

INDIVIDUALISIERUNG EINES VIRTUELLEN THERMOREGULATIONSSYSTEMS ZUR THERMISCHEN KOMFORTBEWERTUNG IN INNENRÄUMEN

Daniel Wölki¹, Carolin Schmidt¹, Gunnar Grün², Christoph van Treeck¹

¹RWTH-Aachen, Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen (E3D), Aachen, Deutschland

²Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP), Abteilung Raumklima, Holzkirchen, Deutschland

E-Mail: woelki@e3d.rwth-aachen.de

KURZFASSUNG

Um die Klimawirkung auf Menschen in Gebäuden unter inhomogenen oder gar zeitlich veränderlichen Randbedingungen ganzheitlich zu verstehen, ist es erforderlich, die dabei ablaufenden, dynamischen Thermoregulationsprozesse im menschlichen Körper und deren komplexe Zusammenhänge zu untersuchen. Hierzu existieren zahlreiche mathematische Modellansätze in der Literatur, welche jedoch in der Regel für einen standardisierten Menschen männlichen Geschlechts kalibriert sind. Der Forschungsansatz liegt deshalb auf der Anpassung der physiologischen Seite eines virtuellen menschlichen Thermoregulationssystems um die Übertragbarkeit des Modells auf andere morphologische Gruppen zu ermöglichen. Die Hautoberfläche repräsentiert dabei die Schnittstelle zwischen Mensch und Umgebungsklima und ist ein wichtiger Indikator für die thermoregulatorische Aktivität des Körpers. Die daraus resultierenden Hautoberflächentemperaturen dienen als Inputparameter für Komfortmodelle zur lokalen und globalen Komfortbestimmung.

ABSTRACT

Holistically understanding the impact of inhomogeneous and time dependent indoor climatic effects on human beings requires the investigation of associated dynamic human thermoregulatory processes and their complex correlations. In this context several mathematical model approaches have been proposed in literature, which generally account for a standard human being of male gender. The research approach in this paper therefore focuses on the adaptation and parametrization of the physiological part of a virtual human thermoregulatory system in order to represent different morphological groups of people. In this regard, the skin surface represents the interface between the human body and its thermal surrounding and reflects the activity of the human thermoregulatory system through changing skin surface temperatures. Such temperatures are further used as input parameters for local and global thermal comfort prediction modeling.

EINLEITUNG

Im Gebäudebereich werden üblicherweise statistische Modelle zur Bewertung der thermischen Behaglich-

keit eingesetzt, die einen unmittelbaren Zusammenhang zwischen Umgebungsklima und thermischem Empfinden herstellen (Fanger, 1970). Unter Annahme stationärer Zustände im Bereich der thermischen Neutralität sind diese Modelle sehr gut etabliert. Um jedoch die Klimawirkung auf Menschen unter inhomogenen oder gar zeitlich veränderlichen Randbedingungen zu verstehen, ist es erforderlich die dabei ablaufenden, menschlichen Thermoregulationsprozesse und deren komplexe intrakorporale Zusammenhänge zu analysieren.

In diesem Zusammenhang wurden bereits eine Vielzahl mathematischer Modellansätze entwickelt (Fiala et al. 1999, 2001; Huizenga et al., 2001; Stolwijk, 1971; Tanabe, 2002), welchen in der Regel eine standardisierte Anthropometrie beziehungsweise Morphologie zu Grunde liegt (männlich, 1,76 m Körpergröße, 73,5 kg Körpergewicht, 42,2 % Muskelanteil und 14,44 % Körperfettanteil).

Am Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen (E3D) wird an der Anpassung der physiologischen Seite eines virtuellen menschlichen Thermoregulationssystems (Paulke, 2007) an unterschiedliche morphologische Gruppen gearbeitet. In einer ersten Studie konnten bereits sogenannte Schlüsselparameter identifiziert und deren Einfluss auf das virtuelle Thermoregulationssystem anhand von Sensitivitätsanalysen (Wölki et al., 2011) untersucht werden.

Dieser Beitrag stellt eine Analyse hinsichtlich des Körperfettanteilunterschieds von Männern und Frauen verschiedener Altersklassen vor.

Es ist bekannt, dass geschlechts- und altersspezifische Diskrepanzen hinsichtlich Fettanteil und -verteilung existieren (Durnin & Womersley, 1974; Davidson et al., 2011). Dies kann insbesondere unter inhomogenen und dynamischen Umgebungsbedingungen hinsichtlich der Beurteilung des lokalen und globalen thermischen Komfortempfindens eine große Rolle spielen.

