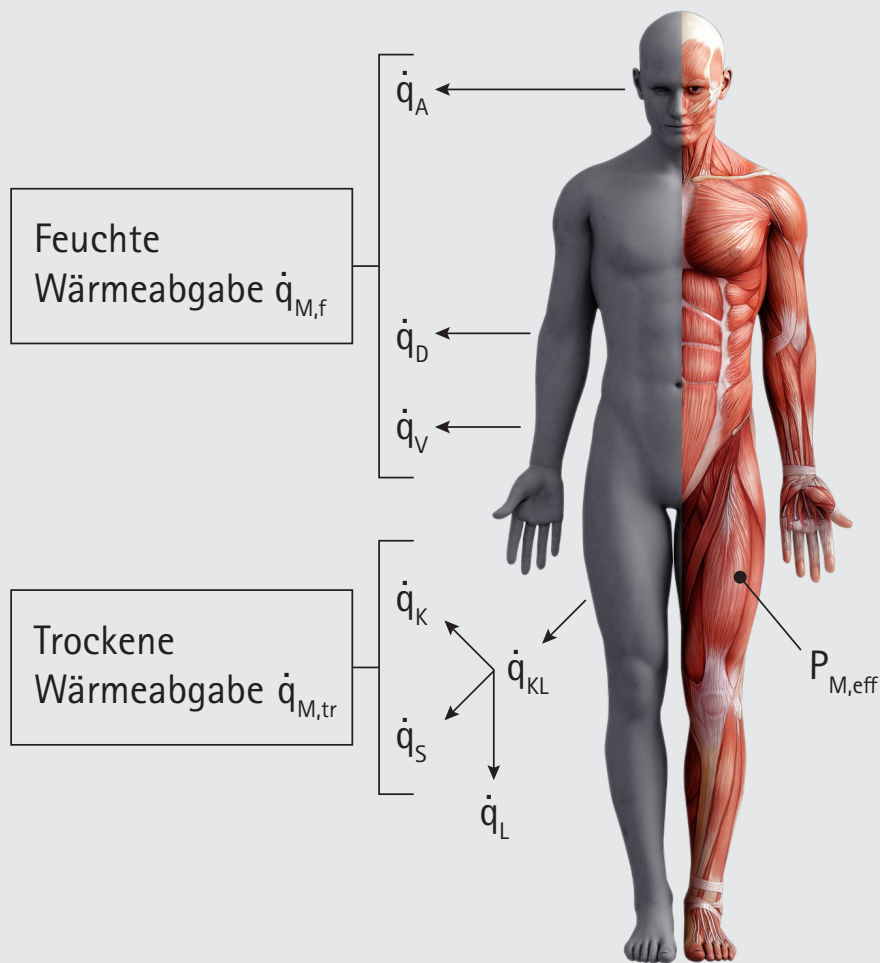


G I

Gebäudetechnik in Wissenschaft & Praxis



- ▶ Thermischer Komfort – Ein Überblick über Wissenschaft und Normung
- ▶ Personenorientierte Klimatisierungssysteme – eine Übersicht über aktuelle und zukünftige Ansätze, Teil 1
- ▶ Strahlungsasymmetrie und deren Bewertung – Ergebnisse einer aktuellen Analyse
- ▶ NOODEL – 33-Knoten-Komfortmodell
- ▶ Neue Klimadaten für die Heizlastberechnung
- ▶ Ist der Rebound-Effekt unvermeidbar?
- ▶ Die stromerzeugende Pelletheizung – Ganzjährig Strom und Wärme aus Pellets und Solar selbst erzeugen



Smart Building –

mit WAGO auf dem Weg zum
intelligenten Gebäude

Wissen über Technologien und Methoden ist essentiell für Ihren Projekterfolg. WAGO begleitet Sie auf dem Weg in die digitale Zukunft. Vertiefen Sie **Ihr Wissen** mit Hilfe von **White Papers, Webinaren und Experteninterviews** zu aktuellen Fragen. Wir rüsten Sie mit unserm Know-how.

www.wago.com/smart-building





Liebe Leserinnen und Leser,

Fragen zur thermischen, hygienischen, akustischen und visuellen Behaglichkeit stellen die Grundlage für die Auslegung und den Betrieb von technischen Systemen im Gebäude dar und werden derzeit durch die DIN EN ISO 7730, die DIN EN 15251 / prEN 16798-1 sowie die ISO 17772 wiedergespiegelt. Die nationalen und internationalen Aktivitäten zur Behaglichkeitsforschung sind sehr verschieden und verfolgen unterschiedliche Zielrichtungen. Zu

nennen sind in der Vergangenheit besonders die Arbeiten von Fanger, der aus verschiedenen Arbeiten ein einfaches Gesamtmodell auf Basis der Bilanzierung der am menschlichen Körper auftretenden Wärmeströme ableitet. Wesentlicher Beitrag von Fanger war hierbei, dass er die Wärmebilanzen durch zahlreiche Probandenuntersuchungen bewertbar machte. Das Modell von Fanger wird heute durch die ISO 7730 einer breiten Anwendung zugeführt. Darüber hinaus existieren jedoch zahlreiche weitere Forschungsergebnisse, die weit über die Arbeiten von Fanger hinausgehen. Zu nennen sind hier insbesondere Modelle, mit denen die Wärmeströme am menschlichen Körper regionenspezifisch bestimmt werden können, was in der Praxis eine verlässlichere Vorhersage bedeutet. Neben den detaillierten Modellen, die auf einer Wärmestrombilanzierung beruhen, sind auch weitere Behaglichkeitsmodelle dokumentiert, die als sogenannte „adaptive“ bzw. „wahrgenommene“ Modelle bezeichnet werden. Verwiesen sei hierzu auf den sommerlichen Kühlfall, für den Modelle bekannt sind, die nicht auf eine starre operative Raumtemperatur fokussieren, sondern einen Bereich von Raumtemperaturen in Abhängigkeit der Außentemperatur und der Art der Anlagentechnik vorschlagen. Ähnlich wie bei der thermischen Behaglichkeit sind auch bei der hygienischen (Lüftungstechnischen), der visuellen und akustischen Behaglichkeit verschiedene Modelle und Bewertungsmethoden verfügbar.

Die GI 6/2018 widmet sich ausschließlich der Thematik der thermischen Behaglichkeit. Im ersten wissenschaftlichen Artikel wird ein Überblick zur wärmephysiologischen Forschung im Ganzen gegeben. Der zweite wissenschaftliche Artikel befasst sich mit Fragestellungen des lokalen thermischen Komforts und stellt hierbei Erkenntnisse zu personenorientierten Klimatisierungssystemen in den Mittelpunkt der Betrachtungen. Der dritte wissenschaftliche Artikel befasst sich mit den Aspekten der Strahlungsasymmetrie bezogen auf eine Halbraumbetrachtung. Ausführlich werden in diesem Artikel die Wechselwirkung warmer und kalter Oberflächen, die sich einstellenden Lufttemperaturgradienten sowie die Bewertung des Raumklimas durch Probanden diskutiert. Im abschließenden vierten Artikel werden ein weiterentwickeltes Personenmodell und dessen Validierung betrachtet.

Am Ende des Jahres 2018 möchte die GI-Redaktion sich herzlich bei allen Leserinnen und Lesern bedanken und Ihnen ein gesegnetes Weihnachtsfest sowie einen guten Start ins Jahr 2019 wünschen.

PD Dr.-Ing. habil. J. Seifert

Prof. Dr.-Ing. B. Oschatz

STANDPUNKT

Fragen zur thermischen, hygienischen, akustischen und visuellen Behaglichkeit stellen die Grundlage für die Auslegung und den Betrieb von technischen Systemen im Gebäude dar.
Joachim Seifert, Bert Oschatz

443

WISSENSCHAFT

Thermischer Komfort – Ein Überblick über Wissenschaft und Normung Thermal Comfort – an Overview of Research and Standards <i>Kai Rewitz, Mark Wesseling, Dirk Müller</i>	446
Personenorientierte Klimatisierungssysteme – eine Übersicht über aktuelle und zukünftige Ansätze, Teil 1 Personal Environmental Control – an Overview of Existing and Future Approaches, Part 1 <i>Alexander Warthmann, Daniel Wölki, Henning Metzmacher, Christoph van Treeck</i>	460
Strahlungsasymmetrie und deren Bewertung – Ergebnisse einer aktuellen Analyse Radiation Asymmetry and its Evaluation – Results of a Current Study <i>Joachim Seifert, Lars Schinke, Maximilian Beyer</i>	480
NOODEL – 33-Knoten-Komfortmodell NOODEL – 33 NODe cOmfort moDEL <i>Rita Streblov, Dirk Müller</i>	488

FACHWISSEN

Neue Klimadaten für die Heizlastberechnung New Climate Data for the Calculation of Heat Load <i>Bernadetta Winiewska, Bert Oschatz</i>	502
Ist der Rebound-Effekt unvermeidbar? <i>Franz Peter Schröder, Christopher Intsiful</i>	510

