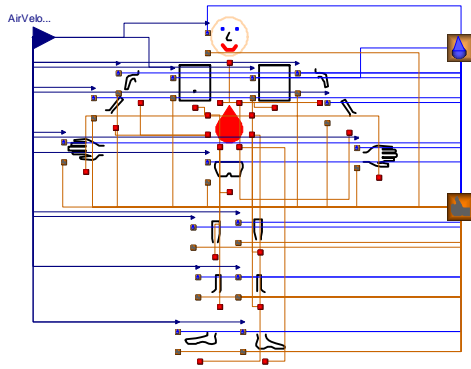


Abbildung 1 Tanabe Modell

Als physiologisches Modell liefert das Tanabe Modell Ausgangsgrößen, wie z.B. die Hautoberflächentemperatur.

Psychologisches Modell

Um aus den physiologischen Größen des Tanabe Modells einen Komfortindex ableiten zu können wird das Modell um ein psychologisches Modell erweitert, das auf dem Zhang Modell (Zhang 2003) basiert.

Das lokale thermische Empfinden wird durch eine logarithmische Funktion der lokalen Hauttemperatur beschrieben. Die Basis für den lokalen thermischen Komfort ist eine abschnittsweise lineare Funktion deren Steigung und Maximum von Körperteil zu Körperteil variiert. Das gesamte thermische Empfinden wird als gewichtetes Mittel der lokalen Empfindungen gebildet.

ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Abbildung 2 zeigt eine Gegenüberstellung zwischen dem lokalen thermischen Empfinden in der Simulation und dem Experiment. Die experimentellen Daten beruhen auf einer Komfortbewertung durch 40 Probanden. Die genauen Umgebungsbedingungen wurden einer 3D Strömungssimulation entnommen. Man kann erkennen, dass es noch deutliche Differenzen zwischen Simulation und Experiment gibt.

Physiologische Modelle enthalten eine Vielzahl von Koeffizienten, die nicht physikalisch hergeleitet werden können, sondern experimentell bestimmt werden müssen. Für diese Bestimmung werden oftmals Messungen mit thermischen Mannequins in einer beschränkten Anzahl von Umgebungsbedingungen eingesetzt. Die Modelle haben somit auch nur einen eingeschränkten Gültigkeitsbereich.

Das Zhang Modell beruht auf einer großen experimentellen Basis jedoch nur mit Versuchen bei denen gezielt einzelne Körperteile gekühlt bzw. erwärmt wurden.

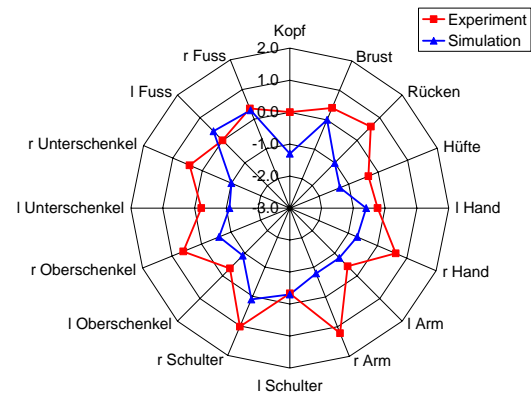


Abbildung 2 Lokales thermisches Empfinden im Experiment und in der Simulation

Um eine maximale Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment zu erzielen, wird das Gesamtmodell in einem Kalibrierungsprozess optimiert.

OPTIMIERUNG

In einer Sensitivitätsanalyse des Modells wurden relevante Modellparameter für die Optimierung ermittelt. Abbildung 3 zeigt den Optimierungsprozess. Die experimentellen Randbedingungen werden als Eingangsgrößen für das Komfortmodell übernommen. Fehlende Größen, wie z.B. der konvektive Wärmeübergang werden einer 3D Strömungssimulation entnommen. Da der menschliche Körper mit seiner Reaktion auf die Umgebungsbedingungen auf diese auch wieder zurückwirkt, kann das thermische Komfortmodell in Modelica auch mit einer numerischen Strömungssimulation in dem kommerziellen Tool CFX gekoppelt werden. Die Kopplung läuft über einen Server (TISC). Die Abweichung des lokalen thermischen Empfindens zwischen Simulation und Experiment ist Eingangsgröße für einen in matlab durchgeführten Optimierungsprozess.

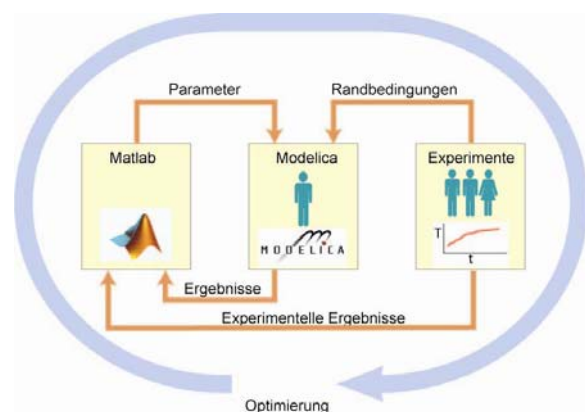


Abbildung 3 Optimierungsprozess

ZUSAMMENFASSUNG

Das Tanabe-Modell bietet im Vergleich zu anderen Komfortmodellen eine gute Basis für Komfortvorhersagen in ungleichförmigen und instationären Umgebungsbedingungen. Durch die Erweiterung um ein psychologisches Modell kann das thermische Empfinden bestimmt werden. Durch die Implementierung des Gesamtmodells in eine Komfortbibliothek für Modelica ist ein flexibles Werkzeug entstanden, das an eine Strömungssimulation in ANSYS CFX gekoppelt und durch einen Optimierungsalgorithmus an unterschiedliche experimentelle Daten angepasst werden kann. Der Anwendungsbereich dieses Komfortmodells kann im Vergleich zu einer Vielzahl bereits existierender Modelle somit deutlich erweitert werden.

LITERATUR

- Tanabe, S., Kobayashi, K. et al. 2002. Evaluation of thermal comfort using combined multi-node thermoregulation (65MN) and radiation models and computational fluid dynamics (CFD), *Energy and Buildings* 34, pp. 637-646
- Zhang H. 2003. Human thermal sensation and comfort in transient and non-uniform thermal environments, Doctoral Dissertation, University of California, Berkeley, USA