Für die Wärmebilanz des Körpers ist Fettgewebe wegen seiner isolatorischen Eigenschaften von großer Bedeutung. Unter kalten Klimabedingungen kann eine solche Isolationsschicht von Vorteil sein, da die Wärmeverluste aus dem Körperinneren an die Umgebung gedämpft werden. In warmen Umgebungen führt dies jedoch als Folge der starken Asymmetrie (Körperkerntemperatur circa 37 °C) des menschlichen Thermoregulationssystems (Romanovsky,

2007; Zhang et al., 2010) sehr schnell zu Überhitzungserscheinungen (Anderson, 1999). Die thermoregulatorische Aktivität des Körpers spiegelt sich dabei in den Hautoberflächentemperaturen wieder, was die Haut zu einer wichtigen Schnittstelle zwischen Mensch und Umgebungsklima macht. Sich ergebende, lokale Hautoberflächentemperaturen beziehungsweise deren Summenmaß, die mittlere Hautoberflächentemperatur, stellen in diesem Zusammenhang wichtige Inputparameter für Komfortmodelle dar, die zur Bestimmung des lokalen und globalen Komfortempfindens verwendet werden.

METHODEN

Materialien

Als virtuelles Basismodell zur Erforschung der physiologischen Seite des menschlichen Thermoregulationssystems dient eine FEM-Implementierung (Paulke, 2007) des bekannten Fiala Modells (Fiala et al. 1999, 2001).

Der virtuelle physiologische Körper („Passives System“) wird hierzu mit Hilfe von insgesamt 19 zylindrischen und sphärischen Körpersegmenten (z.B. Kopf, Beine, Arme) approximiert, die aus verschiedenen virtuellen Gewebsschichten mit deren spezifischen Eigenschaften wie Wärmeleitfähigkeit und Durchblutung zusammengesetzt sind.

Ein Körpersegment besitzt in diesem Zusammenhang immer einen Knochen als Kernelement, eine darüber liegende Muskelschicht, eine Fettschicht und eine Hautschicht, welche die Schnittstelle zwischen virtuellem Mensch und dessen Umgebungsklima repräsentiert. Um asymmetrischen und lokalen Umgebungsbedingungen Rechnung tragen zu können, lassen sich die einzelnen Körpersegmente in Sektoren aufteilen, woraus sich eine Gesamtzahl von 48 Sektoren ergibt.

Aktive Temperaturregelmechanismen wie Schwitzen, Zittern, Gefäßverengung und -erweiterung sind ausgelagert in ein sogenanntes „Aktives System“, welches mit dem „Passiven System“ gekoppelt werden kann. Als Trigger-Größen des „Aktiven Systems“ werden dabei die mittlere Hautoberflächentemperatur, deren Änderung über die Zeit und die zeitliche Änderung der Körperkerntemperatur verwendet.

Probandenversuche

Hierbei handelt es sich um eine erste Vorabstudie um einen Überblick über verschiedene Messmethoden zur Gesamtkörperfettbestimmung zu erhalten und deren Sensitivitäten hinsichtlich Alter und Geschlecht zu analysieren. Die Altersspanne der untersuchten Probanden liegt für männliche Probanden zwischen 21-61 Jahren, für weibliche Probanden zwischen 18-63 Jahren.

Insgesamt wurden 38 weibliche und 46 männliche Probanden vermessen. Untersuchte Parameter und verwendeten Messmittel sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1:

Gemessene Parameter und verwendete Messmittel

PARAMETER	MESSMITTEL	HERSTELLER
Körpergröße	Mess-Station	SECA 285
Körpergewicht	Mess-Station	SECA 285
Taillenumfang	Umfangmaßband mit Rückspulknopf	Slim Guide
Hautfaltendicke	Fettmesszange	Slim Guide
BMI	Mess-Station	SECA 285

Berechnung des Gesamtkörperfettgehalts

Es wird ein Messverfahren verwendet, mit dem anhand von vier ausgewählten Hautfaltendicken am Oberkörper eines Probanden der Gesamtkörperfettgehalt berechnet werden kann (Durnin & Womersley, 1974; Siri, 1961).

Eine Hautfalte wird dabei durch zwei gegenüberliegende Haut- und deren subkutane Fettschichten gebildet und mit Daumen und Zeigefinger gegriffen. Die Dicke der entsprechenden Hautfalte kann dann mit Hilfe einer Fettmesszange bestimmt werden. Folgende Messstellen sind dabei vom Messverfahren vorgeschrieben: Bizeps (Mittig), Trizeps (Mittig), Rückenfalte unterhalb der Scapula (inneres, unteres Ende des Schulterblatts) und Hüftfalte oberhalb der Crista iliaca (Beckenkamm).

Über die Korrelation der Summe der einzelnen Hautfaltendicken und der geschlechtsspezifischen Berechnung der Körperdichte (Durnin & Womersley, 1974), lässt sich dann der Gesamtkörperfettgehalt (Siri, 1961) bestimmen.

Abschätzung der lokalen, subkutanen Fettverteilung

Anhand der vier lokal gemessenen Hautfaltendicken kann auf die Verteilung des subkutanen Fettgewebes am Oberkörper des Probanden geschlossen werden, wodurch sich eventuell auftretende, geschlechts-/altersspezifische Unterschiede in der Körperfettverteilung aufzeigen lassen.

