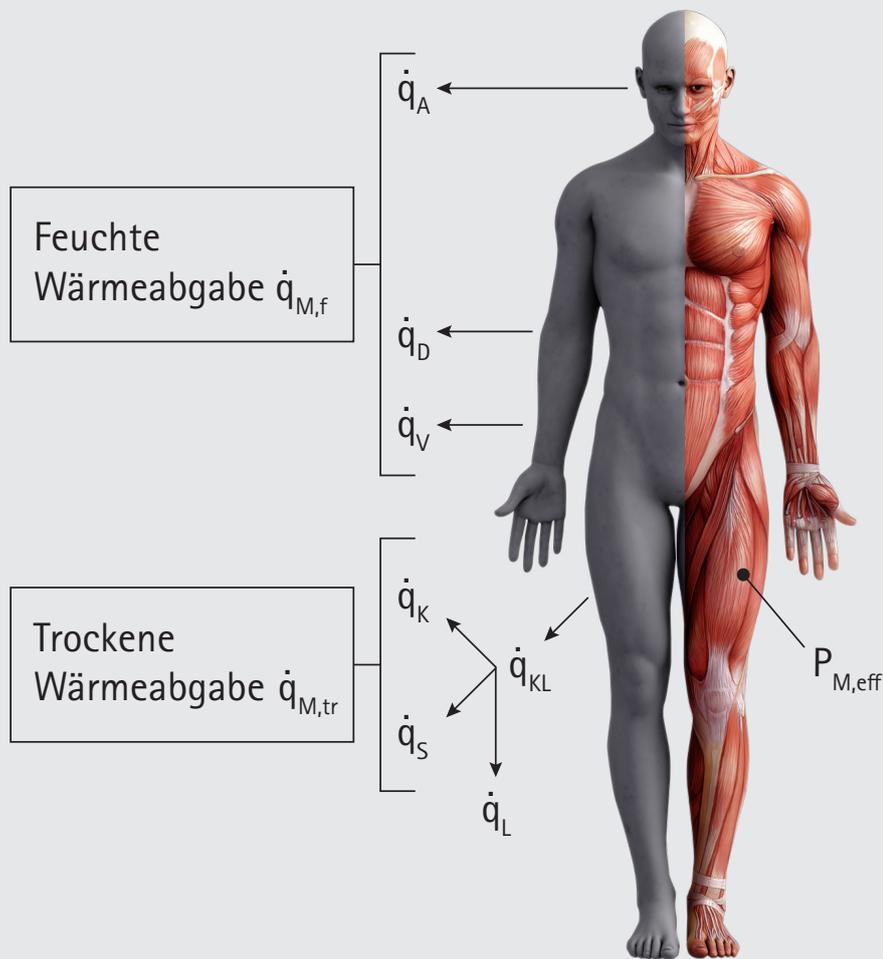


# G | I

## 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 unserem Know-how.

[www.wago.com/smart-building](http://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](mailto:info@kaut.de)

# Thermischer Komfort – Ein Überblick über Wissenschaft und Normung



*Das Arbeitsgebiet zum thermischen Komfort stellt die Verbindung zwischen Innenräumen und Anlagentechnik auf der einen Seite und dem Menschen bzw. dem Nutzer auf der anderen Seite her. In diesem Kontext haben grundlegende wissenschaftliche Erkenntnisse der vergangenen Jahrzehnte bereits Einzug in eine mittlerweile komplexe Normenreihe gehalten. Neben dem integralen PMV-PPD-Modell von Fanger gewinnt im Gebäudebereich zudem das adaptive Modell weiter an Bedeutung, wohingegen im Fahrzeug- und Kabinenbereich eine lokale Bewertung der thermischen Umgebung unabdingbar ist. Aktuelle wissenschaftliche Untersuchungen beschäftigen sich mit der Weiterentwicklung thermophysiologicaler Komfortmodelle und der Möglichkeit, eine Individualisierung für bestimmte Personengruppen zu realisieren. Dabei verlieren einfache Indizes gegenüber den komplexen Modellierungsmöglichkeiten mehr und mehr an Bedeutung.*

## Thermal Comfort – an Overview of Research and Standards

*The field of thermal comfort enables the connection of indoor environments and HVAC systems on the one hand and the human as a user on the other hand. Today, main findings of past research activities already found their way to a complex series of standards. In addition to the integral PMV-PPD-approach of Fanger, the adaptive model becomes more important for built environments. However, for vehicles and cabin environments a local analysis of the thermal environment is very crucial. Current research concentrates on the further development of thermo-physiological comfort models and the opportunity for individualization. In contrast to these models, simple indices become less important.*

VON  
KAI REWITZ  
MARK WESSELING  
DIRK MÜLLER

## 1. Einleitung

In Mitteleuropa verbringen Menschen einen Großteil ihrer Zeit in Gebäuden, um darin zu wohnen, zu arbeiten und ihre Freizeit zu verbringen. Um den heutigen Mobilitätsansprüchen im privaten und im geschäftlichen Bereich gerecht zu werden, werden zudem Transportmittel wie PKW, Bus, Bahn und Flugzeug eingesetzt, die zusammenfassend als Kabinenumgebungen beschrieben werden können. Insgesamt beläuft sich somit der Anteil der Aufenthaltszeit in Innenräumen auf durchschnittlich 90 % [1]. Dabei reichen die Anforderungen weit über die Grundbedürfnisse, wie zum Beispiel ein trockenes Dach über dem Kopf zu haben, hinaus. Neben energetisch-wirtschaftlichen Aspekten erhält die empfundene Aufenthaltsqualität einen immer größer werdenden Stellenwert. Für diese spielen neben der Luftqualität sowie visuellen, haptischen und akustischen Gesichtspunkten insbesondere die thermischen Randbedingungen eine wesentliche Rolle. Im Kontext der damit verbundenen Begriffe „thermisches Empfinden“ und „thermischer Komfort“ wurde in den letzten Jahrzehnten eine ganze Forschungsrichtung etabliert, deren komplexe Interdisziplinarität durch das Zusammenwirken von technischen Anlagen und Sachverhalten, des menschlichen Körpers sowie dessen subjektives Empfinden aus den Fachrichtungen Ingenieurwissenschaften, Medizin und Psychologie geprägt ist.

Die wissenschaftliche Untersuchung des thermischen Komforts ist durch die Aufrechterhaltung der Gesundheit und Leistungsfähigkeit der Nutzer von Innenräumen sowie der Steigerung der generellen Aufenthaltsqualität motiviert. Als zentraler Punkt kann der Wärmeübertragungsprozess des Menschen mit seiner thermischen Umgebung genannt werden. Dazu sind das Verständnis der menschlichen Physiologie sowie der Thermoregulation unter Berücksichtigung der metabolischen Wärmeabgabe und der Erfassung der thermischen Eigenschaften der getragenen Kleidung notwendig. Diese sind letztendlich in den psychologischen Kontext von subjektiven Bewertungen zu setzen. Insbesondere für den Gebäudesektor gewann dieser Forschungsbereich in den letzten beiden Jahrzehnten im Kontext der weltweiten Reduzierung von Treibhausgasemissionen bei gleichbleibendem Komfort eine zunehmende Bedeutung, sodass eine Vielzahl an Forschungsergebnissen bereits in die Entwicklung einer international gültigen Normenreihe eingeflossen ist [2].

Dieser Beitrag verschafft einen Überblick über die Normenreihe „Ergonomie der thermischen Umgebung“, zeigt aber darüber hinaus den weiteren Forschungsbedarf in diesem Gebiet auf und präsentiert eine Auswahl der zurzeit wesentlichen, aktiven Forschungsgruppen weltweit. Dabei werden verschiedene Methoden zur Bestimmung des thermischen Komforts vorgestellt und in diesem Kontext die experimentellen Methoden den Simulationsansätzen gegenübergestellt.

## 2. Normen zum thermischen Komfort

Wie groß der Bedarf an einheitlichen Betrachtungen des thermischen Komforts in der Anwendung ist, zeigt sich in der Anzahl der relevanten Normen. Die Normenreihe „Ergonomie der thermischen Umgebung“ weist eine Sammlung von über 18 verschiedenen Schriften auf, die sich mit den unterschiedlichen Aspekten des thermischen Komforts befassen. Ursprünglich stellte die DIN EN ISO 11399 ein zentrales Dokument dar, in welchem die einzelnen Normen in einen Kontext gestellt wurden [3]. Durch zahlreiche Überarbeitungen und Neuveröffentlichungen weiterer Normen ist die DIN EN ISO 11399 jedoch mittlerweile nicht mehr aktuell. Eine umfängliche Zusammenfassung der Historie der Normung liefern Olesen et. al. [4].

