FORSCHUNGSVEREINIGUNG AUTOMOBILTECHNIK E.V.

FAT-SCHRIFTENREIHE

FAT 257

Ableitung eines messbaren Klimasummenmaßes für den Vergleich des Fahrzeugklimas konventioneller und elektrischer Fahrzeuge

VDA Verband der Automobilindustrie

Ableitung eines messbaren Klimasummenmaßes für den Vergleich des Fahrzeugklimas konventioneller und elektrischer Fahrzeuge

Forschungsstelle:

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Verfasser:

Dipl.-Phys. Rudolf Schwab

Dr.-Ing. Gunnar Grün

Das Forschungsprojekt wurde mit Mitteln der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e. V. (FAT) gefördert.

Inhalt

1 Problemstellung 4

2 Überblick zur Komfortbewertung in Fahrzeugen unter Berücksichtigung von Klimasummenmaßen 6
2.1 Wesentliche Quellen für die Komfortbewertung in Fahrzeugen 8
2.2 Übersicht über Klimasummenmaße 8
2.3 Übliche verwendete Klimasummengrößen und deren Einsatzbarkeit im Fahrzeug 11
2.3.1 Globe-Temperatur 11
2.3.2 Operativtemperatur 12
2.3.3 Äquivalenttemperatur nach DIN EN ISO 14505-2 12
2.3.4 Predicted Mean Vote (PMV) und DIN EN ISO 7730 14
2.4 Lokales thermisches Empfinden und instationäre Randbedingungen 17
2.4.1 Klassische Ansätze zur Bewertung lokaler thermischer Unbehaglichkeiten 17
2.4.2 Thermoregulatorische Ansätze zur Bewertung von Körpersegmenten 18
2.4.3 Bewertung von transienten thermischen Umgebungen 20
2.4.4 Zusammenhänge zwischen globalem und lokalem Komfortempfinden 21
2.5 Schlussfolgerungen 23

3 Erarbeitung eines Sensorkonzeptes für die Fahrzeugklimamessung und Überblick über den Stand der Technik 24
3.1 Erfassung diskreter physikalischer Größen 24
3.1.1 Ausgewählte Mess-Systeme 25
3.1.2 Alternative Mess-Systeme 40
3.2 Erfassung der Äquivalenttemperatur 43
3.2.1 Einzelsensoren 43
3.2.2 Klimamesspuppen 45
3.2.3 Schwitzende Messpuppen 48
3.3 Vergleichende Übersicht zwischen den Systemen 51
3.4 Wärmeaustausch über Kontaktflächen 52

4 Diskussion der Ergebnisse zur Festlegung des zu verfolgenden Verfahrens und der weiteren Vorgehensweise 53
4.1 Diskussion der verschiedenen Verfahren zur Messung der thermischen Behaglichkeit in Fahrzeugen 53

4.2 Vergleichsverfahren zur herstellerübergreifenden Darstellung der thermischen Behaglichkeit in konventionellen und zukünftigen Automobilen 55

5 Schlussfolgerungen und Ausblick 57
5.1 Grenzen der heutigen Verfahren zur Messung der thermischen Behaglichkeit in Fahrzeugen 57
5.2 Entwicklungsschritte für eine zuverlässige und umfassende Messmethode zur Bewertung der thermischen Behaglichkeit in Fahrzeugen 58

Literaturverzeichnis 60

Abbildungsnachweis 63

1 Problemstellung

Zur Bestimmung des thermischen Komforts in Fahrzeugen werden in der Regel Einzelparameter des Fahrzeuginnenraums wie Lufttemperatur, Luftgeschwindigkeit und Wärmestrahlung gemessen und daraus die Wirkung von Veränderungen des Fahrzeug-Klima-Setups erfasst. Die Komfortbewertung wird in der Regel von Mitarbeitern der Fahrzeughersteller vorgenommen. Dabei können beliebig unterschiedliche Ausprägungen der Einzelparameter sich gegenseitig kompensieren und unter Umständen zum gleichen thermischen Empfinden führen. Wünschenswert wäre daher ein Messverfahren, mit dem die Wirkung der Fahrzeugklimatisierung an einem Wert abgelesen werden kann. Wegen der thermischen Inhomogenität in einem Fahrzeuginnenraum sind dabei zusätzlich die lokal unterschiedlichen Gegebenheiten zu berücksichtigen und aufzuzeigen. Beeinflussende Mechanismen sind hierbei Konvektion (Lufttemperatur, Luftgeschwindigkeit, Turbulenzgrad) und Wärmestrahlung (Umschließungsflächentemperatur, Sonneneinstrahlung) sowie der Kontaktwärmeaustausch (Sitze, Lenkrad). Neben diesen fahrzeugbezogenen Größen hängt die letztendlich vom Menschen empfundene thermische Behaglichkeit im Wesentlichen noch von den menschbezogenen Größen Bekleidung und Aktivität ab.

Gelegentlich werden Klimamesspuppen zur Messung der thermischen Situation im Fahrzeug eingesetzt, diese sind jedoch in der Regel teuer und eine flexible Aufteilung der Messzonen für gerade besonders interessierende lokale Bereiche ist nicht möglich. Auch eine Beurteilung der Klimasituation des Fahrerbereichs bei realen Fahrten ist nicht möglich.

Die in DIN EN ISO 7730 [1] beschriebene Messung des PMV-Wertes ist nur für das Gesamtempfinden des Menschen in Räumen mit lokal homogenen und stationären thermischen Bedingungen ausgelegt und deshalb für Fahrzeuge nicht geeignet. Ziel ist daher die Ableitung eines Verfahrens zur Messung der lokalen Klimasituationen in einem Fahrzeug mit Sensoren, die die thermischen Bedingungen lokal als physikalisches Klimasummenmaß wiedergeben und daraus die Berechnung des lokalen thermischen Empfindens für bestimmte Ausprägungen der menschbezogenen Kenngrößen Aktivität und Bekleidung erlauben.

Insbesondere soll das abzuleitende Verfahren einen Vergleich der thermischen Behaglichkeitssituation in konventionellen Fahrzeugen mit der in Elektro- oder Hybridfahrzeuge erlauben, da zu erwarten ist, dass sich die Bedingungen mit denen thermischer Komfort in diesen Fahrzeugen erreicht wird in ihrer physikalischen Ausprägung unterscheiden werden. Ein für den Vergleich der thermischen Fahrzeugklimata geeignetes Messverfahren muss daher die unterschiedlichen physikalischen Einflussgrößen berücksichtigen, wobei gleichzeitig die sich kompensierende oder auch äquivalente Wirkung beachtet und lokal aufgelöst wird. Es soll auch geeignet sein Messungen während realer Fahrten zu ermöglichen, nach Wunsch dabei auch am Platz des Fahrers.

Zielsetzung dabei ist, dass die in der vorliegenden Arbeit gewonnenen Erkenntnisse den Herstellern untereinander übergreifenden Austausch ermöglichen. Damit soll die Basis gebildet werden, dass trotz der dem Wettbewerb unterliegenden Geheimhaltung, unter den Herstellern die Möglichkeit zu einer vergleichenden Bewertung der Ergebnisse von Messungen zum thermischen Komfort gegeben wird.

2 Überblick zur Komfortbewertung in Fahrzeugen unter Berücksichtigung von Klimasummenmaßen

Zum Festlegen bzw. Herausarbeiten eines im Automobilbereich – insbesondere im Hinblick auf E-Mobilität geeigneten – standardisierten Messverfahrens ist es notwendig, einen Überblick für den Automobilbereich relevante, bisher für herkömmlich betriebene Fahrzeuge bekannter Möglichkeiten zur Komfortbewertung zu finden. Die im Automobilbereich verwendeten Methoden werden jedoch aus Wettbewerbsgründen in der Regel nicht veröffentlicht und sind somit allgemein nicht zugänglich.

„Im Vergleich zur Gebäude-Klimatisierung ist die Anzahl der Veröffentlichungen über die Pkw-Klimatisierung kleiner. Dies liegt daran, dass nur der Fahrzeughersteller seine Fahrzeuge wirklich kennt, über die notwendigen versuchstechnischen Anlagen verfügt und sein Wissen aus Gründen des Wettbewerbs verständlicherweise nur selten publiziert.“ [2]

Aus diesem Grunde können im Folgenden in der Regel nur nicht aus dem Automobilbereich stammende Verfahren oder Messmethoden beschrieben werden. Die wichtigsten oder am ehesten auf den Automobilbereich zu übertragenden Erkenntnisse bzw. Messmethoden werden in den folgenden Abschnitten genannt.

Ein Vergleich der Anforderungen zwischen Gebäude und Fahrzeug ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1:
Anforderungen Büroraum gegenüber Fahrgastraum (nach [2]).

Kenngröße	Büroraum	Fahrgastraum eines Pkw
Volumen	Ca. 30 [m^3]	Ca. 3 [m^3]
Volumen pro Person	Ca.10 [m^3/Person]	Ca. 0,6 [m^3/Person]
Betriebsweise	Stationär	Meistens instationär
Lufttemperatur	15–30 [°C]	-25–80 [°C]
Oberflächentemperatur	15–40 [°C]	-25–100 [°C]
Temperaturfeld	Nahezu homogen	Inhomogen
Strömungsfeld	Nahezu homogen	Inhomogen
Strahlungsfeld	Nahezu homogen	Inhomogen
Sonneneinstrahlung	Schutz vorhanden	Wenig Schutz vorhanden
Anströmgeschwindigkeit	Ca. 0,2 [m/s]	bis 5 [m/s]
Abstand zum Fenster	>1 [m]	Ca. 0,2 [m]
Luftwechselrate	2–8 [h-1]	10–200 [h-1]

Die zur Beurteilung des thermischen Komforts von Fahrzeuginsassen maßgeblichen Größen gliedern sich in zwei Gruppen: die physikalischen Größen und die personenbezogenen Größen.

Physikalische Größen

- Lufttemperatur
- Luftgeschwindigkeit und Turbulenzgrad
- Wärmestrahlung aus allen Richtungen und Sonneneinstrahlung
- Wärmeleitung
- Luftfeuchte

Personenbezogene Größen

- innere Wärmebildung beim Stoffwechsel (Metabolismus)
- abgegebene Arbeit (Aktivität)
- Bekleidung (Wärmeleitwiderstand)
- Absorptionskoeffizient der Wärmeeinstrahlung bzw. Emissionskoeffizient der eigenen Wärmestrahlung
- Wasserdampfdiffusion der Bekleidung
- Bildung von Schweiß
- Wärmeaustausch durch die Atmung

- Einwirkungsdauer
- u.a.

2.1 Wesentliche Quellen für die Komfortbewertung in Fahrzeugen

Wesentliche allgemein zugängliche Erkenntnisse über die Klimaphysiologie im Automobilbereich beschreiben die folgenden Quellen:

„Hygienische und physiologische Grundlagen der Pkw-Klimatisierung“ [3], beschreibt dabei die wesentlichen Grundlagen zur PKW-Klimatisierung.

Der „Einfluss der Sonneneinstrahlung auf die thermische Behaglichkeit in Kraftfahrzeugen“ wird eingehend in [4] und [5] in zwei Arbeiten unter Einbeziehung von Korrelationen zwischen Messungen physikalischer Größen und der Befragung einer großen Anzahl von Versuchspersonen beschrieben. Hier werden auch bereits Klimasummenmaße zur Korrelation mit den Aussagen der Versuchspersonen verwendet. Eines davon, die dort genannte Bezugstemperatur, entspricht dabei dem heute allgemein verwendeten Begriff der Äquivalenttemperatur.

2.2 Übersicht über Klimasummenmaße

Klimasummenmaße integrieren mehrere für das thermische Empfinden wesentliche physikalische Größen, da die Vielzahl der physikalischen und personenbezogenen Einflussgrößen zu Schwierigkeiten bei einer vergleichenden Bewertung des Klimas bei unterschiedlichen Situationen führt. Damit das Klima mit nur wenigen, am besten mit nur einer Angabe beschreibbar wird, sind Klimasummenmaße erarbeitet worden. Die Entwicklung der Klimasummenmaße geht dabei auf die Erkenntnis zurück, dass sich die Wirkungen verschiedener Klimagrößen auf den Menschen gegenseitig kompensieren können. So lässt sich zum Beispiel eine unangenehm hohe Lufttemperatur durch eine stärkere Luftbewegung z.B. durch einen Ventilator kompensieren. Andererseits fühlen sich Personen auch bei einer eigentlich unangenehm kalten Lufttemperatur thermisch komfortabel, wenn das Wärmedefizit z.B. durch Sonneneinstrahlung ausgeglichen wird.

Ein erstes Klimasummenmaß zur Bewertung des thermischen Raumklimas wurde von Yaglou [6] mit der Effektivtemperatur eingeführt. Diese stellt eine fiktive Lufttemperatur dar, die gegenüber anderen Kombinationen aus Lufttemperatur, Feuchte und Luftbewegung das gleiche Gefühl thermischer Behaglichkeit hervorruft. Auch mit Hilfe von modifizierten Methoden zur Ermittlung der Effektivtemperatur, werden Einflüsse aus der Strahlungstemperatur nur unzureichend, Einflüsse aus dem Turbulenzgrad von Luftbewegungen überhaupt nicht berücksichtigt. Von Gagge [7] wurde der Begriff der operativen Temperatur eingeführt. Diese Temperatur spiegelt die Innenoberflächentemperatur eines gedachten Raumes wieder, mit welchem ein Körper bei gleicher Innenoberflächen- und Lufttemperatur dieselbe Menge durch Strahlung und Konvektion

austauscht, wie mit dem realen Raum. Allerdings müssen die Luftbewegungen beider Räume gleich groß sein.

Typische Beispiele für Klimasummenmaße aus der Vergangenheit sind im Folgenden angegeben, wobei eine Vielzahl aus dem Bedürfnis zur Beurteilung von Hitzearbeitsplätzen entstanden ist.

Klimasummenmaße durch Zusammenfassung physikalischer Größen

- Aktinometer
- Trocken- und Feuchttemperatur
- Feuchtkugeltemperatur
- Homöotherm
- Wetterfrigorimeter
- Kata-Thermometer
- Davoser Frigorimeter
- Globe-Thermometer
- Eupatheostat
- Abkühlungsschreiber
- Coolometer
- Thermo-Integrator
- Frigorigraph
- Resultierende Temperatur
- Frierkörper
- Behaglichkeitsziffer
- Feuchtkugelthermometer
- Schwülegrad
- Frigorimeter
- R-Meter
- Künstlicher Kopf
- Raumklimaanalysator
- RST-Meter
- Gefühlte Temperatur
- Äquivalenttemperatur
- Wet Bulb Globe Temperature
- Resultierende Trockentemperatur
- Komfortziffer

- Wet-Dry Index
- Kohlensäure-Maßstab
- Operativtemperatur
- Effektivtemperatur
- Wind Chill Temperaturen
- Equatorial Comfort Index
- Still Shade Temperature

Klimasummenmaße durch Bestimmung der physiologischen Beanspruchung

- Physiologischer Effekt
- Predicted 4-Hour Sweat Rate
- Körpertemperatur
- Hauttemperatur
- Pulsfrequenz
- Blutdruck
- Energieumsatz
- Index of Strain
- Schwitzrate

Klimasummenmaße durch Berechnung des Wärmeaustauschs

- Predicted Mean Vote PMV
- Thermal Acceptance Ratio
- Erforderliche Verdunstung
- Heat Stress Index
- Temperature effective limit
- Heat Work Index
- Vorhergesagte Schweißrate
- Index of Thermal Stress
- Äquivalent Operative Temperature
- Äquivalent Operative Sweat Rate
- Relative Strain
- Index of Thermal Comfort

- Model Skin Temperature
- Comfy-Test
- Erforderliche Schweißabgabe
- Erforderliche Bekleidungsisolation

Trotz der Fülle der genannten Begriffe stellen die genannten Beispiele nur eine Auswahl dar. Viele der genannten Größen haben historischen Ursprung und entstammen arbeitsmedizinischen Bereichen für Hitzearbeitsplätze. Daraus ist aber erkenntlich, dass es schon immer ein großes Anliegen war, Messwerte von mehreren Größen in eine einzelne Größe überzuführen, die vergleichbare Aussagen bei unterschiedlichen Randbedingungen ermöglichen. Erst Fanger hat sich in seinen Herleitungen zur Berechnung des PMV-Indexes als Maß für das thermische Empfinden des Menschen ausführlich mit dem Komfortbereich beschäftigt (vgl. Abschnitt 2.5).