Um Rückschlüsse auf die lokale, subkutane Fettverteilung des gesamten Körpers ziehen zu können, sind zusätzliche Messstellen notwendig, die dann wiederum den Einsatz anderer Berechnungsformeln bedingen.

Parametrierung der physiologischen Seite des virtuellen Thermoregulationssystems

Die Parametrierung des virtuellen physiologischen Thermoregulationsmodells erfolgt auf Basis der gemessenen Gesamtkörperfettdaten.

Um einen Vergleich zwischen Originalmodell und modifiziertem Modell durchführen zu können, bleiben anthropometrische und morphologische Daten wie Körpergröße und Körperoberfläche unverändert. Der Körperfettgehalt des Modells wird mit Hilfe von Skalierungsfaktoren, welche die Radien einzelner Gewebsschichten beeinflussen, an die entsprechenden Fettmessdaten angepasst. Eine Verkleinerung des

äußeren Radius der Muskelschicht erhöht den Anteil der Fettschicht im zylindrischen Segment entsprechend und somit auch den Gesamtkörperfettgehalt des Modells. Wie bei der menschlichen Physiologie, hängen auch beim virtuellen, physiologischen Modell die metabolische Grundrate ($M_{bas,0}$) und die Grunddurchblutungsrate (CARDOUT) vom Gesamtkörperfettgehalt ab. Eine Reduzierung des Muskelanteils bei gleichzeitiger Erhöhung des Fettanteils zieht somit eine Anpassung von $M_{bas,0}$ und CARDOUT nach sich. Diese Anpassung muss auch in der Simulation der Referenztemperaturen hinsichtlich thermischer Neutralität berücksichtigt werden (Wölki et al., 2011).

ERGEBNISSE

Gesamtkörperfettmessung

In Abbildung 1 sind die geschlechtsspezifischen Ergebnisse der Hautfaltendickenmessung hinsichtlich der vier vorgeschriebenen Messstellen nach Durnin & Womersley (1974) dargestellt. Basierend auf diesen Messergebnissen wurde ein typisch männlicher Proband (TMP) beziehungsweise eine typisch weibliche Probandin (TWP) definiert.

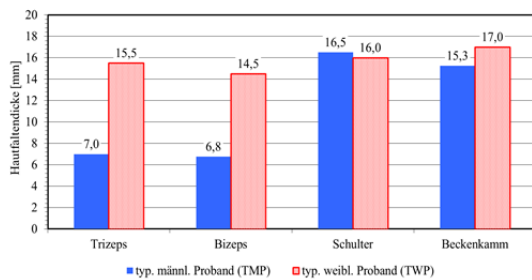


Abbildung 1: Geschlechtsspezifischen Hautfaltendicken und deren lokale Messstellen

Es ist deutlich erkennbar, dass sich die gemessenen Hautfaltendicken des TWP sehr homogen über Extremitäten (Bizeps 14,5 mm, Trizeps 15,5 mm) und Rumpf (Schulter 16,0 mm, Beckenkamm 17,0 mm) verteilen. Beim TMP hingegen ist eine stark inhomogene Verteilung der Hautfaltendicken hinsichtlich Extremitäten (Bizeps 6,8 mm, Trizeps 7,0 mm) und Rumpf (Schulter 16,5 mm, Beckenkamm 15,3 mm) zu erkennen.

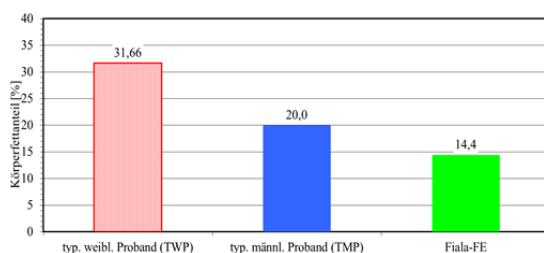


Abbildung 2: Vergleich Körperfettgehalt TMP, TWP und Fiala-FE

Abbildung 2 stellt den Vergleich zwischen Gesamtkörperfettgehalt des physiologischen Originalmodells (Fiala-FE) und den berechneten Gesamtkörperfettgehalten des TMP und TWP dar. Es zeigt sich, dass der berechnete Körperfettgehalt des TWP mit 31,66 % den Modellwert des originalen Fiala-FE Modells, mit einer Differenz von 17,26 % um mehr als 54 % übersteigt. Der berechnete Gesamtkörperfettgehalt des typisch männlichen Probanden (20,0 %) hingegen weist eine Differenz von 5,6 % Körperfett und damit eine Abweichung von 28 % vom Originalwert des Modells auf.