PRAXISWISSEN

Die stromerzeugende Pelletheizung – Ganzjährig Strom und Wärme aus Pellets und Solar selbst erzeugen <i>Beate Schmidt-Menig</i>	518
Systemlösung für hohe Behaglichkeit <i>Markus Steiner</i>	524



Titel: Thermodynamische Bilanz am menschlichen Körper.
Mehr darüber erfahren Sie ab **Seite 480**. (Quelle: adimas/Fotolia.com)

WISSENSWERT

Push-Pull-Prinzip – dezentrale Wohnungslüftung – ist dies nachhaltig? <i>Achim Trogisch</i>	530
CEGA etabliert sich als bedeutender Branchenkongres <i>GI-Redaktion</i>	534
Behaglichkeit effizient realisieren – Trends und Zukunftsaussichten im Heizungsmarkt <i>Burkard Maier</i>	538
Raumdecken als Strahlungsflächen zur Raumtemperierung <i>Roth Werke GmbH</i>	542

SERVICES\STANDARDS

Patentschau	546
Firmenverzeichnis	550
Impressum	554
Termine	Umschlag

Anzeige

GAS-DAMPFBEFEUCHTER GTS für Innen- und Außenaufstellung

KAUT
THE AIR COMPANY



- Acht Leistungsgrößen mit einer Dampfleistung von 34 bis 272 kg/h
- Master/Slave-Geräteverbund mit einer Dampfleistung von bis zu 4.352 kg/h
- PID-Feuchteregler mit VAPOR – LOGIC® Steuerung
- Interfunktionsfähigkeit zu GLT-Systemen durch Modbus- und BACnet-Anbindung
- Eingebauter Ablaufkühler
- Komfortable Gerätekonfiguration
- Markierung von Störmeldungen mit Zeitstempel und Echtzeituhr

Tel. 02 02 - 26 82 230 | info@kaut.de

NOODEL – 33-Knoten-Komfortmodell

Das Mehrknotenkomfortmodell NOODEL setzt sich aus einem thermophysiologicalen Körpermodell und einem psychologischen Modell zur Vorhersage des Komfortempfindens abgeleitet aus dem physiologischen Körperzustand zusammen. NOODEL basiert auf dem 33-Knoten-Komfortmodell, das mittels einer erweiterten Validierung des physiologischen Modells anhand von Literaturdaten und einer Neuformulierung des psychologischen Modells anhand eigener experimenteller Daten zur neuen Version NOODEL weiterentwickelt werden konnte. Der Artikel stellt das überarbeitete Modell vor, welches vollständig als offenes Softwareprojekt bezogen werden kann.

NOODEL – 33 NDe cOmfort moDEL

The multi-node comfort model NOODEL consists of a thermophysiological human body model and a psychological model for predicting thermal sensation and comfort derived from the physiological state of the body. By means of an extended validation of the physiological model based on literature data and a reformulation of the psychological model based on own experimental data, the 33 node comfort model as base version could be improved substantially to the new version NOODEL. This article presents the revised model, which is part of an open source activity of our institute.



VON
RITA STREBLOW
DIRK MÜLLER

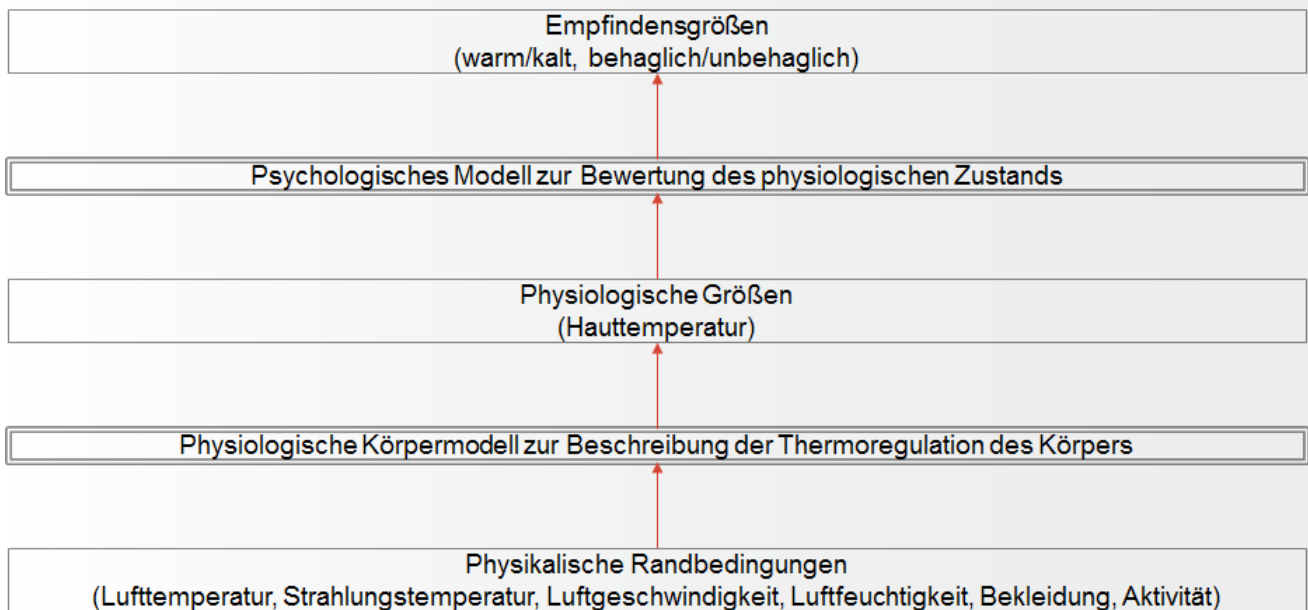


Bild 1: Struktur von NOODEL und Eingangsparameter.

1. Einleitung

In der Praxis wird der thermische Komfort des Menschen in Innenräumen bis heute fast immer auf Basis sehr einfacher statischer globaler Modelle bewertet, obwohl viele Untersuchungen zeigen, dass der Einfluss von einzelnen Körperteilen auf das Gesamtkomfortempfinden von Personen relevant ist. [1], [2], [3]. Daraus lässt sich ableiten, dass die Modellierung des menschlichen Körpers als Ganzes im Sinne eines Einknotenmodells für die Vorhersage des thermischen Komforts in nicht homogenen oder transienten Umgebungen nicht ausreichend ist. Aus diesem Grund haben sich in den letzten Jahrzehnten unterschiedliche zonale Ansätze entwickelt, die den menschlichen Körper in Segmente aufteilen. Diese Mehrknotenmodelle können in Zukunft durch die steigende Verfügbarkeit von Rechenkapazitäten auch für viele praktische Aufgabenstellungen verwendet werden.

Ein Modell dieser Gruppe der Mehrknotenmodelle ist das hier vorgestellte 33-Knoten-Komfortmodell NOODEL. Die in [4] beschriebene Ursprungsversion des Modells (33-NCM) setzt sich aus einem thermophysiological Körpermodell und einem psychologischen Modell zur Vorhersage des Komfortempfindens abgeleitet aus dem physiologischen Körperzustand zusammen. Das physiologische Modell beruht auf dem Modell von Tanabe [5] und dem JOS-Modell [6]. Das hier eingesetzte psychologische Modell setzt auf dem

Ansatz des Zhang Modells [1] auf. Das 33-NCM wurde unter Verwendung einer großen Anzahl eigener Probandenversuche in Klimakammern kalibriert.

Im Gegensatz zur ersten Version dieses Komfortmodells, die mit einer globalen Optimierung aller Parameter entwickelt worden ist, wurde das neue Modell NOODEL durch die Überarbeitung seiner Teilmodelle verbessert und mit dem JOS-2-Modell [7] abgeglichen.

Die Modellstruktur mit seinen Teilmodellen und Eingangsparametern zeigt **Bild 1**.

2. Physiologisches Modell

Im Folgenden wird zunächst das in NOODEL integrierte thermophysiological Modell betrachtet. Dem Modellansatz liegt eine durchschnittliche Person mit einem Gewicht von 74,4 kg und einer Körperoberfläche von 1,87 m² zugrunde. Basierend auf den physikalischen Umgebungsbedingungen Lufttemperatur, Strahlungstemperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftgeschwindigkeit sowie dem Bekleidungsgrad und der Aktivität werden die physiologischen Körperreaktionen bestimmt.

