

Objektive Bewertung des thermischen Komforts im Pkw Entwicklung von Methodiken für aktuelle und zukünftige Klimakonzepte

Andreas Dirk Rolle, M.Sc.

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Engineering and Design der Technischen Universität München zur Erlangung eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
genehmigten Dissertation.

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr. phil. Klaus Bengler
2. Prof. Dr.-Ing. Klaus Peter Sedlbauer

Die Dissertation wurde am 03.06.2022 bei der Technischen Universität München eingereicht
und durch die TUM School of Engineering and Design am 14.10.2022 angenommen.

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München in Zusammenarbeit mit der Audi AG.

Hier möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die mich während dieser spannenden und durchaus fordernden Zeit durch ihre individuelle Unterstützung immer wieder angetrieben und motiviert haben und somit einen großen Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit leisteten.

Besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Klaus Bengler für die vielen konstruktiven Gespräche, der ausgezeichneten Betreuung und dem entgegengebrachten Vertrauen. Der Antrieb früh mit dem Schreiben anzufangen und dem stetigen Interesse am Fortschritt meiner Forschung haben maßgeblich zum Erfolg dieser Dissertation beigetragen. Außerdem danke ich freundlich Herrn Prof. Klaus Peter Sedlbauer für Ihr Interesse an meiner Arbeit und der Übernahme des Koreferates, sowie Herrn Prof. Fottner für den Vorsitz bei der mündlichen Prüfung.

Ich bin überaus dankbar am Lehrstuhl für Ergonomie und der Abteilung Entwicklung Klimaregelung, nicht nur großartige Kolleginnen und Kollegen, sondern auch gute Freunde gefunden zu haben. Euch danke ich für viele unvergessliche Momente die meine Promotionszeit sehr bereichert haben. Besonders möchte ich mich bei Bastian Schmandt und Cyril Guniet bedanken für die Initiierung des Promotionsprojekts, der der tatkräftigen Unterstützung all meiner Versuche und vieles mehr. Ihr habt auf vielfältige Art und Weisen mich gefördert und wir haben viele schöne Momente erlebt. Ebenso möchte ich mich bei Dominik Staab, Frantisek Paur und Matthias Heinze für die exzellente Betreuung seitens Audi bedanken. Ein weiterer großer Dank geht an das Sekretariat Doris Herold und Simona Chiritescu-Kretsch, sowie an die Werkstatt Heribert Hart und Michael Arzberger für eure bedingungslose Hilfsbereitschaft und den Aufbau, Inbetriebnahme und Fehlersuche des Klimaprüfstands und der Klimakammer.

Zu guter Letzt danke ich von Herzen meinen Eltern und meinen Bruder Bernhard, die mir durch ihr Verständnis, ihren Rückhalt und ihre Geduld das notwendige Durchhaltevermögen gegeben haben, ohne euch wäre das nicht möglich gewesen.

München, 30.05.2022

Andreas Rolle

Zusammenfassung

Die Mobilität von heute befindet sich im stetigen Wandel. Durch den Fortschritt im Bereich der Elektromobilität können immer weitere Strecken lokal emissionsfrei zurückgelegt werden. Als größter Nebenverbraucher nimmt die Innenraumklimatisierung direkten Einfluss auf die Reichweite von Elektrofahrzeugen, womit die effiziente Nutzung von Energie immer weiter in den Fokus der Entwicklung gerät. Neben den Anforderungen an Effizienz müssen neue Klimatisierungskonzepte auch den steigenden Anspruch an den thermischen Komfort gerecht werden, die mit dem zunehmenden Wegfall der Fahraufgabe durch das autonome Fahren einhergeht. Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der objektiven Bewertung des thermischen Komforts im Pkw. Nach dem aktuellen Stand der Wissenschaft wird die Äquivalenttemperatur als Bewertungsgröße zur Erfassung der thermischen Umgebung verwendet. Hierzu werden in mehreren Untersuchungen relevante Einflussfaktoren bei Messungen der Äquivalenttemperatur analysiert und Richtlinien für eine zuverlässige Versuchsdurchführung abgeleitet. Durch Komfortmodelle erfolgt eine Interpretation der Äquivalenttemperatur, um Aussagen zum thermischen Komfort zu treffen. Als Bestandteil der DIN EN ISO 14505-2:2007-04 stellt das Komfortzonenmodell nach Nilsson die Ausgangsbasis dieser Arbeit dar. Für potenzielle Verbesserungen sind in weiteren Untersuchungen Stärken und Schwächen des Komfortzonenmodells identifiziert worden. Zusätzlich sind neue Methoden für technische Vergleichsmessungen erarbeitet worden, die umfangreiche Analysen aktueller und neuer Klimakonzepte ermöglichen. Die Erhebungen haben gezeigt, dass Komfortbewertungen eine Grundlage für Energiebetrachtungen darstellen. Ergänzend zu den messtechnischen Untersuchungen wird eine Simulationsmethodik zur numerischen Bestimmung der Äquivalenttemperatur vorgestellt, welche die Komfortbewertungen in frühen Phasen der Fahrzeugentwicklung ermöglicht. Für den produktiven Einsatz im Entwicklungsprozess, müssen die vorgestellten objektiven Bewertungsmethoden verlässliche, effiziente und umfangreiche Untersuchungen des Innenraumklimas ermöglichen. Hierzu wird im Rahmen von Probandenstudien gezeigt, dass sich das Komfortzonenmodell auch für die Bewertung instationärer Klimabedingungen eignet und dass die Äquivalenttemperatur eine valide Bewertungsgröße darstellt. Abschließend ist ein neues Komfortzonenmodell erarbeitet worden, welches eine gute Vorhersagegüte aufweist, den thermischen Komfort im Fahrzeug zu bewerten.

Abstract

Current mobility is constantly changing. Progress in the field of electromobility allows increasing travelling distances free of local emissions. As largest secondary energy consumer, vehicle air conditioning has a direct influence on the all-electric range. Therefore, the efficient use of energy is becoming more and more the focus of development. In addition to efficiency requirements, new air-conditioning concepts must also meet the increasing demands of thermal comfort that come along with the progressive elimination of the driving task, due to autonomous driving. This thesis deals with the objective evaluation of thermal comfort in passenger cars. According to the current state of science, the equivalent temperature is used as a climate index for assessing the thermal environment. For this purpose, several studies are done to analyse relevant influencing factors for equivalent temperature measurements and give guidelines for reliable tests. Comfort models are used to interpret the equivalent temperature in order to reveal more information about thermal comfort. Being a constituent part of DIN EN ISO 14505-2:2007-04 the comfort zone model, according to Nilsson, represents the foundation of this work. In further investigations, strengths and weaknesses of the comfort zone model have been identified, to enable potential improvements. In addition, new methods for technical comparative measurements have been developed, which allow comprehensive analyses of current and new climate concepts. The investigations have shown that comfort evaluations are an important aspect for energy considerations. In addition to the measurements, a simulation methodology, for the numerical determination of the equivalent temperature, is presented. These simulations enable comfort evaluations in early phases during vehicle development. These presented objective evaluation methods have to allow reliable, efficient, and comprehensive investigations of the interior climate, for their productive use in the development process. For this purpose, participant studies are showing that the comfort zone model is suitable for the evaluation of transient climate conditions and that the equivalent temperature is a valid climate index. The main objective for this work is develop a new comfort zone model, which has a good prediction accuracy to evaluate the thermal comfort in the vehicle.

Betreute studentische Arbeiten

Im Rahmen dieser Dissertation entstanden am Lehrstuhl für Ergonomie der Technische Universität München, in den Jahren 2018 bis 2021 unter wesentlicher wissenschaftlicher, inhaltlicher und fachlicher Anleitung des Autors die im Folgenden aufgelisteten studentischen Arbeiten. Untersuchungen und Ergebnisse aus diesen Arbeiten sind in Teilen in das vorliegende Dokument eingeflossen. Der Autor dankt hiermit explizit allen ehemals betreuten Studenten für ihr außerordentliches Engagement bei der Unterstützung des hier behandelten Forschungsprojekts sowie der damit verbundenen Dissertation.

Student	Art der Studienarbeit, Titel und Abgabedatum
Ferdinand Wöhr	Masterarbeit, Untersuchung innovativer Flächenheizsysteme zur Fahrzeugklimatisierung anhand einer Analyse der Äquivalenttemperatur 20.11.2018
Manuel Kipp	Masterarbeit, Entwicklung und Konstruktion eines innovativen Sitzklimatisierungskonzeptes, 31.05.2019
Valentin Zierer	Semesterarbeit, Konstruktion und Bewertung eines Überkopfbelüftungssystems mithilfe der Äquivalenttemperatur, 01.06.2019
Sophia Langer	Masterarbeit, Entwicklung einer Simulationsmethodik zur Bewertung des thermischen Komforts im Fahrzeuginnenraum, 27.01.2020
Jingyun Zhao	Bachelorarbeit, Erweiterung eines Programms zur visuellen Darstellung von Messergebnissen, 02.07.2020
Dubravka Bradaric	Masterarbeit, Automatisierung eines variablen Klimaprüfstandes, 15.07.2020
Christopher Traver	Bachelorarbeit, Konzeptentwicklung zur thermischen Behaglichkeitsbeurteilung im Automobil mit einer Erweiterung durch einen in MATLAB® erstellten Fragebogen, 08.07.2020
Florian Reineke	Semesterarbeit, Experimentelle Analyse der Einflussfaktoren bei Komfortmessungen, 23.12.2020
Lukas Küchle	Masterarbeit, Objektive Analyse innovativer Pkw-Klimatisierungskonzepte, Behaglichkeits- und Energieeffizienzbewertungen konvektiver und strahlungsbasierter Systeme, 30.04.2021
Valentin Zierer	Masterarbeit, Methoden zur Entwicklung isolationsabhängiger Komfortzonendiagramme, 29.07.2021

Gliederung

1	Einleitung und Motivation	1
2	Problemstellung und Zielsetzung	3
2.1	Systembeschreibung: Umwelt – Fahrzeugklima – Mensch	3
2.2	Testgütekriterien	4
2.3	Bewertungsskalen der thermischen Umgebung und Komfort	6
2.4	Ziele und Inhaltlicher Aufbau der Arbeit	9
3	Grundlagen und Stand der Wissenschaft	12
3.1	Thermodynamisches System: Umwelt – Fahrzeugklima	12
3.2	Thermophysiology des Menschen	15
3.2.1	Thermische Wahrnehmung	18
3.2.2	Metabolismus	20
3.2.3	Demografische Unterschiede	20
3.2.4	Kleidung	22
3.2.5	Zugluft	23
3.3	Definition der Systemgrenzen Mensch – Fahrzeugklima	24
3.4	Thermischer Komfort	25
3.5	Metriken zur objektiven Erfassung des Raumklimas	28
3.6	Modellierung von Klimakomfort	31
3.6.1	Thermophysiological Modelle	31
3.6.2	Thermopsychologische Modelle	33
4	Messtechnische Erfassung der thermischen Umgebung	36
4.1	Prüfstände	36
4.2	Klima-Messpuppen	37
4.3	Einflussfaktoren und Sensitivität	38
4.3.1	Ablenkung der Personenanströmer	39
4.3.2	Variation der Sitzposition in Fahrzeuginnenraumrichtung	41
4.3.3	Wiederholungsgenauigkeit von Versuchen	42
4.4	Richtlinien zur Versuchsdurchführung	43
5	Evaluierung von Bewertungsmethoden der Fahrzeugklimatisierung	45

GLIEDERUNG

5.1	Konzeptbewertung Gesamtsystem	45
5.1.1	Methode	46
5.1.2	Ergebnisse	46
5.1.3	Diskussion	48
5.2	Konzeptbewertung isolierter Systeme	49
5.2.1	Isokomfort-Evaluierung	49
5.2.2	Einfluss von thermisch aktiven Oberflächen	50
5.2.3	A/B Analysen	52
5.2.4	Instationärer Aufheizprozess thermisch aktiver Oberflächen	52
5.3	Numerische Berechnung der Äquivalenttemperatur	55
5.3.1	Implementierung in OpenFOAM®	56
5.3.2	Validierung Simulationsmethodik	57
6	Klimakomfortstudien	60
6.1	Instationärer Einfluss von Solarstrahlung	60
6.1.1	Studiendesign	61
6.1.2	Ergebnisse	62
6.1.3	Diskussion	65
6.2	Validierung der Äquivalenttemperatur als Bewertungsgröße	67
6.2.1	Studiendesign	67
6.2.2	Ergebnisse	69
6.2.3	Diskussion	72
6.3	Erweiterung des Komfortzonenmodells um relevante Einflussfaktoren	75
6.3.1	Studiendesign	75
6.3.2	Ergebnisse	77
6.3.3	Diskussion	83
7	Abschließende Diskussion und Ausblick	91
7.1	Forschungsfrage 1	91
7.2	Forschungsfrage 2	95
7.3	Forschungsfrage 3	97
7.4	Zusammenfassung und weiterführende Arbeiten	99
	Literaturverzeichnis	103

GLIEDERUNG

Abbildungsverzeichnis	116
Tabellenverzeichnis	121
Anhang A	122
Anhang A.1 Prüfstände	122
Anhang A.2 Klima-Dummy	128
Anhang B	131
Anhang B.1 Einfluss der Ausströmer auf Messungen der T_{eq}	131
Anhang B.2 Instationärer Einfluss von Solarstrahlung	134
Anhang B.3 Fragebögen	135
Anhang B.4 Erweiterung des Komfortzonenmodells um relevante Einflussfaktoren	137

Abkürzungsverzeichnis

ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
AUTO22	Automatikmodus mit einer Wunschtemperatur von 22°C
BMI	Body-Mass-Index
BMR	Basal Metabolic Rate
CAN	Controller Area Network
CFD	Computational Fluid Dynamics
clo	Isolationsgrad
COVID-19	Coronavirus SARS-CoV-2
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DR	draught rating
EQUITES	Equivalent Temperature System
HWT	Heizwärmetauscher
KWK	Klimawindkanal
KZM	Komfortzonenmodell
M	Mittelwert
met	metabolic equivalent of task
MTV	Mean Thermal Vote
n	Anzahl
PMV	Predictive Mean Vote
PPD	Predicted Percentage Dissatisfied
r.F.	relative Feuchtigkeit
SD	Standardabweichung
SLS	selektives Lasersintern
SPS	speicherprogrammierbare Steuerung
SQL	Structured Query Language
TOST	Two One Sided Tests
VW	Volkswagen

Lateinische Symbole

A	Bezugsfläche
A_1	Bezugsfläche Körper eins
$A_{segment}$	Fläche Körpersegment
A_{whole}	gesamte Fläche Körper
C	Crédits
$C_{Körper}$	spezifische Wärmekapazität
h_{cal}	kalibrierter Wärmeübergangskoeffizient
$h_{cal,segment}$	segmentbezogener kalibrierter Wärmeübergangskoeffizient
K	kalt, jedoch komfortabel
\dot{m}	Massenstrom

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

\dot{m}_i	Massenstrom der einzelnen Ausströmer
$m_{\text{Körper}}$	Körpermasse
\dot{m}_{whole}	Gesamtmassenstrom der Ausströmer
N	neutral
\dot{Q}	Wärmestrom
$\dot{Q}_{\text{Körper}}$	Wärmestrom des Körpers
$\dot{Q}_{\text{Produktion}}$	Wärmeproduktion des Körpers
$\dot{Q}_{\text{Verluste}}$	Wärmeverluste des Körpers
q	Wärmestrom
q_{segment}	segmentbezogener Wärmestrom
q_{sensor}	Wärmestrom Sensor
Rel	Reliabilitätskoeffizient
R_{th}	Thermischer Widerstand
\dot{T}	zeitliche Temperaturänderung
\bar{T}	mittlere gewichtete Ausblasttemperatur
T_1	Temperatur Körper eins
T_2	Temperatur Körper zwei
T_{bet}	Basis-Effektivtemperatur
T_{eq}	Äquivalenttemperatur
$T_{eq,direct}$	gerichtete Äquivalenttemperatur
$T_{eq,segment}$	segmentbezogene Äquivalenttemperatur
$T_{eq,whole}$	globale Äquivalenttemperatur
T_{et}	Effektivtemperatur
T_i	Temperatur der einzelnen Ausströmer
T_{net}	Normal-Effektivtemperatur
T_o	Operativtemperatur
T_{Umgebung}	Umgebungstemperatur
T_s	Oberflächentemperatur
U	Wärmedurchgangszahl
Var	Varianz
W	warm, jedoch komfortabel
x	Variable
ZK	zu kalt
ZW	zu warm

Griechische Symbole

α	Wärmeübergangskoeffizient
Δ	Gradient
ε	Messfehler
$Var(\tau)$	tatsächliche Varianz
Σ_{12}	Strahlungskonstante

1 Einleitung und Motivation

In der mobilen Gesellschaft von heute stellt der Reisekomfort einer der wichtigsten Einflussfaktoren der Kundenzufriedenheit dar [77]. Das Gesamtempfinden wird dabei wesentlich durch den thermischen Komfort beeinflusst [14, 119]. Daher nimmt die Klimatisierung des Fahrzeuginnenraums bei der Entwicklung moderner Fahrzeuge einen hohen Stellenwert ein. Steigende Anforderungen der Kunden an das Wohlbefinden im Fahrzeug [100] rücken den thermischen Komfort, neben Kriterien und Auslegungszielen der Leistungsfähigkeit und Sicherheit, immer weiter in den Fokus des Entwicklungsprozesses [52, 67, 93, 122].

Darüber hinaus werden Klimatisierungssysteme zunehmend in den Vordergrund der Elektromobilität gerückt. Wesentliches Ziel dieses technologischen Wandels ist die Reduktion des Energieverbrauchs bei gleichbleibendem Komfort. Aufgrund der mangelnden Abwärme von Elektromotoren muss die Energie für die Klimatisierung dem Primärspeicher entnommen werden, womit sich die Reichweite unter extremen winterlichen Bedingungen bis zu 50% reduzieren kann [7, 52, 70]. Als größter Nebenverbraucher kann die Fahrzeugklimatisierung einen wichtigen Beitrag zur Reichweitenproblematik von Elektrofahrzeugen liefern.

Nicht nur die Elektromobilität ist ein Treiber für neue Klimatisierungsansätze. Die Entwicklung hochautomatisierter Fahrfunktionen entbindet die Insassen zunehmend von der manuellen Steuerung des Fahrzeuges [131]. Dadurch ergeben sich neue Möglichkeiten und Freiheitsgrade bei der Gestaltung des Innenraums. Variable Sitzkonfigurationen und Körperhaltungen stellen allerdings auch neue Anforderungen an die Klimatisierung [12]. Mit dem Wegfall der Fahraufgabe richtet sich die Aufmerksamkeit vermehrt in Richtung Komfort und Behaglichkeit.

Da der bisherige Entwicklungsprozess im Bereich der Innenraumklimatisierung historisch gewachsen ist, bauen neue Fahrzeugprojekte grundlegend auf dem Wissen vorangegangener Projekte auf. Das führt dazu, dass aktuelle wissenschaftliche Beurteilungsmethoden zur Bewertung des thermischen Komforts in der Entwicklung und Applikation der Fahrzeugklimatisierung kaum Anwendungen finden. Ziel der Applikation ist es, das Fahrzeug für einen großen durchschnittlichen Kundenkreis optimal zu kli-

matisieren. Dafür wird die Klimaautomatik in umfangreichen Abstimmungs- und Erprobungsfahrten durch Versuchingenieure parametrisiert. Die Abstimmung wird wesentlich durch das subjektive thermische Empfinden der verantwortlichen Ingenieure dominiert. Individuelle Einflussfaktoren können das thermische Empfinden beeinflussen und so zu ungünstigen Einstellungen des HVAC-Systems (Heating Ventilation Air-Conditioning) führen. Um quantitative und verlässliche Ergebnisse zur thermischen Wahrnehmung zu erhalten und eine Vergleichbarkeit zwischen unterschiedlichen Klimatisierungskonzepten zu ermöglichen, ist ein Einsatz objektiver Mess- und Bewertungsmethoden unerlässlich [123].

2 Problemstellung und Zielsetzung

Anforderungen an die Entwicklung und Applikation der Klimatisierung steigen von Fahrzeuggeneration zu Fahrzeuggeneration und es fehlt an Methoden die erbrachte Leistung zu quantifizieren. Die Erzeugung von thermischem Komfort im Fahrzeuginnenraum soll dabei unter minimalen Energieverbrauch erfolgen. Zusätzlich wird sich der bisher klassische Innenraum zunehmend verändern, wodurch neue Klimakonzepte für variable Innenraumgestaltungen entwickelt werden müssen. Da zum heutigen Stand kaum Erfahrungswerte vorhanden sind, ist eine frühzeitige Bewertung und Evaluation bereits in den frühen Entwicklungsphasen notwendig. Aktuell werden viele Analysen und Vergleiche auf Basis der Lufttemperatur durchgeführt, während wichtige Einflussgrößen wie Strahlung und Konvektion vernachlässigt werden [7, 73, 117]. Diese Aussagen zum thermischen Komfort und Energieverbrauch besitzen deswegen lediglich eine begrenzte Aussagekraft.

Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Methode zur objektiven Bewertung des thermischen Komforts im Pkw. Die zu entwickelnden Methodiken und Komfortmodelle sollen effiziente Untersuchungen von aktuellen und zukünftigen Klimakonzepten ermöglichen. Grundlegend wird dazu im nächsten Abschnitt das betrachtete System vorgestellt.

2.1 Systembeschreibung: Umwelt – Fahrzeugklima – Mensch

Thermischer Komfort im Fahrzeug setzt sich aus komplexen Wechselwirkungen mehrerer Einflussgrößen zusammen. Deren Zusammenhänge umfassen ein System der Umwelt, des Fahrzeugklimas und des Menschen. Die Systemzusammenhänge sind in Abbildung 1 dargestellt.

Aus der Perspektive der Insassen soll ein Fahrzeug, unabhängig vom Umgebungs-klima, stets angenehm klimatisiert sein. Die Umwelt stellt mit ihren wechselnden Umgebungsbedingungen die äußere Systemgrenze dar und erfordert somit eine permanente Regelung des Fahrzeugklimas. Die Fahrzeugklimaanlage hat dementsprechend die Aufgabe ungünstige thermische Umweltbedingungen zu kompensieren und für

Komfort im Fahrgastraum zu sorgen. Der Mensch wird von dem Innenraumklima¹ beeinflusst und es resultiert ein subjektiver Eindruck des thermischen Komforts in Abhängigkeit physiologischer und intermediärer Faktoren. Einflussfaktoren wie z.B. direkte Sonneneinstrahlung oder heiße Oberflächen haben unmittelbare Auswirkungen auf die thermische Wahrnehmung des Menschen. Damit stehen die Einzelsysteme Umwelt, Fahrzeugklima und Mensch in direkter Wechselwirkung zueinander.

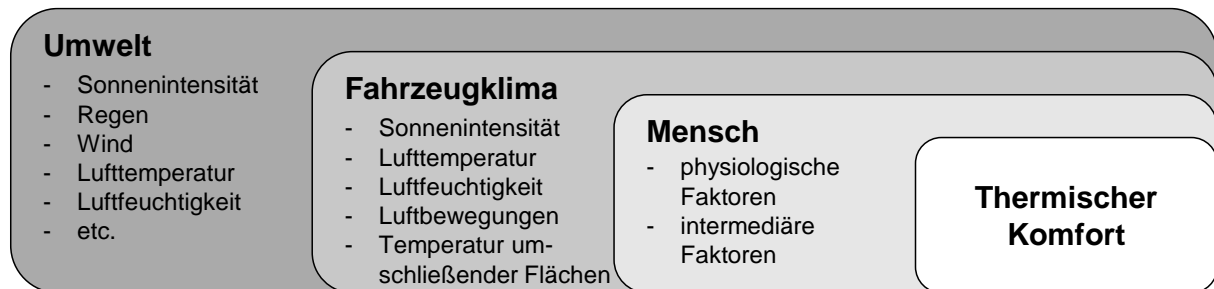


Abbildung 1: Systemgrenzen und Einflussfaktoren „Umwelt – Fahrzeugklima – Mensch“

2.2 Testgütekriterien

Um Aussagen über den thermischen Komfort treffen zu können, müssen Testgütekriterien für eine möglichst exakte Erfassung berücksichtigt werden. Anhand dieser Kriterien soll eine objektive Komfortbewertung im Rahmen der betrachteten Einzelsysteme Umwelt, Fahrzeugklima und Mensch sichergestellt werden. Auch im Bereich der subjektiven Wahrnehmung durch den Menschen stellen sie ein Instrument der Qualitätsbeurteilung psychologischer Tests dar. Allgemein wird dabei zwischen Objektivität, Reliabilität und Validität unterschieden. Die nachfolgenden Definitionen orientieren sich an Moosbrugger und Kelava [80].

Das Kriterium der Objektivität ermöglicht die Vergleichbarkeit von Verfahren und Untersuchungen. Bei der Bewertung des thermischen Komforts soll eine objektive Interpretation des Umgebungsklimas ermöglicht werden, die zu einer eindeutigen Schlussfolgerung der thermischen Behaglichkeit führt. Ein entsprechendes Verfahren wird objektiv genannt, wenn das zu ermittelnde Merkmal unabhängig von dem subjektiven Empfinden von Test- oder Applikationsingenieuren festgestellt werden kann. Für die Ergebnisinterpretation müssen klare und anwenderunabhängige Regeln vorliegen.

¹ Gleichbedeutend mit „Fahrzeugklima“

Nach Lienert und Raatz [76] wird der Begriff der Objektivität in Durchführungs-, Auswertungs- und Interpretationsobjektivität differenziert. Die Durchführungsobjektivität ist beispielsweise gewährleistet, wenn das Umgebungsklima messtechnisch erfasst werden kann. Auswertungsobjektivität ist dahingegen sichergestellt, sobald klare Regeln zur Auswertung festgelegt sind. Eine Standardisierung von Messverfahren, Versuchen und Auswerteroutinen erhöht die Wahrscheinlichkeit der Durchführungs- und Auswertungsobjektivität.

Die Reliabilität adressiert die Messgenauigkeit eines Versuchs. Ein Versuch wird als reliabel (zuverlässig) bezeichnet, wenn es das zu bestimmende Merkmal exakt erfasst und somit frei von zufälligen Messfehlern ist. Die Reliabilität stellt ein statistisches Beurteilungskriterium dar und wird als Varianzverhältnis zwischen der tatsächlichen Varianz $Var(\tau)$ und der Varianz der messfehlerfreien Werte $Var(x)$ definiert

$$Rel(x) = \frac{Var(\tau)}{Var(x)} = \frac{Var(\tau)}{Var(\tau + \varepsilon)}. \quad (1)$$

Dabei sind die messfehlerfreien Werte x gleich der Summe der tatsächlichen Werte τ und des Messfehlers ε . Idealerweise sollte der Erwartungswert des Messfehlers null sein: $E(\varepsilon) = 0$. Der Reliabilitätskoeffizient $Rel(x)$ kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen [104]. Versuche mit einem Reliabilitätskoeffizienten von 0 führen zu Ergebnissen, die ausschließlich durch Messfehler zustande gekommen sind. Ein Wert von 1 entspricht dagegen einem Versuch, der bei wiederholter Durchführung unter identischen Bedingungen zu den selben Ergebnissen führt. Im Falle der messtechnischen Erfassung des Umgebungsklimas kann die Reliabilität durch ein Retest-Verfahren bestimmt werden [80]. Dabei werden zwei Versuche unter identischen Testbedingungen durchgeführt. Die Reliabilität ermittelt sich dann aus der Korrelation der beiden Versuchsergebnisse.

Objektivität und Reliabilität ermöglichen eine hohe Messgenauigkeit und sind somit notwendige Bedingungen für eine hohe Validität. Als wichtigstes Gütekriterium befasst sich die Validität mit der inhaltlichen Übereinstimmung des gemessenen Merkmals und jenem Merkmal, welches von Bedeutung ist [55]. Ein Messverfahren wird als valide (gültig) bezeichnet, wenn das zu messende Merkmal tatsächlich auch gemessen wird. Bei einer hohen Validität ist eine Generalisierung der Versuchsergebnisse auf be-

obachtbares Verhalten außerhalb der Versuchssituation zulässig. Um eine differenzierte Betrachtung der Gültigkeit eines Versuchs zu erhalten, sollten die Aspekte der Inhaltsvalidität, Augenscheinvalidität und Kriteriumsvalidität untersucht werden. Wird bei einem Versuch das zu messende Merkmal repräsentativ erfasst, spricht man von Inhaltsvalidität. Sie wird in der Regel nicht numerisch erfasst, sondern basiert auf fachlichen Überlegungen [22, 79]. Die Augenscheinvalidität sagt aus, inwiefern ein Versuch auch für Laien plausibel erscheint, wodurch die Akzeptanz bei Probandenstudien gesteigert werden kann [80]. Kriteriumsvalidität liegt vor, wenn ein Verhalten innerhalb der Testsituation auf ein Kriterium bzw. Verhalten außerhalb der getesteten Situation geschlossen werden kann [80]. Damit werden Aussagen über die praktische Anwendbarkeit eines Tests zur Vorhersage von Verhalten gemacht.

Die zu entwickelnde Bewertungsmethodik soll Anwendung in der industriellen Fahrzeugentwicklung finden, womit neben den Kriterien der Objektivität, Reliabilität und Validität die Wirtschaftlichkeit zu berücksichtigen ist. Die Anforderungen an die Testökonomie sind dann erfüllt, wenn der diagnostische Erkenntnisgewinn relativ geringe finanzielle und zeitliche Ressourcen verbraucht [80]. Damit sollte der zeitliche Aufwand für die Vorbereitung, Durchführung und Auswertung sowie die Kosten für Prüfstände und Messtechnik im Verhältnis zum Erkenntnisgewinn stehen.

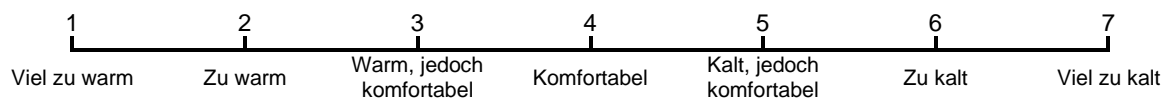
Für weiterführende Literatur zu den Testgütekriterien wird auf die Werke von Moosbrugger und Kelava [80] sowie Wirtz [132] verwiesen.

2.3 Bewertungsskalen der thermischen Umgebung und Komfort

Anhand der zuvor beschriebenen Testgütekriterien können messtechnische Verfahren zur Bestimmung der thermischen Umgebung evaluiert werden. Diese basieren auf rein physikalischen Größen, geben jedoch ohne Erfahrungswerte keinerlei Aufschluss darüber, wie das Umgebungsklima empfunden wird und welcher Komforteindruck daraus resultiert. Nicht jeder Mensch empfindet ein und dasselbe Klima als gleich komfortabel. Der thermische Komfort ist eine subjektive Größe, die anhand von Bewertungsskalen ermittelt werden kann. Da verschiedene Formulierungen unterschiedlich von Probanden verstanden werden können, hat die Wahl der Skala einen entscheidenden Einfluss auf die Beurteilung. Im Folgenden wird eine Reihe verbal-numerischer Beurteilungsskalen vorgestellt.

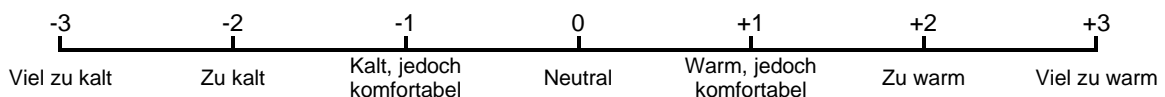
Im Jahr 1936 entwickelte Bedford [9] die nach ihm benannte Skala zur Beurteilung des thermischen Komforts bei leichter Industriearbeit. Die Bedford-Skala ist Tabelle 1 zu entnehmen. Sie besteht aus sieben Stufen und liefert Informationen über das thermische Empfinden und Komfort. Als Nachteil kann die unsymmetrische Nummerierung gesehen werden, die zudem Regeln der inneren Kompatibilität verletzt, da mit kühlerem thermischem Empfinden die Zahlenwerte von 1 bis 7 ansteigen, obwohl in Anlehnung an eine Temperaturskala, intuitiv ein abnehmender Wert erwartet wird [13, 15].

Tabelle 1: Bedford-Skala



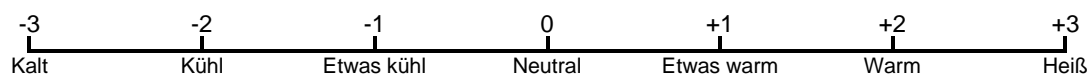
Die von Nilsson [83] verwendete MTV-Skala (Mean Thermal Vote) stellt eine Weiterentwicklung der Bedford-Skala dar. Wie in Tabelle 2 dargestellt ist die Nummerierung symmetrisch aufgebaut und geht von -3 *Viel zu kalt* über 0 *Neutral*, bis hin zu +3 *Viel zu warm*. Das Ziel der MTV-Skala ist eine klare Differenzierung zwischen komfortablen Bewertungen (Werte von -1 bis +1) und unkomfortablen Bewertungen (Werte von -3 bis -2 bzw. +2 bis +3). Regressionen von MTV und Äquivalenttemperaturmessungen zeigen einen linearen Zusammenhang, womit die MTV-Skala Eigenschaften einer Kardinalskala aufweist. Damit ist eine Vielzahl an statistischen Untersuchungsmethoden zulässig [83, 138].

Tabelle 2: MTV-Skala [83, S. 3]



Eine der bekanntesten Skalen ist die von Fanger [41] entwickelte PMV-Skala (Predictive Mean Vote), dargestellt in Tabelle 3. Sie wurde in die ASHRAE 55 (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) [4] und EN ISO 7730:2006-4 [39] übernommen. Im Gegensatz zu den bereits genannten Skalen werden mit der PMV-Skala nur Aussagen zum thermischen Empfinden und nicht zum thermischen Komfort getroffen. Für die Beurteilung des thermischen Komforts hat Fanger [41] ein empirisches Modell entwickelt, welches in Abschnitt 3.6.1 erläutert wird.

Tabelle 3: PMV-Skala [39, S. 6]



Der internationale Standard DIN EN ISO 10551:2020-02 [31] definiert mehrere Skalen zur Beurteilung der thermischen Belastung. Die zu untersuchenden Merkmale werden in jeweils eigenen Skalen untersucht. Analog zu Tabelle 4 kann die Beurteilung des thermischen Empfindens mit einer 7, 9 oder 11 Stufen Skala durchgeführt werden. Die 7-Stufen-Skala ist dabei identisch zur PMV-Skala und sollte bei Untersuchungen von Umgebungsbedingungen nahe der thermischen Neutralität verwendet werden. Weist die thermische Umgebung höhere Belastungen auf, kann die Skala auf 9 oder 11 Stufen erweitert werden. Um Aussagen zum Komfort treffen zu können, muss das Empfinden der thermischen Wahrnehmung bewertet werden. Die Komfort-Skala in Tabelle 5 startet bei einem Wert von 0 für ein angenehmes Klima und endet bei einem Wert von 4 für ein zunehmend unangenehmes Klima. Aussagen zu Änderungen des Umgebungsklimas können mit der Präferenz-Skala in Tabelle 6 ermittelt werden. Sie gibt an um wie viel kälter oder wärmer die Umgebung bevorzugt wird.

Tabelle 4: Skala zur Bewertung des thermischen Empfindens [31, S. 17]

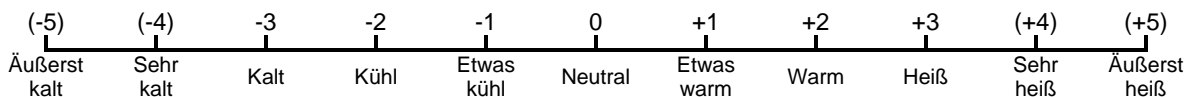


Tabelle 5: Skala zur Beurteilung des thermischen Komforts [31, S. 17]

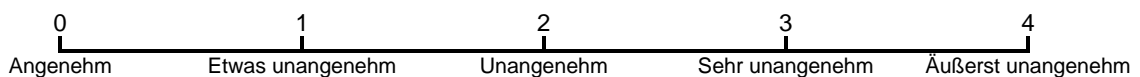
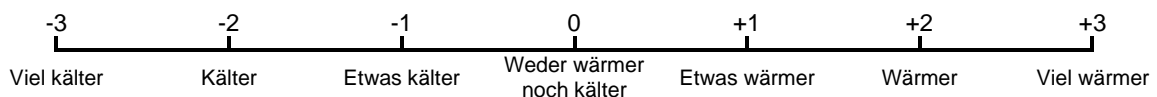


Tabelle 6: Skala zur Beurteilung der thermischen Präferenz [31, S. 18]



Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der Aufbau der vorgestellten Bewertungsskalen ähnlich ist. Das thermische Empfinden kann in mehreren Stufen zwischen kalt und warm beurteilt werden. Im Falle der Bedford- und MTV-Skala wird zusätzlich der thermische Komfort ermittelt. Bewertungen nach der DIN EN ISO 10551:2020-02 verwenden für das thermische Empfinden, Bewertungsurteile und Präferenz unabhängige Skalen. Allgemein muss bei der Bewertung ein Kompromiss zwischen Detaillierungsgrad und zumutbarem Zeitaufwand gefunden werden. Vor allem wenn lokale Effekte ermittelt werden sollen kann die Befragung schnell umfangreich werden und Probanden überfordern.

2.4 Ziele und Inhaltlicher Aufbau der Arbeit

In dieser Arbeit wird eine Methodik für die objektive Bewertung des thermischen Komforts aktueller und zukünftiger Klimakonzepte unter Berücksichtigung der relevanten Einflussfaktoren des Systems „Mensch-Fahrzeugklima“ entwickelt. Bisher gibt es keinen Nachweis, dass bestehende Methoden und Modelle zur Bewertung des thermischen Komforts die vorgestellten Testgütekriterien im vollen Umfang erfüllen. Die in dieser Arbeit vorgestellten Bewertungsmethoden leiten sich aus den thermopsychologischen Modellen ab und erfüllen die Testgütekriterien. Als zentrale Bewertungsgröße dieser Arbeit wird die thermische Umgebung mittels der Äquivalenttemperatur erfasst und mit Hilfe eines Komfortzonenmodells interpretiert. Dadurch können valide Aussagen zum thermischen Komfort getroffen werden, um den Fahrzeugentwicklungsprozess optimal zu unterstützen. Dabei geht das neu entwickelte Komfortzonenmodell über den aktuellen Standard der DIN EN ISO 14505-2:2007-04 hinaus.

Mit dem Ziel der objektiven Komfortbewertung mittels der Äquivalenttemperatur ergeben sich drei zentrale Forschungsfragen:

- F1: Welche Einflussfaktoren sind bei Messungen der Äquivalenttemperatur und Klimakomfortstudien zu berücksichtigen?
- F2: Welche Voraussetzungen müssen erfüllt sein, damit Komfort- und Energiebewertungen anhand der Äquivalenttemperatur im Entwicklungsprozess von Klimakonzepten Anwendung finden?
- F3: Wie müssen bestehende Standards angepasst werden, damit sie sich für die Bewertung des thermischen Komforts in Fahrzeugen besser eignen?

Die Inhalte der Arbeit werden in der nachfolgenden Übersicht zusammengefasst.

Kapitel 3

In folgendem Kapitel werden die Grundlagen der Wärmetransportmechanismen im Fahrzeug und die Thermophysiologie des Menschen erläutert sowie relevante Systemgrenzen umrissen. Darauf aufbauend wird der Begriff des thermischen Komforts definiert. Um dessen primäre Einflussfaktoren zu quantifizieren, werden Metriken zur objektiven Erfassung des Raumklimas betrachtet und die Äquivalenttemperatur als zentrale Bewertungsgröße identifiziert. Basierend auf den

Kapitel 3	physikalischen Einflussfaktoren werden Modelle vorgestellt, welche eine Bewertung des thermischen Komforts ermöglichen.
Kapitel 4	Das Kapitel untersucht die messtechnische Erfassung der thermischen Umgebung. Dazu werden in einem ersten Schritt die verwendeten Prüfstände und das Äquivalenttemperaturmesssystem vorgestellt. Dem folgt eine Analyse der wesentlichen Einflussfaktoren, die sich aufgrund der Ablenkung der Personenanströmer sowie der Variation der Sitzposition ergeben. Zur Verbesserung der Reliabilität werden Richtlinien für eine standardisierte Versuchsdurchführung abgeleitet.
Kapitel 5	Nachdem eine Grundlage für eine zuverlässige Messungen geschaffen wurde, erfolgt in Kapitel 5 die Evaluierungen von Bewertungsmethoden der Fahrzeugklimatisierung. Dazu werden im Klimawindkanal aktuelle Klimakonzepte mit dem Komfortzonenmodell nach Nilsson bewertet. Im Rahmen der Untersuchungen sollen Stärken und Schwächen des Modells identifiziert werden, um die Bewertungsmethodik an aktuelle Anforderungen der Klimatisierung anzupassen. Neben den Komfortuntersuchungen werden auch technische Bewertungen von isolierten Systemen durchgeführt. Ziel der Untersuchungen ist es neue Methoden für die Bewertung von zukünftigen Klimakonzepte zu entwickeln. Abschließend wird zu den physischen Messungen eine Simulationsmethode zur numerischen Bestimmung der Äquivalenttemperatur untersucht. Die Simulationsmethodik soll effiziente Untersuchungen auch in frühen Entwicklungsphasen ermöglichen.
Kapitel 6	In Kapitel 6 werden mehrere Komfortuntersuchungen im Rahmen von umfangreichen Probandenstudien durchgeführt. In einer ersten Studie soll die Anwendbarkeit des Komfortzonenmodells für instationäre Betrachtungen untersucht werden. Hierzu wird das subjektive Komfortempfinden von Probanden bei plötzlich auftretender Solarstrahlung mit dem prognostizierten Komfort des Komfortzonenmodells verglichen. In einer weiteren Studie wird die Äquivalenttemperatur als Bewertungsgröße validiert. Unter wechselnden thermischen Randbedingungen, die einen annähernd konstanten Wärmeverlust zur Folge haben, sollen

Kapitel 6 Probanden bewerten, ob sie diese Klimabedingungen auch als gleichbleibend komfortabel wahrnehmen. In einer abschließenden Studie soll auf Basis vorangegangener Untersuchungen ein neues Komfortbewertungsmodell entwickelt werden.

Kapitel 7 Im finalen Kapitel werden die Forschungsfragen im Zusammenhang mit den durchgeführten Untersuchungen erörtert und abschließend zusammengefasst. Ein Ausblick liefert mögliche Anknüpfungspunkte für Optimierungen und weiterführende Untersuchungen.

3 Grundlagen und Stand der Wissenschaft

Ende des 19. Jahrhunderts war der Klimakomfort motorisierter Fahrzeuge vergleichbar mit dem Komfort einer Pferdekutsche. Nur die Kleidung schützte vor den äußeren Umwelteinflüssen. Mit steigenden Fahrgeschwindigkeiten änderte sich der Aufbau hin zu einer geschlossenen Karosserie mit Scheiben, womit Einfluss auf das Innenraumklima genommen werden konnte [52]. Die ersten Klimatisierungsansätze erfolgten mithilfe subtiler Mittel, wie z.B. heißen Kohlen oder Eisblöcken [23]. Im Laufe der Zeit wurde ein immer größerer technischer Aufwand betrieben, um den thermischen Komfort im Fahrzeug zu steigern. Moderne Fahrzeuge ermöglichen mittlerweile eine automatisierte Regelung für individuell regulierbare Klimatisierung der Sitzplätze.

In diesem Kapitel wird die grundlegende Terminologie zum thermischen Komfort erläutert. Das in Abschnitt 2.1 beschriebene System „Mensch-Fahrgastraum“ dient dabei zur Orientierung, um die komplexen Zusammenhänge zu beschreiben. Des Weiteren werden Metriken zur Erfassung des Raumklimas verglichen und aktuelle Modellierungsansätze zur Bewertung des thermischen Komforts vorgestellt.

3.1 Thermodynamisches System: Umwelt – Fahrzeugklima

Die thermische Umwelt ist ein System mit stark unterschiedlichen Randbedingungen. Nach der World Meteorological Organisation [136, 137] können die weltweiten Temperaturen der Außenluft, dargestellt in Tabelle 7, zwischen $-67,8^{\circ}\text{C}$ und $56,7^{\circ}\text{C}$ betragen.

Tabelle 7: Extremtemperaturen weltweit [136, 137]

	Nordamerika	Südamerika	Europa	Afrika	Asien
max. Temperatur [$^{\circ}\text{C}$]	+56,7	+48,9	+48,0	+55,0	+53,9
min. Temperatur [$^{\circ}\text{C}$]	-63,0	-32,8	-58,1	-23,9	-67,8

In Mitteleuropa kann die Sonnenintensität in den Sommermonaten Maximalwerte zwischen 800 und $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ einnehmen [52]. Durch Wechselwirkungen von Sonne, Wolken, Regen und Wind sind plötzliche Änderungen des Umgebungsklimas möglich. Während der Fahrt wirken alle genannten Umwelteinflüsse auf das Fahrzeug. Bereits vor Fahrtantritt ist das Fahrzeug diesen Einflüssen ausgeliefert, wodurch, sofern keine Vorkonditionierung erfolgt, extreme Innenraumtemperaturen entstehen. Die Wär-

metransportmechanismen beschreiben die physikalischen Effekte zwischen den Systemen Umwelt und Fahrzeugklima. Die wesentlichen Effekte werden in Abbildung 2 dargestellt und im folgenden Abschnitt näher erläutert.

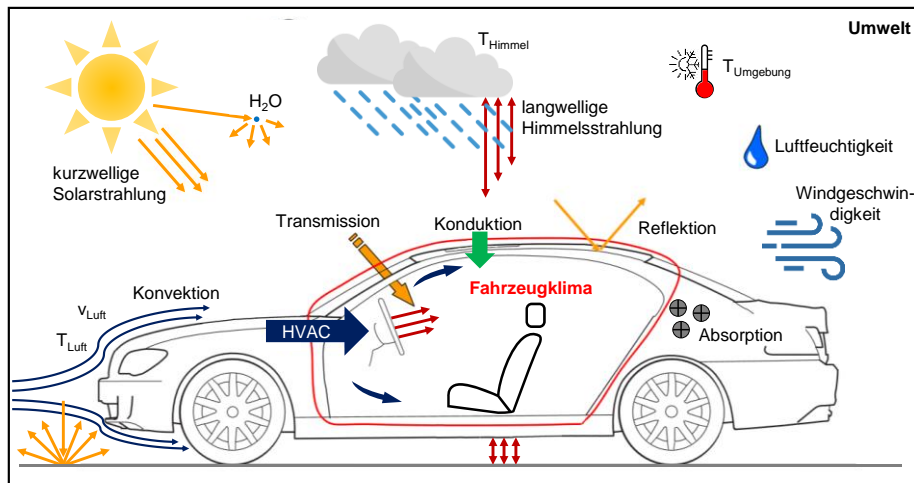


Abbildung 2: System Umwelt-Fahrzeugklima, basierend auf [95, S. 2]

Wärmetransportphänomene

Unter Wärmetransport versteht man den Austausch von Energie in Form von Wärme zwischen zwei Objekten. Nach dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik erfolgt der Wärmeaustausch immer vom höheren zum niedrigeren Temperaturniveau. Es wird dabei zwischen drei verschiedenen Wärmetransportmechanismen unterschieden: Konduktion, Konvektion und Strahlung. Im Falle der Konduktion und Konvektion ist der Wärmeaustausch stoffgebunden. Der Wärmestrom ist dabei Abhängig von dem Wärmedurchgangskoeffizienten, Bezugsfläche und Temperaturdifferenz [58, 97]

$$\dot{Q} = U A \Delta T, \quad (2)$$

mit	\dot{Q}	Wärmestrom	$[W]$,
	U	Wärmedurchgangskoeffizient	$[W/m^2 K]$,
	A	Bezugsfläche	$[m^2]$,
	ΔT	Temperaturdifferenz	$[K]$.

Konduktion

Bei der Konduktion oder auch Wärmeleitung erfolgt der Transport von Wärme in Festkörpern oder Fluiden durch diffusive Prozesse, getrieben von Temperaturgradienten. So leitet zum Beispiel die Karosserie die von außen eingetragene Wärme mittels Konduktion in den Fahrgastraum. Der Wärmestrom durch ein Medium ist dabei von dem thermischen Widerstand abhängig

$$U = \frac{1}{A \sum R_{th}}, \quad (3)$$

mit R_{th} Thermischer Widerstand $[K/W]$.

Konvektion

Als Konvektion wird der Transport von Masse, Impuls und Energie in strömenden Flüssigkeiten oder Gasen bezeichnet. Durch den Fahrtwind erfolgt ein konvektiver Wärmeübergang zwischen der Umgebungsluft und der Karosserie.

Konvektion und Konduktion treten sehr häufig in Wechselwirkung miteinander auf. Erfolgt der Austausch von Wärme zwischen einem Körper und einem Fluid, wird dieser als konvektiver Wärmeübergang bezeichnet. In diesem Fall wird die Wärmedurchgangszahl U durch den Wärmeübergangskoeffizient α ersetzt. Der Wärmeübergangskoeffizient ist vom umströmenden Fluid abhängig. Das Strömungsverhalten wird durch die Strömungsgeschwindigkeit, Viskosität, Wärmeleitfähigkeit, Strömungsregime (laminar oder turbulent), Kontaktfläche und Geometrie des umströmenden Körpers charakterisiert [58, 97].

Thermisch induzierte Strahlung

Im Rahmen von Behaglichkeitsuntersuchungen ist der Austausch von Wärme durch thermisch induzierte Strahlung im Wellenlängenbereich von 0,38 bis 0,78 μm (kurzwellig) und 0,78 bis 1000 μm (langwellig) relevant. Wellenlängen kleiner 0,38 μm und größer 1000 μm haben auf den thermischen Komfort keinen nennenswerten Einfluss und können daher vernachlässigt werden. Der Energietransport erfolgt dabei ohne stofflichen Träger. So wird das Innenraumklima im Fahrzeug durch kurz- und langwellige Strahlung beeinflusst. Im Bereich der Scheiben wird der Fahrgastraum direkt durch kurzwellige Solarstrahlung erwärmt. Erhitzte Bauteile im Fahrgastraum emittieren zusätzlich langwellige Wärmestrahlung. Im Gegensatz zu den anderen Transportmechanismen hat die Temperaturdifferenz einen stärkeren Einfluss auf den Wärmestrom, da sie mit der vierten Potenz eingeht. Der Wärmestrom wird ebenfalls von der Strahlungskonstante und Bezugsfläche beeinflusst. Die Strahlungskonstante beschreibt das Verhältnis von Geometrie, Flächen und Emissionsgeraden (Absorption, Reflektion und Transmission) der in Wechselwirkung stehenden Körper [58, 97]. Ihre Berechnung berücksichtigt zudem die Stefan-Boltzmann-Konstante. Der Wärmestrom \dot{Q} wird wie folgt berechnet

$$\dot{Q} = \Sigma_{12} A_1 (T_1^4 - T_2^4), \quad (4)$$

mit	Σ_{12}	Strahlungskonstante	$[W/m^2K^4]$,
	A_1	Bezugsfläche Körper eins	$[m^2]$,
	T_1	Temperatur Körper eins	$[K]$,
	T_2	Temperatur Körper zwei	$[K]$.

Fahrzeugklimatisierung

Für ein angenehmes Innenraumklima müssen alle von außen kommenden Störgrößen kompensiert werden. Dazu wird die Umgebungsluft angesaugt, im Klimagerät konditioniert und in den Fahrgastraum eingeblasen. Durch Regelung der Ausblastemperatur, des Luftmassenstroms und der Luftverteilung nimmt die Fahrzeugklimatisierung Einfluss auf die thermischen Bedingungen im Innenraum. Im Fall einer Klimaautomatik liefern Sensoren Informationen zu den thermischen Randbedingungen der Umwelt und den klimatischen Bedingungen im Innenraum um einen gleichbleibenden Komfort bereitzustellen. Die Fahrzeugklimatisierung hat nicht nur das Ziel ein behagliches Klima zu schaffen, sondern auch die Aufgabe alle Scheiben zu enteisen und Beschlag zu verhindern, sodass zu jeder Jahreszeit eine permanente Sicht auf die Straße gewährleistet ist. Zudem beeinflusst die Fahrzeugklimatisierung die Leistungsfähigkeit des Menschen, indem sie hohe Innenraumtemperaturen im Sommer verhindert und somit die Reaktionszeiten verkürzt [114, 122].

Das bisher betrachtete System kann rein physikalisch beschrieben werden. Zwischen dem System Fahrzeugklima und Menschen erfolgt ebenfalls ein Wärmeaustausch. Die Wärmetransportmechanismen in diesem System werden im Zusammenhang mit der Thermophysiologie des Menschen im nächsten Abschnitt betrachtet.

3.2 Thermophysiologie des Menschen

Der Mensch gehört zu den homoiothermen Lebewesen, da seine Körperkerntemperatur in gewissen Grenzen konstant gehalten wird. Die Existenz des Menschen ist an eine permanente Wärmeabgabe gebunden. Unabhängig von den Umgebungsbedingungen versucht der Körper diese Bedingungen durch Thermoregulation aufrechtzuerhalten [94]. Der menschliche Körper verfügt über diverse Mechanismen die Körperkerntemperatur zu regulieren [40, 109]. Ein vereinfachtes Schema der Thermoregulation ist in Abbildung 3 dargestellt.

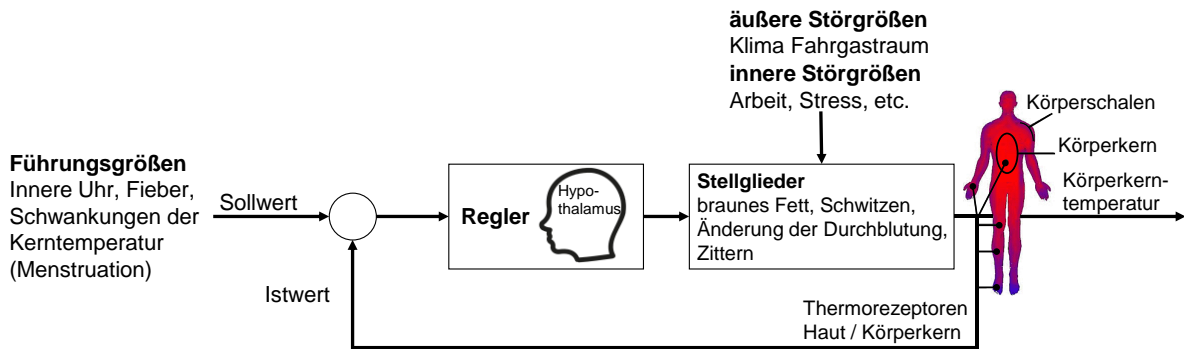


Abbildung 3: Thermoregulation des Menschen, basierend auf [59]

Der Sollwert stellt eine eher hypothetische Größe dar und ist erreicht, wenn weder Mechanismen der Kälteabwehr noch der Wärmeabwehr aktiv sind. Unterschiedliche Rezeptoren im Körper und der Haut geben Rückmeldung über den aktuellen thermischen Zustand. Diese Informationen werden im Hypothalamus verarbeitet und setzen Steuersignale der autonomen Thermoregulation in Bewegung. Eine Übersicht der Regulierungsmechanismen wird in Tabelle 8 zusammengefasst.