Anpassung Fiala-FE an TWP

Auf Basis der gemessenen Körperfett Daten des TWP wurde eine Neu-Kalibrierung des Fiala-FE Modells durchgeführt. Aufgrund der komplexen Parameterzusammenhänge innerhalb des physiologischen Modellkörpers, ist es erforderlich zusätzlich zum Gesamtkörperfettgehalt weitere Parameter anzupassen. Diese sind zusammen mit den originalen Kalibrierungsdaten des Fiala-FE Modells in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2:

Vergleich Kalibrierdaten original Fiala-FE und TWP

PARAMETER	TYP. WEIBL. PROBAND	ORIGINAL FIALA-FE
Gesamtkörperfettgehalt	31,66 %	14,4 %
Muskelanteil	24,04 %	43,21 %
Körpergewicht	70,31 kg	73,53 kg
Gesamtkörperoberfläche (A_{sk})	1,86 m ²	1,86 m ²
Metabolische Grundrate ($M_{bas,0}$)	78,43 W	87,13 W
Durchblutungsrate (CARDOUT.)	4,46 ltr/min	4,89 ltr/min

Mit gestiegenem Körperfettanteil (von 14,4 % auf 31,66 %) und gesunkenem Muskelanteil (von 43,21 % auf 24,04 %) geht eine Verringerung des Körpergewichts (von 73,53 kg auf 70,31 kg), aufgrund der Dichte- und Durchblutungsunterschiede von Fett- und Muskelgewebe einher. Dies zieht eine entsprechende Anpassung von $M_{bas,0}$ (von 87,13 W auf 78,43 W) und CARDOUT (von 4,89 ltr/min auf 4,46 ltr/min) nach sich (siehe Tabelle 2).

Simulation

Nachfolgende Graphen zeigen die Simulationsergebnisse eines Vergleichs zwischen TWP- und originalem Fiala-FE Modell. Die entsprechenden Randbedingungen eines Simulationszyklus für thermische Neutralität sind in Tabelle 3 aufgelistet.

Tabelle 3:
Randbedingungen eines Simulationszyklus

PARAMETER	BEDEUTUNG	WERT
rh [%]	Rel. Luftfeuchte	40
T_a [°C]	Mittlere Umgebungstemperatur	25,67
T_r [°C]	Mittlere Strahlungstemperatur	25,67
ϵ_{wall} [-]	Emissivität der Umgebungsflächen	0,93
v_a [m/s]	Mittlere Luftgeschwindigkeit	0,1
act [met]	Aktivitätslevel	1,2
Icl [clo]	Bekleidungsisolationswert	0,38
PMV [-]	Predicted Mean Vote	0
t [s]	Simulationszeit	100000

In Abbildung 3 sind die Körperkerntemperaturen (T_{hy}) beider Modelle dargestellt.

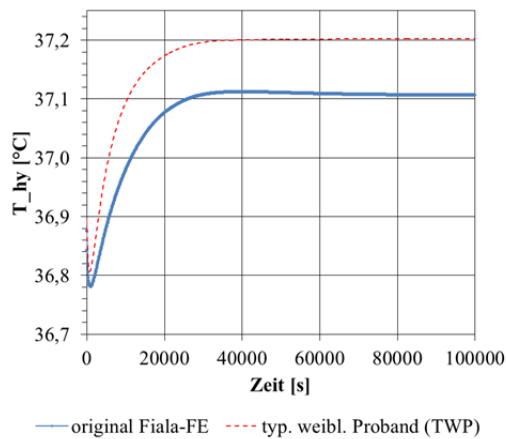


Abbildung 3: T_{hy} original Fiala-FE vs. T_{hy} TWP

Der Graph zeigt im stationären Zustand einen T_{hy} -Unterschied von 0,09 K. T_{hy} des TWP-Modells beträgt dabei 37,20 °C, T_{hy} des originalen Fiala-FE Modells 37,11 °C.

Ein Vergleich der entsprechenden mittleren Hautoberflächentemperaturen (T_{skm}) ist in Abbildung 4 zu sehen. Der T_{skm} -Wert des originalen Fiala-FE Modells unterscheidet sich im stationären Fall vom TWP-Modell um einen Offset von 0,69 K.

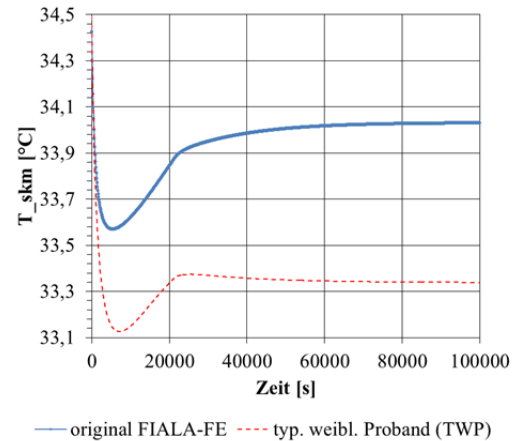


Abbildung 4: T_{skm} original Fiala-FE vs. T_{skm} TWP

Abbildung 5 beinhaltet die Ergebnisse einer Gegenüberstellung des Energieäquivalents der Hautdurchblutungsrate der beiden Modelle Fiala-FE und TWP.