Das thermophysiological Modell unterscheidet hierbei 16 Körperteile. Jedes dieser Körperteile besteht aus einer Kernschicht und einer Hautschicht. Der Variable i repräsentiert im Folgenden die Nummer der einzelnen Körperteile,

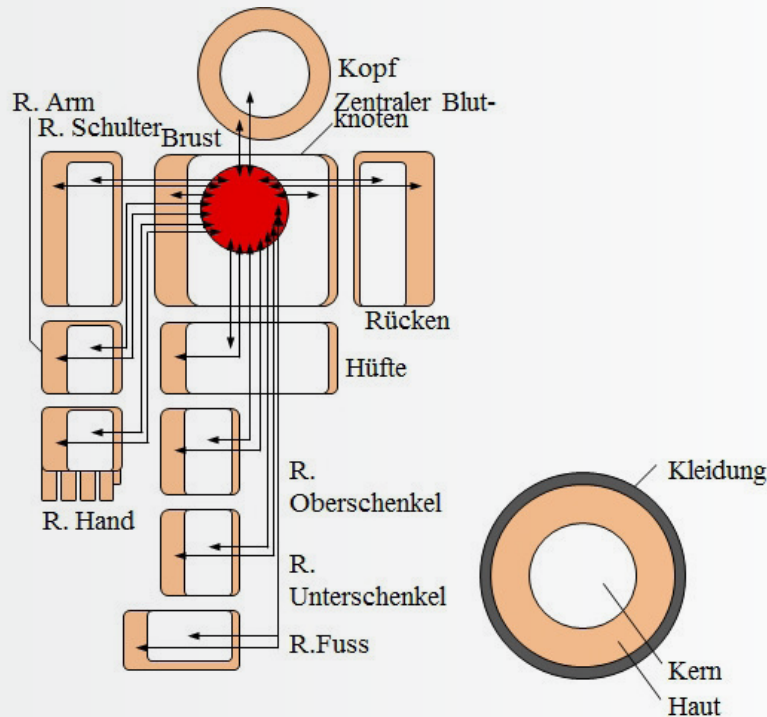


Bild 2: Aufbau des physiologischen Modells von NOODEL mit 16 Körperteilen, Kern- und Hautschicht und zentralem Blutknoten (der Übersichtlichkeit wegen sind die linken Körperteile nicht abgebildet).

die Variable j differenziert die zwei Schichten Kern ($j = 1$) und Haut ($j = 2$). Alle Körperteile und Schichten sind über den Blutfluss mit einem zentralen Blutknoten (33ster Knoten) verbunden (siehe Bild 2).

Die physiologischen Körperreaktionen setzen sich aus dem passiven und aktiven System zusammen. Zum passiven System zählen die Wärmetransportvorgänge ohne Berücksichtigung der vom zentralen Nervensystem aktiv geregelten Reaktionen Blutgefäßerweiterung oder -verengung (Vasomotorik), Schwitzen und Kältezittern.

2.1. Passives System

Der Wärmeaustausch zwischen den Körperschichten basiert auf dem Phänomen der Wärmeleitung. Jedes Körperteil steht mit der Umgebung über Konvektion, Strahlung, Feuchteabgabe und Atmung und bei Kontakt mit anderen Oberflächen über direkte Wärmeleitung in Verbindung. Das sich einstellende thermische Gleichgewicht mit der Umgebung wird über die instationäre Energieerhaltungsgleichung, hier in differentieller Schreibweise, beschrieben:

Kernschicht:

$$c_p(i, 1) * m(i, 1) \frac{dT(i,1)}{dt} = Q(i, 1) - B(i, 1) + D(i, 1) - RES(i, 1) \quad (1)$$

Hautschicht:

$$c_p(i, 2) * m(i, 2) * \frac{dT(i,2)}{dt} = Q(i, 2) - B(i, 2) + D(i, 2) - Q_t(i, 2) - E(i, 2) \quad (2)$$

Blutknoten:

$$C_p(33) * \frac{dT(33)}{dt} = \sum_{i=1}^{16} \sum_{j=1}^2 B(i, j) \quad (3)$$

Tabelle 1: Grundgrößen für die einzelnen Körpersegmente

Körperteil		Kern				Haut			
Nr.	Name	c_p in kJ/(kgK)	m in kg	Q_b in W	$Metf$	c_p in kJ/(kgK)	m in kg	A_{Du} in m	Q_b in W
1	Kopf	3,6	1,809	16,5509	0	0,6786	2,211	0,14	0,1287
2	Brust	4,5342	11,16	24,287	0,091	0,6516	1,24	0,175	0,179
3	Rücken	4,227075	9,927	21,737	0,08	1,4616	1,103	0,161	0,158
4	Hüfte	4,1502	15,813	12,921	0,129	2,0016	1,757	0,221	0,254
5	r. Schulter	1,223568	1,944	1,215	0,026	0,4536	0,216	0,096	0,05
6	l. Schulter	1,223568	1,944	1,215	0,026	0,4536	0,216	0,096	0,05
7	r. Arm	1,527048	0,6165	0,346	0,014	2,1384	0,7535	0,063	0,026
8	l. Arm	1,527048	0,6165	0,346	0,014	2,1384	0,7535	0,063	0,026
9	r. Hand	0,55296	0,153	0,09	0,005	3,9168	0,187	0,05	0,05
10	l. Hand	0,55296	0,153	0,09	0,005	3,9168	0,187	0,05	0,05
11	r. Oberschenkel	3,824424	3,1545	1,318	0,201	1,2024	3,8555	0,209	0,122
12	l. Oberschenkel	3,824424	3,1545	1,318	0,201	1,2024	3,8555	0,209	0,122
13	r. Unterschenkel	2,06568	1,503	0,357	0,099	0,6084	1,837	0,112	0,023
14	l. Unterschenkel	2,06568	1,503	0,357	0,099	0,6084	1,837	0,112	0,023
15	r. Fuß	0,55296	0,216	0,09	0,005	3,9168	0,264	0,056	0,05
16	l. Fuß	0,55296	0,216	0,09	0,005	3,9168	0,264	0,056	0,05

Die spezifischen Wärmekapazitäten und Massen der Körperteile können **Tabelle 1** entnommen werden. Die Größenordnungen der Werte wurde aus dem JOS-2-Modell abgeleitet. Die einzelnen Terme der Wärmeproduktion Q , dem Wärmeaustausch B mit dem Blut, die Wärmeleitung D zwischen Haut und Kernschicht, die Wärmeabgabe durch Respiration RES , die trockene Gesamtwärmeabgabe Q_t und die feuchte Wärmeabgabe E an der Hautoberfläche werden im Folgenden näher erläutert.

Die Wärmeproduktionsrate entspricht in der Hautschicht dem Grundumsatz der Energie, der basalen Wärmeproduktion. In der Kernschicht kommen noch Wärmeproduktion aus externer Arbeit (gemäß des Ansatzes von JOS-2) und Kältezittern, siehe aktives System, hinzu. Die Werte der basalen Wärmeproduktion Q_b sind dem JOS-2-Modell angelehnt und **Tabelle 1** zu entnehmen.

$$Q(i, j) = Q_b(i, j) + W(i, j) + C_h(i, j) \quad (4)$$

Mit

$$W(i, 1) = \left(\frac{58,2 \frac{W}{m^2}}{Met} * MetRate * A_{Du} - Q_b \right) Metf(i)$$

und

$$W(i, 2) = 0 \quad (5)$$

Der Wärmestrom B zum zentralen Blutknoten berechnet sich nach

$$B(i, j) = \alpha \rho c B F(i, j) (T(i, j) - T(33)) \quad (6)$$

$$\text{mit } BF(i, j) = BFB(i, j) + \frac{W(i, j) + C_h(i, j)}{1,16} \quad (7)$$

In der Wärmestromberechnung des Blutes wird vereinfacht die Temperaturdifferenz zwischen dem zentralen Blutknoten und der jeweiligen Knotentemperatur der einzelnen Segmente angesetzt. In der Realität sinkt jedoch auf dem Weg in die Extremitäten die arterielle Bluttemperatur und es kommt zu einem Wärmetransport zwischen Arterien und Venen, der in diesem Modell durch einen Korrekturfaktor α in die Wärmestromberechnung eingeht. Dieser Korrekturfaktor α erfasst vereinfachend das sinkende Temperaturpotenzial in den Extremitäten des Menschen. Der Faktor α und der basale Blutstrom BFB können **Tabelle 2** entnommen werden.

Die volumenspezifische Wärmekapazität des Blutes ist $\rho c = 1,067 \text{ Wh/(L K)}$. Der Faktor 1,16 ergibt sich aus der Annahme, dass im thermischen Gleichgewicht ein Blutstrom von 1 L/h einen Wärmestrom von 1,16 W generiert.

Der Wärmeaustausch D zwischen der Kern- und Hautschicht in jedem Körpersegment durch Wärmeleitung berechnet sich wie folgt

Tabelle 2: Basaler Blutstrom und Koeffizient α zur Berücksichtigung des gegenläufigen arteriellen und venösen Blutstroms

Körperteil	Basaler Blutstrom in L/h		α
	Kern	Haut	
Kopf	35,251	1,754	1
Brust	89,214	1,967	1
Rücken	87,663	1,457	1
Hüfte	33,518	2,272	1
Schulter	1,808	0,91	0,537
Arm	0,94	0,508	0,351
Hand	0,217	1,114	0,762
Oberschenkel	1,406	1,456	0,826
Unterschenkel	0,164	0,651	0,444
Fuß	0,217	1,114	0,762

Tabelle 3: Wärmeleitfähigkeit zwischen Kern- und Hautschicht für die Körperteile

Körperteil	c_d in W/K
Kopf	3,822
Brust	4,385
Rücken	1,643
Hüfte	2,251
Schulter	2,001
Arm	2,065
Hand	0,75
Oberschenkel	2,468
Unterschenkel	3,326
Fuß	0,75

$$D(i, j) = c_d(i, j)(T(i, j) - T(i, j + 1)) \quad (8)$$

Die Wärmeleitfähigkeitskoeffizienten c_d können **Tabelle 3** entnommen werden.