Tabelle 8: Effektoren der menschlichen Temperaturregulation, basierend auf [109, S. 844]

Mechanismen Kälteabwehr	Effekt
braunes Fettgewebe	Wärmeproduktion durch Oxidation von Fettsäuren
Vasokonstriktion	Reduzierung des konvektiven Wärmeübergangs durch Reduzierung der Durchblutung
Zittern	Wärmeproduktion durch rhythmische Muskelkontraktionen
Mechanismen Wärmeabwehr	Effekt
Vasodilatation	Steigerung des konvektiven Wärmeübergangs durch Steigerung der Durchblutung
Schweißproduktion	Abfuhr von Wärme durch Evaporation (Verdunstung)

Die Thermoregulation hat das Ziel ein Gleichgewicht zwischen Wärmeabgabe und Wärmeproduktion einzustellen. Die Wärmebilanz lässt sich durch folgende Gleichung beschreiben [75, S. 284]

$$\dot{Q}_{\text{Körper}} = m_{\text{Körper}} c_{\text{Körper}} \Delta \dot{T} = \Delta \dot{Q}_{\text{Produktion}} - \Delta \dot{Q}_{\text{Verluste}}, \quad (5)$$

mit	$\dot{Q}_{\text{Körper}}$	Wärmestrom des Körpers	[W],
	$m_{\text{Körper}}$	Körpermasse	[kg],
	$c_{\text{Körper}}$	spezifische Wärmekapazität	[J/kg K],
	$\Delta \dot{T}$	zeitliche Temperaturänderung	[K/s],
	$\Delta \dot{Q}_{\text{Produktion}}$	Wärmeproduktion des Körpers	[W],
	$\Delta \dot{Q}_{\text{Verluste}}$	Wärmeabgabe des Körpers	[W].

Produziert der Körper mehr Wärme als er abgeben kann, steigt die Körperkerntemperatur. Die Thermoregulation hält die Körperkerntemperatur konstant bei $37^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ für einen großen Bereich an Umgebungstemperaturen. Unter Berücksichtigung der

äußeren Gewebeschichten, die als Körperschalen bezeichnet werden, ergeben sich jedoch unterschiedliche Hauttemperaturen. In Abbildung 4a ist der Verlauf der Körperkern-, der mittleren Haut- und der Fingertemperatur in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur dargestellt. Bei Umgebungstemperaturen unterhalb von 36°C kühlen die Körperschalen stärker aus und der Körper steigert ab 34°C die Wärmeproduktion zur Aufrechterhaltung der Körperkerntemperatur. Das Konzept der Wärmebilanzen ist ein häufig gewählter Ansatz zur Modellierung von Klimakomfort. Entsprechende Modelle werden in Abschnitt 3.6 erläutert.

Unter normalen thermischen Bedingungen erfolgt ca. 60% der Wärmeabgabe des Menschen durch Strahlung [51]. Ab einer Umgebungstemperatur größer gleich der Körperkerntemperatur kann die Wärmeabgabe ausschließlich über Evaporation erfolgen, da kein Temperaturgefälle zur Umgebung mehr vorhanden ist. Die Wärmeabgabe des Menschen durch Strahlung, Konvektion und Evaporation, in Abhängigkeit zur Umgebungstemperatur, ist in Abbildung 4b visualisiert. Die rote Kurve stellt die resultierende Wärmeabgabe des Körpers dar und entspricht der Summe aus allen drei Wärmetransportmechanismen. Mit der grünen Kurve wird der Wärmeverlust durch Evaporation in Relation gestellt. Evaporation von Schweiß auf der Haut ist die effektivste Form der Wärmeabgabe. Ab einer Umgebungstemperatur oberhalb der Körperkerntemperatur erfolgt die Wärmeabgabe überwiegend durch Evaporation. In Kombination mit konvektiven Einflüssen der Umgebung steigt die Wärmeabgabe stark an, was schnell als unangenehm empfunden wird.

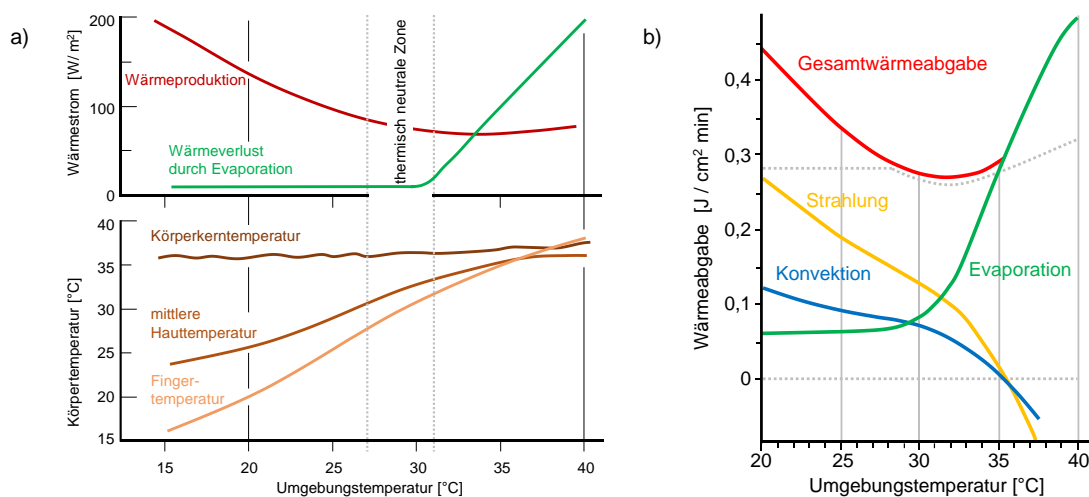


Abbildung 4: a) Wärmeproduktion, Wärmeverlust, Körperkern-, mittlere Haut- und Fingertemperatur in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur; b) Wärmeübertragung des Menschen in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur [86, S. 572, 109, S. 847]

Die Regulationsmechanismen sind nicht nur von der Umgebungstemperatur abhängig, sondern auch von der thermischen Wahrnehmung der Umgebung. Diese und weitere Einflussfaktoren werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

3.2.1 Thermische Wahrnehmung

Die thermische Wahrnehmung der Umgebung erfolgt durch Thermorezeptoren, die sich in der Haut befinden [57, 134]. Die Thermorezeptoren beeinflussen Mechanismen der Wärmeproduktion $\Delta\dot{Q}_{Produktion}$ und des Wärmeverlusts $\Delta\dot{Q}_{Verlust}$.

Allgemein wird dabei zwischen Kälte- und Wärmerezeptoren unterschieden. Die Verteilung der Kälterezeptoren wird in Abbildung 6a veranschaulicht. Aufgrund von Adaptionseffekten kann bei Hauttemperaturen zwischen 30°C und 35°C das Kälte- und Wärmeempfinden verschwinden. Wie in Abbildung 5 dargestellt wird dieser Bereich als thermische Indifferenzzone bzw. als thermisch neutral bezeichnet. Temperaturen unterhalb und oberhalb der thermischen Neutralität lösen Reize aus die von den Rezeptoren als dauerhaft kalt bzw. dauerhaft warm wahrgenommen werden.

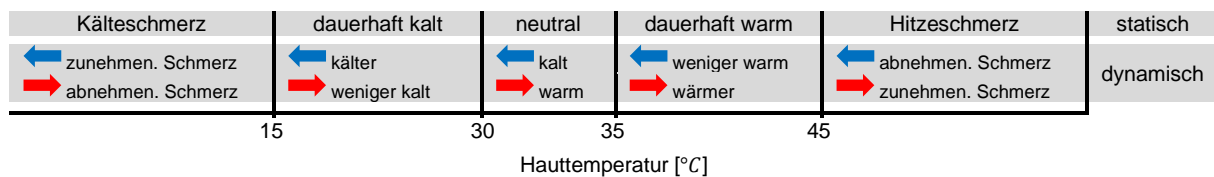


Abbildung 5: Wahrnehmung der Thermorezeptoren, basierend auf [109, S. 289]

Bei statischen Temperaturempfindungen weisen die Kälterezeptoren eine maximale Empfindlichkeit zwischen 20-25°C und die Wärmerezeptoren zwischen 40-45°C auf. Die in Abbildung 6b dargestellte Aktionspotenzialrate der Kälte- und Wärmerezeptoren haben in diesen Temperaturbereichen jeweils ein Maximum. Links und rechts von den Maximalwerten ist der Informationsfluss nicht eindeutig, da die gleiche Aktionspotenzialrate durch zwei verschiedene Temperaturen verursacht werden kann. Nur im Bereich von 30-40°C sind beide Typen der Rezeptoren aktiv und ein eindeutiger Informationsfluss ist gewährleistet. Bei schneller Erhitzung der Haut auf über 45°C kommt es kurzzeitig zu einer paradoxen Kälteempfindung, aufgrund einer steigenden Aktionspotenzialrate der Kälterezeptoren. Dieser Reiz wird anschließend durch einen Hitzeschmerz abgelöst [109].

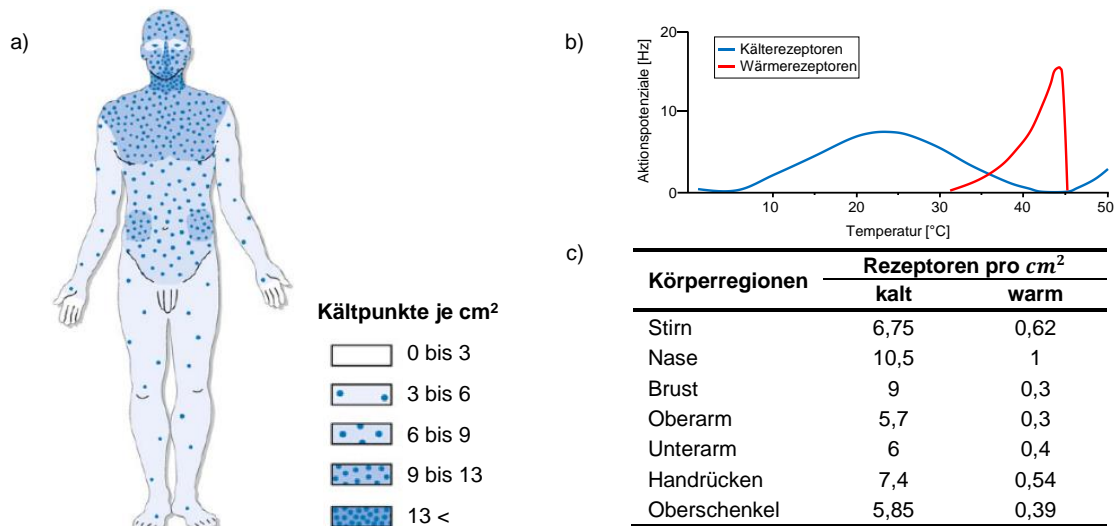


Abbildung 6: a) Verteilung der Kälterezeptoren; b) Sensitivität der Kälte- und Wärmerezeptoren; c) Vergleich der Verteilung an Kälte- und Wärmerezeptoren [57, 86, 109, 290; 843]

Die Verteilung wie auch die Sensitivität der Rezeptoren unterscheidet sich von Körperregion zu Körperregion. Wie in Abbildung 6a zu erkennen weisen die Extremitäten eine sehr geringe Dichte an Kälterezeptoren auf. Kopf, Nacken, Brust und Nierenregion sind dagegen deutlich empfindlicher gegenüber kühlen Reizen. Im Vergleich zu den Kälterezeptoren ist die Verteilungsdichte der Wärmerezeptoren in Abbildung 6c deutlich geringer. Mit einem Wärmerezeptor zu 10,5 Kälterezeptoren pro cm^2 ist die Dichte der jeweiligen Rezeptoren im Bereich der Nase am größten.

Nach Zhang kann die thermische Wahrnehmung in *Empfinden* und *Komfort* unterteilt werden. Dem *Empfinden* kann einen objektiven Charakter zugeschrieben werden, wenn z.B. zwischen einem gekühlten und geheizten Fahrzeuginnenraum differenziert werden soll. Ob der entsprechende Reiz als positiv wahrgenommen wird, bestimmt die subjektive Komponente *Komfort* [141]. Gleiche thermische Zustände können in Abhängigkeit des physiologischen Zustands mal als angenehm oder unangenehm bewertet werden. Dieses Phänomen wird als thermische Allästhesie bezeichnet [133]. Allästhesie ist ein psychophysiologisches Phänomen, das eine abhängige Beziehung zwischen dem inneren Zustand eines Organismus und einem als Freude oder Unbehagen wahrgenommenen Reiz beschreibt. Für mehr Informationen zu dem Thema Allästhesie wird auf die Arbeiten von Cabanac [17] und Parkinson et al. [91, 92] verwiesen.

3.2.2 Metabolismus

Die Wärmeproduktion $\Delta\dot{Q}_{Produktion}$ in Gleichung 5 wird in Grundumsatz und Muskelarbeit unterteilt. Zum Grundumsatz oder auch *Basal Metabolic Rate* (BMR) zählen alle biologischen Prozesse zur Aufrechterhaltung der Vitalfunktionen. Der menschliche Stoffwechsel hängt dabei vom Gesundheitszustand, Alter, Geschlecht und Art der Ernährung ab. Je nach Körpergewicht produziert ein erwachsener Mensch im Ruhezustand zwischen 60 bis 100 Watt. Durch körperliche Tätigkeiten erfolgt eine zusätzliche Wärmeproduktion durch Muskelarbeit, die den Grundumsatz deutlich übersteigen kann. Bei kontinuierlichen Tätigkeiten, z.B. Laufen eines Marathons, kann die Wärmeproduktion schnell Werte von 1180 Watt und mehr erreichen [115].

Allgemein werden der Grundumsatz und die Muskelarbeit als Leistungsdichte (Arbeit pro Körperfläche) mit der Einheit met (metabolic equivalent of task) angegeben [39, S. 7]

$$1 \text{ met} \hat{=} 58,2 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}. \quad (6)$$

In Tabelle 9 ist eine Übersicht der Energieumsätze für unterschiedliche Tätigkeiten dargestellt. Bei einer sitzenden Tätigkeit (1 met) hat ein durchschnittlicher Mann mit einer Körperfläche von ca. $1,8 \text{ m}^2$ einen Energieumsatz von ca. 100 Watt.

Tabelle 9: Energieumsatz unterschiedlicher Tätigkeiten [36, S. 23]

Aktivität	met	W/m ²
Schlafen	0,7	40
Liegen	0,8	45
Ruhezustand, Sitzen	0,9	55
Sitzende Tätigkeit (Büro, Wohnung, Schule, Labor)	1,2	70
Leichte Tätigkeit im Stehen (Einkaufen, Labor, leichte Industriearbeit)	1,6	95
Mäßig schwere Tätigkeit (Verkaufstätigkeit, Hausarbeit, Maschinenbedienung)	2,0	115
Mittel schwere Tätigkeit (Arbeiten mit Handwerkzeug, z.B. Polieren)	2,7	160
Schwere Tätigkeit (Arbeiten mit Handwerkzeug, z.B. schweres Bohren)	4,0	230

3.2.3 Demografische Unterschiede

Das identische Umgebungsklima wird häufig von Männern und Frauen unterschiedlich bewertet. Die Unterschiede bei der thermischen Wahrnehmung sind auf physiologische Faktoren zurückzuführen. Männer haben in der Regel einen größeren Anteil an Muskelmasse im Verhältnis zur Fettmasse. Dadurch ergibt sich allgemein ein höherer Grundumsatz und in Abhängigkeit des Aktivitätslevels wird wie in Abbildung 7c darge-

stellt mehr Wärme erzeugt. Es ergeben sich außerdem Unterschiede bei der Verteilung der Fettmasse. Diese ist bei Männern im Gegensatz zu Frauen eher gleichmäßig über den Körper verteilt und schützt somit besser gegen Kälte. Betrachtet man den Aufbau der Haut ist die Epidermis (Oberhaut) von Männern etwa 15% dicker, sodass Wärme besser gespeichert wird. Einen weiteren nennenswerten Unterschied stellt das Verhältnis von Hautoberfläche zum Körpervolumen dar, welches bei Frauen größer ist als bei Männern. Die Bezugsfläche für den Wärmetransport (vgl. Formeln 2 bis 4) ist damit größer, weshalb Frauen bei gleichem Körpervolumen mehr Wärme an die Umgebung abgeben [29]. Ab einer Umgebungstemperatur von ca. 15°C drosselt der weibliche Körper die Durchblutung der Extremitäten zum Schutz der inneren Organe, weswegen Arme und Beine schneller auskühlen. Dieser Mechanismus ist evolutionär bedingt zur Sicherstellung der Fortpflanzung [120].

Weitere Unterschiede ergeben sich bei der Körperkerntemperatur, die je nach Tageszeit leichte Schwankungen aufweist. Diese Schwankungen sind über einen einzelnen Tag gesehen bei Männern und Frauen gleich, nicht jedoch über einen Zeitraum von einem Monat.

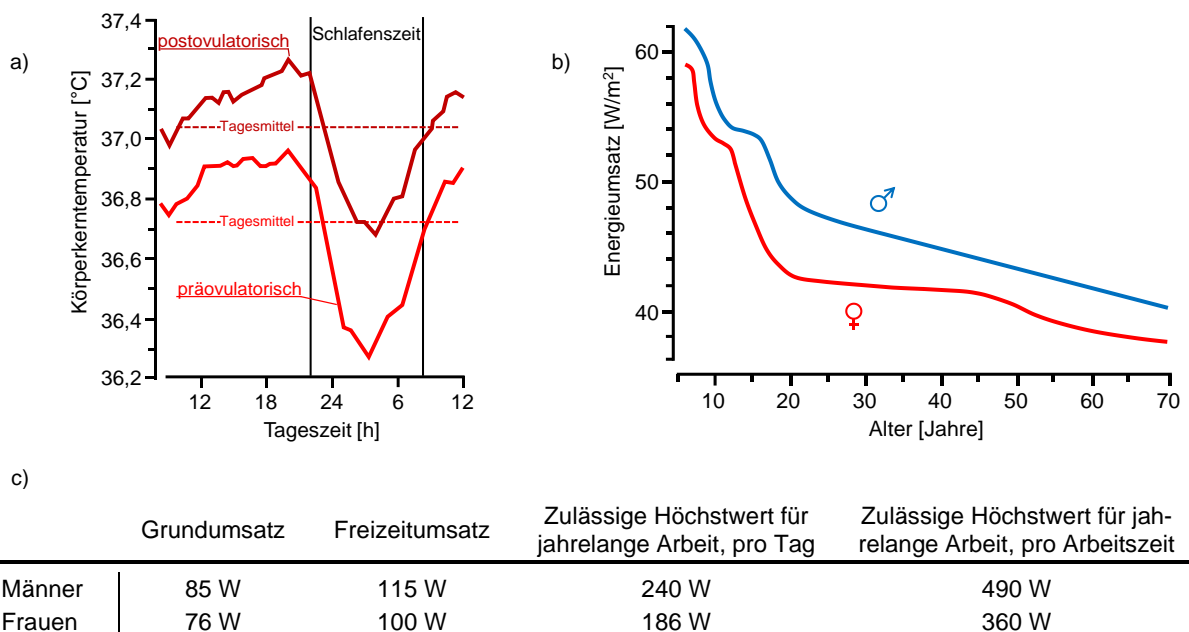


Abbildung 7: a) Tagesverlauf der Körperkerntemperatur von Frauen in der ersten Hälfte (präovulatorisch) und während der zweiten Hälfte (postovulatorisch) des Monatszyklus; b) Einfluss von Geschlecht und Alter auf den Metabolismus; c) Exemplarische Energieumsätze für eine 70 kg schwere Person [109, S. 838-839]

Die Änderungen der Körperkerntemperatur von Frauen über den Tagesverlauf, vor und nach dem Eisprung, werden in Abbildung 7a dargestellt. In der ersten Hälfte vom Zyklus (präovulatorisch) ist die Körperkerntemperatur durchschnittlich 0,5°C niedriger im Vergleich zur zweiten Hälfte (postovulatorisch). In Summe haben die physiologischen Unterschiede zur Folge, dass Frauen im Vergleich zu Männern schneller frieren. Speziell im Bereich der Extremitäten. Daher sollte bei Bewertungen des thermischen Komforts zwischen Männern und Frauen differenziert werden.

Eine weitere wichtige Differenzierung ist das Alter, da im höheren Alter die Mechanismen der Thermoregulation eingeschränkt sind. Beeinträchtigungen der Thermorezeptoren und eine verminderte Wärmeabgabe bei Belastung sind dafür verantwortlich. Wie in Abbildung 7b dargestellt nimmt zusätzlich der Metabolismus mit steigendem Alter ab, weswegen der Körper weniger Wärme produziert. Daher bevorzugen ältere Menschen eine etwas höhere Umgebungstemperatur [56, 86, 124, 126]. Mit steigendem Lebensalter sinkt der Energieumsatz bei Frauen im Vergleich zu Männern deutlich stärker ab, womit sich die geschlechterspezifischen Unterschiede in Bezug auf das thermische Empfinden noch stärker ausprägen könnten.

3.2.4 Kleidung

Kleidung hat einen starken Einfluss auf das thermische Empfinden des Menschen. Sie isoliert den Körper und reduziert den konduktiven, konvektiven und strahlungsgebundenen Wärmeverlust $\Delta\dot{Q}_{Verlust}$ an die Umgebung. Ist der Wärmeverlust zu groß stellt sich ein kaltes, und bei zu geringem Wärmeverlust ein warmes thermisches Empfinden ein. Entsprechend den Umgebungsbedingungen passt der Mensch seine Bekleidung an. Der Isolationsgrad wird typischerweise in der Einheit clo angegeben [37, S. 6]

$$1 \text{ clo} \cong 0,155 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}. \quad (7)$$

Ein clo-Wert von eins entspricht normaler Tageskleidung bestehend aus Unterwäsche, Hemd, Hose, Jacke, Socken und Schuhe. Weitere Isolationswerte für unterschiedliche Kleidungsstücke sind in Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10: Thermische Isolationswerte von Kleidungsstücken für Männer und Frauen, basierend auf [4]

Männer		clo	Frauen		clo
Unterwäsche	Unterhemd	0,06	Unterwäsche	Büstenhalter und Slip	0,05
	T-Shirt	0,09		Minislip	0,13

	Slip	0,05		Slip	0,19
	Unterhemd-lange Ärmel	0,35		Unterhemd-lange Ärmel	0,35
	Unterhose-lange Beine	0,35		Unterhose-lange Beine	0,35
Hemd	leicht, kurze Ärmel	0,14	Bluse	leicht	0,20
	Leicht, lange Ärmel	0,22		schwer	0,29
	schwer, kurze Ärmel	0,25	Kleid	leicht	0,22
	schwer, lange Ärmel	0,29		schwer	0,70
Weste	leicht	0,15	Rock	leicht	0,10
	schwer	0,29		schwer	0,22
Hose	leicht	0,26	Hose	leicht	0,26
	schwer	0,32		schwer	0,44
Pullover	leicht	0,20	Pullover	leicht	0,17
	schwer	0,37		schwer	0,37
Jacke	leicht	0,22	Jacke	leicht	0,17
	schwer	0,49		schwer	0,37
Socken	knöchellang	0,04	Strümpfe	leicht	0,01
	knielang	0,10		schwer	0,01
Schuhwerk	Sandalen	0,02	Schuhwerk	Sandalen	0,02
	Schuhe	0,04		Schuhe	0,04
	Stiefel	0,08		Stiefel	0,08

3.2.5 Zugluft

Zugluft wird definiert als „unerwünschte lokale Abkühlung des Körpers durch Luftbewegungen“ [39, S. 6]. Sie wirkt sich damit negativ auf das Wohlbefinden aus und zählt zu einer der häufigsten Ursachen für lokale Unbehaglichkeit. Die Beeinträchtigung durch Zugluft kann als *draught rating* (DR) bezeichnet werden. Sie gibt den vorausgesagten Prozentsatz an Menschen an, die sich durch Zugluft beeinträchtigt fühlen [39]. Aktuelle Grenzwerte stammen aus dem Bereich der Gebäudeklimatisierung. Diese lassen sich nicht ohne weiteres auf die Fahrzeugklimatisierung übertragen. Das in der EN ISO 7730:2006-04 definierte Zugluftmodell ist beispielsweise nur gültig für einen kleinen Temperaturbereich zwischen 20°C bis 26°C und niedrige Luftgeschwindigkeiten unter 0,5 m/s. Laufende Untersuchungen des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) betrachten neben der Luftgeschwindigkeit auch den Einfluss des Turbulenzgrads der Luftströmung. Zwischenergebnisse zeigen einen messbaren Einfluss des Turbulenzgrads auf den thermischen Komfort. Die Untersuchungen verdeutlichen zudem den Einfluss der Fahrzeugumgebung, da Luftgeschwindigkeiten hier häufig anders wahrgenommen werden [130].

3.3 Definition der Systemgrenzen Mensch – Fahrzeugklima

Zusammenfassend sollen die Grenzen für die bereits vorgestellten Systeme definiert werden. Das System Mensch wird dabei in drei Teilsysteme, Kleidung, Haut und Körper, unterteilt. Am Beispiel unterschiedlicher Temperaturen sind die Systemzusammenhänge in Abbildung 8 dargestellt. Die Karosserie inklusive Scheiben stellt die erste thermodynamische Grenze zur Umwelt dar, in Kombination mit dem HVAC-System wird Einfluss auf das Innenraumklima genommen. Das Innenraumklima nimmt dabei wiederum Einfluss auf die Oberflächentemperatur der Kleidung. Somit stellt die Oberflächentemperatur der Kleidung die zweite thermodynamische Grenze dar. Durch die Wahl der Kleidung bzw. des Isolationsgrades erfolgt eine Beeinflussung der Hauttemperatur. Der Kontaktbereich zwischen Kleidung und Haut stellt somit die dritte thermodynamische Grenze dar. Die vierte thermodynamische Grenze wird durch die Körperschalen gebildet und stellt den Übergang zur Körperkerntemperatur dar.

Bei zu warmen oder zu kalten Innenraumtemperaturen erfolgt beim Menschen eine Verhaltensanpassung, indem er die Einstellungen für die Fahrzeugklimatisierung ändert. Zusätzlich kann auch eine Anpassung der Kleidung erfolgen, um somit das Mikroklima der Kleidung zu verbessern. Auf die Haut- und Körperkerntemperatur hat der Mensch aufgrund der autonomen Anpassung der Thermoregulation nur indirekten Einfluss.

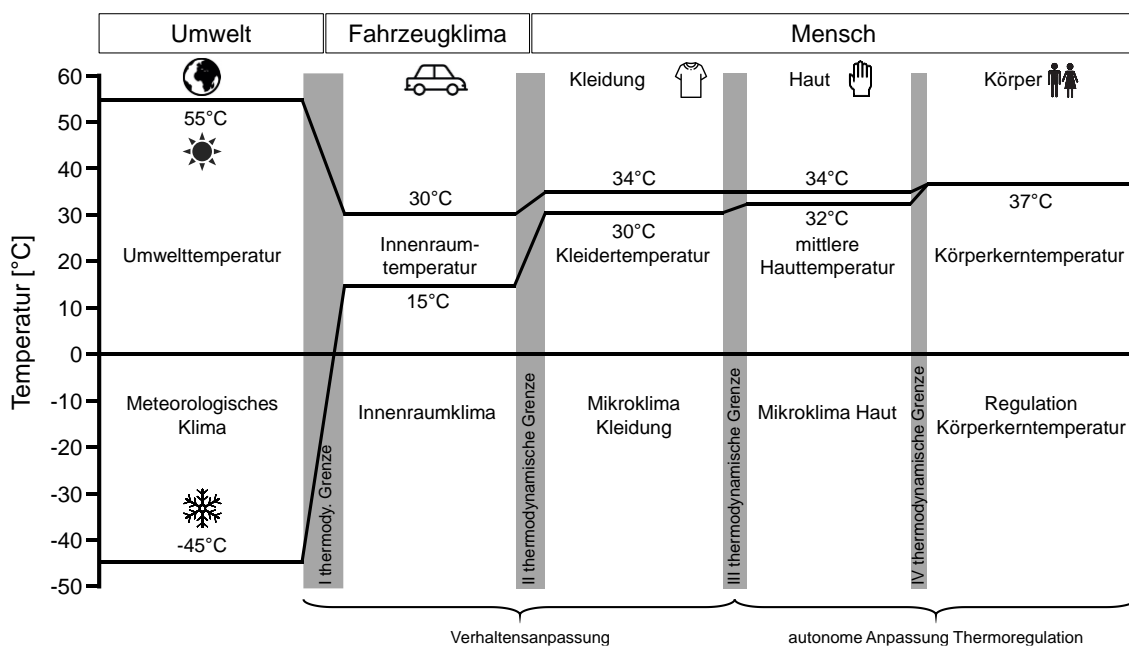


Abbildung 8: Thermodynamische Systemgrenzen: Umwelt – Fahrzeugklima – Mensch im stationären Fahrzeugbetrieb; basierend auf [71, S. 15, 109, S. 287]

Im Rahmen dieser Arbeit wird das Innenraumklima bis hin zum Mikroklima der Haut betrachtet, womit die Systemgrenzen durch die erste und vierte thermodynamische Grenze definiert ist. Das meteorologische Klima und die Regulationsmechanismen der Körperkerntemperatur haben einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die erste und vierte thermodynamische Grenze, sind jedoch nicht Hauptbestandteil der folgenden Untersuchungen.

Nachdem die Systemgrenzen klar definiert sind, wird im folgenden Abschnitt genauer auf die Definition und Einflussfaktoren des thermischen Komforts eingegangen.

3.4 Thermischer Komfort

Der thermische Komfort bzw. die thermische Behaglichkeit ist ein subjektiver Begriff, der durch eine Vielzahl von Empfindungen und Wahrnehmungen beeinflusst wird [21]. Die Definition der Wahrnehmungen ist nicht immer eindeutig und wird in der Literatur kontrovers diskutiert [8]. Allgemein finden sich in der Literatur viele verschiedene Ansätze *thermischen Komfort* zu beschreiben. Eine der bekanntesten Definitionen beschreibt den thermischen Komfort bzw. die thermische Behaglichkeit „...als Gefühl, das Zufriedenheit mit dem Umgebungsklima ausdrückt“ [39, S. 14]. Abweichend zu dieser Begriffsdefinition wird in der ASHRAE 55 die thermische Behaglichkeit als ein subjektives Konzept bezeichnet, welches sich auf das physische und psychische Wohlbefinden mit der Umgebung bezieht [4]. Diese formal einfachen Definitionen geben jedoch keinen Aufschluss darüber, wie thermischer Komfort quantifiziert werden kann.

Physiologische Unterschiede und damit verbundene persönliche Präferenzen machen es unmöglich alle Menschen unter identischen Klimabedingungen zufrieden zu stellen. Nach Fanger [41] ist die thermische Umgebung optimal, wenn der Prozentsatz an zufriedenen Menschen maximal ist. Zufriedenheit ist dann erreicht, wenn diese Menschen kein Bedürfnis verspüren das Klima zu ändern bzw. ihr Verhalten anzupassen. Wie in Abschnitt 2.1 erläutert, setzt sich der Komforteindruck aus einer komplexen Verkettung physikalischer, physiologischer und intermediärer Bedingungen zusammen. Die jeweiligen Einflussfaktoren wirken sich unterschiedlich auf die thermische Behaglichkeit aus. Wie in Abbildung 9 dargestellt können diese in primäre, sekundäre und zusätzliche Faktoren unterteilt werden. Eine direkte messtechnische Erfassung der thermischen Behaglichkeit ist somit nicht möglich, weswegen viele Studien sich

darauf konzentrieren, physikalische Zustände und physiologische Reaktionen mit dem resultierenden Komfort zu korrelieren. In diesem Kontext kann thermischer Komfort als *kognitive Interpretation der physiologischen Antwort auf die physikalischen Zustände der thermischen Umgebung* beschrieben werden.

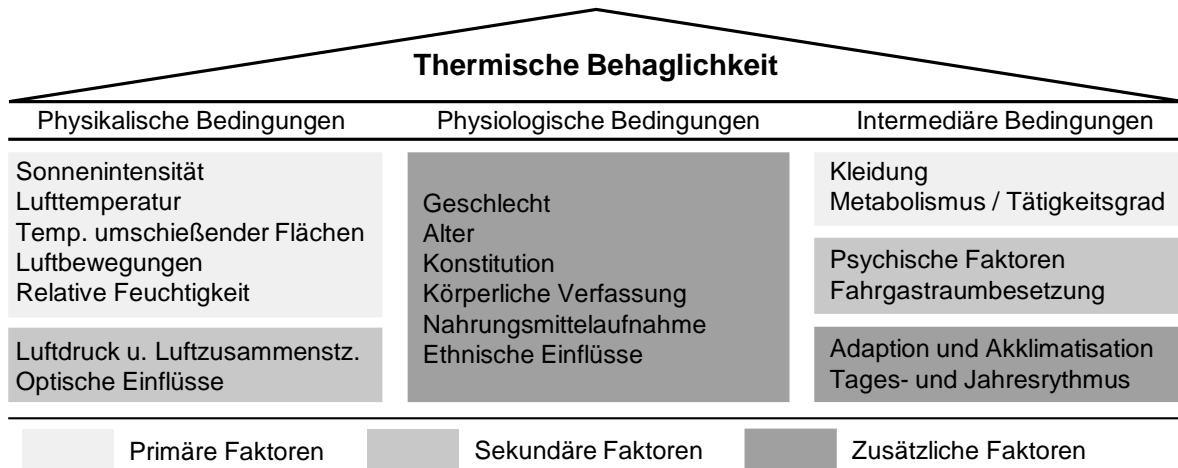


Abbildung 9: Einflussfaktoren auf die thermische Behaglichkeit, basierend auf [48, S. 13, 113]

Die physikalischen Zustände und davon abhängige physiologischen Reaktionen folgen dabei deterministischen Gesetzmäßigkeiten, wohingegen die kausalen Zusammenhänge der kognitiven Interpretation nur stochastisch beschrieben werden können. Die physiologische Reaktion und kognitive Interpretation sind stark subjektiv geprägt, wohingegen die physikalischen Bedingungen der thermischen Umgebung sich objektiv bestimmen lassen [133].

Wirken die Einflussfaktoren der physikalischen Bedingungen lokal auf einzelne Körperregionen, muss zwischen globalem und lokalem thermischen Komfort differenziert werden. Im folgenden Abschnitt werden diese Begriffe genauer erläutert.

Globaler und lokaler thermischer Komfort

Im Gegensatz zur Gebäudeklimatisierung wird das Innenraumklima im Fahrzeug stark von dem Umgebungsklima beeinflusst (vgl. Abschnitt 3.1). Sonneneinstrahlung, warme und kalte Oberflächen haben somit einen direkten Einfluss auf den lokalen thermischen Komfort. Dabei bezeichnet lokaler Komfort das thermische Empfinden von einzelnen Körperteilen, während globaler Komfort beschreibt wie sich ein Insasse aus thermischer Sicht insgesamt fühlt - z.B. *zu warm* oder *zu kalt* [111]. Trotz aktiver Klimatisierung des Innenraums sind im Fahrzeug die lokal wirkenden Einflüsse nicht

zu vernachlässigen, womit eine rein globale Betrachtung des thermischen Komforts ungenügend ist.

Ausgehend vom Konzept des lokalen thermischen Komforts werden immer mehr Untersuchungen durchgeführt, um festzustellen wie lokale Bewertungen einzelner Körperregionen sich auf den globalen thermischen Komfort auswirken [134]. Erste Modelle berechneten den globalen thermischen Komfort anhand einer Mittelwertbildung mit einfachen Wichtungen der verschiedenen Körperteile. Unterschiedliche Experimente führten dabei zu unterschiedlichen Wichtungsfaktoren [111]. Streblov [116] kam in einer Studie mit 290 Probanden zum Ergebnis, dass Diskomfort im Wesentlichen von lokalen Bewertungen am Kopf, Schultern und Beinen resultiert. Zeitgleich haben lokal der Kopf und die Schultern auch einen positiven Einfluss auf den globalen thermischen Komfort, ebenso wie das Becken und die Füße.

Sofern kein großes Ungleichgewicht zwischen den Körperregionen herrscht, kann nach Zhang [141] der Gesamtkomfort durch die einfache Mittelung der lokalen thermischen Bewertungen erfolgen. Wird jedoch eine der folgenden Voraussetzungen erfüllt, ergibt sich der globale thermische Komfort aus dem Mittelwert der beiden kleinsten und der größten lokalen Komfortbewertung (9-stufige-Skala zur Bewertung des thermischen Empfindens, vgl. Tabelle 4):

- a) Die zweit kleinste lokale thermische Bewertung ist kleiner $-2,5$ (*kühl / kalt*).
- b) Die thermische Umgebung kann in gewissen Grenzen kontrolliert werden oder die thermischen Bedingungen sind transient.

Park et al. [87] hat in einer Studie untersucht wie groß die Unterschiede lokaler Bewertungen einzelner Körperregionen ausfallen und inwieweit sich mehrere Körperregionen zusammenfassen lassen, um Aussagen über den globalen thermischen Komfort treffen zu können. In Summe wird der globale thermische Komfort primär von drei Körperregionen, Kopf/Nacken, Oberkörper/Arme und Beine/Füße bestimmt. Der Einfluss auf das Gesamttempfinden ist je nach Körperregion unterschiedlich. In warmen Umgebungen dominiert das thermische Empfinden im Kopfbereich, während bei neutralen Bedingungen der Einfluss der unteren Extremitäten und bei kühlen Umgebungsbedingungen zusätzlich der Oberkörper den globalen Komfort bestimmt.

Die vorgestellten Ansätze sollen verdeutlichen, dass die Bestimmung des Gesamtempfindens auf Basis lokaler Bewertungen in inhomogenen Klimasituationen schwierig zu bestimmen sind und generell von einigen persönlichen Randbedingungen abhängen. Der Einfluss bestimmter Körperregionen auf den globalen thermischen Komfort unterscheidet sich zudem, ob die jeweilige Region als warm bzw. kalt empfunden wird [110].

3.5 Metriken zur objektiven Erfassung des Raumklimas

Das Raumklima setzt sich aus den folgenden unabhängigen Klimagrundgrößen zusammen: Lufttemperatur, mittlere Strahlungstemperatur, absolute Luftfeuchtigkeit, Luftgeschwindigkeit und Oberflächentemperatur. Für detaillierte Erklärungen und Methoden der messtechnischen Erfassung wird auf die DIN EN ISO 7726:2002-04 [35] verwiesen. Je nach Wechselwirkung der Klimagrundgrößen ergeben sich stationäre homogene Umgebungsbedingungen bis hin zu einem sehr dynamischen inhomogenen Raumklima [106].

Die Wirkung der Klimagrundgrößen auf den Menschen können sich gegenseitig kompensieren. Beispielsweise kann warme, bewegte Luft das gleiche thermische Empfinden hervorrufen, wie kühlere, unbewegte Luft. Basierend auf dieser Erkenntnis sind Klimasummenmaße entwickelt worden. Sie integrieren mehrere, für das thermische Empfinden wesentliche, Klimagrundgrößen, um somit die Vergleichbarkeit von unterschiedlichen Klimabedingungen zu ermöglichen [111, 127]. Im nächsten Absatz wird eine Auswahl an Klimasummenmaßen vorgestellt und ihre Eignung zur Bewertung dynamischer inhomogener Klimabedingungen im Fahrzeug bewertet.

Operativtemperatur T_o – wurde von Gagge [50] eingeführt und beschreibt eine „gleichmäßige Temperatur eines imaginären schwarzen Raumes, in dem eine Person die gleiche Wärmemenge durch Strahlung und Konvektion austauschen würde wie in der bestehenden nicht gleichmäßigen Umgebung“ [32, S. 10, 39, S. 5]. Die Operativtemperatur wird für die einheitliche Beschreibung der Umgebungsbedingungen hinsichtlich der Lufttemperatur und Strahlung verwendet. Sie findet Anwendung in natürlich belüfteten Räumen mit großflächigen, weitgehend gleichmäßig erwärmten Wänden ohne Zwangskonvektion und Sonneneinstrahlung. Der

Einsatz im Fahrzeug ist nicht geeignet da typische Randbedingungen wie Strahlungsasymmetrien, größere Luftgeschwindigkeiten sowie direkte Sonneneinstrahlung nicht berücksichtigt werden.

Effektivtemperatur T_{et} – wurde von Yaglou [139] entwickelt und ist eines der ersten Klimasummenmaße zur Bewertung des thermischen Raumklimas. Sie stellt eine fiktive Lufttemperatur dar, die gegenüber unterschiedlichen Kombinationen aus Lufttemperatur, Feuchte und Luftbewegung das gleiche thermische Empfinden hervorruft. Die Normal- und Basis-Effektivtemperatur (T_{net} , T_{bet}) berücksichtigen zusätzlich noch unterschiedliche Isolationsgrade der Bekleidung. Unterschiedliche Turbulenzgrade der Luft werden bei der Effektivtemperatur nur unzureichend abgebildet. Sie berücksichtigt keine Wärmestrahlung weswegen die Anwendung im Fahrzeug nach DIN 33403-3:2011-07 nicht zulässig ist [30].

Äquivalenttemperatur T_{eq} – ist definiert als „Temperatur eines homogenen Raumes mit einer mittleren Strahlungstemperatur gleich der Lufttemperatur und einer Luftgeschwindigkeit von null, in dem der Wärmeverlust einer Person durch Konvektion und Strahlung dem Wärmeverlust unter den tatsächlich beurteilten Bedingungen entspricht“ [34, S. 5]. Im Kontext der thermischen Ergonomie ist die T_{eq} nach dem internationalen Standard DIN EN ISO 14505-2:2007-04 zur Beurteilung der thermischen Umgebung in Fahrzeugen oder anderen geschlossenen Räumen mit asymmetrischen oder uniformen Klimaverhältnissen anwendbar. Die Eignung der T_{eq} die thermische Umgebung in Fahrzeugen zu bewerten, wird durch die Forschungsvereinigung Automobiltechnik Schriftreihe 257 ebenfalls bestätigt [111].

Die T_{eq} integriert die thermischen Einflüsse inhomogener Umgebungsbedingungen, resultierend aus unterschiedlichen Oberflächentemperaturen, direkter Sonneneinstrahlung, variablen Lufttemperaturen sowie laminaren und turbulenten Strömungen, und überführt diese in einen homogenen Zustand. Für zwei unterschiedliche T_{eq} wird diese Modellvorstellung in Abbildung 10 veranschaulicht. Nicht berücksichtigt werden die Einflüsse der Luftfeuchtigkeit, womit sie aus physikalischer Sicht den sensiblen (trockenen) Wärmeübergang beschreibt. Die Luftfeuchtigkeit spielt beim Fahrzeugklima eine eher untergeordnete Rolle. Eine relative Feuchtigkeit (r.F.) der Luft zwischen 30% bis 70% hat keinen großen Einfluss auf den thermischen Komfort [28, 29, 113]. Die untere Grenze von 30% wird aus

medizinische Sicht empfohlen [16] und ab einer r.F. von 70% steigt die Schweißproduktion des menschlichen Körpers stärker an.

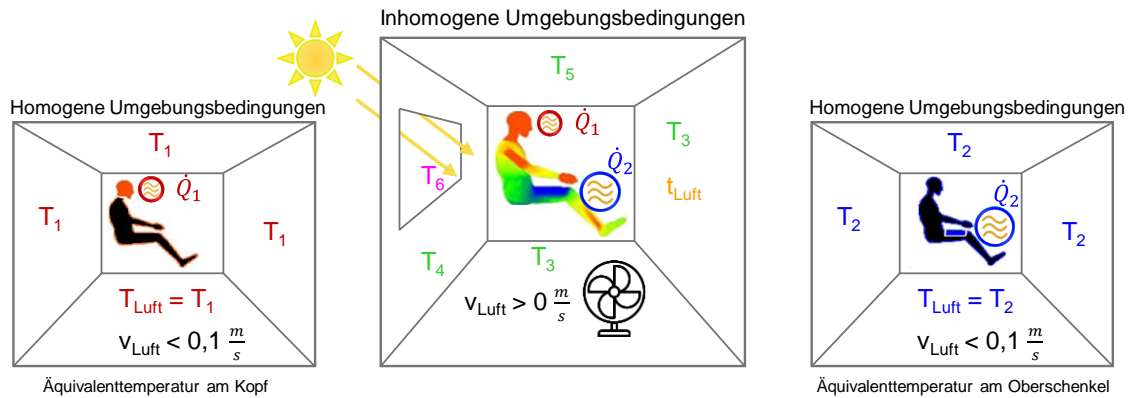


Abbildung 10: Überführung des Wärmeverlusts einer Person mit warmen Kopf \dot{Q}_1 unter inhomogenen Umgebungsbedingungen (mitte) in homogene klimatische Bedingungen (links), sowie die Überführung des Wärmeverlusts einer Person mit kühlen Oberschenkeln \dot{Q}_2 unter inhomogenen Umgebungsbedingungen (mitte) in homogene klimatische Bedingungen (rechts), basierend auf [82, 129].

Betrachtet man die Einflussfaktoren in Tabelle 11 verhält sich die T_{eq} ähnlich zum thermischen Empfinden des Menschen, weswegen sie umgangssprachlich auch als *gefühlte Temperatur* bezeichnet wird.

Tabelle 11: Einfluss der Klimagrundgrößen auf die T_{eq} , basierend auf [82, S. 38]

Klimagrundgröße	Veränderung	Einfluss
Luftgeschwindigkeit	↑	↓ T_{eq} sinkt
Lufttemperatur	↓	↓ T_{eq} sinkt
Strahlungstemperatur	↓	↓ T_{eq} sinkt
Luftgeschwindigkeit	↓	↑ T_{eq} steigt
Lufttemperatur	↑	↑ T_{eq} steigt
Strahlungstemperatur	↑	↑ T_{eq} steigt

Die T_{eq} berechnet sich allgemein anhand von Formel 8. Dabei setzt sich der Wärmeverlust q aus dem Wärmeaustausch durch Strahlung R und Konvektion C zusammen. Der Wärmeübergangskoeffizient wird für unterschiedliche Temperaturen in einer genormten homogenen Umgebung kalibriert.

$$T_{eq} = T_s - \frac{\dot{q}}{h_{cal}}, \quad (8)$$

mit	T_s	Oberflächentemperatur	[K]
	\dot{q}	Wärmestromdichte	[W/m ²]
	h_{cal}	Wärmeübergangskoeffizient	[W/m ² K]
	ΔT	Temperaturgradient	[K]

Je nach Messsystem gibt es unterschiedliche Methoden die T_{eq} zu bestimmen. Sind lokale Effekte von Interesse, wird die segmentbezogene Äquivalenttemperatur ($T_{eq,segment}$) ermittelt. Im Falle von globalen Betrachtungen erhält die T_{eq} im Index den Zusatz *whole*. Der Zusammenhang zwischen $T_{eq,segment}$ und $T_{eq,whole}$ wird anhand der Formeln 9 und 10 verdeutlicht

$$T_{eq,segment} = T_{s,segment} - \frac{q_{segment}}{h_{cal,segment}}, \quad (9)$$

$$T_{eq,whole} = \sum_{s=1}^n \left(T_{eq,segment} \cdot \frac{A_{segment}}{A_{whole}} \right), \quad (10)$$

mit $A_{segment}$ Fläche Körpersegment $[m^2]$,
 A_{whole} Gesamte Fläche Körper $[m^2]$.

Umfangreiche Begriffsdefinitionen der T_{eq} sind der DIN EN ISO 14505-2:2007-04 [34] zu entnehmen und für Informationen zur historischen Entwicklung werden die Arbeiten von Nilsson [82, 84] empfohlen.

In dieser Arbeit stellt die T_{eq} die zentrale Bewertungsgröße zur objektiven Beschreibung der thermischen Umgebung im Fahrzeug dar. Sie ist eine rein physikalische Messgröße und liefert damit keine direkten Informationen zum thermischen Komfort. Durch geeignete Modelle können jedoch Aussagen zum thermischen Komfort in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen getroffen werden. Diese werden im folgenden Abschnitt vorgestellt.

3.6 Modellierung von Klimakomfort

Die experimentelle Untersuchung des thermischen Komforts durch Probanden ist sehr zeitaufwändig, kostspielig und oftmals schwierig zu standardisieren [81]. Seit über 50 Jahren gibt es das Bestreben Modelle zu entwickeln, um den thermischen Komfort zu quantifizieren. Allgemein kann zwischen zwei Arten von Modellen unterschieden werden, thermophysiologische- und thermopsychologische Modelle [2, 21]. Mit dem Ziel die Vorteile der thermophysiologischen- und thermopsychologischen Modelle zu nutzen, wurde im Laufe der Zeit auch Kombinationen beider Modelle entwickelt.

3.6.1 Thermophysiologische Modelle

Der Hauptanreiz für die Entwicklung thermophysiologischer Modelle, besteht darin die thermische Reaktion des Menschen auf unterschiedliche Umgebungsbedingen vo-

rauszusagen [43]. Thermophysiologische Modelle sind mathematische Beschreibungen der physiologischen Reaktion auf komplexe Wärmeübertragungsmechanismen des menschlichen Körpers beeinflusst durch die unterschiedlichsten Umgebungsbedingungen [103]. Für das Verständnis thermischer Regulierungsmechanismen des menschlichen Körpers stellen sie ein wichtiges Werkzeug dar [65]. Wie bereits erwähnt (Abschnitt 3.2.1 & 3.2.4) wird der menschliche Körper in mehrere Schichten unterteilt, z.B. Körperkern, Muskulatur, Fett, Hautgewebe und zusätzlichen Bekleidungsschichten [53, 54]. Das Gewebesystem repräsentiert den menschlichen Körper mit all seinen physiologischen und thermischen Eigenschaften. Dagegen steuert das thermoregulatorische System die Effektoren der menschlichen Temperaturregulation (siehe Tabelle 8) [102].

Es gibt eine Vielzahl an thermophysiologischen Modellen für die unterschiedlichsten Anwendungsgebiete. Zu den bekanntesten Vertretern gehören die Modelle von Tanabe et al. [121], Fiala et al. [42–44], das Berkeley Comfort Model [64, 142] und ThermoSEM [68, 69]. Die Anwendung von thermophysiologischen Modellen zur Vorhersage des thermischen Komforts sind nicht durch internationale Standards anerkannt. Tiefere Einblicke zum Thema thermophysiologische Modelle bieten die Arbeiten von Katic et al. [66] und Foda et al. [45].

PMV und PPD Model

Den Grundstein für viele thermophysiologische Modelle hat Fanger 1970 mit dem PMV Model gelegt [41]. Es ist der bekannteste und am häufigsten verwendete Ansatz zur Beurteilung der thermischen Behaglichkeit in Gebäuden. Das PMV Modell wird beschrieben durch die empirisch ermittelte Komfortgleichung für den Wärmeaustausch des menschlichen Körpers [4, 39]

$$PMV = (0,303 \cdot e^{-0,036 \cdot M} + 0,028) \cdot W. \quad (11)$$

Dabei steht M für den metabolischen Energieumsatz und W für die wirksame mechanische Leistung in W/m^2 (nach Fanger, 1970). Das Modell basiert auf einer Kombination von Wärmebilanztheorien und der menschlichen Physiologie für Thermoregulation. Validiert wurde das Model für gleichmäßige und stationäre Umgebungsbedingungen [113]. Es beschreibt keine komplexen thermophysiologische Vorgänge des menschlichen Körpers, dennoch hat der Zusammenhang von thermischen Bilanzgleichungen den Grundstein für viele heutige thermophysiologische Modelle gesetzt [133].

Die Zufriedenheit oder Unzufriedenheit des Menschen mit der thermischen Umgebung wird in diesem Modell auf die folgenden sechs Variablen zurückgeführt werden: Lufttemperatur, mittlere Strahlungstemperatur, Luftgeschwindigkeit, relative Luftfeuchtigkeit, Aktivitätsniveau und Isolierung der Kleidung. Ergänzend zum PMV Model hat Fanger den Index Predicted Percentage Dissatisfied (PPD) vorgestellt um den Grad an Unzufriedenheit mit dem Umgebungsklima zu ermitteln [4, 39]

$$PPD = 100 - 95 e^{(-0,03353 PMV^4 - 0,2179 PMV^2)} . \quad (12)$$

Unter idealen thermischen Bedingungen ($PMV = 0$) sind nach dem PPD Model immer noch 5% der Bevölkerung unzufrieden mit dem Umgebungsklima. Zusammenfassend können mit dem PMV Model Aussagen zum thermischen Empfinden getroffen werden, während das PPD Model eine Interpretation hinsichtlich des thermischen Komforts ermöglicht. Für eine umfangreiche Diskussion des PMV-Modells mit möglichen Verbesserungspotenzialen wird auf die Arbeit von van Hoof [125] verwiesen.

3.6.2 Thermopsychologische Modelle

Bei den thermopsychologischen Modellen wird im Gegensatz zu den thermophysiologicalen Modellen die Reaktion des Menschen auf eine definierte Umgebungsbedingung nicht simuliert, sondern anhand von Fragebögen ermittelt. Die physiologische Reaktion, z.B. das thermische Empfinden des Menschen, wird in Verbindung mit den Umgebungsbedingungen beschrieben, um Aussagen zum thermischen Komfort treffen zu können. In der Regel werden Klimasummenmaße (vgl. Abschnitt 3.5) mit der thermischen Wahrnehmung von Probanden korreliert. Idealerweise resultieren unter den definierten thermischen Randbedingungen ähnliche physiologische Reaktionen des Menschen, sodass sich der thermische Komfort durch ein stochastisches Model beschreiben lässt. Beispiele von thermopsychologischen Modellen sind die Modelle von Cengiz et al. [18], Kulkarni et al. [74] und Shek & Chan [112]. Der bekannteste Ansatz, der in den internationalen Standard DIN EN ISO 14505-2:2007-04 aufgenommen wurde, ist das Komfortzonenmodell (KZM) von Nilsson [82]. Nilssons Komfortzonenmodell stellt damit die Ausgangsbasis der nachfolgenden Untersuchungen dar.

Nilssons Komfortzonenmodell

In zwei Studien, mit einem zeitlichen Abstand von 6 Jahren, hat Nilsson unterschiedliche Klimabedingungen in einer Fahrzeugkabine erzeugt, um die kognitive Antwort auf

die physiologische Reaktion von Probanden zu untersuchen [63, 83]. Zur objektiven Erfassung der thermischen Umgebungsbedingungen wurden beheizte Mannequins verwendet, die den Wärmeverlust an die Umgebung messen. Über den Wärmeverlust hat Nilsson die $T_{eq,segment}$ und $T_{eq,whole}$ bestimmt. In Summe haben 20 männliche Probanden 30 Klimabedingungen bewertet. Das vollständige Versuchsdesign ist Tabelle 12 zu entnehmen.