2.3 Übliche verwendete Klimasummengrößen und deren Einsatzbarkeit im Fahrzeug

Von der Vielzahl der oben genannten Größen werden aktuell nur noch wenige benutzt. Die wesentlichen sind im Folgenden kurz beschrieben, soweit sie für den Automobilbereich relevant sind, und die Vor-und Nachteile für eine Anwendung im Fahrzeug erläutert.

2.3.1 Globe-Temperatur

Beim Globe-Thermometer handelt es sich um ein passives Messgerät, das 1930 von Vernon entwickelt wurde und zur Bestimmung des Strahlungseinflusses eingesetzt wird, wobei die Lufttemperatur ein weiterer bestimmender Faktor ist. Es handelt sich hierbei nach Definition um eine kupferne, außen geschwärzte Hohlkugel mit einem Durchmesser von 152 mm. Darin befindet sich ein Temperatursensor (ursprünglich ein Quecksilberthermometer), der eine Lufttemperatur im Inneren der Kugel misst, die durch eine Kombination aus der die Kugel umgebenden Lufttemperatur und Strahlung hervorgerufen wird. Der Vorteil des Globe-Thermometers ist seine einfache Handhabung und dass Strahlung und Lufttemperatur zusammen als ein Klimasummenmaß wiedergegeben werden. Damit lässt sich zumindest eine qualitative Aussage zur Strahlungssituation machen, wenn die Lufttemperatur bekannt ist, Als Nachteil allgemein ist zu nennen, dass unbehagliche Asymmetrien, wie sie im Fahrzeug auftreten können, nicht erkannt werden. Wie zum Beispiel eine zu warme Umgebung vorne und eine zu kalte hinten als unangenehm empfunden wird (Lagerfeuereffekt), das Globe-Thermometer aber eine durchaus akzeptable Globe-Temperatur wiedergegeben kann. Damit der Wert nicht verfälscht wird, darf auch keine nennenswerte Luftgeschwindigkeit herrschen, um die Veränderung der Kugeltemperatur aufgrund von Strahlung gegenüber der Lufttemperatur nicht durch Konvektion zu beeinflussen. Für transiente Vorgänge im Fahrzeug

ist wegen der großen Wärmeträgheit das Globe-Thermometer nicht geeignet, da es etwa 20 min benötigt, um ein Gleichgewicht mit seiner Umgebung zu erreichen. Globe-Thermometer sind aktuell nach wie vor kommerziell erhältlich.

2.3.2 Operativtemperatur

Bei der Operativtemperatur handelt es sich um einen Mittelwert aus Lufttemperatur und mittlerer Strahlungstemperatur der Umgebungsflächen. Das zunächst einfache erscheinende Verfahren hat seine typische Anwendung in natürlich belüfteten Gebäuden mit großflächigen, weitgehend gleichmäßig erwärmten Wänden ohne Sonneneinstrahlung und Zwangskonvektion durch Klimaanlagen. Schwierigkeiten bestehen bei der Bestimmung der mittleren Strahlungstemperatur bei inhomogen strahlenden Umgebungsflächen, wie sie im Kfz typisch sind. Ähnlich wie beim Globe-Thermometer werden Strahlungsasymmetrien nicht erfasst und direkte Sonneneinstrahlung findet keinen Eingang in die Berechnung. Die das thermische Empfinden entscheidend mit bestimmende Luftgeschwindigkeit wird nicht direkt berücksichtigt. Die Operativtemperatur ist deshalb nur für relativ einfache thermische Situationen verwendbar, wie sie im Kfz nicht die Regel sind. Als kommerziell erhältliches Messgerät ist lediglich ein Gerät auf dem Markt, das von der Funktion eher an ein Globe-Thermometer angelehnt ist, ohne dessen Definition zu erfüllen (vgl. Abschnitt 3.1.1).

2.3.3 Äquivalenttemperatur nach DIN EN ISO 14505-2

Alleiniger Maßstab zur Beurteilung des Klimas war bisher häufig nur die Lufttemperatur. Diese ist allerdings in der Regel nur in Gebäuden eine ausreichende Messgröße, da dort normalerweise weder direkte Sonneneinstrahlung noch erhöhte Luftbewegungen auftreten. Um den Einfluss von Temperaturstrahlung und Luftbewegung mit zu berücksichtigen wurde die Äquivalenttemperatur eingeführt. Diese hat im Laufe der Zeit mehrere Definitionen erhalten und wurde in den 1990er Jahren hauptsächlich vor dem Hintergrund der Bewertung der thermischen Umgebung in Automobilen festgelegt. Die Äquivalenttemperatur integriert dabei mehrere für das thermische Empfinden wesentliche physikalische Größen, in der Regel Lufttemperatur, Luftgeschwindigkeit und Strahlung, da die Vielzahl der Kombinationen der Einflussgrößen zu Schwierigkeiten bei einer vergleichenden Bewertung des Klimas führt.

Der Begriff der Äquivalenttemperatur als Klimasummenmaß und die Bedeutung für die Messungen in Kraftfahrzeugen wird ausführlich in der DIN EN ISO 14505-2 [8] beschrieben. Sie ist dort folgendermaßen definiert:

„Die Äquivalenttemperatur ist die homogene Temperatur des gedachten Raumes mit einer Luftgeschwindigkeit gleich Null, in dem eine Person die gleiche trockene Wärme durch Strahlung und Konvektion abgibt wie in der tatsächlichen Umgebung ohne einheitliche Bedingungen“.

Messtechnisch wird anstelle einer Person die Wärmeabgabe eines beheizten Messkörpers und dessen Oberflächentemperatur gemessen und daraus die Äquivalenttemperatur bestimmt. Der Begriff der Äquivalenttemperatur beruht dabei auf der Idee, dass Klimasummenmaße die durch verschiedene Einflussgrößen bedingte komplexe thermische Beanspruchung des Menschen in einem Zahlenwert zusammenfassen. Dabei wird vorausgesetzt, dass gleiche Klimasummenwerte der gleichen Wirkung auf den Menschen entsprechen. Die in der DIN EN ISO 14502-2 definierte Äquivalenttemperatur fasst hierbei die den thermischen Komfort bestimmenden Größen Lufttemperatur, Luftgeschwindigkeit und Wärmestrahlung zu einem Klimasummenmaß zusammen.

Aufgrund der im Kfz örtlich sehr inhomogenen thermischen Randbedingungen werden in der DIN EN ISO 14502-2 die folgenden für verschiedene Anwendungsbereiche näher spezifizierten Äquivalenttemperaturen angegeben:

Äquivalenttemperatur für Klimamesspuppen

„Die **Äquivalenttemperatur für den gesamten Körper** ist die Temperatur eines gedachten umschlossenen Raumes mit gleicher Temperatur von Luft und den umgebenden Oberflächen sowie mit ruhender Luft, in dem ein beheizter Messwertaufnehmer in Gestalt einer menschengroßen Puppe die gleiche trockene Wärme durch Strahlung und Konvektion abgibt, wie in der tatsächlichen nicht homogenen Umgebung. "

„Die **segmentbezogene Äquivalenttemperatur** ist die homogene Temperatur eines gedachten umschlossenen Raumes mit gleicher Temperatur von Luft und den umgebenden Oberflächen sowie mit ruhender Luft, in dem ein oder mehrere ausgewählte Zonen einer beheizten Puppe die gleiche trockene Wärme durch Strahlung und Konvektion abgeben wie in der tatsächlichen nicht homogenen Umgebung."

Äquivalenttemperatur für Einzelsensoren

„Die **gerichtete Äquivalenttemperatur** ist die homogene Temperatur eines gedachten umschlossenen Raumes mit gleicher Temperatur von Luft und den umgebenden Oberflächen sowie mit ruhender Luft, in dem eine kleine, flache, beheizte Oberfläche die gleiche trockene Wärme durch Strahlung und Konvektion abgibt, wie in der tatsächlichen nicht homogenen Umgebung."

„Die **ungerichtete Äquivalenttemperatur** ist die homogene Temperatur eines gedachten umschlossenen Raumes mit gleicher Temperatur von Luft und den umgebenden Oberflächen sowie mit ruhender Luft, in dem ein beheiztes Ellipsoid die gleiche trockene Wärme durch Strahlung und Konvektion abgibt, wie in der tatsächlichen nicht homogenen Umgebung."

In [9] werden Messungen zu Äquivalenttemperaturen verschiedener Methoden und Geräte anhand von Labor und Feldversuchen beschrieben. Die Ergebnisse dort zeigen, dass in diesem Bereich noch vermehrt Aufwand getrieben werden

muss. Die relativen Ergebnisse des Messgerätes in sich waren plausibel, aber ein Vergleich der Ergebnisse der unterschiedlichen Messgeräte zueinander war noch unbefriedigend. Bild 1 zeigt einen Auszug der Ergebnisse mit 4 Klimamesspuppen am Beispiel des Zusammenhangs der gemessenen Äquivalenttemperaturen am Kopf und dem von den Probanden im Mittel wiedergegebenen Bewertungen der thermischen Behaglichkeit am Kopf (Local Mean Vote Head).

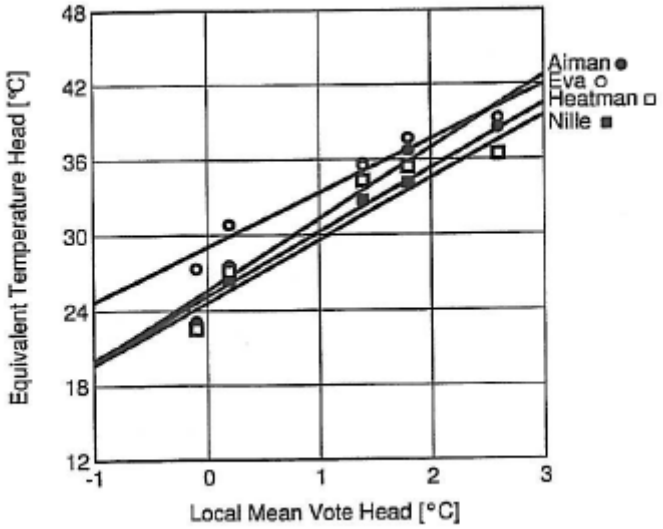

Bild 1:
Beispiel des Zusammenhangs der gemessenen Äquivalenttemperaturen am Kopf und der von den Probanden im Mittel wiedergegebenen Bewertungen der thermischen Behaglichkeit am Kopf (Local Mean Vote Head) mit unterschiedlichen Klimamesspuppen [9].

Die in der DIN EN ISO 14502-2 angegebenen Ausführungen zur Messung der Äquivalenttemperatur bilden eine Grundlage für vergleichende Messung der thermischen Belastung auf Personen im Fahrzeug. Wie Bild 1 zeigt, sind die Ergebnisse von Messungen mit verschiedenen Geräten, die die Äquivalenttemperatur messen, leider nicht überzeugend und differieren deutlich. Darüber hinaus waren viele der in [9] angegebenen Geräte Einzelstücke und waren generell nicht bzw. sind aktuell nicht mehr kommerziell erhältlich. Dies mag auch ein Grund dafür sein, dass die Messmethode nach der DIN EN ISO 14502-2 im Automobilbereich noch keinen Durchbruch erfahren hat. Welche Messgeräte heute noch erhältlich sind, ist ab Abschnitt 3 beschrieben.

2.3.4 Predicted Mean Vote (PMV) und DIN EN ISO 7730

Die im vorherigen Abschnitt beschriebene Äquivalenttemperatur beschreibt integral die physikalischen Einflussgrößen, also die thermische Belastung des

Menschen. Nicht erfasst wird hierbei die Reaktion des Menschen, seine Beanspruchung, ausgedrückt als sein thermisches Empfinden, das neben den thermischen Randbedingungen noch im Wesentlichen von den personenbezogenen Größen Aktivität und Bekleidung abhängt. Deren Werte sind noch einigermaßen griffig zu erfassen und führen zu nachfolgend beschriebenem PMV-Index, der allerdings nur für weitgehend homogene und stationäre Situationen, wie sie in Gebäuden typischerweise herrschen, Gültigkeit hat. Zusätzlich für das thermische Empfinden psychophysische Faktoren werden nicht mit einbezogen. Dass diese einen maßgeblichen Einfluss auf die thermische Behaglichkeit haben ist zwar bekannt, können nach heutigem Stand des Wissens aber nicht in die Berechnungsmethoden zur Vorhersage des thermischen Empfindens einbezogen werden.

Ein im Gebäudebereich bewährtes Verfahren zur Vorhersage des im Mittel zu erwartenden thermischen Empfindens aufgrund von Messungen von Einzelparametern bei moderaten Umgebungsbedingungen stellt die DIN EN ISO 7730 [1] dar. Diese liefert einen sog. PMV-Wert (Predicted Mean Vote), der sowohl die physikalischen Randbedingungen, wie auch die personenbezogenen Größen Aktivität und Bekleidung berücksichtigt. Hierbei ist die grundsätzliche Annahme, dass sich der Mensch komfortabel fühlt, wenn der Körper im thermischen Gleichgewicht mit der Umgebung steht. Dies gilt somit für die Bilanz zwischen einerseits strahlungsbezogenem und konvektivem Wärmeaustausch und andererseits der internen Wärmeproduktion bei Wärmeverlusten durch trockene und feuchte Atmung, Diffusion und Schwitzen. Weiterhin werden Hauttemperatur und Schweißrate innerhalb der erforderlichen Grenzen angenommen, in welchen thermisches Gleichgewicht herrscht. Damit kann mit einer iterativen Berechnung die Predicted Mean Vote (PMV) wie folgt bestimmt werden:

$$\begin{aligned}\mathrm{PMV} = &\left(0{,}303\, e^{-0{,}036M} + 0{,}028\right)\left((M - W)\right.\\ &- 3{,}05\, 10^{-3}\left(5733 - 6{,}99(M - W) - p_a\right) - 0{,}42\left((M - W) - 58{,}15\right)\\ &- 1{,}7\, 10^{-5} M\left(5867 - p_a\right) - 0{,}0014 M\left(34 - t_a\right)\\ &\left.- 3{,}96\, 10^{-8} f_{cl}\left((t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4\right) - f_{cl} h_c \left(t_{cl} - t_a\right)\right)\end{aligned}$$

mit einer Oberflächentemperatur auf der Bekleidung von

$$\begin{aligned}t_{cl} = &35{,}7 - 0{,}028(M - W)\\ &- 0{,}155\, I_{cl}\left(3{,}96\, 10^{-8} f_{cl}\left((t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4\right) + f_{cl} h_c \left(t_{cl} - t_a\right)\right).\end{aligned}$$

PMV = vorhergesagtes mittleres Gesamtempfinden [-]

M = Stoffwechselrate [W/m²] (1 met = 58,15 W/m²)

W = externe Arbeit [W/m²] (üblicherweise W = 0 W/m²)

p_a = Dampfdruck [Pa]

t_a = Lufttemperatur [°C]

t_r = mittlere Strahlungstemperatur [°C]

h_c = konvektiver Wärmeübergangskoeffizient [W/m²K]

I_{cl} = Bekleidungsdämmwiderstand [m²K/W]

f_{cl} = Verhältnis bekleideter/unbekleideter Körper [-]

Die möglichen Ausprägungen der PMV-Werte sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2:
Zusammenhang der PMV-Skala mit den zugehörigen Beschreibungen.

PMV-Wert	Verbale Beschreibung
-3	kalt
-2	kühl
-1	leicht kühl
0	neutral
1	leicht warm
2	warm
3	heiß

Die angegebene Beziehung zur Bestimmung von PMV liefert eine weitgehend verlässliche Aussage zum zu erwartenden thermischen Gesamtempfinden, in homogenen Räumen, bei zeitlich stationären Zuständen. Aussagen zum lokalen Empfinden von einzelnen Körperteilen, bei örtlich und zeitlich inhomogenen Bedingungen, können damit nicht gewonnen werden.