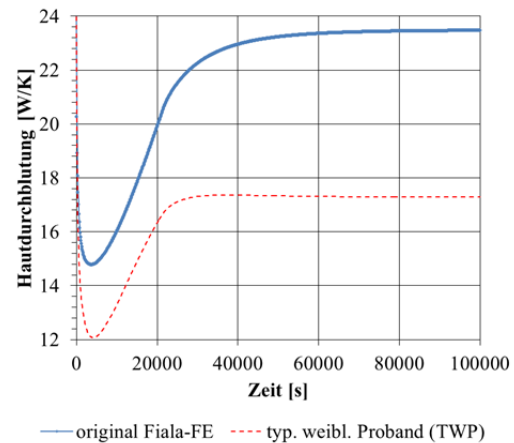


Abbildung 5: Hautdurchblutung original Fiala-FE vs. Hautdurchblutung TWP

Es wird deutlich, dass die Hautdurchblutung und damit die Wärmeabfuhr des Körpers beim originalen Fiala-FE Modell höher ist als die des TWP-Modells. Im stationären Fall erreicht diese Differenz einen Wert von 6,18 W/K.

Abbildung 6 und Abbildung 7 zeigen die Gefäßreaktionen (Gefäßerweiterung und Gefäßverengung) der beiden Modelle im Vergleich. Es zeigt sich ein zeitlicher Versatz im Zeitpunkt des Einsetzens der Gefäßerweiterung beider Modelle (Abbildung 6). Des Weiteren fällt die Gefäßerweiterungsreaktion des TWP-Modells höher aus als die des originalen Fiala-FE Modells, was im stationären Zustand zu einer Amplitudendifferenz von 2,94 W/K führt (Abbildung 6).

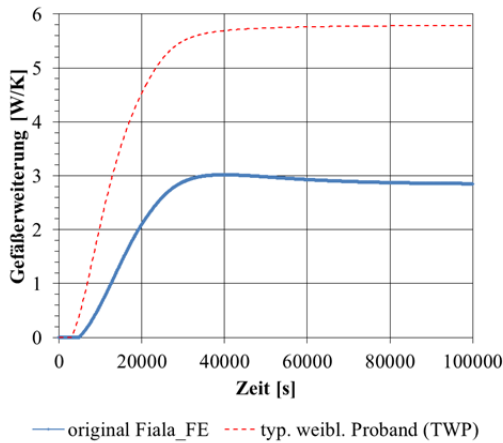


Abbildung 6: Gefäßweiterung orig. Fiala-FE vs. TWP-Modell

Die entsprechenden Gefäßverengungsreaktionen der beiden Modelle im Vergleich sind Abbildung 7 zu entnehmen. In Relation zum originalen Fiala-FE Modell ist eine erhöhte absolute Gefäßverengungsreaktion zu erkennen.

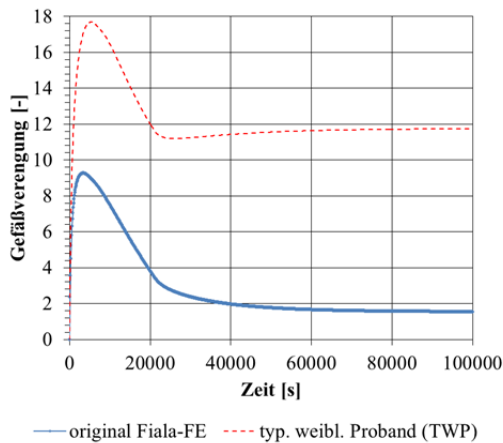


Abbildung 7: Gefäßverengung orig. Fiala-FE vs. TWP-Modell

Ein Vergleich des Herzauswurfvolumens (CARDOUT) ist in Abbildung 8 zu sehen.

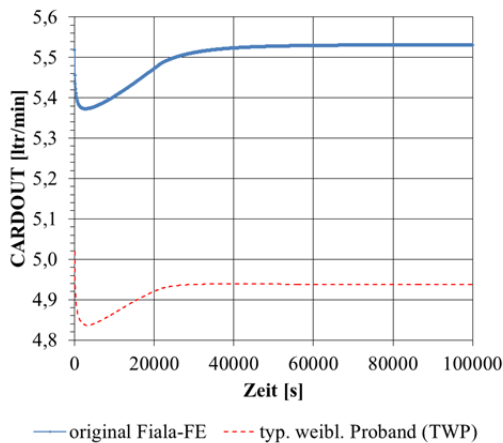


Abbildung 8: CARDOUT orig. Fiala-FE vs. CARDOUT TWP-Modell

Im stationären Zustand ergibt sich für das TWP-Modell ein CARDOUT von 4,94 ltr/min. Das CARDOUT des originalen Fiala-FE Modells hingegen liegt bei 5,53 ltr/min. Abbildung 9 stellt die Schwitzzraten der beiden Modelle im Vergleich dar.