Tabelle 12: Versuchsdesign von Nilsson zur Ermittlung des thermischen Komfort für 30 stationäre Klimabedingungen [34, 63, 83]

	Studie 1		Studie 2	
Anzahl Probanden	♂:10 & ♀: 0		♂:10 & ♀: 0	
Messung T_{eq}	MANIKIN1 bekleidet		MANIKIN2 bekleidet	
Versuchszeit / Frageintervalle	60 Min. / 30 Min.		60 Min. / 30 Min.	
Komfortbewertung MTV-Skala	global und lokal		global und lokal	
Klimabedingungen	11 Sommer	9 Winter	5 Sommer	5 Winter
Kleidungsisolations	0,6 clo	1 clo	0,6 clo	1 clo
Umgebungstemperatur	30°C – 35 °C	-20°C	30°C – 35 °C	-20°C

Auf der Basis eines linearen Regressionsmodells mit $\overline{MTV}_{global} \sim 1 + T_{eq,whole}$ und $\overline{MTV}_{lokal} \sim 1 + T_{eq,segment}$ hat Nilsson die Komfortzonendiagramme für Sommer und Winter entwickelt. Dabei steht \overline{MTV} für die gemittelten Komfortbewertungen der Probanden und T_{eq} für die Messwerte der entsprechenden Klimabedingungen. Die in Abbildung 11 dargestellten Komfortzonenmodelle definieren Grenzwerte für die T_{eq} , zur Voraussage von globalem und lokalem thermischem Komfort.

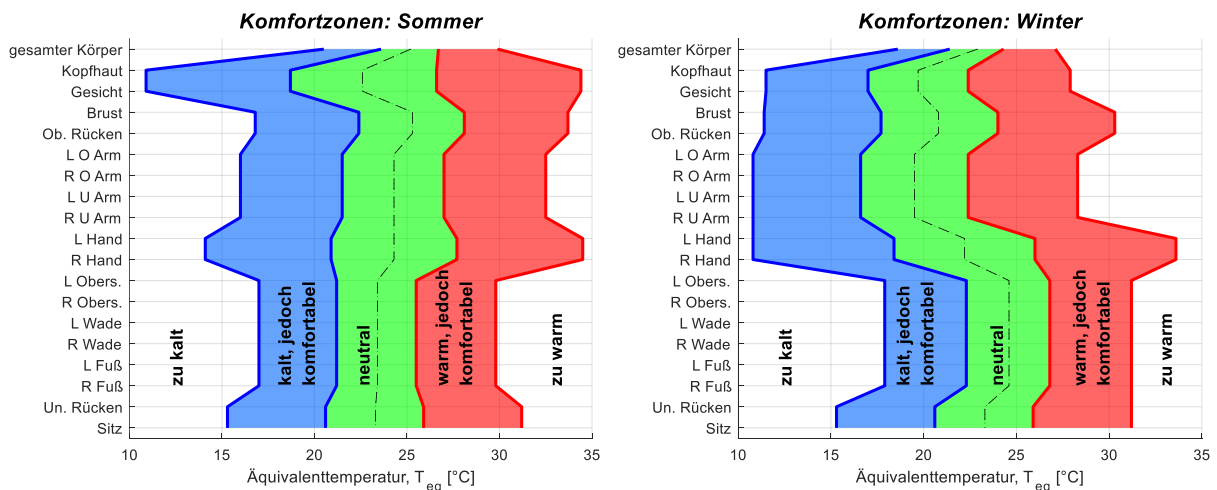


Abbildung 11: KZM nach Nilsson für Sommer- und Winterkleidung; Abkürzungen: L = links, R = rechts, O = oberer, U = unterer, basierend auf [82, S. 52]

Wie in Abbildung 11 dargestellt wird z.B. unter sommerlichen Umgebungsverhältnissen mit $T_{\text{eq,whole}} = 25,2^{\circ}\text{C}$ global ein thermisch *neutraler* Komfort erwartet, was einem MTV-Wert von 0 entspricht. Das KZM ermöglicht eine einfache Komfortbewertung stationärer inhomogener Umgebungsbedingungen anhand der T_{eq} . Das Modell ist jedoch durch die kleine und relativ homogene Probandenstichprobe limitiert. Zudem ist zu prüfen, inwieweit die mittlerweile über 24 Jahre alten Messungen und Komfortuntersuchungen aus heutiger Sicht noch aktuell sind.

4 Messtechnische Erfassung der thermischen Umgebung

In diesem Kapitel wird die messtechnische Erfassung der thermischen Umgebung für das thermodynamische System „Umwelt – Fahrzeugklima“ analysiert. Diese Untersuchungen sind grundlegend für die Bewertung des thermischen Komforts im Pkw, weswegen sämtliche Aspekte für eine Standardisierung von Äquivalenttemperaturmessungen betrachtet werden.

Zum Beginn des Kapitels werden die verwendeten Prüfstände vorgestellt, da diese wichtige Randbedingungen der Umwelt und des Fahrzeugklimas definieren. Im Anschluss wird das Messsystem zur Erfassung der T_{eq} vorgestellt, da die T_{eq} die zentrale Bewertungsgröße dieser Arbeit darstellt. Darauf folgende Untersuchungen gehen auf versuchsrelevante Einflussfaktoren, wie die Ausströmer und Sitzposition ein und betrachten die Sensitivitäten bei Messwiederholungen. Abschließend werden Richtlinien zur Versuchsdurchführung von Äquivalenttemperaturmessungen abgeleitet.

4.1 Prüfstände

Exakte und reproduzierbare Einstellungen der Klimabedingungen sind für präzise Messungen der T_{eq} von großer Bedeutung. Realfahrtversuche unterliegen vielen Schwankungen der Umwelt und eignen sich deswegen nur bedingt für die Durchführung von messtechnischen Untersuchungen und Komfortstudien. In der Fahrzeugindustrie kommen daher Klimawindkanäle zum Einsatz, um kontrollierte Umgebungsbedingungen zu erzeugen. Der Klimawindkanal (KWK) ermöglicht realistische und reproduzierbare Einstellungen der Lufttemperatur, Luftgeschwindigkeit, Luftfeuchtigkeit, Sonnenintensität sowie der Fahrwiderstände auf einem Rollenprüfstand. Damit werden alle relevanten Einflussfaktoren der Umwelt berücksichtigt. Im KWK kann somit das Fahrzeugklima in Abhängigkeit der Umwelteinflüsse untersucht werden. Allgemein sind Klimawindkanäle sehr kostenintensiv, weswegen je nach Fragestellung auch spezialisierte Klimaprüfstände verwendet werden.

Neben Versuchen im KWK wird ein großer Teil der Untersuchungen in einem für Komfortstudien entwickelten Klimaprüfstand durchgeführt. Der Klimaprüfstand verfügt über ein Fahrzeugklimagerät der AUDI AG, womit das HVAC-System in großen Teilen identisch ist mit vielen Fahrzeugen aus dem Volkswagen (VW) Konzern. Unter kontrollierten Umgebungsbedingungen, die durch eine Klimakammer sichergestellt werden,

kann mit dem Klimaprüfstand ein fahrzeugtypisches Innenraumklima erzeugt werden. Der Klimaprüfstand ermöglicht eine individuelle Regelung der Ausblastemperatur, der Luftverteilung und des Luftmassenstroms. Zusätzlich können die Oberflächen des Innenraums durch Flächenheizung erwärmt werden, womit die Oberflächentemperatur in gewissen Grenzen definiert werden kann. Im Rahmen dieser Arbeit sind über 3.000 Betriebsstunden am Klimaprüfstand absolviert worden. Durch eine in Python entwickelte Software kann der Klimaprüfstand vollautomatisiert betrieben werden, womit ein 24h Betrieb ermöglicht wird. Der hohe Automationsgrad liefert dabei einen großen Beitrag zur Verbesserung der Testökonomie. In Summe ermöglicht der Klimaprüfstand individuelle und exakt einstellbare Klimabedingungen für eine objektive und reliable Durchführung von Versuchen. Eine vollständige Beschreibung der unterschiedlichen Prüfstände ist in Anhang A.1 dokumentiert.

4.2 Klima-Messpuppen

Die vorgestellten Prüfstände haben das Ziel die Einflüsse der Umwelt und des Fahrzeugklimas so gut wie möglich zu kontrollieren. Unter dieser Voraussetzung sind reliable Messungen der T_{eq} möglich. Zur Erfassung der T_{eq} werden in der Praxis beheizte Klima-Messpuppen oder einzelne beheizte Messwertaufnehmer verwendet, welche in Abbildung 12 dargestellt sind.

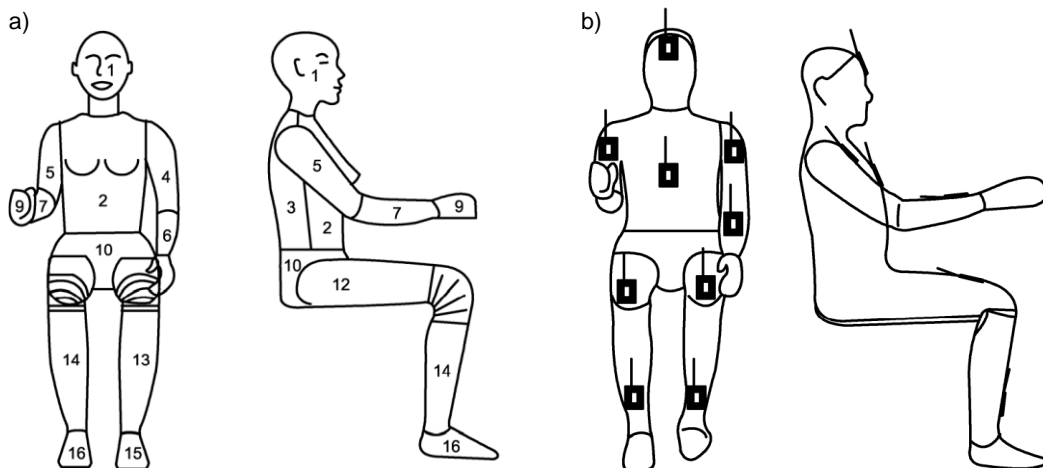


Abbildung 12 a) Beheizte Klima-Messpuppe; b) Beheizte Messwertaufnehmer mit Dummy [34, S. 13-15]

Die kommerzielle Verfügbarkeit dieser Systeme ist begrenzt, da im Forschungsbereich wie auch bei Fahrzeugherstellern sehr oft Eigenentwicklungen im Einsatz sind. Eine Übersicht der historischen Entwicklung und Funktionen der Messsysteme bieten die

Arbeiten von Holmér [62] und Foda et al. [46]. Im Rahmen dieser Arbeit wird das *Equivalent Temperature System* (EQUITES) der Firma Comlogo GmbH verwendet, welches von der AUDI AG zur Verfügung gestellt wird [20]. Hierbei handelt es sich um 16 beheizte Messwertaufnehmer, die entsprechend der DIN EN ISO 14505-2:2007-04 einen konstanten Wärmestrom q einregeln. Durch die beheizten Messwertaufnehmer erfasst das Messsystem die segmentbezogene Äquivalenttemperatur ($T_{eq,segment}$). Die globale Äquivalenttemperatur $T_{eq,whole}$ wird entsprechend Formel 10 berechnet und ergibt sich aus dem arithmetischen Mittelwert der 16 beheizten Messwertaufnehmer, die allgemein auch als Sensoren bezeichnet werden.

Zur Gewährleistung der Durchführungsobjektivität und Reliabilität wird für das EQUITES ein Dummy in Eigenentwicklung gefertigt. Der Dummy sorgt für eine exakte Positionierung der Sensoren an einem Menschmodell. Für eine natürliche Anströmung sind alle Sensoren in die Oberfläche des Dummies eingebettet und einstellbare Gelenke sorgen für eine präzise und reproduzierbare Positionierung des EQUITES im Fahrzeug. Vereinfachend wird der Verbund aus Dummy und EQUITES allgemein als Klima-Dummy bezeichnet.

Durch die integrierten Sensoren mit fester Verkabelung ist der Klima-Dummy jederzeit einsatzbereit, womit sich die Vorbereitungszeit für Messungen deutlich verkürzt. Damit verbessert der Klima-Dummy im Gegensatz zu vergleichbaren Systemen [49, 78, 89, 90] die Testökonomie und stellt damit ein sehr effizientes Messwerkzeug zur objektiven Erfassung des Umgebungsklimas dar. Detaillierte Beschreibungen zum Klima-Dummy sind Anhang A.2 zu entnehmen.

4.3 Einflussfaktoren und Sensitivität

Die reliable Durchführung von Versuchen setzt genaue Kenntnisse des Systemverhaltens voraus. Neben den in Abschnitt 3.4 vorgestellten Einflussfaktoren auf die thermische Behaglichkeit sind weitere physikalische Randbedingungen für eine Reproduzierbarkeit von Klimabedingungen zu berücksichtigen.

Die Regelung der Ausblastemperatur, des Luftmassenstroms und der Luftverteilung sind maßgeblich für die Durchströmung der Fahrzeugkabine und Temperaturverteilung verantwortlich. Damit nimmt die Applikation der Klimaregelung im Entwicklungs-

prozess viel Zeit ein. Selbst eine gute Klimaregelung kann jedoch bei ungünstigen Einstellungen der Personenanströmer den thermischen Komfort negativ beeinflussen. Aus diesem Grund stellt sich die Frage, wie stark das Innenraumklima unter stationären Einstellungen der Klimaregelung durch unterschiedlich abgelenkte Personenanströmer beeinflusst wird. Für die Untersuchung wird die Sitzposition fest eingestellt. Umgekehrt wird auch untersucht, inwieweit die Sitzposition bei fest eingestellten Personenanströmern und stationärer Klimaregelung das Innenraumklima beeinflusst. Diese geometrischen Beziehungen werden in den folgenden Abschnitten genauer betrachtet. Die Gültigkeit der Untersuchungen hängt davon ab, wie genau das Innenraumklima eingestellt werden kann und von der Genauigkeit der Äquivalenttemperaturmessungen. Bei wiederholten Messungen sollten im Idealfall die Abweichungen der Ergebnisse so klein wie möglich sein. Daher werden zusätzliche Untersuchungen zur Wiederholungsgenauigkeit durchgeführt.

Für die Untersuchungen ist im Allgemeinen der thermische Ausgangszustand nicht zu vernachlässigen. Soll z.B. ein durchgekühltes Fahrzeug auf ein *neutrales* Komfortniveau erwärmt werden, wird wesentlich mehr Zeit zum Klimatisieren benötigt, bis das Innenraumklima stationär ist. Grund dafür sind die thermischen Massen, weshalb die Oberflächentemperaturen nur langsam wärmer werden. Damit bedingen große Differenzen zwischen der Ziel- und Starttemperatur eine deutlich längere Vorkonditionierungsphase. Im Fall von Heizleistungsuntersuchungen zielt die Vorkonditionierungsphase darauf ab das Fahrzeug auf ein niedriges Temperaturniveau durchzukühlen. Die VDA 220 definiert hier eine Vorkonditionierungsdauer von mindestens 8 Stunden bei -20°C [128].

4.3.1 Ablenkung der Personenanströmer

In einer Versuchsreihe im Klimaprüfstand wird die Ablenkung der Personenanströmer bei einer Klimakammertemperatur von 30°C , untersucht. Neben der Ablenkung werden zusätzlich die Lufttemperatur und der Luftmassenstrom variiert. Ziel der Untersuchung ist es herauszufinden wie sich Änderungen der Durchströmung, unter stationären Bedingungen, auf Messungen der T_{eq} auswirken. Für jede Kombination der Lufttemperatur und Luftmassenstrom werden die Ausströmer in 13 Stufen verstellt. Diese Stufen werden in Abbildung 13a durch die roten Markierungen visualisiert, welche der Position entsprechen auf die der Personenanströmer eingestellt wird. Wie in Abbildung

13b dargestellt variiert die Orientierung der Ausströmer zwischen einer indirekten und direkten Anströmung. Diese kann durch ein eigen entwickeltes Winkelmessgerät exakt eingestellt werden. Das Winkelmessgerät ist in Abbildung 13c dargestellt.

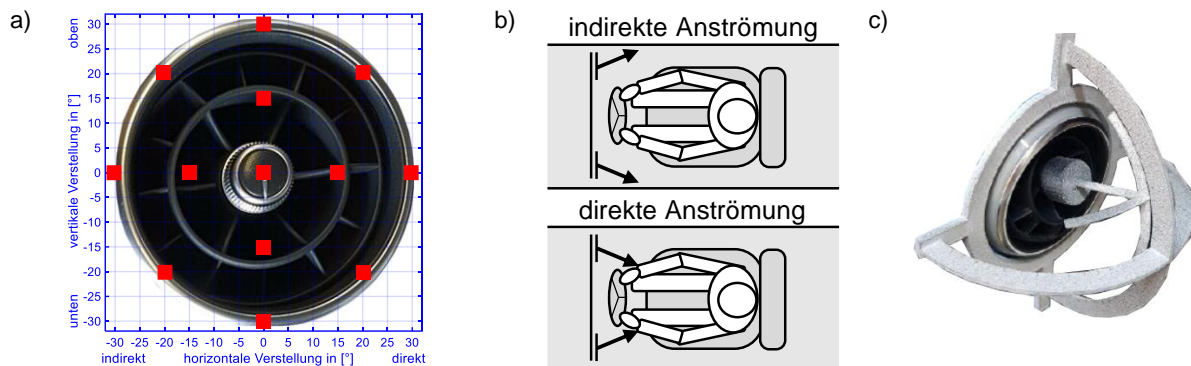


Abbildung 13: a) Ablenkung der Personenanströmer; b) Schematische Darstellung der symmetrischen Verstellung für ein indirekte und direkte Anströmung; c) Winkelmessgerät für exakte Einstellungen der Ausströmer

In Abhängigkeit der Ablenkung betragen die Differenzen der T_{eq} für eine indirekte bzw. direkte Anströmung zwischen $3,6^{\circ}\text{C}$ (Kopfhaut) und $15,3^{\circ}\text{C}$ (rechte Hand). Sensoren, die eine größere Distanz zu den Ausströmern aufweisen, reagieren weniger sensitiv auf Änderungen der Ablenkung im Vergleich zu Sensoren, die sich in unmittelbarer Nähe zum Ausströmer befinden. In Abbildung 14a sind die Messergebnisse der T_{eq} in Abhängigkeit der 13 Ausströmerstellungen für eine Ausblastemperatur von $T_1 = 20^{\circ}\text{C}$ und einem Luftmassenstrom von $\dot{m}_1 = 2 \text{ kg/min}$ dargestellt.

Durch Umrechnen der gemessenen Äquivalenttemperaturen anhand des Sommerkomfortzonenmodells wird der Einfluss der Personenanströmer auf den thermischen Komfort noch deutlicher. Die Komfortdarstellung der Ergebnisse ist in Abbildung 14b visualisiert. Je nach Ablenkung variiert der thermische Komfort zwischen *neutral* und *viel zu kalt*. Dieser Effekt wird durch einen steigenden Massenstrom verstärkt, sodass die T_{eq} lokal weiter sinkt. Der erhöhte Massenstrom führt konvektiv mehr Wärme ab, womit global und lokal niedrigere Werte der T_{eq} erreicht werden. Ein gegensätzliches Verhalten wird mit steigenden Ausblastemperaturen erzielt. Damit verhält sich die T_{eq} in Übereinstimmung mit den Einflussfaktoren in Tabelle 11. Alle weiteren Ergebnisse für die Variation der Ausblastemperatur mit $T_2 = 24^{\circ}\text{C}$ und den Luftmassenströmen mit $\dot{m}_2 = 3,3 \text{ kg/min}$ und $\dot{m}_3 = 4,5 \text{ kg/min}$ sind Anhang B.1 zu entnehmen.

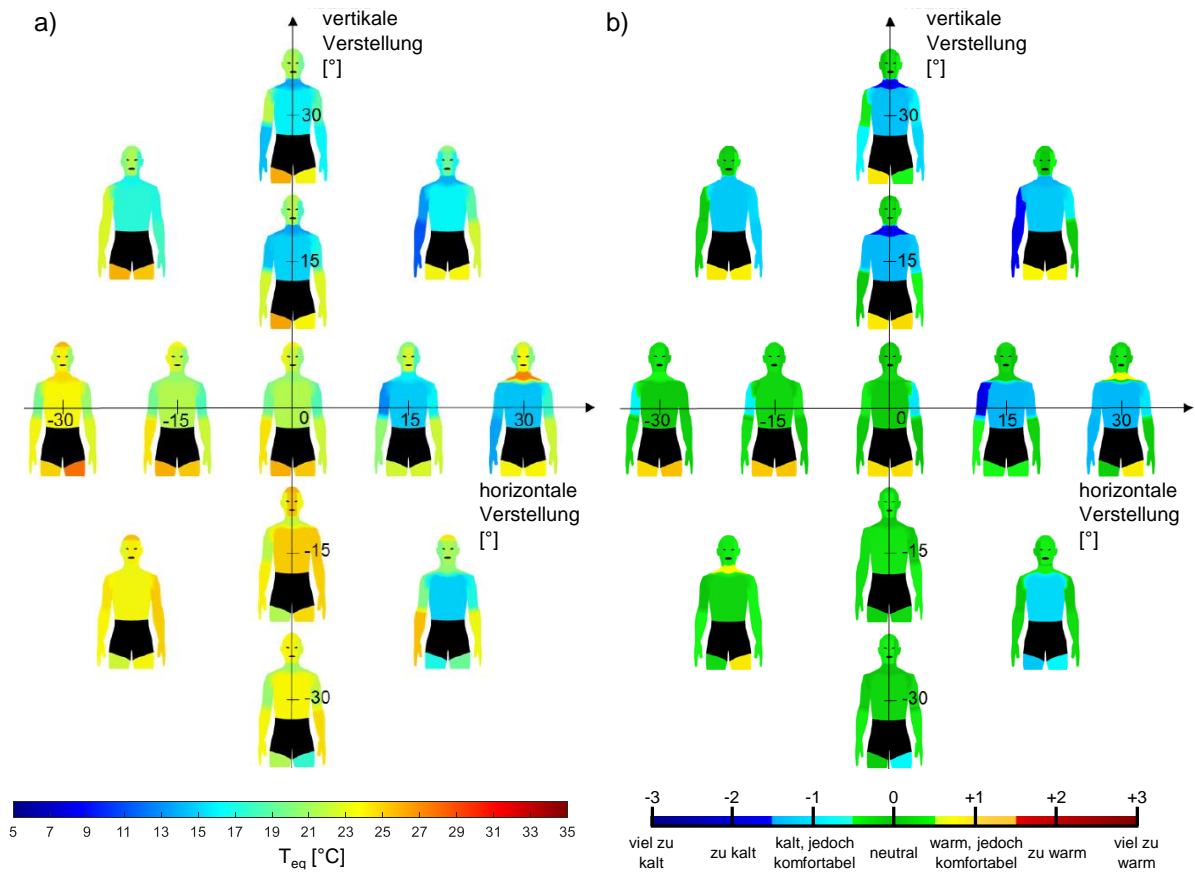


Abbildung 14: Ergebnisse für $T_1 = 20^\circ\text{C}$; $\dot{m}_1 = 2 \text{ kg/min}$: a) Temperaturdarstellung: Messungen der T_{eq} in Abhängigkeit der Ausströmer Ablenkung; b) Komfortdarstellung: Bewertung der T_{eq} mittels Nilssons Komfortzonmodell, für sommerliche Umgebungsverhältnisse

Die Untersuchungen zeigen, dass eine gut eingestellte Klimaregelung durch ungünstig abgelenkte Personenanströmer den thermischen Komfort stark verschlechtert. Im Rahmen von Fahrzeug- und Prüfstandversuchen kann somit eine Reproduzierbarkeit der Ergebnisse nur unter Berücksichtigung der Ausströmerstellungen gewährleistet werden. Abweichungen verändern die Durchströmung der Fahrzeugkabine und damit auch die thermischen Randbedingungen der physikalischen Umgebung [10, 25].

4.3.2 Variation der Sitzposition in Fahrzeuginnenraumrichtung

Bei festgelegter Ausrichtung der Personenanströmer kann auch die Sitzposition in Fahrzeuginnenraumrichtung eine Rolle spielen. In Abhängigkeit der Körpergröße ist eine individuelle Einstellung der Sitzposition notwendig, damit eine sichere und bequeme Fahrerhaltung gewährleistet wird. Um herauszufinden wie sich die T_{eq} bei einer Variation der Sitzposition in Fahrzeuginnenraumrichtung ändert, wird ein Fahrzeugversuch in ei-

ner Klimakammer bei -10°C durchgeführt. Alle Personenanströmer sind horizontal sowie vertikal zentriert und die Klimaautomatik wird im Automatik-Modus mit einer Wunschtemperatur von 22°C (AUTO22) eingestellt. Nach einer Vorkonditionierungszeit von 60 Min. sind stationäre Klimabedingungen im Innenraum erreicht. Der Klima-Dummy wird zusammen mit dem Fahrzeugsitz von der hintersten bis zur vordersten Sitzposition in fünf Stufen verstellt. Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass leichte Abweichungen der Sitzposition um die Mittellage zu minimalen Änderungen der T_{eq} führen. Extremere Ausprägungen, wie z.B. die vorderste und hinterste Sitzposition, wirken sich stärker auf die Messergebnisse aus. Grund dafür sind leicht veränderte Strömungsverhältnisse sowie Änderungen der Sichtfaktoren zu kalten Bauteilen. Mit jeder Stufe, die der Sitz in Fahrtrichtung bewegt wird nimmt der Abstand zu den Personenauströmer ab und damit verbunden steigen leicht die Lufttemperaturen und Luftgeschwindigkeiten an. Der Effekt der höheren Luftgeschwindigkeiten ist hier dominierend, womit konvektiv mehr Wärme abtransportiert wird und die Äquivalenttemperaturen leicht sinken. Betrachtet man die Sichtfaktoren, z.B. für die kalte Seitenscheibe und die weniger kalte B-Säule, nehmen diese für die Seitenscheibe zu und für die B-Säule ab je weiter der Sitz nach vorne verstellt wird. Als Folge sinken die Messwerte der Sensoren, die in Richtung B-Säule bzw. Seitenscheibe orientiert sind. Ein umgekehrtes Verhalten würde sich im Fall von Solarstrahlung einstellen.

Daraus kann abgeleitet werden, dass leichte Ungenauigkeiten bei der Positionierung des Klima-Dummies um die Mittellage der Sitzverstellung nur zu kleinen Änderungen der T_{eq} führen. Ein Vergleich von Messungen, die in der vordersten und hintersten Sitzposition durchgeführt werden, sind dagegen nicht zulässig. Weitere Informationen zum Einfluss der Sitzposition sind der Veröffentlichung von Rolle et al. zu entnehmen [100].

4.3.3 Wiederholungsgenauigkeit von Versuchen

Zuverlässige Prüfstände und Messtechnik sind notwendige Bedingungen für die objektive Erfassung der thermischen Umgebungen. Fahrzeuge, die mit einer Klimaautomatik ausgestattet sind, ermöglichen reproduzierbare Klimabedingungen bei identischen Eingangsgrößen der Regelung. Inwiefern der in Eigenentwicklung erweiterte Klimaprüfstand ebenfalls eine hohe einstellbare Güte des Innenraumklimas aufweist, soll in einer Untersuchung geprüft werden. Im Rahmen dieser Untersuchung wird

ebenfalls die Messgenauigkeit des Klima-Dummies evaluiert. Nach dem Retest-Verfahren werden zwei Versuche mit identischen Randbedingungen im Klimaprüfstand durchgeführt. Dabei beträgt die Wiederholgenauigkeit der Ausblastemperatur 99,99%, des Luftmassenstroms 99,99% und der Heizfolientemperatur 99,82%. Der Klimaprüfstand ermöglicht damit sehr präzise und reproduzierbare Einstellungen des Innenraumklimas. Die objektive Erfassung der thermischen Umgebung erreicht eine Wiederholgenauigkeit mit dem Klima-Dummy von 99,05%. Wird zwischen zwei Versuchen der Klima-Dummy neu auf dem Fahrer- oder Beifahrerplatz positioniert verschlechtert sich die Wiederholgenauigkeit nur unwesentlich. Am sensitivsten reagieren die Sensoren im Bereich der Hände, wenn der Klima-Dummy in eine Fahrerhaltung gebracht wird. Die Hände am Lenkrad befindet sich damit in unmittelbarer Nähe zu den Personenanströmer, womit leichte Positionsänderungen größere Abweichungen der Messwerte zur Folge haben.

4.4 Richtlinien zur Versuchsdurchführung

Zusammenfassend werden, aus den in Abschnitt 4.3 vorgestellten Untersuchungen, Richtlinien für eine standardisierte Versuchsdurchführung von Klimaversuchen abgeleitet. Neben der objektiven Erfassung des Raumklimas durch Messungen der T_{eq} ist für belastbare Untersuchungen die Reproduzierbarkeit der thermischen Umgebung essenziell.

Im ersten Abschnitt wird auf die Vorkonditionierung eingegangen. Die thermische Vorgeschichte eines Prüfstands oder Fahrzeugs ist nicht zu vernachlässigen, da je nach Zustand ein deutlich trägeres Systemverhalten vorliegt und mehr Zeit benötigt wird ein stationäres Innenraumklima herzustellen. Der zweite Abschnitt geht auf Maßnahmen für eine exakte Positionierung des Klima-Dummies ein und beschreibt zwei Körperhaltungen für Messungen. Im drauffolgenden Abschnitt werden die zu definierenden Randbedingungen für die Versuchsdurchführung aufgelistet. Anschließend wird unter dem Punkt *Optionale Daten* auf Messwerte und Signale eingegangen, die im Fehlerfall die Ursachenanalyse vereinfachen. Im letzten Abschnitt werden relevante Einflussfaktoren für den Vergleich von Messergebnissen zwischen wechselnden Versuchsfahrzeugen genannt. Die Richtlinien gehen über die Untersuchungen aus Kapitel 4 hinaus und stellen eine Empfehlung zur Verbesserung der Testgüte dar.

Startbedingungen vor Versuchsbeginn

- a. Die Vorkonditionierungszeit ist ausreichend lang zu wählen. Umgebungstemperatur für die Vorkonditionierung und den Versuch soll identisch sein.
- b. Bei kurzen Vorkonditionierungszeiten (≤ 2 h) kann der Klima-Dummy mit dem Fahrzeug oder Prüfstand konditioniert werden.

Exakte Positionierung des Klima-Dummies

- c. Für Messungen am Fahrplatz ist der Klima-Dummy in eine Fahrerhaltung mit den Händen am Lenkrad einzustellen. Bei Untersuchungen mit Versuchsfahrer kann alternativ auch auf dem Beifahrerplatz eine Fahrerhaltung eingenommen werden. Auf allen weiteren Sitzplätzen ist eine natürliche Sitzhaltung einzustellen, mit Händen seitlich an den Oberschenkeln.
- d. Sitzhöhe, Lehnenwinkel, Sitzflächenneigung, Verstellung in Fahrzeuginnenraumrichtung muss in Kombination mit Klima-Dummy abgestimmt werden. Anschließend sind die Gelenkwinkel zu notieren.

Zu definierende Randbedingungen für die Versuchsdurchführung

- e. Klimaprüfstand: Versuchsskript mit allen Randbedingungen definieren.
- f. Fahrzeugversuch: Einstellungen am Klimabedienteil definieren, Soll-Wert vorgeben, Betriebsmodus wählen AUTO/Manuell, Umluftautomatik aktivieren/deaktivieren, Zonen synchronisieren und Sitzgurte anschnallen.
- g. Ablenkung der Personenanströmer festlegen.

Optionale Daten

- h. Ausströmer-, Oberflächen-, Fußraum- und Kopfraumtemperaturen messen.
- i. Fahrzeugversuch: Bus-Kommunikation des HVAC-Systems aufzeichnen.

Einflussfaktoren bei wechselnden Versuchsfahrzeugen

- j. Motor- und Heizleistung, Wärmekapazität und Innenraumvolumen der Karosserie und Lackfarbe beachten.
- k. Ausstattung berücksichtigen: Glasdach, Verschiebung, Klimasystem

5 Evaluierung von Bewertungsmethoden der Fahrzeugklimatisierung

Eine präzise messtechnische Erfassung der thermischen Umgebung ist grundlegend für technische Vergleichsmessungen und Komfortbewertungen. In der Praxis werden häufig Fahrzeuge in Relation zu Anderen gesetzt oder Teilsysteme des HVAC-Systems bewertet.

Im Hinblick auf Komfort und Energieeffizienz werden Gesamt- und Teilkonzepte in dem folgenden Kapitel untersucht. Die Komfortbewertungen erfolgen anhand des KZM nach Nilsson, wobei Stärken und Schwächen für mögliche Anpassungen seines Modells identifiziert werden. Neben den Komfortbewertungen werden neue Methoden zur Konzeptbewertung entwickelt, die eine bessere Vergleichbarkeit der thermischen Innenraumbedingungen und des Energieverbrauchs ermöglichen. Zum Abschluss des Kapitels wird eine Methode zur numerischen Bestimmung der T_{eq} vorgestellt.

5.1 Konzeptbewertung Gesamtsystem

Die Variantenvielfalt von HVAC-Systemen aktueller Fahrzeuge ist sehr umfangreich. Je nach Fahrzeugklasse und Ausstattungsoptionen sind unterschiedliche technische Lösungen im Einsatz. Ziel der Hersteller ist es mit Zusatzausstattungen den Innenraumkomfort weiter zu steigern und sich auf diese Weise von Wettbewerbern zu differenzieren. Neben unterschiedlicher Hardware wird unter anderem auch die Applikation der Klimaautomatik gezielt an den Markt sowie an die Käuferschaft angepasst. So werden beispielsweise, entsprechend der Vorlieben des amerikanischen Marktes, die Fahrzeuge kühler abgestimmt [105].

Zu dieser Variantenvielfalt soll in einem Experiment der thermische Komfort für verschiedene Fahrzeugklassen untersucht werden. Mit der Prämisse das nicht alle Fahrzeuge identischen Komfort bereitstellen wird ein Mittel- und Oberklasse Fahrzeug untersucht. Das Ziel dieser Untersuchung ist es herauszufinden inwiefern sich die DIN EN ISO 14505-2:2007-04 dazu eignet den thermischen Komfort der beiden Fahrzeugklassen zu bewerten. Diese Untersuchung wurde bereits in der Publikation von Rolle et al. [101] veröffentlicht. Im Folgenden wird deswegen kurz auf das Versuchsdesign eingegangen. Anschließend werden die Ergebnisse vorgestellt und diskutiert. Eine

ausführliche Beschreibung der Untersuchung kann der Publikation entnommen werden.

5.1.1 Methode

Die Versuche finden im KWK statt um reale und reproduzierbare Umgebungsbedingungen sicherzustellen. Ein Mittel- und Oberklasse-Fahrzeug werden unter identischen Bedingungen bei Temperaturen zwischen -20°C bis $+40^{\circ}\text{C}$ untersucht. Im ersten Teil des Versuchs starten die Fahrzeuge mit 50 km/h bei einer Umgebungstemperatur von -20°C . Nach einer 90-minütigen Aufheizphase sind stationäre Temperaturbedingungen im Innenraum erreicht. Anschließend wird die Umgebungstemperatur alle 6 Min. um 1°C erhöht, sodass sich ein quasistationäres Verhalten einstellt. Der KWK und das dazugehörige Temperaturprofil mit Randbedingungen sind in Abbildung 15 dargestellt. Ab einer Umgebungstemperatur von 16°C werden die Ausströmer für den Sommerbetrieb eingestellt.

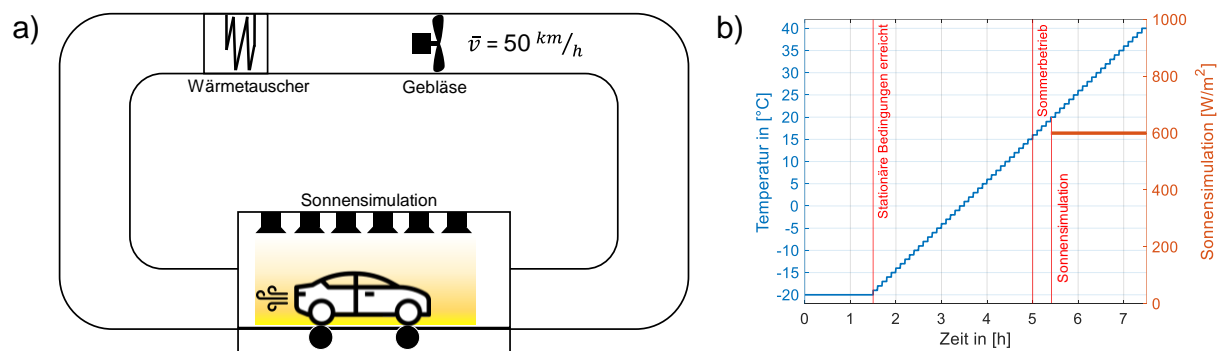


Abbildung 15: a) KWK mit einer konstanten Wind- und Fahrzeuggeschwindigkeit von 50 km/h ; b) Temperaturverlauf über die 7h30min Versuchszeit; Sonnensimulation aktiv ab $T = 20^{\circ}\text{C}$

Jedes Fahrzeug wird mit drei Klima-Dummies ausgestattet, die auf dem Beifahrerplatz, zweite Sitzreihe links und rechts positioniert werden. Für die Fahrzeugführung, Änderungen der Einstellungen und Plausibilisierung der Messergebnisse sitzt ein Testfahrer auf dem Fahrerplatz. Die Versuche werden gemäß den Richtlinien in Abschnitt 4.4 durchgeführt.

5.1.2 Ergebnisse

Die Messungen der Klima-Dummies werden für 13 Umgebungsbedingungen von -20°C bis $+40^{\circ}\text{C}$ in 5°C Schritten ausgewertet. Die Bewertung der T_{eq} erfolgt mit dem KZM und ist exemplarisch für eine Umgebungstemperatur von 10°C in Abbildung

Mittelklasse Fahrzeugs um 3% höher im Vergleich zur Oberklasse. Auch in der zweiten Sitzreihe fällt die Bewertung für das Mittelklasse Fahrzeug höher aus, mit 79% zu 76% auf der linken Seite und 79% zu 73% auf der rechten Seite.

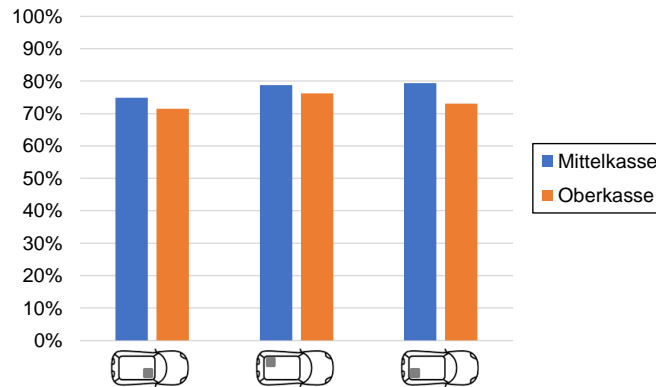


Abbildung 17: Crédit-Evaluierung der Komfortbewertung für Mittelklasse und Oberklasse Fahrzeug

5.1.3 Diskussion

Gemäß der DIN EN ISO 14505-2:2007-04 und dem KZM schneidet das Mittelklasse Fahrzeug nach der Crédit-Evaluierung besser im Vergleich zur Oberklasse ab. Betrachtet man die mittlere T_{eq} der 13 Umgebungsbedingungen, ist der Innenraum des Oberklasse Fahrzeugs wärmer abgestimmt. Basierend auf der Norm und dem KZM führt der wärmere Innenraum zu einer Profilverchiebung zu Gunsten des Mittelklasse Fahrzeugs. Diese Ergebnisse entsprechen nicht dem höheren technischen Aufwand, welcher in Oberklasse-Fahrzeugen betrieben wird, um ein angenehmes Innenraumklima zu gewährleisten. Beispielsweise sorgen zusätzliche Ausströmer in der B-Säule dafür den thermischen Komfort in der zweiten Sitzreihe zu verbessern. Viele weitere technische Unterschiede differenzieren das Mittelklasse- zum Oberklasse-Fahrzeug, sodass ein gegenteiliges Ergebnis zu erwarten sei.

Das HVAC-System muss nicht nur eine Vielzahl an technischen, sondern auch kundenspezifischen Anforderungen erfüllen. Um den Ansprüchen der prognostizierten Kunden gerecht zu werden, ist der Innenraum des Oberklasse-Fahrzeugs gezielt wärmer abgestimmt. Die Kunden in diesem Preissegment sind in der Regel älter und bevorzugen ein etwas wärmeres Klima. Die Auswertung dagegen basiert auf dem KZM, welches lediglich eine Differenzierung zwischen den Sommer- und Winterkomfortzonen ermöglicht. Die Differenzierung ist jedoch nicht ausreichend für einen Vergleich zwischen Mittel- und Oberklasse-Fahrzeug. Demografische Merkmale und ethnische

Einflüsse finden im KZM keinerlei Berücksichtigung, sind jedoch wichtige Parameter, die im Fahrzeugentwicklungsprozess bestimmte Anforderungen definieren. Wenn Fahrzeuge mit unterschiedlichen Entwicklungszielen verglichen werden sollen, ist eine nutzerorientierte Skalierung der Komfortzonen für verschiedene Altersgruppen, Geschlechter oder deren Herkunft notwendig. Eine entsprechende Erweiterung, die auf Nilssons Ansatz des KZMs aufbaut, wird in Kapitel 6 vorgestellt.

5.2 Konzeptbewertung isolierter Systeme

Im Entwicklungsprozess werden immer wieder Teilsysteme der Fahrzeugklimatisierung untersucht mit dem Ziel den thermischen Komfort zu verbessern oder bei gleichbleibendem Komfort den Energieverbrauch zu senken. Manche Konzepte haben sogar das Potenzial den Komfort zu steigern bei sinkendem Energieverbrauch. Höhere Anforderungen für Elektro- und autonom fahrende Fahrzeuge erfordern neue Klimatisierungsansätze, die nicht mehr wie bisher evolutionär auf vorhandenen Lösungen aufbauen, sondern größere Änderungen im Gesamtsystem bedingen. Auch hier werden in der Praxis noch sehr häufig Bewertungen auf subjektiver Ebene durchgeführt.

Im folgenden Abschnitt werden anhand unterschiedlicher Klimatisierungskonzepte Methoden zur objektiven Analyse des thermischen Komforts und Energieverbrauchs auf technischer Ebene vorgestellt.

5.2.1 Isokomfort-Evaluierung

Isokomfort beschreibt stationäre, thermodynamische Zustandsänderungen der Umgebung bei konstanter T_{eq} . Im Gegensatz zur isothermen Zustandsänderung, die sich direkt auf Änderungen des Drucks und spezifischen Volumens beziehen, werden Änderungen der Wärmetransportmechanismen allgemein betrachtet. Somit wird die T_{eq} in Abhängigkeit zweier Haupteinflussfaktoren analysiert. Das Ziel von Isokomfort-Evaluierungen besteht darin, Konzeptvergleiche für ein breites Temperaturspektrum unter gleichbleibenden thermischen Komfort durchzuführen. Ein vergleichbares Komfortniveau stellt zudem eine Grundvoraussetzung für Energiebetrachtungen dar. Bewertungen auf Basis der Lufttemperatur weisen im Hinblick auf energetischen Betrachtungen eine große Unschärfe auf und sind damit fehlerbehaftet [7, 73, 117]. Die Isokomfort-Evaluierung geht dabei von der Prämisse aus, dass unterschiedliche Umgebungsein-

flüsse, die zu der gleichen T_{eq} führen, auch vergleichbaren Komfort bieten. Diese Voraussetzung wird im späteren Verlauf der Arbeit in Abschnitt 6.2 genauer untersucht. Zur näheren Veranschaulichung der Methode wird die Isokomfort-Evaluierung im folgenden Abschnitt anhand eines Beispiels vorgestellt. Das methodische Vorgehen wurde bereits in der Publikation von Rolle et al. [100] veröffentlicht. Ausführliche Beschreibungen zur Versuchsdurchführung, Ergebnissen und Diskussion sind der Veröffentlichung zu entnehmen.

5.2.2 Einfluss von thermisch aktiven Oberflächen

Klassischerweise wird im Winter der Innenraum mit konditionierter Luft geheizt. Flächenheizungen ermöglichen eine lokale Wärmeübertragung. Durch die zusätzliche Wärmestrahlung kann die Innenraumtemperatur reduziert werden und eine potenzielle Energieeinsparung ist möglich. Bei der Dimensionierung des Klimatisierungskonzepts stellt sich die Frage, wie viele Heizfolien im Innenraum notwendig sind und wo diese für eine effiziente Klimatisierung verbaut sein müssen.

In einer Messreihe am Klimaprüfstand werden stufenweise mehrere Kombinationen an Ausblas- und Oberflächentemperaturen untersucht und die resultierende T_{eq} gemessen. Pro Messreihe ist jeweils eine Heizgruppe am Klimaprüfstand aktiv, um die Auswirkung der Wärmestrahlung eindeutig auf die unterschiedlichen Körperregionen zuzuordnen. Exemplarisch werden die Isokomfort-Diagramme für das Beheizen des Dachhimmels in Abbildung 18 dargestellt. Die Messungen der T_{eq} werden in drei Segmente, Kopf, Oberkörper und Beine, zusammengefasst.

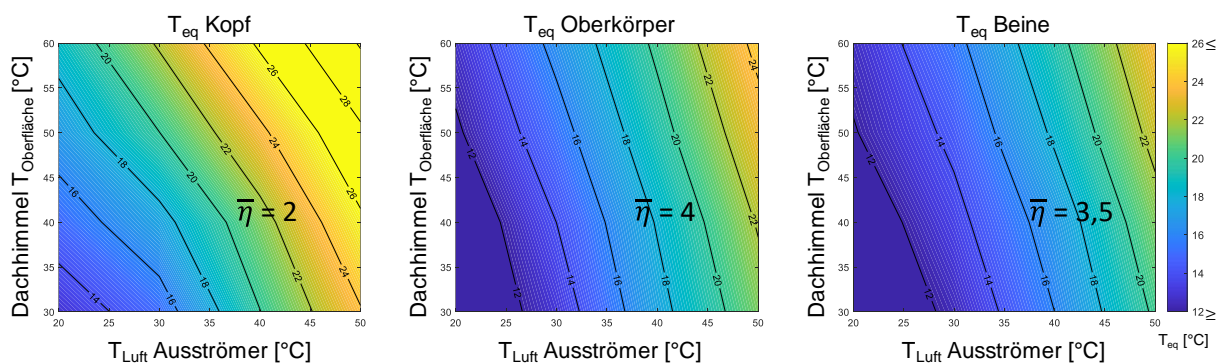


Abbildung 18: Isokomfort-Diagramme der Körpersegmente Kopf, Oberkörper und Beine

Auf der x-Achse ist die Variation der Ausblastemperatur und auf der y-Achse die Oberflächentemperatur des Dachhimmels aufgetragen. Kombinationen der x- und y-Werte,

die eine konstante T_{eq} zur Folge haben, werden im Diagramm als Isokomfortlinien bezeichnet. Ein senkrechter Verlauf der Isokomfortlinien würde bedeuten, dass die Variation der Oberflächentemperatur bei einer definierten Ausblastemperatur keinen Einfluss auf die T_{eq} hat. Ein umgekehrtes Verhalten stellt sich bei einem horizontalen Verlauf der Isokomfortlinien ein. Hier hätten Änderungen der Ausblastemperatur keinen Einfluss auf die T_{eq} . Somit kann die Effektivität der Flächenheizung durch den Gradienten ermittelt werden. Die Isokomfortlinien weisen am Kopf ein mittleres Gefälle von $\bar{\eta} = |-2|$ auf. Für eine gleichbleibende T_{eq} muss bei einer Reduzierung der Ausblastemperatur um 1°C die Oberflächentemperatur des Dachhimmels im Durchschnitt um 2°C erhöht werden. Mit $\bar{\eta} = |-4|$ und $\bar{\eta} = |-3,5|$ hat die Temperierung des Dachhimmels einen geringeren Einfluss auf den Oberkörper und die Beine. Neben dem Gradienten ist auch das erreichte Temperaturniveau von Bedeutung. Bei einer Kombination von $T_{\text{Oberfläche}} = 45^\circ\text{C}$ und $T_{\text{Luft}} = 40^\circ\text{C}$ wird am Kopf eine T_{eq} von $22,5^\circ\text{C}$, am Oberkörper $18,8^\circ\text{C}$ und an den Beinen $17,5^\circ\text{C}$ erreicht.

Zusammenfassend hat die Isokomfort-Analyse ergeben, dass eine beheizte Mittelkonsole auf alle drei Segmente, Kopf, Oberkörper und Beine, Einfluss nimmt. Die Heizflächen im Dachhimmel und Instrumententafelunterseite wirken dagegen lokal am Kopf und an den Beinen. Eine Temperierung der Instrumententafeloberseite wirkt sich nur gering auf die T_{eq} aus und eignet sich daher nicht zum Heizen. Für die Dimensionierung des Flächenheizkonzepts sollten Heizfolien im Fußraum, Mittelkonsole, Türverkleidung und Dachhimmel verbaut sein, um eine gleichmäßige Klimatisierung sicherzustellen. Ähnliche Erkenntnisse werden im Rahmen von Probandenstudien von Schmidt et al. erzielt [107].

Die Isokomfort-Evaluierung kann flexibel zur Analyse von Klimakzepten eingesetzt werden. Sie ermöglicht eine schnelle und einfache Interpretation der Messergebnisse in Abhängigkeit von zwei Einflussfaktoren. Der Einfluss von Klimatisierungskonzepten kann für ein weites Temperaturspektrum bewertet werden. Ein weiteres Anwendungsbeispiel der Isokomfort-Evaluierung zur Bewertung eines Überkopfbelüftungssystems ist der Publikation von Rolle et al. [100] zu entnehmen.

5.2.3 A/B Analysen

Im Fahrzeugentwicklungsprozess werden Änderungen am HVAC-System genaustens untersucht, damit die Auswirkungen dieser Änderungen auf den Komfort und Energieverbrauch beurteilt werden können. In vielen Fällen werden neue Klimatisierungskonzepte in Relation zu bestehenden Serienkonzepten bewertet. Solche Vergleiche bezeichnet man im allgemein als A/B Analysen. Im Bereich der Fahrzeugklimatisierung stellt in der Regel ein konventionelles HVAC-System mit Defroster, Personenanströmer und Fußraumdüsen die Ausgangsbasis dar. Entsprechend der zu untersuchenden Fragestellung wird eine Nullmessung durchgeführt. Die Nullmessung definiert die Ausgangsbasis einer Untersuchung und stellt damit die Referenz für Vergleichsmessungen dar. Von dieser Ausgangsbasis können in einem zweiten Versuch Komfort- und Energiebetrachtungen neuer Konzepte eingeordnet werden. Die Randbedingungen der beiden Versuche müssen identisch sein, um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten.

Neben neuen Konzepten werden auch zusätzliche Teilsysteme zum konventionellen HVAC-System untersucht. Eine klassische A/B Analyse, mit dem Ziel den Einfluss eines erweiterten Belüftungsfelds im Hinblick auf Komfort zu untersuchen, wurde bereits in der Publikation von Rolle et al. [100] veröffentlicht. In einem Abkühlversuch im KWK wird ein konventionelles HVAC-System einmal mit und einmal ohne erweitertem Belüftungsfeld untersucht. Die Analyse zeigt, dass der zusätzliche Ausströmer in der Instrumententafel die Fahrzeugkabine unter sommerlichen Umgebungsverhältnissen schneller runter kühlt und für eine gleichmäßigere Luftverteilung sorgt. Im folgenden Abschnitt wird eine A/B Analyse vorgestellt, die den thermischen Komfort wie auch den Energieverbrauch des Systems betrachtet.

5.2.4 Instationärer Aufheizprozess thermisch aktiver Oberflächen

Die Isokomfort-Evaluierung der thermisch aktiven Oberflächen zeigen welche Heizflächen besonders effektiv sind und zu einem behaglichen Innenraumklima beitragen. Diese Evaluierung beschränkt sich auf stationäre Betrachtungen. Wenn jedoch ein instationärer Aufheizprozess untersucht wird, ist eine A/B Analyse zu empfehlen.

Im Rahmen der Untersuchungen aus Abschnitt 5.1 sind Datensätze eines instationären Aufheizvorgangs bei -20°C entstanden. Die Regelung der Klappen und Ausblasttemperatur des HVAC-Systems wird für die Nullmessung direkt übernommen. Aufgrund des kleineren Innenraumvolumens des Klimaprüfstands wird die Gebläsedrehzahl im Vergleich zum Fahrzeugversuch im KWK um 20% reduziert. Durch die fahrzeugtypische Regelung des Klimageräts verhält sich der konvektive Aufheizprozess des Klimaprüfstands vergleichbar mit dem Aufheizprozess eines realen Fahrzeugs. Die A/B Analyse wird bei einer winterlichen Umgebungstemperatur von -5°C durchgeführt, da diese Temperatur in Deutschland häufiger vorkommt als -20°C [118]. Nach einer Aufheizphase von 45 Min. stellt sich global ein *neutraler* thermischer Komfort nach dem KZM ein.

In einem zweiten Versuch soll der Aufheizvorgang durch thermisch aktive Oberflächen unterstützt werden. Ziel der Untersuchung ist es schnell komfortable Innenraumbedingungen herzustellen und zusätzlich durch die lokal übertragene Strahlungswärme Energie einzusparen. Dafür wird innerhalb der ersten 11 Min. das konvektive Aufheizverhalten identisch zur Nullmessung gefahren und anschließend der Massenstrom auf $1,5\text{ kg/min}$ reduziert. Der verbleibende Massenstrom transportiert Frischluft in den Innenraum und verhindert die Bildung von Beschlag. Als zusätzliche Wärmequelle wird Strahlungswärme vom Dachhimmel, Mittelkonsole, Türverkleidung, Instrumententafelunterseite und Fußraum übertragen. Die Heizfolien erreichen dabei eine Temperatur von 60°C , womit nach DIN EN ISO 13732-1:2008-12 mit ausreichender Sicherheit keine Verbrennungsgefahr besteht [33].

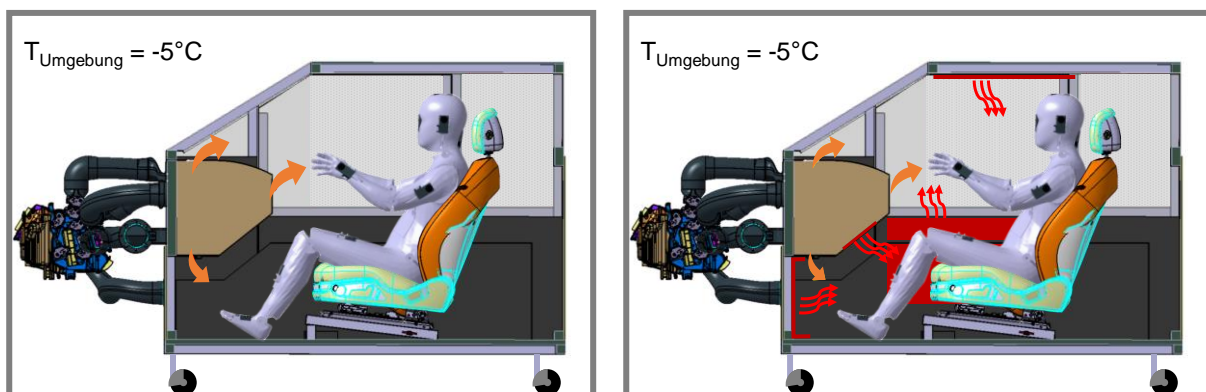


Abbildung 19: Aufheizvorgang bei -5°C mit konventionellem HVAC-System (links) und in Kombination mit thermisch aktiven Flächen (rechts)

Die Temperaturen der Flächenheizungen werden so lange gehalten, bis ebenfalls global ein neutraler thermischer Komfort erreicht wird. Anschließend werden die Temperaturen der Heizfolien reduziert, damit das Innenraumklima bis zum Ende der Versuchszeit stationär gehalten werden kann. Die gewählten Versuchsparameter sind im Rahmen von Voruntersuchungen experimentell ermittelt. Das Versuchsdesign für die klassische (Nullmessung) und der strahlungsdominierten Aufheizung ist in Abbildung 19 dargestellt. Die Messergebnisse der T_{eq} werden nach dem KZM bewertet. Ein direkter Vergleich des thermischen Komforts zwischen der Nullmessung und dem Flächenheizkonzept wird in Abbildung 20a visualisiert. Bei dem rein konvektiven Aufheizprozess ist der linke Fuß am Ende der Versuchszeit noch *zu kalt*, der restliche Körper befindet sich dagegen in einem angenehmen Bereich. Das Flächenheizkonzept schafft es die Beine besser zu wärmen, womit allgemein thermische Asymmetrien minimiert werden. Die Heizleistung des Nullversuchs ist in Abbildung 20b, und die des Flächenheizkonzepts in Abbildung 20c dargestellt. Die gestrichelten roten Linien markieren den Zeitpunkt, zu dem global ein *neutraler* thermischer Komfort erreicht wird.