Basierend darauf bietet **Bild 1** eine Grundlage, um sich einen schnellen Überblick über die verschiedenen Normen zu verschaffen. Übergeordnet werden die genutzten Symbole und Begriffe in einer Art Glossar definiert [5]. Es erfolgt eine Einteilung hinsichtlich der thermischen Umgebungsbedingungen in moderat (grün), heiß (rot) und kalt (blau). Auf der linken Seite befindet sich eine allgemeine Risikobeurteilung der thermischen Umgebung, welche in die drei Stufen „Beobachten“, „Analyse“ und „Expertise“ gegliedert ist [6]. Deren Methodik kann zur Analyse und Vermeidung von Stress und Unbehaglichkeit aufgrund unzureichender Umgebungs-klimabedingungen in allen Temperaturbereichen herangezogen werden. Zentrale Elemente stellen somit die Arbeitsmethoden für die jeweilige thermische Randbedingung dar, wobei zurzeit nur für die kalten Umgebungsbedingungen eine veröffentlichte Norm (DIN EN ISO 15743) existiert [7]. Die Erarbeitungen der ISO/TR 16594<sup>1</sup> für den

<sup>1</sup> Der Inhalt des Dokuments ISO/TR 16594 ist identisch mit dem Inhalt des Dokuments ISO/TR 15694.

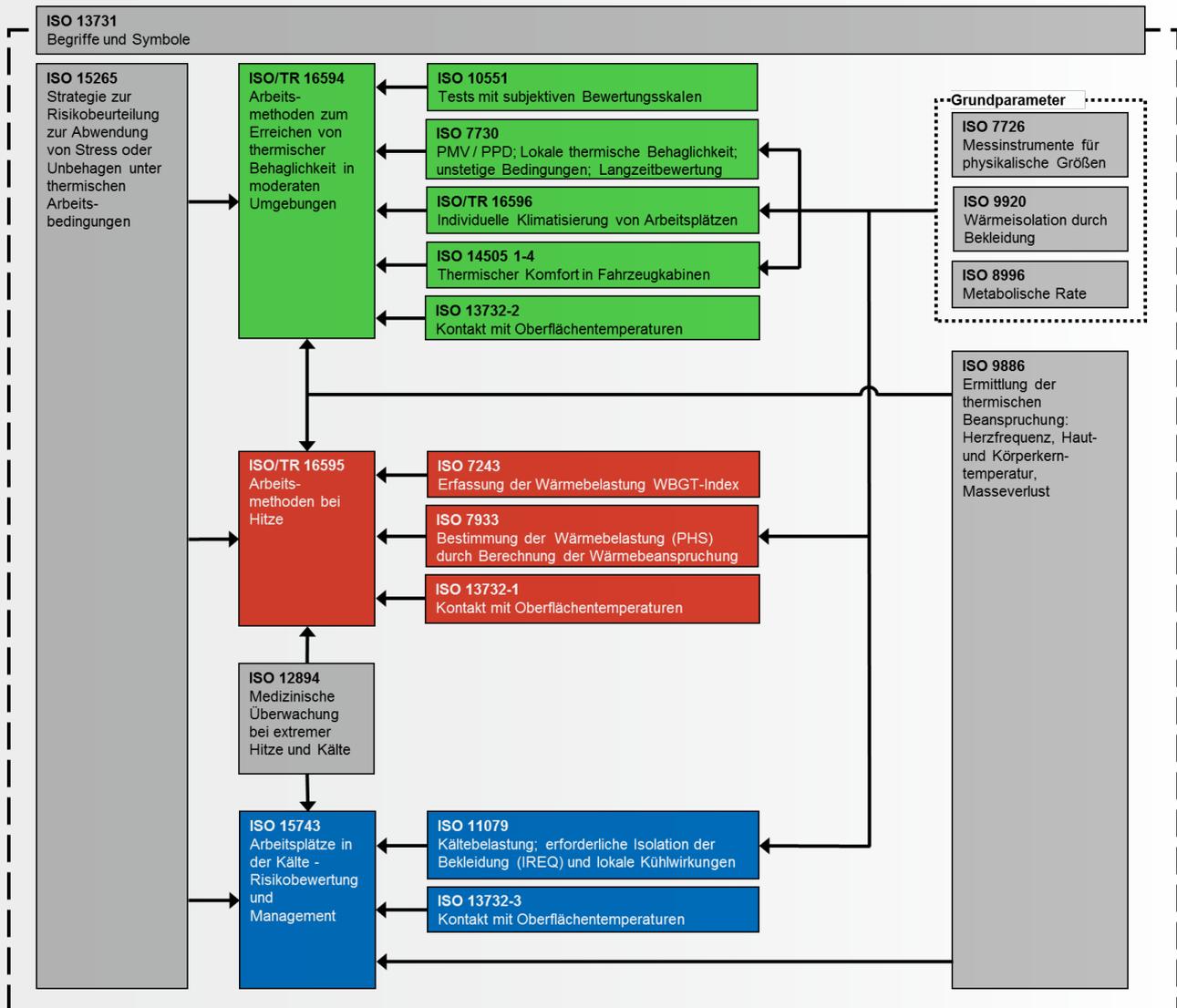


Bild 1: Übersicht zur Normenreihe „Ergonomie der thermischen Umgebung“.

moderaten Temperaturbereich sowie der ISO/TR 16595 für den warmen Bereich werden aktuell von Jørn Toftum (Dänemark) bzw. von Jacques Malchaire (Belgien) geleitet. Eine Ermittlung der thermischen Beanspruchung kann anhand der Erfassung und Interpretation der Körperkerntemperatur, der Hauttemperaturen an unterschiedlichen Körperteilen, der Herzschlagfrequenz und des Masseverlustes des menschlichen Körpers erfolgen [8]. Für kalte und warme Umgebungsbedingungen ist der thermische Komfort im Vergleich zur allgemeinen Risikoanalyse und Sicherstellung der Gesundheit der betreffenden Personen von geringerer Bedeutung [9]–[13]. So werden für diese Bereiche bspw. zusätzlich Anforderungen für eine medizinische Überwachung bei

Probandenversuchen definiert [14]. Im Folgenden wird jedoch der Fokus auf den thermischen Komfort bei moderaten Bedingungen gelegt.

Mittlerweile existieren eine Reihe an Modellansätzen, die es ermöglichen, von objektiven Daten, wie sie durch physikalische Messungen gewonnen werden können, auf eine mögliche subjektive Bewertung von Personengruppen zu schließen. Dennoch kann z. B. zur Neu- oder Weiterentwicklung solcher Modelle die Erfassung von weiteren subjektiven Daten notwendig werden. Dazu wird eine Empfehlung zur Durchführung von Probandenstudien mit subjektiven Bewertungsskalen hinsichtlich Wahrnehmung (thermisches Empfinden), Bewertung (thermische Behaglichkeit), Präferenz sowie Annehmbarkeit

Thermisches Empfinden		Thermische Behaglichkeit		Thermische Präferenz	
-4	sehr kalt	4	äußerst unbehaglich	3	viel wärmer
-3	kalt	3	sehr unbehaglich	2	wärmer
-2	kühl	2	unbehaglich	1	etwas wärmer
-1	leicht kühl	1	leicht unbehaglich	0	keine Veränderung
0	weder kühl noch warm	0	nicht unbehaglich	-1	etwas kühler
+1	leicht warm			-2	kühler
+2	warm			-3	viel kühler
+3	heiß				
+4	sehr heiß				

Bild 2: Übersicht der subjektiven Bewertungsskalen der thermischen Umgebung nach DIN EN ISO 10551 [15] für Empfinden, Behaglichkeit und Präferenz.

bzw. Toleranz gegeben [15]. Die ISO-Skala bezüglich der Wahrnehmung wird als zweipolig, symmetrisch, siebenstufig und mit einem zentralen Indifferenzpunkt definiert. Sie kann bei Bedarf auf neun Stufen erweitert werden (siehe Bild 2). Die Bewertungsskala entspricht einer einpoligen 4-stufigen Skala mit einem Ursprungspunkt, der keiner Wirkung entspricht und drei bzw. vier Stufen mit steigender Intensität. Die Präferenzskala weist sieben Stufen, zwei Pole und einen Indifferenzpunkt auf. Neben den vorgestellten ISO-Skalen, bei denen das Empfinden von der Bewertung getrennt betrachtet wird, existieren auch weitere Skalen wie z. B. die Bedford-Skala, welche eine Kombination aus Empfinden und Bewertung beinhaltet [16].