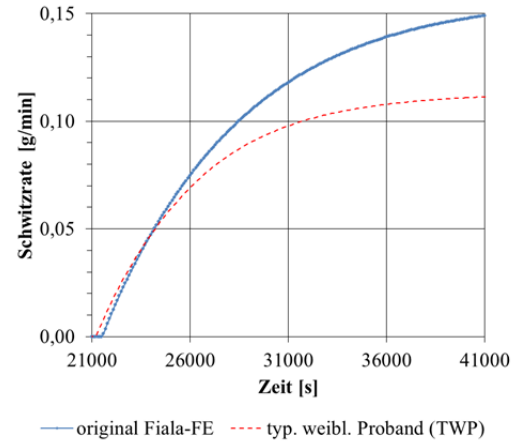


Abbildung 9: Schwitzzrate orig. Fiala-FE vs. TWP-Modell

Auch hier ist eine zeitliche Verschiebung hinsichtlich des Startzeitpunktes der Schwitzreaktion zwischen den Modellen zu erkennen. Das Einsetzen der Schwitzreaktion des TWP-Modells findet zu einem früheren Zeitpunkt statt. Im stationären Zustand wird jedoch weniger Schweiß abgesondert als beim originalen Fiala-FE Modell.

Behaglichkeitsmodellierung

Die quantitativen Auswirkungen der gefundenen Zusammenhänge hinsichtlich des thermischen Empfindens sind in Abbildung 10 veranschaulicht.

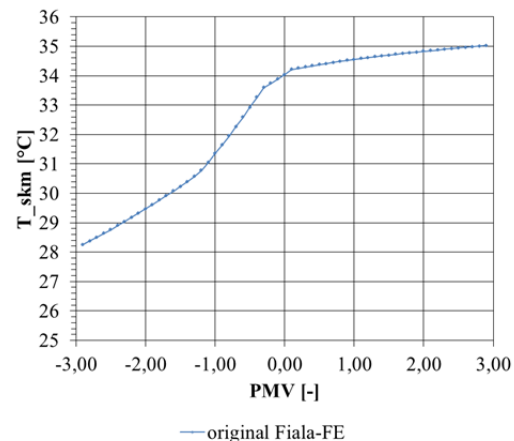


Abbildung 10: PMV versus T_{skm} des originalen Fiala-FE Modells

Es handelt sich dabei um Ergebnisse einer physiologischen Simulation, bei der mittlere Hautoberflächentemperaturen nach dem in Schmidt et al. (2012) dargestellten Verfahren ermittelt werden. In diesem Zusammenhang wird das originale Fiala-FE Modell in einem Raum betrachtet, dessen thermische Eigen-

schaften so gewählt werden, dass sie den im Diagramm gezeigten PMV-Werten exakt genügen. Als Resultat erhält man die Ergebnisse der gesamten PMV-Bandbreite (-2,9 bis +2,9) in Abhängigkeit der mittleren Hautoberflächentemperatur (T_{skm}). Es zeigt sich eine asymmetrische Verteilung von T_{skm} über den gesamten PMV-Bereich.

Im Warmbereich (PMV 0 bis +2,9) sind die Abweichung der T_{skm} -Werte mit 0,99 K sehr gering ($T_{skm} = 34,04\text{ °C}$ für PMV = 0 verglichen mit $T_{skm} = 35,03\text{ °C}$ für PMV = +2,9). Im Kaltbereich zeigt sich jedoch eine hohe T_{skm} -Auffächerung, aus der eine Temperaturverteilungsbreite von 5,79 K resultiert ($T_{skm} = 34,04\text{ °C}$ für PMV = 0 und $T_{skm} = 28,25\text{ °C}$ für PMV = -2,9).

DISKUSSION

Die Ergebnisse der Körperfettmessung von insgesamt 38 weiblichen und 46 männlichen Probanden zeigen einen deutlichen, geschlechtsspezifischen Unterschied hinsichtlich Verteilung (Abbildung 1) und Anteil (Abbildung 2) des Körperfettgewebes.

Während die männlichen Probanden eine erhöhte Fettansammlung an Rücken und Beckenkamm aufweisen, verteilt sich das Fettgewebe der weiblichen Probanden homogener über den Körper. Dies stimmt mit den Ergebnissen von Anderson (1999) überein.

Eine Verwendung der Vier-Falten-Messmethode zur Bestimmung der Körperdichte und damit des Gesamtkörperfettgehalts ist in der hohen Genauigkeit der Messergebnisse begründet (Davidson et al., 2011; Durnin & Rahaman, 1967). Die Qualität des Messinstruments, die Körperseite, an welcher die Messungen durchgeführt wird und die Berücksichtigung der Hautdicke, haben keinen Einfluss auf die Güte der Messergebnisse (Durnin & Womersley, 1974).