Der Wärmeverlust über die Atmung wird nur der Kernschicht der Brust zugeordnet:

$$RES(2,1) = \sum_{i=1}^{16} \sum_{j=1}^2 Q_b(i, j) * (0,0014 * (34 - T_{Umg}) + 0,017 * (5,867 - p_{Umg})) \quad (9)$$

Der Wärmeverlust durch Verdunstung an der Hautoberfläche setzt sich aus der Wasserdampfdiffusion durch die Haut sowie der Verdunstung von Schweiß zusammen. Die Schweißmenge wird über das aktive System geregelt.

$$E(i, 2) = \min(E_b(i, 2) + E_{SW}(i, 2), E_{max}) \quad (10)$$

$$E_b(i, 2) = 0,06 * \left(\frac{1 - E_{SW}(i, 2)}{E_{max}(i)}\right) * E_{max}(i) \quad (11)$$

$$E_{max}(i) = h_e(i) * (p_{Haut,s}(i) - p_{Umg}) * A_{Du}(i) \quad (12)$$

$$h_e(i) = \frac{LR * fp_{Cl}(i)}{0,155 * I_{Cl}(i) + fp_{Cl}(i) / (h_c(i) f_{Cl}(i))} \quad (13)$$

$$fp_{Cl}(i) = \frac{1}{1 + 0,155 * f_{Cl}(i) * h_c(i) * I_{Cl}(i) / 0,45} \quad (14)$$

$$h_e(i) = \frac{LR * fp_{Cl}(i)}{0,155 * I_{Cl}(i) + fp_{Cl}(i) / h_c(i) f_{Cl}(i)} \quad (15)$$

$$f_{Cl}(i) = 1 + 0,28 I_{Cl} \quad (16)$$

Der Wärmeübergangskoeffizient der Verdunstung h_e lässt sich aus der Lewis-Beziehung bestimmen mit der Lewis-Zahl von $LR = 16,5$ [8]. Der Bekleidungsflächenfaktor f_{Cl} als das Verhältnis von Kleidungsoberfläche zu Fläche des nackten Körpers kann nach [9] mit Formel 16 abgeschätzt werden. Die Feuchtedurchlässigkeit der Kleidung fp_{Cl} wird mit Gleichung 14 nach [10] abgeschätzt.

Die Wärmetransportvorgänge an der Hautoberfläche setzen sich aus Konvektion, Strahlung und Wärmeleitung zu Kontaktflächen zusammen.

$$Q_t(i, 2) = Q_{con}(i) + Q_{rad}(i) + Q_{cond}(i) \quad (17)$$

$$Q_{con}(i) = h_c * (T(i, 2) - T_{Umg}(i)) * A_{Du}(i) * f_{Cl}(i) * (1 - CSF(i)) \quad (18)$$

$$Q_{rad}(i) = h_r * (T(i, 2) - T_{rad}(i)) * A_{Du}(i) * f_{Cl}(i) * (1 - CSF(i)) \quad (19)$$

$$Q_{mat}(i) = (1 / (0,155 * I_{Cl}) + 0,35) * (T(i, 2) - T_{Mat}(i)) * A_{Du}(i) * f_{Cl}(i) * CSF(i) \quad (20)$$

Für den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten wird zwischen natürlicher, gemischter und erzwungener Konvektion in Abhängigkeit der Luftgeschwindigkeit unterschieden. Bei natürlicher Konvektion gilt die Gleichung nach Fanger [11]:

$$h_c = 2,38 W / (m^2 K) * abs(T - T_{Umg})^{0,25} \quad (21)$$

Tabelle 4: Solltemperaturen des physiologischen Modells für den neutralen Zustand

Körperteil	T _{set} in °C	
	Kern	Haut
Kopf	36,1	35,94
Brust	36,87	34,58
Rücken	36,92	34,48
Hüfte	36,99	34,58
Schulter	36,25	34,29
Arm	35,8	33,95
Hand	35,02	34,44
Oberschenkel	36,78	34,24
Unterschenkel	36,58	34,13
Fuß	35,02	34,44

Im Bereich der gemischten und erzwungenen Konvektion gilt die Gleichung 22 mit hinterlegten Koeffizienten nach de Dear [12].

$$h_c = bv^n \tag{22}$$

2.2. Aktives System

Das aktive System ergänzt das passive System um eine regelnde Funktion. Das aktive System besteht aus den Regulationsmechanismen Vasomotorik, Kältezittern und Schweißbildung. Jede Abweichung vom Sollwert der Körperkerntemperatur veranlasst das zentrale Nervensystem zu notwendigen thermoregulatorischen Maßnahmen, um die Körperkerntemperatur zu stabilisieren. Zur Abbildung dieses Mechanismus werden jedem Knoten physiologische Sollwerttemperaturen (siehe Tabelle 4) zugeordnet und Fehlersignale aus dem Soll-Ist-Vergleich gebildet.

$$ERROR(i, j) = T(i, j) - T_{set}(i, j) \tag{23}$$

Tabelle 5: Gewichtungsfaktoren des aktiven Systems

Körperteil	SKINR	SKINS	SKINV	SKINC	CHILF	METF
Kopf	0,0549	0,064	0,1043	0,0213	0,0339	0
Brust	0,1492	0,146	0,098	0,0638	0,2739	0,091
Rücken	0,1321	0,129	0,086	0,0638	0,241	0,08
Hüfte	0,2122	0,206	0,138	0,0638	0,3875	0,129
Schulter	0,0227	0,051	0,0313	0,0213	0,0024	0,026
Arm	0,0117	0,026	0,0163	0,0213	0,0014	0,014
Hand	0,0923	0,0155	0,0605	0,1489	0,0002	0,005
Oberschenkel	0,0501	0,073	0,092	0,0213	0,0039	0,201
Unterschenkel	0,0251	0,036	0,023	0,0213	0,0018	0,099
Fuß	0,0923	0,0155	0,0605	0,1489	0,0002	0,005

Wenn $ERROR(i, j) > 0$

$$WRM(i, j) = ERROR(i, j), \quad CLD(i, j) = 0 \tag{24}$$

Und wenn $ERROR(i, j) < 0$

$$WRM(i, j) = 0, \quad CLD(i, j) = -ERROR(i, j) \tag{25}$$

Die aktiven Maßnahmen werden dann über ein integrales Fehlersignal gesteuert:

$$WRMS = \sum_{i=1}^{16} (SKINR(i) * WRM(i, 2)) \tag{26}$$

$$CLDS = \sum_{i=1}^{16} (SKINR(i) * CLD(i, 2)) \tag{27}$$

Der Faktor *SKINR* beschreibt die Gewichtung der Verteilung der Warm- und Kaltrezeptoren in jedem Körperteil und kann Tabelle 5 entnommen werden.

Die Regelung des Blutstroms erfolgt über aus den Fehlersignalen abgeleitete Blutgefäß-erweiterungs- *DL* und -verengungs- *ST* Signale. Die Kontrollkoeffizienten können ebenfalls Tabelle 5 und Tabelle 6 entnommen werden.

$$BF(i, 2) = \frac{BFB(i, 2) + (SKINV(i) * DL)}{1 + (SKINC(i) * ST)} * km(i, 2) \tag{28}$$

$$DL = C_{dl} * ERROR(1,1) + S_{dl}(WRMS - CLDS) + P_{dl} * WRM(1,1) * WRMS \tag{29}$$

$$ST = -C_{st} * ERROR(1,1) + S_{st}(WRMS - CLDS) + P_{st} * CLD(1,1) * CLDS \tag{30}$$

Tabelle 6: Koeffizienten des aktiven Systems

C_{dl} in L/s K	117	C_{st} in 1/K	10,8	C_{sw} in W/K	371,2	C_{ch} in W/K	0
S_{dl} in L/s K	7,5	S_{st} in 1/K	10,8	S_{sw} in W/K	33,64	S_{ch} in W/K	0
P_{dl} in L/s K ²	0	P_{st} in 1/K ²	0	P_{sw} in W/K ²	0	P_{ch} in W/K ²	24,36

Tabelle 7: Koeffizienten des lokalen thermischen Empfindens

Körperteil	$C1_{neg}$	$K1_{neg}$	$C1_{pos}$	$K1_{pos}$	$C2_{neg}$ $dT_{skin}/dt < 0$	$C2_{pos}$ $dT_{skin}/dt > 0$	$C3$	$T_{set,psy}$ in °C
Kopf	0,4	0,2	1,3	0,2	543	90	0	34,5
Brust	0,35	0,1	0,65	0,1	39	136	0	34,3
Rücken	0,3	0,1	0,75	0,1	88	192	0	34,48
Hüfte	0,2	0,15	0,74	0,15	75	137	0	34,58
Schulter	0,3	0,1	0,43	0,1	156	167	0	33,32
Arm	0,03	0,1	0,05	0,1	144	125	0	30
Hand	0,2	0,15	0,37	0,15	19	46	0	34,44
Oberschenkel	0,2	0,1	0,36	0,1	151	263	0	34,24
Unterschenkel	0,22	0,1	0,48	0,1	206	212	0	32,99
Fuß	0,21	0,15	1,79	0,15	109	162	0	35