Vor allem im Gebäudebereich hat sich zur Bewertung von thermischen Umgebungsbedingungen das PMV-PPD-Modell von Ole Fanger fest etabliert [17]. Diesem liegt die Annahme zugrunde, dass das thermische Empfinden maßgeblich durch die Bewertung der Wärmebilanz des Menschen mit seiner Umgebung beschrieben werden kann, wobei der Mensch als homoiothermes Wesen eine ausgeglichene Wärmebilanz zur Aufrechterhaltung einer konstanten Körpertemperatur anstrebt. Als Ausgangsgleichung für die menschliche Wärmebilanz kann dazu

$$S = M - (W + C + R + K + E + Resp)$$

mit

$$M - W \geq 0$$

betrachtet werden. Dabei wird die Änderung der gespeicherten Wärme im menschlichen Körper („S“) durch die Differenz der metabolischen Rate

(„M“) und der Summe aus verrichteter mechanischer Leistung („W“) und Wärmetransport durch Konvektion („C“), Strahlung („R“), Wärmeleitung („K“), Verdampfung („E“) und Atmung („Resp“) bestimmt. Bei dem Modell handelt es sich um einen empirischen Berechnungsansatz zur Abschätzung einer mittleren Bewertung des thermischen Empfindens (engl.: predicted mean vote: PMV) auf der siebenstufigen ISO-Skala zwischen „heiß“ und „kalt“ basierend auf sechs Haupteinflussparametern. Diese sind zum einen vier physikalische Parameter der Umgebung bestehend aus Lufttemperatur, Luftgeschwindigkeit, mittlerer Strahlungstemperatur und Luftfeuchte [18]. Zusätzlich gehen in die zugehörigen Bestimmungsgleichungen des PMV der mittlere Energieumsatz und der mittlere Bekleidungsgrad der betrachteten Personengruppe ein [19], [20]. Ausgehend von dem berechneten PMV kann mithilfe einer stochastischen Verteilungsfunktion auf einen resultierenden Anteil an Unzufriedenen (engl.: predicted percentage of dissatisfied: PPD) geschlossen werden. Ergänzend zu dieser allgemeinen Bestimmung des thermischen Empfindens können separat lokale Einflüsse durch Betrachtung von vertikalen Temperaturunterschieden, warmen bzw. kalten Fußböden und allgemeinen Strahlungsasymmetrien analysiert werden. Zudem besteht die Möglichkeit zur Bestimmung eines vorausgesagten Anteils an Unzufriedenen aufgrund von Zugluft. Der Einfluss von transienten Umgebungsbedingungen wird über einen einfachen Ansatz durch die Begrenzung von Temperatur-Drifts und Amplituden bei zyklischem Verhalten beschrieben. Zudem kann der Einfluss auf Personen, die Oberflächen mit moderaten Temperaturen berühren, bestimmt werden [21].

Als Erweiterung des PMV-PPD-Modells kann das adaptive Modell betrachtet werden, welches eine Anpassung des Nutzers an die thermischen Randbedingungen in einem Gebäude berücksichtigt. Diese sogenannte Adaptation kann dabei in drei Kategorien unterteilt werden:

1. **Physiologie:** Akklimatisierung des Nutzers
2. **Verhalten:** zum Beispiel Nutzung von Fensteröffnungen, Anpassung der Kleidung
3. **Psychologisch:** Angepasste Erwartungshaltungen an unterschiedliche Typen von Gebäuden, zum Beispiel ob diese klimatisiert sind oder nicht

Für dieses Modell wird die Komfortraumtemperatur mit Grenzabweichungen von  $\pm 2$  K als operative Temperatur in Abhängigkeit des stündlichen Außenlufttemperaturmittelwertes definiert [22]. Diese gilt für den Sommerbetrieb von Bürogebäuden ohne maschinelle Kühlanlagen und für Nutzer mit geringer Aktivität sowie die Möglichkeiten, bei Bedarf Fenster zur Außenluft zu öffnen und ihre Kleidung anzupassen. Ein weiterer Adaptionsmechanismus kann bspw. die Nutzung von regelbaren Ventilatoren sein, um die Luftgeschwindigkeit lokal zu erhöhen. Somit können die Grenzen der zulässigen operativen Temperatur erhöht werden.

Fahrzeuge weisen im Allgemeinen hinsichtlich der thermischen Umgebungsbedingungen im Vergleich mit Gebäuden einige Unterschiede auf. So sind die Abstände des Nutzers zur Fahrzeughülle geringer und der potentielle Einfluss durch Sonneneinstrahlung ist aufgrund des prozentual höheren Anteils an transparenten Flächen größer. Die Nutzung von Klimaanlage kann zudem je nach Lastfall zu inhomogenen Temperatur- und Geschwindigkeitsfeldern führen, welche zusätzlich durch Strahlungsasymmetrien sowie transiente Vorgänge überlagert werden können. Der jeweilige, vor allem lokale Einfluss auf das thermische Empfinden kann durch die bisher genannten Normen jedoch nur unzureichend abgebildet werden. Ergänzend zum Einsatz im Gebäudebereich wurde daher eine dreiteilige Normenreihe verfasst, die sich mit dem thermischen Komfort in Fahrzeugen befasst [23]–[26]. Zur Bewertung von thermischen Umgebungen in Fahrzeugen werden zwei Methoden vorgestellt, zum einen die physikalisch messbare und reproduzierbare Äquivalenttemperatur und zum anderen die Nutzung von subjektiven Bewertungen durch Testpersonen. Die Äquivalenttemperatur ist definiert als integrale Vergleichstemperatur eines

Raumes, welcher eine homogene Strahlungstemperatur gleich der Lufttemperatur und eine Luftgeschwindigkeit von null aufweist, sodass die Wärmeübertragung einer Person durch Konvektion und Strahlung mit diesem Raum gleich der Wärmeübertragung mit der tatsächlichen Umgebung ist. Zur Bestimmung der Äquivalenttemperatur werden verschiedene beheizte Messgeräte vorgestellt. Zur Beurteilung von thermischen Asymmetrien ist die segmentbezogene Äquivalenttemperatur heranzuziehen, welche mit den vorgestellten Messmethoden für einzelne Körperteile einer Person bestimmt werden kann. Die Interpretation der Messergebnisse hinsichtlich eines subjektiven thermischen Empfindens kann mithilfe von Temperatur-Behaglichkeits-Diagrammen erfolgen, die im Wesentlichen auf den Arbeiten von Nilsson beruhen [27]. In diesen werden bezogen auf die Äquivalenttemperatur für 16 Körpersegmente und das Gesamtempfinden jeweils fünf subjektive Bewertungsstufen („zu kalt“, „kalt, jedoch behaglich“, „neutral“, „warm, jedoch behaglich“, „zu warm“) markiert. Dabei wird zwischen dem Sommer- und Winterbetrieb unterschieden.

Zur Ermittlung der thermischen Umgebung durch subjektive Bewertungen werden Empfehlungen unter Berücksichtigung der spezifischen Anforderungen in einer Fahrzeuggabine gegeben bspw. zur Abfrage des thermischen Empfindens an einzelnen Körpersegmenten [26]. Dabei wird generell empfohlen, soweit vorhanden, die ISO-Skalen zu nutzen, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit weiteren Untersuchungen zu gewährleisten. Eine Erweiterung der Empfindungs-Skala bei der Untersuchung von extremen Bedingungen, wie sie beispielsweise für einen Aufheiz- oder Abkühlprozess im Winter bzw. Sommer für ein geparktes Fahrzeug auftreten können, ist jedoch möglich. Bei der Auswertung und Interpretation der Ergebnisse werden Unterschiede zu den Normen aus dem Gebäudebereich ersichtlich. Beim thermischen Empfinden wird der Skalenbereich größer +2 (warm) bzw. kleiner –2 (kühl) als unbehaglich definiert, wobei der Anteil an Unzufriedenen im Gebäudebereich durch den Anteil der Bewertungen größer +1 (etwas warm) bzw. kleiner –1 (etwas kühl) bestimmt wird. Zusätzlich wird eine „Stickigkeits“-Skala eingeführt, welche die Stickigkeit analog zur „Unbehaglichkeit“ jeweils nicht-symmetrisch in vier Stufen von „nicht stickig“ bis „sehr stickig“

einteilt. Dabei stellen diese beiden Skalen gegenseitige Ergänzungen dar und können dabei helfen, die Ergebnisse auf Plausibilität zu prüfen.