Als Vorteil des PMV-Indexes ist zu nennen, dass hier die thermische Beanspruchung, also eine Bewertung des thermischen Komforts wie ihn der Mensch beschreibt, erfolgt. Als Nachteil für den Einsatz im Kfz ist zu nennen, dass der Index nur für weitgehend homogene Räume mit geringen Asymmetrien definiert ist und auch nur für das Gesamtempfinden. Lokal unterschiedliche Situationen die z.B. kalte Füße oder eine lokale Erwärmung durch z.B. Sonneneinstrahlung hervorrufen, werden nicht berücksichtigt. Zusätzlich erfordert die Berechnung einen hohen Messaufwand, da alle in der Gleichung vorkommenden Größen einzeln gemessen werden müssen.

2.4 Lokales thermisches Empfinden und instationäre Randbedingungen

2.4.1 Klassische Ansätze zur Bewertung lokaler thermischer Unbehaglichkeiten

Bei der Betrachtung des thermischen Komforts im Gebäudebereich lag der Fokus zunächst auf der Beurteilung der gesamten thermischen Situation bei einem größtenteils uniformen thermischen Raumklima. Trotz insgesamt thermisch neutralen Umgebungsbedingungen wurden jedoch weiterhin thermisch unbehagliche Situationen beobachtet, weshalb Ansätze für die Beurteilung lokaler Unbehaglichkeiten durch einerseits asymmetrische Temperaturverteilungen und andererseits Zugluft abgeleitet wurden. Diese beziehen sich weiterhin auf die in Gebäude üblichen stationären Bedingungen.

Üblicherweise treten Temperaturschichtungen oder kältere bzw. wärmere Oberflächen, welche zu einem asymmetrischen Wärmeaustausch führen, auf. In DIN EN ISO 7730 [1] werden hier Modelle referenziert, welche den Anteil Unzufriedener für bestimmte Szenarien ermitteln: für vertikale Lufttemperaturunterschiede, warme bzw. kalte Fußböden, Asymmetrie der Strahlungstemperatur und Zugluft.

Vertikale Lufttemperaturunterschiede

Die Bestimmung des Anteils Unzufriedener mit vertikalen Lufttemperaturunterschieden geht zurück auf Olesen et al. (1979)[10]. In ihren Untersuchungen wurden sitzende Personen in thermischer Neutralität verschiedenen Differenzen $\Delta t_{a,v}$ von 0°C bis zu 8°C zwischen Kopf und Knöcheln ausgesetzt. Hieraus wurde folgender Zusammenhang ermittelt:

$$PD_{vertical} = 100 / \left(1 + e^{\left(5{,}76 - 0{,}856\,\Delta t_{a,v}\right)}\right).$$

Kalte bzw. warme Fußböden

Für Personen mit leichtem Schuhwerk wurden von Olesen (1977)[11] Zusammenhänge zwischen dem Anteil Unzufriedener und kalten bzw. warmen Fußböden aufgestellt. Für diese ist nicht das Material des Fußbodens, sondern seine Temperatur t_f maßgebend. Folgender Zusammenhang wurde aus den Bewertungen von Probanden bei unterschiedlichen Fußbodentemperaturen $5°C \leq t_f \leq 40°C$ auf verschiedenen Bodenmaterialien gewonnen:

$$PD_{floor} = 100 - 94\, e^{\left(-1{,}387 + 0{,}118\, t_f - 0{,}0025\, t_f^2\right)}.$$

Weitergehende Veröffentlichungen zur Messung des Kontaktwärmestromes und dem thermischen Komfort von generell Oberflächen berührenden Körperteilen wurden nicht gefunden. In diesem Kontext existieren im Wesentlichen Ergebnisse zu Schmerz und Verletzungen, jedoch nicht in Verbindung mit Auswirkungen auf die thermische Behaglichkeit des Umgebungsklimas.

Asymmetrie der Strahlungstemperatur

Untersuchungen von Fanger et al. (1985) [12] resultierten in Beziehungen zwischen dem Anteil Unzufriedener und verschieden temperierter Decken- und Wandflächen. Für leicht bekleidete (0,6 clo) sitzende Personen in thermischer Neutralität können folgende Zusammenhänge bei Differenzen in der Strahlungstemperatur der zwei Halbräume vor und hinter einer kleinen Platte Δt_{pr} herangezogen werden:

$$PD_{r,asym} = \begin{cases} 100/(1+e^{(2{,}84-0{,}174\,\Delta t_{pr})}) - 5{,}5 & \text{, warme Decke mit } \Delta t_{pr} < 23°\text{C} \\ 100/(1+e^{(9{,}93-0{,}500\,\Delta t_{pr})}) & \text{, kalte Decke mit } \Delta t_{pr} < 15°\text{C} \\ 100/(1+e^{(3{,}72-0{,}052\,\Delta t_{pr})}) - 3{,}5 & \text{, warme Wand mit } \Delta t_{pr} < 35°\text{C} \\ 100/(1+e^{(6{,}61-0{,}345\,\Delta t_{pr})}) & \text{, kalte Wand mit } \Delta t_{pr} < 15°\text{C} \end{cases}.$$

Zugluft

Zugluft wird meist als ungewünschtes lokales Kühlen des Körpers durch Luftbewegung verstanden. Da Luftbewegungen mit einem hohen Turbulenzgrad bei gleicher Geschwindigkeit und Lufttemperatur mehr Beschwerden verursachen als solche mit niederem Turbulenzgrad, schlugen Fanger et al. (1988) [13] ein Modell zur Ermittlung der Anzahl Unzufriedener bezüglich Zugluft vor. Dieses basiert neben der Lufttemperatur t_a und der mittleren Luftgeschwindigkeit v_a auch auf dem Turbulenzgrad Tu in Prozent:

$$PD_{draft} = \min[(3{,}143 + 0{,}3696\,\bar{v}_a\,Tu)(34 - t_a)(\bar{v}_a - 0{,}05)^{0{,}6223}\;;100].$$

Dieses ist gültig für die Zugluftbewertung im Nacken einer bei leichter Tätigkeit sitzenden Person, wobei $v_a < 0{,}5$ m/s, 20°C ≤ t_a ≤ 26°C und 10 % ≤ Tu ≤ 60 % und ist auch in DIN EN ISO 7730 (2006) [1] verankert.

2.4.2 Thermoregulatorische Ansätze zur Bewertung von Körpersegmenten

Im Rahmen der Weiterentwicklung von Computerprogrammen zur Berechnung von physikalischen Umgebungsbedingungen wurden in den letzten Jahren vermehrt thermophysiologische Modelle entwickelt, die anhand von thermoregulatorischen Vorgängen im menschlichen Körper auch lokale Vorhersagen ermöglichen sollen. Je nach Modell wird hier der menschliche Körper in unterschiedlich viele Segmente mit verschiedenem Aufbau eingeteilt, für welche basierend auf empirischen Faktoren zur Thermoregulation und Wärmebilanzgleichungen meist eine Aussage zur lokalen Verteilung von resultierenden Hauttemperaturen errechnet wird. Die bekanntesten sind die Modelle nach Tanabe et al. (1995) [14], Fiala (1998) [15] und Huizenga et al. (1999) [16].

Problematisch sowohl im Hinblick auf die Bewertung der mit solchen Modellen berechneten Ergebnisse, als auch deren messtechnische Umsetzung bei der Be-

urteilung unterschiedlicher Konfigurationen von Fahrzeugkabinen ist die „Übersetzung“ der berechneten Hauttemperaturen in Aussagen zum (lokalen) thermischen Empfinden. Die aktuell umfangreichsten Studien wurden hierzu von Zhang (2003) [17], Arens et al. (2006) [18a, 18b] und Zhang et al. (2010) [19a, 19b, 19c] durchgeführt. Basierend auf experimentellen Studien mit 160 Probanden wird anhand eines umfangreichen empirischen Gleichungsapparates, welcher für die einzelnen Körperteile sowie den gesamten Körper die Wahrnehmung und Komfortbewertung nach der Modellarchitektur in Bild 2 ermittelt, werden Aussagen zum thermischen Komfort abgeleitet.

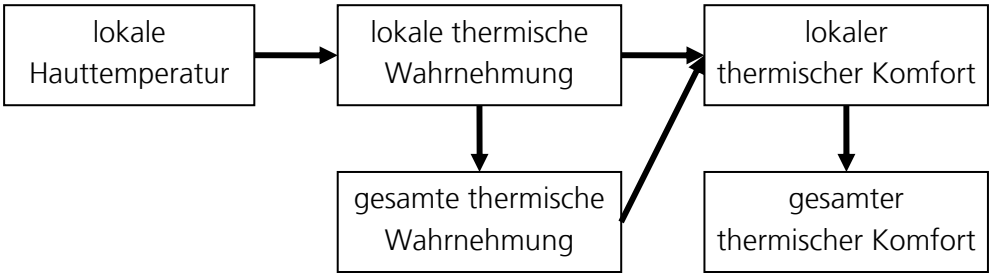

Bild 2:
Modellarchitektur für die lokale und gesamte thermische Wahrnehmung und Komfortbewertung aus lokal ermittelten Hauttemperaturen nach [17].

Über mehrere Regressionskoeffizienten wird hierbei eine Abbildung der lokalen Hauttemperaturen über die thermische Wahrnehmung auf den thermischen Komfort realisiert.

Einen anderen Weg berechnete lokale Größen in Verbindung mit lokalen subjektiven Bewertungen zu setzen hat Nilsson (2004) [20] und Nilsson (2007) [21] beschritten. Anstatt lokaler Hauttemperaturen verwendet er die resultierenden Wärmeströme von Körpersegmenten unter inhomogenen thermischen Bedingungen und setzt sie in Verbindung mit den zugehörigen Äquivalenttemperaturen. Die Korrelationen dieser Äquivalenttemperaturen wurden anhand von Bewertungen des thermischen Komforts aus Experimenten mit Probandenpanels bei sitzender Tätigkeit und zwei verschiedenen Kleidungsszenarien (Sommer und Winter) ermittelt. Die resultierenden Grafiken haben auch Eingang in die Norm ISO 14505-2 [8] gefunden.

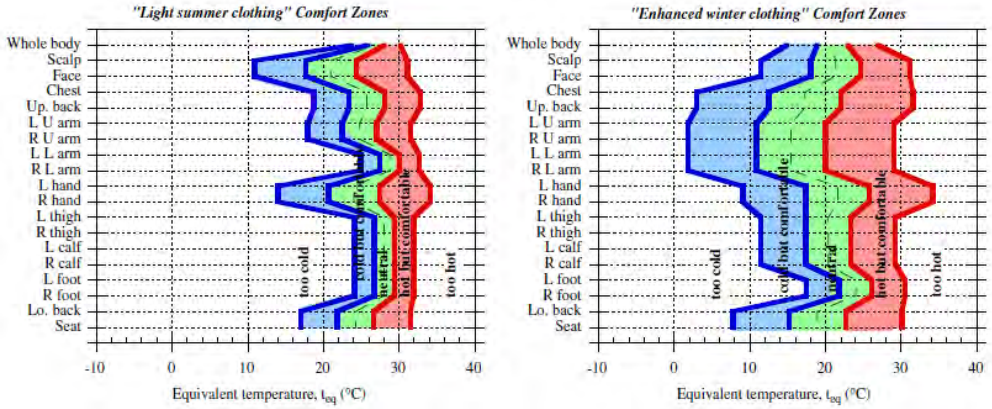

Bild 3:
Diagramme mit Komfortzonen für leichte Sommerbekleidung und erweiterte Winterbekleidung bei sitzender Tätigkeit nach [21].

2.4.3 Bewertung von transienten thermischen Umgebungen

Die meisten Untersuchungen zum thermischen Komfort beziehen sich auf stationäre Bedingungen. Erst mit der Entwicklung der oben genannten thermoregulatorischen Modelle rückten auch transiente thermische Umgebungen in den Fokus nachdem mit diesen Ansätzen auch eine Berechnung von sich ändernden Bedingungen ermöglicht wurde. Nachdem sich diese Modelle in erster Linie mit der Berechnung von Hauttemperaturen auseinandersetzen sind konsequenterweise auch die Betrachtungen der transienten Umgebungen durch die Beobachtung von Hauttemperaturen und deren thermische Wahrnehmung geprägt. Eine der wenigen Aussagen bei instationären Bedingungen liefern die Dissertationen [22], [23] und [15], aus ersterer stammt das folgende beispielhafte Bild.

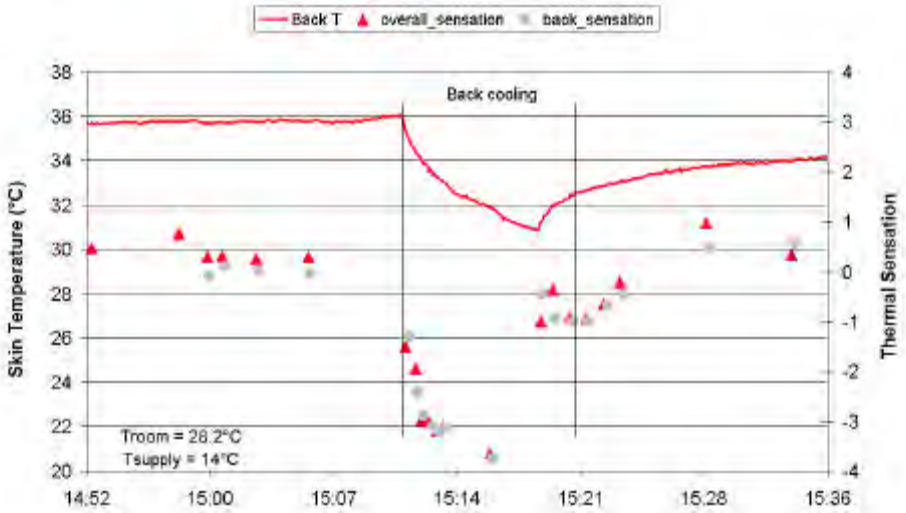

Bild 4:
Zeitlicher Verlauf des Gesamtempfindens und des thermischen Empfindens am Rücken bei kurzzeitiger Abkühlung der Haut am Rücken [22].

2.4.4 Zusammenhänge zwischen globalem und lokalem Komfortempfinden

Ausgehend von dem ursprünglichen Wunsch aus Messungen des Raumklimas auf das thermische Empfinden der Insassen schließen zu können, anstatt jedes Mal Personen zu befragen, entstand dann vor allem im Zusammenhang mit Klimaanlagen das Bedürfnis, lokales Empfinden an verschiedenen Körperteilen zu erfassen. Nachdem dafür lokale Messungen und Befragungen zum lokalen Empfinden durchgeführt und dazu entsprechende Korrelationen gebildet wurden, ergab sich nun umgekehrt das Bedürfnis, aus der Kenntnis des lokalen Empfindens eine Aussage zum zu erwartenden globalen thermischen Empfinden ableiten zu können. Globales Empfinden bedeutet hierbei, dass der Insasse eine Einschätzung darüber abgibt, wie er sich insgesamt fühlt, z.B. „mir ist kalt“, „mir ist warm“, usw. Interessanterweise beruhen die zu dieser Thematik bisher dargestellten Ansätze darauf, dass das globale Empfinden nicht nur aus Messungen der lokalen physikalischen Randbedingungen erfolgen soll, sondern versucht wurde, das globale thermische Empfinden aus Befragungen zu einzelnen Körperteilen durch mathematische Algorithmen zu berechnen, und mit den Ergebnissen der Befragung zu korrelieren. Foda et al. (2011) [24] kommen in ihrem Überblick über verschiedene solcher mathematischer Modelle zu dem Schluss, dass die Abweichung dieser Modelle im Mittel bei 1 Skaleneinheit (von insgesamt 7) liegt.