Auch das Schwitzen E_{sw} und das Kältezittern C_h werden direkt aus den Fehlersignalen abgeleitet und mit Kontrollkoeffizienten gewichtet.

$$E_{sw}(i, 2) = (C_{sw} * ERROR(1,1) + S_{sw}(WRMS-CLDS) + P_{sw} * WRM(1,1) * WRMS) * SKINS(i) km(i, 2) \quad (31)$$

$$km(i, 2) = 2,0^{ERROR(i,2)/RT(i,2)} \text{ mit } RT = 10 \quad (32)$$

$$C_h(i, 1) = P_{ch} * CLD(1,1) * CLDS * CHILF(i) \quad (33)$$

3. Psychologisches Modell

Neben dem thermophysiologicalen Modell eines Menschen wird für die Bewertung des thermischen Komforts ein psychologisches Modell benötigt. Die Signale des Körpers müssen in Hinblick auf die aktuellen Umgebungsbedingungen bewertet werden. Das hier genutzte psychologische Modell leitet aus der über das physiologische Modell bestimmten Hauttemperatur das Komfortempfinden ab. Es wird zwischen dem lokalen thermischen Empfinden TSl der einzelnen Körperteile und dem thermischen Empfinden für den Gesamtkörper TSo unterschieden. Der Bewertung liegt wie bei der Befragung der Probandengruppe eine 7-Punkt-Skala von -3 für kalt bis 3 für warm zugrunde.

Aus dem thermischen Empfinden kann wiederum der lokale thermische Komfort TCI und der globale Komfort TCo abgeleitet werden. Der Bewertung liegt ebenfalls eine 7-Punkt-Skala von -3 für sehr unbehaglich bis 3 für sehr behaglich zugrunde.

In dieser hier vorgestellten Überarbeitung des psychologischen Modells sind Probandenbewertungen aus Untersuchungen von Möhlenkamp [13], [14] für Misch- und Quellluftkonzepte bei unterschiedlichen mittleren Raumtemperaturen eingeflossen. Die Untersuchungen wurden im Prüfstand Aachen Comfort Cube (ACCu) des Instituts durchgeführt.

3.1. Lokales thermisches Empfinden

Für das lokale thermische Empfinden wird der Ansatz einer logistischen Funktion nach [1] wie bereits im in [4] beschriebenen Ausgangsmodell beibehalten. Mit der strikten Unterteilung in physiologisches und psychologisches Modell wird neben den physiologischen Sollwerttemperaturen für das aktive System eine lokale psychologische Sollwerttemperatur für die Reaktion des thermischen Empfindens eingeführt. Die psychologischen Sollwerttemperaturen können zusammen mit den überarbeiteten Koeffizienten der Funktion **Tabelle 7** entnommen werden.

$$TSl(i) = 3 \left(\frac{2}{1 + e^{C1(T(i,2) - T_{set,psy}(i)) - K1[(T(i,2) - \sum_{i=1}^{16} \bar{T}(i,2)/16) - (T_{set,psy}(i) - \sum_{i=1}^{16} \bar{T}_{set,psy}(i)/16)]}} - 1) + C2 \frac{dT(i, 2)}{dt} + C3 \frac{dT(i, 1)}{dt} \right) \quad (34)$$

Die Koeffizienten C1 und K1 unterscheiden sich dabei in Abhängigkeit davon, ob die lokale Hauttemperatur kleiner/gleich der psychologischen Sollwerttemperatur ($C1_{neg}$, $K1_{neg}$) oder größer ($C1_{pos}$, $K1_{pos}$) ist. Auch für C2 gibt es eine Fallunterscheidung, die beachtet, ob die Hauttemperatur sinkt ($C2_{neg}$) oder steigt ($C2_{pos}$). Die Funktion sieht ebenfalls eine Berücksichtigung der Änderung der Kerntemperatur vor, die aus den vorliegenden Daten jedoch nicht abgeleitet werden konnte. Daher wird in diesem Modell der Koeffizient C3 zu Null gesetzt. Unter für Innenräume typischen Bedingungen kann in guter Näherung davon ausgegangen werden, dass sich die Körperkerntemperatur nicht ändert.

3.2. Globales thermisches Empfinden

Für das globale thermische Empfinden wurde ein neuer zustandsbasierter Ansatz entwickelt. Bei diesem Ansatz ist es entscheidend, ob die Mehrzahl der Körperteile als warm oder kalt bewertet wird. Sollte sich der Körper in einem überwiegend warmen Zustand befinden (mindestens acht Körperteile als warm empfunden) und das drittkühlste Körperteil ebenfalls als warm empfunden wird, so gilt

$$TSO = 0,5 * TSl_{max} + 0,5 * TSl_{third,max} \quad (35)$$

Gibt es hingegen ein gegenläufiges Empfinden und das drittkühlste Körperteil liegt noch im kühlen Bereich so gilt

$$TSO = 0,33 * TSl_{max} + 0,33 * TSl_{third,max} + 0,33 * TSl_{min} \quad (36)$$

Befindet sich der Körper überwiegend in einem kühlen Zustand und auch das drittwärmste Körperteil ist noch kühl, so gilt

$$TSO = 0,38 * TSl_{min} + 0,62 * TSl_{third,min} \quad (37)$$

Für das gegenläufige Empfinden, bei dem das drittwärmste Körperteil noch im warmen Bereich liegt, gilt

$$TSO = 0,33 * TSl_{min} + 0,33 * TSl_{second,min} + 0,33 * TSl_{max} \quad (38)$$

Dieser Ansatz führt zu einer besseren Übereinstimmung mit den experimentellen Daten. Allerdings wurde bisher nicht untersucht, ob

Tabelle 8: Koeffizienten des lokalen thermischen Komforts

Körperteil	C3	C4	C5
Kopf	-0,4418	0,0048	0,9722
Brust	-0,4306	0,0324	0,908
Rücken	-0,4498	0,009	1,0677
Hüfte	-0,4281	0,0192	0,8832
Schulter	-0,4255	0,0456	0,8853
Arm	-0,4209	0,334	0,8242
Hand	-0,4219	0,0347	0,8368
Oberschenkel	-0,4009	0,0681	0,6773
Unterschenkel	-0,398	0,0806	0,5936
Fuß	-0,3752	0,1152	0,4188

eine flächenverhältnisorientierte Bewertung oder eine andere Wichtung von Körperteilen zu besseren Ergebnissen führt. Damit sollte dieses Berechnungsverfahren als ein möglicher pragmatischer Ansatz im psychologischen Modell betrachtet werden.

3.3. Lokaler thermischer Komfort

Bei der Berechnung des lokalen thermischen Komforts zeigen sich in der alten Version des 33-NCM Abweichungen, wenn die aktuellen Daten aus den Probandenversuchen ausgewertet werden. Grund für diese Abweichungen ist, dass das bisherige Modell zur Bestimmung des lokalen thermischen Komforts einen quadratischen Zusammenhang zwischen lokalem Komfort und lokalem Empfinden ansetzt, bei dem der maximale lokale Komfort von der Bewertung des Gesamtempfindens beeinflusst wurde. In der Auswertung neuer Probandendaten im Rahmen der Überarbeitung des Modells konnte der Einfluss des Gesamtempfindens auf den lokalen Komfort unter durchschnittlichen Innenraumbedingungen nicht bestätigt werden, sodass das neue Modell NOODEL auf einen reinen quadratischen Zusammenhang zwischen diesen Größen reduziert wird. Die Koeffizienten sind **Tabelle 8** zu entnehmen.

$$TCl(i) = C_3 * TSl(i)^2 + C_4 * TSl(i) + C_5 \quad (39)$$

3.4. Globaler thermischer Komfort

Das Komfortempfinden des Menschen wird als Wert für den gesamten Körper aus einem Mittelwert des minimalen und maximalen lokalen Komforts bestimmt.