### 3. Thermischer Komfort in der Wissenschaft

Auch wenn bereits die Ergebnisse einer Vielzahl von wissenschaftlichen Untersuchungen in die Erarbeitung von internationalen Normen eingeflossen sind, gelten weiterhin einige Fragestellungen bisweilen nur als unzureichend geklärt [28]. So bewertet van Hoof die Anwendung des PMV-PPD-Modells über die letzten 40 Jahre und nennt weiteren Forschungsbedarf hinsichtlich des Einflusses der Gruppenzusammensetzung auf das thermische Empfinden, welche bei den Versuchen von Fanger größtenteils aus Studenten bestand [29]. Zudem wird prognostiziert, dass der individuelle thermische Komfort berücksichtigt durch persönliche Nutzerprofile in Zukunft an Bedeutung gewinnen wird. Die Erkenntnisse zur thermischen Adaptation werden von Brager und de Dear beschrieben [30]. So hat die physiologische Akklimatisierung einen geringen Einfluss auf die thermische Adaptation im Vergleich zur Anpassung des Nutzerverhaltens oder der Erwartungshaltung. Zudem kann ein Unterschied zwischen den Bewertungen eines natürlich belüfteten gegenüber denen eines klimatisierten Gebäudes aufgezeigt werden, der sich nur teilweise durch das PMV-Wärmebilanzmodell erklären lässt. So sind die Komfort- bzw. Toleranzgrenzen für ein nicht klimatisiertes Gebäude größer als für ein klimatisiertes Gebäude. Nichol und Humphreys analysieren zudem Unterschiede für die Definition der Raumkomforttemperatur für nicht klimatisierte Gebäude in den Normen ASHRAE: Standard 55-2004 und EN15251 [22], [31], [32]. Weiterer Forschungsbedarf wird hinsichtlich der Adaptationsmechanismen als auch des Einflusses von energieeffizienten Heiz- und Kühlsystemen wie Quellluft, die zu nicht homogenen Randbedingungen führen, ausgewiesen. Insgesamt kann festgestellt werden, dass die Aktivität von Forschern in diesem Bereich, gemessen an der Anzahl an Veröffentlichungen in internationalen Fachzeitschriften und den resultierenden Zitationen, weltweit stark zugenommen hat [2]. Dies wird zudem durch eine Vielzahl an Literaturstudien, die in den letzten Jahren publiziert wurden, bestätigt. Dabei spielt der thermische Komfort in

Gebäuden allgemein insbesondere aber auch für nicht homogene und transiente Untersuchungen eine wesentliche Rolle [2], [29], [30], [33]–[35].

In **Tabelle 1** ist eine Auswahl von relevanten Forschungseinrichtungen mit entsprechender Adresse zum Internetauftritt gegeben. Zudem bietet die im Rhythmus von zwei Jahren stattfindende Windsor-Konferenz<sup>2</sup> die Möglichkeit, einen Überblick über die aktuellen internationalen Forschungstätigkeiten im Bereich der thermischen Behaglichkeit zu gewinnen. Zusätzlich zu den vorgestellten Institutionen existieren durch die Internationale Energieagentur (engl.: International Energy Agency, IEA) geförderte Verbundvorhaben, sogenannte IEA-EBC-Annexe. Dabei handelt es sich um internationale Programme zur Ermöglichung von gemeinschaftlichen Forschungs- und Entwicklungsprojekten innerhalb der 22 Mitgliedstaaten im Bereich der Energietechnik auf Gebäude- und Quartiersebene (Energy in Buildings and Communities Programme, EBC). Aktuell wird das Thema „thermischer Komfort“ im laufenden „EBC Annex 69 (Strategy and Practice of Adaptive Thermal Comfort in Low Energy Buildings)“ untersucht. Zudem findet diese Thematik Bedeutung in dem in 2017 abgeschlossenen „EBC Annex 62 (Ventilative Cooling)“.

Grundlegend lassen sich die in der Forschung zur Verfügung stehenden Methoden in zwei Kategorien einteilen. Auf der einen Seite steht die Erfassung von experimentellen Daten, welche sowohl die physikalisch messbaren Größen wie Lufttemperatur und Geschwindigkeit als auch die subjektiven Bewertungen des Menschen beinhalten. Dabei lassen sich wiederum zwei Sub-Methoden unterscheiden. Dies sind zum einen die Untersuchungen in Prüfständen bzw. Klimakammern, welche eine gute Reproduzierbarkeit und eine genaue Kontrolle der Randbedingungen ermöglichen. Zum anderen können Feldstudien im laufenden Gebäudebetrieb genutzt werden, die den Vorteil bieten, im Allgemeinen größere Stichproben und Bewertungen unter realen Anwendungsbedingungen zu erfassen [2], [34]. Eine direkte Analyse der experimentellen Daten ist jedoch nur auf die zuvor festgelegten diskreten Messszenarien beschränkt. Daher stehen der Erfassung von experimentellen Daten der Entwurf und die

<sup>2</sup> Weitere Informationen sind unter <http://windsorconference.com/> zu finden.

**Tabelle 1:** Übersicht zu ausgewählten Forschungseinrichtungen

Institution	Schwerpunkte	Webadresse
Center for the Built Environment, University of California, Berkeley, USA	Komfort in Innenraumumgebungen; thermophysiologische Komfortmodellierung (Berkeley-Komfort-Modell) unter transienten und asymmetrischen Randbedingungen	<a href="http://www.cbe.berkeley.edu/index.htm">www.cbe.berkeley.edu/index.htm</a> <a href="http://comfort.cbe.berkeley.edu/">http://comfort.cbe.berkeley.edu/</a>
Architectural Science, University of Sydney, Australien	Thermische Behaglichkeit, Luftqualität und Produktivität; Adaptives Komfortmodell	<a href="http://www.sydney.edu.au/architecture/research/arch-science">www.sydney.edu.au/architecture/research/arch-science</a>
Environmental Ergonomics Research Center, Loughborough University of Technology, England	Menschliche thermoregulatorische Physiologie; Umgebungsergonomie; Wärme- und Feuchtigkeitstransport durch Kleidung	<a href="http://www.lboro.ac.uk/departments/design-school/research/environmental-ergonomics">www.lboro.ac.uk/departments/design-school/research/environmental-ergonomics</a>
Leibniz-Institut für Arbeitsforschung, TU Dortmund, Deutschland	Thermophysiologische Modellierung, Universal Thermal Climate Index (UTCI)	<a href="http://www.ifado.de">www.ifado.de</a> ; <a href="http://www.utci.org">www.utci.org</a>
Department of the Built Environment, TU Eindhoven, Niederlande	Optimierung von Innenraumqualität zur Steigerung von Gesundheit, Komfort und Produktivität	<a href="http://www.tue.nl/en/university/departments/built-environment/research/research-programs/building-physics-and-services/research/chairs/building-performance">www.tue.nl/en/university/departments/built-environment/research/research-programs/building-physics-and-services/research/chairs/building-performance</a>
Institut für Gebäude- und Raumklimatechnik, RWTH Aachen University, Deutschland	Thermophysiologische Komfortmodellierung (33-NCM); Nutzerverhalten; Zusammenspiel von Anlagentechnik, Innenraum und thermischem Komfort	<a href="http://www.ebc.eonerc.rwth-aachen.de">www.ebc.eonerc.rwth-aachen.de</a>
Department of Civil Engineering, DTU, Dänemark	Erreichen eines gesunden, behaglichen und produktiven Innenraumklimas unter minimalem Energieaufwand	<a href="http://www.iciee.byg.dtu.dk">www.iciee.byg.dtu.dk</a>
Department of Architecture, Waseda University in Tokio, Japan	Thermophysiologische Komfortmodellierung (JOS-2-Modell) unter transienten und asymmetrischen Randbedingungen	<a href="http://www.tanabe.arch.waseda.ac.jp/en">www.tanabe.arch.waseda.ac.jp/en</a>
Department of Human Biology / Movement Sciences, Maastricht University Medical Center, Niederlande	Energiestoffwechsel und Thermoregulation des menschlichen Körpers; Einfluss von thermischen und visuellen Umgebungen auf Physiologie und Gesundheit	<a href="http://www.maastrichtuniversity.nl/markenlichtenbelt/research">www.maastrichtuniversity.nl/markenlichtenbelt/research</a> <a href="http://www.maastrichtuniversity.nl/research/graduate-schools/school-nutrition-and-translational-research-metabolism">www.maastrichtuniversity.nl/research/graduate-schools/school-nutrition-and-translational-research-metabolism</a>
Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen, RWTH Aachen University, Deutschland	Thermophysiologische Komfortmodellierung (MORPHEUS); Nutzerverhalten, Weiterentwicklung von Klimasensoren	<a href="http://www.e3d.rwth-aachen.de">www.e3d.rwth-aachen.de</a>
Fachgebiet Bauphysik und technischer Ausbau (fbta), Karlsruher Institut für Technologie, Deutschland	Aufenthaltsqualität am Arbeitsplatz; Nutzerzufriedenheit und -verhalten; Feldmessungen zur sommerlichen thermischen Behaglichkeit in Gebäuden; menschliche Adaption an Störfaktoren	<a href="http://fbta.ieb.kit.edu/forschung.php">http://fbta.ieb.kit.edu/forschung.php</a>
J. B. Pierce Foundation Laboratory, New Haven, Connecticut, USA	Grundlagenwerke zur numerischen Modellierung des menschlichen Thermoregulationssystems	<a href="http://www.jbpierce.org">www.jbpierce.org</a>

Weiterentwicklung von Berechnungsmodellen gegenüber, die für einen größeren Bereich von Randbedingungen eingesetzt werden können. Dabei können je nach Modellansatz sowohl Prüfstands- als auch Feldstudien Anwendung finden. So basiert z. B. das PMV-PPD-Modell von Fanger auf Versuchen in Klimakammern [36], während

das Adaptive Komfortmodell auf den Ergebnissen von Feldstudien beruht. Generell bilden die Modelle in unterschiedlichen Abstraktionsgraden den Wärmetransport zwischen Mensch und Umgebung und die resultierende subjektive Bewertung ab. Im Folgenden wird eine Kategorisierung der bestehenden Komfortmodelle und

deren Anwendungsbereiche vorgestellt. Parsons unterteilt die entwickelten Modelle in thermische Indizes, Ein-Segment-Modelle und Multi-Segment-Modelle [16].