In der Vergangenheit wurden zur Ermittlung des globalen thermischen Komforts zunächst Mittelwertbildungen durch einfache Wichtungen der verschiedenen Körperteile vorgenommen, wobei dann unterschiedliche Experimente auch unterschiedliche Wichtungsfaktoren ergaben. Das Problem bei all diesen Verfahren ist, dass eine Bestimmung des Gesamtempfindens immer schwieriger wird, je inhomogener die Klimasituation ist und natürlich auch noch von den persönlichen Randbedingungen Aktivität und lokaler Bekleidung abhängt. Erste Ansätze hierzu wurden 1994 in einem vom FAT beauftragten Forschungsprojekt „Einfluss der Sonneneinstrahlung auf die thermische Behaglichkeit in Kraftfahrzeugen" [5] herausgearbeitet, in dem in einer Vielzahl von Versuchsreihen Zusammenhänge zwischen lokaler Äquivalenttemperatur und lokalem thermischen Empfinden von Versuchspersonen herausgearbeitet wurden. Dabei erwies es sich als zielführend, den Zusammenhang zwischen dem lokalen Empfinden und dem Gesamtempfinden unterschiedlich auf Warm- und Kaltbereich zu beziehen. So zeigte es sich, dass die Bewertung eines kalt empfundenen Körperteils sich in einer ähnlich kalt wiedergegebenen Bewertung des Gesamtempfindens wiederspiegelt. Im Warmbereich, in dem alle Körperteile als wenigstens neutral oder wärmer bezeichnet wurden, der Mittelwert über die Bewertungen der als am wärmsten empfundenen Körperteile der Bewertung des Gesamtempfindens weitgehend entsprach. Physiologisch ist dies dadurch erklärbar, dass das unangenehme Kaltempfinden dezentral über Thermorezeptoren in der Haut wahrgenommen wird, das Warmempfinden, bis hin zum Schwitzen, über Thermorezeptoren im Stammhirn (Hypothalamus, insula cortex) erfolgt. Das Erwärmen des Stammhirns erfolgt dabei wesentlich über den Brutkreislauf.

Aktuelle Forschungsansätze zum Zusammenhang zwischen lokalem und globalem Empfinden sind zwar in geringer Zahl vorhanden und wurden erst wieder in den letzten zehn Jahren durchgeführt, liefern aber ähnliche Ergebnisse – wie beispielsweise die Studien [23], [25], [26].

In [23] werden zwei Regeln für die Ableitung des thermischen Gesamtkomforts abgeleitet:

Regel 1: der thermische Gesamtkomfort ist der Mittelwert der lokalen thermischen Bewertungen, sofern nicht Regel 2 greift

Regel 2: der thermische Gesamtkomfort ist der Mittelwert aus den beiden kleinsten und der größten lokalen Bewertung wenn eine der folgenden Bedingungen gilt:
a) die zweit kleinste Bewertung ist > -2,5
b) die Probanden können ihre thermische Umgebung zu einem gewissen Grad kontrollieren oder die thermischen Bedingungen sind transient.

Im Komfortmodell von [26] wird der globale thermische Komfort als gewichteter Mittelwert aus den lokalen Bewertungen berechnet, wobei die Wichtungsfaktoren anhand von Versuchsdaten mit 290 Probanden ermittelt wurden.

Hierbei stellt sich heraus, dass auf den thermischen Diskomfort im Wesentlichen die Bewertungen von Kopf, Schultern und Beinen einen Einfluss haben, während der thermische Komfort im positiven Sinne hauptsächlich von den Bewertungen an Kopf, Schultern, Becken und Füßen determiniert wird.

In der Veröffentlichung [25] wurde untersucht, inwiefern sich die lokale Bewertung des thermischen Komforts an unterschiedlichen Körperteilen unterscheidet bzw. zu Körperregionen zusammenfassen lässt um eine Aussage über den globalen Komfort treffen zu können. Hierbei konnten die Bewertungen auf drei Körperregionen – Kopf/Nacken, Oberkörper/Arme und Beine/Füße – reduziert werden, wobei diese den globalen thermischen Komfort unterschiedlich beeinflussen. Während in zu warmen Bedingungen die lokale thermische Bewertung im Kopfbereich den thermischen Gesamtkomfort determiniert, ist dieser bei neutralen Bedingungen durch die unteren Extremitäten und bei zu kalten Bedingungen zusätzlich durch den Oberkörper beeinflusst.

2.5 Schlussfolgerungen

Aus dem Überblick über etablierte Klimasummenmaße für die Bewertung des Fahrzeugklimas insbesondere zum Vergleich verschiedener Fahrzeuge bzw. Fahrzeugtypen wurde in Diskussion mit den im FAT-Arbeitskreis 5 "Klimatisierung" vertretenen Herstellern die Äquivalenttemperatur identifiziert. Diese vereint die für die thermische Behaglichkeit mit der Umgebung maßgebenden physikalischen Größen, so dass geeignete Sensorik hierfür im weiteren Vorgehen im Fokus stand.

Eine geeignete Größe für die Bewertung der thermischen Behaglichkeit von Oberflächen berührenden Körperteilen konnte nicht identifiziert werden, so dass mögliche Sensorkonzepte hierfür diskutiert wurden.

3 Erarbeitung eines Sensorkonzeptes für die Fahrzeugklimamessung und Überblick über den Stand der Technik

Für das Sensorkonzept zum Vergleich von Fahrzeugklimata wurden sowohl Sensoren zur Messung der für die thermische Behaglichkeit relevanten Einzelgrößen zusammengetragen, als auch Möglichkeiten zur Messung von Klimasummengrößen – insbesondere der Äquivalenttemperatur – recherchiert. Hierbei wurden auch die von einigen Herstellern vertraulich zur Verfügung gestellten Informationen über bisherige Messmethoden bzw. bestehende Anforderungen einbezogen. Diese wurden bei der Ableitung des Sensorkonzeptes ohne Bezug auf die einzelnen Firmen mit berücksichtigt.

3.1 Erfassung diskreter physikalischer Größen

Bei den bisherigen Messungen des Fahrzeugklimas im Hinblick auf thermischen Komfort werden von den Anwendern in der Regel diskrete physikalische Größen erfasst und die Wirkung auf die thermische Behaglichkeit von Versuchsingenieuren beurteilt. Eine übergreifende, allgemeingültige gemeinsame Beurteilung durch verschiedene Anwender ist kaum möglich. In der Regel werden folgende diskreten Größen erfasst:

- Lufttemperatur
- Luftgeschwindigkeit (evtl. mit Turbulenzgrad)
- Wärmeeinstrahlung (direkt, indirekt)
- Luftfeuchte (beim thermischen Komfort in der Regel nur im Schwülebereich wichtig)

Der Vorteil dieses Konzepts, mit einzelnen Sensoren die verschiedenen physikalischen Größen zu erfassen liegt darin, dass die Ausrüstung in der Regel vorhanden bzw. leicht beschaffbar und im Kfz prinzipiell anwendbar ist. Eine Übertragung der Messwerte auf das Gesamtempfinden über die PMV Skala ist nur in homogenen Situationen möglich. Als Nachteil ist anzusehen, dass der Einfluss der gegenseitigen Kompensation bzw. Verstärkung der einzelnen Größen schwierig bestimmbar ist, die Messung der Strahlungskomponenten große Sorgfalt erfordert und keine Erkenntnisse der Vielzahl der Messergebnis-Kombinationen auf die lokale Wirkung bekannt sind. Eine gerichtete Messung erfordert hierbei spezielle Messwertaufnehmer und der Aufwand für gleichzeitige lokale Messungen wächst mit Anzahl der Messstellen um mindestens den Faktor 3, bei der Erfassung der drei typischen erforderlichen Messgrößen. Aufgrund der großen Inhomogenitäten im Fahrzeug, im Gegensatz zu Gebäuden, ist eine Vielzahl von Messpunkten erforderlich, die wegen der transienten Zustände auch gleichzeitig zu erfassen sind. Die Messrate sollte dabei in der Dimension von 1-10 Hz liegen. Für die Ermittlung des Turbulenzgrades sind 5 Hz

erforderlich, 20 Hz werden empfohlen, wobei die Luftgeschwindigkeit über einen Zeitraum von 3 min gemessen werden soll.

Zur Messung der genannten Größen sind auf den Markt die verschiedensten Sensoren und Datenerfassungsgeräte erhältlich. Dementsprechend groß ist bisher die Vielzahl bei den unterschiedlichen Anwendern. Abhilfe soll deshalb in diesem Projekt geschaffen werden, indem einige wenige, im Automobilbereich am besten geeigneten Messsysteme aus der Fülle der am Markt befindlichen Angebote hier vorgestellt werden. Damit können sich die Hersteller, z.B. im FAT-Arbeitskreis, in Zukunft auf gleiche Systeme einigen und ihre gewonnenen Ergebnisse schließlich besser vergleichen.

3.1.1 Ausgewählte Mess-Systeme

Als geeignete Mess-Systeme stellten sich Produkte wie z.B. die der Anbieter LumaSense und Ahlborn heraus, diese sind im Folgenden kurz dargestellt. Ergänzend werden einige weitere Systeme und Produkte dargestellt, die den Ansprüchen aber nur in Einzelfällen genügen werden.

System LumaSense Innova 1221

Dieses Mess-System erlaubt die Messung von

- Lufttemperatur
- Strahlungstemperatur (gleichzeitig zwei Halbräume)
- Luftgeschwindigkeit (omnidirektional)
- Oberflächentemperatur
- Luftfeuchte

Mit einem speziellen Sensor ist es auch möglich die Operativtemperatur sowie eine Äquivalenttemperatur zu messen, die aber nicht exakt der in DIN EN ISO 14505-2 [8] definierten entspricht. Bild 5 zeigt eine Ansicht des Datenloggers und der dazu erhältlichen Sensorik.

Bild 5:
Ansicht der LumaSense Innova 1221 Messeinrichtung mit den zugehörigen Sensoren.

Das System ist speziell darauf ausgerichtet, Messungen entsprechend der DIN EN ISO 7730 [1] und der Ermittlung von PMV unter weitgehend homogenen uns stationären Bedingungen durchzuführen. Unter Einbeziehung aller Sensoren können folgende Komfort- und Hitzestress-Indikatoren berechnet werden:

- Predicted Mean Vote (PMV)
- Percentage of dissatisfaction (PPD)
- Draught rating
- Turbulence intensity
- Optimal operative temperature
- Equivalent temperature
- Effective temperature
- Required sweat rate
- Wet bulb globe temperature

Der Aufbau des Temperatursensors ist in Bild 6 dargestellt. Als einer der wenigen Lufttemperatursensoren ist dieser in strahlungsgeschützter Ausführung erhältlich.

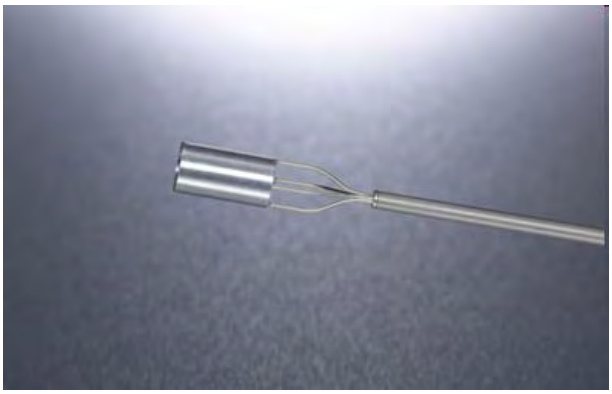

Bild 6:
Lumasense Lufttemperatursensor INNOVA MM0034 in strahlungsgeschützter Ausführung.

Der eigentliche Sensor besteht aus einem PT 100. Die technischen Daten lauten:

Messbereich: –20 bis 50 °C

Ansprechzeit: 20 s bei 50% Änderung, 50 s bei 90% und ruhender Luft

Genauigkeit: 5 bis 40 °C : ±0.2°C | –20 bis 50 °C: ±0.5 °C

Als Besonderheit ist der Wärmestrahlungssensor anzusehen, der gleichzeitig beide Halbräume getrennt erfassen kann. Bild 7 zeigt ein Foto des Sensors, Bild 8 die schematische Darstellung dazu.

Bild 7:
Foto des Lumasense Strahlungssensors INNOVA MM0036 zur zeitgleichen Erfassung beider Halbräume.

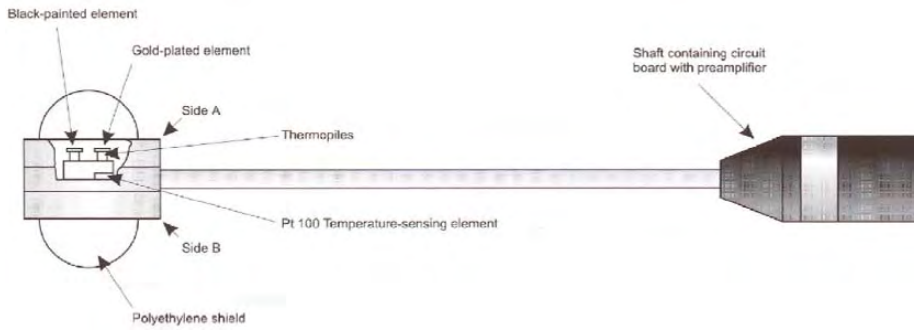

Bild 8:
Schematische Darstellung des Lumasense Strahlungssensors INNOVA MM0036.

Als technische Daten ist angegeben:

Messbereich: Umgebungstemperatur ±50 °C

Ansprechzeit: 15 s bei 50% Änderung, 60 s bei 90% Änderung

Arbeitsbereich: 5 °C ≤ Lufttemperatur ≤ 40 °C

Der INNOVA Luftgeschwindigkeitssensor (Bild 9) ist als omnidirektionaler Sensor ausgeführt, der weitgehend gleich auf Luftgeschwindigkeiten aus allen Richtungen reagiert.

Bild 9:
Luftgeschwindigkeitssensor INNOVA MM0038.

Der Sensor ermöglicht neben der Messung der reinen Luftgeschwindigkeit auch eine Messung des Turbulenzgrades und der Erfassung des Zugluftrisikos nach DIN EN ISO 7730 [1]. Der Aufbau des Sensors ist schematisch in Bild 10 dargestellt.

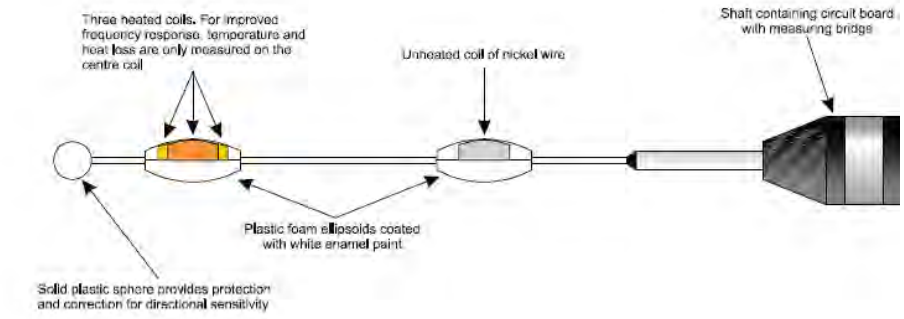

Bild 10:
Schematischer Aufbau des Luftgeschwindigkeitssensors INNOVA MM0038.

Die Luftfeuchtemessung erfolgt im Gegensatz zu den meisten Luftfeuchtesensoren hier nicht kapazitiv, sondern mit einem miniaturisierten Taupunkt-Spiegel, der im Sondenkopf des Sensors INNOVA MM0037 untergebracht ist. Bild 11 zeigt ein Foto des Sensors, Bild 12schematisch den Aufbau.

Bild 11:
Ansicht des Luftfeuchtesensors INNOVA MM0037.

Die angegebenen technischen Daten lauten:

Taupunkt-Messbereich: $t_a - t_d < 25$ °C
(mit t_a als Lufttemperatur und t_d als Taupunkttemperatur)

Genauigkeit:
$t_a - t_d < 10$ K: ±0.5 K oder ±0.05 kPa
$10K < t_a - t_d < 25$ K: ±1.0K oder ±0.1 kPa

Messzeit: typischerweise 1 Minute

Messintervall: 3 Minuten mit dem Datenerfassungsgerät 1221

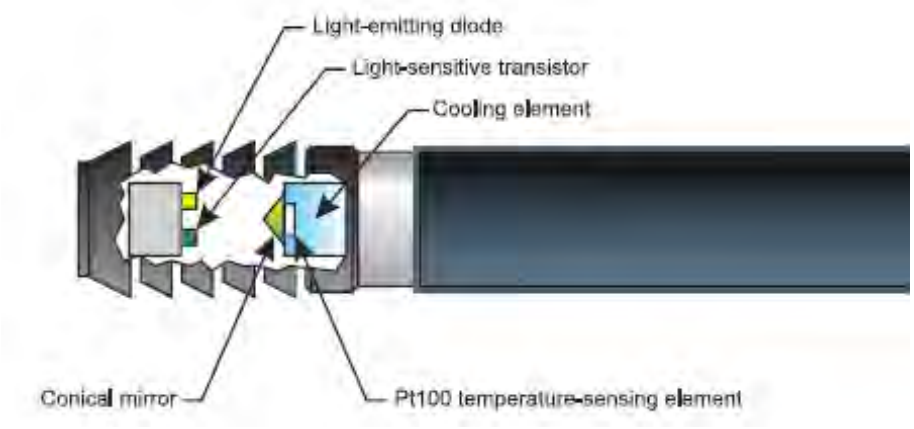

Bild 12:
Schematischer Aufbau des Luftfeuchtesensors INNOVA MM0037.