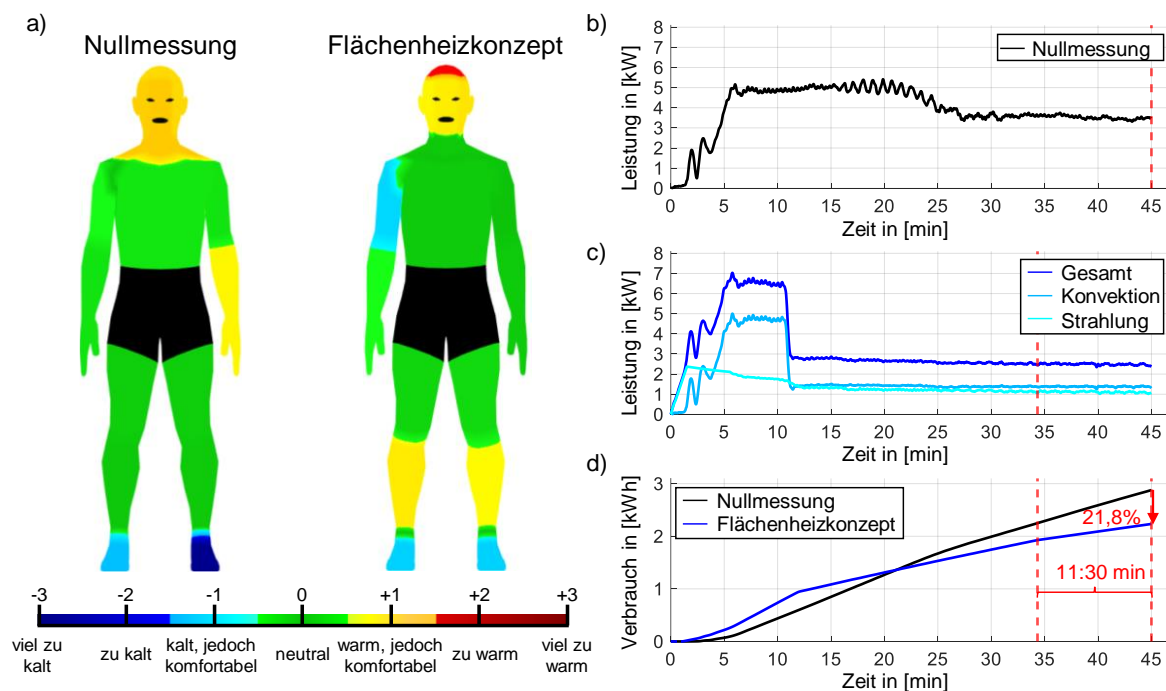


Abbildung 20: a) Komfortbewertung Nullmessung und Flächenheizkonzept nach 45 Min.; b) Heizleistung konvektive Klimatisierung (Nullmessung); c) Heizleistung konvektive und strahlungsbasierte Klimatisierung (Flächenheizkonzept); d) Kumulierter Energieverbrauch Nullmessung und Flächenheizkonzept

Die kumulierten Energieverbräuche der beiden Versuche sind Abbildung 20d zu entnehmen. Innerhalb der ersten Minuten liegt die Heizleistung des Flächenheizkonzepts

über dem der Nullmessung. Somit wird nach dem Kaltstart schnell ein angenehmes Innenraumklima geschaffen. Durch die Reduzierung des Massenstroms nach 11 Min. wird die Heizleistung deutlich reduziert, sodass der Energieverbrauch im Vergleich zur Nullmessung um 21,8% reduziert werden kann. Das Flächenheizkonzept erreicht nach 33:17 Min. ein *neutrales* Komfortniveau, womit es um 11:30 Min. schneller ist im Vergleich zur klassischen Aufheizung.

Die A/B Analyse ermöglicht einen detaillierten Vergleich zwischen dem konventionellen HVAC-System und dem Flächenheizkonzept. Der thermische Komfort kann durch die beheizten Oberflächen in den ersten Minuten nach dem Kaltstart deutlich schneller gesteigert werden. Im Durchschnitt stellen beide Klimatisierungsansätze ein *neutrales* Innenraumklima bereit. Allgemein wird durch die Flächenheizungen der Fußraum besser gewärmt, jedoch besteht eine leichte Tendenz zur Kopfraumüberhitzung. Um diesem Problem entgegenzuwirken, muss die Heizleistung im Kopfraum früher reduziert werden. Auf diese Weise steigert das Flächenheizkonzept den thermischen Komfort im instationären sowie im stationären Bereich und ermöglicht eine deutliche Reduktion des Energieverbrauchs. Zusammengefasst stellt das Flächenheizkonzept schneller komfortable Innenraumbedingungen her und spart dabei noch Energie. Allgemein kann der Aufheizvorgang noch weiter optimiert werden. Diese Untersuchungen gehen jedoch über das Ziel dieser Dissertation hinaus.

5.3 Numerische Berechnung der Äquivalenttemperatur

Messtechnische Untersuchungen sind im Vergleich zu Simulationen mit einem hohen Aufwand an Zeit und Kosten verbunden. Aus diesem Grund ist heutzutage ein Großteil des Entwicklungsprozesses von Fahrzeugen computergestützt. Zum Beginn der Entwicklung werden für die Fahrzeugklimatisierung konzeptrelevante Anforderungen definiert. In dieser Phase erfolgen CFD-Simulationen (Computational Fluid Dynamics) für die technische Auslegung der Be- und Entlüftung des Fahrzeugs sowie die Auslegung des HVAC-Systems. Aktuelle Simulationen im Bereich der Fahrzeugklimatisierung vernachlässigen die Betrachtung des thermischen Komforts. Komfortuntersuchungen finden erst in einer späten Phase der Fahrzeugentwicklung statt, da physische Prototypen für die Messungen benötigt werden. Die hohe Auslastung von Versuchsträgern und Prüfständen erfordern zudem immer kürzere und effizientere Untersuchungsmethoden.

Für zukünftige Klimatisierungskonzepte, vor allem im Bereich der Elektromobilität, ist eine frühzeitige Bewertung des thermischen Komforts sowie Untersuchungen zum Energieverbrauch essenziell. Die numerische Bestimmung der T_{eq} stellt eine zeit- und kosteneffiziente Methode für die objektive Erfassung des Innenraumklimas dar. In Kombination mit dem KMZ wird die Beurteilung der thermischen Behaglichkeit ermöglicht. Die vollständige Entwicklung der Simulationsmethodik wurde bereits veröffentlicht und ist der Publikation von Rolle et al. [99] zu entnehmen. In den folgenden Abschnitten wird auf die Implementierung und Validierung der Simulationsmethodik eingegangen.

5.3.1 Implementierung in OpenFOAM®

Ziel der Simulationsmethodik ist es die T_{eq} nach DIN EN ISO 14505-2:2007-04 mit allen ihren physikalischen Eigenschaften zu simulieren [34]. Hierzu muss in einem ersten Schritt das numerische Lösungsverfahren definiert werden. Zum Einsatz kommt der Solver *buoyantSimpleFoam*, da er Wärmetransportmechanismen und stationäre Betrachtungen einer zusammenhängenden Fluidregion simulieren kann. Als Strahlungsmodell wird die *fiwFactor* Methode verwendet. Nach mehreren Simulationen zur Überprüfung der physikalischen Korrektheit wird der physische Sensor des Klimadummies virtuell implementiert.

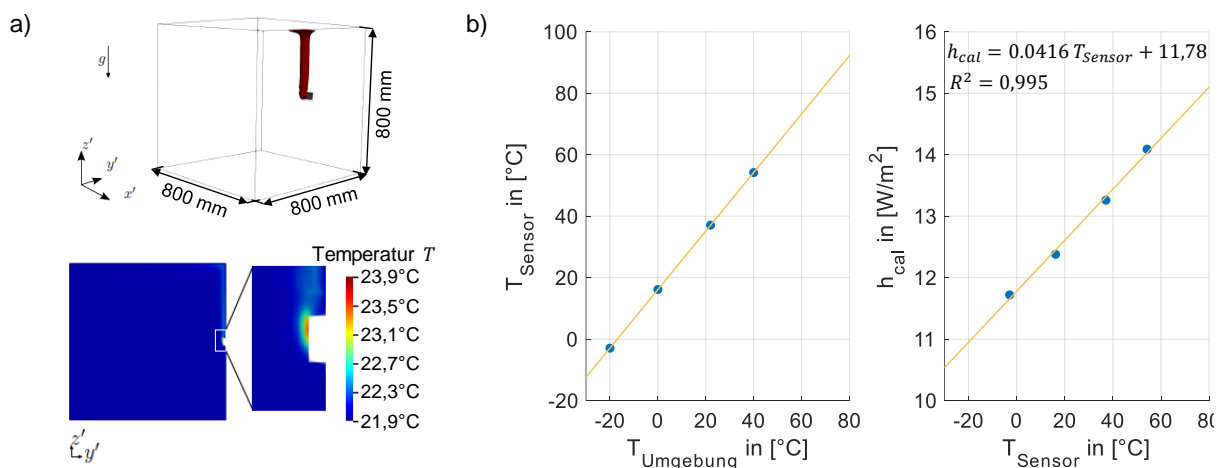


Abbildung 21 a) Simulationsumgebung und -ergebnis der Sensorkalibrierung; b) T_{Sensor} in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur $T_{Umgebung}$ und Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten h_{cal} nach Formel 14

Anschließend erfolgt die Kalibrierung des virtuellen Sensors identisch zum Klima-Dummy, Messsystem und der DIN EN ISO 14505-2:2007-04. Der physikalische Sensor wird nach dem Regelungsprinzip *konstanter Wärmestrom* mit $q_{\text{Sensor}} = 200 \text{ W/m}^2$ betrieben [34] und wertet somit die resultierende Oberflächentemperatur in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen aus. Für eine direkte Vergleichbarkeit wird für den virtuellen Sensor ebenfalls die Oberflächentemperatur T_{Sensor} ausgewertet bei einem konstanten Wärmestrom von $q_{\text{Sensor}} = 200 \text{ W/m}^2$. Unter homogenen Umgebungsbedingungen mit Windgeschwindigkeiten unter $0,1 \text{ m/s}$ entspricht die T_{eq} der Umgebungstemperatur T_{Umgebung} . Die Berechnung der T_{eq} (Formel 8) ist damit nur noch vom Wärmeübergangskoeffizienten h_{cal} abhängig. Entsprechend kann der Wärmeübergangskoeffizient unter homogenen Bedingungen nach Formel 14 berechnet werden

$$h_{\text{cal}} = \frac{q_{\text{Sensor}}}{T_{\text{Sensor}} - T_{\text{eq}}} = \frac{q_{\text{Sensor}}}{T_{\text{Sensor}} - T_{\text{Umgebung}}} \quad (14)$$

Die Kalibrierung des virtuellen Sensors wird gemäß Abbildung 21a in einer kubischen Kammer für vier unterschiedliche homogene Umgebungsbedingungen von -20°C bis $+40^\circ\text{C}$ durchgeführt. Die Simulationsergebnisse für die Oberflächentemperaturen des virtuellen Sensors sind in Abbildung 21b gegenüber der Umgebungstemperatur dargestellt. Mit Formel 14 wird der Wärmeübergangskoeffizient h_{cal} bestimmt und anschließend eine lineare Regression durchgeführt. Der Korrelationskoeffizient weist mit $R^2 = 0,995$ ein lineares Verhalten auf, sodass der Wärmeübergangskoeffizient h_{cal} mit ausreichender Genauigkeit durch die Temperatur der Sensoroberfläche T_{Sensor} bestimmt werden kann. Damit kann die T_{eq} durch Simulation der Oberflächentemperatur T_{Sensor} anhand von Formel 15 bestimmt werden

$$T_{\text{eq}} = T_{\text{Sensor}} \frac{q_{\text{Sensor}}}{0,0416 T_{\text{Sensor}} + 11,78} \quad (15)$$

Die Kalibrierung wird für die 16 Sensoren des Klima-Dummies übernommen, um einen direkten Vergleich zum Messsystem zu ermöglichen. Im nächsten Abschnitt wird ein Validierungsansatz zur Überprüfung der vorgestellten Simulationsmethodik bei inhomogenen Umgebungsbedingungen vorgestellt.

5.3.2 Validierung Simulationsmethodik

Zur Bestimmung der Äquivalenttemperatur unter inhomogenen Umgebungsbedingungen wird die Validierung mit dem Klimaprüfstand durchgeführt. Der Klimaprüfstand ist dafür in die CFD-Simulation integriert worden, um die Vergleichbarkeit zwischen dem

Experiment und der Simulation zu gewährleisten. In dem Experiment und der Simulation werden feste Werte für die Temperatur der Heizflächen, der Ausblastemperatur und den Luftmassenstrom vorgegeben. Zur Messung der T_{eq} im Klimaprüfstand wird gemäß Abbildung 22a der Klima-Dummy auf dem Fahrerplatz positioniert.

Die messtechnisch und simulativ ermittelten Äquivalenttemperaturen sind in Abbildung 22b dargestellt. Der kühle Luftstrom trifft zu einem großen Teil den Oberkörper des Klima-Dummies und zirkuliert in den Kopf- und Fußraum. Das Strömungsverhalten entspricht den simulierten Werten der T_{eq} die im KZM als blaue Kreise dargestellt sind. Die geringe Luftströmung gepaart mit einer hohen Wärmelast durch die Heizfolien sorgen für ein *warmen, jedoch komfortablen* thermischen Komfort im Kopf- und Fußbereich. Körperregionen, die durch den Luftstrom stärker gekühlt werden, werden als *neutral* bis hin zu *kalt, jedoch komfortabel* eingestuft. Die numerisch ermittelten Werte der T_{eq} passen damit zum simulierten Strömungsfeld. Ein Vergleich zwischen den messtechnisch ermittelten Werten der T_{eq} und den Simulationsergebnissen zeigt eine gute Übereinstimmung.

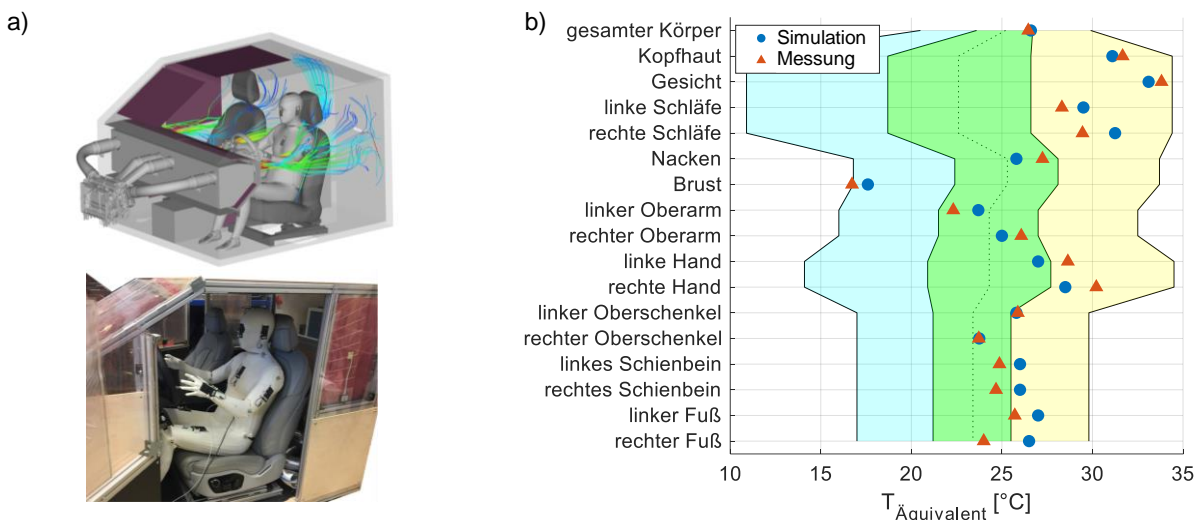


Abbildung 22 a) Vergleich zwischen dem virtuellen und physischen Klimaprüfstand mit Klima-Dummy;
b) Ergebnisse der T_{eq} für die Simulation und Messung, dargestellt im Sommer-KZM

Allgemein lassen sich die Abweichungen zwischen der Simulation und den Messungen auf geometrische Unterschiede, bedingt durch kleine Ungenauigkeiten bei der Positionierung des Klima-Dummies, zurückführen.

In Summe liefert die Simulationsmethodik zur numerischen Bestimmung der T_{eq} valide Ergebnisse. Die Methodik kann ergänzend zur messtechnischen Erfassung der T_{eq}

eingesetzt werden. Zudem eignet sie sich, um in frühen Phasen der Fahrzeugentwicklung Analysen zum thermischen Komfort durchzuführen und neue Klimatisierungskonzepte zu bewerten.

6 Klimakomfortstudien

Für die objektive Erfassung des Umgebungsklimas sind reliable Messungen und effiziente Untersuchungsmethoden nicht zu vernachlässigende Aspekte. Durch geeignete Komfortmodelle kann im Anschluss an die Messungen Aussagen zum thermischen Komfort getroffen werden. Je nach Fragestellung weisen die Modelle Grenzen der Bewertung auf, da der Anwendungsbereich oft nicht genau definiert ist. So ist zum Beispiel dem internationalen Standard DIN EN ISO 14505-2:2007-04 nur eine grobe Beschreibung zu entnehmen unter welchen Versuchsbedingungen das KZM entwickelt wurde. Detaillierte Informationen zu den Modelllimitationen werden nicht genannt [34]. Weiterhin weist die T_{eq} als Bewertungsgröße Grenzen auf, die nicht genauer definiert sind. Von diesen Problemen ausgehend, werden im folgenden Kapitel umfangreiche Komfortstudien mit Probanden durchgeführt. Ziel der Studien ist es den Anwendungsbereich klar zu definieren und ein verbessertes Komfortmodell zu entwickeln. Die erste Studie betrachtet den Einfluss von Solarstrahlung und die Eignung des KZMs zur Bewertung instationärer Klimabedingungen. In einer zweiten Studie wird die T_{eq} als Bewertungsgröße validiert und abschließend erfolgt auf der Grundlage von Nilssons Untersuchungen eine Neuentwicklung des KZMs [82].

Die folgenden Studien werden gemäß der Deklaration von Helsinki [135] und den Ethischen Grundsätzen der Föderation Deutscher Psychologenverbände [47] (in Anlehnung an den Code of Ethics der American Psychological Association (APA) [3]) durchgeführt. Die Ethikkommission der Technischen Universität München hat die Studien unter den Aktenzeichen *585/20 S*, *586/20 S* und *125/21 S* genehmigt.

6.1 Instationärer Einfluss von Solarstrahlung

Solarstrahlung zählt zu den primären Faktoren und hat damit einen erheblichen Einfluss auf den thermischen Komfort. In modernen Fahrzeugen wird ein großer Aufwand betrieben, die Sonneneinstrahlung, die oft als Störgröße wirkt, zu kompensieren. Durch spezielle Sensorik kann die Sonnenintensität, Sonnenhöhenwinkel und Azimut von der Klimaregelung berücksichtigt werden. Mehrzonen-Klimaautomatiken können somit gezielt sonnige Sitzplätze im Fahrzeug intensiver kühlen. Durch wechselnde Bewölkung kann es während einer realen Fahrt immer wieder zu schnellen Änderungen der Sonneneinstrahlung kommen. Ziel der Studie ist es herauszufinden, wie sensitiv

die Probanden auf plötzlich auftretende Wärmestrahlung reagieren und ob sich das KZM zur Voraussage des thermischen Komforts bei instationären Umgebungsbedingungen eignet.

6.1.1 Studiendesign

Die Studie wird im Klimaprüfstand bei einer Temperatur der Klimakammer von 24°C durchgeführt. Nach der Begrüßung erhalten die Probanden eine Sicherheitseinweisung. Danach wird ihnen der Ablauf des Versuchs erläutert. Anschließend beantworten sie demografische Fragen zu Geschlecht, Alter, Größe und Gewicht. Die Vorbefragung findet außerhalb der Klimakammer, bei einer Raumtemperatur von 22°C, statt. Die Studienteilnehmer werden angewiesen Kleidung bestehend aus Jeans, T-Shirt, Unterwäsche, Schuhe und Socken mit einem Gesamtisoliationsgrad von ca. 0,6 clo zu tragen. Zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit wird bei abweichenden Isolationsgraden entsprechende Kleidung den Probanden bereitgestellt. Im Anschluss an die Vorbefragung betreten die Probanden die Klimakammer und nehmen direkt im Klimaprüfstand Platz. Die Simulation der Sonneneinstrahlung erfolgt über eine Wärmelast durch das Beheizen der Frontscheibe. Die Frontscheibe erreicht dabei eine Temperatur von 90°C. Zum Beginn der Versuchszeit ist die Frontscheibe wie in Abbildung 23a dargestellt abgedeckt, sodass keine Wärmestrahlung auf den Probanden einwirkt. Zu diesem Zeitpunkt ist nach dem Sommer-KZM ein *neutraler* thermischer Komfort im Innenraum des Klimaprüfstands eingeregelt. Die Probanden werden über einen Zeitraum von 12 Min., alle 3 Min., nach ihrem subjektiven thermischen Komfort anhand der MTV-, Komfort- und Präferenz-Skala befragt (Tabelle 2, 5 & 6).

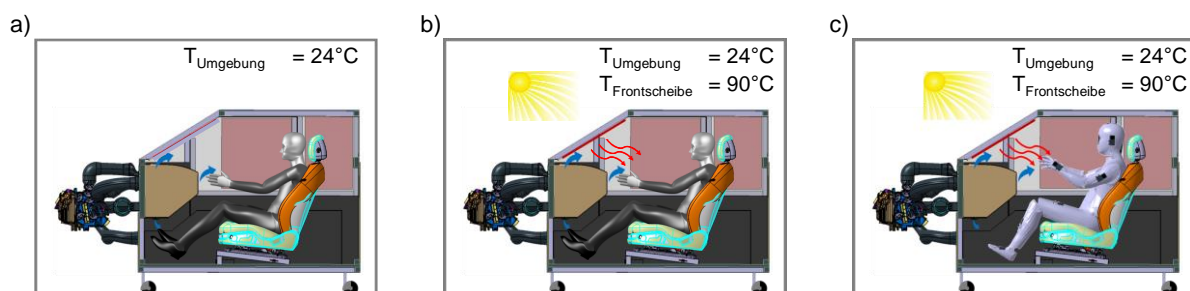


Abbildung 23 a) Fragerunde 1: Ausgangssituation ohne Wärmelast; b) Fragerunde 2-5 der Probanden: Versuch mit Wärmelast; c) Messtechnische Untersuchung mit Klima-Dummy, Versuchsablauf identisch zur Probandenstudie

Abgefragt werden die Bereiche Global, Gesicht, Brust, Oberarme, Hände und Oberschenkel. Nach dem ersten Frageintervall wird die Abdeckung von der Frontscheibe entfernt und die Probanden nehmen die Wärmelast vergleichbar zu Abbildung 23b war. Am Ende der Versuchszeit verlassen die Probanden die Klimakammer und geben Feedback zum Versuch. Zur objektiven Erfassung des Raumklimas wird der komplette Versuch gemäß Abbildung 23c mit dem Klima-Dummy mehrfach wiederholt.

6.1.2 Ergebnisse

Im ersten Teil der Ergebnisse wird auf die Studienpopulation und die demografischen Fragen eingegangen. Anschließend erfolgt ein Vergleich der subjektiv und objektiv ermittelten Komfortbewertungen sowie eine statistische Analyse der Daten. Zum Abschluss wird eine Analyse im Hinblick auf geschlechterspezifische Unterschiede durchgeführt.

Probandenpopulation

An der Studie haben 34 Probanden ($n = 34$) im Alter zwischen 21 bis 61 Jahren teilgenommen. Das ergibt ein durchschnittliches Alter von 28 Jahren ($SD = 8,7$). Die Verteilung zwischen männlichen und weiblichen Probanden liegt bei 17:17. Alle Teilnehmer sind im Besitz eines Führerscheins und fahren regelmäßig Auto mit einer durchschnittlichen Fahrleistung von 11.300 km ($SD = 9.990$).

Vergleich subjektive und objektive Komfortbewertung

Für eine bessere Vergleichbarkeit werden die Messergebnisse des Klima-Dummies mit dem Sommer-KZM in Werte der MTV-Skala umgerechnet. Der zeitliche Verlauf zwischen dem durchschnittlichen subjektiven Empfinden der Probanden (schwarzer Verlauf) und den objektiven Messungen (grauer Verlauf) ist in Abbildung 24 dargestellt. Die einzelnen Graphen stellen das thermische Empfinden unterschiedlicher Körperregionen dar. Der gelbe, grüne und blaue Bereich visualisieren die Komfortniveaus

- *warm, jedoch behaglich,*
- *neutral* und
- *kalt, jedoch behaglich.*

Im Fall der Probanden geben die schwarzen Fehlerbalken die Standardabweichung zu den gemittelten MTV-Werten wieder. Die in grau dargestellten Messungen des

Klima-Dummies werden aus Gründen der Übersicht ohne Fehlerbalken dargestellt. Die Standardabweichungen, die sich durch Messwiederholungen ergeben, sind auf einem niedrigen Niveau.

Zum Startzeitpunkt des Versuchs bewerten ein Großteil der Probanden den globalen thermischen Komfort als *neutral*. Der Fehlerbalken erreicht einen minimalen MTV-Wert von -0,8 womit die Antworten der Probanden bis in den Bereich *kalt, jedoch komfortabel* streuen. Nach einer Versuchszeit von drei Minuten steigt das Temperaturniveau und ein *warm, jedoch komfortabler* globaler Komfort resultiert, welcher bis zum Ende gehalten wird. Die Messung weist global zum Beginn der Versuchszeit leicht höhere MTV-Werte auf bei gleichem Komfortniveau. In den ersten Minuten unter der Wärmelast steigt der prognostizierte Komfort der Messung im Vergleich zu den Probanden langsamer, womit sich ein kleinerer Gradient einstellt. Zum Ende der Versuchszeit wird nach dem Sommer-KZM ebenfalls ein thermischer Komfort von *warm, jedoch komfortabel* erreicht, mit einem 0,26 niedrigerem MTV-Wert. Ähnliche Ergebnisse zum globalen Komfort ergeben sich lokal beim Gesicht, der Brust, der Oberarme und der Hände. Zu vereinzelten Zeitpunkten wird jedoch objektiv nicht immer dasselbe Komfortniveau der Probanden erreicht.

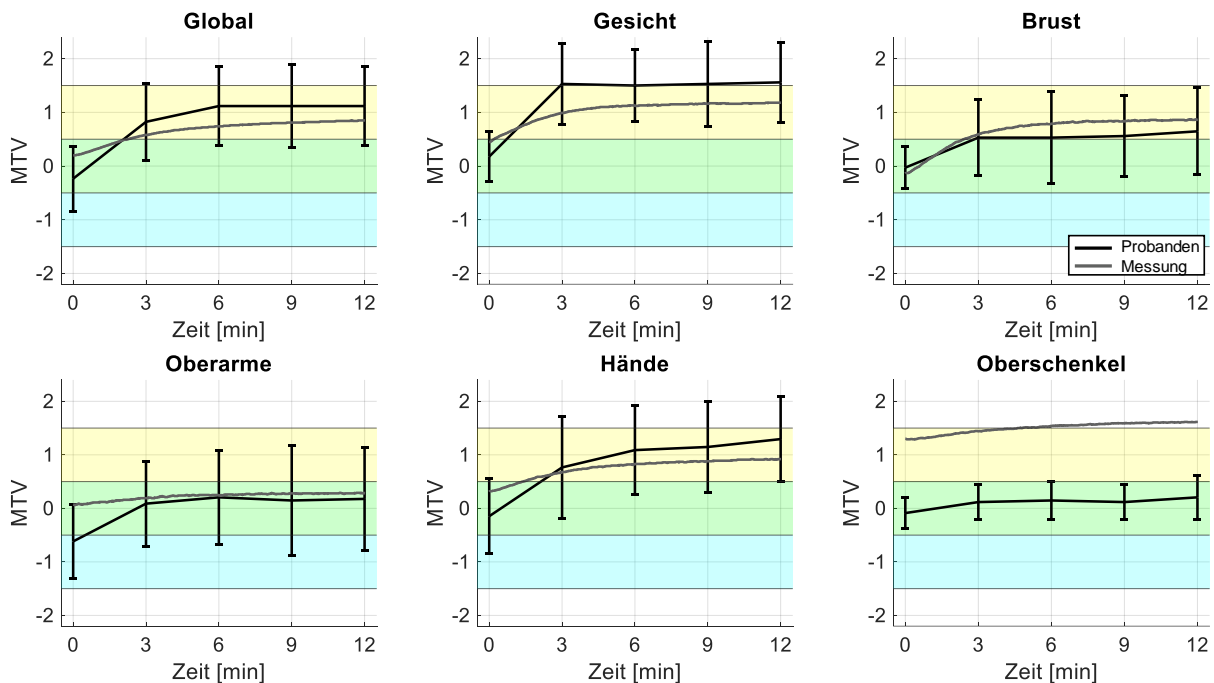


Abbildung 24 Instationärer Einfluss von Solarstrahlung: Vergleich des subjektiven thermischen Komforts (schwarzer Verlauf) und den objektiven Messungen des Klima-Dummies (grauer Verlauf) umgerechnet in die MTV-Werte mit dem Sommer-KZM; Die Fehlerbalken geben die Standardabweichung der durchschnittlichen MTV-Werte wieder

Größere Unterschiede zwischen den Ergebnissen der Probanden und der Messung weisen die Oberschenkel auf. Qualitativ ist der messtechnische Verlauf ähnlich zu dem der Probanden, jedoch wird von Anfang bis Ende ein wärmeres Komfortniveau prognostiziert. Allgemein reagieren die Probanden bei unbedeckten Körperregionen wie Gesicht und Hände sensitiver auf die Wärmestrahlung im Vergleich zu den bedeckten Regionen.

Statistisch können für einen Großteil der Zeitpunkte und Körpersegmente Äquivalenzen zwischen den subjektiven und objektiven Komfortbewertungen mittels Äquivalenztest (TOST-Verfahren) nachgewiesen werden. Die Ergebnisse der Äquivalenztests für die unterschiedlichen Körperregionen sind Tabelle 13 zu entnehmen. Für jeden der fünf betrachteten Zeitpunkte im Abstand von 3 Min. wird der Mittelwert M, die Standardabweichung SD, die Fehlerwahrscheinlichkeit p und das Ergebnis des Äquivalenztests angegeben. Die Äquivalenzlimits werden zu $\pm 0,5$ gewählt und aufgrund der kleinen Probandenstichprobe wird ein Signifikanzniveau von $\alpha < 10\%$ festgelegt. Die Größe des Konfidenzintervalls entspricht damit den Kategorien der MTV-Skala, womit bei Äquivalenz auch dieselbe Bewertung für den thermischen Komfort resultiert.

Tabelle 13: Instationärer Einfluss von Solarstrahlung: Äquivalenztest für die subjektive und objektive Komfortbestimmung bei einem Signifikanzniveau von $\alpha < 10\%$

Global	M	SD	p	M	SD	p	M	SD	p	M	SD	p	M	SD	p
Proband	-0,2	0,6	0,307	0,8	0,7	0,04	1,1	0,7	0,197	1,1	0,8	0,093	1,1	0,7	0,045
Messung	0,2	0,1		0,6	0,1		0,7	0,1		0,8	0,1		0,9	0,1	
Äquivalenz	nicht signifikant			signifikant			nicht signifikant			signifikant					
Gesicht	M	SD	p	M	SD	p	M	SD	p	M	SD	p	M	SD	p
Proband	0,2	0,5	0,006	1,5	0,8	0,698	1,5	0,7	0,147	1,5	0,8	0,175	1,6	0,8	0,189
Messung	0,5	0,1		1,0	0,1		1,1	0,1		1,2	0,1		1,2	0,1	
Äquivalenz	signifikant			nicht signifikant			nicht signifikant			nicht signifikant					
Brust	M	SD	p	M	SD	p	M	SD	p	M	SD	p	M	SD	p
Proband	-0,1	0,4	0,013	0,5	0,7	0,006	0,5	0,9	0,116	0,6	0,8	0,132	0,7	0,8	0,090
Messung	-0,1	0,2		0,6	0,3		0,8	0,3		0,8	0,3		0,9	0,3	
Äquivalenz	signifikant			signifikant			nicht signifikant			nicht signifikant					
Oberarme	M	SD	p	M	SD	p	M	SD	p	M	SD	p	M	SD	p
Proband	-0,6	0,7	0,931	0,1	0,8	0,003	0,2	0,9	0,002	0,1	1	0,020	0,2	1	0,014
Messung	0,1	0		0,2	0		0,2	0,1		0,3	0,1		0,3	0	
Äquivalenz	signifikant			signifikant			signifikant			signifikant					
Hände	M	SD	p	M	SD	p	M	SD	p	M	SD	p	M	SD	p
Proband	-0,1	0,7	0,395	0,8	1,0	0,018	1,1	0,8	0,082	1,1	0,9	0,092	1,3	0,8	0,223
Messung	0,3	0,2		0,7	0,2		0,8	0,2		0,9	0,2		0,9	0,2	
Äquivalenz	signifikant			signifikant			signifikant			nicht signifikant					
Obersch.	M	SD	p	M	SD	p	M	SD	p	M	SD	p	M	SD	p
Proband	-0,1	0,3	0,181	0,1	0,3	0,100	0,1	0,4	0,239	0,1	0,3	0,434	0,2	0,4	0,440
Messung	1,3	0,1		1,4	0,1		1,5	0,1		1,6	0,1		1,7	0,1	
Äquivalenz	nicht signifikant			nicht signifikant			nicht signifikant			nicht signifikant					
Zeit [min]	0			3			6			9			12		

Geschlechterspezifische Unterschiede

Betrachtet man die weiblichen Probanden separat, weisen sie im Vergleich zu den männlichen Probanden im Durchschnitt leicht niedrigere MTV-Werte auf. Mit Ausnahme der Oberarme ergibt sich bei beiden Geschlechtern, lokal wie global, dasselbe Komfortniveau. Die Oberarme werden von den Frauen am Anfang als *kalt, jedoch komfortabel* und am Ende der Versuchszeit als *neutral* bewertet. Die Ergebnisse der Komfortbewertungen sind in Abbildung 25 visualisiert.

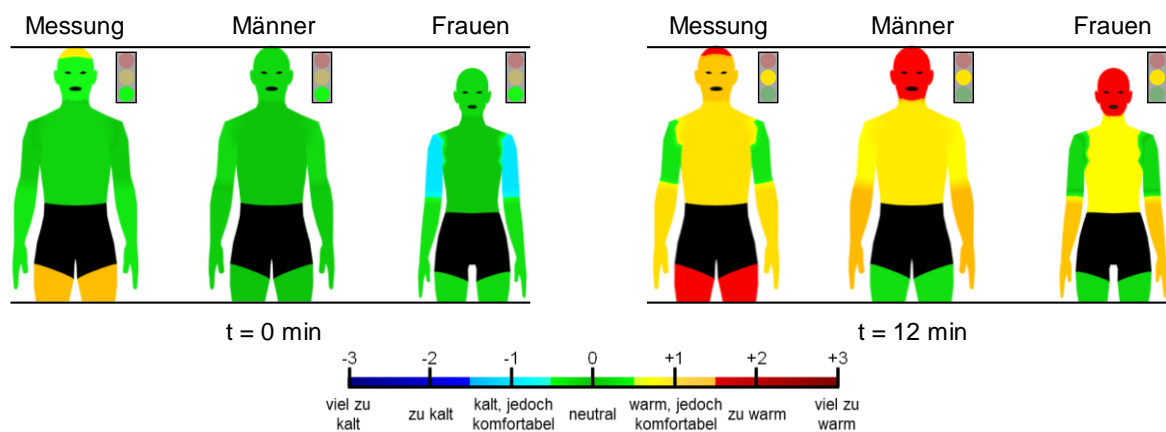


Abbildung 25 Ergebnisse der objektiven und subjektiven Komfortbewertung zum Beginn (t = 0 min) und Ende der Versuchszeit (t = 12min); Die Ampel repräsentiert den globalen thermischen Komfort

Der globale thermische Komfort wird durch die Ampeln wiedergegeben. Über die gesamte Versuchszeit stimmt das globale Komfortniveau der männlichen und weiblichen Probanden mit dem der Messungen überein. Der zeitliche Verlauf der Komfortbewertung der männlichen und weiblichen Probanden ist Anhang B.2 zu entnehmen.

6.1.3 Diskussion

Die Ergebnisse der Studie verdeutlichen den Einfluss der Wärmestrahlung auf den thermischen Komfort. Kurz nachdem die Abdeckung von der Frontscheibe entfernt wird registrieren die Probanden den zusätzlichen Wärmestrom, wodurch bei der Befragung ein wärmeres Umgebungsklima zurückgemeldet wird. Nach 3 Min. folgen nur noch kleinere Änderungen der MTV-Werte. Auch objektiv wird die Wärmestrahlung von dem Klima-Dummy direkt erfasst, jedoch stellt sich hier ein etwas trägeres Verhalten ein. Durch die Umrechnung der T_{eq} in MTV-Werte kann die Vorhersagegüte des

KZMs untersucht werden. In der weiter folgenden Diskussion werden die umgerechneten MTV-Werte stellvertretend für die T_{eq} -Messungen besprochen. Nach einer Versuchszeit von 6 Min. gehen die MTV-Werte in eine Sättigung über (vgl. Abbildung 24). Dieses Verhalten ist auf ein stabiles, jedoch etwas langsames Regulationsprinzip der Sensoren zurückzuführen [20, 34]. Das trägere Verhalten der Sensoren bedingt kurzzeitig größere Abweichungen zu den subjektiven MTV-Werten der Probanden. Aus diesem Grund sollte bei instationären Vorgängen den Sensoren ausreichend Zeit zum Nachregeln gegeben werden, sodass sich ein stabiler Messwert einstellen kann. Bei großen Änderungen der Umgebungsbedingungen wird ein Zeitraum von 5 bis 10 Min. empfohlen. Bei Versuchen unter realen Umwelteinflüssen mit schnell wechselnden Randbedingungen ist zu prüfen, inwieweit die Dynamik der Sensoren ausreichend für belastbare Messungen ist.

Betrachtet man die Ausgangssituation des Versuchs, ergeben sich für die meisten Körperregionen größere Abweichungen zwischen den subjektiven und objektiven Daten. Vor dem ersten Frageintervall bleibt den Probanden sehr wenig Zeit sich auf das neue Innenraumklima einzustellen. Für zukünftige Untersuchungen sollte man den Probanden mehr Zeit für die Eingewöhnungsphase im Klimaprüfstand geben. Damit könnte eine bessere Übereinstimmung zwischen den subjektiven und objektiven MTV-Werten zum Startzeitpunkt erzielt werden.

Allgemein stimmt das prognostizierte Komfortniveau der umgerechneten MTV-Werte gut mit dem subjektiven Empfinden der Probanden überein. Statistisch kann für die meisten Zeitpunkte eine Äquivalenz nachgewiesen werden (vgl. Tabelle 13). Damit eignet sich das KZM in gewissen Grenzen auch zur Bewertung von instationären Vorgängen. Die statischen Zonen des Modells können hier als Zielwerte interpretiert werden. Die Vorhersagegüte ist jedoch stark an das KZM gekoppelt. Im Bereich der Oberschenkel erreichen die Messungen qualitativ einen ähnlichen Verlauf, jedoch wird das Komfortniveau nicht richtig wiedergegeben. Eine Verbesserung der Prognose im Bereich der Oberschenkel kann nur durch Anpassungen des KZMs erreicht werden.

Ordnet man die erzielten Ergebnisse in die Literatur ein, finden sich mehrere Studien die unterschiedliche Einflussfaktoren, wie z.B. Intensität oder Strahlungsspektrum der Solarstrahlung auf den thermischen Komfort untersuchen. Diese verwenden keine Klimasummenmaße zur objektiven Bewertung der thermischen Umgebung, womit sie

sich für einen Vergleich der Ergebnisse nicht eignen [60, 61]. Schwab, sowie Bohm et al. haben in ihren Untersuchungen gezeigt, dass sich Messungen der T_{eq} für die Bewertung von Solarstrahlung unter stationären Bedingungen eignen [11, 110]. In Anbetracht der Ergebnisse kann die T_{eq} auch für instationäre Klimabedingungen als Bewertungsgröße verwendet werden. Die Übereinstimmung mit den subjektiven Komfortbewertung der Probanden stellt einen erweiterten Einsatzbereich des KZMs für instationäre Umgebungsverhältnisse dar.

6.2 Validierung der Äquivalenttemperatur als Bewertungsgröße

Die Anwendung des KZMs zur Bewertung neuer Klimatisierungskonzepte setzt die T_{eq} als valide Bewertungsgröße zur objektiven Erfassung der thermischen Umgebung voraus. Entsprechend der Definition der T_{eq} werden aus physikalischer Sicht klimatische Zustände als äquivalent angesehen, die denselben Wärmeverlust zur Folge haben. Aus physiologischer Sicht stellt sich jedoch die Frage, ob klimatisch äquivalente Bedingungen auch den selben thermischen Komfort hervorrufen. Im Rahmen einer Studie wird zur Validierung der T_{eq} als Bewertungsgröße der Verlauf einer Isokomfortlinie im Klimaprüfstand nachgefahren. Das Ziel der Studie ist es unter stetig wechselnden thermischen Randbedingungen ein Innenraumklima mit stationären Werten der T_{eq} zu erzeugen, sodass in der Theorie auch ein stationärer Komfort resultiert. Hierzu werden die Ausblas- gegenüber den Heizfolientemperaturen stufenweise verfahren, um äquivalente Klimabedingungen zu erzeugen.

6.2.1 Studiendesign

Als Voraussetzung für die Umsetzung der Studie ist es notwendig die unterschiedlichen Paarungen der Ausblas- und Heizfolientemperaturen zu kennen, die ein äquivalentes Klima zur Folge haben. In einer messtechnischen Untersuchung wird für den parallelen Betrieb aller Heizfolien ein Isokomfortdiagramm erstellt. Der Betrieb aller acht Heizgruppen soll für eine symmetrische Verteilung der Wärmestrahlung sorgen. Die Versuche werden bei einer Umgebungstemperatur von 5°C in der Klimakammer durchgeführt. Auf der Grundlage des Isokomfortdiagramms werden in weiteren Abstimmungsrunden die Parameter des Klimaprüfstands ermittelt, um den Verlauf einer Isokomfortlinie bei 25°C zu reproduzieren. Der zeitliche Verlauf der Ausblas- und Heiz-

folientemperaturen des Klimaprüfstands ist in Abbildung 26 dargestellt. Die Ausblas-temperaturen starten bei 39°C und werden innerhalb der Versuchszeit von 14 Min. auf 13,5°C reduziert. Die immer geringer werdende konvektive Wärmeleistung wird stufenweise durch Wärmestrahlung kompensiert. Die Oberflächentemperaturen heizen sich dabei von 20°C bis zu 41°C auf. Um einer Kopfraumüberhitzung entgegenzuwirken, wird die Temperatur der Heizfolien *Dachhimmel* und *I-Tafel oben* nach 6:30 Min. reduziert. Durch die Reduzierung der Ausblastemperatur steigt die Luftdichte, weswegen die Gebläsedrehzahl von 1800 u/min gleichmäßig auf 1600 u/min reduziert wird, um einen konstanten Luftmassenstrom zu gewährleisten.

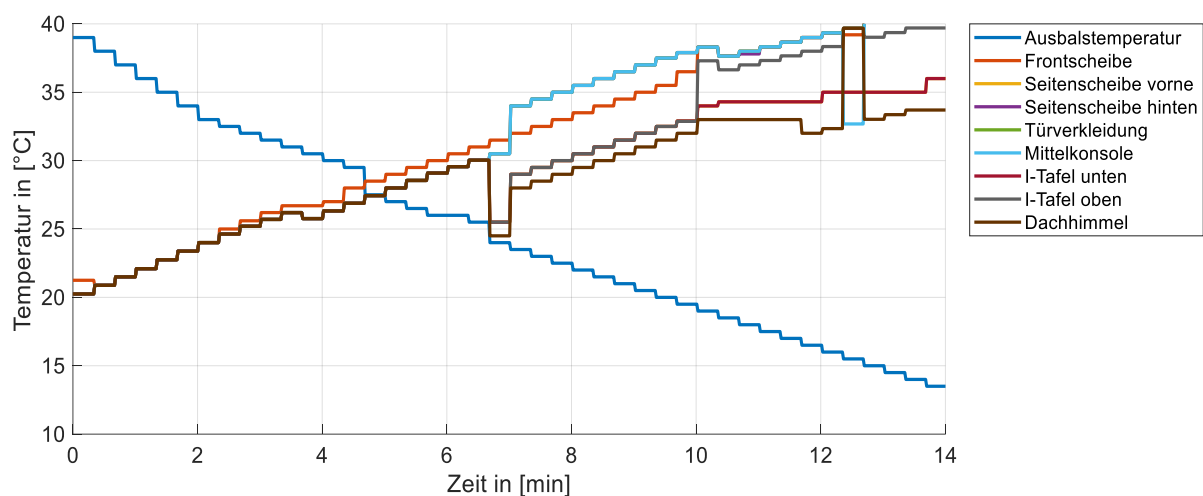


Abbildung 26 Zeitlicher Verlauf der Soll-Werte für die Ausblas- und Heizflächentemperaturen im Klimaprüfstand, bei einer Umgebungstemperatur von 5°C

Zur Sicherstellung reproduzierbarer Versuchsbedingungen erfolgt vor jedem Probandendurchgang eine Vorkonditionierungsphase von 60 Min. Der Ablauf der Probandenstudie unterteilt sich in die Vorbefragung, den Versuch und die Feedbackrunde. Im Rahmen der Vorbefragung füllen die Probanden eine gekürzte Version (Abschnitt: 1 & 3-4) des demografischen Fragebogens in Anhang B.3 aus (vgl. Abbildung 60). Während der Vorbefragung können sich die Probanden bei 22°C Zimmertemperatur akklimatisieren. Für die Vergleichbarkeit der Studienergebnisse werden die Probanden angewiesen einen Pullover mit 0,28 clo zu tragen und während der Versuchszeit die Hände am Lenkrad auf der 10- und 2-Uhr-Position zu belassen. Anschließend betreten die Probanden die Klimakammer und nehmen im Klimaprüfstand Platz. Die Kommunikation mit dem Versuchsleiter erfolgt über eine Gegensprechanlage. Während der 14-minütigen Versuchszeit wird in fünf Fragerunden, mit einem zeitlichen Abstand von

3min30s, Fragen zur Beurteilung der thermischen Belastung gestellt. Der Fragebogen ist Anhang B.3, Abbildung 61 zu entnehmen. Zur Überprüfung der thermischen Bedingungen im Klimaprüfstand ist ein Klima-Dummy auf dem Beifahrerplatz positioniert. Die Messwerte der T_{eq} für den Vergleich mit den subjektiven Daten der Probanden sind im Rahmen der Abstimmungsrunden, entsprechend den Richtlinien zur Versuchsdurchführung (vgl. Abschnitt 4.4), auf dem Fahrplatz aufgezeichnet worden. Zum Abschluss der Studie können die Probanden in einer Feedbackrunde zurückmelden, ob sie Änderungen der Ausblas- und Oberflächentemperaturen registriert haben.

6.2.2 Ergebnisse

Zuerst werden die Ergebnisse des demografischen Fragebogens der Studienpopulation und anschließend die objektiven Messungen des Klima-Dummies vorgestellt. Für eine bessere Vergleichbarkeit werden im zweiten Teil die Messergebnisse der T_{eq} in Komfortwerte umgerechnet und mit den subjektiven Daten der Probanden verglichen. Abschließend erfolgt eine Äquivalenzanalyse der Daten.

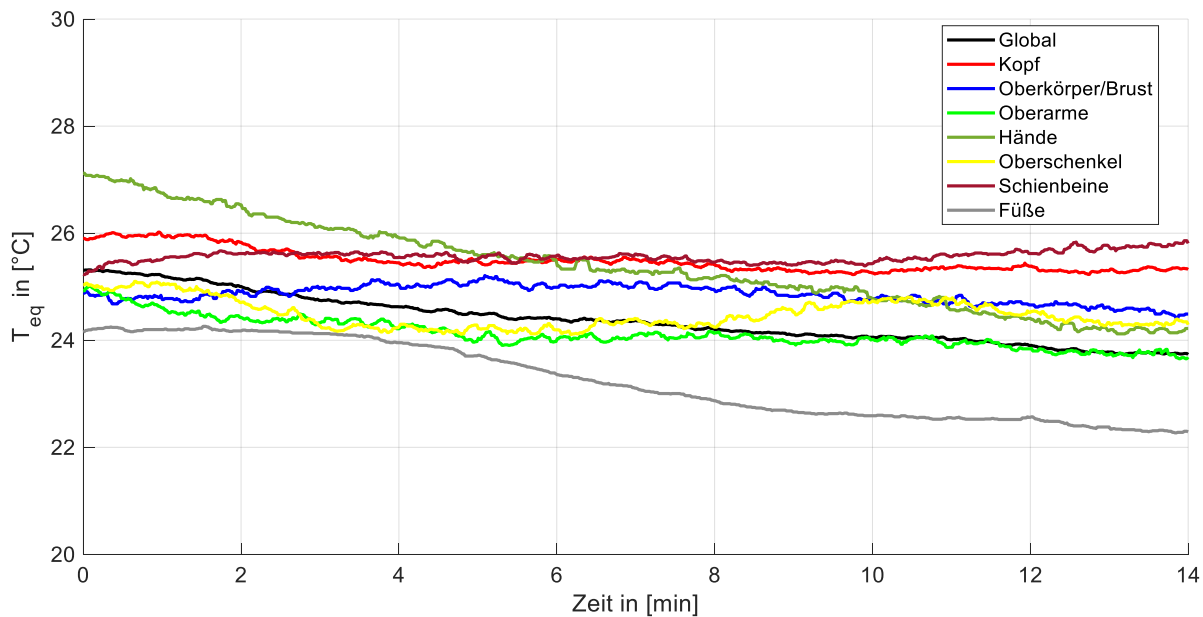
Studienpopulation

An der Studie haben insgesamt 41 Probanden ($n = 41$) teilgenommen mit einem Anteil von 59% Männern und 41% Frauen. Das durchschnittliche Alter beträgt 27 Jahre ($SD = 6,3$) mit einer Altersspanne von 19 bis 62 Jahren. Alle Probanden sind im Besitz eines gültigen Führerscheins, fahren regelmäßig mit dem Auto und 88% nutzen während der Fahrt die Klimaanlage.

Quasistationäres Innenraumklima

Die stetigen Änderungen der Ausblas- und Oberflächentemperaturen im Klimaprüfstand haben ein quasistationäres Innenraumklima zur Folge. Mit fortschreitender Versuchszeit nimmt die konvektive Wärmeübertragung ab und die fehlende Wärme wird durch die Wärmestrahlung kompensiert. Der zeitliche Verlauf der Messergebnisse für die unterschiedlichen Körperregionen sowie die Mittelwerte M und Standardabweichungen SD über die Versuchszeit von 14 Min. sind in Abbildung 27 dargestellt. Die Messungen des Klima-Dummies weisen für die meisten Körperregionen nur geringe Änderungen der T_{eq} auf. Für die Bereiche Kopf, Oberkörper/Brust, Oberarme, Oberschenkel und Schienbeine liegen die Werte der Standardabweichung zwischen $0,1^{\circ}C$

und $0,28^{\circ}\text{C}$, sodass diese weitestgehend als stationär angesehen werden können. Höhere Standardabweichungen werden global sowie lokal in den Bereichen der Hände und Füße erreicht. Hier sinken die Äquivalenttemperaturen mit fortschreitender Versuchszeit. Global beträgt die Differenz der T_{eq} von Anfang bis zum Ende der Versuchszeit $1,57^{\circ}\text{C}$. Die T_{eq} der Hände werden $2,9^{\circ}\text{C}$ kälter und die Werte der Füße reduzieren sich um $1,86^{\circ}\text{C}$.



	Global	Kopf	Oberkörper/Brust	Oberarme	Hände	Oberschenkel	Schienbeine	Füße
M	24,39	25,48	24,86	24,13	25,39	24,49	25,57	23,25
SD	0,45	0,21	0,18	0,28	0,83	0,27	0,10	0,71

Abbildung 27 Zeitlicher Verlauf der globalen und lokalen Messwerte der T_{eq} , sowie Mittelwerte und Standardabweichungen über die Versuchszeit von 14 Min.

Vergleich subjektive und objektive Komfortbewertung

Für einen Großteil der Körperregionen herrschen äquivalente Klimabedingungen über die gesamte Versuchszeit. Zur Validierung der T_{eq} als Bewertungsgröße werden die objektiven Messergebnisse mit den subjektiven Komfortbewertungen der Probanden verglichen. Analog zur vorherigen Studie werden die Messwerte der T_{eq} mit dem KZM nach Nilsson in MTV-Werte umgerechnet. Für eine bessere Vergleichbarkeit der qualitativen Verläufe werden zusätzlich die umgerechneten MTV-Werte der Messungen entlang der y-Achse parallel verschoben, sodass zum Zeitpunkt 0 die Startwerte der objektiven und subjektiven Daten identisch sind. Ähnlich wie Abschnitt 6.1.2 sind die Ergebnisse der Probanden und Messungen in Abbildung 28 dargestellt. Das Empfinden der Probanden global und in den Bereichen Kopf, Oberkörper/Brust, Oberarme

und Oberschenkel stimmen mit dem Verlauf des prognostizierten thermischen Komforts sehr gut überein. Die Differenz zu den Messungen dieser Körpersegmente ist mit 0,17 im Bereich der Oberschenkel am größten. Die Körpersegmente Hände, Schienbeine und Füße werden von den Probanden subjektiv etwas kälter bewertet im Vergleich zu den Messungen. Im Bereich der Hände und Füße sind die maximalen Abweichungen zwischen den objektiven und subjektiven Daten mit 0,25 gering. Von allen Körperregionen weisen die Bewertungen der Schienbeine die größten Unterschiede auf. Nach einer Versuchszeit von 14 Min. beträgt die Differenz 0,51.