Anhand des Gesamtkörperfettgehaltvergleichs zwischen originalem Fiala-FE Modell und einem typisch weiblichen Probanden (TWP) wird deutlich, dass die Kalibrierungsdaten des originalen Fiala-FE Modells für ein männliches Individuum ausgelegt sind (Abbildung 2).

Eine erste Anpassung des Gesamtkörperfettgehalts des originalen Fiala-FE Modells an einen TWP deutet auf eine Abhängigkeit zwischen Körperfettgehalt, Körperkerntemperatur T_{hy} (Abbildung 3) und mittlerer Hautoberflächentemperatur T_{skm} (Abbildung 4) hin. Mit erhöhtem Fettanteil kann der Körper, aufgrund der verminderten Wärmeleitfähigkeit von Fettgewebe, pro Zeiteinheit weniger Wärme vom Körperkern an seine Umgebung abführen, was schließlich einen Anstieg der Körperkerntemperatur (T_{hy}) zur Folge hat (Anderson, 1999).

Der reduzierte Muskelanteil vermindert die Gesamtdurchblutung (CARDOUT) des Körpers (Tabelle 2) und beeinflusst die Durchblutung der Haut, da zwischen Muskelanteil und Hautdurchblutung ein quasi-linearer Zusammenhang besteht (Fiala et al., 2001). Diesbezüglich zeigt das TWP-Modell eine im Vergleich zum originalen Fiala-FE Modell reduzierte

Hautdurchblutung (Abbildung 5), eine gesteigerte Gefäßerweiterung (Abbildung 6) und eine entsprechende Gefäßverengung (Abbildung 7). Aus physiologischer Sicht würde eine verminderte Wärmeabgabe des Körperkerns aufgrund des erhöhten Gesamtkörperfettanteils und der damit einhergehenden Steigerung der Körperisolation unter Belastung jedoch zu einer Erhöhung der Hautdurchblutung führen und somit diesen Effekt kompensieren (Anderson, 1999). Dies steht im Einklang mit der Erhöhung der Gefäßerweiterung (Abbildung 6), welche diametral zur Gefäßverengung ist (Abbildung 7).

Es ist jedoch unklar, in welcher Relation die beiden Funktionen zu den entsprechenden Resultaten des originalen Fiala-FE Modells stehen.

Auch ist ungeklärt, weshalb das Herzauswurfvolumen (CARDOUT), welches die Herzfrequenz repräsentiert, unter dem Wert des originalen Fiala-FE Modells liegt (Abbildung 8), da eine direkte Abhängigkeit zwischen Herzfrequenz und Arbeitsbelastung besteht. Dies bedeutet im Falle des TWP-Modells, dass aufgrund der reduzierten Gesamtdurchblutungsrate des Körpers die Herzfrequenz über der des originalen Fiala-FE Modells liegen müsste um die zusätzliche Wärme vom Körperkern abzuführen (Anderson, 1999). Eine genauere Untersuchung der mathematischen Struktur des Fiala-FE Modells zeigt, dass diesbezüglich eine Parameteranpassung im Zusammenhang mit der Berechnung der Arbeitsbelastung („H“), welche die Steigerung der metabolischen Rate aufgrund erhöhter mechanischer Aktivität beeinflusst, erforderlich ist.

Da es sich bei der vorliegenden Version des Fiala-FE Modells um ein kommerziell erhältliches Tool handelt (Paulke, 2007), konnte eine entsprechende Anpassung aufgrund eingeschränkter Code-Zugänglichkeit zu diesem Zeitpunkt nicht realisiert werden und muss in einem nächsten Schritt erfolgen. Aufgrund der fehlerhaften Parametrierung der Arbeitsbelastungsgleichung kann das vorzeitige Einsetzen der Schwitzreaktion des TWP-Modells (Abbildung 9) und eine reduzierte mittlere Hautoberflächentemperatur T_{skm} nicht ausreichend interpretiert werden (Abbildung 4).

Dies gilt auch für die Korrelation zwischen T_{skm} und PMV, welche eine Verschiebung des entsprechenden Behaglichkeitswerts des TWP-Modells in negativer Richtung (PMV = -0,4 bei $T_{skm} = 33,3\text{ °C}$) vorhersagt (Abbildung 10).

SCHLUSSFOLGERUNG

Anhand einer Probandenstudie hinsichtlich der Bestimmung des geschlechtsspezifischen Gesamtkörperfettgehalts, konnte gezeigt werden, dass das originale Fiala-FE Modell (Paulke, 2007) für eine männliche Person ausgelegt ist und sich dessen physiologische Kalibrierungsdaten von denen einer realen, weiblichen Physiologie stark unterscheiden.