Zur Abrundung des Systems ist ein Temperatur-Taststab in PT100-Ausführung erhältlich, mit dem Oberflächentemperaturen gemessen werden können.
Bild 13 zeigt ein Foto des Sensors INNOVA MM0035, Bild 14 die schematische Ansicht.

Bild13:
Taststab INNOVA MM0035 zur Messung der Oberflächentemperatur.

Als technische Daten sind angegeben:

Messbereich: –20 bis 100 °C

Ansprechzeit in ruhender Luft: 2 s bei 50% Änderung, 7 s bei 90% Änderung

Genauigkeit: ±0.5 °C bei 5 bis 40 °C

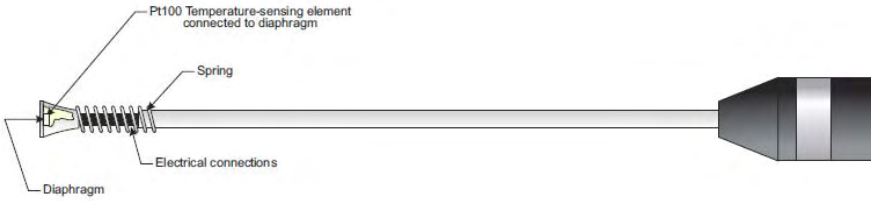

Bild 14:
Schematische Ansicht des Taststabs INNOVA MM0035.

Als Besonderheit gegenüber anderen Systemen ist zusätzlich ein Sensor zur Messung der Operativ-Temperatur erhältlich (INNOVA MM0060). Die Operativ-Temperatur ist hierbei definiert als gleichförmige Temperatur eines strahlungstechnisch schwarzen Raumes, in dem ein Insasse die gleiche Wärme durch Strahlung und Konvektion austauscht wie in der gerade gegebenen inhomogenen Umgebung. Die ovale Form des Sensors ist der Form des menschlichen Körpers nachempfunden und wird zur Messung in verschiedenen Lagen eingesetzt, entsprechend verschiedener Körperhaltungen von Menschen. Aus diesem Grund hat der Sensor 3 Orientierungen: vertikal, 30° aus der Vertikalen, und horizontal, entsprechend einer stehenden, sitzenden oder liegenden Position des Menschen. Bild 15 zeigt ein Foto des Sensors MM0060.

Bild 15:
Sensor INNOVA MM0060 zur Messung der Operativ-Temperatur.

Die technischen Daten zum Operativ-Sensor MM0060 lauten:

Messgenauigkeit und Messbereich: ±0.3 °C bei 5 bis 40 °C

Elektrischer Ausgang: PT100 Signal in 4-Leiter Schaltung

Ansprechzeit in ruhender Luft:1 min bei 50% Änderung, 10 min bei 90% Änderung

Zur Anbringung der verschiedenen Sensoren des INNOVA Systems ist ein der menschlichen Anatomie nachempfundener Halter erhältlich, der als FLATMAN bezeichnet wird. Dieser kann z.B. im Fahrzeug auf einem Sitz montiert werden und an dem an 10 verschiedenen Positionen Sensoren angebracht werden können. Bild 16 zeigt eine Ansicht des FLATMAN bei der Messung in einem Kraftfahrzeug, Bild 17 den kompletten mechanischen Aufbau.

Bild 16:
Ansicht des INNOVA FLATMAN bei der Messung in einem Fahrzeug.

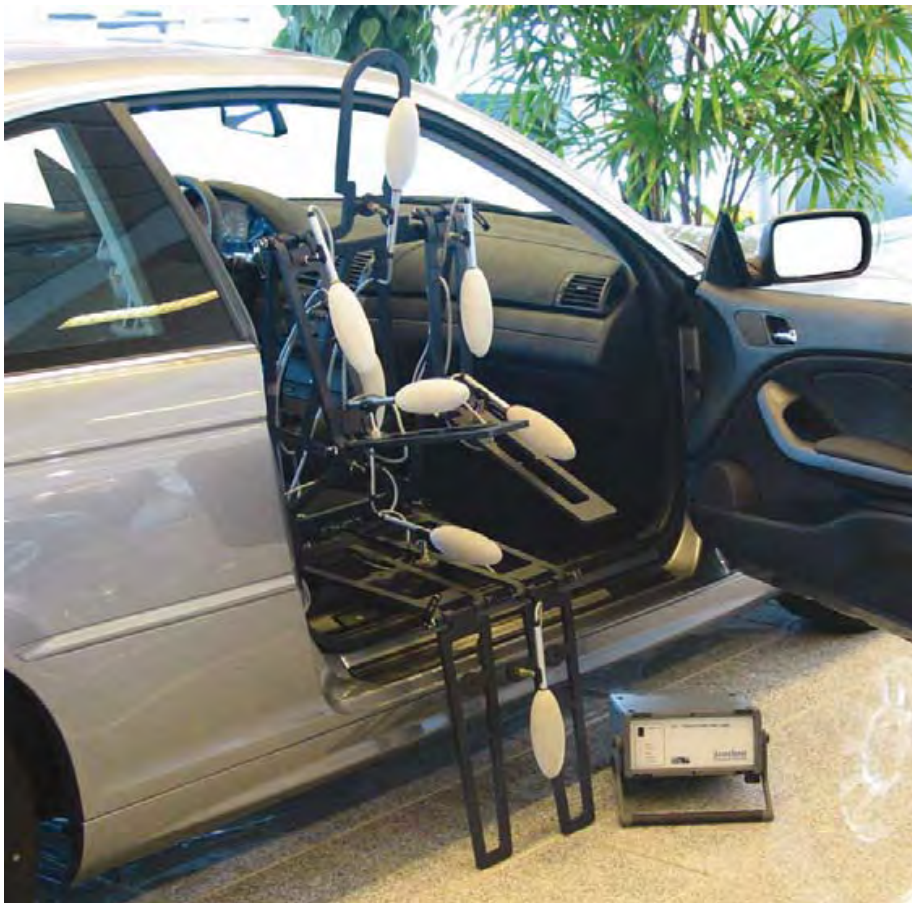

Bild 17:
Komplett-Ansicht des INNOVA FLATMAN.

Als Problematik im Bereich der lokal unterschiedlichen Randbedingungen im Kfz ist bei Nutzung des ursprünglich für Gebäudemessungen entwickelten INNOVA Systems anzuführen: Von den diskreten Größen können mit diesem System mit einem Datenlogger nur maximal 2 Messstellen mit den im Fahrzeug interessantesten Größen Lufttemperatur, Luftgeschwindigkeit und Strahlung gleichzeitig erfasst werden, für die operative Temperatur max. 8 Messstellen gleichzeitig (dafür keine weiteren Messgrößen zusätzlich). Ausschlaggebend hierfür ist, dass in das Datenerfassungsgerät INNOVA 1221 zwar maximal 4 Messmodule mit jeweils 3 Sensoranschlüssen eingeschoben werden können, die genannten im Fahrzeug interessantesten Größen jedoch auf zwei unterschiedliche Module verteilt sind. Bild 18 und Bild 19 sollen dies verdeutlichen.

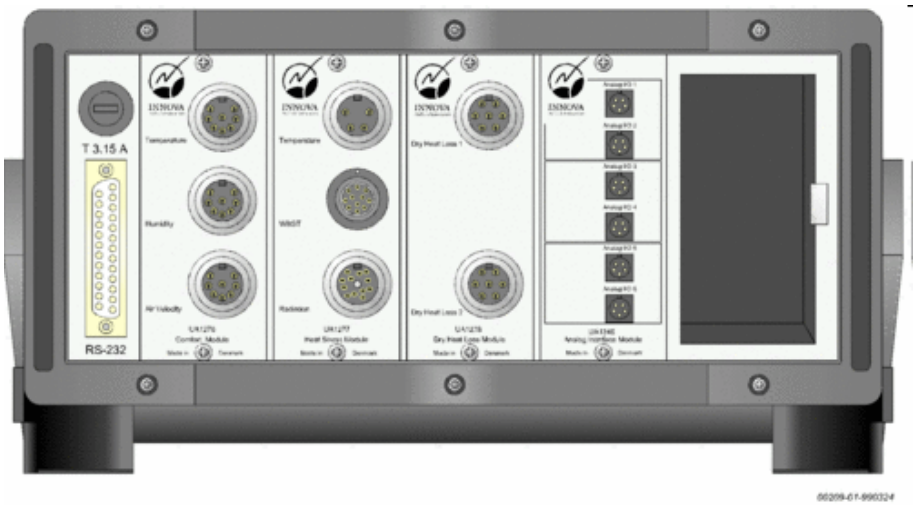

Bild 18:
Ansicht der Rückseite des Datenloggers INNOVA 1221 mit der Möglichkeit zum Einschieben von max. 4 Messmodulen.

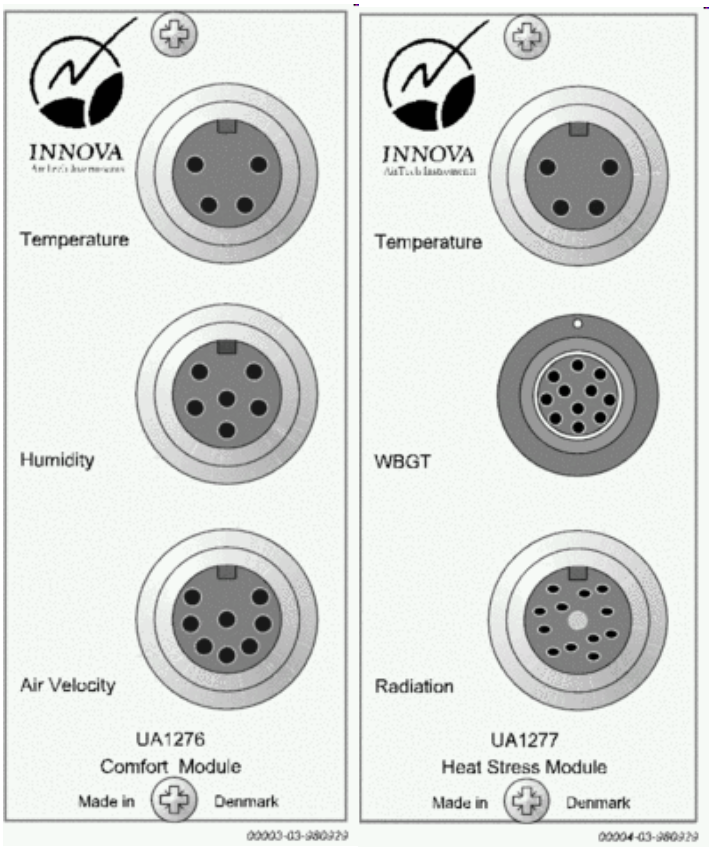

Bild 19:
Ansicht der beiden zur Messung von Lufttemperatur, Luftgeschwindigkeit und Strahlung notwendigen Module UA1276 und UA1277 für eine Messstelle.

System Ahlborn ALMEMO®

Das Messwerterfassungssystem ALMEMO® der Firma Ahlborn umfasst neben einem universellen Datenlogger eine Vielzahl von Sensoren für unterschiedlichste Messgrößen. Kennzeichen des Systems ist, dass die Spezifikationen für die unterschiedlichsten Sensoren in einer Elektronik im zugehörigen Stecker festgeschrieben sind. Bild 20 zeigt als Beispiel einen stationären sowie einen mobilen Datenlogger.

Bild 20:
Beispiele von Datenloggern im ALMEMO® Messsystem.

Die für die thermische Behaglichkeit wesentlichen Sensoren sind in der Regel in verschiedenen Ausführungen erhältlich, um speziellen Anforderungen gerecht werden zu können

Zur Messung der Luftgeschwindigkeit stehen neben Flügelradanemometern auch richtungsabhängige und richtungsunabhängige thermoelektrische Strömungssensoren zur Verfügung. Bild 21zeigt ein Beispiel eines omnidirektionalen Anemometers, das als FVA 605 TA in verschiedenen Geschwindigkeitsbereichen erhältlich ist.

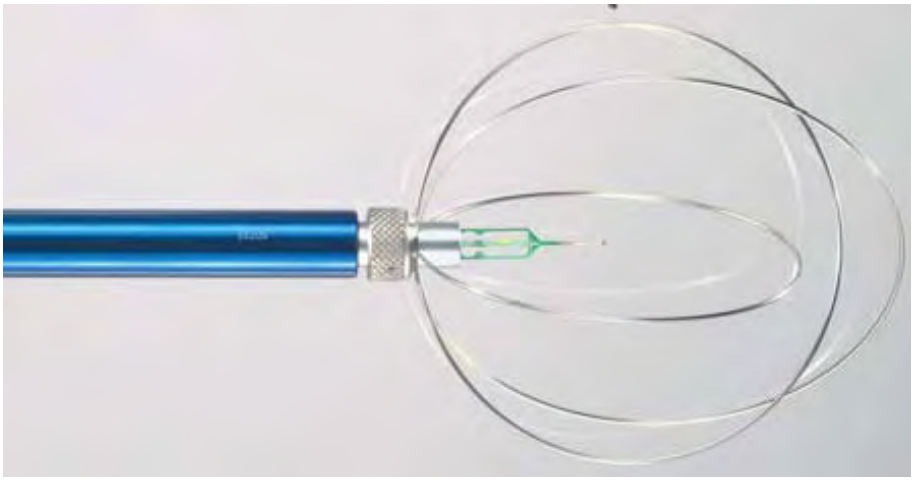

Bild 21:
Ansicht des thermoelektrischen Luftgeschwindigkeitssensors FVA 605 TA aus dem ALMEMO® System.

In der omnidirektionalen Ausführung gibt es für die Anwendung zum thermischen Komfort im Fahrzeug die Sensoren in zwei Geschwindigkeitsbereichen.

FV A605 TA1 (O): 0,01 bis 1 m/s

FV A605 TA5 (O): 0,15 bis 5 m/s

Die technischen Daten hierzu sind;

Auflösung:

FV A605 TA1 (O): 0,001 m/s

FV A605 TA5 (O): 0,01 m/s

Genauigkeit:

FV A605 TA1(O): ±1,0% vom Endwert und ±1,5% vom Messwert

FV A605 TA5(O): ±0,5% vom Endwert und ±1,5% vom Messwert

Zur Messung der Lufttemperatur bzw. Lufttemperatur und Feuchte als Kombifühler steht eine Vielzahl von Sensoren auf Thermoelement-, PT100-, oder NTC-Basis zur Verfügung. Interessant hierbei ist, dass Anschlussleitungen auch für extreme Temperaturen zur Verfügung stehen. Als Beispiel sollen hier ein PT100 Mantelfühler und ein Kombifühler für Feuchte und Temperatur vorgestellt werden. Bild 22zeigt die Ansicht eines PT100 Mantelfühlers, Bild 23 eines Kombifühlers.

Bild 22:
Ansicht eines PT100 Mantelfühlers aus dem ALMEMO®-System.

Die technischen Angaben des Mantelfühlers lauten:

Messelement: Pt100 4L, DIN Klasse B;

Optionen: DIN Klasse A, 1/5 DIN Klasse B

Einsatztemperatur –40 bis +160°C.

Standardkabel: 1,5 m Leitung Teflon/Silikon-isoliert,

Einsatztemperatur –50 bis +200°C.

ALMEMO® Stecker Pt100 ZA9030FS1 mit Auflösung 0,1 K

Option: Pt100 ZA9030FS2 mit Auflösung 0,01 K <
(Standard bei 1/5 DIN Klasse B).