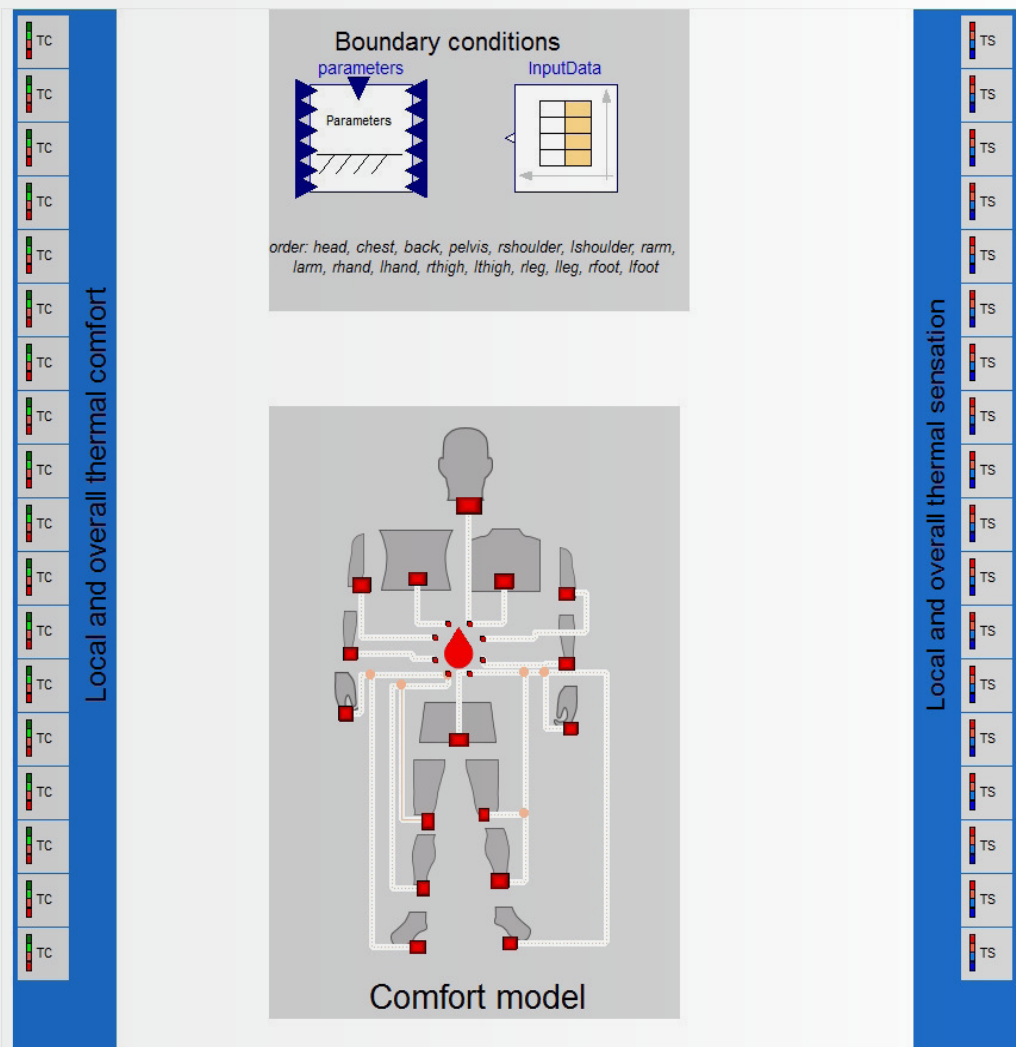


Bild 3: Grafische Oberfläche des in Modelica umgesetzten NOODEL-Gesamtmodells.

$$TC_o = 0,5 * \max(TC_l) + 0,5 * \min(TC_l) \quad (40)$$

Auch hier ist zu erwarten, dass durch weitere und detaillierte Probandenexperimente neue Erkenntnisse gewonnen werden können, die zu einer Vorhersageverbesserung des Komfortmodells führen.

4. Validierung

NOODEL ist komplett in der Modellierungssprache Modelica [15] umgesetzt und in der Entwicklungsumgebung Dymola und OpenModelica getestet. Bild 3 zeigt das Gesamtmodell in der grafischen Oberfläche.

Im Folgenden wird das Verhalten des Modells beispielhaft an Testfällen aus der Literatur illustriert. Weitere Ergebnisse des Modells können

dem mit dem Modell zusammen veröffentlichten Handbuch des Modells entnommen werden.

Der Testfall nach Jacquot [16] zeigt den Verlauf der Hauttemperatur und das thermische Gesamttempfinden sowie den Gesamtkomfort für einen Abkühlvorgang von 24 auf 16 °C über einen Zeitraum von 120 min (siehe Bild 4 und Bild 5). Die Vorkonditionierungsphase von 60 min bei 21 °C ist nicht abgebildet.

Der Testfall nach Nagano [17] untersucht einen Temperatursprung von 34 °C auf 28 °C. Die Probanden befanden sich 50 Minuten in einer Klimakammer mit einer operativen Temperatur von 34 °C und wechselten dann innerhalb von 3 Minuten in eine kühlere Klimakammer mit einer Temperatur von 28 °C. Eine Vorkonditionierungsphase von 28 °C über 60 Minuten ist hier nicht abgebildet.

In den Experimenten von Nagano wurde die mittlere Hauttemperatur nach der Definition der gemittelten 7-Punkt-Hauttemperatur bestimmt, die auch in NOODEL für den Vergleich berechnet wurde. Für die symmetrischen Körperteile wird hierbei das arithmetische Mittel der beiden Körperteile genommen.

$$T_{7-Punkt} = 0,07 T_{Kopf} + 0,14 T_{Arme} + 0,05 T_{Hände} + 0,35 T_{Brust} + 0,19 T_{Oberschenkel} + 0,13 T_{Unterschenkel} + 0,07 T_{Füße} \quad (41)$$

In beiden Fällen erweist es sich als schwierig, die genauen Randbedingungen des Versuchs zu modellieren. So ist beispielsweise eine sitzende Position der Probanden dokumentiert. Genaue Informationen zur Kontaktfläche oder Kontakttemperatur sind jedoch unbekannt. So zeigen die Temperaturverläufe für beide Testfälle eine Abweichung zu den experimentellen Daten.

Hinzu kommen Abweichungen zwischen den einzelnen Probanden und Messungsgenauigkeiten, sodass die experimentellen Daten mit einem Unsicherheitsbereich betrachtet werden müssen. Der Temperaturverlauf wird durch die Simulation gut wiedergegeben. Beide Testfälle zeigen ebenfalls, dass es schwierig ist, trotz Vorkonditionierungsphase den genauen Ausgangszustand der Probanden zu treffen. Im Testfall nach Nagano (siehe Bild 6 und Bild 7) kann der dreiminütige Wechsel zwischen den Klimakammern im Modell nicht abgebildet werden, sodass es hier zu einem größeren Temperaturunterschied zwischen Experiment und berechneter mittlerer Hauttemperatur zu Beginn der zweiten 50 Minuten in der Klimakammer kommt. Die Unterschiede in der Hauttemperatur spiegeln sich auch in Abweichungen zwischen Experiment und simulierten Daten für das Komfortempfinden wider. Sowohl für das thermische Empfinden als auch den thermischen Komfort wird der Verlauf aber sehr gut getroffen.

5. Zusammenfassung

NOODEL ist in seiner neuen Form ein erweitertes Mehrknotenkomfortmodell. Es setzt sich aus einem physiologischen Körpermodell zusammen, das unter Vorgabe der physikalischen Randbedingungen der Umgebung unter vereinfachter Beschreibung der Wärmetransportvorgänge im menschlichen Körper für 16 Körpersegmente

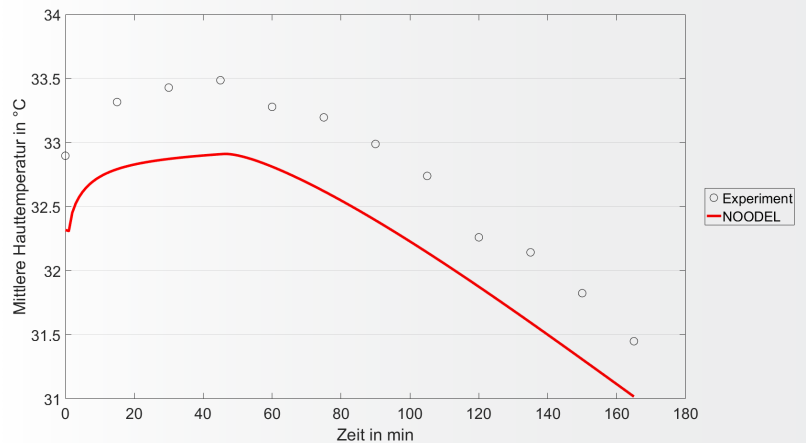


Bild 4: Mittlere Hauttemperatur für einen Abkühlvorgang von 24 auf 16 °C nach [15].

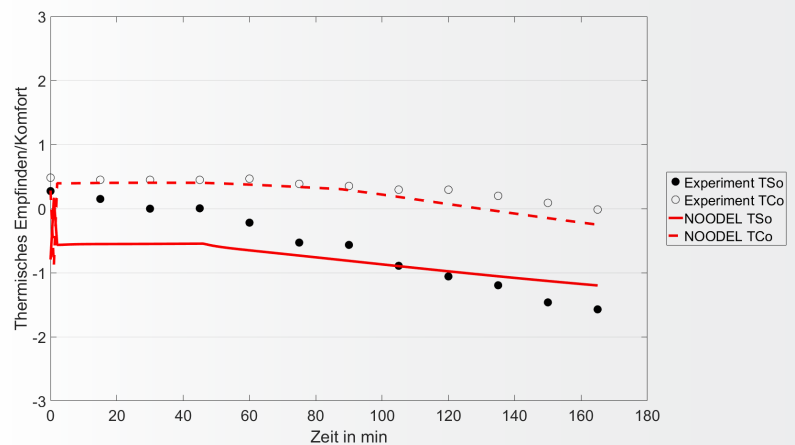


Bild 5: Gesamtempfinden und Gesamtkomfort für den Abkühlvorgang.

aufgeteilt in eine Kern- und Hautschicht und verbunden über einen zentralen Blutknoten die Hauttemperatur berechnet. Die Hauttemperaturen sind Eingangsgröße für das psychologische Komfortmodell, das das lokale und globale thermische Empfinden sowie den lokalen und globalen thermischen Komfort bestimmt.