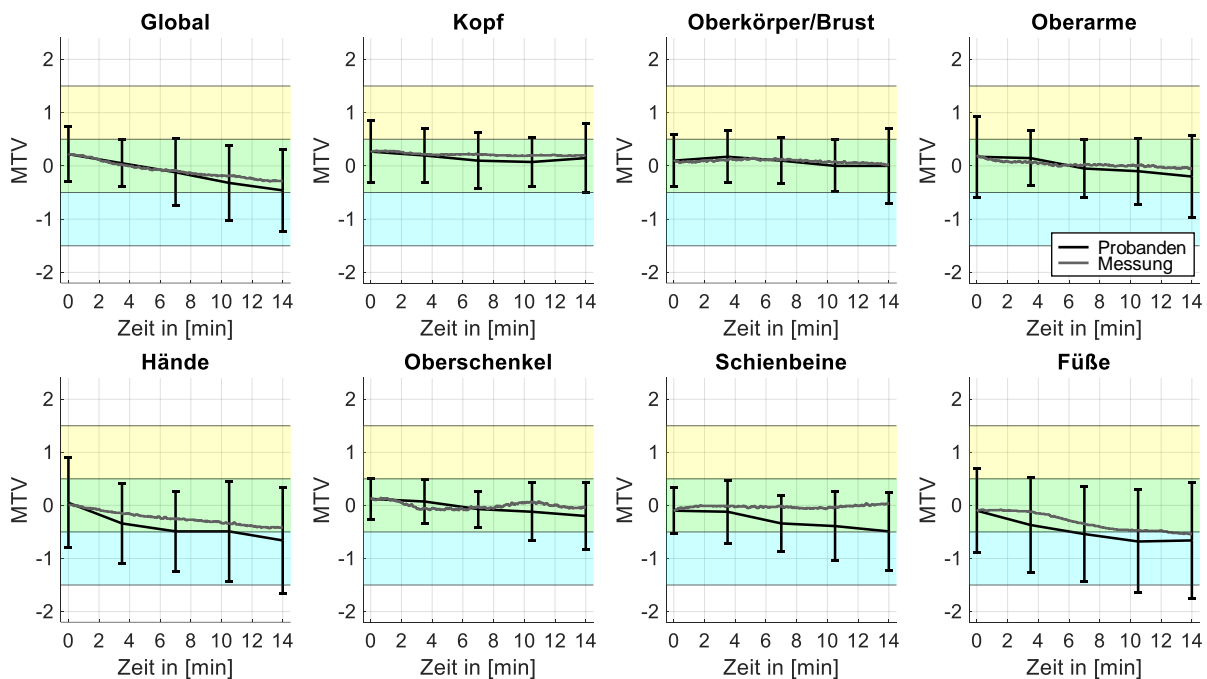


Abbildung 28 Validierung der T_{eq} als Bewertungsgröße: Vergleich des subjektiven thermischen Komforts und den objektiven Messungen des Klima-Dummies umgerechnet in die MTV-Werte mit dem Sommer-KZM. Die Fehlerbalken geben die Standardabweichung der durchschnittlichen MTV-Werte wieder.

Für die statistische Analyse der Daten werden für die subjektiven und objektiven Komfortbewertungen Äquivalenztests (TOST-Verfahren) durchgeführt. Die Äquivalenzlimits betragen $\pm 0,5$, bei einem Signifikanzniveau von $\alpha < 10\%$. Für 38 der 40 Zeitpunkte kann eine Äquivalenz nachgewiesen werden. Die Fehlerwahrscheinlichkeit p liegt für die 38 Zeitpunkte unter 5%. Mit p -Werten von 13,7% und 14,9% sind die Antworten der Probanden im Bereich der Schienbeine für die letzten zwei Fragerunden nicht äquivalent zu den objektiven Komfortbewertungen. Die Ergebnisse der Äquivalenztests sind in Tabelle 14 dargestellt.

Tabelle 14 Validierung der T_{eq} als Bewertungsgröße: Äquivalenztest für die subjektive und objektive Komfortbestimmung bei einem Signifikanzniveau von $\alpha < 10\%$

Global	M	SD	p	M	SD	p	M	SD	p	M	SD	p	M	SD	p
Proband	0,2	0,5	0,022	0	0,4	0,012	-0,1	0,6	0,008	-0,3	0,7	0,036	-0,5	0,8	0,047
Messung	0,2	0,1		0	0,2		-0,1	0,2		-0,2	0,2		-0,3	0,2	
Äquivalenz	signifikant			signifikant			signifikant			signifikant			signifikant		
Kopf	M	SD	p	M	SD	p	M	SD	p	M	SD	p	M	SD	p
Proband	0,3	0,6	0,012	0,2	0,5	0,009	0,1	0,5	0,024	0,1	0,5	0,021	0,2	0,6	0,014
Messung	0,3	0,2		0,2	0,2		0,2	0,2		0,2	0,2		0,2	0,2	
Äquivalenz	signifikant			signifikant			signifikant			signifikant			signifikant		
Oberk./Brust	M	SD	p	M	SD	p	M	SD	p	M	SD	p	M	SD	p
Proband	0,1	0,5	0,001	0,2	0,5	0,003	0,1	0,4	0,001	0	0,5	0,005	0	0,7	0,017
Messung	0,1	0,2		0,1	0,2		0,1	0,2		0,1	0,2		0,1	0,2	
Äquivalenz	signifikant			signifikant			signifikant			signifikant			signifikant		
Oberarme	M	SD	p	M	SD	p	M	SD	p	M	SD	p	M	SD	p
Proband	0,2	0,8	0,020	0,1	0,5	0,005	0	0,5	0,007	-0,1	0,6	0,023	-0,2	0,8	0,048
Messung	0,2	0,2		0,1	0,2		0	0,2		0	0,3		0	0,3	
Äquivalenz	signifikant			signifikant			signifikant			signifikant			signifikant		
Hände	M	SD	p	M	SD	p	M	SD	p	M	SD	p	M	SD	p
Proband	0	0,9	0,021	-0,3	0,8	0,035	-0,5	0,8	0,041	-0,5	0,9	0,044	-0,7	1	0,049
Messung	0	0,3		-0,2	0,3		-0,3	0,3		-0,3	0,3		-0,4	0,4	
Äquivalenz	signifikant			signifikant			signifikant			signifikant			signifikant		
Obersch.	M	SD	p	M	SD	p	M	SD	p	M	SD	p	M	SD	p
Proband	0,1	0,4	0,009	0,1	0,4	0,010	0	0,3	0,002	-0,1	0,5	0,031	-0,2	0,6	0,029
Messung	0,1	0,2		0	0,2		0	0,2		0,1	0,2		0	0,2	
Äquivalenz	signifikant			signifikant			signifikant			signifikant			signifikant		
Schienbeine	M	SD	p	M	SD	p	M	SD	p	M	SD	p	M	SD	p
Proband	-0,1	0,4	0,001	-0,1	0,6	0,011	-0,3	0,5	0,048	-0,4	0,7	0,137	-0,5	0,7	0,149
Messung	-0,1	0,2		0	0,2		0	0,2		0	0,1		0	0,1	
Äquivalenz	signifikant			signifikant			signifikant			Nicht signifikant			nicht signifikant		
Füße	M	SD	p	M	SD	p	M	SD	p	M	SD	p	M	SD	p
Proband	-0,1	0,8	0,011	-0,4	0,9	0,047	-0,5	0,9	0,034	-0,7	1	0,043	-0,7	1,1	0,041
Messung	-0,1	0,3		-0,1	0,4		-0,4	0,4		-0,5	0,4		-0,5	0,4	
Äquivalenz	signifikant			signifikant			signifikant			signifikant			signifikant		
Zeit [min:ss]	0			3:30			7:00			10:30			14:00		

6.2.3 Diskussion

Im ersten Teil wird auf die erzeugten Klimabedingungen eingegangen, um zu prüfen, ob das gewählte Versuchsdesign äquivalente Klimabedingungen für eine Validierung der T_{eq} als Bewertungsgröße herstellt. Anschließend folgt eine Diskussion der Auswertungsmethode sowie der erzielten subjektiven und objektiven Daten. Auf Basis dieser Diskussion werden die Ergebnisse im Zusammenhang der Zielsetzung eingeordnet. Abschließend wird auf Grenzen der vorgestellten Validierung eingegangen.

Die Untersuchungen im Klimaprüfstand zeigen, dass äquivalente Klimabedingungen unter stark variierenden thermischen Randbedingungen erzeugt werden können. Für einen Großteil der betrachteten Körpersegmente werden nur kleine Schwankungen der T_{eq} festgestellt. Die größten Änderungen weisen die Messwerte an den Händen und Füßen auf. Die beheizte Instrumententafeloberseite schafft es nicht ausreichend die fehlende konvektive Wärmeleistung zu kompensieren, da die Sichtfaktoren zu den

Äquivalenttemperatursensoren, die sich auf der Handrückseite des Klima-Dummies befinden, sehr gering sind. Zusätzliche Strahlungsquellen sind notwendig, um hier ein Absenken der T_{eq} zu verhindern. Zum Zeitpunkt der Untersuchungen sind die Heizfolien im Fußraum aufgrund von Reparaturarbeiten nicht einsatzbereit. Zur Kompensierung der fehlenden Strahlungswärme wird während der Vorkonditionierungsphase ersatzweise viel warme Luft in den Fußraum eingeblasen. Mit Reduzierung der Ausblasttemperaturen wird im Laufe der Versuchszeit ebenfalls der Massenstrom im Fußraum reduziert. Ohne Heizfolien im Fußraum sind die Maßnahmen jedoch nicht ausreichend, um die T_{eq} konstant zu halten. Die stetig sinkenden Messwerte im Bereich der Hände und Füße wirken sich somit negativ auf den Globalwert aus, da dieser aus dem Mittelwert der 16 Sensoren des Klima-Dummies gebildet wird. In Summe stellt der Klimaprüfstand während der Versuchszeit weitestgehend äquivalente Klimabedingungen bereit, womit die grundlegenden Voraussetzungen für die Validierung der T_{eq} als Bewertungsgröße geschaffen sind.

Die nach dem KZM umgerechneten Messergebnisse werden entlang der y-Achse verschoben, sodass sie mit dem Ausgangsniveau der Probandenbewertungen übereinstimmen. Mit diesem Vorgehen können die objektiven und subjektiven Daten direkt miteinander verglichen werden, unabhängig davon wie gut die Vorhersagegüte des Komfortmodells ist. Nahezu gleichbleibende Werte der T_{eq} führen auch zu annähernd konstanten Komfortbewertungen des KZMs. In Bereichen, wo die Äquivalenttemperaturen nicht konstant gehalten werden, wird der Verlauf durch die Umrechnung in die MTV-Werte vom KZM bestimmt. Im Bereich des Oberkörpers ist der Verlauf der Messung im Vergleich zum thermischen Komfort der Probanden nahezu deckungsgleich. Die Probanden bewerten die Klimabedingungen für den Kopf, die Oberarme und die Oberschenkel ebenfalls gleichbleibend komfortabel. Durch die Verschiebung entlang der y-Achse kann bei Änderungen der T_{eq} nicht mehr das resultierende Komfortniveau beurteilt werden, dennoch können Aussagen zum Verlauf getroffen werden. In den Bereichen Global, Hände und Füße verhält sich der Verlauf der Messungen sehr ähnlich zu dem Empfinden der Probanden. Mit Reduzierung der T_{eq} resultieren bei den Probanden auch kühlere Komfortbewertungen. Die Änderungen werden global gesehen durch das KZM gut vorausgesagt. Für die Körpersegmente Hände und Füße unterschätzt das KZM die Reduzierungen der T_{eq} leicht. Nur im Bereich der Schienbeine

gehen die Bewertungen der Messungen mit den Komfortbewertungen der Probanden auseinander. Die T_{eq} wird in diesem Bereich sehr konstant gehalten, jedoch sinkt nach der zweiten Fragerunde das Komfortniveau der Probanden. Eine mögliche Erklärung für dieses Ergebnis könnte der kühler werdende Fußraum sein. Rückmeldungen der Probanden haben ergeben, dass Bewertungen zweier angrenzenden Körperbereiche oft nicht so einfach zu differenzieren sind. Die kälter werdenden Füße nehmen damit auf die Komfortbewertungen der Schienbeine Einfluss. Dieser Einfluss zeigt sich in den subjektiven Bewertungen leicht verzögert. Nach der dritten Fragerunde (nach 7 Min.) reduziert sich das Komfortniveau der Schienbeine. Bis auf die Schienbeine decken sich die qualitativen Betrachtungen der Verläufe mit den statistischen Analysen der Äquivalenztests.

In der Literatur finden sich keine Untersuchungen zur Validierung der T_{eq} . In Studien von Nilsson, Danca, Wöhrle oder Park et al. wird die T_{eq} als Beurteilungsgröße verwendet, ohne genauer auf die Gültigkeit der Definition einzugehen [24, 82, 88, 89, 133]. Ziel der vorgestellten Untersuchung ist es herauszufinden, ob entsprechend der Beurteilung der T_{eq} physikalisch äquivalente Klimabedingungen, die einen vergleichbaren Wärmeverlust zur Folge haben, auch aus physiologischer Sicht gleichbleibend komfortabel empfunden werden. Körperbereiche bei denen die T_{eq} nicht konstant gehalten wird, sind für die Untersuchung zweitrangig. Hier nimmt die Vorhersagegüte des KZMs großen Einfluss, womit die Validierung der T_{eq} nur in Abhängigkeit des KZMs erfolgen kann. Betrachtet man die Körpersegmente bei denen die T_{eq} annähernd konstant gehalten werden, resultiert aus physiologischer Sicht auch ein gleichbleibendes Komfortniveau.

Im Rahmen der Studie kann damit die T_{eq} als objektive Beurteilungsgröße validiert werden. Klimatisch äquivalente Bedingungen, die beim Menschen einen konstanten Wärmeverlust zur Folge haben, führen somit zu einem gleichbleibenden thermischen Komfort. Diese Aussage ist jedoch nicht allgemein gültig, da in der Studie keine extremen Temperaturkombinationen untersucht wurden. Mit Steigerung des Massenstroms nimmt die Kühlleistung deutlich zu. Die Kühlleistung kann theoretisch durch eine Steigerung der Wärmestrahlung kompensiert werden, sodass wieder ein gleichbleibender Wärmeverlust beim Menschen resultiert. Mit steigendem Luftmassenstrom erhöht sich

die Wahrscheinlichkeit für störende Luftbewegungen, womit man in den Bereich der Zugluft kommt. Zugluft beeinflusst den thermischen Komfort negativ, weswegen der klimatische Zustand, im Vergleich zu Klimabedingungen ohne Zugluft, nicht mehr als äquivalent empfunden wird. Allgemein ergeben sich Einschränkungen für Klimabedingungen die eine physiologische Reaktion des menschlichen Körpers, wie z.B. schwitzen, zur Folge haben. Solche Effekte werden von der T_{eq} nicht berücksichtigt. Aufgrund des in der Studie untersuchten weiten Temperaturspektrums kann die T_{eq} für einen großen Einsatzbereich validiert werden.

6.3 Erweiterung des Komfortzonenmodells um relevante Einflussfaktoren

Die Untersuchungen in Abschnitt 5.1 zeigen Schwächen des KZMs als Teil des internationalen Standards DIN EN ISO 14505-2:2007-04 zur Bewertung des Innenraumklimas in Fahrzeugen auf. In einer weiteren Probandenstudie soll daher das KZM um relevante Einflussfaktoren, wie geschlechterspezifische und demografische Unterschiede, erweitert werden. Das Studiendesign orientiert sich dabei an den Studien von Nilsson [82].

6.3.1 Studiendesign

Die Studie wird im Klimaprüfstand durchgeführt, um kontrollierte und reproduzierbare Klimabedingungen zu gewährleisten. Das Probandenkollektiv teilt sich in zwei Gruppen, die jeweils sieben unterschiedliche Klimabedingungen nacheinander erleben. Gruppe 1 startet bei einer durchschnittlichen T_{eq} von 10°C und Gruppe 2 bei einer durchschnittlichen T_{eq} von 12°C. Pro Durchgang wird die durchschnittliche T_{eq} um 4°C erhöht. Nach jedem Durchgang im Klimaprüfstand erfolgt eine Pause von mindestens 10 Min. außerhalb der Klimakammer. Die Pause wird bei Bedarf verlängert, bis die Probanden sich wieder akklimatisiert haben. Der zeitliche Ablauf der Studie ist in Tabelle 15 dargestellt. Die Reihenfolge der Durchgänge ist technisch durch den Klimaprüfstand bestimmt, da die beheizbaren Oberflächen in Kombination mit dem HVAC-System deutlich mehr Heizleistung im Vergleich zur Kühlleistung bereitstellen. Gestartet wird somit immer mit der kühleren Temperatur, sodass der Innenraum von Durchgang zu Durchgang stufenweise wärmer wird. Für die ersten vier Durchgänge ist die Klimakammer auf eine Lufttemperatur von 10°C eingestellt. In der Pause zum fünften

Durchgang wird die Lufttemperatur der Klimakammer auf 20°C erhöht. Damit passt sich die Umgebungstemperatur in der zweiten Hälfte des Versuchs dem stetig wärmer werdenden Innenraum des Klimaprüfstands an.

Tabelle 15: Zeitplanung Probandenstudie und durchschnittliche T_{eq} der Durchgänge 1 bis 7 für Gruppe 1 und Gruppe 2, sowie Lufttemperatur der Klimakammer

Durchgang	1	Pause	2	Pause	3	Pause	4	Pause	5	Pause	6	Pause	7
Gruppe 1	10°C		14°C		18°C		22°C		26°C		30°C		34°C
Gruppe 2	12°C		16°C		20°C		24°C		28°C		32°C		36°C
Klimakammer	10°C						20°C						
Zeit in [min]	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

Nach mehreren Feinabstimmungen resultiert ein konstantes Innenraumklima pro Durchgang. In den Pausen zwischen den Durchgängen werden die Oberflächen- und Lufttemperaturen auf das nächsthöhere Temperaturniveau erwärmt und anschließend wieder konstant gehalten.

Die Studie wird im Zeitraum vom 01.04.2021 bis 31.07.2021 unter strengen COVID-19 (Coronavirus SARS-CoV-2) Hygieneauflagen durchgeführt. Für die Teilnahme an der Studie müssen externe Probanden einen negativen COVID-19 Test vorlegen. Zuerst erfolgt die Begrüßung und Sicherheitseinweisung der Klimakammer sowie des Klimaprüfstands. In einer Vorbefragung füllen die Probanden den demografischen Fragebogen aus. Anschließend wird ihnen das Versuchsdesign vorgestellt und der Hauptfragebogen inklusive der Bewertungsskalen erläutert. Im Rahmen der Studie tragen die Probanden Kleidung mit einem Gesamtisoliationsgrad von 0,72 clo. Der thermische Komfort wird global und lokal im Bereich vom Kopf, Oberkörper / Brust, Oberarme, Hände, Oberschenkel, Schienbeine und Füße abgefragt. Die Probanden sind angewiesen nur Werte der MTV-Skala zwischen -1 (*kalt, jedoch komfortabel*), 0 (*neutral*) und +1 (*warm, jedoch komfortabel*) zurückzumelden, wenn sie das Innenraumklima als angenehm empfinden. Werden Antworten in den Bereichen -3 (*viel zu kalt*), -2 (*zu kalt*), +2 (*zu warm*) und +3 (*viel zu warm*) zurück gemeldet, müssen die Probanden zusätzlich beurteilen, wie unangenehm sie das Klima empfinden. Die Bewertung geht hier von *etwas unangenehm* bis *äußerst unangenehm*. Die Fragebögen zur Studie sind dem Anhang B.3 zu entnehmen.

Es wird vorausgesetzt, dass die Probanden vor jedem Durchgang ihren thermischen Zustand, nach der MTV-Skala, als neutral bewerten. Bei Bedarf wird die Zeit vor jedem Durchgang verlängert, damit ausreichend Zeit zum Akklimatisieren ist. Nachdem die

Vorbefragung und Einweisungen abgeschlossen sind, betreten die Probanden den Klimaprüfstand, nehmen auf dem Fahrersitz Platz und stellen diesen passend für sich ein. Über eine Gegensprechanlage beantworten die Probanden den Fragebogen zur Beurteilung der thermischen Belastung pro Durchgang drei Mal. Der Fragebogen wird zum Beginn, nach der Hälfte und am Ende der 10 Minuten-Intervalle abgefragt. Zwischen den Befragungen haben die Probanden die Möglichkeit einen Dokumentar- oder Unterhaltungsfilm anzuschauen, um vergleichbar zu einer entspannten Autofahrt einen Teil der kognitiven Ressourcen zu binden.

Zur Kontrolle des Innenraumklimas ist während der Probandenstudie ein Klima-Dummy auf dem Beifahrerplatz positioniert. Im Anschluss an die Probandenstudie wird der komplette Versuch für die Gruppe 1 und Gruppe 2 zur objektiven Ermittlung des Innenraumklimas mehrmals mit einem unbekleideten Klima-Dummy auf dem Fahrerplatz durchgeführt. Das Versuchsdesign mit Probanden und Klima-Dummy ist in Abbildung 29 dargestellt.

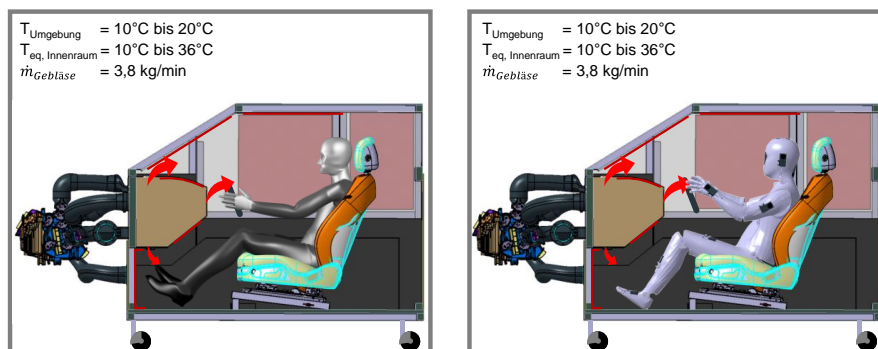


Abbildung 29 Versuchsdesign im Klimaprüfstand mit Probanden (links) und Klima-Dummy (rechts)

6.3.2 Ergebnisse

Zu Beginn dieses Abschnitts wird die Studienpopulation und die Ergebnisse des demografischen Fragebogens vorgestellt. Im zweiten Teil erfolgen Regressionsanalysen der subjektiven und objektiven Daten. Die Regressionsanalyse stellt die Grundlage zur Entwicklung eines neuen KZM dar. Abschließend werden die Untersuchungen auf Normalverteilung vorgestellt.

Studienpopulation

In Summe haben 83 Probanden ($n = 83$) an der Studie teilgenommen. Die Altersverteilung ist in Abbildung 30a dargestellt und liegt zwischen 18 bis 82 Jahren. Das durchschnittliche Alter der Probanden beträgt 38 Jahre ($SD = 14,6$). An der Studie haben

41% weibliche und 59% männliche Probanden teilgenommen, mit einem durchschnittlichem BMI von 24,1 (SD = 3,6). Die Verteilung des BMIs ist in Abbildung 30b visualisiert. Alle Studienteilnehmer sind im Besitz eines gültigen Führerscheins und fahren regelmäßig mit dem Auto. Über 50% fahren zwischen 10.000 km bis 20.000 km pro Jahr und 99% nutzen während der Fahrt regelmäßig die Klimaanlage. Mit 81% bevorzugt ein Großteil der Probanden ein HVAC-System mit Klimaautomatik.

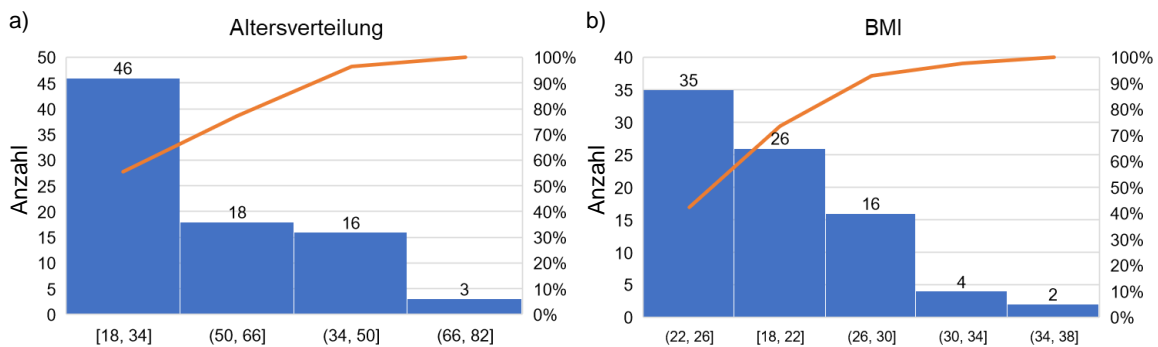


Abbildung 30 a) Pareto-Diagramm: Altersverteilung der Probanden (M = 38 Jahre; SD = 14,6); b) Pareto-Diagramm: BMI der Probanden (M = 24,1; SD = 3,6)

Alle weiteren Ergebnisse des demografischen Fragebogens sind in Abbildung 31 zusammengefasst. Etwas über ein Drittel der Probanden ist bereits vor Versuchsbeginn *zu warm*, sodass ihnen mehr Zeit zum Akklimatisieren gegeben wird. Probanden bekommen ebenfalls mehr Zeit zum Akklimatisieren, wenn ihnen vor dem Versuch *zu kalt* ist, Sie eine warme Mahlzeit oder Getränk zu sich genommen haben, beim Sport waren oder verschwitzt sind.

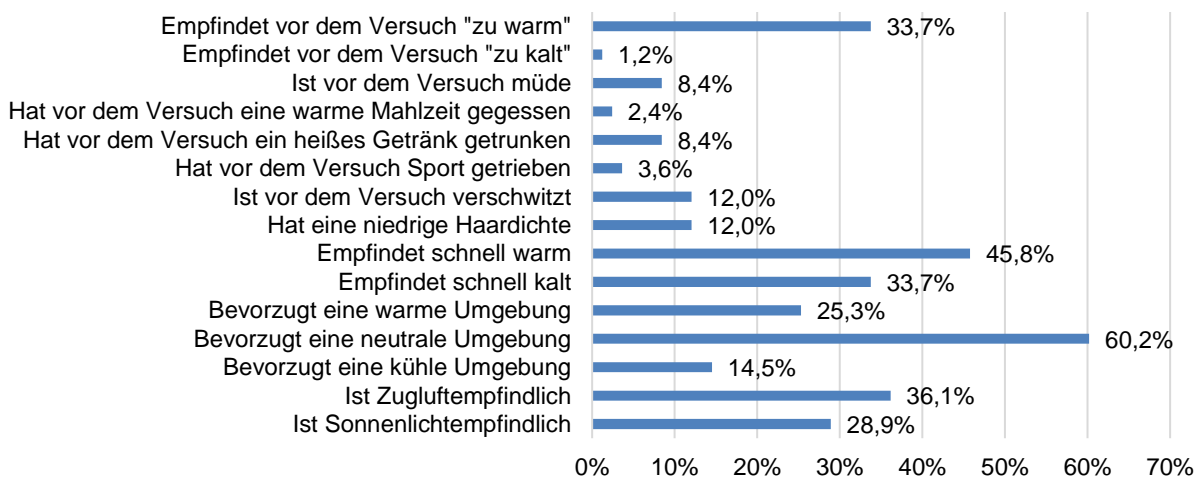


Abbildung 31 Ergebnisse Allgemeine Fragen und Fragen zur thermischen Wahrnehmung des demografischen Fragebogens

Den 12% der Probanden, die vor dem Versuch verschwitzt waren, wurde Kleidung zum Wechseln zur Verfügung gestellt. Weitere 12% weisen eine geringere Haardichte auf, zwei Probanden haben keine Kopfbehaarung. Über 60% bevorzugen eine neutrale thermische Umgebung.

Regressionsanalyse der subjektiven und objektiven Daten

Ein Vergleich der drei Frageintervalle pro Durchgang zeigt lediglich kleine Änderungen nach der zweiten Fragerunde. Damit melden ein Großteil der Probanden nach einer Zeit von 5 Min. bis 10 Min. im Klimaprüfstand das gleiche Komfortniveau zurück. Die Antworten der dritten Fragerunde nach 10 Min. werden somit für die Regressionsanalyse verwendet. Identisch zur Auswertung von Nilsson erfolgt eine Korrelation der subjektiven Komfortbewertungen der Probanden mit den objektiven Werten der T_{eq} für die untersuchten Umgebungsbedingungen [82]. Dafür werden die Messergebnisse der T_{eq} auf der x-Achse und die gemittelten MTV-Werte auf der y-Achse für die 14 Klimabedingungen in Abbildung 32 als blaue Punkte dargestellt. Allgemein weisen die Messwerte der T_{eq} nur geringe Unterschiede zwischen der linken und rechten Körperhälfte auf, sodass sie entsprechend den zugeordneten Körpersegmenten des Klima-Dummies gemittelt werden. Damit entspricht der Messwert *Global* wieder dem Durchschnitt der Messergebnisse aller Sensoren.

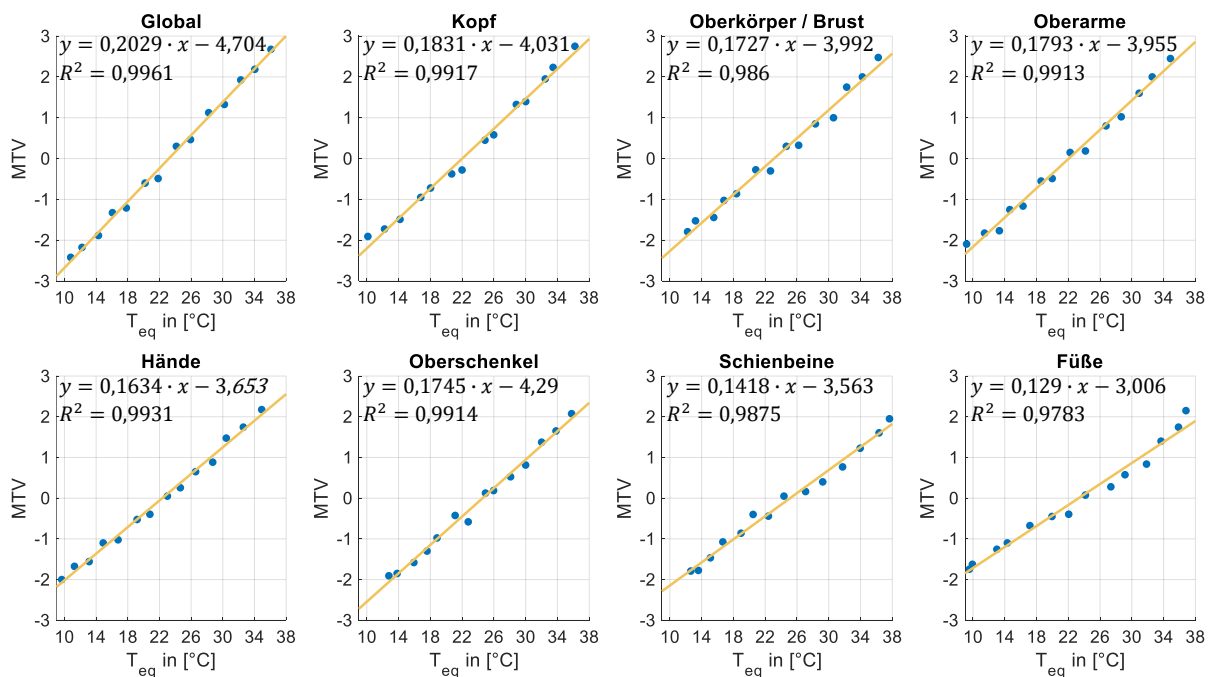


Abbildung 32 Lineare Regression der gemittelten subjektiven MTV-Werte (n = 83) und der objektiven Messungen mit dem Klima-Dummy für die 14 unterschiedlichen Klimabedingungen

Die Korrelationskoeffizienten R^2 sind für alle Körperbereiche größer 0,97, womit ein linearer Zusammenhang zwischen den subjektiven und objektiven Daten besteht. Die linearen Regressionen sind in Abbildung 32 als gelbe Linie eingezeichnet und mit Formeln angegeben. In Abhängigkeit der T_{eq} gibt die Geradengleichung des linearen Modells das zu erwartende Komfortniveau der MTV-Skala wieder. Ein MTV-Wert von 0 entspricht dem idealen Klima. Realistischer ist es für den idealen thermischen Komfort zwei Grenzen anzugeben. Abweichend zu Nilsson wird ein Konfidenzintervall mit $\pm 0,5$ MTV gewählt, sodass für den Komfortbereich gleich breite Zonen resultieren. Die Grenze der Äquivalenttemperatur für ein *zu kaltes* Klima wird bei $MTV = -1,5$ und für ein *kaltes, jedoch komfortables* Klima bei $MTV = -0,5$ ermittelt. Analog werden für positive MTV-Werte die Grenzen für den *warmen, jedoch komfortabel* und *zu warmen* Bereich bestimmt. Durch Einsetzen der MTV-Werte und lösen der Geradengleichungen ergeben sich die neuen Grenzwerte der T_{eq} . Das neu ermittelte Komfortzonenmodell ist in Abbildung 33 visualisiert. Bereiche, die einen angenehmen thermischen Komfort prognostizieren sind in blau, grün und gelb eingefärbt.

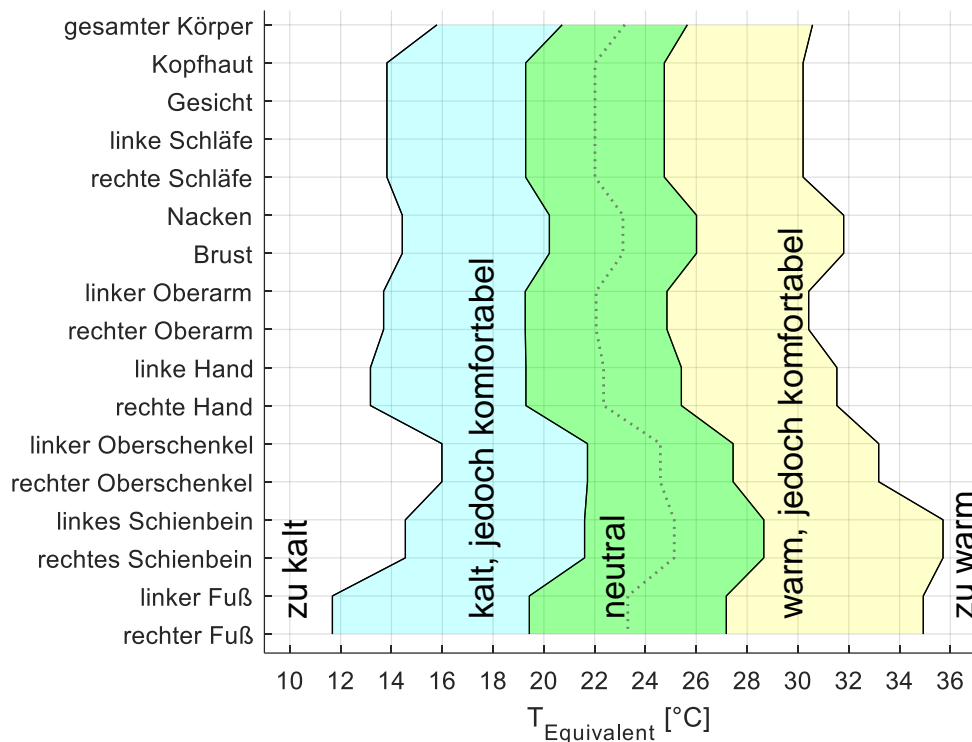


Abbildung 33 Allgemeines Komfortzonenmodell für $n = 83$ und $clo = 0,72$

In einer weiteren Analyse werden die Daten der Komfort-Skala in Relation zu den 14 Klimabedingungen gesetzt. In Abbildung 34 ist auf der x-Achse die T_{eq} und auf der y-

Achse die gemittelten Komfort-Werte dargestellt. Bei niedrigen und hohen Temperaturen steigt die Unzufriedenheit. Eine quadratische Regressionsanalyse ergibt hohe Werte für den Korrelationskoeffizienten R^2 die zwischen 0,9189 (Oberkörper / Brust) und 0,9699 (Hände) liegen. Ein Komfort-Wert von 0 entspricht einem angenehmen Klima und wird nur bei MTV-Werten zwischen -1 bis +1 vergeben. Ähnlich zum linearen Modell wird zur Ermittlung von Temperaturgrenzen ein Konfidenzintervall von $\pm 0,5$ auf der Komfort-Skala gewählt. Außerhalb des Konfidenzintervalls steigt die Wahrscheinlichkeit, dass das gegebene Klima zunehmend unangenehmer empfunden wird.

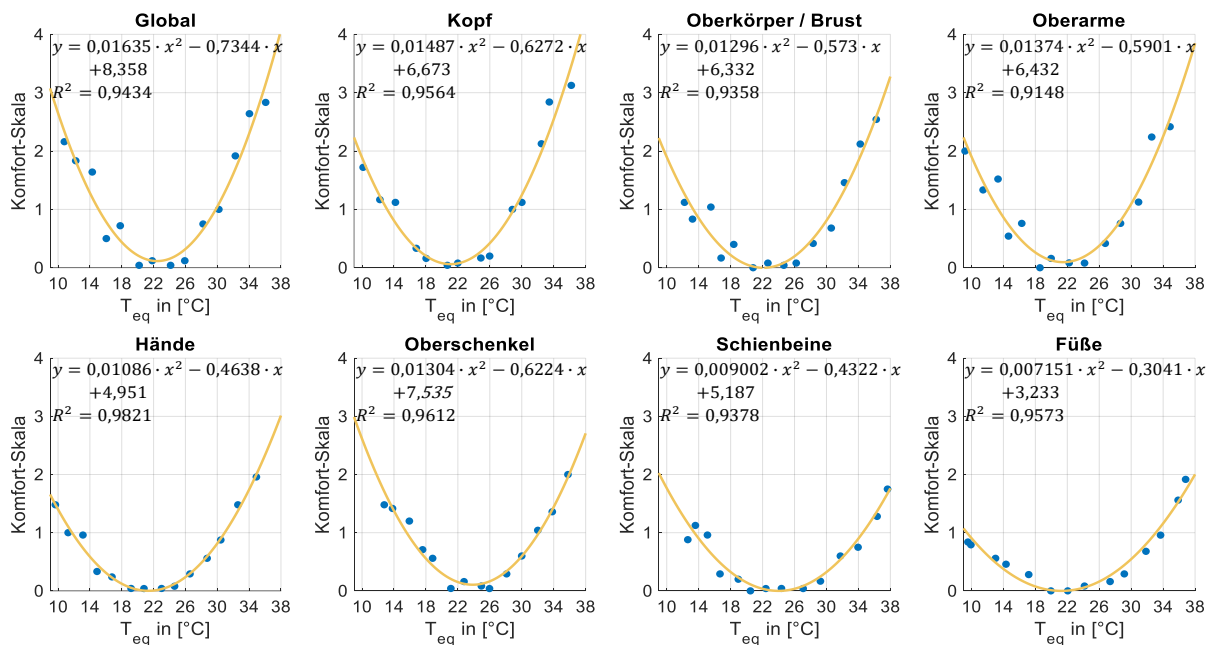


Abbildung 34 Quadratische Regression der subjektiven Komfort-Werte (n = 83) und der objektiven Messungen mit dem Klima-Dummy für die 14 unterschiedlichen Klimabedingungen

Das quadratische Modell ist eine Erweiterung des KZMs und liefert zusätzliche Informationen, ob das Klima angenehm bzw. unangenehm empfunden wird. Die neu ermittelten Grenzen sind in Abbildung 35 als Strichpunktlinien eingezeichnet. Sie verkleinern jeweils die Zonen *kalt, jedoch komfortabel* und *warm, jedoch komfortabel*. Die neuen Zonen werden als *Übergangsbereich kalt* und *Übergangsbereich warm* definiert. Die Kombination aus dem linearen und quadratischen Modell ergibt das erweiterte Komfortzonenmodell. Die weiteren Ergebnisse der linearen und quadratischen Regression sowie das erweiterte Komfortzonenmodell der geschlechterspezifischen Auswertung sind dem Anhang B.4 zu entnehmen.

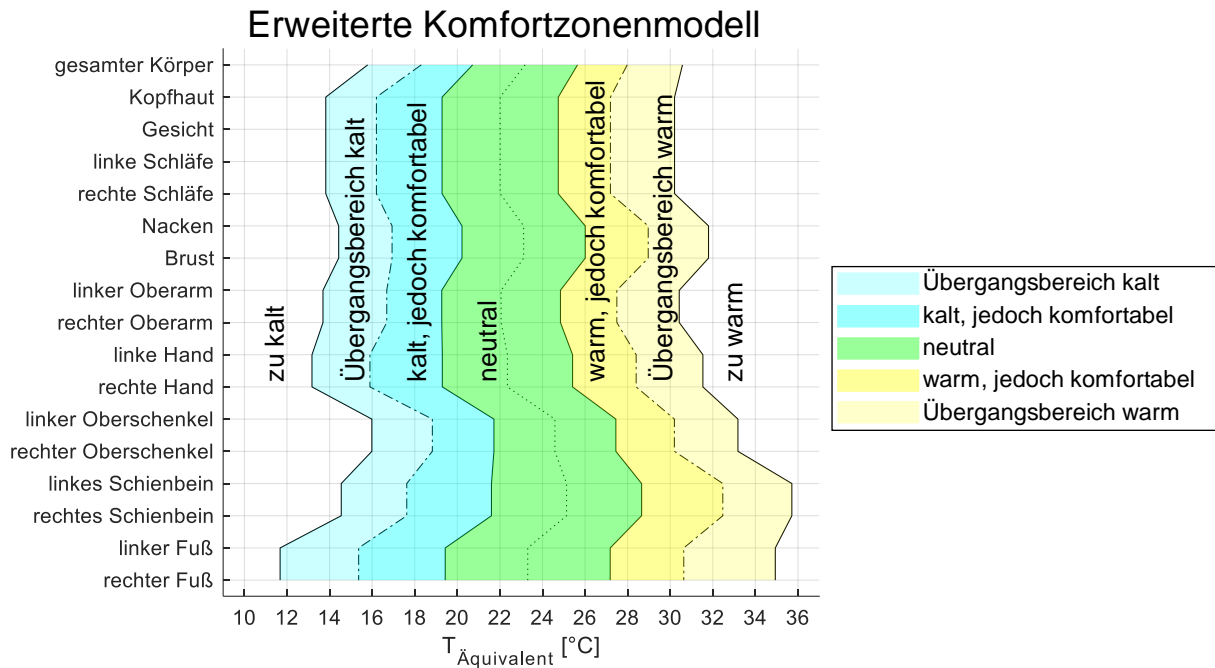


Abbildung 35 Erweiterte Komfortzonenmodell für n = 83 und clo = 0,72

Test auf Normalverteilung

Die lineare Regressionsanalyse setzt normalverteilte Daten voraus, weswegen die subjektiven und objektiven Daten mit dem Shapiro-Wilk-Test auf Normalverteilung getestet werden. Der Shapiro-Wilk-Test wird gewählt, weil er eine hohe Teststärke auch bei Stichprobenumfängen von $n < 50$ aufweist und in der Wissenschaft ein allgemein anerkanntes Testverfahren darstellt [98, 140]. Für alle Körperregionen liegt der Wert der Shapiro-Wilk Teststatistik W in Tabelle 16 nahe bei eins. Die Wahrscheinlichkeit p liegt deutlich über einem Signifikanzniveau von 0,05, womit die gemittelten Werte für MTV und T_{eq} normalverteilt sind.

Tabelle 16 Shapiro-Wilk-Test auf Normalverteilung für die gemittelten MTV- und T_{eq} -Werte

MTV	Global	Kopf	Oberk./Brust	Oberarme	Hände	Oberschenkel	Schienbeine	Füße
W	0,9500	0,9505	0,9518	0,9493	0,9598	0,9519	0,9578	0,9601
p	0,5606	0,5679	0,5885	0,5494	0,7200	0,5898	0,6868	0,7241
T_{eq}	Global	Kopf	Oberk./Brust	Oberarme	Hände	Oberschenkel	Schienbeine	Füße
W	0,9582	0,9643	0,9566	0,9619	0,9640	0,9607	0,9429	0,9385
p	0,6940	0,7923	0,6677	0,7546	0,7877	0,7339	0,4564	0,3989

In einer weiteren Analyse werden die Rohdaten ($n=581$) der MTV-Werte grafisch untersucht. Der Normalplot der Residuen, dargestellt in Abbildung 36, weist für alle Körperregionen ein lineares Verhalten auf, womit ebenfalls die Annahme der Normalverteilung bestätigt wird.

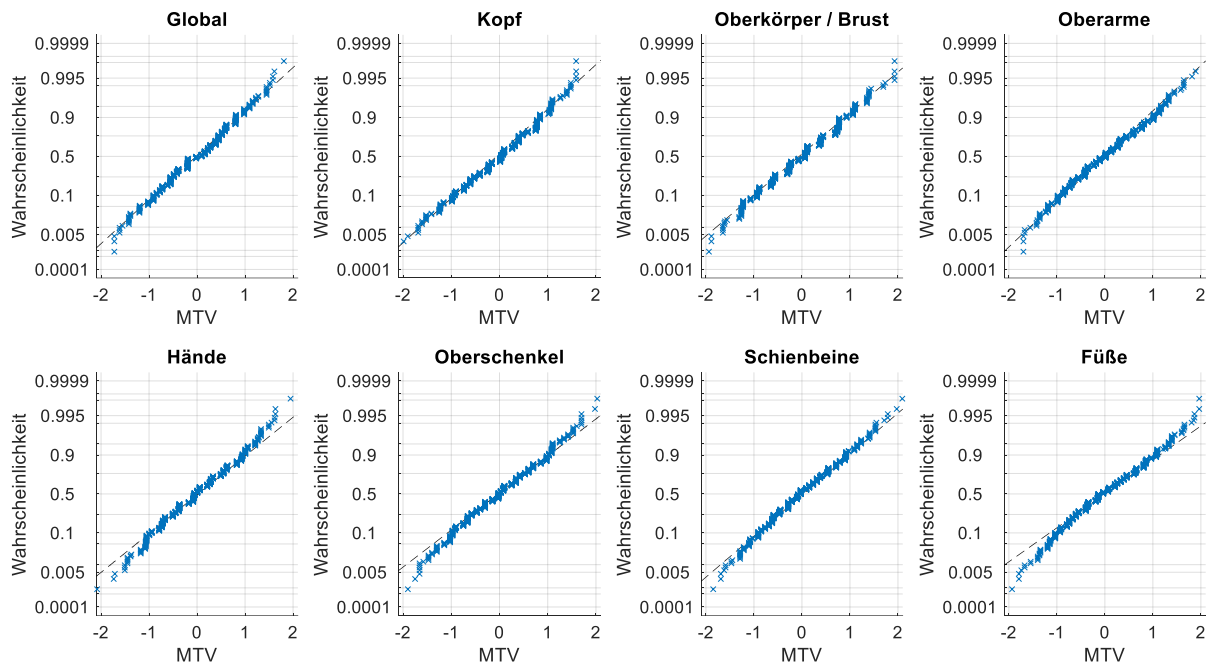


Abbildung 36 Normalplot der Residuen von MTV (n = 581)

6.3.3 Diskussion

Im ersten Teil der Diskussion erfolgt ein detaillierter Vergleich des Studiendesigns und der Ergebnisse mit den Untersuchungen von Nilsson. Anschließend werden die demografischen Merkmale, Geschlecht und Alter, wie auch die Erweiterungen des KZMs, genauer betrachtet. Abschließend werden die Limitationen des erweiterten Komfortzonenmodells definiert.

Vergleich Studiendesign und Ergebnisse mit Nilsson

Ein detaillierter Vergleich mit den Untersuchungen von Nilsson ist in Tabelle 17 dargestellt. An Nilssons Studien haben jeweils 10 männliche Probanden mit einer relativ homogenen Altersverteilung teilgenommen. Die exakten Zeiträume der Studien sind nicht veröffentlicht, können jedoch auf die Jahre 1991 und 1997 geschätzt werden [83]. Im Vergleich weist die in dieser Arbeit vorgestellte Studienpopulation mit 83 Teilnehmern, einen deutlich heterogeneren Querschnitt auf und stellt damit eine gute Ausgangsbasis dar. Aufgrund physiologischer Unterschiede, welche die thermische Wahrnehmung beeinflussen, sollten Frauen und ältere Probanden (vgl. Abschnitt 3.2.3) bei Klimakomfortstudien nicht vernachlässigt werden. Mit einem Anteil von 41% Frauen und 25% Probanden über 50 Jahre ist neben einer allgemeinen Analyse eine gruppenspezifische Betrachtung sinnvoll.

Tabelle 17 Vergleich des Studiendesigns mit den Untersuchungen von Nilsson [82]

	Nilsson / DIN EN ISO 14505-2:2007-04				Rolle
	Studie 1: ca. 1991		Studie 2: ca. 1997		Studie: 2021
Durchführung	Studie 1: ca. 1991		Studie 2: ca. 1997		Studie: 2021
Anzahl Probanden	♂: 10 & 0 : ♀		♂: 10 & 0 : ♀		♂: 49 & 34 : ♀
Altersverteilung	relativ homogen		relativ homogen		heterogen
Messung T _{eq}	MANIKIN1 bekleidet		MANIKIN2 bekleidet		Klima-Dummy unbekleidet
Versuchszeit/Frageintervalle	60 min / 30 min		60 min / 30 min		10 min / 5 min
Bewertung MTV-Skala	global u. 5 Zonen lokal		global u. 5 Zonen lokal		global u. 7 Zonen lokal
Klimabedingungen	11 Sommer	9 Winter	5 Sommer	5 Winter	14 Sommer bis Winter
Ø T _{eq} der Klimabedingungen	22°C – 28°C	22°C – 26°C	20°C – 29°C	18°C – 25°C	10°C – 36°C
Kleidungsisolations	0,6 clo	1 clo	0,6 clo	1 clo	0,72 clo
Umgebungstemperatur	30°C & 35 °C		30°C & 35 °C		10°C & 20°C

Zur objektiven Erfassung des Innenraumklimas verwendet Nilsson zwei verschiedene Messpuppen, die während der Versuche bekleidet sind. Bekleidete Messpuppen sind sehr sensitiv gegenüber Störungen. Je nach Passform der Kleidung resultieren unterschiedliche Messergebnisse bei gleichem Isolationsgrad. In der Dissertation von Nilsson wird bereits auf diese Problematik hingewiesen [82]. Untersuchungen mit einem bekleideten Klima-Dummy haben bei wiederholten Messungen im Klimaprüfstand Temperaturdifferenzen von bis zu 7°C ergeben. Neben der Reproduzierbarkeit verschlechtert sich in der Praxis auch die Messdynamik des Klima-Dummies. Aufgrund der Isolation reagiert das Messsystem sehr träge auf Änderungen, sodass ausschließlich stationäre Klimabedingungen sinnvoll untersucht werden können. Durch die Kleidung verschlechtert sich die Reliabilität von Messungen und eine generelle Übertragbarkeit der Ergebnisse (Kriteriumsvalidität) ist nicht mehr gewährleistet. Bei Messungen mit einem unbekleideten Klima-Dummy erfolgt die objektive Erfassung des Fahrzeugklimas zwischen der ersten und zweiten thermodynamischen Grenze (vgl. Abbildung 8). Die Einflüsse der Kleidung sowie die Teilsysteme Haut und Körper werden durch die subjektiven Komfortbewertungen berücksichtigt.

Eine weitere Differenzierung ist die Versuchszeit von 10 Min. pro Durchgang. Sie stellt einen Kompromiss dar, um mit einem vertretbaren Zeitaufwand möglichst viele Probanden zu untersuchen. Nach dem Ergebnisbericht Mobilität in Deutschland beträgt die durchschnittliche Fahrzeit pro Tag ca. 45 Min. Die Fahrzeit teilt sich auf in zwei Fahrten mit je 15 km [85]. Ein Großteil der Fahrzeit wird benötigt den Innenraum auf ein angenehmes Komfortniveau zu konditionieren, womit die Studie die letzten 10 Min. einer realen Fahrt unter stationären Bedingungen abbildet.

Nilsson untersucht 30 verschiedene Klimabedingungen mit einem sehr ähnlichem Temperaturspektrum. Die sommerlichen Bedingungen weisen eine durchschnittliche T_{eq} im Innenraum des Prüfstands zwischen 20°C bis 29°C und für die winterlichen Bedingungen zwischen 18°C bis 26°C auf. Damit sind die Zonen *zu kalt* und *zu warm* des Sommer- und Winter-KMZs für fast alle Körperregionen extrapoliert. Diese Bereiche werden nicht mehr durch Beobachtungen des subjektiven Komforts der Probanden gestützt. Für validere Prognosen decken die 14 untersuchten Klimabedingungen im Vergleich ein deutlich größeres Temperaturspektrum zwischen 10°C bis 36°C ab.

Anwendungsbereiche für das Sommer- und Winter-KZM sind nicht klar definiert. Hauptunterscheidungsmerkmal im Versuchsdesign stellt die Kleidungsisolations- und Umgebungstemperatur dar. Mit 35°C, 30°C und -20°C werden sehr extreme Außenbedingungen untersucht. Wesentlich interessanter für den thermischen Komfort sind nicht die Außentemperaturen, sondern die thermischen Bedingungen im Fahrzeuginnenraum. Damit kann die Kleidung als wesentliche Differenzierung zwischen Sommer und Winter betrachtet werden. Der gewählte Isolationsgrad von 0,72 clo entspricht einer durchschnittlichen Bekleidungskombination, die während des gesamten Jahres in konditionierten Innenräumen getragen werden kann. Durch die Analyse des Studiendesigns von Nilsson werden einige Verbesserungspotenziale aufgedeckt. Diese werden in dem neuen Studiendesign dieser Arbeit umgesetzt.