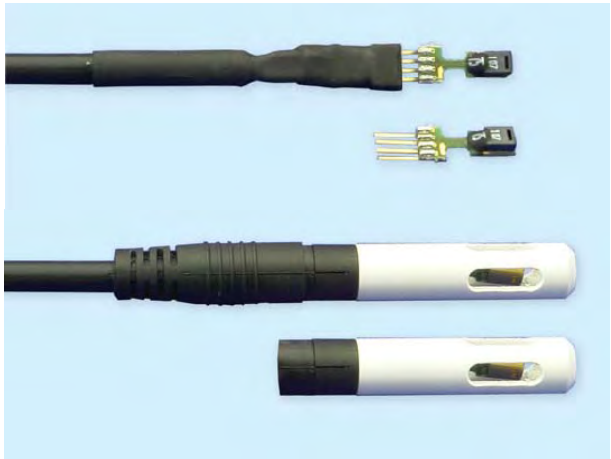

Bild 23:
Ansicht des Kombifühlers für Feuchte und Temperatur FHAD 46.Oben FHAD 460 als freiliegender Sensor für kürzeste Ansprechzeit, unten FHAD 462 in geschlitzter Fühlerkappe.

Die technischen Daten für den FHAD 46 lauten:

FHAD 460: -20.+80°C/ 5.98 % r.F.

FHAD 462: -20.+60°C/ 5.98 % r.F

Messdauer / Ausgabeperiode: ca. 3s

Genauigkeit: ±0,3 K bei 25°C, Reproduzierbarkeit: ±0,1 K

Der Einfluss der Sonneneinstrahlung kann mit einem Strahlungssensor erfasst werden. Bild 24zeigt eine Ansicht des Globalstrahlungs-Messkopfes FLA 623 GS. Der Messbereich erstreckt sich von 0 bis ca. 1300 W/m², Die Abmessungen lauten:

Höhe 29 mm, Durchmesser 33 mm

Bild 24:
Ansicht des ALMEMO® Globalstrahlungs-Messkopfes FLA 623 GS.

Der spektrale Messbereich ist aus 25 ersichtlich.

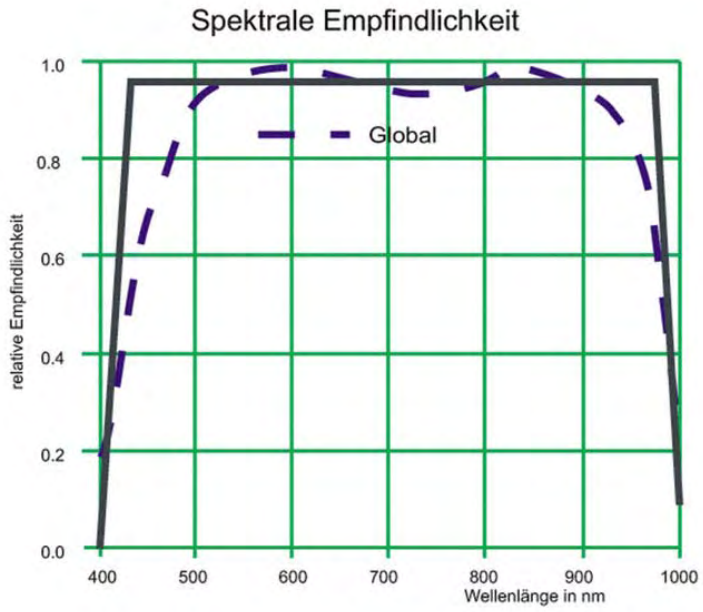

Bild 25:
Spektraler Messbereich des Globalstrahlungs-Messkopfes FLA 623 GS.

Zur Messung der thermischen Behaglichkeit steht eine besondere Mess-Sensorik zur Verfügung (vgl. Bild26).

Bild 26:
ALMEMO® - Mess-Sensorik zur Ermittlung der thermischen Behaglichkeit.

Diese Messanordnung ermöglicht die Messung aller physikalischer Parameter zur Beurteilung und Bewertung der thermischen Behaglichkeit. Aus der aufgenommenen Messreihe operativer Temperatur (Globe-Temperatur), Raumtemperatur, Raumluft-Strömung und Feuchtigkeit sowie aus den notwendigen Eingabeparametern wie Bekleidungsfaktor, Aktivitätsgrad und mechanischer Leistung ist ähnlich dem Innova-System der sich daraus ergebende PMV- und PPD-Wert nach DIN EN ISO 7730 [1] sowie der Turbulenzgrad nach DIN EN 13779

(früher DIN 1946 Teil 2) über die Software AMR WinControl mit Zusatzmodul Wärmekomfortmessung im Online- oder Offlinebetrieb berechenbar. Anzumerken ist, dass durch die vergleichsweise große thermische Masse des Globe-Thermometers schnelle zeitliche Strahlungsänderungen nur verzögert erfasst werden können. Wegen seiner großen Trägheit kann es folglich nicht zur Bestimmung der Strahlungstemperatur in einem Umgebungsklima eingesetzt werden, das sich schnell ändert. Im Allgemeinen ist davon auszugehen, dass die Einstellzeit je nach den physikalischen Eigenschaften der Kugel und der Art des Umgebungsklimas bei 20 min bis 30 min liegt

Zur Übertragung der Messdaten an einen PC stehen beim ALMEMO®-System verschiedene kabelgebundene und drahtlose Möglichkeiten zur Verfügung.

Zu den kabelgebundenen Möglichkeiten gehören:

- PC-Verbindung mit USB-Datenkabel ZA 1919 DKU
- RS232-Datenkabel Typ ZA 1909 DK5,
- USB – Konverterkabel ZB 1909 USB (Lichtleiter, galv. Trennung)

Für drahtlose Übertragungswege sind zu nennen:

- Bluetooth-USB-CPU-Modul ZA1719BCU
- GSM-Mobilfunk-MODEM ZA 1709 GSM
- Festnetz-Telekom-MODEM ZA 1709 MK2, ZB 1709 M2
- Drahtlose Datenverbindung für große Entfernungen Funkmodem ZB 1709 FM5

3.1.2 Alternative Mess-Systeme

System Dantec ComfortSense

Dieses System entstand ursprünglich aus einer Luftgeschwindigkeitsmessung und erlaubt mittlerweile auch die Messung von Lufttemperatur, Luftfeuchte und operativer Temperatur. Die Strahlung an sich kann mit diesem System nicht erfasst werden. Bild 27 zeigt eine Ansicht des Mess-Systems. Aus den mit dem System gemessenen Größen kann der PMV und PPD-Index nach DIN EN ISO 7730 [1] berechnet werden.

Bild 27:
Ansicht des Systems Dantec ComfortSense.

Ein einzelner Datenlogger besitzt 16 Eingänge, wobei mehrere Datenlogger aneinander gereiht werden können, bis zu maximal 96 Eingängen. Aufgrund fehlender Strahlungsmessmöglichkeiten wird dieses System für Kfz-Anwendungen weniger in die engere Wahl gezogen

System SKC

Das System SKC aus den USA erlaubt in einem kompakten Gerät die Messung von:

- Trocken- und Feuchtkugel – Temperatur
- Globe Temperatur
- Relativer Luftfeuchte
- Luftgeschwindigkeit
- WBGT index
- Hitze-Index/Humidex

Bild 28 zeigt eine Abbildung des Gerätes.

Bild28:
Ansicht des SKC-Systems QUESTemp° 36.

Das Gerät ist hauptsächlich für Einzelmessungen an Hitze-Arbeitsplätzen konzipiert und für Kfz-Messungen nur bei speziellen Hitze-Mess-Anforderungen geeignet.

System SMG/interlink®

Das System SMG/interlink® aus den USA erlaubt mit der Sonde 2300AHTS die gleichzeitige Messung von Lufttemperatur, Luftfeuchte und Luftgeschwindigkeit. Zusätzlich sind noch der Taupunkt und der Luftvolumenstrom bestimmbar. Bild 29 zeigt eine Ansicht des Sensors 2300AHTS.

Bild 29:
Ansicht des Dreifach-Sensors 2300AHTS zur Erfassung von Luftgeschwindigkeit, Temperatur und Feuchte.

Das Gerät findet seine Anwendung hauptsächlich bei Untersuchungen von Klimaanlagen. Messungen zur Wärme- bzw. Sonneneinstrahlung sind damit nicht möglich.

3.2 Erfassung der Äquivalenttemperatur

3.2.1 Einzelsensoren

Die Messung der Äquivalenttemperatur kann sowohl mit speziellen Einzelsensoren oder mit Klimamesspuppen erfolgen. Im Gegensatz zu vergangenen Jahren sind aktuell zur Erfassung der Äquivalenttemperatur entsprechend DIN EN ISO 14505-2 [8] kaum noch Einzelsensoren erhältlich, die eine Äquivalenttemperatur erfassen können. Aktuell sind überwiegend nur noch Klimamesspuppen erhältlich. Von den ursprünglich bekannten Einzelsensoren zur direkten Erfassung wird zurzeit nur noch das System DRESSMAN des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik weiterentwickelt. Bild 30 zeigt eine Ansicht dieses Systems in der ursprünglichen Ausführung. Die dort verwendeten Sensoren basieren auf einer mit konstanter Heizleistung beheizten planen Sensorfläche, deren resultierende Oberflächentemperatur von der Lufttemperatur, der Luftgeschwindigkeit und der Strahlung der Umschließungsflächen bzw. der Sonneneinstrahlung bestimmt wird. Daraus kann dann die lokale Äquivalenttemperatur für die entsprechende Körperstelle bestimmt werden.

Bild 30:
Ansicht des Messsystems DRESSMAN des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik.

Einzelsensoren zur Messung der Äquivalenttemperatur erlauben im Gegensatz zu nachfolgend beschriebenen Klimamesspuppen eine flexible Belegungsdichte von Sensoren an besonders interessierenden Körperteilen und reagieren in der Regel aufgrund ihrer geringeren thermischen Masse relativ rasch auf transiente Zustände.

Ellipsoide Sensoren zur Messung der ungerichteten Äquivalenttemperatur können als Option an das bereits vorgestellte System LumaSense Innova 1221 an-

geschlossen werden. Bild 31 zeigt eine Ansicht des dafür verwendeten Sensors MM0057

Bild 31:
Ansicht des Sensors MM0057 zur Messung der ungerichteten Äquivalenttemperatur mit dem System LumaSense Innova 1221.

Bei Verwendung von 4 Moduleinschüben UA1278 in den Datenlogger Innova 1221 können maximal 8 Sensoren betrieben werden, wobei eine zusätzliche externe 12 V Stromversorgung benötigt wird.

Mit den gleichen Sensoren arbeitet auch das System Comfort Meter des dänischen Herstellers PT-Teknik. Bei diesem System können mehrere, z.B. 10 Sensoren in Reihe über RS 485 über jeweils ein Interface direkt an einen Computer angeschlossen werden. Bild 32 zeigt die Komponenten des Systems.

Bild 32:
Ansicht des Systems Comfort Meter des dänischen Herstellers PT-Teknik zur Messung der ungerichteten Äquivalenttemperatur.

Die Messung der ungerichteten Äquivalenttemperatur hat ihren Ursprung in der Beurteilung von Räumen mit weitgehend homogenen Bedingungen. Bei den stark inhomogenen thermischen Bedingungen in Kraftfahrzeugen kann es zu deutlichen Verfälschungen kommen. So werden z. B. heiße Bedingungen von einer Seite und kalte von der anderen Seite gemittelt und können somit als durchaus akzeptabel angezeigt werden.

3.2.2 Klimamesspuppen

Klimamesspuppen erlauben eine komfortable Erfassung der Äquivalenttemperatur gleichzeitig an mehreren über den Körper verteilten Messstellen. Allerdings werden dabei häufig einzelne Körpersegmente insgesamt integriert, was bei räumlich eng begrenzten lokalen Randbedingungen (z.B. an den Armaturenbrettausströmern) zu Verfälschungen führen kann.

Thermal Mannequin Driver, Hersteller PT Teknik, Dänemark

Von den Klimamesspuppen zur Messung der Äquivalenttemperatur wird am geeignetsten die Messpuppe „Thermal Mannequin Driver“ des dänischen Herstellers PT Teknik, Denmark befunden, die speziell zum Sitzen in Kraftfahrzeugen vorgesehen ist. Bild 33 zeigt diese Messpuppe.

Bild 33:
Klimamesspuppe „Thermal Mannequin Driver“ des dänischen Herstellers PT Teknik [Quelle: http://pt-teknik.dk/driver].

Die Messpuppe wird durch Heiz- und Temperaturmessdrähte direkt unter der Oberfläche der einzelnen Messzonen betrieben. Die Messzonen entsprechen den einzelnen Körperteilen, bzw. einzelnen Segmenten. Dadurch ergibt sich ein Mittelwert über jede Messzone. Die Lage und Anzahl der Messzonen kann bei der Beauftragung weitgehend frei gewählt werden, ist danach aber nicht mehr änderbar.

Die Messpuppe kann zum leichteren Transport in zwei Teile geteilt und in vier Betriebsmodi genutzt werden:

- Beheizung auf eine bestimmte Temperatur
- Beheizung mit festem Wärmestrom
- Temperatur folgt der Komfort-Gleichung
- Ohne Beheizung zur Messung der operativen Temperatur

Aufgrund der Betriebsweisen konstanter Wärmestrom oder konstante Temperatur kann die Messpuppe zur Messung der segmentiellen Äquivalenttemperatur oder der Äquivalenttemperatur für den ganzen Körper kalibriert werden.

Die Messpuppe benötigt als Stromversorgung 100/240 V Netzspannung, alternativ 15 V bis 28 V Gleichspannung. Der Wärmestrom ist zwischen 0 und 200 W/m² einstellbar, bzw. im Konstant-Temperatur-Modus zwischen 18 °C bis 42 °C. Das Gewicht liegt bei 20 kg. Der Körper kann als Mann mit einer Größe von 175 cm oder als Frau mit einer Größe von168 cm gewählt werden.

Automotive HVAC Manikin, Measurement Technology Northwest, Seattle

Die Messpuppe Automotive HVAC Manikin besitzt eine Vielzahl von Einzelsensoren, die an definierten Punkten über die Oberfläche verteilt sind (vgl. Bild34). Erfasst werden die Lufttemperatur, die Luftgeschwindigkeit, die relative Luftfeuchte und der Strahlungswärmestrom.

Bild 34:
Ansicht der Messpuppe Automotive HVAC Manikin des Herstellers Measurement Technology Northwest, Seattle.

Die Messpuppe wurde speziell für den Kfz-Einsatz entwickelt (Bild35), und ist in zwei Teile zerlegbar zur leichteren Anbringung auf dem Fahrzeugsitz. Als Spezifikationen sind angegeben:

Lufttemperatur: -20 °C bis 70 °C

Luftgeschwindigkeit: 0,1 bis 5,0 m/s

Strahlung: 0 bis 3000 W/m² bei einer Wellenlänge zwischen 1 – 20 µm

Relative Luftfeuchte: 0 bis 95 %, nicht kondensierend

Der Körper kann zwischen den Größen westlich (178,5 cm) und asiatisch (168,5 cm) gewählt werden. Das Gewicht beträgt 22kg, die Oberfläche ca. 1,8 m².

Eine Messung der Äquivalenttemperatur nach DIN EN ISO 14505-2 erfolgt nicht.

Bild 35:
Ansicht zweier Messpuppen Automotive HVAC Manikin beim Einsatz in einem Fahrzeug.

3.2.3 Schwitzende Messpuppen

Zur Abrundung des Themas soll noch kurz auf schwitzende Messpuppen eingegangen werden, die hauptsächlich für Messungen an der Bekleidung oder an Sitzen entwickelt wurden.

NEWTON – Sweating Thermal Manikin, Measurement Technology Northwest, Seattle

Diese Messpuppe besteht aus einem Kohlefaser-Epoxidharz-Körper, dessen einzelne Körperteile beweglich miteinander verbunden sind. Die Puppe ist in verschiedenen Ausführungen mit 20 bis 36 Zonen erhältlich. Die Flüssigkeitsabgabe ist computergesteuert einstellbar. Als Option ist ein Teststand erhältlich, mit der die Puppe mit einem Motor Bewegung simulieren kann. Als weitere Option kann die Messpuppe mit einer Mund- und Nasenatmung ausgestattet werden. Bild 36 zeigt eine Ansicht der Messpuppe NEWTON.

Bild 36:
Ansicht der schwitzenden Messpuppe NEWTON des Herstellers Measurement Technology Northwest, Seattle.

SAM Sweating Agile thermal Manikin, Hersteller EMPA ETH Zürich

Bei SAM handelt es sich um eine anatomisch geformte Puppe mit den Abmessungen eines männlichen Erwachsenen. SAM simuliert Hitzeverlust, Schweißproduktion und realistische Bewegungen des menschlichen Körpers. Auf einem inneren Skelettaufbau, über den SAM an einer Wägevorrichtung aufgehängt ist, sind 26 Schalenteile aufgesetzt, die einzeln geheizt und mit Temperaturfühlern bestückt sind. Dadurch kann die Hautoberfläche auf konstante Temperatur oder konstante Heizleistung geregelt werden. Bild 37 zeigt eine Ansicht der Messpuppe SAM.