Das Modell wurde unter Nutzung von Literaturdaten und eigenen Probandenexperimenten in Misch- und Quellluftsystemen überarbeitet. Die Testfälle bilden dabei nur einen Teilbereich von Innenraumsituationen ab. Validierungsfälle zeigen für Temperaturdrifts und Temperatursprünge in mittleren Temperaturniveaus eine gute Übereinstimmung zwischen berechneten und experimentellen Daten. Für komplexere Innenraumsituationen kann mit den derzeitigen Datensätzen keine abschließende Aussage zur Güte des Modells getroffen werden. Das Modell wird aber kontinuierlich durch neue

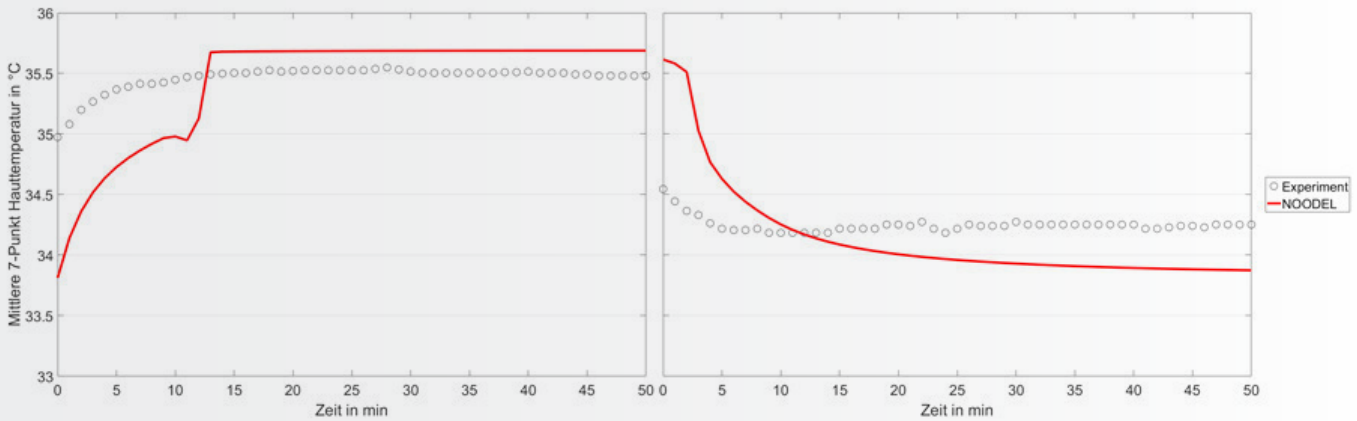


Bild 6: Mittlere 7-Punkt Hauttemperatur für einen Temperatursprung von 34 auf 28 °C nach [16].

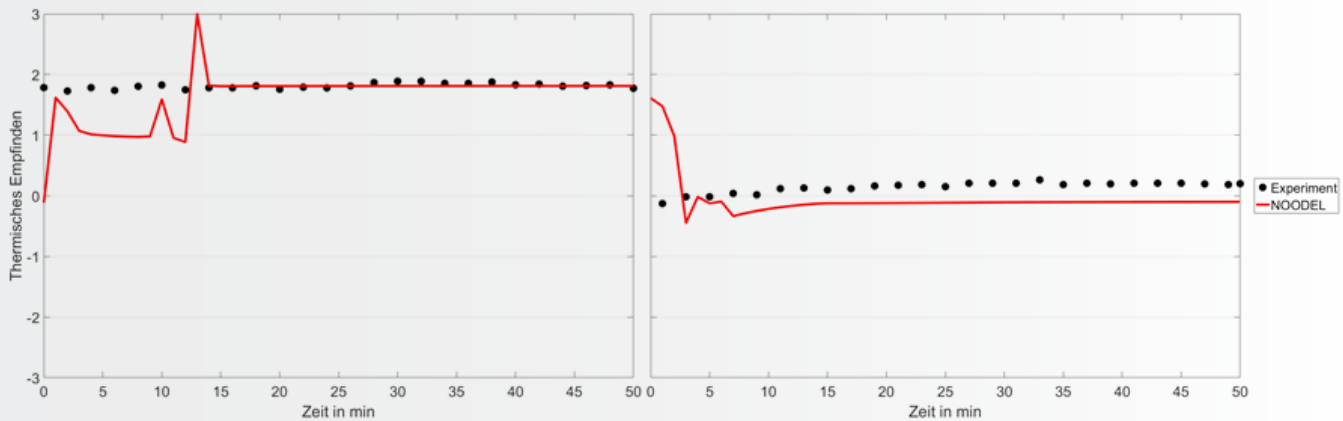


Bild 7: Gesamttempfinden für den Temperatursprung.

AUTOREN VITA



Dr.-Ing. Rita Streblov

- 2003 Abschluss (Diplom) des Studiums der Gebäudetechnik, Technische Universität Berlin
 - 2003 – 2007 Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Hermann-Rietschel-Institut, Technische Universität Berlin
 - Seit 2007 Oberingenieurin am Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik des E.ON Energy Research Centers, RWTH Aachen University
 - 2011 Promotion im Fachbereich Maschinenbau, RWTH Aachen University
- Kontakt** RWTH Aachen University
 Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik
 Mathieustr. 10
 52074 Aachen
 Tel.: +49 241 80 49 767
 E-Mail: rstreblov@eonerc.rwth-aachen.de

experimentelle Daten erweitert. Insbesondere laufen aktuell Untersuchungen zur Berücksichtigung physiologischer Unterschiede, wie beispielsweise Unterschiede zwischen Mann und Frau [18].

NOODEL ist vollständig in Modelica programmiert und unter der MIT Lizenz frei verfügbar. Es kann unter <https://github.com/RWTH-EBC/NOODEL> heruntergeladen werden. Wir begrüßen Rückmeldungen und eine Weiterentwicklung des Modells. Auch freuen wir uns, wenn Beispiele der Nutzung des Modells zur Verfügung gestellt werden.

Danksagung

Wir danken der Heinz Trox Wissenschafts gGmbH für die finanzielle Unterstützung für die Überarbeitung des Modells. Die Basisversion des Modells ist aus einer Kooperation mit der Airbus Operations GmbH hervorgegangen, an die ebenfalls unser Dank geht. Die für die Überarbeitung verwendeten neuen Probandendaten stammen aus Untersuchungen von Martin Möhlenkamp.

Carlos Manuel Ferreira Domingos hat mit seiner Masterarbeit zur Verbesserung des physiologischen Modells beigetragen. Masayuki Ogata danken wir für den intensiven Austausch zum JOS-2-Modell.

Literatur

[1] H. Zhang: Thermal Sensation and Comfort in Transient and Non-uniform Thermal Environemnts, University of California, Berkeley, 2003 (PhD Thesis).

[2] M. Hagino, J. Hara: Development of a Method for Predicting Comfortable Airflow in the Passenger Compartment, 1992, pp. 1 -10, SAE Technical Paper Series No. 922131.

[3] J. G. Ingersoll, T. G. Kalman, L. M. Maxwell: Automobile Passenger Comaprtment Thermal Comfort Model-part II: Human thermal Comfort Calculation, 1992, pp. 1 – 11, SAE Technical Paper Series No. 929266.

[4] R. Streblov: Thermal Sensation and Comfort Model for Inhomogeneous Indoor Environements, RWTH Aachen University, Dissertation, 2011.

[5] S. Tanabe et al.: Evaluation of thermal comfort using combined multi-node thermoregulation (65 MN) and radiation models and computational fluid dynamics (CFD), Energy and Buildings 34, pp. 637 – 646, 2002.

[6] K. Murakami, S. Tanabe, M. Haneda: Numerical thermoregulation-model JOS for evaluation of thermal comfort, Proceedings of Roomvent 2007, 2007.

[7] Y. Kobayashi, S. Tanabe: Development of JOS-2 human thermoregulation model with detailed vascular system, Building and Environment 66, 2013.

[8] ASHRAE Handbook – Fundamentals, Atlanta: American Society for Heating, Refrigeration and Air-Conditioning, 2005.

[9] E. A. McCullogh, B. W. Jones, J. Huck: A Comprehensive Data Base for Estimating Clothing Insulation, ASHRAE Transactions 1985, 91, pp. 29–47.

[10] V. Candas, V. Candas, A. Hoefl: Clothing, assessment and effects on thermophysiological responses of man working in humid heat, ERGONOMICS, 38:1, 1995, pp. 115-127, DOI: 10.1080/00140139508925089.

[11] P. O. Fanger: Thermal Comfort: Analysis and applications in environmental engineering. New York: McGraw-Hill Book Company, 1970.

[12] R. J. de Dear, E. Arens, H. Zhang, M. Oguro: Convective and radiative heat transfer coefficients for individual human body segments, International Journal for Biometeorology, 40, pp. 141 – 156, 1997.