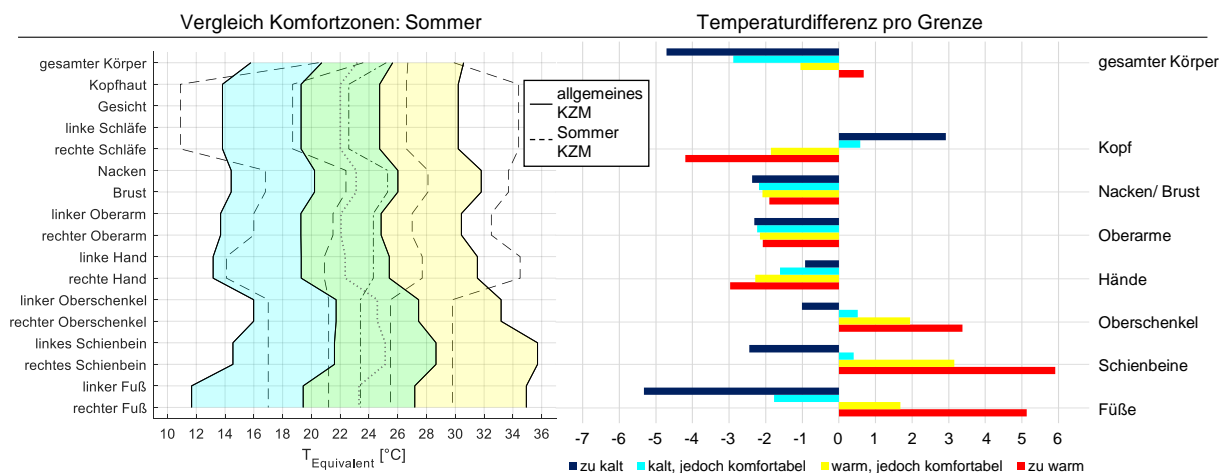


Abbildung 37 Vergleich Komfortzonen: Sommer mit allgemeinem Komfortzonenmodell für $n = 83$ und $clo = 0,72$

Zunächst werden die Ergebnisse der beiden Untersuchungen miteinander verglichen. In Abbildung 37 erfolgt ein Vergleich der Grenzwerte des Sommer-KZMs mit den

Grenzwerten des neu ermittelten KZMs. Auf der linken Seite sind die Grenzwerte bei-der Modelle in einem Diagramm dargestellt und auf der rechten Seite die jeweilige Temperaturdifferenz der vier Grenzen von *zu kalt* bis hin *zu warm* der 8 unterschiedli-chen Körperregionen. Ein Großteil der Grenzen des allgemeinen KZMs sind nach links verschoben, womit kühle Äquivalenttemperaturen bevorzugt werden. Die feinere Unt-tergliederung der Beine in Oberschenkel, Schienbeine und Füße weisen die größten Differenzen auf. Nach dem allgemeinen KZM tolerieren die Füße eine 5,5°C kältere T_{eq} bis zu dem Übergang in den *zu kalten* Bereich. Ein weiterer Vergleich der Grenz-werte des Winter-KZMs mit den Grenzwerten des allgemeinen KZMs ist in Abbildung 38 dargestellt. Im Gegensatz zum Sommer-KZM ist hier ein Großteil der Grenzen des allgemeinen KZMs nach rechts verschoben, womit wärmere Äquivalenttemperaturen bevorzugt werden. Die größte Verschiebung weisen die Schienbeine auf. Hier werden 5,5°C höhere Äquivalenttemperaturen akzeptiert, bis der Übergang in den *zu warmen* Bereich erfolgt.

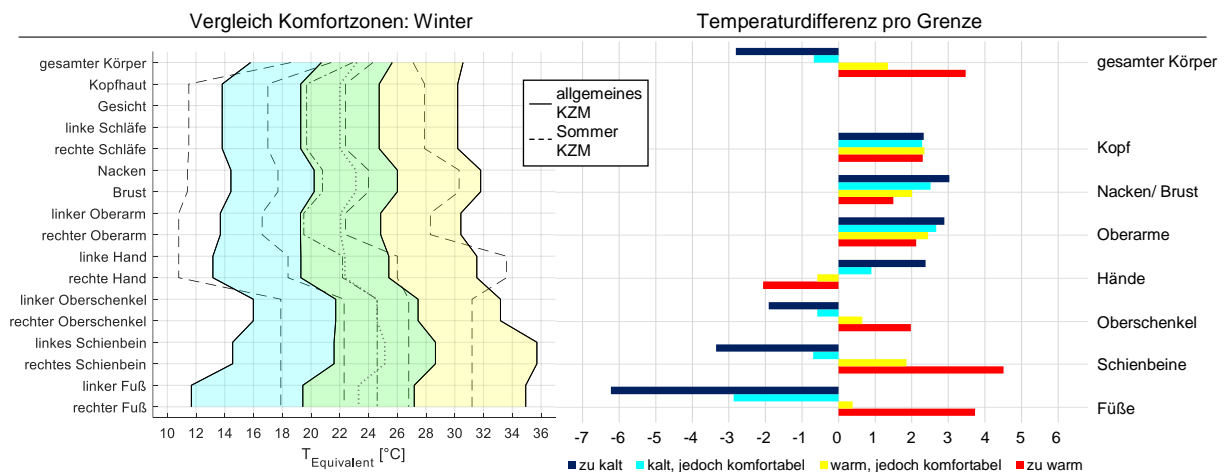


Abbildung 38 Vergleich Komfortzonen: Winter mit allgemeinem Komfortzonenmodell für $n = 83$ und $clo = 0,72$

Erweiterung des Komfortzonenmodells um demografische Merkmale

Zur Untersuchung demografischer Merkmale werden die insgesamt 83 Probanden in Teilgruppen untergliedert. Anschließend wird für jede Teilgruppe eine lineare Regressionsanalyse durchgeführt und, analog zum bisherigen Vorgehen, wird ein neues Komfortzonenmodell erstellt. Ein Vergleich der Grenzwerte zwischen dem allgemeinen KZM ($n=83$) und dem geschlechterspezifischen KZM der männlichen ($n=49$) und weiblichen ($n=34$) Probanden ist in Abbildung 39 dargestellt. Aus Gründen der Übersicht

werden die Grenzen des erweiterten KZMs mit den Übergangsbereichen nicht dargestellt.

Global gesehen bevorzugen die weiblichen Probanden im Vergleich zu den männlichen Probanden eine durchschnittlich höhere T_{eq} von $1,8^{\circ}\text{C}$. Auch lokal wird ein wärmeres Umgebungsklima bevorzugt. Dieses Ergebnis stimmt mit den Erwartungen überein, die sich aufgrund der physiologischen Unterschiede zwischen Männern und Frauen ergeben (vgl. Abschnitt 3.2.3). Im Bereich der Füße, mit einer Differenz von $2,7^{\circ}\text{C}$, ist der Unterschied am größten. Das Profil der Grenzen für die männlichen und weiblichen Probanden folgt weitestgehend dem Verlauf des allgemeinen KZMs. Anhand der in Abbildung 39 dargestellten geschlechterspezifischen Grenzwerte kann eine individuellere Applikation der Fahrzeugklimatisierung gezielt für Männer und Frauen umgesetzt werden.

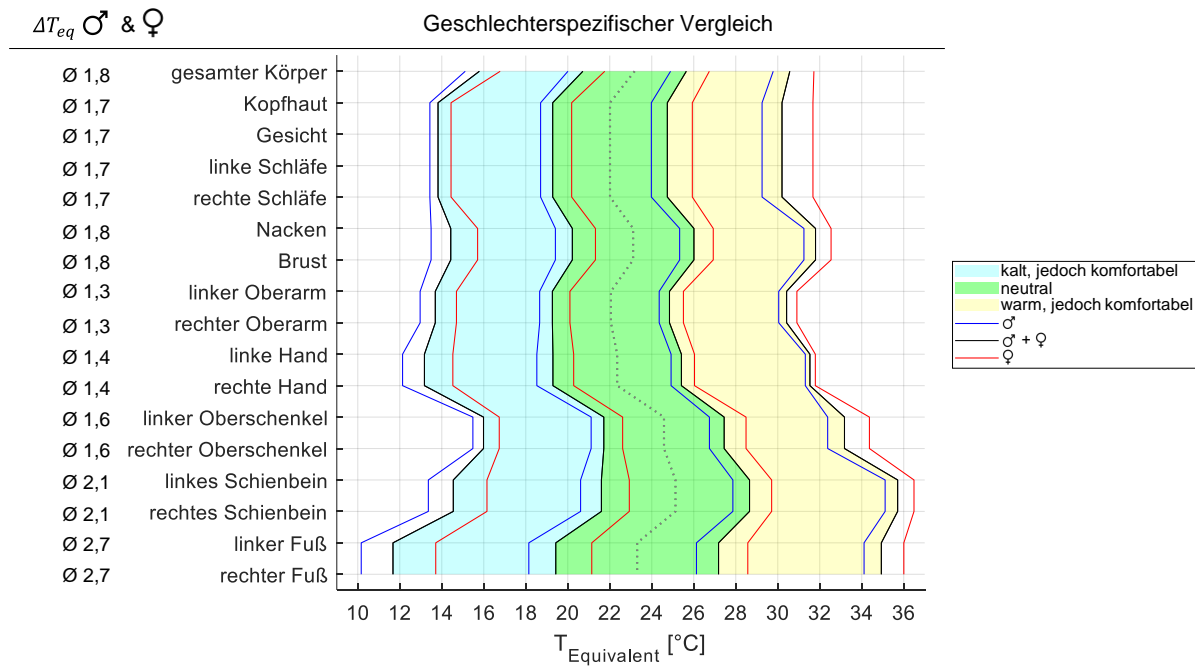


Abbildung 39 Allgemeines Komfortzonenmodell (n = 83) im Vergleich zu den geschlechterspezifischen Grenzen für $clo = 0,72$; ΔT_{eq} entspricht der durchschnittlichen Differenz der T_{eq} zwischen männlich und weiblich

Betrachtet man in einer weiteren Untersuchung die altersspezifischen Unterschiede sind die Ergebnisse nicht mehr so eindeutig. Aufgrund des Erhebungszeitraums ist die Teilgruppe der Probanden 50+ mit $n=24$ wesentlich kleiner als die der jüngeren Probanden unter 50 Jahre ($n = 59$). Wird zusätzlich noch die Verteilung der Geschlechter in diesen Gruppen berücksichtigt, sind die Unterschiede noch größer. Die jüngeren Probanden teilen sich auf in 25 weibliche und 34 männliche Probanden, wohin gehend

die ältere Gruppe sich aus 9 weiblichen und 15 männlichen Probanden zusammensetzt. Bei der Analyse zur Ermittlung altersspezifischer Komfortzonenmodelle der beiden Gruppen sind für die meisten Körpersegmente nur geringe Unterschiede zu beobachten. Die Antworten der Probanden, die knapp über 50 Jahre alt sind unterscheiden sich nur wenig von den Antworten der Probanden unter 50 Jahre. Die Grenze von 50 Jahren zur Differenzierung zwischen Jung und Alt ergibt sich im Wesentlichen durch die untersuchte Stichprobe. Eine Erhöhung der Altersgrenze führt zu einer noch kleineren Teilgruppe der älteren Probanden. Zusammengefasst eignet sich die untersuchte Stichprobe nicht für eine differenzierte Analyse altersspezifischer Einflüsse auf den thermischen Komfort. Für zukünftige Untersuchungen ist unter anderem zu klären, ab welcher Altersgruppe ein Unterschied in der thermischen Wahrnehmung zu registrieren ist.

Erweitertes Komfortzonenmodell

Das erweiterte Komfortzonenmodell kombiniert die Bewertungen der MTV-Skala mit denen der Komfort-Skala. Bezüglich des Informationsgehalts ist das quadratische Modell der Komfort-Skala vergleichbar mit Fangers PPD-Modell [41], da beide Modelle Informationen zur Unzufriedenheit des erlebten Umgebungsklimas liefern. Komfortwerte zwischen ± 0.5 stehen für ein *angenehmes* Klima. Mit steigenden Werten nimmt die Unzufriedenheit des erlebten Umgebungsklimas zu. Als Eingangsgröße des quadratischen Modells wird, identisch zum linearen Modell, die T_{eq} verwendet. Mit diesem Vorgehen kann der Informationsgehalt beider Modelle im erweiterten Komfortzonenmodell vereint werden.

Die neu definierten Grenzen des erweiterten Komfortzonenmodells haben eine Verkleinerung der Zonen *kalt, jedoch komfortabel* und *warm, jedoch komfortabel* zur Folge. Die Bereiche, in dem das lineare Modell der MTV-Bewertungen ein angenehmes Klima prognostiziert und zeitgleich der Komfort zunehmend unangenehmer bewertet wird, werden als *Übergangsbereich kalt* und *Übergangsbereich warm* definiert. In der Praxis ist es oft schwierig eine feste Grenze zu definieren, ab der das Klima als *zu kalt* oder *zu warm* bewertet wird. Äquivalenttemperaturen nahe der Grenze würden das Klima in dem einem Fall z.B. als *zu kalt* und in dem anderen Fall als *kalt, jedoch komfortabel* bewerten, obwohl die jeweiligen Temperaturen betragsmäßig sehr dicht zusammen liegen. In der Realität ist ein Übergangsbereich jedoch realistischer, der im

Fälle extremere Äquivalenttemperaturen angibt, wie unangenehm das Klima empfunden wird. Die Kombination des linearen und quadratischen Modells stellt somit eine sinnvolle Erweiterung dar.

Modelllimitationen

Die Studie zur Validierung der T_{eq} als Bewertungsgröße stellt die Grundvoraussetzung zur Anwendung des erweiterten KZMs außerhalb der Versuchsumgebung dar. In diesem Zusammenhang ergeben sich durch die T_{eq} und das gewählte Versuchsdesign Limitationen zur Anwendung des Komfortmodells. Im Folgenden wird auf die Einschränkungen, die sich durch das Versuchsdesign ergeben, eingegangen:

1. Vor Fahrtantritt wird von einem *neutralen* thermischen Komfort der Insassen ausgegangen
 - Unterkühlte oder überhitze Körperregionen haben Verschiebungen der Grenzwerte zur Folge, die durch das Modell nicht definiert sind
2. Kontaktbereiche wie Sitz, Lenkrad und Armablagen sollten keine großen Temperaturdifferenzen zu den Komfortbereichen aufweisen
 - Zu niedrige oder zu hohe Temperaturen im Kontaktbereich beeinflussen die thermische Wahrnehmung und verschlechtern die Vorhersagegüte
3. Das erweiterte Komfortzonenmodell ist gültig für einen Bekleidungsisolationsgrad von 0,72 clo und einem Aktivitätsniveau von 0,9 – 1,2 met
 - Niedrigere Isolationsgrade verschieben den Komfortbereich der bekleideten Körpersegmente hin zu wärmeren Äquivalenttemperaturen
 - Höhere Isolationsgrade verschieben den Komfortbereich der bekleideten Körpersegmente hin zu kälteren Äquivalenttemperaturen
 - Ein höheres Aktivitätsniveau wie z.B. bei sportlicher Fahrweise erhöht die Toleranz gegenüber kühleren Temperaturen
4. Die Versuchszeit pro Klimabedingung beträgt 10-12 Min., womit der thermische Komfort einer Autofahrt, von durchschnittlicher Dauer, untersucht wurde [85]
 - Abweichungen vom *neutralen* thermischen Komfort könnten bei längeren Fahrzeiten zunehmend unangenehm empfunden werden

5. Die Studie ist in Deutschland durchgeführt worden, ethnische und kulturelle Einflüsse der Probandenstichprobe aus anderen Ländern werden nicht berücksichtigt
 - In Ländern mit anderen Klimazonen oder kulturellen Gewohnheiten wird sich die Vorhersagegüte des Modells verschlechtern
6. Die Messungen der T_{eq} sind mit dem vorgestellten Klima-Dummy durchgeführt, welches das EQUITES Messsystem der Firma Comlogo GmbH verwendet
 - Andere Äquivalenttemperaturmesssysteme, die keine vergleichbaren Messwerte liefern, führen zu verfälschten Ergebnissen

7 Abschließende Diskussion und Ausblick

Die objektive Bewertung des thermischen Komforts im Pkw stellt keine einfache Aufgabe dar. Obwohl es nach dem aktuellen Stand der Wissenschaft viele unterschiedliche Komfortbewertungsmodelle gibt, erschweren fehlende Standards im Bereich der thermophysiological Modelle die Vergleichbarkeit von Ergebnissen. Mit der DIN EN ISO 14505-2:2007-04 existiert hingegen ein Standard der thermopsychologischen Modelle [34]. Dieser Standard findet vermehrt Anwendung in der Automobilindustrie und adressiert explizit die Beurteilung der thermischen Umgebung in Fahrzeugen anhand von Äquivalenttemperaturmessungen. Bewertungen des thermischen Komforts sind so in Kombination mit dem KZM möglich. Die DIN EN ISO 14505-2:2007-04 geht jedoch nicht auf Einflussfaktoren der Versuchsdurchführung, Validierung der Äquivalenttemperatur und Anwendungsbereiche bzw. Limitationen des KZMs ein. In Bezug auf die Forschungsfragen in Kapitel 2 werden umfangreiche Untersuchungen zur T_{eq} und dem KZM durchgeführt. Die Forschungsfragen werden nachfolgend diskutiert und abschließend wird ein Ausblick für zukünftige Untersuchungen gegeben.

7.1 Forschungsfrage 1

„Welche Einflussfaktoren sind bei Messungen der Äquivalenttemperatur und Klimakomfortstudien zu berücksichtigen?“

Reliable Messungen stellen eine Grundvoraussetzung zur objektiven Bewertung der thermischen Umgebung dar. In Kapitel 6.3 werden die objektiven Messungen im Rahmen von thermopsychologischen Modellen mit dem subjektiven Empfinden von Probanden korreliert. Die zuverlässige Durchführung von Klimakomfortstudien ist ein wichtiger Bestandteil der thermopsychologischen Modellbildung. Nicht nur im Rahmen der Modellbildung ist es notwendig die Einflüsse auf Klimakomfortstudien zu kennen, sondern auch für den Abgleich mit bestehenden Modellen oder Konzeptanalysen von HVAC-Systemen.

Wie in Abschnitt 2.1 vorgestellt, können die Einflüsse der T_{eq} und Klimakomfortstudien gemäß der Teilsysteme Umwelt – Fahrzeugklima – Mensch in drei Kategorien eingeteilt werden. Im Falle der T_{eq} wird statt dem Teilsystem Mensch der Klima-Dummy stellvertretend für die messtechnische Erfassung des Fahrzeugklimas betrachtet. Un-

abhängig davon, ob die T_{eq} oder der thermische Komfort von Probanden erfasst werden soll, sind die Einflussfaktoren der Umwelt und des Fahrzeugklimas auf den Menschen bzw. den Klima-Dummy identisch. Die Einflussfaktoren der verschiedenen Systeme sind in Tabelle 18 zusammengefasst und werden nachfolgend erläutert.

Tabelle 18 Einflussfaktoren entsprechend der Systeme Umwelt, Fahrzeugklima, Klima-Dummy und Mensch, basierend auf den vorangegangenen Untersuchungen und [34, 48, S. 13, 52, 113]

Umwelt	Fahrzeugklima	Klima-Dummy	Mensch
Lufttemperatur	Vorkonditionierung	Größe und Körperhaltung	Metabolismus
Luftgeschwindigkeit	Manuell/Klimaautomatik/Regelung	Einstellbarkeit/Positionierung	Aktivitätsniveau
Luftfeuchtigkeit	Einstellungen Klimabedienteil	Anzahl Zonen/Sensoren	Geschlecht/ Alter
Sonnenintensität	Zonigkeit HVAC-System	Eingebettete Sensoren	Isolationsgrad/Bekleidung
Luftdruck	Sitzplatzerkennung	Frei positionierte Sensoren	Herkunft/Gewohnheiten
Luftqualität	Ausströmer Ablenkung	Vorkonditionierung	Nahrungsmittelaufnahme
Optische Einflüsse (hell/Tag; dunkel/Nacht)	Antrieb (Benziner, Diesel, Gas, Hybrid, Elektro)	Dummy + Sensoren Dummy beheizt	Thermischer Zustand vor Versuchsstart
	Wärmeleitung Oberflächen	↓	Adaption/Akklimatisation
	Temp. umschießend. Flächen	Messgröße:	Monatszyklus
	Sitzeinstellungen/Position	segmentbezogene T_{eq}	Tages- u. Jahresrhythmus
	Karosserie/Fahrzeugvolumen	gerichtete T_{eq}	Körperliche Verfassung
	Ausstattungsvarianten HVAC	Regelungsprinzip:	Geistige Verfassung
	Verglasung/Glasflächen	Konstante Temperatur	
	Lackfarbe	Konstanter Wärmestrom	
	Farbe & Materialien Interieur	Behaglichkeitsgleichung	

Wie in Abschnitt 3.1 beschrieben unterliegt die thermische Umwelt starken Schwankungen und kann sehr extreme Temperaturen annehmen. Haupteinflussgrößen sind die Lufttemperatur, -geschwindigkeit, -feuchtigkeit und die Sonnenintensität. Zur Gewährleistung der Reproduzierbarkeit sollten Untersuchungen in einem Klimawindkanal oder einer Klimakammer mit definierten Randbedingungen durchgeführt werden. Eine untergeordnete Rolle spielen die Faktoren Luftdruck, oder -qualität sowie die optischen Einflüsse. Im Rahmen von Prüfstandversuchen werden diese Faktoren in der Regel nicht kontrolliert, da sie keine großen Schwankungen unterliegen.

Wesentlich komplexer wird die Betrachtung des Teilsystems Fahrzeugklima. Hier muss je nach Fragestellung genauer differenziert werden. Der einfachste Fall stellt ein Versuch in der Klimakammer mit einem Fahrzeugmodell dar, wie z.B. dem Klimaprüfstand aus Abschnitt 4.1. Hier müssen für reproduzierbare Untersuchungen die Einflussfaktoren Vorkonditionierung, Klimaregelung (Luftverteilung, Massenstrom, Ausblastemperatur, Schichtung), Ablenkung der Ausströmer, Sitzeinstellung/-position und thermisch umschließende Flächen kontrolliert werden. Soll die komplette Systemdy-

namik Bestandteil der Untersuchung sein, ist ein Fahrzeug dem Klimaprüfstand vorzuziehen. Zusätzlich sind dann die Einflussfaktoren manuelle Klimatisierung/Klimaautomatik, Einstellungen des Klimabedienteils, Zonigkeit des HVAC-Systems und Sitzplatzerkennung zu berücksichtigen. Je nach Fahrzeug werden z.B. bei einer Mehrzonen-Klimaautomatik nicht besetzte Sitzplätze weniger intensiv klimatisiert. Die Sitzplatzerkennung kann z.B. über Drucksensoren im Sitz oder durch Anschnallen des Sitzgurtes erfolgen. Im aufwändigsten Fall wird das Innenraumklima zwischen zwei verschiedenen Fahrzeugen untersucht und verglichen. Hier sind zusätzlich die Faktoren Antrieb, Karosserie/Fahrzeugvolumen, Verglasung/Glasflächen, Lackfarbe, Ausstattungsvarianten HVAC, Wärmeleitung der Oberflächen, Farbe und Materialien des Interieurs relevant. Der Antrieb definiert wie viel Heizleistung zu Verfügung steht oder ob im Falle von Elektrofahrzeugen ein separater Heizkreislauf für die Klimatisierung vorhanden ist. Im Sommerbetrieb wird z.B. mehr Zeit benötigt ein Fahrzeug mit großem Innenraumvolumen, Panoramaglasdach, schwarzem Lack und schwarzer Leder Ausstattung im Interieur unter Sonnenlast auf ein kühleres Temperaturniveau abzukühlen. In Abhängigkeit des Fahrzeugsegments wird eine bessere Kühlleistung der zweiten und dritten Sitzreihe z.B. durch Zusatzgebläse oder einem Heckklimagerät erzielt. Im Anbetracht der großen Anzahl an Einflussfaktoren ist eine genaue Analyse der jeweiligen Auswirkungen auf das Fahrzeugklima sehr komplex.

Die Systeme Umwelt und Fahrzeugklima definieren die thermischen Zustände, die auf den Klima-Dummy bzw. im Rahmen von Klimakomfortstudien auf den Probanden, wirken. Das System Klima-Dummy wird im Folgenden genauer erläutert. Die Änderungen der T_{eq} in Abhängigkeit der Klimagrundgrößen wird in Abschnitt 3.5, Tabelle 11 veranschaulicht. Neben den thermischen Randbedingungen werden die Messwerte unter anderem durch die Bauart und dem Regelungsprinzip beeinflusst. Im Wesentlichen werden zwei Bauarten unterschieden. Die segmentbezogene Äquivalenttemperatur $T_{eq, segment}$ wird durch eine beheizten Dummy bestimmt. In der Regel wird der Dummy in mehrere Zonen unterteilt, die separat die $T_{eq, segment}$ bestimmen. Beheizte Messwertnehmer (Sensoren), die an mehreren Körpersegmenten an einem Dummy verteilt sind, übereinstimmend mit dem Klima-Dummy aus Abschnitt 4.2., messen die gerichtete Äquivalenttemperatur $T_{eq, direct}$. Unabhängig von der Bauart gibt es drei verschiedene Regelungsprinzipien. Vor- und Nachteile zu den jeweiligen Regelungen können

der DIN EN ISO 14505-2:2007-04 entnommen werden [34]. Entsprechend der Norm ist ein Vergleich von Messwerten, die nach einem grundsätzlich unterschiedlichen Verfahren ermittelt werden, nicht zulässig. Im Fall der $T_{eq, direct}$, die durch mehrere Sensoren ermittelt wird, ist die Verwendung eines Dummies für eine exakte Positionierung der Sensoren zu empfehlen. Die Körpergröße, -haltung und Sitzposition beeinflussen die Messwerte der T_{eq} . Leichte Positionsänderungen der Sensoren spiegeln sich aufgrund der inhomogenen Durchströmung des Fahrzeugs in den Messwerten wider. Damit trägt der Klima-Dummy wesentlich zu einer Verbesserung der Testökonomie und Reliabilität bei.

Klimakomfortstudien sind mit einem großen Aufwand an Zeit und Kosten verbunden. Umso wichtiger ist es für eine belastbare Studie die genauen Einflussfaktoren zu kennen. Neben den Einflüssen, die sich durch den Versuch und der thermischen Umgebung ergeben, stellt der Mensch die größte unbekannt Variable dar. Damit der Mensch die thermische Umgebung als positiv wahrnimmt, müssen bestimmte Voraussetzungen erfüllt sein. Nach einer Definition von Abele und Becker ist Wohlbefinden ein Zustand, der mit positiven Gefühlen und Stimmungen, Zufriedenheit sowie einem positiven Körpergefühl einhergeht. Dieser Zustand kann nur erreicht werden, wenn eine Person körperlich und geistig gesund ist [1]. In Bezug auf das thermische Wohlbefinden sollten die Versuchspersonen daher in einer guten körperlichen und geistigen Verfassung sein. Des Weiteren existieren schwierig zu beeinflussende Faktoren, wie Tages-, Jahresrhythmus, Monatszyklus, Adaption/Akklimatisation und Metabolismus, die sich auch auf Bewertungen des Umgebungsklimas auswirken. Weitere Einflussfaktoren, die durch das Studiendesign definiert werden sollten, sind Aktivitätsniveau, Geschlecht, Alter, Bekleidung, Herkunft und thermischer Zustand vor Versuchsstart.

Das hier vorgestellte Spektrum an Einflussfaktoren auf Messungen der T_{eq} und Klimakomfortuntersuchungen ist groß. Neben den Haupteinflussfaktoren, die im Stand der Wissenschaft präsentiert werden (vgl. Kapitel 3), gibt es gerade bei Fahrzeugversuchen viele technische Einflüsse, die zu berücksichtigen sind. Mangelndes Systemverständnis kann zu einem ungeeigneten Studiendesign führen - im schlimmsten Fall werden nicht belastbare Ergebnisse erzeugt. Als Beispiel hierfür können zwei Studien von Danca et al. genannt werden [26, 27]. In beiden Untersuchungen wird ein Fahrzeug mit einer manuellen Klimaanlage im Standbetrieb verwendet. Die Versuche fanden

unter realen Umweltbedingungen, einmal im Freien und einmal in einer Halle, statt. Im Standbetrieb steht aufgrund der geringen Motordrehzahl nur ein kleiner Teil der Heiz- und Kühlleistung zur Verfügung, was bei Umgebungstemperaturen von 0°C und 35°C ggf. nicht ausreichend ist, das Fahrzeug angemessen zu klimatisieren. Zudem kann das verwendete manuelle Klimatisierungssystem im Vergleich zu einer Klimaautomatik nicht sicherstellen, ob das Fahrzeugglima auf ein einheitliches Komfortniveau geregelt wird. Dieses vorgestellte Studiendesign kann nicht garantieren, dass jeder Proband vergleichbare Innenraumbedingungen für die Bewertung des thermischen Komforts erlebt. Im Gegensatz dazu sind alle Untersuchungen dieser Arbeit unter kontrollierbaren und reproduzierbaren Klimabedingungen durchgeführt, sodass alle Versuchsbedingungen für die Probanden einheitlich sind.

7.2 Forschungsfrage 2

„Welche Voraussetzungen müssen erfüllt sein, damit Komfort- und Energiebewertungen anhand der Äquivalenttemperatur im Entwicklungsprozess von Klimakzepten Anwendung finden?“

Die Anwendbarkeit, als objektives Maß zur Erfassung der thermischen Umgebung, setzt die Validierung der T_{eq} voraus. Bisherige Untersuchungen gehen nicht auf die Validierung oder Grenzen der Bewertung ein [24, 82, 89, 90, 133]. Allgemein ist die Definition der T_{eq} gültig für Klimabedingungen, die aus physikalischer Sicht als gleichwertig beurteilt werden und auch aus physiologischer Sicht den selben thermischen Komfort beim Menschen hervorrufen. Diese Voraussetzung wird in Abschnitt 6.2 genauer untersucht. Durch die Variation der Wärmeübertragungsmechanismen, Konvektion und Strahlung werden Klimabedingungen mit annähernd konstanter T_{eq} erzeugt, die von den Probanden als gleichbleibend komfortabel bewertet werden. Die Studie kann damit erfolgreich die T_{eq} als Bewertungsgröße für die untersuchten Klimabedingungen validieren. Die äquivalenten Klimabedingungen wurden für ein großes Temperaturspektrum untersucht. Dennoch müssen die Grenzen der Validierung noch genauer analysiert werden, da Zugluft und physiologische Reaktionen zur Aufrechterhaltung der menschlichen Thermoregulation den thermischen Komfort negativ beeinflussen können.

Neben der Validierung sind effiziente Untersuchungsmethoden ausschlaggebend für die Akzeptanz eines produktiven Einsatzes im Fahrzeugentwicklungsprozess. Diese werden in Abschnitt 5.2 und 5.3 vorgestellt. Die Entwicklung des Klima-Dummies liefert hier einen wertvollen Beitrag zur Testökonomie und optimiert zudem die Reliabilität des Messverfahrens. Die vorgestellten Isokomfort-Evaluierungen und A/B Analysen ermöglichen detaillierte Untersuchungen von aktuellen und zukünftigen Klimakonzepten anhand der T_{eq} . Auf der Basis technischer Vergleiche ermöglicht das KZM eine Prognose des zu erwartenden thermischen Komforts. Messungen der T_{eq} und Bewertungen des KZMs können dabei für stationäre, wie auch für instationäre thermische Klimabedingungen verwendet werden. Die Untersuchungen in Abschnitt 6.1 zeigen, dass bei instationären thermischen Vorgängen die Komfortzonen Zielwerte der T_{eq} für einen *neutralen* thermischen Komfort definieren.

Verbrauchsbewertungen haben in den letzten Jahren an Bedeutung zugenommen, insbesondere da bei Elektrofahrzeugen nicht mehr ausreichend Abwärme vorhanden ist, die zum Konditionieren des Innenraums genutzt werden kann. Daher ist neben der Komfortbewertung auch ein Vergleich des Energieverbrauchs zu beachten. Äquivalente thermische Innenraumbedingungen, die einen *neutralen* thermischen Komfort hervorrufen, ermöglichen einen solchen Vergleich. Die Entwicklung neuer Klimakonzepte ermöglicht Einsparungspotentiale aufzudecken, ohne den thermischen Komfort zu verschlechtern. Da die Fahrzeugklimatisierung einen starken Einfluss auf den Gesamtverbrauch eines Elektrofahrzeugs hat, können verbesserte Klimakonzepte einen wichtigen Beitrag zur Reichweitensteigerung liefern [7, 52, 70]. Die Reichweite ist neben dem Kaufpreis das zweitwichtigste Kaufargument für ein Elektrofahrzeug [72]. Bewertungsmethoden, die relevante Einflussfaktoren der Wärmeübertragungsmechanismen wie Konvektion und Strahlung vernachlässigen, stellen eine zu große Vereinfachung dar und sind somit nicht zulässig für Komfort- und Energiebewertungen.

Neue Konzepte müssen früh im Entwicklungsprozess auf Gesamtfahrzeugebene bewertet werden. Eine Zunahme der virtuellen Methoden führt zu einer Reduzierung an Fahrzeugprototypen, die erst zu einem späten Zeitpunkt im Entwicklungsprozess zur Verfügung stehen [96]. Die vorgestellte Simulationsmethodik zur numerischen Bestimmung der T_{eq} in Abschnitt 5.3, stellt eine wichtige Grundlage zur frühzeitigen virtuellen Bewertung der Fahrzeugklimatisierung dar. Die numerische Bestimmung der T_{eq} liefert

für den validierten Sommerfall vergleichbare Ergebnisse zu den Messungen des Klima-Dummies, womit die Grundlage für eine einheitliche Bewertung von der virtuellen bis hin zur Auslegung physischer Prototypen gelegt ist. Die objektive Erfassung der thermischen Umgebung durch die T_{eq} erfüllt somit alle Voraussetzungen für Bewertungen aktueller und zukünftiger Klimakonzepte.

Zusammengefasst stellt die T_{eq} eine valide Bewertungsgröße dar, auf deren Basis effiziente Untersuchungen der Fahrzeugklimatisierung, Konzeptvergleiche und Analysen neuer Klimatisierungsansätze möglich sind. Damit sind alle Voraussetzungen geschaffen, um mit den vorgestellten Methoden umfangreiche Komfort- und Energiebewertungen für instationäre und stationäre Betrachtungen durchzuführen. Durch Simulation der T_{eq} können Bewertungen in einem frühen Stadium des Fahrzeugentwicklungsprozesses erfolgen und zu einem späteren Stadium durch Messungen bestätigt werden. Somit kann ein produktiver Einsatz im Entwicklungsprozess erfolgen.

7.3 Forschungsfrage 3

„Wie müssen bestehende Standards angepasst werden, damit sie sich für die Bewertung des thermischen Komforts in Fahrzeugen besser eignen?“

Das in der DIN EN ISO 14505-2:2007-04 aufgenommene KZM nach Nilsson ist der einzige existierende Standard für die objektive Bewertung des thermischen Komforts in Fahrzeugen und stellt damit die Ausgangsbasis dieser Arbeit dar. Demgegenüber werden mögliche Anpassungen und Verbesserungen diskutiert.

Die Untersuchungen in Abschnitt 5.1 veranschaulichen die Grenzen des KZMs nach Nilsson. Das Modell basiert auf einer kleinen und homogenen Probandenstichprobe. Demografische Merkmale wie Geschlecht und Alter werden durch das KZM unzureichend berücksichtigt. Im Rahmen von Nilssons Studien werden die durchschnittlichen Äquivalenttemperaturen im Innenraum des Prüfstands lediglich zwischen 18°C bis 29°C variiert, womit ein Großteil der definierten Komfortgrenzen extrapoliert sind. Im Hinblick auf diese Vereinfachungen, wird ein erweitertes Komfortzonenmodell in Abschnitt 6.3 entwickelt. Das neue Modell basiert auf einer deutlich größeren Probandenstichprobe ($n=83$) mit einem breiten Spektrum an männlichen, weiblichen, jungen und alten Teilnehmern. Die durchschnittliche T_{eq} im Klimaprüfstand wird zwischen

10°C bis 36°C variiert. Alle definierten Komfortgrenzwerte werden damit durch Bewertungen eines breiten Probandenspektrums gestützt.

Betrachtet man die linearen Regressionsmodelle der unterschiedlichen Körpersegmente, weisen die Korrelationskoeffizienten R^2 der Komfortzonenmodelle nach Nilsson große Unterschiede auf. Je nach Körperregion werden die Korrelationen zwischen T_{eq} und MTV-Werten in Tabelle 19 zu 1% bis 87% von dem linearen Modell beschrieben. Zudem wird nicht direkt klar welche linearen Modelle für das Sommer- und Winter-KZM verwendet werden, da Körpersegmente teilweise identische Grenzwerte aufweisen, für diese jedoch mehrere Korrelationen existieren. Die Beinregion setzt sich z.B. aus sechs Körpersegmenten, von dem linken Oberschenkel bis rechten Fuß, zusammen. Die Korrelationskoeffizienten variieren zwischen 13% bis 74% (Sommer) und 29% bis 87% (Winter), jedoch sind die Grenzwerte im KZM für diese sechs Körpersegmente identisch.

Tabelle 19 Vergleich der Korrelationskoeffizienten R^2 für die linearen Regressionsmodelle $MTV \sim 1 + T_{eq}$, angegeben in Prozent [82]

Nilsson																	
Sommer	73	77	84	-	-	79	81	76	74	56	87	74	74	41	68	13	32
Winter	71	60	78	-	-	34	31	63	42	7	1	52	73	52	87	29	32
Rolle	99,6	99,2	99,2	99,2	99,2	98,6	98,6	99,1	99,1	99,3	99,3	99,1	99,1	98,8	98,8	97,8	97,8
	Global	Kopfhaut	Gesicht	l. Schläfe	r. Schläfe	Nacken	Brust	l. Oberarm	r. Oberarm	l. Hand	r. Hand	l. Oberschenkel	r. Oberschenkel	l. Schienbein	r. Schienbein	l. Fuß	r. Fuß

Die neu ermittelten linearen Regressionen in Abschnitt 6.3.2 weisen im Vergleich deutlich höhere Korrelationskoeffizienten zwischen 97,8% und 99,6% auf. Die präzise Übereinstimmung der Daten ist mit dem optimierten Versuchsdesign zu begründen. Alle Probanden haben sieben Klimabedingungen mit kurzen, zeitlichen Abständen in einer Versuchsreihe bewertet. Die Reihenfolge der Klimabedingungen von kalt nach warm ist den Probanden bekannt. Der Unterschied der T_{eq} von durchschnittlich 4°C pro Klimabedingung ist groß genug, sodass die Probanden von Durchgang zu Durchgang eine Veränderung der thermischen Bedingungen im Klimaprüfstand wahrnehmen. In Summe melden die Probanden mit steigender T_{eq} durchschnittlich auch ein wärmeres Komfortniveau zurück.

Das KZM ist zudem, für eine individuelle Abstimmung des Innenraumklimas, um geschlechterspezifische Grenzwerte erweitert worden. Die Übergangsbereich kalt und warm stellen eine weitere Verbesserung dar. Diese neu definierten Zonen verkleinern

den Komfortbereich und liefern durch die quadratischen Regressionsmodelle zusätzliche Informationen, wie unangenehm das Klima erlebt wird. Die Messungen der T_{eq} für das erweiterte KZM sind zur Verbesserung der Reliabilität und Testökonomie mit einem unbekleideten Klima-Dummy durchgeführt worden. Die Anwendbarkeit des erweiterten KZMs ist damit allgemein auf unbekleidete Klima-Dummies ausgelegt. Aufgrund des optimierten Studiendesigns, des breiten Probandenspektrums, des zusätzlichen Informationsgehalts sowie einer höheren Übereinstimmung der subjektiven und objektiven Daten ist das in dieser Arbeit entwickelte Komfortzonenmodell besser geeignet den thermischen Komfort im Fahrzeug zu bewerten und sollte damit mit in die DIN EN ISO 14505-2:2007-04 aufgenommen werden.

7.4 Zusammenfassung und weiterführende Arbeiten

Das Ziel der vorliegenden Dissertation ist die objektive Bewertung des thermischen Komforts im Pkw. Ausgehend von dem Stand der Wissenschaft und Anforderungen der Fahrzeugentwicklung wird die Äquivalenttemperatur als Metrik zur objektiven Erfassung des Innenraumklimas verwendet. Bewertungen anhand der Äquivalenttemperatur finden im Klimawindkanal mit Serienfahrzeugen sowie in einer Klimakammer mit Klimaprüfstand statt. Im Rahmen dieser Untersuchungen liefert die Entwicklung eines eigenen Klima-Dummies einen großen Beitrag zur Verbesserung der Reliabilität und Testökonomie. Analysen der Äquivalenttemperaturmessungen zeigen in Abhängigkeit der Fragestellung und Systemgrenzen eine große Vielfalt an Einflussfaktoren. Allgemein können die Einflussfaktoren den Systemen Umwelt, Fahrzeugklima und Klima-Dummy zugeordnet werden. Der komplexeste Fall stellt ein Vergleich des Innenraumklimas verschiedener Fahrzeuge dar. Werden neben den technischen Untersuchungen auch Klimakomfortstudien durchgeführt, sind zudem die Einflussfaktoren des Systems Mensch zu berücksichtigen. Auf der Basis gewonnener Erkenntnisse werden Richtlinien zur Versuchsdurchführung definiert.

Die Äquivalenttemperatur ist eine physikalische Messgröße und liefert keine direkten Informationen zum thermischen Komfort. Das Komfortzonenmodell nach Nilsson ermöglicht eine Interpretation der Messwerte im Hinblick auf den thermischen Komfort. Bewertungen des Innenraumklimas eines Fahrzeugs der Mittelklasse und Oberklasse zeigen Grenzen des Komfortzonenmodells auf. Demografische Merkmale werden unzureichend berücksichtigt. Diese spielen jedoch eine Rolle im Applikationsprozess der

Innenraumklimatisierung in Abhängigkeit vom Fahrzeugsegment und Markt. Ausgehend von Nilssons Untersuchungen und dem internationalen Standard DIN EN ISO 14505-2:2007-04 wird ein erweitertes Komfortzonenmodell zur Bewertung der thermischen Behaglichkeit unter inhomogenen Klimabedingungen in einer Fahrzeugumgebung entwickelt. Die zugrundeliegende Komfortstudie untersucht ein breites Spektrum an Probanden, sowie 14 Klimabedingungen von kalt bis warm. Damit werden im Gegensatz zu Nilsson alle Grenzwerte des Modells durch Korrelationen mit dem subjektiven thermischen Komfort der Probanden gestützt. Des Weiteren ermöglicht das erweiterte Komfortzonenmodell eine Differenzierung der thermischen Wahrnehmung von Männern und Frauen. Zusätzlich liefert es Informationen darüber, wie unangenehm das Klima außerhalb des Komfortbereichs empfunden wird. Neben den Erweiterungen werden auch klare Grenzen des Modells definiert. Zusammengefasst stellt das optimierte Studiendesign, im Vergleich zu Nilssons Studien, eine validere Untersuchungsbasis dar, womit das erweiterte Komfortzonenmodell besser geeignet ist den thermischen Komfort in Fahrzeugen zu bewerten.

Objektivität und Reliabilität stellen notwendige Bedingungen für den Einsatz der Äquivalenttemperatur als Bewertungsgröße dar. Die Validität eines Verfahrens entscheidet über die Aussagekraft der Messergebnisse. Hierzu wird untersucht, ob physikalisch gleichwertige Klimabedingungen, die einen konstanten Wärmeverlust des menschlichen Körpers zur Folge haben, auch gleichbleibend komfortabel von den Probanden bewertet werden. Im Rahmen der Probandenstudie kann die Äquivalenttemperatur als valide Bewertungsgröße bestätigt werden. Damit führen unterschiedliche Klimabedingungen, die eine gleichbleibende Äquivalenttemperatur zur Folge haben, auch zum selben thermischen Komfort. Damit diese Metrik auch im Fahrzeugentwicklungsprozess Anwendung findet, sind effiziente Untersuchungs- und Bewertungsmethoden essenziell. Neue Systeme oder Klimakonzepte werden häufig isoliert untersucht. Hier ermöglichen Isokomfort-Evaluierungen stationäre Vergleiche von zwei Klimakonzepten bei gleichbleibendem thermischem Komfort für einen großen Temperaturbereich. Vergleichbare thermische Bedingungen sind zudem notwendig für einen angemessenen Vergleich des Energieverbrauchs. Bei einem instationären Aufheizprozess mit thermisch aktiven Oberflächen wird eine A/B Analyse durchgeführt. Im Vergleich zu

einem konventionellen Klimatisierungssystem kann der Innenraum mit Flächenheizungen schneller auf ein neutrales Komfortniveau erwärmt werden und spart zudem 21,8% der Heizleistung ein. Zu dem instationären Aufheizprozess mit thermisch aktiven Oberflächen wird der instationäre Einfluss von Solarstrahlung in einer Studie untersucht. Diese Studie zeigt, dass sich das Komfortzonenmodell in gewissen Grenzen auch für die Bewertung von instationären Vorgängen eignet. Neben den messtechnischen Untersuchungen wird eine Simulationsmethodik zur numerischen Berechnung der Äquivalenttemperatur vorgestellt, die in frühen Stadien der virtuellen Produktentwicklung eingesetzt werden kann. In Summe erfüllen die vorgestellten Methoden zur Komfortbewertung anhand der Äquivalenttemperatur im automobilen Kontext alle Voraussetzungen für die Bewertung aktueller und zukünftiger Klimakonzepte.

Die durchgeführten Untersuchungen stellen eine Grundlage für weiterführende Arbeiten dar. Folgende Punkte bieten weitere Ansätze der Optimierung:

- Eine Erweiterung des Klima-Dummies um Sensorik zur Erfassung der konduktiven Wärmeübertragung. Die äquivalente Kontakttemperatur könnte hier eine geeignete Metrik darstellen, die neben dem sensiblen auch den latenten Wärmestrom berücksichtigt [108]. Einen weiteren vielversprechenden Ansatz der objektiven Bewertung des Kontaktbereichs liefert die Dissertation von Wöhrle [133]. Das Komfortzonenmodell kann damit um Grenzwerte für den Kontaktbereich ergänzt werden.
- Aufgrund unterschiedlicher Bauarten und Regelungsprinzipien sollten Messungen verschiedener Äquivalenttemperaturmesssysteme miteinander verglichen werden. Bei Abweichungen sind Umrechnungsformeln für eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse abzuleiten.
- Durch weitere Probandenversuche sollten die Einflüsse Alter, Bekleidung, Aktivitätsniveau und kulturelle Unterschiede genauer untersucht werden, um entsprechende Anpassungen am Komfortzonenmodell vorzunehmen.
- Ein zu kaltes oder zu warmes Empfinden vor Fahrtantritt bedarf einer Anpassung der Innenraumklimatisierung, um entsprechend das Komfortniveau schnell zu verbessern. Wie sich die thermische Vorgeschichte auf Strategien

für ein effizientes Erwärmen oder Abkühlen der Insassen auswirkt, sollte in weiteren Studien untersucht werden.

- Autonomes Fahren ermöglicht potenziell neue Innenraumgestaltungen. Die Anwendbarkeit des erweiterten Komfortzonenmodells für neue Körperhaltungen, wie z.B. die Liegeposition, ist zu prüfen.
- Erweiterung der Simulationsmethodik zur numerischen Berechnung der Äquivalenttemperatur für instationäre Betrachtungen.
- Entwicklung eines Fahrzeugmodells zur Abschätzung von Energieverbräuchen des HVAC-Systems. Gekoppelt mit der numerischen Berechnung der Äquivalenttemperatur können Auswirkungen auf den thermischen Komfort und den Energieverbrauch in Wechselwirkung betrachtet werden.

Literaturverzeichnis

- [1] A. Abele und P. Becker, Hg., *Wohlbefinden: Theorie - Empirie - Diagnostik*, 2. Aufl. Weinheim: Juventa-Verl., 1994.
- [2] A. Alahmer, A. Mayyas, A. A. Mayyas, M. A. Omar und D. Shan, „Vehicular Thermal Comfort Models: A Comprehensive Review“, *Applied Thermal Engineering*, Jg. 31, 6-7, S. 995–1002, 2011, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2010.12.004.
- [3] American Psychological Association. (2017). Ethical principles of psychologists and code of conduct (2002, amended effective June 1, 2010, and January 1, 2017). <http://www.apa.org/ethics/code/index.html>, „Ethical Principles of Psychologists and Code of Conduct: (2002, amended effective June 1, 2010, and January 1, 2017)“, 2017. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.apa.org/ethics/code/index.html>
- [4] ASHRAE 55, „Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy“, 55-2013, 2013.
- [5] AUDI AG, „Klimawindkanal mit Windgeschwindigkeiten von bis zu 300 km/h“, 2017.
- [6] F. Auracher, „Entwicklung eines Prüfstandes zur Quantifizierung der Behaglichkeit hinsichtlich Fahrzeuginnenklimatisierung“. Masterarbeit, Lehrstuhl für Ergonomie, Technische Universität München, Garching bei München, 2017.
- [7] V. Bader, *Klimatisierungsmaßnahmen und Reichweitenberechnung für Elektrofahrzeuge: Innovative Klimatisierungs- und thermische Komfortkonzepte zur Optimierung der Reichweite von Elektrofahrzeugen (E-Komfort)*, 2014.
- [8] W. Beavan, „Perception: Evolution of a Concept“, *Psychological Review*, Jg. 65, Nr. 1, S. 34–55, 1958, doi: 10.1037/h0045496.
- [9] T. Bedford, „The Warmth Factor in Comfort at Work“, MRC Industrial Health Board Report HMSO, London, UK vol 76., 1936.
- [10] F. Bode, I. Nastase, P. Danca und A. Meslem, *The Influence of the Inlet Angle of Vehicle Air Diffuser on the Thermal Comfort of Passengers*. Piscataway, NJ: IEEE, 2017. [Online]. Verfügbar unter: <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=8115598>

- [11] M. Bohm, I. Holmér, H. Nilsson und O. Norén, *Thermal Effect of Glazing in Driver's Cabs*, 2002.
- [12] N. Boughanmi, „Bewertung vertikaler Belüftungskonzepte hinsichtlich des thermischen Komforts“, 2016. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.e3d.rwth-aachen.de/cms/E3D/Forschung/Publicationen/~iync/Details/?file=674878>
- [13] H. Bubb, „Systemergonomische Gestaltung“ in *Ergonomie*, H. Schmidtke, Hg., 3 Aufl. München: Hanser, 1993, S. 390–420.
- [14] H. Bubb, „Komfort und Diskomfort“. *Ergonomie Aktuell*, 4., Lehrstuhl für Ergonomie, Technische Universität München, 2003.
- [15] H. Bubb, K. Bengler, R. E. Grünen und M. Vollrath, *Automobilergonomie*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015.
- [16] K. Bux und N. von Hahn, „Trockene Luft“ - Literaturstudie zu den Auswirkungen auf die Gesundheit“, 2020.
- [17] M. Cabanac, „Pleasure: The Common Currency“, *Journal of Theoretical Biology*, Jg. 155, Nr. 2, S. 173–200, 1992, doi: 10.1016/S0022-5193(05)80594-6.
- [18] T. G. Cengiz und F. C. Babalik, „An On-the-Road Experiment Into the Thermal Comfort of Car Seats“, *Applied Ergonomics*, Jg. 38, Nr. 3, S. 337–347, 2007, doi: 10.1016/j.apergo.2006.04.018.
- [19] P. Christ, „Modeling of Automotive HVAC Units Using Proper Orthogonal Decomposition“. Dissertation, Lehrstuhl für Thermodynamik, Technische Universität München, Garching bei München, 2019.
- [20] Comlogo GmbH, „Datenblatt-Equites-Equivalent Temperature System“ ART-2001, 2021.
- [21] C. Croitoru, I. Nastase, F. Bode, A. Meslem und A. Dogeanu, „Thermal Comfort Models for Indoor Spaces and Vehicles - Current Capabilities and Future perspectives“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 44, S. 304–318, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2014.10.105.
- [22] L. J. Cronbach und P. E. Meehl, „Construct Validity in Psychological Tests“, *Psychological Bulletin*, Jg. 52, Nr. 4, S. 281–302, 1955, doi: 10.1037/h0040957.
- [23] S. Daly, *Automotive Air Conditioning and Climate Control Systems*, 1. Aufl. Amsterdam: Butterworth-Heinemann, 2006.

- [24] P. Danca, „Ventilation Strategies for Improving the Indoor Environment Quality in Vehicles“. Dissertation, Civil and Mechanical Engineering Laboratory, University of Rennes 1, France, 2018.
- [25] P. Danca, F. Bode, I. Nastase und A. Meslem, „CFD Simulation of a Cabin Thermal Environment with and Without Human Body – Thermal Comfort Evaluation“, *E3S Web Conf.*, Jg. 32, 2018, doi: 10.1051/e3sconf/20183201018.
- [26] P. Danca, I. Nastase, F. Bode, C. Croitoru, A. Dogeanu und A. Meslem, „Evaluation of the thermal comfort for its occupants inside a vehicle during summer“, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, Jg. 595, S. 12027, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/595/1/012027.
- [27] P. Danca und A. Vartires, „Thermal Comfort Assessment using Human Subjects“, *XXIII International Scientific-Technical Conference*, 2015.
- [28] P. Danca, A. Vartires und A. Dogeanu, „An Overview of Current Methods for Thermal Comfort Assessment in Vehicle Cabin“, *Energy Procedia*, Jg. 85, S. 162–169, 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.12.322.
- [29] H. Deyhle und R. Bienert, „Fahrzeug-Klimatisierung aus Kundensicht: Subjektive vs. objektive Bewertung“ in *Haus der Technik Fachbuch*, Bd. 108, *Subjektive Fahreindrücke sichtbar machen IV: Korrelation zwischen objektiver Messung und subjektiver Beurteilung in der Fahrzeugentwicklung*, K. Ecker, Hg., Renningen: Expert-Verl., 2010, S. 135–146.
- [30] DIN 33403-3:2011-07, „Klima am Arbeitsplatz und in der Arbeitsumgebung - Teil 3: Beurteilung des Klimas im Warm- und Hitzebereich auf der Grundlage ausgewählter Klimasummenmaße“.
- [31] DIN EN ISO 10551:2020-02, „Ergonomie des Umgebungsklimas – Beurteilung des Einflusses des Umgebungsklimas unter Anwendung subjektiver Bewertungsskalen“.
- [32] DIN EN ISO 13731:2002-04, „Ergonomie des Umgebungsklimas: Begriffe und Symbole“.
- [33] DIN EN ISO 13732-1:2008-12, „Ergonomie der thermischen Umgebung – Bewertungsverfahren für menschliche Reaktionen bei Kontakt mit Oberflächen – Teil 1: Heiße Oberflächen“, S. 1–52.

- [34] DIN EN ISO 14505-2:2007-04, „Ergonomie der thermischen Umgebung – Beurteilung der thermischen Umgebung in Fahrzeugen, Teil 2: Bestimmung der Äquivalenttemperatur“.
- [35] DIN EN ISO 7726:2002-04, „Umgebungsklima: Instrumente zur Messung physikalischer Größen“, S. 1–62.
- [36] DIN EN ISO 8996:2005-01, „Ergonomie der thermischen Umgebung – Bestimmung des körpereigenen Energieumsatzes“, S. 1–31.
- [37] DIN EN ISO 9920:2009-10, „Ergonomie der thermischen Umgebung – Abschätzung der Wärmeisolation und des Verdunstungswiderstandes einer Bekleidungskombination“, S. 1–107.
- [38] DWD, „Entwicklung der Jahresmitteltemperatur in Deutschland in ausgewählten Jahren von 1960 bis 2020“, 2021.
- [39] EN ISO 7730:2006-04, „Ergonomie der thermischen Umgebung – Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit“, S. 1–60.
- [40] K. Fabbri, *Indoor Thermal Comfort Perception*. Cham: Springer International Publishing, 2015.
- [41] P. O. Fanger, *Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering*. Copenhagen: Danish Technical Press, 1970.
- [42] D. Fiala, G. Havenith, P. Bröde, B. Kampmann und G. Jendritzky, „UTCI-Fiala Multi-Node Model of Human Heat Transfer and Temperature Regulation“, *International Journal of Biometeorology*, Jg. 56, Nr. 3, S. 429–441, 2012, doi: 10.1007/s00484-011-0424-7.
- [43] D. Fiala, K. J. Lomas und M. Stohrer, „A Computer Model of Human Thermoregulation for a Wide Range of Environmental Conditions: The Passive System“, *Journal of Applied Physiology*, Jg. 87, Nr. 5, S. 1957–1972, 1999, doi: 10.1152/jappl.1999.87.5.1957.
- [44] D. Fiala, K. J. Lomas und M. Stohrer, „Computer Prediction of Human Thermoregulatory and Temperature Responses to a Wide Range of Environmental Conditions“, *International Journal of Biometeorology*, Jg. 45, Nr. 3, S. 143–159, 2001, doi: 10.1007/s004840100099.