Bild 37:
Ansicht der schwitzenden Messpuppe SAM des Herstellers EMPA ETH Zürich.

STAN Seat Test Automotive Manikin, Measurement Technology Northwest, Seattle

Bei der Messeinrichtung STAN handelt es sich um eine Vorrichtung zur Messung der Feuchtetransporteigenschaften eines Sitzes. Bild 38 zeigt ein Foto dieser Vorrichtung.

Bild 38:
Ansicht der Messeinrichtung STAN des Herstellers Measurement Technology Northwest, Seattle.

Die Messeinrichtung STAN besitzt sechs temperaturgeregelte Segmente zur Messung des Wärmeflusses. Die Feuchtigkeitsproduktion erfolgt durch poröses Metall, wobei die Feuchtigkeitsmenge über einen Computer eingestellt werden kann.

3.3 Vergleichende Übersicht zwischen den Systemen

In der folgenden Tabelle ist in einer vergleichenden Übersicht dargestellt, ob und auf welche Art mit den einzelnen Systemen Äquivalenttemperaturen ermittelt werden können.

Tabelle 3:
Messmöglichkeiten der Äquivalenttemperatur mit den verschiedenen genannten Systemen.

System, Gerät	**Äquivalenttemperatur messbar**	**Bemerkungen**
Lumasense Innova 1221 für diskrete Messgrößen	nein	
Lumasense Innova mit Sensor MM0057	ja	Nur ungerichtete Äquivalenttemperatur
Ahlborn Almemo für diskrete Messgrößen	nein	
Dantec ComfortSense	nein	
SKC QUESTemp	nein	
SMG/interlink 2300AHTS	nein	
DRESSMAN	ja	Einzelsensoren für diskrete Größen auf Oberfläche der Puppe befestigt, Nachfolgemodell wird 2013 erwartet
PT-Teknik Comfort Meter	ja	Nur ungerichtete Äquivalenttemperatur
PT-Teknik Thermal Manikin Driver	ja	Segmentelle Äquivalenttemperatur
Measurement Technology Nortwest; Automotive HVAC Manikin	nein	Einzelsensoren für diskrete Größen auf Oberfläche der Puppe befestigt
Measurement Technology Nortwest; Newton	nein	schwitzfähig
EMPA Zürich; SAM	nein	schwitzfähig

System, Gerät	Äquivalenttem-peratur messbar	Bemerkungen
Measurement Technology Nortwest; STAN	nein	schwitzfähig, speziell für Sitze

3.4 Wärmeaustausch über Kontaktflächen

Mit den bisher beschriebenen Messmöglichkeiten können Wärmeübergänge über Kontaktflächen nur zum Teil erfasst werden. Am besten geeignet wären hierbei Klimamesspuppen, falls die Messsegmente genau den Kontaktflächen entsprechen. Messungen an z.B. beheizten Lenkrädern können damit allerdings nicht durchgeführt werden.

Als momentan beste Methode zur Messung an beheizten Lenkrädern sind herkömmliche Wärmestromsensoren zu nennen, die allerdings in einer hoch flexiblen Ausführung notwendig sind. Als am geeignetsten gelten die Sensoren der Firma RdF (USA), die als flexible Folien-Wärmestrommesser unter dem Namen Micro-Foil Heatflux Sensors in verschiedenen Ausführungen vertrieben werden. Ein Beispiel zeigt Bild 39.

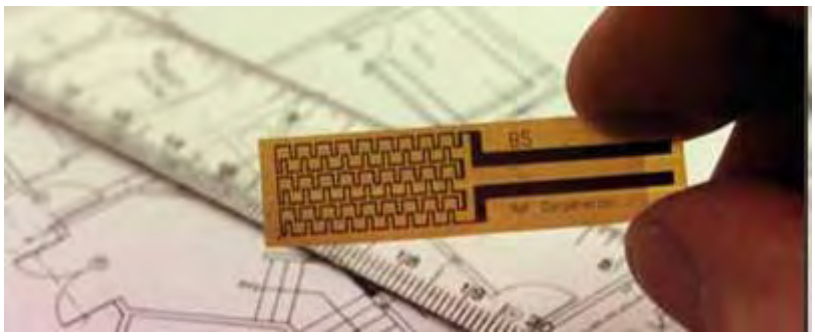

Bild 39:
Ansicht eines Micro-Foil Heatflux Sensors.

Als Nachteil ist anzusehen, dass bei dieser Methode ein beheizter „Gegenkörper“ für Anwendung am Lenkrad oder als Ersatz für den auf dem Sitz befindlichen Menschen nicht kommerziell erhältlich ist, so dass die Messmethode in dieser Form nur mit einer Versuchsperson möglich ist.

4 Diskussion der Ergebnisse zur Festlegung des zu verfolgenden Verfahrens und der weiteren Vorgehensweise

4.1 Diskussion der verschiedenen Verfahren zur Messung der thermischen Behaglichkeit in Fahrzeugen

Zur Festlegung geeigneter Verfahren zur Messung der thermischen Behaglichkeit in Fahrzeugen wurde während des Projektfortschritts auch eine Befragung der FAT-Arbeitskreismitglieder durchgeführt, welche Messmethoden (Geräte und Hersteller) bei den einzelnen Mitgliedern bereits benutzt werden, bzw. welche Anforderungen bei der Erfassung des thermischen Komforts bestehen.

Die daraus gewonnenen Erkenntnisse sind im Folgenden ohne Bezug zu den Arbeitskreismitgliedern stichwortartig dargestellt.

Verwendete Mess-Systeme

Messpuppen:

- Messpuppe mit Temperatur- und Geschwindigkeitssensoren, bzw. Klima-Messpuppe mit Kombi-Sensoren für Temperatur, Geschwindigkeit und Strahlung an der Oberfläche; in der Regel Eigenentwicklungen
- Im Sitzbereich: Feuchte und Temperatursensoren bzw. Schwitzdummy.

Einzelsensoren:

- Temperatur und Feuchtesensoren von Fa. Vaisalla
- Wind- und Temperatursensoren von Fa. Dantec
- Strahlungssensoren (abgeleitet aus IR-Sensoren) von Fa. HL-Planar
- Lufttemperaturen mit IPETRONIC in Verbindung mit DIADEM
- Feuchtkugel, Drucksensoren für Volumenströme

Sonstige genannte Ausrüstung:

Dewetronmodule, Ipetronik-Module, Sorcus Argus (Tätigkeit eingestellt).

Anforderungen

a) Vergleichbare Bestimmung von Gesamtempfinden, wie auch lokales thermisches Empfinden stationär und instationär, basierend auf dem gesamten thermalen Haushalt (Konvektion, Leitung, Strahlung)

b) Ermittlung des lokalen und des Gesamtempfindens mittels subjektiver Bewertung

c) Vergleichbare Definition der Messstellen

d) Auslegung neuer Fahrzeuge: Wie weit kann man den heutigen Komfortstandard für neue E-Fahrzeug Konzepte reduzieren?

e) Erfassung der Solarstrahlung (Transmission)

f) Primär Darstellung des instationären Verhaltens (Aufheiz-, Abkühlverhalten), sekundär des stationären Verhaltens (Beharrungskühlen)

g) Bestimmung von Wirkungsgrad, Leistung und Zeitverlauf, Heizleistung, Aufheizverhalten, Frontscheibenenteisung

Erfahrungen

Als Erfahrungen mit dem Mess-System Flatman wurde angegeben

„Es ist bisher nicht gelungen die Messungen mit diesem Gerät in ausreichender Weise zu subjektiven Beurteilungen zu korrelieren. Es gibt für den Einsatz dieses Geräts Einschränkungen, die in vielen Fällen aussagekräftige Messungen im Fahrzeug nicht zulassen. Der Thermodummy kann die praktische Entwicklung nur in Einzelfällen ergänzen."

Ergebnis der Diskussionen mit dem FAT-Arbeitskreis

Soweit möglich, wurden bei den Vorschlägen für die Messverfahren die aus dem Arbeitskreis gewonnenen Erkenntnisse mit berücksichtigt. Als zentraler Punkt ergab sich aus den Diskussionen mit dem FAT-Arbeitskreis, dass als standardisiertes Messverfahren nicht nur ein Verfahren entwickelt werden sollte, sondern stufenweise Möglichkeiten genannt werden, um eine gewisse Variabilität im erforderlichen finanziellen Aufwand zu ermöglichen.

Die im folgenden Abschnitt beschriebenen Vorschläge für zukünftige abgestimmte Mess-Verfahren wurden dabei vereinbart.

Insgesamt zeigte es sich, dass eine optimale Messmethode, die für alle Interessenten zu erschwinglichen Preisen und guter Vergleichbarkeit aktuell am Markt nicht erhältlich ist. Deshalb konnten abschließend noch keine Vereinbarungen zur Vorgehensweise für weiterführende Tests zur Anwendbarkeit in Kraftfahr-

zeugen getroffen werden. Befürwortet wurde eine Weiter- bzw. Neuentwicklung von Messsystemen, die den besonderen Ansprüchen zur Messung des thermischen Komforts im Vergleich herkömmlicher Fahrzeuge und Elektrofahrzeugen gerecht werden können. Daher wurde speziell dem Thema des Wärmeübergangs über Kontaktflächen breiterer Raum eingeräumt und dies als Vorschlag für weitere Untersuchungen angenommen.

4.2 Vergleichsverfahren zur herstellerübergreifenden Darstellung der thermischen Behaglichkeit in konventionellen und zukünftigen Automobilen

Für die Darlegung eines geeigneten Messverfahrens sind neben den technischen Erfordernissen auch die dafür anfallenden Kosten zu berücksichtigen. Deshalb werden im folgenden Messverfahren in drei Stufen angegeben, die einer aufsteigenden Kostenhierarchie unterliegen. Zusätzlich ist noch zu berücksichtigen, dass einerseits spezifische Messungen bei verschiedenen Anwendern durch Austausch von Messwerten auf gleicher Daten- und Messgerätegrundlage vergleichbar sein sollen. Andererseits soll die Messmethode gleichzeitig dafür geeignet sein, den Vergleich von herkömmlichen Fahrzeugen mit zukünftigen Fahrzeugen zu ermöglichen, aktuell z.B. mit Elektrofahrzeugen. Ausgehend von diesen Prämissen ergaben sich die folgenden drei Stufen.

1. Stufe:
Messung der diskreten physikalischen Größen

Im Bereich der Erfassung der thermischen Behaglichkeit existieren unterschiedliche Systeme die mehrere diskrete Größen erfassen könne, wie z.B. das System ALMEMO®, auf deren Vielseitigkeit und z.T. bereits bei den Fahrzeugherstellern vorhandene Verbreitung sollte geachtet werden. Die Kosten für die Erfassung von Lufttemperatur, Luftgeschwindigkeit und Strahlung liegen bei einem solchen System derzeit je nach Konfiguration in etwa zwischen 3 T€ und 9 T€ für bis zu 3 Messstellen. Diese Minimalkonfiguration der Messung von den genannten 3 Einzelgrößen ist zwar die preiswerteste, kann aber nur die technischen Randbedingungen vergleichend darstellen. Eine Äquivalenttemperatur nach DIN EN ISO 14505-2 [8] kann damit nicht gemessen werden. Aus den damit erfassbaren Messgrößen die zu erwartende thermische Behaglichkeit zu bestimmen ist schwierig. Insbesondere der Einfluss der Strahlungstemperatur hinsichtlich des thermischen Komforts kann häufig nur unzureichend abgebildet werden, sofern überhaupt Messgeräte mit einer nach ISO 7726 [14] ausreichenden Genauigkeit verfügbar sind (siehe auch [27]). Darüber hinaus ist zu bedenken, dass zwar unterschiedliche Messwerte der einzelnen physikalischen Größen bei z.B. zwei Messsituationen ähnliches thermisches Empfinden hervorrufen können, sich die Werte der einzelnen Größen aber insgesamt in ihrer Bewertung kompensieren können.

2. Stufe:
Direkte Messung der Äquivalenttemperatur mit Einzelsensoren

Favorisiert wurde ursprünglich die Messung der Äquivalenttemperatur mit flexibel anzubringenden Einzelsensoren. Diese sind jedoch aktuell nicht am Markt erhältlich. Eine Weiterentwicklung dieser Sensoren von Seiten der Industrie oder von Forschungseinrichtungen wird angestrebt. Die Kosten für ein derartiges zukünftiges Mess-System sollten in der Grundausstattung für eine Messstelle 25 T€ nicht wesentlich überschreiten. Bei diesem Messverfahren könnten sowohl die in DIN EN ISO 10505-2 angegebene gerichtete Äquivalenttemperatur als auch durch eine ausreichende Anzahl von Sensoren die ungerichtete oder segmentbezogene Äquivalenttemperatur bzw. die Äquivalenttemperatur für den ganzen Körper durch Mittelung gemessen werden

3. Stufe:
Direkte Messung der Äquivalenttemperatur mit Klimamesspuppen

Zur Messung der Äquivalenttemperatur mit Klimamesspuppen, wie z.B. der „Thermal Driver Manikin", sind nur wenige Systeme auf dem Markt erhältlich vorgeschlagen. Der Preis für eine derartige Klimamesspuppe beträgt ca. 85 T€ bis 100 T€, je nach Ausstattung. Damit kann die in DIN EN ISO 10505-2 angegebene segmentbezogene Äquivalenttemperatur bzw. die Äquivalenttemperatur für den ganzen Körper erfasst werden.

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

5.1 Grenzen der heutigen Verfahren zur Messung der thermischen Behaglichkeit in Fahrzeugen

Thermische Behaglichkeit wird von vielen Faktoren beeinflusst, sowohl von der Umgebung und der Konstitution des Fahrzeuginsassen, als auch durch die Erfahrungen und Erwartungen der bewertenden Person. Lediglich die Parameter der Umgebung können durch Messmethoden objektiv abgebildet werden. Unter der Annahme einer ausgeglichenen Wärmebilanz einer Person für komfortable Klimata können auch die wichtigen Parameter Bekleidung (entspricht einem thermischen Widerstand) und Aktivität (entspricht einer Wärmequelle) bei solchen Methoden einbezogen werden. Die letztlich interessierende Komfortbewertung, also die subjektiven Bewertung durch den Fahrzeuginsassen, kann jedoch nur anhand von Korrelationen der Bewertung verschiedener Klimata durch Probandenpanels in die Methode integriert werden.

Die maßgeblichen physikalischen Einflussgrößen auf die thermische Behaglichkeit, die Luft- und Strahlungstemperatur, Luftgeschwindigkeit und –turbulenz sowie die Luftfeuchte werden bislang im Wesentlichen durch die jeweils spezifische Messsensorik erfasst. Dies hat den Nachteil, dass eine sehr große Kombinationsvielfalt für die Korrelation mit Komfortbewertungen bei unterschiedlichen Aktivitäten und Bekleidungsgraden der Fahrzeuginsassen entsteht. Solche Korrelationen existieren jedoch nur für ausgewählte Fälle – häufig nur für homogene und stationäre thermische Randbedingungen und auch nicht für einzelne Körpersegmente, was für den Untersuchungsgegenstand einer Fahrgastzelle jedoch notwendig ist.

Um diese Vielfalt der Kombinationsmöglichkeiten einzuschränken wurden Klimasummenmaße erdacht, deren vielversprechendste und auch international für die Fahrzeugbewertung standardisierte die Äquivalenttemperatur ist. Für diese Größe existieren einige Messverfahren, die jedoch entweder nicht (mehr) am Markt verfügbar, unflexibel bzw. für lokale Auflösung oder Testfahrten nicht geeignet, oder sehr kostenintensiv sind.

Die Äquivalenttemperatur ist für inhomogene Klimata geeignet und kann mit einigen Messsystemen auch bezogen auf Körpersegmente bestimmt werden. Allerdings fehlen auch hier in den meisten Fällen die entsprechenden zuverlässigen Korrelationen mit Probandenbewertungen. Dies gilt insbesondere für sämtliche instationären Fälle, für die so gut wie keine Korrelationen zugänglich sind. Ebenfalls ist bei einigen Messsystemen keine ausreichend kleine Ansprechzeit bei sich schnell ändernden Umgebungsbedingungen vorhanden, denn je größer das Messsystem ist, desto langsamer reagiert es meistens. Vor allem für sogenannte Pull-down Szenarien sind die meisten Systeme wenig geeignet, nachdem die Verfahren im Wesentlichen auf beheizten Körpern beruhen.