Thermische Indizes wurden entwickelt, um das thermische Empfinden bzw. die thermische Belastung von Menschen vor allem in warmen und heißen Umgebungen durch eine einzige integrale Größe wiederzugeben. Ziel ist es dabei, alle maßgeblichen Parameter zu berücksichtigen, um die Reaktion des Menschen sowohl im zivilen und militärischen Arbeitsumfeld als auch beim Sport und im Freizeitbereich zu bestimmen und mögliche Gefahren zu identifizieren und zu minimieren. Dabei ist zu berücksichtigen, dass historisch bedingt durch geringe verfügbare Rechenleistungen und das Ziel, möglichst einfach handhabbare Berechnungsvorschriften zu erhalten, einem Großteil der Indizes Vereinfachungen zugrunde liegen. Die einfachsten Indizes stellen dabei mit empirischen Ansätzen eine direkte Korrelation zwischen physikalischen Messwerten und einer subjektiven Bewertung bzw. einem thermischen Belastungsrisiko dar. Als Beispiel lässt sich die Effektivtemperatur mit den Eingangsgrößen Lufttemperatur und Luftfeuchte nennen, die aus der Bestrebung hervorging, die Wärmebelastung von US-amerikanischen Soldaten in 1950er-Jahren vorherzusagen.

Zur Verbesserung der Genauigkeit und zur Berücksichtigung weiterer Parameter wie Strahlung wurden im Laufe der Jahre weitere Indizes entwickelt. Übersichten über die thermischen Indizes liefern Epstein und Moran sowie Havenith und Fiala [37], [38]. Zurzeit stellt der WBGT-Index (engl.: Wet-Bulb-Globe-Temperature) den gebräuchlichsten direkten Index dar und dieser wird auch in der ISO 7243 und BGI 579 genutzt [13], [39]. Diese Dokumente liefern in Abhängigkeit der metabolischen Rate, des Akklimatisierungszustandes der betroffenen Personen und der Luftgeschwindigkeit Grenzwerte des WBGT-Index, welche nicht zu überschreiten sind. Zur Bestimmung werden mit entsprechenden Sensoren die Trocken- und Feuchtkugeltemperaturen, sowie die Globe-Temperatur erfasst [18]. Auf Kritikpunkte hinsichtlich der Limitierung des Anwendungsbereiches auf leichte Bekleidungsgrade wurde in der aktuellen Version durch die Einführung von Korrekturfaktoren für weitere Bekleidungsgrade reagiert, dennoch wird empfohlen z. B. für eine detaillierte Analyse von Effekten durch Schutz-

kleidung komplexere Modellansätze zu wählen [37].

Für inhomogene und asymmetrische Randbedingungen setzt sich das thermische Gesamtempfinden aus dem lokalen thermischen Empfinden der einzelnen Körperteile zusammen [40]–[42]. Um die Randbedingungen solcher Umgebungen hinsichtlich des Temperatur- und Geschwindigkeitsfeldes abbilden zu können, gewann die numerische Strömungssimulation zur Berechnung von Raumluftströmung schnell an Bedeutung. Im Kontext der heutigen verfügbaren Rechenleistungen und umfassenden experimentellen Untersuchungen konnten somit komplexere Modelle entwickelt werden, welche eine detaillierte Betrachtung von lokalen Einflussgrößen und transienten Vorgängen ermöglichen. So können Einflüsse einzelner Körperteile auf die Bewertung des Gesamtempfindens berücksichtigt werden. Diese Modelle werden auch als thermophysiological Modelle bezeichnet. Sie bestehen in der Regel aus einem passiven und einem aktiven System des menschlichen Körpers.

Durch das passive System wird der Wärmetransport zwischen Mensch und Umgebung und innerhalb des Mensch-Modells abgebildet. Die Modelle des passiven Systems lassen sich zunächst hinsichtlich der Abbildung des Körpers in ein oder mehrere Körpersegmente aufteilen. Die weitere Gliederung erfolgt daraufhin, in wie viele Schichten bzw. Knoten jedes Segment aufgelöst wird. Die höchste Auflösung bieten Multi-Element-Modelle, in denen einzelne Körperteile durch eine Vielzahl an Elementen aufgelöst werden (siehe **Bild 3**). Das aktive System beschreibt die Wärmeregulation innerhalb des menschlichen Körpers. Dieses wird durch ein virtuelles zentrales Nervensystem gesteuert und setzt sich aus den Funktionen zur Regulierung des Blutflusses über Gefäßverengung und Gefäßweiterung sowie aus Schwitzen und Kältezittern zusammen. Ziel ist dabei die Aufrechterhaltung einer konstanten Körperkerntemperatur. Die Modelleingangsgrößen sind die Randbedingungen der Umgebung sowie physiologische Parameter wie metabolische Rate, Körpergewicht- und Größe, Fettanteil, Alter und Geschlecht. Als Ergebnis werden für die jeweiligen Segmente die Kern- und Hauttemperatur berechnet. Durch die Anbindung an ein psychologisches Modell können die berechneten Temperaturwerte zur Bewertung der thermischen Umgebung hinsichtlich einer subjektiven Skala interpretiert werden. Das Gesamtmodell kann

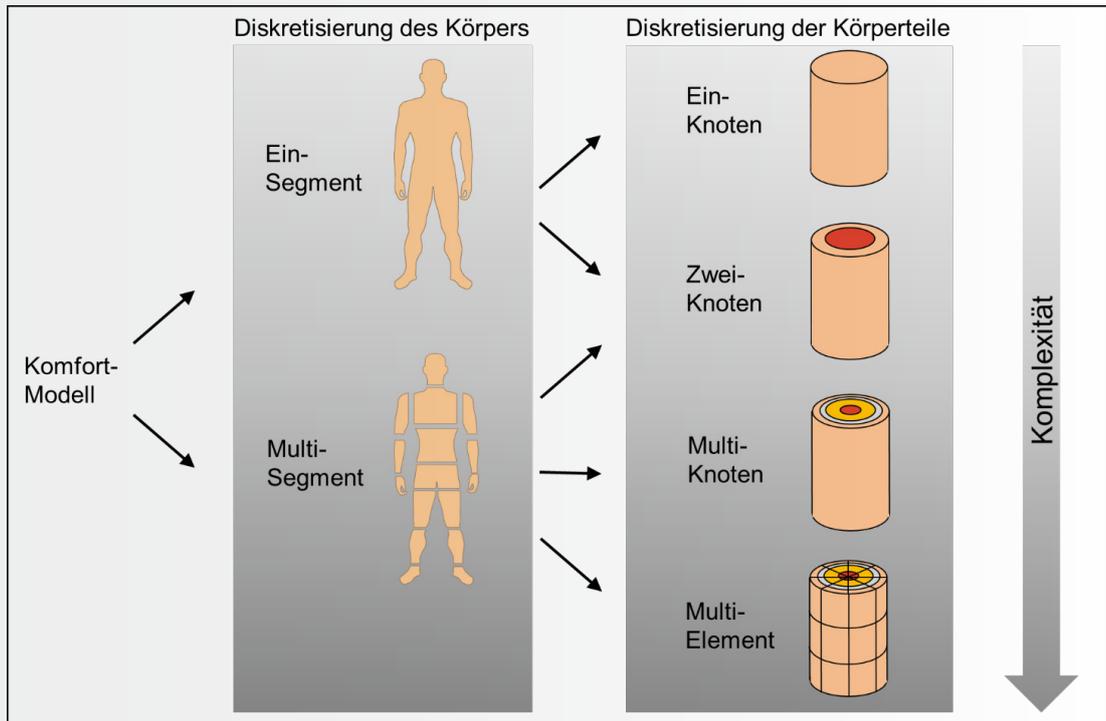


Bild 3: Gliederung von thermophysiologicalen Komfortmodellen hinsichtlich Körper- und Körperteil-Diskretisierung (passives System).

dann als thermophysiologicales Komfortmodell bezeichnet werden. Eine Übersicht zu bestehenden thermischen Modellen im Allgemeinen liefern Katic et al., Croitoru et al. und Cheng et al. und speziell für Fahrzeugumgebungen Hintea et al., Alahmer et al. und Danca et al. [43]–[48].