- [45] E. Foda, I. Almesri, H. B. Awbi und K. Siren, „Models of human thermoregulation and the prediction of local and overall thermal sensations“, *Building and Environment*, Nr. 46, 2011.
- [46] E. Foda und K. Sirén, „A Thermal Manikin with Human Thermoregulatory Control: Implementation and Validation“, *International Journal of Biometeorology*, Jg. 56, Nr. 5, S. 959–971, 2012, doi: 10.1007/s00484-011-0506-6.
- [47] Föderation Deutscher Psychologinnenvereinigungen, „Testbeurteilungssystem des Diagnostik- und Testkuratoriums“, *Psychologische Rundschau*, Jg. 69, Nr. 2, S. 109–116, 2018, doi: 10.1026/0033-3042/a000401.
- [48] W. Frank, *Raumklima und thermische Behaglichkeit*. Berlin, München, Düsseldorf: Ernst, 1975.
- [49] Fraunhofer IBP, „Klimamesssystem DressMAN 2.0: Energieeffizienz und Raumklima“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.pruefstellen.ibp.fraunhofer.de/de/energieeffizienz-und-raumklima/dressman.html>. Zugriff am: 25. August 2021.
- [50] A. P. Gagge, „Standard Operative Temperature: A Generalized Temperature Scale, Applicable to Direct and Partial Calorimetry“, *American Journal of Physiology-Legacy Content*, Nr. 131, S. 93–103, 1940.
- [51] R. Gerard, „Vegetative Physiologie“, 2016.
- [52] H. Großmann und C. Böttcher, *Pkw-Klimatisierung*, 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2020.
- [53] T. Han und L. Huang, „A Sensitivity Study of Occupant Thermal Comfort in a Cabin Using Virtual Thermal Comfort Engineering“ in *SAE 2005 World Congress & Exhibition*, 2005, doi: 10.4271/2005-01-1509.
- [54] T. Han, L. Huang, S. Kelly, C. Huizenga und Z. Hui, „Virtual Thermal Comfort Engineering“ in *SAE 2001 World Congress*, 2001, doi: 10.4271/2001-01-0588.
- [55] J. Hartig, A. Frey und N. Jude, „Validität“ in *Springer-Lehrbuch, Testtheorie und Fragebogenkonstruktion*, H. Moosbrugger und A. Kelava, Hg., 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012.
- [56] G. Havenith, „Temperature Regulation and Technology“, *Gerontechnology*, S. 41–49, 2001.
- [57] H. Hensel, *Thermal Sensations and Thermoreceptors in Man*. Springfield, Ill.: Thomas, 1982.

- [58] H. Herwig und A. Moschallski, *Wärmeübertragung*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019.
- [59] HHU, *Regelkreisschema der Thermoregulation beim Menschen*. Lehrmaterial. [Online]. Verfügbar unter: https://www3.hhu.de/biodidaktik/Steuerung_Regelung/thermo/therm2.html (Zugriff am: 5. August 2021).
- [60] T. Hirn, A. Kirmas, D. Backes und L. Eckstein, „The Influence of Radiation Intensity and Wavelength on Thermal Perception“, *Building and Environment*, Jg. 196, S. 107763, 2021, doi: 10.1016/j.buildenv.2021.107763.
- [61] S. G. Hodder und K. Parsons, „The Effects of Solar Radiation on Thermal Comfort“, *International Journal of Biometeorology*, Jg. 51, Nr. 3, S. 233–250, 2007, doi: 10.1007/s00484-006-0050-y.
- [62] I. Holmér, „Thermal Manikin History and Applications“, *European Journal of Applied Physiology*, Jg. 92, Nr. 6, S. 614–618, 2004, doi: 10.1007/s00421-004-1135-0.
- [63] I. Holmér, H. Nilsson, M. Bohm, A. Browén und O. Noren, „Evaluation of Thermal Environment in Automotive Vehicles“, 2nd ATA Int Conf. on Vehicle Comfort Ergonomic, Vibration, Noise and Thermal Aspects, 1992.
- [64] C. Huizenga, Z. Hui und E. Arens, „A Model of Human Physiology and Comfort for Assessing Complex Thermal Environments“, *Building and Environment*, Jg. 36, Nr. 6, S. 691–699, 2001, doi: 10.1016/S0360-1323(00)00061-5.
- [65] K. P. Ivanov, „The Development of the Concepts of Homeothermy and Thermoregulation“, *Journal of Thermal Biology*, Jg. 31, 1-2, S. 24–29, 2006, doi: 10.1016/j.jtherbio.2005.12.005.
- [66] K. Katić, R. Li und W. Zeiler, „Thermophysiological models and their applications: A review“, *Building and Environment*, Jg. 106, S. 286–300, 2016, doi: 10.1016/j.buildenv.2016.06.031.
- [67] M. Kilic und S. M. Akyol, „Experimental Investigation of Thermal Comfort and Air Quality in an Automobile Cabin During the Cooling Period“, *Heat and Mass Transfer*, Jg. 48, Nr. 8, S. 1375–1384, 2012, doi: 10.1007/s00231-012-0988-8.
- [68] B. Kingma, „Human Thermoregulation - A Synergy between Physiology and Mathematical Modelling“. Ph.D Thesis, Maastrich University, 2012.

- [69] B. R. M. Kingma, L. Schellen, A. J. H. Frijns und W. D. van Marken Lichtenbelt, „Thermal Sensation: a Mathematical Model Based on Neurophysiology“, *Indoor Air*, Jg. 22, Nr. 3, S. 253–262, 2012, doi: 10.1111/j.1600-0668.2011.00758.x.
- [70] M. Konz, „Spezifische Anforderungen an das Heiz-Klimasystem elektromotorisch angetriebener Fahrzeuge“ (ger), *Forschungsvereinigung Automobiltechnik*, Nr. 233, S. 1–100, 2011.
- [71] H. Koralewski, „Energiehaushalt und Temperaturregulation: Wärmehaushalt und Temperaturregulation“, 2006.
- [72] M. Kords, „Kriterien für den Kauf eines Elektroautos in Deutschland im Jahr 2018“, *Markenartikel Magazin*, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://de-statista-com.eaccess.ub.tum.de/statistik/daten/studie/631361/umfrage/umfrage-zu-den-bedingungen-fuer-den-kauf-eines-elektroautos/>
- [73] C. Kreuzer, J. P. Rugh und J. Tomerlin, „Test Method for Quantifying Climate Control Technologies that Target the Vehicle Occupant“, National Renewable Energy Laboratory, Mesa, AZ, 2016.
- [74] M. R. Kulkarni und F. Hong, „An Experimental Technique for Thermal Comfort Comparison in a Transient Pull Down“, *Building and Environment*, Jg. 39, Nr. 2, S. 189–193, 2004, doi: 10.1016/j.buildenv.2003.08.008.
- [75] S. Leonhardt und M. Walter, Hg., *Medizintechnische Systeme: Physiologische Grundlagen, Gerätetechnik und automatisierte Therapieführung*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2016.
- [76] G. A. Lienert und U. Raatz, *Testaufbau und Testanalyse*, 6. Aufl. Weinheim: Beltz, 1998. [Online]. Verfügbar unter: http://www.content-select.com/index.php?id=bib_view&ean=9783621278454
- [77] C. Marggraf-Micheel und S. Jäger, *Erfassung des subjektiven Wohlbefindens in der Flugzeugkabine*. Köln: DLR, Bibliotheks- und Informationswesen, 2007.
- [78] E. Mayer und R. Schwab, „Presentation of a Dummy Representing Suit for Simulation of huMAN heatloss (DRESSMAN)“, *European Journal of Applied Physiology*, Jg. 92, Nr. 6, S. 626–629, 2004, doi: 10.1007/s00421-004-1141-2.
- [79] L. Michel und W. Conrad, „Testtheoretische Grundlagen psychometrischer Tests“ in Bd. 6, *Enzyklopädie der Psychologie*, K. J. Groffmann und L. Michel, Hg., (Bd. 6, S. 19-70). Göttingen: Hogrefe, 1982.

- [80] H. Moosbrugger und A. Kelava, Hg., *Testtheorie und Fragebogenkonstruktion*, 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012.
- [81] H. Nilsson, „Comfort Climate Evaluation with Thermal Manikin Methods and Computer Simulation Models“, *Indoor Air*, 2003.
- [82] H. Nilsson, „Comfort Climate Evaluation with Thermal Manikin Methods and Computer Simulation Models“. Dissertation, Department of Civil and Architectural Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2004.
- [83] H. Nilsson, I. Holmér, M. Bohm und O. Norén, „Equivalent Temperature and Thermal Sensation: Comparison with Subjective Responses“, *Proceedings of Comfort in the automotive industry. Recent development and achievements, Bologna, ATA*, S. 1–6, 1997.
- [84] H. Nilsson, I. Holmér, M. Bohm und O. Norén, Hg., *Definition and Theoretical Background of the Equivalent Temperature*, 1999.
- [85] C. Nobis und T. Kuhnimhof, „Mobilität in Deutschland – MiD: Ergebnisbericht“, BMVI, infas, DLR, IVT, infas 360., Bonn, Berlin, 2018.
- [86] H.-C. Pape, A. Kurtz und S. Silbernagl, *Physiologie*. Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 2019.
- [87] S. Park, R. T. Hellwig, G. Grün und A. Holm, „Local and Overall Thermal Comfort in an Aircraft Cabin and their Interrelations“, *Building and Environment*, Jg. 46, Nr. 5, S. 1056–1064, 2011, doi: 10.1016/j.buildenv.2010.11.003.
- [88] S. Park, S. Stratbücker, V. Nasyrov, A. Pathak und R. Schwab, *Innovative Klimatisierungs- und thermische Komfortkonzepte zur Optimierung der Reichweite von Elektrofahrzeugen (E-Komfort)*.
- [89] S. Park, S. Stratbücker, M. Visser und G. Grün, „Thermal Comfort Measurement Methodology during a Heat-Up or Cool-Down Phase of a Vehicle equipped with microclimate heating and cooling elements“, 2019.
- [90] S. Park, M. Visser, S. Stratbücker und V. Norrefeldt, „Objektive Klimakomfortbewertung im Fahrzeug mit DressMAN 3.2: Erweiterung der Äquivalenttemperatur zur Gesamtbewertung des thermischen Komforts“, *Fraunhofer IBP-Mitteilung*, Nr. 571, 2021.
- [91] T. Parkinson und R. de Dear, „Thermal Pleasure in Built Environments: Spatial Alliesthesia from Air Movement“, *Building Research & Information*, Jg. 45, Nr. 3, S. 320–335, 2017, doi: 10.1080/09613218.2016.1140932.

- [92] T. Parkinson, R. de Dear und C. Candido, „Thermal Pleasure in Built Environments: Alliesthesia in Different Thermoregulatory Zones“, *Building Research & Information*, Jg. 44, Nr. 1, S. 20–33, 2016, doi: 10.1080/09613218.2015.1059653.
- [93] K. C. Parsons, *Human Thermal Environments: The Effects of Hot, Moderate, and Cold Environments on Human Health, Comfort and Performance*, 2. Aufl. London, New York: Taylor & Francis, 2003.
- [94] K. C. Parsons, *Human Thermal Environments: The Effects of Hot, Moderate, and Cold Environments on Human Health, Comfort, and Performance*, 3. Aufl. Boca Raton, Fla.: CRC Press/Taylor & Francis, 2014.
- [95] S. Paulke, S. Wagner und M. Ellinger, „Air Conditioning Cabin Simulation With Local Comfort Rating of Passengers“, P+Z Engineering GmbH, 2007.
- [96] S. Pischinger und U. Seiffert, Hg., *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*, 8. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016. [Online]. Verfügbar unter: <http://swbplus.bsz-bw.de/bsz470767995cov.htm>
- [97] W. Polifke und J. Kopitz, *Wärmeübertragung: Grundlagen, analytische und numerische Methoden*, 2. Aufl. München u.a: Pearson Studium, 2009. [Online]. Verfügbar unter: <http://lib.myilibrary.com/detail.asp?id=505990>
- [98] N. Razali und Y. B. Wah, „Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests“, *Journal of Statistical Modeling and Analytics*, Nr. 2, S. 21–33, 2011.
- [99] A. Rolle, F. Paur, D. Staab und K. Bengler, „A Simulation Methodology for the Numerical Determination of the Equivalent Temperature“ in *International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME)*, Mauritius, Mauritius, 2021, S. 1–8, doi: 10.1109/ICECCME52200.2021.9591075.
- [100] A. Rolle, B. Schmandt, C. Guinet und C. Bengler, „How can the Thermal Sensation be Objectively Determined in Order to Analyse Different Vehicle Air Conditioning Concepts?“, *Windsor Conference*, S. 343–357, 2020.
- [101] A. Rolle, B. Schmandt, C. Guinet und C. Bengler, Hg., *Assessment of Thermal Comfort in different Vehicle Classes - The Suitability of ISO 14505-2:2006-12*, 2021.

- [102] J. P. Rugh *et al.*, „Predicting Human Thermal Comfort in a Transient Nonuniform Thermal Environment“, *European Journal of Applied Physiology*, Jg. 92, Nr. 6, S. 721–727, 2004, doi: 10.1007/s00421-004-1125-2.
- [103] L. Schellen, M. Loomans, B. Kingma, M. H. de Wit, A. Frijns und W. D. van Marken Lichtenbelt, „The use of a Thermophysiological Model in the Built Environment to Predict Thermal Sensation“, *Building and Environment*, Jg. 59, S. 10–22, 2013, doi: 10.1016/j.buildenv.2012.07.010.
- [104] K. Schermelleh-Engel und C. Werner, „Methoden der Reliabilitätsbestimmung“ in *Springer-Lehrbuch, Testtheorie und Fragebogenkonstruktion*, H. Moosbrugger und A. Kelava, Hg., 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012.
- [105] J. Schloemann, „Kulturgeschichte der Klimaanlage: Im ewigen Mai“, *Süddeutsche Zeitung*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sueddeutsche.de/kultur/kulturgeschichte-der-klimaanlage-im-ewigen-mai-1.2549215>. Zugriff am: 9. Januar 2022.
- [106] C. Schmidt, „Entwicklung eines Modellansatzes zur Bewertung der thermischen Behaglichkeit unter inhomogenen Klimabedingungen“. Dissertation, Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen, RWTH Aachen, Aachen, 2016.
- [107] C. Schmidt, S. Veselá, M. Nabi Bidhendi und C. van Treeck, „Zusammenhang zwischen lokalem und globalem Behaglichkeitsempfinden: Untersuchung des Kombinationseffektes von Sitzheizung und Strahlungswärmeübertragung zur energieeffizienten Fahrzeugklimatisierung“, *Forschungsvereinigung Automobiltechnik*, Nr. 272, S. 1–58, 2015.
- [108] C. Schmidt, D. Wölki und C. van Treeck, „Definition einer „Äquivalenten Kontakttemperatur“ als Bezugsgröße zur Bewertung der ergonomischen Qualität von kontaktbasierten Klimatisierungssystemen in Fahrzeugen“, *Forschungsvereinigung Automobiltechnik*, Nr. 314, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vda.de/de/services/Publikationen/fat-schriftenreihe-314.html>
- [109] R. Schmidt, F. Lang und M. Heckmann, Hg., *Physiologie des Menschen*, 31. Aufl. Berlin: Springer, 2017.
- [110] R. Schwab, „Einfluss der Sonneneinstrahlung auf die thermische Behaglichkeit in Kraftfahrzeugen“, *Forschungsvereinigung Automobiltechnik*, Nr. 109, S. 1–202, 1994. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vda.de/de/services/Publikationen/fat-schriftenreihe-109.html>

- [111] R. Schwab und G. Grün, „Ableitung eines messbaren Klimasummenmaßes für den Vergleich des Fahrzeugklimas konventioneller und elektrischer Fahrzeuge“, *Forschungsvereinigung Automobiltechnik*, Jg. 257, 2013.
- [112] K. W. Shek und W. T. Chan, „Combined Comfort Model of Thermal Comfort and Air Quality on Buses in Hong Kong“, *The Science of the total environment*, Jg. 389, 2-3, S. 277–282, 2008, doi: 10.1016/j.scitotenv.2007.08.063.
- [113] M. Simion, L. Socaciu und P. Unguresan, „Factors which Influence the Thermal Comfort Inside of Vehicles“, *Energy Procedia*, Jg. 85, S. 472–480, 2016, doi: 10.1016/j.egypro.2015.12.229.
- [114] Spiegel, *Hitze lässt uns langsamer denken - Versuch mit Studenten*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.spiegel.de/gesundheit/diagnose/hitze-laesst-uns-langsamere-denken-versuch-mit-studenten-a-1217681.html#> (Zugriff am: 25. März 2020).
- [115] H. Spitzer, T. Hettlinger und G. Kaminsky, *Tafeln für den Energieumsatz bei körperlicher Arbeit*, 6. Aufl. Berlin: Beuth, 1982.
- [116] R. Streblow, „Thermal Sensation and Comfort Model for Inhomogeneous Indoor Environments“. Dissertation, Energy Efficient Buildings and Indoor Climate, RWTH, Aachen, 2010.
- [117] H. Strobel und T. Neumann, „Erweiterte Möglichkeiten der Kabinenklimatisierung durch körpernahes Heizen und Kühlen“. Parkhotel Stuttgart Messe-Airport, 20. Nov. 2018.
- [118] N. C. Strupp und N. Lemke, „Klimadaten und Pkw-Nutzung, Nutzungsverhalten zu Auslegung, Versuch und Simulation“, Nr. 224, 2009. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vda.de/de/services/Publikationen/fat-schriftenreihe-224.html>
- [119] P. Stuke und K. Bengler, „Interior Air Conditioning for Electric Vehicle EVA: New Approach on Vehicle Interior Cooling to Increase Comfort and Reduce Energy Consumption“. Conference Paper, Chair of Ergonomics, Technical University Munich, 2014.
- [120] Tageszeitung, „Frauen frieren schneller als Männer: Wissenschaftler kennen vier gute Gründe“, *tz*, 7. Feb. 2012, 2012. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.tz.de/leben/gesundheit/darum-frieren-frauen-schneller-1591535.html>. Zugriff am: 7. Juli 2020.

- [121] S. Tanabe, K. Kobayashi, J. Nakano, Y. Ozeki und M. Konishi, „Evaluation of Thermal Comfort using Combined Multi-Node Thermoregulation (65MN) and Radiation Models and Computational Fluid Dynamics (CFD)“, *Energy and Buildings*, Jg. 34, Nr. 6, S. 637–646, 2002, doi: 10.1016/S0378-7788(02)00014-2.
- [122] J. Temming, „Fahrzeugklimatisierung und Fahrsicherheit: Auswirkungen sommerlichen Klimas in Kfz auf die Leistungsfähigkeit der Fahrer“, *Forschungsvereinigung Automobiltechnik*, Nr. 177, S. 1–319, 2003. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vda.de/de/services/Publicationen/fat-schriftenreihe-177.html>
- [123] C. Thomschke, V. Bader, A. Gubalke und C. van Treeck, „Bewertung der transienten thermischen Behaglichkeit in einer realen Fahrzeugumgebung“, *IBPSA Conference*, 2014.
- [124] K. Tsuzuki und T. Iwata, „Thermal Comfort and Thermoregulation for Elderly People Taking Light Exercise“, *Indoor Air*, S. 647–652, 2002.
- [125] J. van Hoof, „Forty Years of Fanger's Model of Thermal Comfort: Comfort for All?“, *Indoor Air*, Jg. 18, Nr. 3, S. 182–201, 2008, doi: 10.1111/j.1600-0668.2007.00516.x.
- [126] J. van Hoof und J. Hensen, „Thermal Comfort and Older Adults“, *Gerontechnology*, Jg. 4, S. 223–228, 2006, doi: 10.4017/gt.2006.04.04.006.00.
- [127] C. van Treeck, „Indoor Thermal Quality Performance Prediction“ in *Building performance simulation for design and operation*, J. Hensen und R. Lamberts, Hg., London, New York: Spon Press, 2011, S. 180–217.
- [128] VDA, „VDA 220 Standardaufheizung für PKW mit 1 bis 2 Sitzreihen“, 2005.
- [129] VW AG, „Comfortis User Meeting 2019“, Volkswagen Group Research, 2019.
- [130] A. Westhoff und D. Schiepel, „Experimentelle Untersuchung zum thermischen Komfort im Grenzbereich des Luftzugempfindens in einer generischen Fahrzeugkabine“, Fachtagung Fahrzeugklimatisierung, 2020.
- [131] H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz und C. Singer, *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015.
- [132] M. A. Wirtz, *Dorsch - Lexikon der Psychologie*, 19. Aufl., 2020.
- [133] W. Wöhrle, „Vehicular Climatization Effectiveness: Application of Thermal Perception Models for the Assessment of Direct Passenger Conditioning Concepts in Vehicles“. Dissertation, Bau Geo Umwelt, Technical University Munich, Munich, 2020.

- [134] W. Wöhrle, S. Park und K. P. Sedlbauer, „Local Cooling Intensity Thresholds during Vehicle Cool Down“, Technische Akademie Esslingen, 2019.
- [135] World Medical Association, „Declaration of Helsinki: Ethical Principles for Medical Research Involving Human Subjects“ (eng), *JAMA*, Jg. 310, Nr. 20, S. 2191–2194, 2013, doi: 10.1001/jama.2013.281053.
- [136] World Meteorological Organisation, *Höchste jemals gemessene Temperatur weltweit nach Regionen bis 2019: In Statista*. [Online]. Verfügbar unter: <https://de-statista-com.eaccess.ub.tum.de/statistik/daten/studie/609823/umfrage/hoechste-gemessene-temperaturen-weltweit-nach-regionen/> (Zugriff am: 21. Juni 2020).
- [137] World Meteorological Organisation, *Niedrigste jemals gemessene Temperatur weltweit nach Regionen bis 2019: In Statista*. [Online]. Verfügbar unter: <https://de-statista-com.eaccess.ub.tum.de/statistik/daten/studie/609836/umfrage/niedrigste-gemessene-temperaturen-weltweit-nach-regionen/> (Zugriff am: 21. Juni 2020).
- [138] D. Wyon, S. Larsson, B. Forsgren und I. Lundgren, „Standard Procedures for Assessing Vehicle Climate with a Thermal Manikin“, *Society of Automotive*, S. 46–56, 1989.
- [139] Yaglou, „Temperature, Humidity, and Air Movement in Industries: The Effective Temperature Index“, *Journal of Industrial Hygiene*, Nr. 9, S. 297–309, 1927.
- [140] B. W. Yap und C. H. Sim, „Comparisons of Various Types of Normality Tests“, *Journal of Statistical Computation and Simulation*, Jg. 81, Nr. 12, S. 2141–2155, 2011, doi: 10.1080/00949655.2010.520163.
- [141] H. Zhang, „Human Thermal Sensation and Comfort in Transient and Non-Uniform Thermal Environments“. Dissertation, University of California, Berkeley, 2003.
- [142] H. Zhang, C. Huizenga, E. Arens und T. Yu, „Considering Individual Physiological Differences in a Human Thermal Model“, *Journal of Thermal Biology*, Jg. 26, 4-5, S. 401–408, 2001, doi: 10.1016/S0306-4565(01)00051-1.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Systemgrenzen und Einflussfaktoren „Umwelt – Fahrzeugklima – Mensch“.....	4
Abbildung 2:	System Umwelt-Fahrzeugklima, basierend auf [95, S. 2].....	13
Abbildung 3:	Thermoregulation des Menschen, basierend auf [59]	16
Abbildung 4:	a) Wärmeproduktion, Wärmeverlust, Körperkern-, mittlere Haut- und Fingertemperatur in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur; b) Wärmeübertragung des Menschen in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur [86, S. 572, 109, S. 847]	17
Abbildung 5:	Wahrnehmung der Thermorezeptoren, basierend auf [109, S. 289]	18
Abbildung 6:	a) Verteilung der Kälterezeptoren; b) Sensitivität der Kälte- und Wärmerezeptoren; c) Vergleich der Verteilung an Kälte- und Wärmerezeptoren [57, 86, 109, 290; 843].....	19
Abbildung 7:	a) Tagesverlauf der Körperkerntemperatur von Frauen in der ersten Hälfte (präovulatorisch) und während der zweiten Hälfte (postovulatorisch) des Monatszyklus; b) Einfluss von Geschlecht und Alter auf den Metabolismus; c) Exemplarische Energieumsätze für eine 70 kg schwere Person [109, S. 838-839]	21
Abbildung 8:	Thermodynamische Systemgrenzen: Umwelt – Fahrzeugklima – Mensch im stationären Fahrzeugbetrieb; basierend auf [71, S. 15, 109, S. 287].....	24
Abbildung 9:	Einflussfaktoren auf die thermische Behaglichkeit, basierend auf [48, S. 13, 113]	26
Abbildung 10:	Überführung des Wärmeverlusts einer Person mit warmen Kopf q_1 unter inhomogenen Umgebungsbedingungen (mitte) in homogene klimatische Bedingungen (links), sowie die Überführung des Wärmeverlusts einer Person mit kühlen Oberschenkeln q_2 unter inhomogenen Umgebungsbedingungen (mitte) in homogene klimatische Bedingungen (rechts), basierend auf [82, 129].....	30
Abbildung 11:	KZM nach Nilsson für Sommer- und Winterkleidung; Abkürzungen: L = links, R = rechts, O = oberer, U = unterer, basierend auf [82, S. 52]	34
Abbildung 12	a) Beheizte Klima-Messpuppe; b) Beheizte Messwertaufnehmer mit Dummy [34, S. 13-15].....	37
Abbildung 13:	a) Ablenkung der Personenanströmer; b) Schematische Darstellung der symmetrischen Verstellung für ein indirekte und direkte Anströmung; c) Winkelmessgerät für exakte Einstellungen der Ausströmer	40

Abbildung 14:	Ergebnisse für $T_1 = 20^\circ\text{C}$; $m_1 = 2 \text{ kg/min}$: a) Temperaturdarstellung: Messungen der T_{eq} in Abhängigkeit der Ausströmer Ablenkung; b) Komfortdarstellung: Bewertung der T_{eq} mittels Nilssons Komfortzonmodell, für sommerliche Umgebungsverhältnisse	41
Abbildung 15:	a) KWK mit einer konstanten Wind- und Fahrzeuggeschwindigkeit von 50 km/h; b) Temperaturverlauf über die 7h30min Versuchszeit; Sonnensimulation aktiv ab $T = 20^\circ\text{C}$	46
Abbildung 16:	Komfortdarstellung: Vergleich des thermischen Komforts zwischen Mittel- und Oberklasse Fahrzeug, bei einer Umgebungstemperatur von 10°C	47
Abbildung 17:	Crédit-Evaluierung der Komfortbewertung für Mittelklasse und Oberklasse Fahrzeug	48
Abbildung 18:	Isokomfort-Diagramme der Körpersegmente Kopf, Oberkörper und Beine	50
Abbildung 19:	Aufheizvorgang bei -5°C mit konventionellem HVAC-System (links) und in Kombination mit thermisch aktiven Flächen (rechts)	53
Abbildung 20:	a) Komfortbewertung Nullmessung und Flächenheizkonzept nach 45 Min.; b) Heizleistung konvektive Klimatisierung (Nullmessung); c) Heizleistung konvektive und strahlungsbasierte Klimatisierung (Flächenheizkonzept); d) Kumulierter Energieverbrauch Nullmessung und Flächenheizkonzept	54
Abbildung 21	a) Simulationsumgebung und -ergebnis der Sensorkalibrierung; b) T_{Sensor} in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur T_{Umgebung} und Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten h_{cal} nach Formel 14	56
Abbildung 22	a) Vergleich zwischen dem virtuellen und physischen Klimaprüfstand mit Klima-Dummy; b) Ergebnisse der T_{eq} für die Simulation und Messung, dargestellt im Sommer-KZM.....	58
Abbildung 23	a) Fragerunde 1: Ausgangssituation ohne Wärmelast; b) Fragerunde 2-5 der Probanden: Versuch mit Wärmelast; c) Messtechnische Untersuchung mit Klima-Dummy, Versuchsablauf identisch zur Probandenstudie.....	61
Abbildung 24	Instationärer Einfluss von Solarstrahlung: Vergleich des subjektiven thermischen Komforts (schwarzer Verlauf) und den objektiven Messungen des Klima-Dummies (grauer Verlauf) umgerechnet in die MTV-Werte mit dem Sommer-KZM; Die Fehlerbalken geben die Standardabweichung der durchschnittlichen MTV-Werte wieder	63

Abbildung 25	Ergebnisse der objektiven und subjektiven Komfortbewertung zum Beginn ($t = 0$ min) und Ende der Versuchszeit ($t = 12$ min); Die Ampel repräsentiert den globalen thermischen Komfort	65
Abbildung 26	Zeitlicher Verlauf der Soll-Werte für die Ausblas- und Heizflächentemperaturen im Klimaprüfstand, bei einer Umgebungstemperatur von 5°C	68
Abbildung 27	Zeitlicher Verlauf der globalen und lokalen Messwerte der T_{eq} , sowie Mittelwerte und Standardabweichungen über die Versuchszeit von 14 Min.	70
Abbildung 28	Validierung der T_{eq} als Bewertungsgröße: Vergleich des subjektiven thermischen Komforts und den objektiven Messungen des Klima-Dummies umgerechnet in die MTV-Werte mit dem Sommer-KZM. Die Fehlerbalken geben die Standardabweichung der durchschnittlichen MTV-Werte wieder.	71
Abbildung 29	Versuchsdesign im Klimaprüfstand mit Probanden (links) und Klima-Dummy (rechts)	77
Abbildung 30	a) Pareto-Diagramm: Altersverteilung der Probanden ($M = 38$ Jahre; $SD = 14,6$); b) Pareto-Diagramm: BMI der Probanden ($M = 24,1$; $SD = 3,6$)	78
Abbildung 31	Ergebnisse <i>Allgemeine Fragen</i> und <i>Fragen zur thermischen Wahrnehmung</i> des demografischen Fragebogens.....	78
Abbildung 32	Lineare Regression der gemittelten subjektiven MTV-Werte ($n = 83$) und der objektiven Messungen mit dem Klima-Dummy für die 14 unterschiedlichen Klimabedingungen	79
Abbildung 33	Allgemeines Komfortzonenmodell für $n = 83$ und $clo = 0,72$	80
Abbildung 34	Quadratische Regression der subjektiven Komfort-Werte ($n = 83$) und der objektiven Messungen mit dem Klima-Dummy für die 14 unterschiedlichen Klimabedingungen	81
Abbildung 35	Erweiterte Komfortzonenmodell für $n = 83$ und $clo = 0,72$	82
Abbildung 36	Normalplot der Residuen von MTV ($n = 581$)	83
Abbildung 37	Vergleich Komfortzonen: Sommer mit allgemeinem Komfortzonenmodell für $n = 83$ und $clo = 0,72$	85
Abbildung 38	Vergleich Komfortzonen: Winter mit allgemeinem Komfortzonenmodell für $n = 83$ und $clo = 0,72$	86
Abbildung 39	Allgemeines Komfortzonenmodell ($n = 83$) im Vergleich zu den geschlechterspezifischen Grenzen für $clo = 0,72$; ΔT_{eq} entspricht der durchschnittlichen Differenz der T_{eq} zwischen männlich und weiblich.....	87
Abbildung 40:	Klimawindkanal der AUDI AG im Werk Ingolstadt [5]	122
Abbildung 41:	Vergleich der Abmaßen zwischen AUDI A4 und Sitzkiste [6, S. 27]	123

Abbildung 42:	Interieur Sitzkiste: Instrumententafel mit Fußraumdüsen (rot), Personenanströmern (gelb) und Defrosterdüse (blau)	123
Abbildung 43:	Positionierung, Abmaße und Leistungen der Flächenheizungen .	124
Abbildung 44:	Funktionsplan und Kommunikation zwischen Messrechner, Technikplattform und Sitzkiste.....	125
Abbildung 45:	Blockschaltbild der Massenstromregelung: PI-Regler mit Back-Calculation Methode zur Unterdrückung des Windup Verhaltens mit Filtration der Eingangsgrößen	125
Abbildung 46:	Regelabweichung zwischen Ist- und Soll-Wert der Massenstromregelung	126
Abbildung 47:	Blockschaltbild der Temperaturregelung; PID-Regler mit Back-Calculation Methode zur Unterdrückung des Windup Verhaltens mit Filtration der Eingangsgrößen	126
Abbildung 48:	Regelabweichung zwischen Ist- und Soll-Wert der Temperaturregelung.....	127
Abbildung 49:	Vorbereitungsraum, Kontrollraum, Klimakammer und Klimaprüfstand mit Sicherheitseinrichtung am Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München	128
Abbildung 50:	Eigenschaften und Segmentierung der Klima-Messpuppe [100, S. 345].....	129
Abbildung 51:	Vergleich zwischen herkömmlich befestigten Sensoren und dem Strömungsoptimierten eingebetteten Sensor [100, S. 345]	129
Abbildung 52:	Lagerungs- und Transportkästen für den mobilen Einsatz der Klima-Dummies	130
Abbildung 53:	$T_1 = 20^{\circ}\text{C}$; $m_2 = 3,3 \text{ kg/min}$: a) Temperaturdarstellung; b) Komfortdarstellung	131
Abbildung 54:	$T_1 = 20^{\circ}\text{C}$; $m_3 = 4,5 \text{ kg/min}$: a) Temperaturdarstellung; b) Komfortdarstellung	132
Abbildung 55:	$T_2 = 24^{\circ}\text{C}$; $m_1 = 2 \text{ kg/min}$: a) Temperaturdarstellung; b) Komfortdarstellung	132
Abbildung 56:	$T_2 = 24^{\circ}\text{C}$; $m_2 = 3,3 \text{ kg/min}$: a) Temperaturdarstellung; b) Komfortdarstellung	133
Abbildung 57:	$T_2 = 24^{\circ}\text{C}$; $m_3 = 4,5 \text{ kg/min}$: a) Temperaturdarstellung; b) Komfortdarstellung	133
Abbildung 58	Vergleich subjektiver thermische Komfort der weiblichen Probanden und den objektiven Messungen des Klima-Dummy, umgerechnet in die MTV-Werte mit dem Sommer-KZM; Die Fehlerbalken geben die Standardabweichung der durchschnittlichen MTV-Werte wieder.....	134
Abbildung 59	Vergleich subjektiver thermische Komfort der männlichen Probanden und den objektiven Messungen des Klima-Dummy,	

	umgerechnet in die MTV-Werte mit dem Sommer-KZM; Die Fehlerbalken geben die Standardabweichung der durchschnittlichen MTV-Werte wieder.....	134
Abbildung 60	Demografischer Fragebogen.....	135
Abbildung 61	Fragebogen zur Beurteilung der thermischen Belastung	136
Abbildung 62	Lineare Regression der gemittelten subjektiven MTV-Werte (n = 49, männliche Probanden) und der objektiven Messungen mit dem Klima-Dummy für die 14 unterschiedlichen Klimabedingungen.....	137
Abbildung 63	Lineare Regression der gemittelten subjektiven MTV-Werte (n = 34, weibliche Probanden) und der objektiven Messungen mit dem Klima-Dummy für die 14 unterschiedlichen Klimabedingungen.....	137
Abbildung 64	Quadratische Regression der subjektiven Komfort-Werte (n = 49, männliche Probanden) und der objektiven Messungen mit dem Klima-Dummy für die 14 unterschiedlichen Klimabedingungen.....	138
Abbildung 65	Quadratische Regression der subjektiven Komfort-Werte (n = 34, weibliche Probanden) und der objektiven Messungen mit dem Klima-Dummy für die 14 unterschiedlichen Klimabedingungen.....	138
Abbildung 66	links: Erweiterte Komfortzonenmodell für n = 49 und $clo = 0,72$ der männlichen Probanden; rechts: Erweiterte Komfortzonenmodell für n = 34 und $clo = 0,72$ der weiblichen Probanden.....	139

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Bedford-Skala.....	7
Tabelle 2:	MTV-Skala [83, S. 3]	7
Tabelle 3:	PMV-Skala [39, S. 6]	7
Tabelle 4:	Skala zur Bewertung des thermischen Empfindens [31, S. 17]	8
Tabelle 5:	Skala zur Beurteilung des thermischen Komforts [31, S. 17].....	8
Tabelle 6:	Skala zur Beurteilung der thermischen Präferenz [31, S. 18].....	8
Tabelle 7:	Extremtemperaturen weltweit [135, 136]	12
Tabelle 8:	Effektoren der menschlichen Temperaturregulation, basierend auf [109, S. 844]	16
Tabelle 9:	Energieumsatz unterschiedlicher Tätigkeiten [36, S. 23].....	20
Tabelle 10:	Thermische Isolationswerte von Bekleidungsstücken für Männer und Frauen, basierend auf [4]	22
Tabelle 11:	Einfluss der Klimagrundgrößen auf die T_{eq} , basierend auf [82, S. 38]	30
Tabelle 12:	Versuchsdesign von Nilsson zur Ermittlung des thermischen Komfort für 30 stationäre Klimabedingungen [34, 63, 83]	34
Tabelle 13:	Instationärer Einfluss von Solarstrahlung: Äquivalenztest für die subjektive und objektive Komfortbestimmung bei einem Signifikanzniveau von $\alpha < 10\%$	64
Tabelle 14:	Validierung der T_{eq} als Bewertungsgröße: Äquivalenztest für die subjektive und objektive Komfortbestimmung bei einem Signifikanzniveau von $\alpha < 10\%$	72
Tabelle 15:	Zeitplanung Probandenstudie und durchschnittliche T_{eq} der Durchgänge 1 bis 7 für Gruppe 1 und Gruppe 2, sowie Lufttemperatur der Klimakammer	76
Tabelle 16:	Shapiro-Wilk-Test auf Normalverteilung für die gemittelten MTV- und T_{eq} -Werte.....	82
Tabelle 17:	Vergleich des Studiendesigns mit den Untersuchungen von Nilsson [82].....	84
Tabelle 18:	Einflussfaktoren entsprechend der Systeme Umwelt, Fahrzeugklima, Klima-Dummy und Mensch, basierend auf den vorangegangenen Untersuchungen und [34, 48, S. 13, 52, 113] ...	92
Tabelle 19:	Vergleich der Korrelationskoeffizienten R^2 für die linearen Regressionsmodelle $MTV \sim 1 + T_{eq}$, angegeben in Prozent [82]....	98

Anhang A

Im folgenden Anhang werden die unterschiedlichen Prüfstände, die im Rahmen der Untersuchung verwendet werden, vorgestellt und auf die messtechnische Ausrüstung zur Erfassung der Äquivalenttemperatur eingegangen.

Anhang A.1

Thermische Prüfstände ermöglichen eine realitätsnahe Simulation des Umgebungsklimas. Nachfolgend werden die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Prüfstände vorgestellt.

Klimawindkanal

Im KWK kann der Fahrtwind, Fahrwiderstände, Umgebungstemperatur, Luftfeuchtigkeit und Sonnenlast exakt an die gewünschten Versuchsbedingungen eingestellt werden. Das Fahrzeug wird, wie in Abbildung 40 dargestellt, an einem Rollenprüfstand befestigt und kann im Geradeausbetrieb mit Geschwindigkeit von bis zu 300 km/h gefahren werden. Scheinwerfer an der Decke ermöglichen eine Sonnensimulation von maximal 1200 W/m^2 . Die vorgestellten Untersuchungen wurden im KWK der AUDI AG durchgeführt.



Abbildung 40: Klimawindkanal der AUDI AG im Werk Ingolstadt [5]

Klimaprüfstand

Sofern das HVAC-System nicht in Interaktion mit dem Gesamtfahrzeug getestet werden soll, kann für viele Fragestellungen auch ein Fahrzeugmodell verwendet werden.

Der im Jahr 2017 von Auracher [6] in Kooperation mit der AUDI AG entwickelte Klimaprüfstand wird als Basis verwendet und grundlegend weiterentwickelt. Die erste Ausbaustufe des Klimaprüfstands erfordert einen manuellen Betrieb, womit ausschließlich stationäre thermische Randbedingungen untersucht werden können. Nachfolgend wird die letzte Ausbaustufe des Klimaprüfstands vorgestellt mit allen, im Rahmen der Promotion, entwickelten Funktionserweiterungen.

Der Klimaprüfstand besteht aus einer Sitzkiste und Technikplattform. Wie in Abbildung 41 dargestellt, ist die Sitzkiste dem Vorderwagen eines B-Segment Fahrzeugs nachempfunden.



Abbildung 41: Vergleich der Abmaßen zwischen AUDI A4 und Sitzkiste [6, S. 27]

Die erste Sitzreihe ist mit beheizten und belüfteten Klimasitzen ausgestattet. Neben den vier Personenanströmer sind in der letzten Ausbaustufe zwei Fußraumdüsen, und eine zentrale Defrosterdüse in der Instrumententafel integriert. Die Instrumententafel mit Ausströmern ist in Abbildung 42 dargestellt.

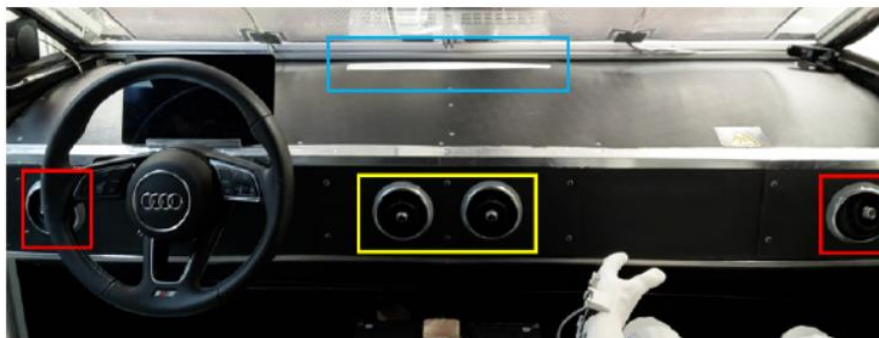


Abbildung 42: Interieur Sitzkiste: Instrumententafel mit Fußraumdüsen (rot), Personenanströmern (gelb) und Defrosterdüse (blau)

Die Sitzkiste wird über die Ausströmer mit konditionierter Luft zum Heizen und Kühlen versorgt. Zusätzlich kann der Innenraum über integrierte Heizfolien gewärmt werden. Die Heizfolien ermöglichen die Simulation einer Sonnenlast. Alternativ kann mit ihnen auch körpernahe Heizkonzepte auf Basis von Wärmestrahlung untersucht werden. Die

Heizfolien für die Fahrer- und Beifahrerseite sind paarweise zusammengefasst, so dass acht Heizgruppen individuell geregelt werden können. Aufgrund einer nachträglich integrierten Heizfläche im Fußraum kann wahlweise die Heizfolie 3a oder 3b verwendet werden. Die Positionierung, Abmaße und Leistungen der Heizflächen sind Abbildung 43 zu entnehmen. Die Heizflächen werden von einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) geregelt. Neben den Heizflächen werden über die SPS auch die Soll-Werte für den Heizwärmetauscher (HWT) und den Verdampfer eingeregelt.

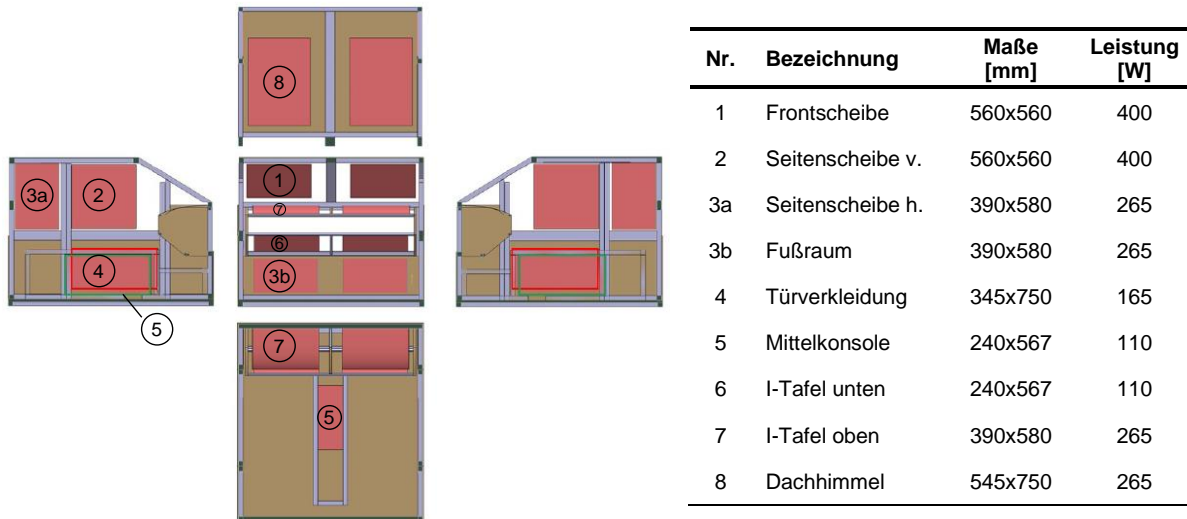


Abbildung 43: Positionierung, Abmaße und Leistungen der Flächenheizungen

Für die Klimatisierung der Sitzkiste wird die Außenluft im MLBevo-Klimagerät konditioniert und über die Ausströmer verteilt. Für das Konditionieren der Außenluft liefern der Heiz- und Kühlkreislauf die notwendige Wärme- und Kälteleistung. Die Kommunikation zwischen der SPS und dem Messrechner erfolgt dabei über Profibus. Die Aktivierung und Parametervorgabe der Teilsysteme „Heizflächen“, „Heizkreislauf“ und „Kühlkreislauf“ kann über eine Python Schnittstelle vorgegeben werden. Das Klimagerät und die Messtechnik kommunizieren via LIN- bzw. CAN-Bus. Eine Übersicht der Teilsysteme, Energie- und Datenströme ist in Abbildung 44 dargestellt. Der Betrieb mit einer in Python entwickelten Software stellt die Haupterweiterung des Klimaprüfstands dar. Neben einem manuellen Modus kann der Prüfstand auch vollautomatisiert betrieben werden. Alle Daten des Klimaprüfstands werden dabei in einer SQL-Datenbank (Structured Query Language) gespeichert.

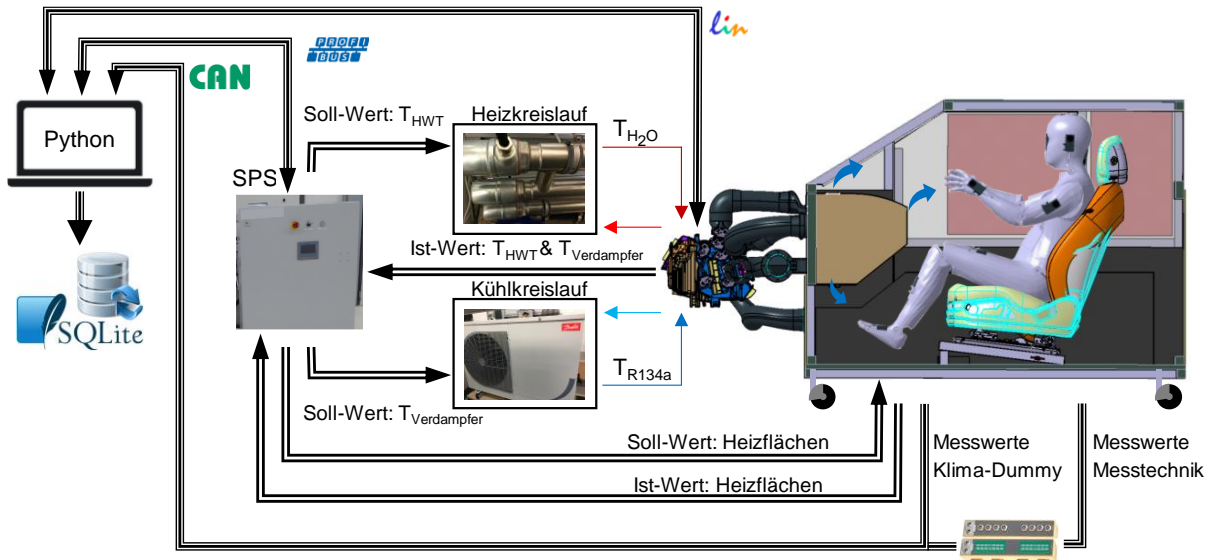


Abbildung 44: Funktionsplan und Kommunikation zwischen Messrechner, Technikplattform und Sitzkiste

Im Vergleich zum realen Fahrzeug sind keine Steuergeräte mit Klimafunktionssoftware für den Betrieb des Fahrzeugklimageräts vorhanden. Hierfür sind eigene Regelungen für den Luftmassenstrom und der Ausblastemperatur in Python umgesetzt. Der Luftmassenstrom wird pro Ausströmer mittels Differenzdruckmessung bestimmt. Die Entwicklung der Messstrecke zur Differenzdruckmessung und Massenstrombestimmung ist der Arbeit von Christ [19] zu entnehmen. In Abhängigkeit der Gebläsedrehzahl kann ein definierter Massenstrom eingestellt werden. Das Blockschaltbild zur Regelung der Gebläsedrehzahl ist in Abbildung 45 dargestellt.

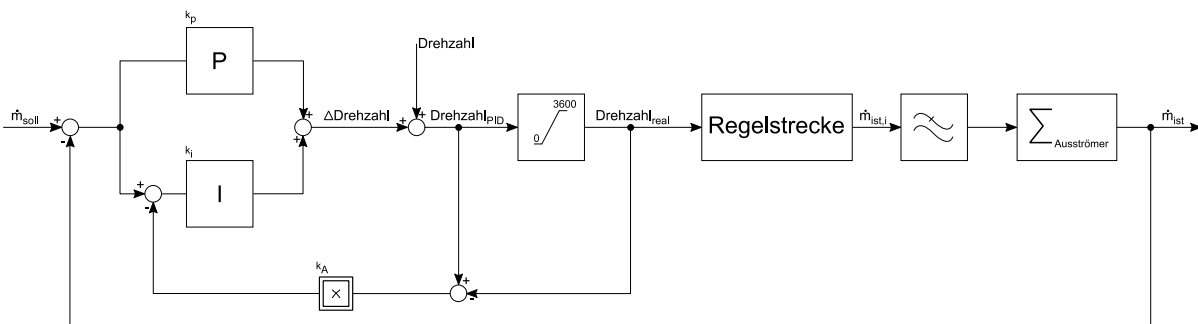


Abbildung 45: Blockschaltbild der Massenstromregelung: PI-Regler mit Back-Calculation Methode zur Unterdrückung des Windup Verhaltens mit Filtration der Eingangsgrößen

Mit einer Abweichung des Massenstroms von $\pm 0,06$ kg/min zwischen Ist- und Soll-Wert wird eine sehr hohe Regelgüte erreicht. Für unterschiedliche Massenströme zwischen 2 bis 5 kg/min ist die Regelabweichung der Massenstromregelung in Abbildung 46 visualisiert. Der Ist-Wert erreicht zeitweise leicht größere Differenzen zum Soll-

Wert, bei $t = 150$ bis 300 s. In diesem Zeitintervall werden die Ausblastemperaturen verändert, womit die Temperklappe leichte Einflüsse auf die Massenstromregelung hat.

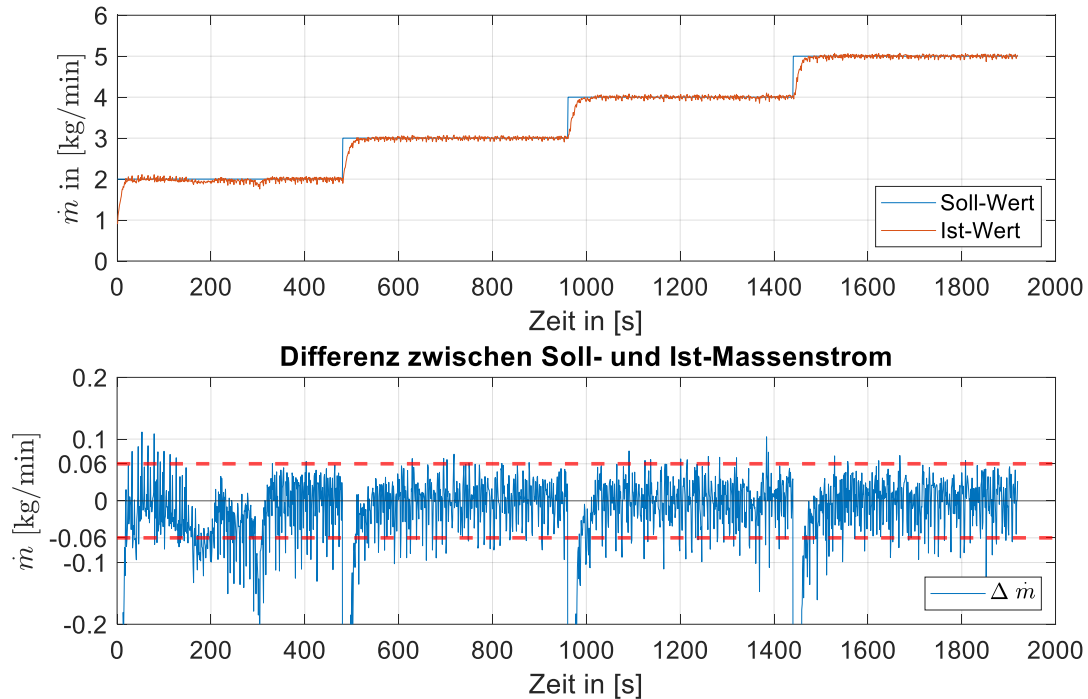


Abbildung 46: Regelabweichung zwischen Ist- und Soll-Wert der Massenstromregelung

Zum Einstellen von definierten Ausblastemperaturen wird die Temperklappe entsprechend dem Blockschaltbild in Abbildung 47 geregelt. Das Fahrzeugklimagerät verfügt über zwei Temperklappen, sodass die Ausblastemperatur für Fahrer und Beifahrerseite unabhängig voneinander geregelt werden kann.