Sowohl Systeme zur Bestimmung der Äquivalenttemperatur als auch Zusammenstellungen von Sensorik für die entsprechenden Einzelgrößen berücksichtigen lediglich zwei der drei Wärmeübertragungsmechanismen: Konvektion und Strahlung. Die Wärmeleitung wird hier nicht berücksichtigt. Dies findet seinen Ursprung in der Herkunft der thermischen Komfortbewertung aus dem Bauwesen, in welchem dieser Mechanismus für den Gesamtkomfort des Nutzers eine eher untergeordnete Rolle spielt. Dementsprechend ist er auch in den korrelierten Gesamtbewertungen, wie z.B. dem für stationäre und homogene Bedingungen verwendeten PMV, nicht berücksichtigt. In einer Fahrgastzelle steht der Nutzer jedoch mit vielen Fahrzeugteilen lokal in direktem Kontakt, wie z.B. Sitz und Lenkrad. Hierfür existieren aktuell weder Messverfahren, noch entsprechende Korrelationen mit Komfortbewertungen. Nachdem insbesondere körperberührende Klimatisierungssysteme für elektrische Fahrzeuge geeignet scheinen, ist für die Berücksichtigung der Wärmeleitung hinsichtlich des thermischen Komforts ein Mess- und Bewertungssystem, im besten Falle ähnlich zu dem der Äquivalenttemperatur, notwendig.

5.2 Entwicklungsschritte für eine zuverlässige und umfassende Messmethode zur Bewertung der thermischen Behaglichkeit in Fahrzeugen

Um eine zuverlässige und umfassende Messmethode bereitstellen zu können, die eine Bewertung der thermischen Behaglichkeit in Fahrzeugen gegenüber dem Fahrzeugraum sowie gegenüber berührten Flächen zulässt und für einen flexiblen Einsatz in Testszenarien geeignet ist, sind nach aktuellem Stand noch mehrere Entwicklungsschritte zu vollziehen. Für die Bewertung der thermischen Behaglichkeit gegenüber dem Fahrzeugraum existiert mit der Äquivalenttemperatur zwar eine geeignete Bewertungsgröße, allerdings ist es aufgrund der aktuellen Marktsituation notwendig die Messsensorik zunächst entsprechend weiterzuentwickeln. Für die entsprechende Bewertung von kontaktierten Flächen sollte in einem zweiten Schritt eine geeignete Methode identifiziert werden, um sie anschließend in ein Messsystem umzusetzen. Für beide Messverfahren sollten schließlich anhand von Probandenversuchen die entsprechenden und notwendigen Korrelationen für die Komfortbewertung hergeleitet werden.

Diese Schritte sind im Folgenden mit den wesentlich zu berücksichtigenden Fragestellung aufgeführt:

1) Äquivalenttemperatur: Weiterentwicklung einer adäquaten Messsensorik zur Einsatzreife

1. Berücksichtigung der thermischen Trägheit für instationäre Vorgänge

2. Lokale Flexibilität für unterschiedliche Anordnungen, insbesondere bei inhomogenen Lastfällen oder lokalen Ausströmern

3. Einsatzfähigkeit bei Labor- und Feldversuchen auf allen Sitzplätzen

4. Hohe Reliabilität und Reproduzierbarkeit

5. Ergonomische Bedienung und Visualisierung der Messdaten

2) Kontaktflächenbewertung: Entwicklung eines Messverfahrens zur Komfortbewertung bei Kontakt

1. Anlehnung an die Methodik der Bewertung durch die Äquivalenttemperatur

    a) Ableitung der relevanten physikalischen Größe, wie z.B. Kontaktwärmestrom, als Referenz

    b) Identifikation und Gruppierung der wesentlichen Körpersegmente, möglichst in Kongruenz mit dem Äquivalenttemperaturverfahren

    c) Untersuchung der Effektstärke bei stationären und instationären Vorgängen hinsichtlich thermischer Behaglichkeit für die Auswahl eines geeigneten Probandenpanels

2. Integration in das Messsystem zur Äquivalenttemperaturbewertung, hierbei zusätzlich zu den oben genannten Punkten:

    a) Definition eines geeigneten temperierten Gegenkörpers für den Sensorkopf

    b) Identifikation einer flexiblen Oberfläche zur Herstellung eines Vollkontaktes mit der betroffenen Oberfläche und einer entsprechenden Anbringung im Test

3) Komfortbewertung: Ermittlung von Korrelationen zwischen Messgrößen und Bewertungen des thermischen Komforts durch ein ausreichend großes Probandenpanel, bezogen auf

1. Körpersegmente und inhomogene Klimasituationen (z.B. durch lokale Asymmetrien oder unterschiedliche Anteil hinsichtlich Konvektion und Strahlung)

2. Übliche Bekleidungsgrade (z.B. Sommer, Winter, Übergangszeit sowie Freizeit- und Geschäftskleidung)

3. Übliche Aktivitäten (z.B. sitzend Fahrer, sitzend Beifahrer/Fahrgast, stehend Fahrgast)

4. Instationäre Temperaturverläufe (unterschiedliche Gradienten und Bereiche)

Literaturverzeichnis

[1]	DIN EN ISO 7730:2006-05: Ergonomie des Umgebungsklimas - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und der lokalen thermischen Behaglichkeit.
[2]	Grossmann H (2010) Pkw-Klimatisierung: Physikalische Grundlagen und technische Umsetzung. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
[3]	Temming J (1984) Hygienische und physiologische Grundlagen der Fahrzeugklimatisierung. In: Reichelt J, Schlepper H (Hrsg.) Kältetechnik im Kraftfahrzeug. C.F. Müller-Verlag, Karlsruhe.
[4]	Schwab R, Mayer E (1989) Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss der Sonneneinstrahlung auf die thermische Behaglichkeit in Kraftfahrzeugen. FAT Schriftenreihe Nr. 81, Frankfurt am Main.
[5]	Schwab R (1994) Einfluss der Sonneneinstrahlung auf die thermische Behaglichkeit in Kraftfahrzeugen. FAT Schriftenreihe Nr. 109, Frankfurt am Main.
[6]	Yaglou CP (1927) Temperature, Humidity and Air Movement in Industries: The Effective Temperature Index. In: *Journal for Industrial Hygiene*, **9**, 297-309.
[7]	Gagge AP. (1940) Standard Operative Temperature, Generalized Temperature Scale Applicable to Direct and Partitional Calometry. In: *American Journal of Physiology*, **131** (1), 93-103.
[8]	DIN EN ISO 14505-2:2007-04, Ergonomie der thermischen Umgebung – Beurteilung der thermischen Umgebung in Fahrzeugen – Teil 2: Bestimmung der Äquivalenttemperatur.
[9]	EQUIV Consortium (1999) Development of Standard Test Methods for Evaluation of Thermal Climate in Vehicles. Jordbrukstekniska institutet, Uppsala.
[10]	Olesen BW, Scholer M und Fanger PO. (1979) Vertical Air Temperature Diffe-rences and Comfort. In: Fanger PO und Valbjorn O (Hrsg.), Indoor Climate. Danish Building Research Institute, Copenhagen, Denmark. 561-579.
[11]	Olesen BW. (1977) Thermal Comfort Requirements for Floors. In: Institute for International Research I (Hrsg.). Meeting of Commissions B1, B1, E1 of the IIR, 1977, Belgrade, 307-313.
[12]	Fanger PO, Ipsen BM, Langkilde G, Olesen BW, Christensen NK und Tanabe S. (1985) Comfort Limits for Asymmetric Thermal Radiation. Energy and Buildings, 8 (3), 225-236.
[13]	Fanger PO, Melikov AK, Hanzawa H und Ring J. (1988) Air Turbulence and Sensation of Draught. Energy and Buildings, 12, 21-39.

[14]	Tanabe S, Stuzuki T, Kimuar K und Horikawa S. (1995) Numerical Simulation Model of Thermal Regulation of Man With 16 Body Parts of Evaluating Thermal Environment. Part 1: Heat Transfer at Skin Surface and Comparison With SET* and Stolwijk Model. In: Architectural Institute of Japan (Hrsg.) Summaries of Technical Papers of Annual Meeting. Aug.1995.
[15]	Fiala, D. (1998) Dynamic Simulation of Human Heat Transfer and Thermal Comfort (PhD thesis). Leicester, UK: IESD, De Montfort University.
[16]	Huizenga C, Hui Z, Duan T und Arens E. (1999) An Improved Multinode Model of Human Physiology and Thermal Comfort. In: International Building Performance Simulation Association (Hrsg.). IBPSA Conference - Building Simulation 1999, Kyoto, 13.Sep.1999.
[17]	Zhang H. (2003) Human Thermal Sensation and Comfort in Transient and Non-Uniform Thermal Environments. Dissertation, University of California, Berkeley
[18a]	Arens E, Zhang H, Huizenga C (2006) Partial- and whole-body thermal sensation and comfort— Part I: Uniform environmental conditions. In: Journal of Thermal Biology, 31, 53–59
[18b]	Arens E, Zhang H, Huizenga C (2006) Partial- and whole-body thermal sensation and comfort— Part II: Non-uniform environmental conditions. In: Journal of Thermal Biology, 31, 60–66
[19a]	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. In: Building and Environment, 45, 380–388.
[19b]	Zhang H, Arens E, Huizenga C, Han T (2010) Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments: Part II: Local comfort of individual body parts. In: Building and Environment, 45, 389–398.
[19c]	Zhang H, Arens E, Huizenga C, Han T (2010) Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments: Part III: Whole-body sensation and comfort. In: Building and Environment, 45, 399–410.
[20]	Nilsson HO. (2004) Comfort Climate Evaluation With Thermal Manikin Methods and Computer Simulation Models.
[21]	Nilsson HO (2007) Thermal comfort evaluation with virtual manikin methods. In: Building and Environment 42, 4000–4005.
[22]	Wang X (1994) Thermal comfort and sensation under transient conditions. Dissertation, The Royal Institute of Technology, Stockholm, Schweden.
[23]	Zhang H (2003) Human Thermal Sensation and Comfort in Transient and Non-Uniform Thermal Environments. Dissertation University of California, Berkeley.

[24]	Foda E, Almesri I, Awbi HB, Sirén K (2011) Models of human thermoregulation and the prediction of local and overall thermal sensations. Building and Environment, 46, 2023-2032.
[25]	Park S, Hellwig R, Grün G, Holm A (2011) Local and overall thermal comfort in an aircraft cabin and their interrelations. In: Building and Environment 46, .p. 1056-1064
[26]	Streblow R (2010) Thermal Sensation and Comfort Model for Inhomogeneous Indoor Environments. Dissertation Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen,
[27]	d'Ambrosio Alfano FR, Palella BI, Riccio G (2011) The role of measurement accuracy on the thermal environment assessment by means of PMV index. Building and Environment, 46, 1361-1369.

Abbildungsnachweis

Bild 1: EQUIV Consortium (1999) Development of Standard Test Methods for Evaluation of Thermal Climate in Vehicles. Jordbrukstekniska institutet, Uppsala.

Bild 2: Zhang H (2003) Human Thermal Sensation and Comfort in Transient and Non-Uniform Thermal Environments. Dissertation University of California, Berkeley.

Bild 3: Nilsson HO (2007) Thermal comfort evaluation with virtual manikin methods. In: Building and Environment 42, 4000–4005.

Bild 4: Wang X (1994) Thermal comfort and sensation under transient conditions. Dissertation, The Royal Institute of Technology, Stockholm, Schweden.

Bild 5: http://www.lumasenseinc.com/DE/produkte/gasueberwachung/thermal-comfort/

Bild 6: http://www.lumasenseinc.com/DE/produkte/thermal-comfort/air-temperature/air-temperature-transducer.html

Bild 7: http://www.lumasenseinc.com/DE/produkte/thermal-comfort/radiant-temperature/radiant-temperature-asymmetry-transducer-.html

Bild 8: http://www.lumasenseinc.com/uploads/Products/Gas_Monitoring_Products/Thermal_Comfort/pdf/Datasheet/PD_MM0036.pdf

Bild 9: http://www.lumasenseinc.com/uploads/Products/Gas_Monitoring_Products/Thermal_Comfort/pdf/Datasheet/PD_MM0036.pdf

Bild 10: http://www.lumasenseinc.com/uploads/Products/Gas_Monitoring_Products/Thermal_Comfort/pdf/Datasheet/PD_MM0038.pdf

Bild 11: http://www.lumasenseinc.com/DE/produkte/thermal-comfort/humidity/humidity-transducer.html

Bild 12: http://www.lumasenseinc.com/uploads/Products/Gas_Monitoring_Products/Thermal_Comfort/pdf/Datasheet/Humidity-of-Air-Transducer-INNOVA-MM0037_Datasheet.pdf

Bild 13: http://www.lumasenseinc.com/DE/produkte/thermal-comfort/surface-temperature/surface-temperature-transducer.html

Bild 14: http://www.lumasenseinc.com/uploads/Products/Gas_Monitoring_Products/Thermal_Comfort/pdf/Datasheet/Surface-Temperatures-Transducer-INNOVA-MM0035_Datasheet.pdf

Bild 15: http://www.lumasenseinc.com/DE/produkte/thermal-comfort/t-operative/operative-temperature-transducer.html

Bild 16: http://www.lumasenseinc.com/DE/produkte/thermal-comfort/flatman/

Bild 17: http://www.lumasenseinc.com/uploads/Solutions/Images/Applications/veh2.jpg

Bild 18: http://www.lumasenseinc.com/DE/produkte/thermal-comfort/modules/

Bild 19: http://www.lumasenseinc.com/DE/produkte/thermal-comfort/modules/

Bild 20: http://www.ahlborn.com/Kategorie/Geraete/Geraete-Uebersicht/1.html

Bild 21: http://www.ahlborn.com/Kategorie/Sensoren/Sensoren-Uebersicht/10.html

Bild 22: www.ahlborn.com/Kategorie/Sensoren/Sensoren-Uebersicht/8.html

Bild 23: http://www.ahlborn.com/Kategorie/Sensoren/Sensoren-Uebersicht/9.html

Bild 24: http://www.ahlborn.com/Kategorie/Sensoren/Sensoren-Uebersicht/14.html

Bild 25: http://www.ahlborn.com/getfile.php?1930.pdf

Bild 26: http://www.ahlborn.com/getfile.php?1515.pdf

Bild 27: http://www.dantecdynamics.com/Default.aspx?ID=20093

Bild 28: http://www.skcinc.com/prod/755-QT36.asp

Bild 29: http://www.smglink.com/GrayWolf_Solomat/Indoor_Air_Quality_IAQ_monitor/IAQ__2300AHTS_3--Function_Probe.html

Bild 30: Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Bild 31: http://www.lumasenseinc.com/DE/produkte/thermal-comfort/t-equivalent/equivalent-temperature.html

Bild 32: http://pt-teknik.dk/images/Comf_1.jpg

Bild 33: http://pt-teknik.dk/manikins/Driver_4.jpg

Bild 34: http://www.mtnw-usa.com/thermalsystems/products/full-body/automotive-hvac-manikin.php

Bild 35: http://www.mtnw-usa.com/thermalsystems/products/full-body/automotive-hvac-manikinAddImg.php#

Bild 36: http://www.mtnw-usa.com/thermalsystems/products/full-body/thermal-manikin-newton.php

Bild 37: http://www.empa.ch/plugin/template/empa/*/26077

Bild 38: http://www.mtnw-usa.com/thermalsystems/products/thermal-manikin/stan.php

Bild 39: http://www.rdfcorp.com/products/hflux/hfs-c_01.shtml

Impressum

Herausgeber FAT
Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V.
Behrenstraße 35
10117 Berlin
Telefon +49 30 897842-0
Fax +49 30 897842-600
www.vda-fat.de

ISSN 2192-7863

Copyright Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) 2013

VDA | Verband der Automobilindustrie

FAT | Forschungsvereinigung Automobiltechnik

Behrenstraße 35
10117 Berlin
www.vda.de
www.vda-fat.de