Ein bekanntes Einzel-Segment-Modell stellt das 2-Knoten-Modell von Gagge aus dem Jahr 1971 dar [49]. Darin wird der menschliche Körper als zweischichtiger Zylinder modelliert. Der innere Zylinder stellt dabei den Körperkern mit interner Wärmeproduktion dar und das äußere Ringelement die Haut. Dabei wird der Wärmetransport zwischen der inneren und äußeren Schicht sowie der äußeren Schicht und der Umgebung durch das aktive System geregelt. Eine Unterteilung in mehrere Körpersegmente findet für dieses Modell nicht statt. Sollen einzelne Körperteile betrachtet werden, können Multi-Segment-Modelle eingesetzt werden. Eines der bekanntesten Modelle, das Pierce-Modell, wurde von Stolwijk entwickelt und umfasst 25 Knoten, wobei sechs Körperteile als Kugel bzw. Zylinder (Kopf, Rumpf, Arme, Beine, Hände, Füße) mit jeweils vier Schichten (Körperkern, Fett, Muskeln, Haut) modelliert werden. Der letzte Knoten umfasst einen zentralen Blutknoten mit homo-

gener Temperatur, der für einen konvektiven Wärmetransport zu den restlichen Knoten sorgt. Zusätzlich wird der Wärmeaustausch zwischen benachbarten Segmenten bzw. Körperteilen per Wärmeleitung modelliert. Weitere Modelle, die auf dem Ansatz des aktiven Systems von Stolwijk basieren, sind z. B. das Modell von Tanabe, das 33-NCM, sowie das Berkeley-Comfort-Modell [50]–[54]. Ein weiteres bekanntes Modell wurde 1999 von Fiala vorgestellt [55]. In diesem werden 15 Körperteile (Kopf, Gesicht, Nacken, Schultern, Arme, Hände, Brustkorb, Bauch, Beine, Füße) idealisiert als Kugel bzw. Zylinder abgebildet. Das Modell ermöglicht eine dynamische Vorhersage der thermischen Behaglichkeit (engl.: Dynamic Thermal Sensation: DTS) unter Berücksichtigung von asymmetrischen Temperatureinflüssen [55]–[59]. Jedes Element beinhaltet je nach Körperteil verschiedene Gewebeschichten (Hirn, Lunge, Knochen, Muskel, Organe, Fett und zwei Schichten Haut) mit entsprechenden thermischen Eigenschaften. Das Thermoregulationssystem basiert auf Regressionsansätzen zwischen berechneten physiologischen Werten und einer Reihe von experimentellen Datensätzen zu thermischen Behaglichkeitsuntersuchungen. Kritik besteht darin, ob durch die Regression die grundlegenden

Mechanismen zur Beeinflussung der thermischen Behaglichkeit im Detail abgebildet werden können und dass eine Erweiterung um den Einfluss der untersuchten Hautfeuchte bislang aussteht [16]. Foda et al. liefern einen Vergleich zwischen dem Fiala-Modell, dem Berkeley-Modell und einer multisegmentalen Version des Pierce-Modells [60]. Dabei beschreiben sie u.a. Unterschiede hinsichtlich der Thermoregulation in Bezug auf verschiedene experimentelle Daten der lokalen Hauttemperaturen unter stationären und transienten Vorgängen [61].

Neben der Abbildung des menschlichen Körpers sind entsprechende Kleidungsmodelle zur Bestimmung des realen Wärmetransports bzw. des Wärmeempfindens notwendig, da Kleidung als thermische Dämmung und Wasserdampfbarriere dienen oder z. B. Feuchtigkeit aufnehmen oder abgeben kann [62], [63]. Zur Erfassung von Kleidungseigenschaften können z. B. thermische Manikins eingesetzt werden. Ein Verfahren dazu wird von Holmer und Nilsson vorgestellt [64]. Ein Kleidungsmodell für das Berkeley-Modell liefert bspw. Ming [65].

Als Beispiel für einen komplexen thermischen Index ist der UTCI (engl.: Universal Thermal Climate Index) zu nennen, welcher auf einer Weiterentwicklung des Fiala-Modells inklusive eines Bekleidungsmodells basiert und als Ergebnis aus einer Zusammenarbeit von 45 Wissenschaftlern aus 23 Ländern hervorgegangen ist [66] – [70]. Der Anwendungsbereich umfasst sowohl warme Umgebungsbedingungen mit Sonneneinstrahlung und hoher relativer Luftfeuchte als auch kalte Umgebungen unter Berücksichtigung von Windeinfluss im Freien. Als weitere Entwicklungsansätze werden Implementierungen zur Berücksichtigung der Fitness, dem Grad der Akklimatisierung sowie von Alter und Geschlecht der untersuchten Personengruppen genannt [68].

#### 4. Zusammenfassung und Ausblick

Das Thema thermischer Komfort hat sowohl in der Wissenschaft als auch in der Normung vor allem in den letzten 20 Jahren weiter stark an Bedeutung gewonnen. Neben dem fest etablierten PMV-PPD-Modell von Fanger existieren mittlerweile einige vielversprechende Weiterentwicklungen wie das adaptive Modell, welches neben der eindimensionalen Wärmebilanz des Menschen auch Anpassungen hinsichtlich des

Nutzerverhaltens und der Erwartungen an unterschiedliche Gebäudetypen berücksichtigt. Durch die heutigen zur Verfügung stehenden Rechenkapazitäten wurden zudem eine Reihe an komplexen thermophysiologischen Komfortmodellen entwickelt, sodass auch für komplexe asymmetrische und transiente Umgebungsbedingungen Vorhersagen für das thermische Empfinden und die Akzeptanz getroffen werden können. Solche Komfortmodelle bieten die Möglichkeit mit vergleichsweise geringem Aufwand und finanziellen Mitteln Bewertungen von Klimasystemen vor allem in der Design- und Engineering-Phase vorzunehmen.

Es bleibt spannend, welche wissenschaftlichen Erkenntnisse Einzug in zukünftige Normen halten werden und ob das adaptive Modell größere Bedeutung in diesem Kontext gewinnen wird. Eine Möglichkeit wäre die Erweiterung auf Gebäude mit mechanischer Lüftung bzw. Klimaanlage, bei denen die gleitende Außenlufttemperatur möglicherweise durch die gleitende Innenlufttemperatur ersetzt werden kann. Ansätze dazu gehen laut de Dear et al. auf Untersuchungen von Humphreys und Nicol aus den 1970er-Jahren zurück [2].

Auch hinsichtlich der thermophysiologischen Komfortmodelle ist noch eine Reihe von Fragestellungen zu beantworten, da die meisten Modelle nur für einen begrenzten Einsatzbereich validiert sind. Die genaue Beschreibung von Kleidungseigenschaften sowie die Individualisierung von Modellen auf unterschiedliche Personengruppen stehen weiterhin im Fokus der Forscher. Zur Analyse von komplexen Randbedingungen wird zudem die Kopplung an numerische CFD-Simulationen zur lokalen Auflösung der Geschwindigkeits- und Temperaturfelder um die einzelnen Körperteile weiter an Bedeutung gewinnen.

#### Danksagung

Wir danken für die finanzielle Unterstützung durch die Heinz Trox Wissenschafts gGmbH.

#### Literatur

- [1] Debiak, M.: Ausschuss für Innenraumrichtwerte. (vormals Ad-hoc-Arbeitsgruppe), Homepage des Umweltbundesamtes 2017. <http://www.umweltbundesamt.de/themen/gesundheit/kommissionen-arbeitsgruppen/ausschuss-fuer-innenraumrichtwerte-vormals-ad-hoc#textpart-2>.