Eine erste Neu-Kalibrierung bezüglich eines typisch weiblichen Probanden (TWP) zeigt erforderliche

Parameteranpassungen innerhalb der mathematischen Modellstruktur und die damit einhergehende hohe Modellkomplexität. Entsprechende Simulationsergebnisse deuten auf einen Zusammenhang zwischen Körperfettgehalt und thermischer Behaglichkeit hin. Aufgrund von Unstimmigkeiten bei der Analyse der Simulationsergebnisse konnte ein weiterer Parameter innerhalb der mathematischen Modellstruktur des Fiala-FE Modells identifiziert werden (Arbeitsbelastungsparameter „H“), dessen Anpassung im Sinne einer TWP-Modellierung zwingend notwendig ist. Diese Anpassung erfolgt in einem nächsten Schritt und bedingt wiederum eine erneute Analyse der daraus gewonnenen Simulationsergebnisse.

AUSBLICK

Für die Zukunft sind umfangreiche Probandenstudien und statistische Auswertungen der Ergebnisse geplant, welche eine Validierung des Modells erlauben.

DANKSAGUNG

Die Autoren danken Herrn Stefan Paulke für die enge Zusammenarbeit bei der Anpassung des Fiala-FE Rechencodes und P+Z Engineering für die Bereitstellung der Software THESEUS-FE.

LITERATUR

- Anderson, G.S. 1999. Human morphology and temperature regulation. *Int. J. Biometeorol.*, 43:99-109.
- Behnke, A. R., Feen, B. G., Welham, W. C. 1942. The specific gravity of healthy men. *J. Am. Med. Assoc.*, 118, 495-498.
- Davidson, L. E., Wang, J., Thornton, J. C., Kaleem, Z., Silva-Palacios, F., Pierson R. N., Heymsfield, S. B., Gallagher, D. 2011. Predicting Fat Percentage by Skinfolds in Racial Groups: Dunin and Womersley Revisited. *Med. & Sci. in Sports & Exercise*, 43(3), 542-549.
- DIN EN ISO 7730, 2006. Erg. Therm. Umgebung – Anal. Bestimmung und Interpretation der therm. Behag. durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lok. therm. Behag. (ISO 7730:2005). Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, Germany.
- Durnin, J. V. G. A., Rahaman, M. M. 1967. The assessment of the amount of fat in the human body from measurements of skinfold thickness. *Br. J. Nutr.*, 21, 681-689.
- Durnin, J. V. G. A., Womersley, J. 1974. Body fat assessed from total body density and its estimation from skinfold thickness: measurements on 481 men and women aged from 16 to 72 years. *Br. J. Nutr.*, 32, 77-97.
- Fanger, P.O. 1970. *Thermal Comfort*. Copenhagen: Danish Technical Press.
- Fiala, D., Lomas, K.J., and Stohrer, M. 1999. A computer model of human thermoreg. for a wide range of env. conditions: the passive system. *J Appl Physiol*, 87:1957-1972.
- Fiala, D., Lomas, K.J., and Stohrer, M. 2001. Computer pred. of human thermoreg. and temp. responses to a wide range of environmental conditions. *Int J Biometeorol.*, 45:143-159.
- Huizenga, C., Hui, Z., and Arens, E. 2001. A model of human physiol. and comfort for assessing complex thermal env.. *Bldg. and Env.*, 36, 691-699.
- Keys, A., Brožek, J. 1953. Body fat in adult man. *Physiol. Rev.*, 33, 245-325.
- Paulke, S. (2007). Finite element based implementation of Fiala's thermal manikin in THESEUS-FE. *EUROSIM 2007*.
- Romanovsky, A. A. 2007. Thermoregulation: Some concepts have changed. *Functional architecture of the thermoregulatory system. Am. J. Physiol. Regul. Integr. Physiol.*, 292, R37-R46.
- Schmidt, C., Wölki, D., Grün, G., van Treeck, C. 2012. Accuracy of mean skin temperature calculations and measurements in thermal comfort-related assessment. Windsor Conference, London, UK.
- Siri, W. E. 1961. Body composition from fluid spaces and density: analysis of methods. In: *Technique for Measuring Body Composition*, J. Brozek and A. Henschel, Editors. National Academy of Sciences, 223-224.
- Stern, H. 1901. Investigations on corporal specific gravity and on the value of the factor in physical diagnosis. *M. Rec.*, 59, 204-207.
- Stolwijk, J.A.J. 1971. A mathematical model of physiol. temp. reg. in man. Contractor report NASA CR-1855, Nat. Aeronautics and Space Admin., Washington D.C..
- Tanabe, S.-I., Kobayashi, K., Nakano, J., Ozeki, Y., and Konishi, M. 2002. Evaluation of thermal comfort using combined multi-node thermoregulation (65MN) and radiation models and computational fluid dynamics (CFD). *Energy and Buildings*, 34:637-646.
- Wölki, D., van Treeck, C., Zhang, Y., Stratbücker, S., Bolineni, S. R., Holm, A. 2011. Individualization of virtual thermal manikin models for predicting thermophysical responses. *Indoor Air 2011*, Austin, Texas.
- Zhang, H., Arens, E., Huizenga, C., Han, T. 2010. Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments: Part I: Local sensation of individual body parts. *Building and Environment*, 45, 380-388.