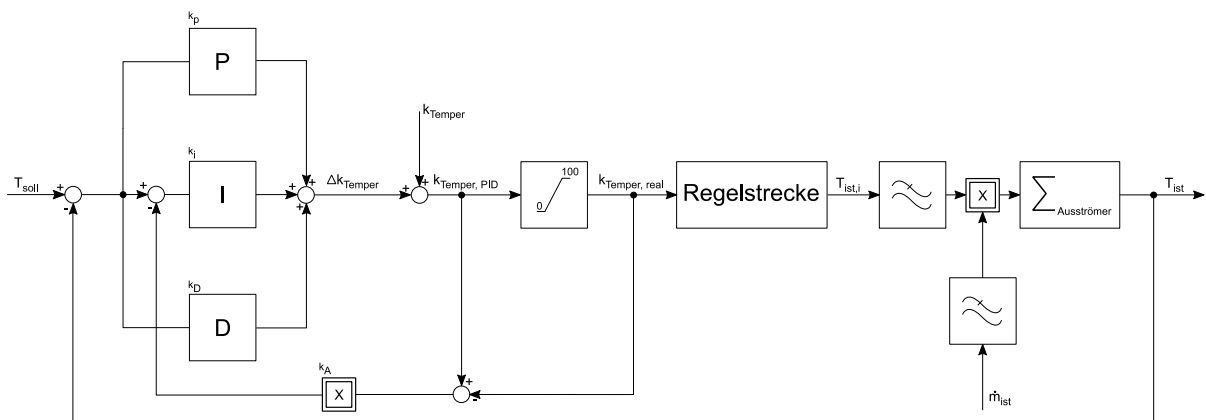


Abbildung 47: Blockschaltbild der Temperaturregelung; PID-Regler mit Back-Calculation Methode zur Unterdrückung des Windup Verhaltens mit Filtration der Eingangsgrößen

Die Ausblastemperaturen der sieben einzelnen Auströmer werden dabei gemittelt und jeweils über den Massenstrom gewichtet

$$\bar{T} = \sum_{s=1}^7 \frac{\dot{m}_i}{\dot{m}_{whole}} \cdot T_i, \quad (16)$$

mit	\bar{T}	Mittlere gewichtete Ausblastemperatur	[°C]
	T_i	Temperatur der einzelnen Ausströmer	[°C]
	\dot{m}_i	Massenstrom der einzelnen Ausströmer	[kg/min]
	\dot{m}_{whole}	Gesamtmassenstrom	[kg/min]

Zur Überprüfung der Robustheit, wird ein Test mit unterschiedlichen Soll-Temperaturen zwischen 10°C und 60°C und Gebläsedrehzahlen zwischen 2000 rpm und 3600 rpm durchgeführt. Im Durchschnitt betragen die Abweichungen der Ist- zur Soll-Temperatur $\pm 0,4^\circ\text{C}$, womit auch die Ausblastemperatur eine hohe Regelgüte aufweist. Die Ergebnisse des Reglertests sind in Abbildung 48 veranschaulicht.

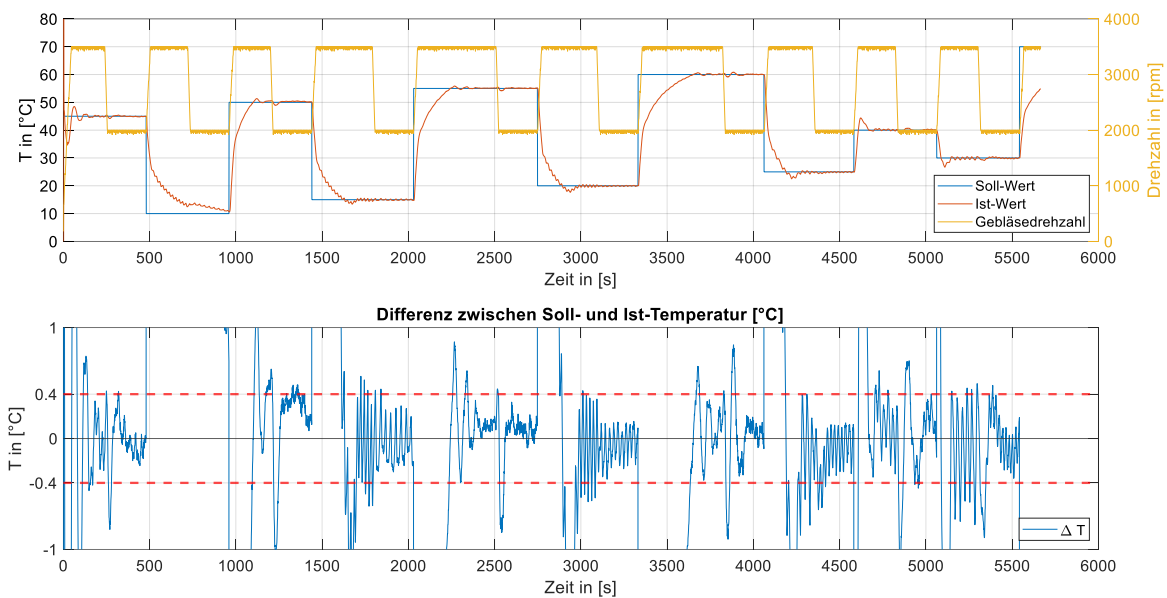


Abbildung 48: Reglabweichung zwischen Ist- und Soll-Wert der Temperaturregelung

Klimakammer

Der Klimaprüfstand wird in Kombination mit einer Klimakammer des Herstellers Weiss-technik betrieben. Durch die Klimakammer können definierte Umgebungstemperaturen zwischen -30°C und $+60^\circ\text{C}$ eingestellt werden mit einer Temperaturkonstanz von $\pm 1^\circ\text{C}$. Die relative Feuchtigkeit kann im Bereich der Plusgrade zwischen 10 bis 95%

geregelt werden mit einer Genauigkeit von $\pm 3\%$ - 5% . Eine Übersicht der Versuchseinrichtung mit Vorbereitungsraum, Kontrollraum, Klimakammer und Klimaprüfstand ist in Abbildung 49 dargestellt.

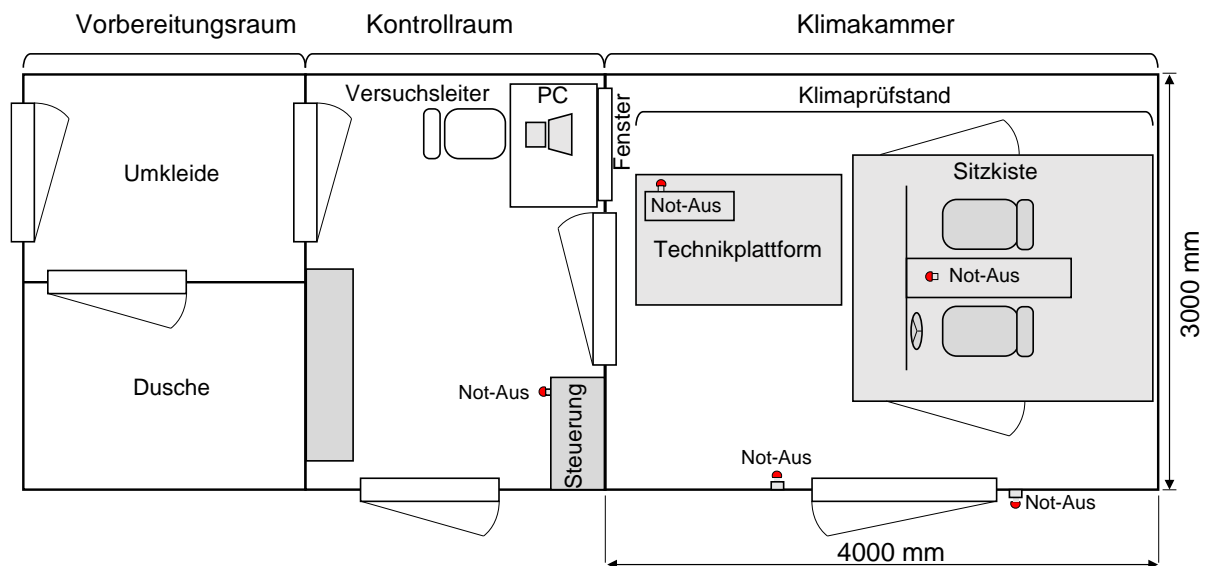
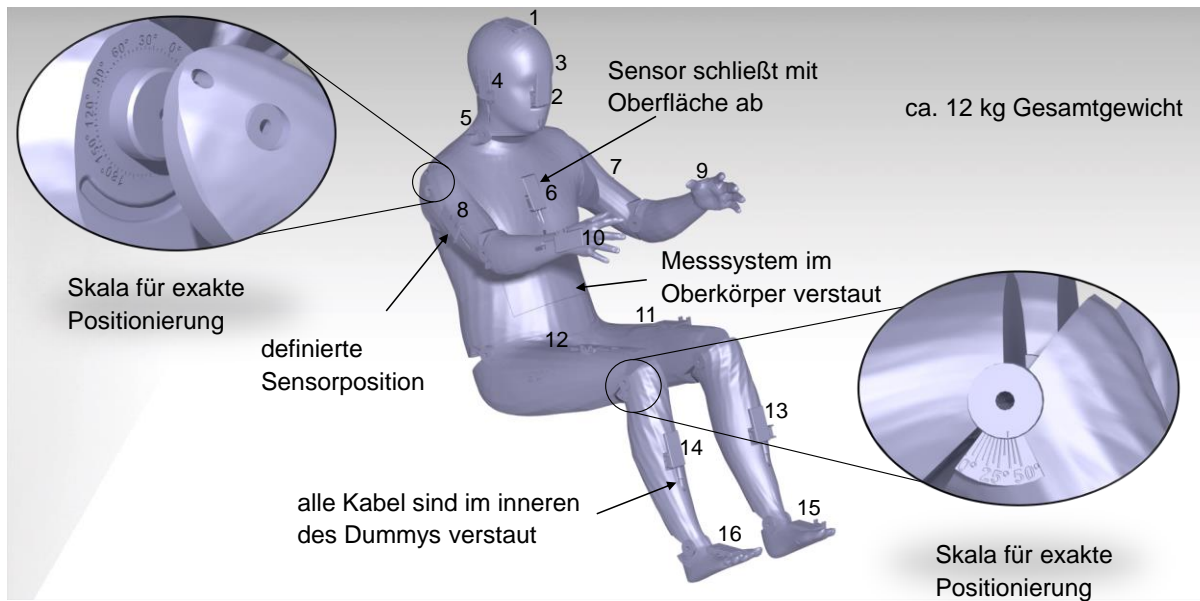


Abbildung 49: Vorbereitungsraum, Kontrollraum, Klimakammer und Klimaprüfstand mit Sicherheits-einrichtung am Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München

Die Klimakammer und der Klimaprüfstand verfügen über insgesamt fünf Not-Ausschalter. Für den automatisieren Betrieb ist die Klimakammer und der Klimaprüfstand gemeinsam an einem Prüfgutschutz angeschlossen. Somit werden beide Systeme stromlos geschaltet, wenn ein vordefinierter Temperaturbereich verlassen wird.

Anhang A.2

Der Klima-Dummy ermöglicht reproduzierbare Messungen der segmentbezogenen Äquivalenttemperatur zur objektiven Erfassung der thermischen Umgebung. Die beheizten Messwertaufnehmer erfüllen die Anforderungen der DIN EN ISO 14505-2:2007-04 und arbeiten mit einem konstanten Wärmestrom q . Zur Gewährleistung der Positionierungsgenauigkeit ist jedes Gelenk mit einer Skala versehen. Die 16 Messwertaufnehmer des EQUITES sind an definierten Körperregionen des Dummies positioniert. Bereiche, die eine höhere Dichte an Thermorezeptoren aufweisen sind mit mehr Sensoren ausgestattet. Die exakte Positionierung ist Abbildung 50 zu entnehmen.



1. Kopfhaut	5. Nacken	9. linke Hand	13. linkes Schienbein
2. Gesicht	6. Brust	10. rechte Hand	14. rechtes Schienbein
3. linke Schläfe	7. linker Oberarm	11. linker Oberschenkel	15. linker Fuß
4. rechte Schläfe	8. rechter Oberarm	12. Rechter Oberschenkel	16. rechter Fuß

Abbildung 50: Eigenschaften und Segmentierung der Klima-Messpuppe [100, S. 345]

Die Sensoren sind in der Oberfläche des Dummies eingebettet, somit wird eine natürliche Umströmung sichergestellt. Wie in Abbildung 51 veranschaulicht weisen herkömmlich befestigte Sensoren im Vergleich einen höheren Luftwiderstand auf. Für eine einfachere Handhabung sind alle Kabel im Inneren des Dummies verstaut und laufen am Messsystem, welches im Oberkörper untergebracht ist, zusammen. Die Datenkommunikation erfolgt über ein Controller Area Network (CAN-Bus), womit alle sechs Klima-Dummies parallel betrieben werden können. Das Messsystem wird über das 12V Bordnetz mit Spannung versorgt.

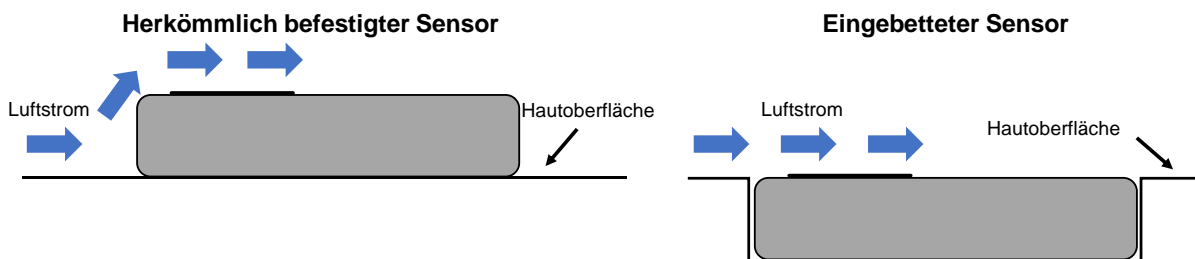


Abbildung 51: Vergleich zwischen herkömmlich befestigten Sensoren und dem strömungsoptimierten eingebetteten Sensor [100, S. 345]

Die Größe und Statur des Dummies entspricht dem 50. Perzentil Mann. Der Dummy wird im selektiven Lasersinter (SLS) Verfahren 3D gedruckt, damit alle Anforderungen

an die Funktionen und Gewicht umgesetzt werden können. Das Gesamtgewicht von ca. 12 kg trägt zur einfachen Handhabung bei.

Für die Klima-Dummies werden passgenaue Transportkästen angefertigt, sodass ein schneller Wechsel der Messtechnik zwischen mehreren Fahrzeugen erfolgen kann. Die Transportkästen sind in Abbildung 52 dargestellt.



Abbildung 52: Lagerungs- und Transportkästen für den mobilen Einsatz der Klima-Dummies

Anhang B

In diesem Abschnitt werden zusätzliche Ergebnisse der vorgestellten Untersuchungen und Studien präsentiert.

Anhang B.1

Ergebnisse Abschnitt 4.3.1: Einfluss der Ausströmer auf Messungen der T_{eq}

Die Durchströmung des Fahrzeugs ist ein wesentlicher Einflussfaktor bei Äquivalenttemperaturmessungen. In Abbildung 53a bis 57a sind die Messergebnisse der T_{eq} in Abhängigkeit der Ausblastemperatur und Massenstrom dargestellt. Die Ausblastemperatur wird in zwei Stufen ($T_1 = 20^\circ\text{C}$; $T_2 = 24^\circ\text{C}$) und der Massenstrom in drei Stufen ($\dot{m}_1 = 2 \text{ kg/min}$; $\dot{m}_2 = 3,3 \text{ kg/min}$; $\dot{m}_3 = 4,5 \text{ kg/min}$) verstellt. Mit dem KZM wird eine Bewertung der T_{eq} durchgeführt. Die Ergebnisse der Komfortbewertung werden in Abbildung 53b bis 57b dargestellt. Die Komfortdarstellungen verdeutlichen, wie groß die

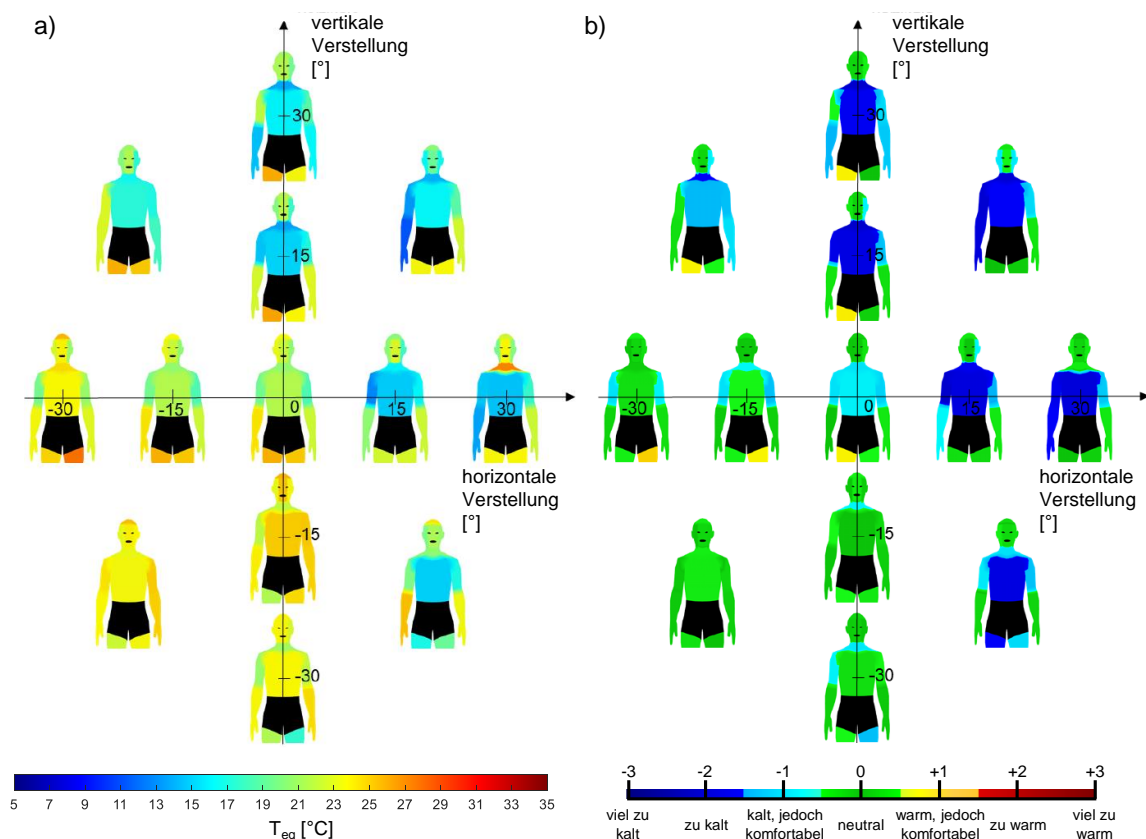


Abbildung 53: $T_1 = 20^\circ\text{C}$; $\dot{m}_2 = 3,3 \text{ kg/min}$: a) Temperaturdarstellung; b) Komfortdarstellung

Änderung des thermischen Empfindens in Abhängigkeit einer indirekten und direkten Anströmung ist. Mit steigenden Massenstrom nimmt die Anzahl der „zu kalten“ bis „viel

zu kalten“ Körperregionen zu. Eine höhere Ausblastemperatur von $T_2 = 24^\circ\text{C}$ reduziert die Anzahl „zu kalter“ Körperregionen.

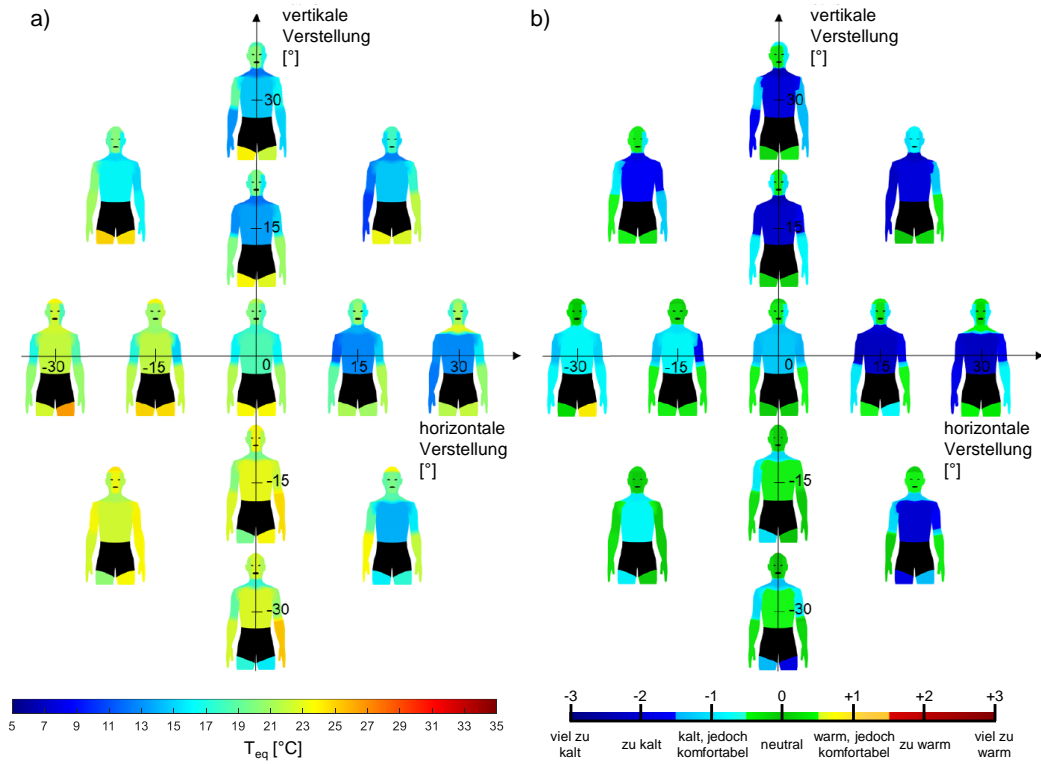


Abbildung 54: $T_1 = 20^\circ\text{C}$; $\dot{m}_3 = 4,5 \text{ kg/min}$: a) Temperaturdarstellung; b) Komfortdarstellung

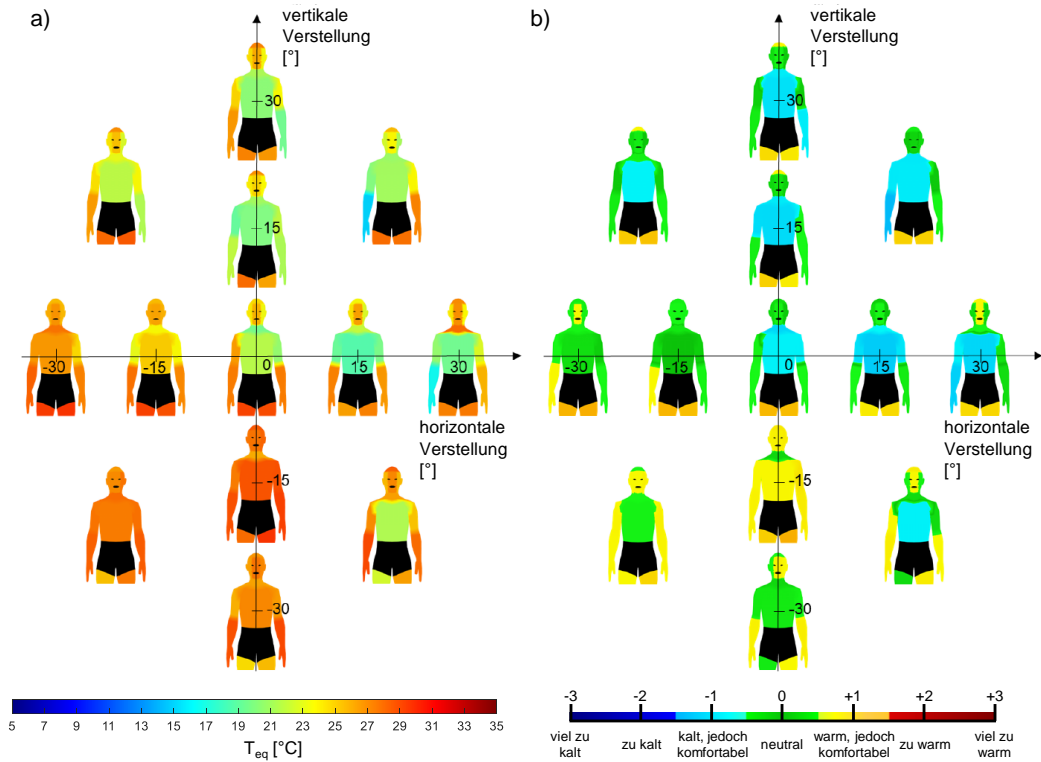


Abbildung 55: $T_2 = 24^\circ\text{C}$; $\dot{m}_1 = 2 \text{ kg/min}$: a) Temperaturdarstellung; b) Komfortdarstellung

ANHANG B

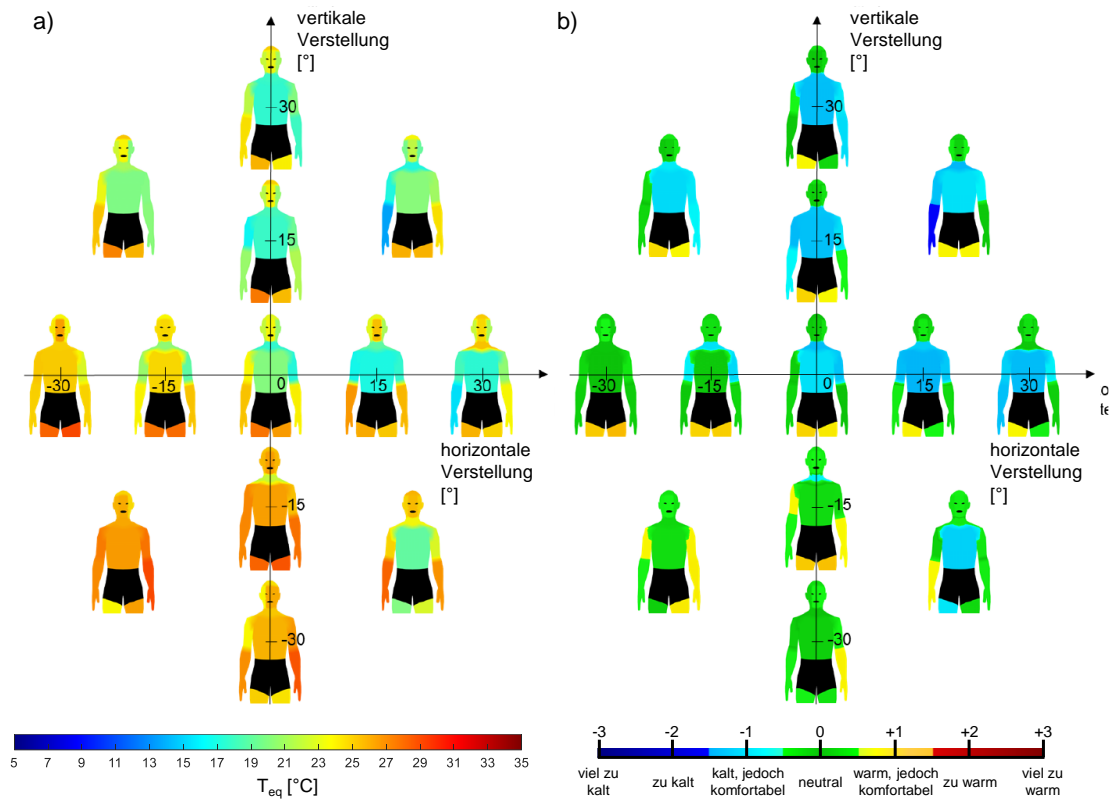


Abbildung 56: $T_2 = 24^\circ\text{C}$; $\dot{m}_2 = 3,3 \text{ kg/min}$: a) Temperaturdarstellung; b) Komfortdarstellung

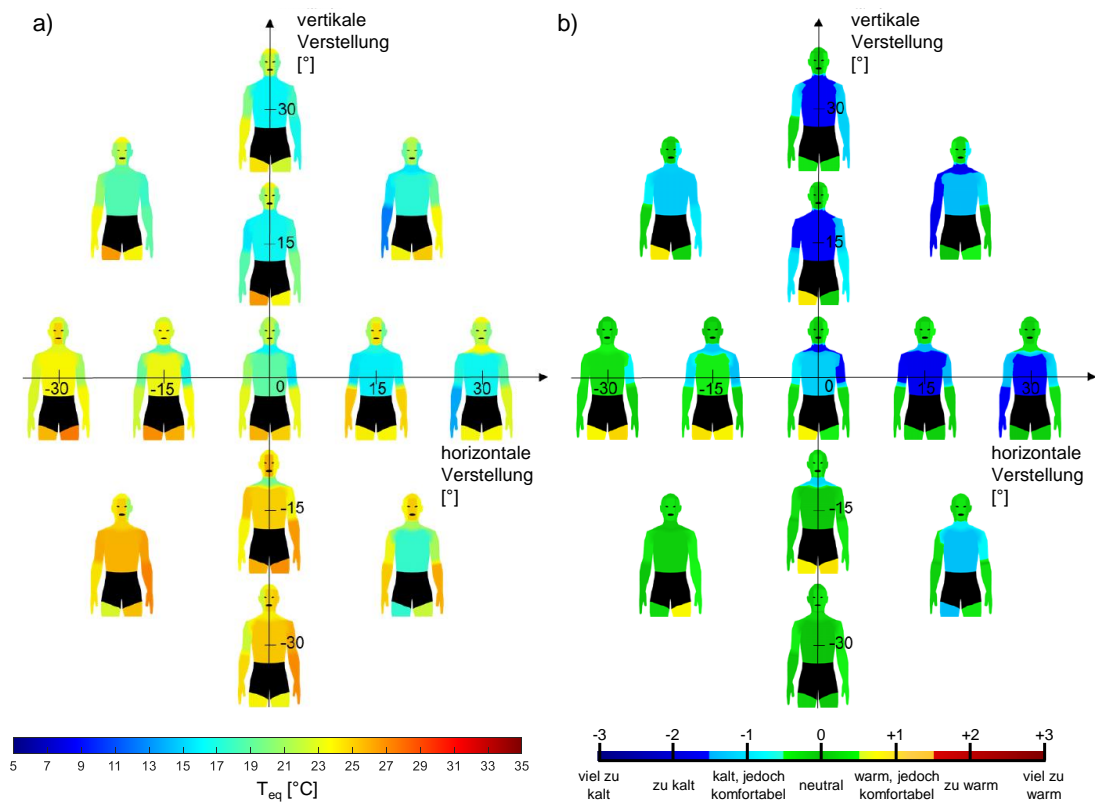


Abbildung 57: $T_2 = 24^\circ\text{C}$; $\dot{m}_3 = 4,5 \text{ kg/min}$: a) Temperaturdarstellung; b) Komfortdarstellung

Anhang B.2

Ergebnisse Abschnitt 6.1: Instationärer Einfluss von Solarstrahlung

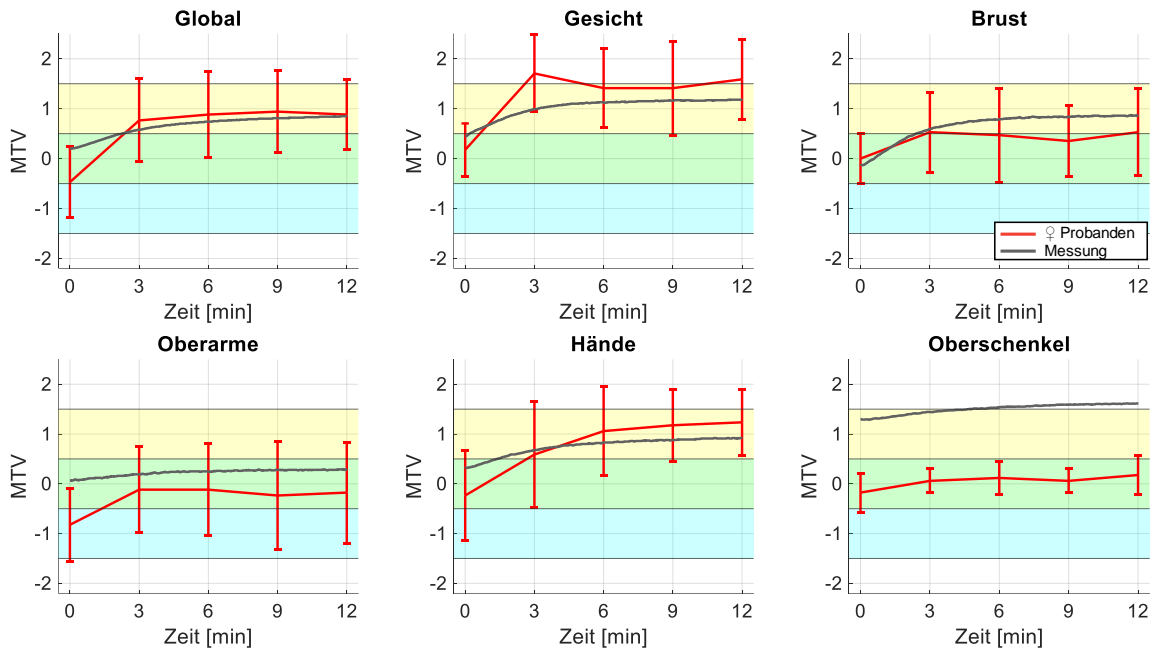


Abbildung 58 Vergleich subjektiver thermische Komfort der weiblichen Probanden und den objektiven Messungen des Klima-Dummy, umgerechnet in die MTV-Werte mit dem Sommer-KZM; Die Fehlerbalken geben die Standardabweichung der durchschnittlichen MTV-Werte wieder

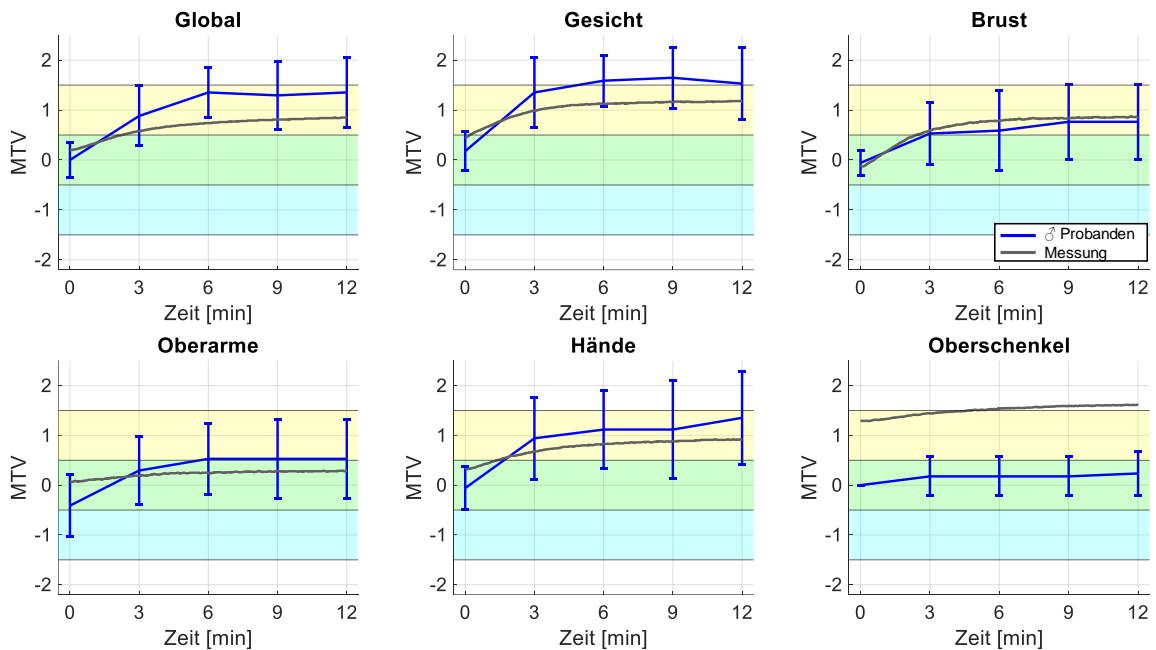


Abbildung 59 Vergleich subjektiver thermische Komfort der männlichen Probanden und den objektiven Messungen des Klima-Dummy, umgerechnet in die MTV-Werte mit dem Sommer-KZM; Die Fehlerbalken geben die Standardabweichung der durchschnittlichen MTV-Werte wieder

Anhang B.3

Die verwendeten Fragebögen sind in Abbildung 60 und 61 dargestellt.

Lehrstuhl für Ergonomie
Fakultät für Maschinenwesen
Technische Universität München

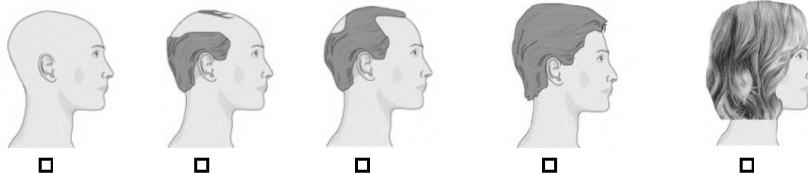


1. Persönliche Angaben

Probanden-ID: _____
 Alter: _____
 Geschlecht: _____
 Größe: _____
 Gewicht: _____
 Höchster Bildungsabschluss: _____
 Führerschein: Klasse-B oder vergleichbar kein Führerschein

2. Allgemeine Fragen

Ist Ihnen momentan zu warm? ja nein
 Ist Ihnen momentan zu kalt? ja nein
 Sind Sie übermüdet oder haben die Nacht schlecht geschlafen? ja nein
 Haben Sie in den letzten 30 min. eine warme Mahlzeit zu sich genommen? ja nein
 Haben Sie in den letzten 30 min. ein heißes Getränk zu sich genommen? ja nein
 Haben Sie in den letzten 30 min. sich körperlich betätigt oder Sport getrieben? ja nein
 Fühlen Sie sich momentan verschwitzt? ja nein
 Leiden Sie unter körperliche Beschwerden, die Ihre thermische Wahrnehmung beeinträchtigen? ja nein
 Bewerten Sie bitte Ihre Haardichte anhand der Folgenden Abbildungen:



Nur für Frauen zu beantworten:

Befinden Sie sich in der ersten Hälfte (präovulatorisch) oder in der zweiten Hälfte (postovulatorisch) des Monatszyklus? erste Hälfte zweite Hälfte
 Menopause keine Angabe

3. Allgemeine Fragen zur Fahrzeugklimatisierung

Wie viele Kilometer fahren Sie in etwa jährlich? < 10.000 km 10.000 – 20.000 km > 20.000 km
 Fahren Sie in der Regel ein Fahrzeug mit Klimaanlage? ja nein
 Falls ja, nutzen Sie auch die Klimaanlage (A/C Funktion)? ja nein
 Bevorzugen Sie im Fahrzeug eine manuelle Klimaanlage oder eine Klimaautomatik? manuell Automatik

4. Thermische Wahrnehmung

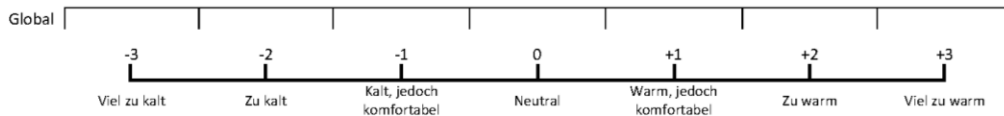
Frieren Sie schnell? ja nein
 Wird Ihnen schnell warm? ja nein
 Bevorzugen Sie tendenziell eine kältere, neutrale oder wärmere Umgebung? kälter neutral wärmer
 Sind Sie zugluftempfindlich? ja nein
 Sind Sie empfindlich gegenüber Sonneneinstrahlung? ja nein

Abbildung 60 Demografischer Fragebogen

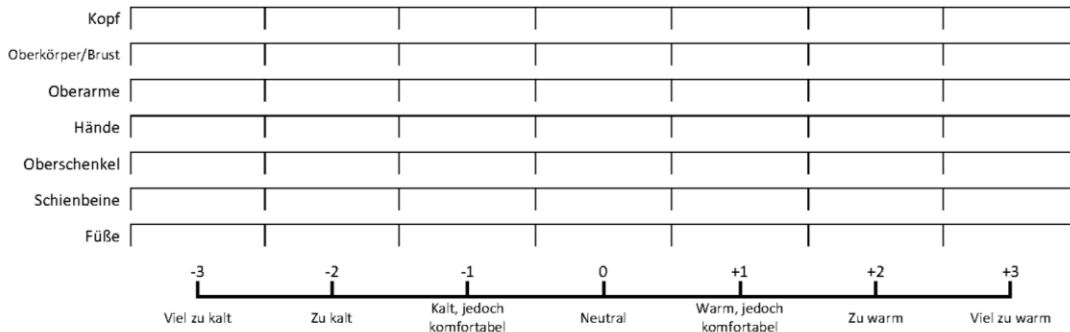
Fragebogen zur Beurteilung der thermischen Belastung

VP: _____ Datum: _____ Uhrzeit: _____ Befragung: Vor-, 0, 5, 10 Nach- Sitzung: _____

1. Bewerten Sie anhand der folgenden Skala wie Sie sich jetzt fühlen:



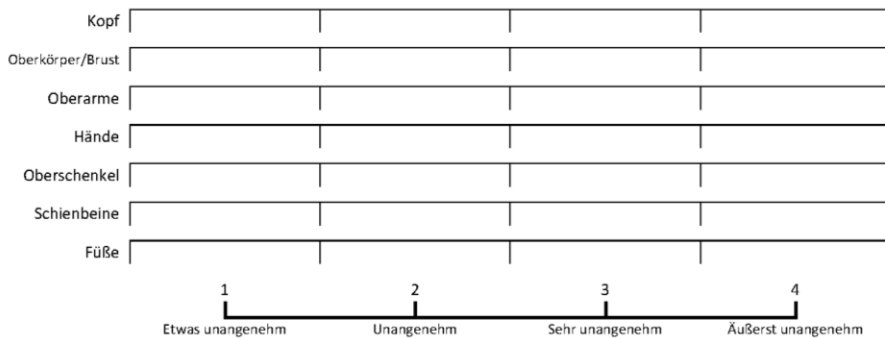
2. Wenn vereinzelte Körperteile von der globalen thermischen Wahrnehmung abweichen, bewerten Sie diese:



3. Wie empfinden Sie das aktuelle Klima:



4. Wenn vereinzelte Körperteile vom globalen thermischen Empfinden abweichen, bewerten Sie diese:



5. Bitte geben Sie an, wie Sie sich jetzt lieber fühlen würden:



6. Bitte geben Sie an, wie Sie das Umgebungsklima persönlich bewerten:



Abbildung 61 Fragebogen zur Beurteilung der thermischen Belastung

Anhang B.4

Ergebnisse Abschnitt 6.3: Erweiterung des KZMs um relevante Einflussfaktoren

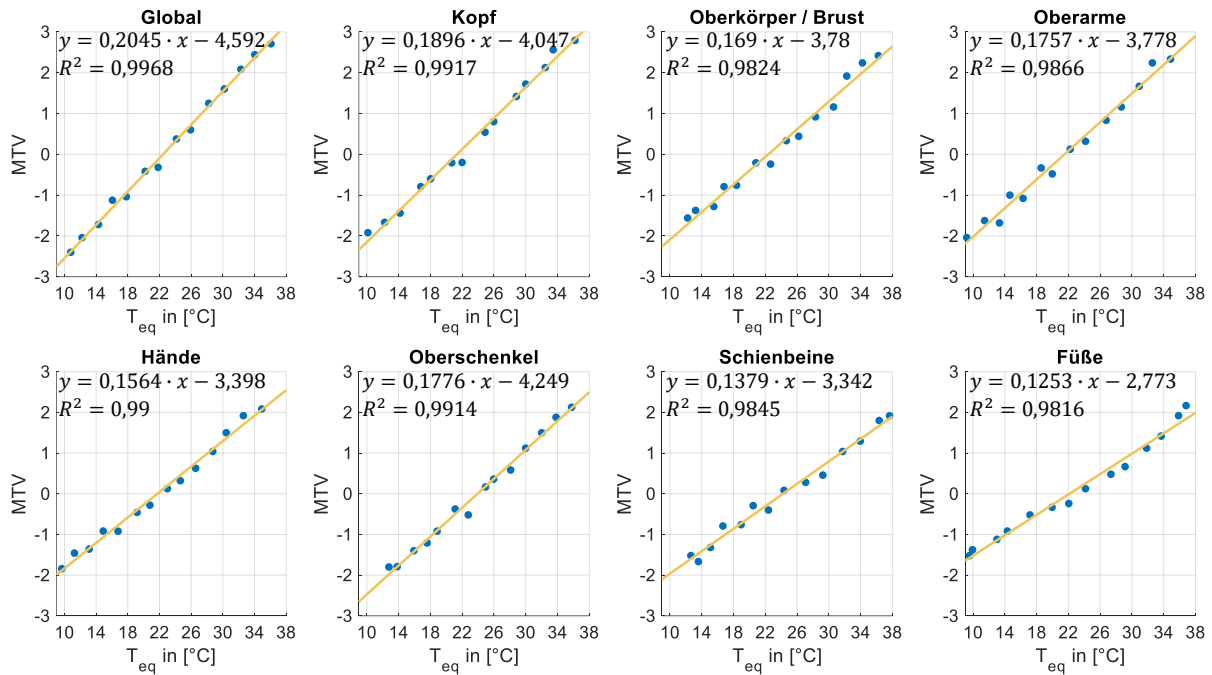


Abbildung 62 Lineare Regression der gemittelten subjektiven MTV-Werte (n = 49, männliche Probanden) und der objektiven Messungen mit dem Klima-Dummy für die 14 unterschiedlichen Klimabedingungen

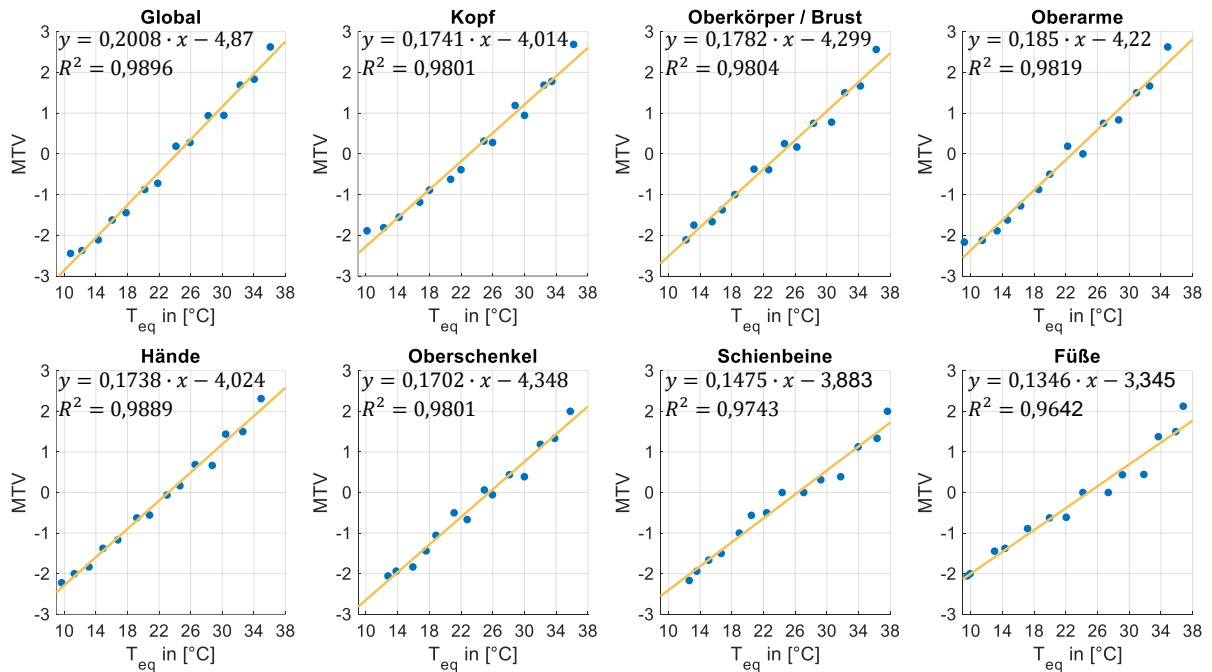


Abbildung 63 Lineare Regression der gemittelten subjektiven MTV-Werte (n = 34, weibliche Probanden) und der objektiven Messungen mit dem Klima-Dummy für die 14 unterschiedlichen Klimabedingungen

ANHANG B

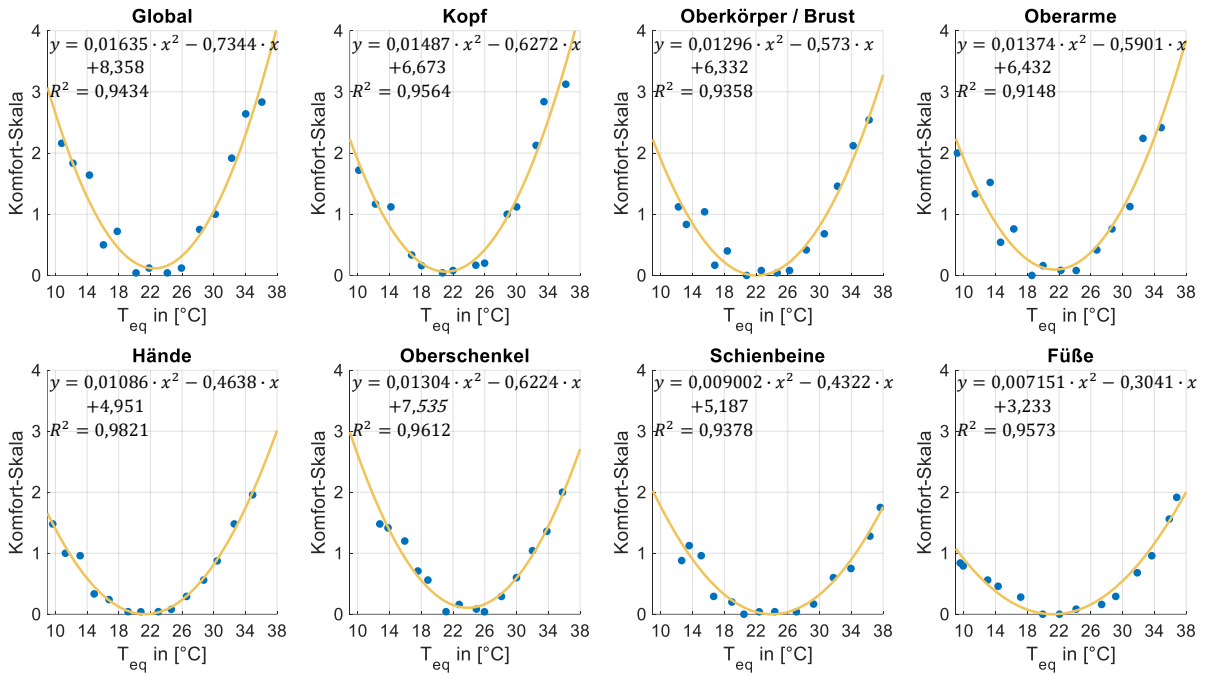


Abbildung 64 Quadratische Regression der subjektiven Komfort-Werte (n = 49, männliche Probanden) und der objektiven Messungen mit dem Klima-Dummy für die 14 unterschiedlichen Klimabedingungen

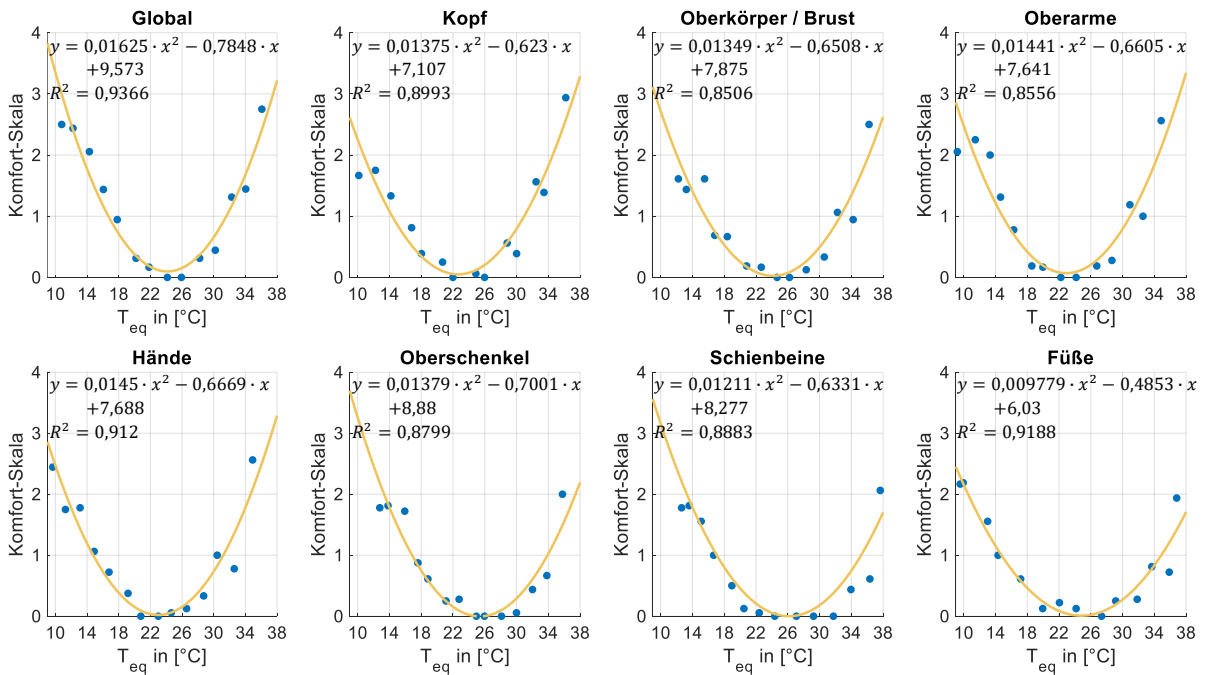


Abbildung 65 Quadratische Regression der subjektiven Komfort-Werte (n = 34, weibliche Probanden) und der objektiven Messungen mit dem Klima-Dummy für die 14 unterschiedlichen Klimabedingungen

ANHANG B

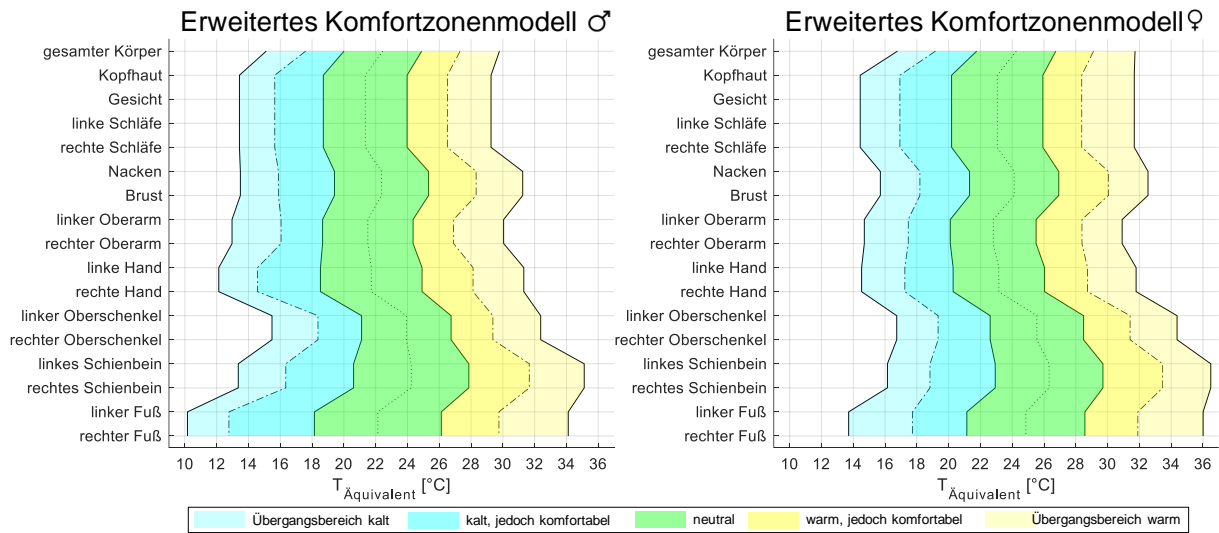


Abbildung 66 links: Erweiterte Komfortzonenmodell für $n = 49$ und $clo = 0,72$ der männlichen Probanden; rechts: Erweiterte Komfortzonenmodell für $n = 34$ und $clo = 0,72$ der weiblichen Probanden