- [2] de Dear, R. J., Akimoto, T., Arens, E. A., Brager, G. S., Candido, C., Cheong, K. W. D., Li, B., Nishihara, N., Sekhar, S. C., Tanabe, S.-i., Toftum, J., Zhang, H. u. Zhu, Y.: Progress in thermal comfort research over the last twenty years. *Indoor air* 23 (2013) 6, S. 442–461.
- [3] DIN EN ISO 11399; 2000-11. Ergonomie des Umgebungsklimas – Grundlagen und Anwendung relevanter internationaler Normen.
- [4] Olesen, B. W., d'Ambrosio Alfano, F. R., Parsons, K. C. u. Palella, B. I.: The history of international standardization for the ergonomics of the thermal environment. *Windsor Conference 2016 - Making Comfort Relevant - Proceedings. 9th International Windsor Conference. 2016, S. 15–38.*
- [5] DIN EN ISO 13731; 2001-12. Ergonomie des Umgebungsklimas – Begriffe und Symbole.
- [6] DIN EN ISO 15265; 2004-08. Ergonomie der thermischen Umgebung - Strategie zur Risikobeurteilung zur Abwendung von Stress oder Unbehagen unter thermischen Arbeitsbedingungen.
- [7] DIN EN ISO 15743:2008; 2008-07. Ergonomie der thermischen Umgebung - Arbeitsplätze in der Kälte – Risikobewertung und Management.
- [8] DIN EN ISO 9886; 2004-02. Ergonomie – Ermittlung der thermischen Beanspruchung durch physiologische Messungen.
- [9] DIN EN ISO 13732-1; 2008-09. Ergonomie der thermischen Umgebung - Bewertungsverfahren für menschliche Reaktionen bei Kontakt mit Oberflächen – Teil 1: Heiße Oberflächen.
- [10] DIN EN ISO 7933; 2004-08. Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der Wärmebelastung durch Berechnung der vorhergesagten Wärmebeanspruchung.
- [11] DIN EN ISO 13732-3; 2008-12. Ergonomie der thermischen Umgebung -Bewertungsmethoden für Reaktionen des Menschen bei Kontakt mit Oberflächen -Teil 3: Kalte Oberflächen.
- [12] DIN EN ISO 11079; 2007-12. Ergonomie der thermischen Umgebung - Bestimmung und Interpretation der Kältebelastung bei Verwendung der erforderlichen Isolation der Bekleidung (IREQ) und lokalen Kühlwirkungen.
- [13] DIN EN ISO 7243; 2017-12. Ergonomie der thermischen Umgebung - Ermittlung der Wärmebelastung durch den WBGT-Index (wet bulb globe temperature).
- [14] DIN EN ISO 12894; 2001-06. Ergonomie des Umgebungsklimas - Medizinische Überwachung von Personen, die einer extrem heißen oder kalten Umgebung ausgesetzt sind.
- [15] DIN EN ISO 10551; 2001-04. Ergonomie des Umgebungsklimas - Beurteilung des Einflusses des Umgebungsklimas unter Anwendung subjektiver Bewertungsskalen.
- [16] Parsons, K. C.: *Human Thermal Environments. The effects of hot, moderate, and cold environments on human health, comfort and performance.* London and New York: Taylor & Francis 2014.
- [17] DIN EN ISO 7730; 2005-11. Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit (ISO 7730:2005); Deutsche Fassung EN ISO 7730:2005.
- [18] EN ISO 7726; 2001-07. Umgebungsklima – Instrumente zur Messung physikalischer Größen.
- [19] DIN EN ISO 8996; 2004-10. Ergonomie der thermischen Umgebung – Bestimmung des körpereigenen Energieumsatzes.
- [20] DIN EN ISO 9920; 2009-06. Ergonomie der thermischen Umgebung – Abschätzung der Wärmeisolation und des Verdunstungswiderstandes einer Bekleidungskombination.
- [21] ISO/TS 13732-2; 2001-03. Ergonomie der thermischen Umgebung - Bewertungsmethoden für Reaktionen des Menschen bei Kontakt mit Oberflächen – Teil 2: Menschlicher Kontakt mit moderaten Oberflächen.
- [22] DIN EN 15251; 2007-05. Eingangsparemeter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden - Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik.
- [23] DIN EN ISO 14505-2; 2006-12. Ergonomie der thermischen Umgebung – Beurteilung der thermischen Umgebung in Fahrzeugen – Teil 2: Bestimmung der Äquivalenttemperatur.
- [24] DIN EN ISO 14505-2 - Berichtigung 1; 2007-10. Ergonomie der thermischen Umgebung – Beurteilung der thermischen Umgebung in Fahrzeugen – Teil 2: Bestimmung der Äquivalenttemperatur, Berichtigung zu DIN EN ISO 14505-2:2007-04.
- [25] DIN ISO/TS 14505-1; 2007-12. Ergonomie der thermischen Umgebung – Beurteilung der thermischen Umgebung in Fahrzeugen – Teil 1: Grundlagen und Verfahren für die Bewertung der thermischen Belastung.
- [26] DIN EN ISO 14505-3; 2006-06. Ergonomie der thermischen Umgebung - Beurteilung der thermischen Umgebung in Fahrzeugen - Teil 3: Bewertung der thermischen Behaglichkeit durch Versuchspersonen.
- [27] Nilsson, H. O.: *Comfort climate evaluation with thermal manikin methods and computer simulation models,* Royal Institute of Technology, University of Gävle and The Swedish National Institute for Working Live Doctoral Thesis. Stockholm 2004.
- [28] Olesen, B. W. u. Parsons, K. C.: Introduction to thermal comfort standards and to the proposed new version of EN ISO 7730. *Energy and Buildings* 34 (2002) 6, S. 537–548.
- [29] van Hoof, J.: Forty years of Fanger's model of thermal comfort: comfort for all? *Indoor air* 18 (2008) 3, S. 182–201.
- [30] Brager, G. S. u. de Dear, R. J.: Thermal adaptation in the built environment: a literature review. *Energy and Buildings* (1998) 27, S. 83–96.
- [31] ASHRAE Standard 55; 2013. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy.
- [32] Nicol, F. u. Humphreys, M.: Derivation of the adaptive equations for thermal comfort in freerunning buildings in European standard EN15251. *Building and Environment* 45 (2010) 1, S. 11–17.
- [33] Mishra, A. K., Loomans, M.G.L.C. u. Hensen, J.L.M.: Thermal comfort of heterogeneous and dynamic indoor conditions - An overview. *Building and Environment* 109 (2016), S. 82–100.
- [34] Rupp, R. F., Vásquez, N. G. u. Lamberts, R.: A review of human thermal comfort in the built environment. *Energy and Buildings* 105 (2015), S. 178–205.
- [35] Djongyang, N., Tchinda, R. u. Njomo, D.: Thermal comfort. A review paper. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (2010) 9, S. 2626–2640.

- [36] Fanger, P. O.: Thermal comfort. Analysis and Applications in Environmental Engineering. NewYork: McGraw-Hill Book Company 1970.
- [37] Havenith, G. u. Fiala, D.: Thermal Indices and Thermo-physiological Modeling for Heat Stress. *Comprehensive Physiology* 6 (2015) 1, S. 255–302.
- [38] EPSTEIN, Y. u. MORAN, D. S.: Thermal Comfort and the Heat Stress Indices. *Industrial Health* 44 (2006) 3, S. 388–398.
- [39] BGI 579; 2006-15. Hitzarbeit – Erkennen, beurteilen, schützen.
- [40] Zhang, H., Arens, E. A., Huizenga, C. u. Han, T.: Thermal sensation and comfort models for nonuniform and transient environments, part I: Local sensation of individual body parts. *Building and Environment* 45 (2010) 2, S. 380–388.
- [41] Zhang, H., Arens, E. A., Huizenga, C. u. Han, T.: Thermal sensation and comfort models for nonuniform and transient environments, part II: Local comfort of individual body parts. *Building and Environment* 45 (2010) 2, S. 389–398.
- [42] Zhang, H., Arens, E. A., Huizenga, C. u. Han, T.: Thermal sensation and comfort models for nonuniform and transient environments, part III: Wholebody sensation and comfort. *Building and Environment* 45 (2010) 2, S. 399–410.
- [43] Cheng, Y., Niu, J. u. Gao, N.: Thermal comfort models. A review and numerical investigation. *Building and Environment* 47 (2012), S. 13–22.
- [44] Croitoru, C., Nastase, I., Bode, F., Meslem, A. u. Dogeanu, A.: Thermal comfort models for indoor spaces and vehicles—Current capabilities and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 44 (2015), S. 304–318.
- [45] Katić, K., Li, R. u. Zeiler, W.: Thermophysiological models and their applications: A review. *Building and Environment* 106 (2016), S. 286–300.
- [46] Alahmer, A., Mayyas, A., Mayyas, A. A., Omar, M. A. u. Shan, D.: Vehicular thermal comfort models; a comprehensive review. *Applied Thermal Engineering* 31 (2011) 6-7, S. 995–1002.
- [47] Hintea, D., Kemp, J., Brusey, J., Gaura, E. u. Beloe, N.: Applicability of thermal comfort models to car cabin environments. 11th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics. 2014.
- [48] Danca, P., Vartires, A. u. Dogeanu, A.: An Overview of Current Methods for Thermal Comfort Assessment in Vehicle Cabin. *Energy Procedia* 85 (2016), S. 162–169.
- [49] Gagge, A. P., Stolwijk, J. A. J. u. Hardy, J. D.: Comfort and thermal sensations and associated physiological responses at various ambient temperatures. *Environmental Research* (1967) 1, S. 1–20.
- [50] Rita Streblov: Thermal Sensation and Comfort Model for Inhomogeneous Indoor Environments, RWTH Aachen University Dissertation. Aachen 2010.
- [51] Kobayashi, Y. u. Tanabe, S.-I.: Development of JOS-2 human thermoregulation model with detailed vascular system. *Building and Environment* 66 (2013), S. 1–10.
- [52] Tanabe, S.-I., Kobayashi, K., Nakano, J., Ozeki, Y. u. Konishi, M.: Evaluation of thermal comfort using combined multinode thermoregulation (65MN) and radiation models and computational fluid dynamics (CFD). *Energy and Buildings* 34 (2002) 6, S. 637–646.
- [53] Zhang, H.: Human thermal sensation and comfort in transient and nonuniform thermal environments, University of California Dissertation. Berkeley 2003.
- [54] Huizenga, C., Zhang, H. u. Arens, E. A.: A model of human physiology and comfort for assessing complex thermal environments. *Building and Environment* 36 (2001) 6, S. 691–699.
- [55] Fiala, D.: Dynamic Simulation of Human Heat Transfer and Thermal Comfort, De Montfort University Leicester u. FH Stuttgart - Hochschule für Technik Dissertation. Leicester, Stuttgart 1998.
- [56] Fiala, D., Lomas, K. J. u. Strohler, M.: A computer model of human thermoregulation for a wide range of environmental conditions: The passive system. *Journal of Applied Physiology* 1999 (1999) 87, S. 1957–1972.
- [57] Fiala, D., Lomas, K. J. u. Strohler, M.: Computer prediction of human thermoregulatory and temperature responses to a wide range of environmental conditions. *International journal of biometeorology* 45 (2001) 3, S. 143–159.
- [58] Fiala, D. u. Lomas, K. J.: The dynamic effect of adaptive human responses in the sensation of thermal comfort. Windsor Conference 2001 - Moving Thermal Comfort Standards into the 21 th Century. Cumberland Lodge, Windsor, UK 2001, S. 147–157.
- [59] Fiala, D., Lomas, K. J. u. Strohler, M.: Dynamic Simulation of human heat transfer and thermal comfort. Proceedings of the 12th International Conference on Environmental Ergonomics, ICEE 2007. Ljubljana: Biomed 2007.
- [60] Foda, E. u. Siren, K.: A new approach using the Pierce twonode model for different body parts. *International journal of biometeorology* 55 (2011) 4, S. 519–532.
- [61] Foda, E., Almesri, I., Awbi, H. B. u. Sirén, K.: Models of human thermoregulation and the prediction of local and overall thermal sensations. *Building and Environment* 46 (2011) 10, S. 2023–2032.
- [62] Havenith, G., Richards, M. G., Wang, X., Broede, P., Candas, V., den Hartog, E., Holmer, I., Kuklane, K., Meinander, H. u. Nocker, W.: Apparent latent heat of evaporation from clothing: attenuation and “heat pipe” effects. *Journal of applied physiology* (Bethesda, Md. : 1985) 104 (2008) 1, S. 142–149.
- [63] Vesela, S., Kingma, B. R. M. u. Frijns, A. J. H.: Impact of local clothing values on local skin temperature simulation. Windsor Conference 2016 – Making Comfort Relevant - Proceedings. 9th International Windsor Conference. 2016.
- [64] Holmer, I. u. Nilsson, H. O.: Heated manikins as a tool for evaluating clothing. *Annals of Occupational Hygiene* 39 (1995) 6, S. 809–818.
- [65] Ming, F.: A model of heat and moisture transfer through clothing integrated with the UC Berkeley comfort model. *Building and Environment* 2014 (2014).
- [66] Jendritzky, G., de Dear, R. J. u. Havenith, G.: UTCI - why another thermal index? *International journal of biometeorology* 56 (2012) 3, S. 421–428.
- [67] Broede, P., Fiala, D., Blazejczyk, K., Holmer, I., Jendritzky, G., Kampmann, B., Tinz, B. u. Havenith, G.: Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *International journal of biometeorology* 56 (2012) 3, S. 481–494.
- [68] Fiala, D., Havenith, G., Broede, P., Kampmann, B. u. Jendritzky, G.: UTCI Fiala multi node model of human heat transfer and temperature regulation. *International journal of biometeorology* (2011) Special Issue, S. 1–13.
- [69] Havenith, G., Fiala, D., Blazejczyk, K., Richards, M. G., Broede, P., Holmer, I., Rintamaki, H., Benshabat, Y.,