[13] M. Möhlenkamp, S. Behrendt, M. Schmidt, D. Müller: Bewertung des thermischen Komforts von Quell- und Mischlüftungskonzepten in einem hochmodularen Prüfraum, Tagungsband der Deutschen Kälte- und Klimatagung 2014 in Düsseldorf, Dt. Kälte- und Klimatechn. Verein, 2015.

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

A_{Du}	Körperoberfläche nach Dubois	m^2
b	Koeffizient	-
B	Wärmestrom zwischen Körperteilknoten und zentralem Blutknoten	W
BF	Blutstromrate	L/h

AUTOREN VITA



Prof. Dr.-Ing. DIRK MÜLLER

1989 – 1993	Studium des Maschinenbaus, Fachrichtung: Grundlagen des Maschinenwesens, RWTH Aachen University
1993 –1994	DAAD-Stipendium, Thayer School of Engineering, Dartmouth College, USA, Bachelor of Engineering
1994 – 1995	Studium des Maschinenbaus, Fachrichtung: Grundlagen des Maschinenwesens, RWTH Aachen University, Diplom
1995 – 1999	Wissenschaftlicher Angestellter am Lehrstuhl für Wärmeübertragung und Klimatechnik, RWTH Aachen University, Promotion
1999 – 2002	Projektleiter, Zentralbereich Forschung und Vorausentwicklung, Angewandte Physik: Strömungsanalyse und -modellierung, Robert Bosch GmbH
2002 – 2003	Prozessleiter Simulationsverfahren, Technologiecenter Konzern; Abteilungsleiter, Festigkeits-, Dynamik- und Strömungsanalyse für Motorkühlelemente und Klimaanlage, Behr GmbH & Co.
2003 – 2007	Universitätsprofessor, Fachgebiet Heiz- und Raumlufttechnik, Hermann-Rietschel-Institut, Obmann des Studiengangs „Gebäudetechnik“, Institutsleiter, Technische Universität Berlin
Seit 2007	Universitätsprofessor, Direktor, Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik, E.ON Energy Research Center, RWTH Aachen University
2011 – 2015	Geschäftsführer Technik, TROX GmbH

Kontakt E-Mail: dmueller@eonerc.rwth-aachen.de

[14] M. Möhlenkamp et al.: Thermal Comfort in Environments with Different Vertical Air Temperature Gradients. Indoor Air 2018, Oktober 2018, <https://doi.org/10.1111/ina.12512>.

[15] P. Fritzon, P. Bunus: Modelica – A general Object-Oriented Language for Continuous and Discrete-Event System Modeling, Proceedings of the 35th annual Simulation Symposium, 2002.

[16] C.M.C. Jacquot et al.: Influence of thermophysiology on thermal behaviour: the essentials of categorization, Physiology & Behaviour 128, pp. 180 – 187, 2014.

[17] K. Nagano et al.: Effects of ambient temperature steps on thermal comfort requirements, International Journal of Biometeorology 50, pp. 33 – 39, 2005, DOI 10.1007/s00484-005-0265-3.

[18] K. Rewitz, M. Möhlenkamp, M. Wesseling, D. Müller: Influence of gender on thermal sensation and comfort in indoor environments with displacement ventilation, Proceedings der Roomvent & Ventilation Konferenz, Espoo, Finland, 2018.

BFB	Basale Blutstromrate	L/h
C_{ch}	Kontrollkoeffizient Kältezittern für Kernschicht des Kopfsegmentes	W/K
c_d	Wärmeleitfähigkeit	W/K
C_{dl}	Blutgefäßerweiterungskontrollkoeffizient für Kernschicht des Kopfsegmentes	-
C_h	Wärmeproduktion aus Kältezittern	W
C_p	Wärmekapazität	kJ/K
c_p	Spezifische Wärmekapazität	kJ/(kg*K)
C_{st}	Blutgefäßerengungskontrollkoeffizient für Kernschicht des Kopfsegmentes	1/K
C_{sw}	Schweißkontrollkoeffizient für Kernschicht des Kopfsegmentes	W/K
CHILF	Verteilungskoeffizient für Muskelschicht für Kältezittern	-
CLD	Kalt Signal	K
CLDS	Integriertes kalt Signal	K
CSF	Flächenanteil in Kontakt mit anderer Oberfläche	-
D	Wärmestrom durch Wärmeleitung zwischen zwei benachbarten Schichten	W
DL	Blutgefäßerweiterungssignal	-
E	Verdunstungswärmestrom an Hautoberfläche	W
E_b	Wärmestrom durch Wasserdampfdiffusion durch die Haut	W
E_{max}	Maximaler Verdunstungswärmestrom	W
ERROR	Fehlersignal	K
E_{sw}	Wärmestrom durch Schwitzen	W
f_{cl}	Verhältnis von Kleidungsoberfläche zu Fläche des nackten Körpers	-
fp_{cl}	Feuchtedurchlässigkeit der Kleidung	-
h_c	Konvektiver Wärmedurchgangskoeffizient	W/(m ² K)
h_e	Wärmedurchgangskoeffizient für Verdunstung	W/(m ² kPa)
h_r	Radiativer Wärmedurchgangskoeffizient	W/(m ² K)
i	Laufvariable Körperteile (1–16)	-
l_{cl}	Bekleidungswiderstand	clo
j	Laufvariable Schichten (1–2)	-
km	Lokaler Faktor	-
LR	Lewis-Zahl	-
m	Masse	kg
Metf	Verteilungsfaktor für Muskelschicht für die Wärmeproduktion durch externe Arbeit	-
MetRate	Metabolische Rate	Met
n	Koeffizient	-
P_{ch}	Kontrollkoeffizient Kältezittern für Kernsegment des Kopfsegmentes und Hautschicht von jedem Segment	W/K ²
P_{di}	Kontrollkoeffizient für Blutgefäßerweiterung für Kernsegment des Kopfsegmentes und Hautschicht von jedem Segment	1/K ²
P_{st}	Kontrollkoeffizient für Blutgefäßerengung für Kernsegment des Kopfsegmentes und Hautschicht von jedem Segment	1/K ²
P_{sw}	Kontrollkoeffizient für Schwitzen für Kernsegment des Kopfsegmentes und Hautschicht von jedem Segment	W/K ²
$p_{Haut,s}$	Sättigungsdampfdruck an der Hautoberfläche	kPa
p_{Umg}	Dampfdruck der Umgebung	kPa
Q	Wärmeproduktionsrate	W
Q_b	Basale metabolische Rate	W
Q_{con}	Konvektiver Wärmestrom	W
Q_{cond}	Wärmestrom durch Wärmeleitung	W
Q_{mat}	Wärmestrom an Material	W
Q_{rad}	Wärmestrom durch Strahlung	W

Q_t	Wärmestrom durch Konvektion, Strahlung und Wärmeleitung an der Hautoberfläche	W
RES	Wärmestrom durch Atmung im Kernelement der Brust	W
RT	Temperaturunterschied für $km(i,2) = 2$	-
S_{ch}	Kontrollkoeffizient Kältezittern für Hautschicht von jedem Segment	W/K
S_{dl}	Kontrollkoeffizient zur Blutgefäßerweiterung für Hautschicht von jedem Segment	L/(h K)
S_{st}	Kontrollkoeffizient zur Blutgefäßverengung für Hautschicht von jedem Segment	1/K
ST	Blutgefäßverengungssignal	-
S_{sw}	Kontrollkoeffizient Schwitzen für Hautschicht von jedem Segment	W/K
$SKINC$	Verteilungskoeffizient für Blutgefäßverengung	-
$SKINR$	Gewichtungskoeffizient zur Integration des Sensorsignals	-
$SKINS$	Gewichtungskoeffizient des Hautanteils für Schwitzen	-
$SKINV$	Gewichtungskoeffizient des Hautanteils für Blutgefäßerweiterung	-
T	Temperatur	°C
T_{mat}	Materialtemperatur	°C
TCI	Lokaler Komfort	-
TCO	Gesamtkomfort	-
T_{set}	Solltemperatur	°C
TSI	Lokales Empfinden	-
TSO	Gesamtempfinden	-
t_{umg}	Mittlere Umgebungstemperatur	°C
v	Luftgeschwindigkeit	m/s
W	Externe Arbeit	W
WRM	Warm Signal	K
$WRMS$	Integriertes warm Signal	K
α	Verhältnis des gegenläufigen Blutflusses	-
ρc	Volumenspezifische Wärme des Blutes	Wh/(L K)

Ihre Ansprechpartner für
GI - Gebäudetechnik in Wissenschaft & Praxis:

GI

Redaktionsleitung

Henriette von Feilitzsch

Tel.: +49 821 65 04 49-15

Fax: +49 821 65 04 49-99

E-Mail: vonfeilitzsch@innotech-medien.de

Redaktion

Katja Ewers

Tel.: +49 821 65 04 49-97

Fax: +49 821 65 04 49-99

E-Mail: ewers@innotech-medien.de

Anzeigen

Stephan Wedekind

Tel.: +49 821 65 04 49-55

Fax: +49 821 65 04 49-99

E-Mail: wedekind@innotech-medien.de

Abonnement/Einzelheftbestellungen

Dirk Sommer

Tel.: +49 821 65 04 49-41

Fax: +49 821 65 04 49-99

E-Mail: abo@recknagel-online.de