## AUTOREN VITA



Dipl.-Ing. KAI REWITZ

- 2006 – 2012 Studium des Maschinenbaus, Fachrichtung: Energietechnik, RWTH Aachen University
- Seit 2012 Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Team „Nutzerverhalten und Komfort“ am Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimattechnik des E.ON Energieforschungszentrums der RWTH Aachen University
- Kontakt** E-Mail: krewitz@eonerc.rwth-aachen.de



Dipl.-Ing. MARK WESSELING

- 2006 – 2012 Studium des Maschinenbaus, Fachrichtung: Energietechnik, RWTH Aachen University
- 2012 – 2015 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimattechnik des E.ON Energieforschungszentrums der RWTH Aachen University.
- Seit 2015 Teamleiter „Nutzerverhalten und Komfort“ am Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimattechnik des E.ON Energieforschungszentrums der RWTH Aachen University.
- Kontakt** E-Mail: mweseling@eonerc.rwth-aachen.de



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 Voraentwicklung, Angewandte Physik: Strömungsanalyse und -modellierung, Robert Bosch GmbH
- 2002 – 2003 Prozessleiter Simulationsverfahren, Technologiecenter Konzern; Abteilungsleiter, Festigkeits-, Dynamik- und Strömungsanalyse für Motorkühlelemente und Klimaanlagen, 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 Raumklimattechnik, E.ON Energy Research Center, RWTH Aachen University
- 2011 – 2015 Geschäftsführer Technik, TROX GmbH
- Kontakt** RWTH Aachen University  
E.ON Energy Research Center  
Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimattechnik  
Mathieustr. 10, 52074 Aachen  
E-Mail: dmueller@eonerc.rwth-aachen.de

Jendritzky, G.: The UTCI clothing model. International journal of biometeorology 56 (2012) 3, S. 461–470.

- [70] Broede, P., Jendritzky, G., Fiala, D. u. Havenith, G.: The universal thermal climate index UTCI in operational use. Windsor Conference 2010 - Adapting to Change: New Thinking of Comfort - Proceedings. Cumberland Lodge, Windsor, UK 2010.

## Symbolverzeichnis

<b>C</b>	Wärmetransport durch Konvektion bezogen auf die Körperfläche	$W m^{-2}$
<b>E</b>	Wärmetransport durch Verdampfung bezogen auf die Körperfläche	$W m^{-2}$
<b>K</b>	Wärmetransport durch Wärmeleitung bezogen auf die Körperfläche	$W m^{-2}$
<b>M</b>	Metabolische Energieproduktion bezogen auf die Körperfläche	$W m^{-2}$
<b>R</b>	Wärmetransport durch Strahlung bezogen auf die Körperfläche	$W m^{-2}$
<b>Resp</b>	Wärmetransport durch Atmung bezogen auf die Körperfläche	$W m^{-2}$
<b>S</b>	Änderung der gespeicherten Wärme im menschlichen Körper bezogen auf die Körperfläche	$W m^{-2}$
<b>W</b>	Mechanische Leistung bezogen auf die Körperfläche	$W m^{-2}$

## Abkürzungsverzeichnis

<b>33-NCM</b>	33 Node Comfort Model – 33-Knoten-Komfortmodell
<b>CFD</b>	Computational Fluid Dynamics – Numerische Strömungsmechanik
<b>DTS</b>	Dynamic Thermal Sensation – Dynamisches thermisches Empfinden
<b>EBC</b>	Energy in Buildings and Communities – Energie in Gebäuden und Kommunen
<b>IEA</b>	International Energy Agency – Internationale Energieagentur
<b>PMV</b>	Predicted Mean Vote – Abschätzung einer mittleren Bewertung des thermischen Empfindens
<b>PPD</b>	Predicted Percentage of Dissatisfied – Vorausgesagter Anteil an Unzufriedenen
<b>UTCI</b>	Universal Thermal Climate Index – Universeller thermischer Klimaindex
<b>WBGT-Index</b>	Wet-Bulb-Globe-Temperature-Index – Feuchtekugel-Globetemperatur-Index

# Thermodynamik der feuchten Luft

PD Dr.-Ing. habil. Joachim Seifert

150 Seiten



Das vorliegende Werk ist als kompaktes Nachschlagewerk zum Thema „Thermodynamik der feuchten Luft“ zu verstehen.

Im zweiten und dritten Kapitel ist der Schwerpunkt auf die thermodynamischen Grundlagen gelegt, bevor im vierten Kapitel die Konstruktion des Mollier  $h, x$ -Diagramms beschrieben wird. Der fünfte Hauptabschnitt befasst sich mit Zustandsänderungen, wie z. B. Heizen, Kühlen und deren technischer Umsetzung. Fortgeführt werden die Ausführungen mit einer speziellen Herleitung zur Befeuchtung und Entfeuchtung von Luft.

Abgeschlossen werden die Erläuterungen mit ausführlichen Komplex-Beispielen zu allen wichtigen klimatechnischen Systemen. Im besonderen Fokus stehen hierbei Nur-Luft-Klimaanlagen, Luft-Wasser-Klimaanlagen sowie neuere DEC-Klimaanlagen. Besonders wichtig sind dem Autor die praxisnahe Aufbereitung und Berechnung verschiedener klimatechnischer Prozesse.

Buch  
€ 49,90

ISBN 978-3-96143-074-1

eBook  
€ 49,90

ISBN 978-3-96143-075-8

Bestellungen unter:

E-Mail: [buch@recknagel-online.de](mailto:buch@recknagel-online.de)

Tel.: +49 821 65 04 49-41

[www.recknagel-online.de](http://www.recknagel-online.de)