VDA | Verband der Automobilindustrie

FAT | Forschungsvereinigung Automobiltechnik

FAT-Schriftenreihe 354

Untersuchung zum thermischen Komfort im Pkw für den Grenzbereich des Luftzugempfindens

Untersuchung zum thermischen Komfort im Pkw für den Grenzbereich des Luftzugempfindens

Forschungsstelle

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Insitut für Aerodynamik und Strömungstechnik

und Luft- und Raumfahrtpsychologie

Dr. rer. nat. Andreas Westhoff

Dr. phil. Claudia Marggraf-Micheel

Dr. rer. soz. Julia Maier

Dr. phil. Panja Goerke

Dr. rer. nat. Daniel Schiepel

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

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **1**
- 1.1 Motivation . . . 1
- 1.2 Thermischer Komfort . . . 2
  - 1.2.1 Thermischer Komfort: Methoden, Normen und Standards . . . 3
  - 1.2.2 Bewertung des thermischer Komforts im PKW bei Zugluft . . . 5

2 Exp. Aufbau **9**
- 2.1 Messmittel thermisches Manikin . . . 9
- 2.2 Einzelpersonenkabine . . . 12
- 2.3 Luftausströmer . . . 14

3 Objektiver thermischer Komfort **17**
- 3.1 Isotherme Randbedingungen . . . 17
- 3.2 Umgebungstemperatur 29^{o} C und Variation der Zulufttemperatur . . . 32
- 3.3 Strahlungswärme . . . 35

4 Subjektiver Komfort **42**
- 4.1 Versuchsdurchführung . . . 42
- 4.2 Komfortbeurteilung . . . 43
- 4.3 Fazit . . . 49

5 Bewertung und Zusammenfassung **51**
- 5.1 Vergleich und Bewertung subjektiver/objektiver Komfort . . . 51
- 5.2 Grenzbereich des Zugluftempfindens . . . 55
- 5.3 Vergleich mit bestehenden Normen . . . 58

Literaturverzeichnis **61**

Abbildungsverzeichnis

1.1 Definition Äquivalenttemperatur 6

2.1 Prozesskette Kalibrierung 9
2.2 Kalibierung Äquivalenttemperatur 10
2.3 Komfortbewertung EN ISO14505 Sommer 11
2.4 Aufbau Einzelpersonenkabine 12
2.5 Luftausströmer 14
2.6 Referenzgeschwindigkeit 15

3.1 Oberflächentemperatur für $T_{\mathrm{A}} = T_{\mathrm{U}} = 23^o$ 18
3.2 Oberflächentemperatur für $T_{\mathrm{A}} = T_{\mathrm{U}} = 23^o$ 19
3.3 Thermischer Komfort $T_{\mathrm{A}} = T_{\mathrm{U}} = 23^o$ 20
3.4 Äquivalenttemperatur isotherm Kopf und Brust 22
3.5 Äquivalenttemperatur Oberarme 23
3.6 Äquivalenttemperatur Unterarme und Hände 27
3.7 Äquivalenttemperatur Untermarm und Hände 28
3.8 Äquivalenttemperatur als Funktion der Referenzgeschwindigkeit für $T_{\mathrm{U}} = 29^o$ 33
3.9 Äquivalenttemperatur als Funktion der Referenzgeschwindigkeit bei Strahlungswärme (Oberkörper) 37
3.10 Äquivalenttemperatur als Funktion der Referenzgeschwindigkeit bei Strahlungswärme (Unterkörper) 39
3.11 Mittlere Äquivalenttemperaturdifferenz $\overline{\Delta\Theta}$ 40

4.1 Klimaparametereinschätzung 43
4.2 Klimaparameterbewertung 44
4.3 Änderungswünsche 45
4.4 Lokale Komforteinschätzungen/Bewertung 47
4.5 Merkmal Geschlecht Luftzug 48

5.1 Einschätzung/Bewertung Luftzug und Temperatur 52
5.2 Klimazufriedenheit Bewertung 54
5.3 Übersicht thermischer Komfort nach EN ISO14505 56

Tabellenverzeichnis

4.1 Parameter Probandenstudie 42

Nomenklatur

Akronym

ASHRAE : American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
DLR : Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
EN : Europäische Norm
EPK : Einzelpersonenkabine
IR : Infrarot
ISO : Internationale Organisation für Normung
PKW : Personen Kraft Wagen
PMV : Predicted Mean Vote
PPD : Predicted Percentage of Unsatisfied
TM : Thermisches Manikin

Index

A : Ausströmer
k : Körperteil
L : Luft
l : links
r : rechts
U : Umgebung

Kennzahlen

clo : Cloth [-]
DR : Draft Rate (Zugluftrate) [-]

Symbole

α : Wärmeübergangskoeffizient [m^2/s]
β_L : Wärmeausdehnungskoeffizient Luft [1/K]
$\Delta\Theta$: Differenz Äquivalenttemperatur [K]
ΔT : Temperaturdifferenz [K]
$\dot{Q}_\mathsf{EK}$: Wärmestrom erzwungene Konvektion [W]
$\dot{Q}_\mathsf{S}$: Wärmestrom Strahlung [W]
$\dot{Q}_\mathsf{TK}$: Wärmestrom thermische Konvektion [W]
$\dot{Q}_\mathsf{TM}$: Heizleistung thermisches Manikin [W]
$\dot{V}$: Volumenstrom [ℓ/min]
$\dot{V}_\mathsf{G}$: Gesamtvolumenstrom [ℓ/min]
ϵ : Emissonsgrad [-]
λ_L : Temperaturleitfähigkeit Luft [m^2/s]
λ_L : Wärmeleitfähigkeit Luft [W/m K]
ν_L : dynamische Viskosität Luft [W/m K]
σ : Stefan-Boltzmann-Konstante [W / m^2 K^4]
Θ : Äquivalenttemperatur [^{o}C]
g : Erdbeschleunigung [m/s^2]
I : Turbulenzgrad [%]
rF : relative Feuchte [%]
T_A : Temperatur am Ausströmer [^{o}C]
T_L : Lufttemperatur [^{o}C]
T_O : Oberflächentemperatur [^{o}C]
T_P : Temperatur Passagier [^{o}C]
T_U : Umgebungstemperatur [^{o}C]
U : Geschwindigkeit [m/s]
U_ref : Geschwindigkeit [m/s]
U_L : Luftgeschwindigkeit [m/s]
U_Ref : Referenzgeschwindigkeit [m/s]

1 Einleitung

1.1 Motivation

Ob auf dem Weg zur Arbeit oder in den Urlaub, in den heutigen Industriestaaten verbringt der Mensch einen nicht unwesentlichen Teil seiner Zeit im Fahrzeug. Nicht zuletzt deswegen und aufgrund des gesteigerten Wettbewerbs ist der Komfort im Fahrzeug ein mitentscheidendes Argument für die Profilierung im Wettbewerb der Fahrzeughersteller [1]. Hierbei spielt für den Gesamtkomfort in einem Fahrzeug neben dem Fahrkomfort, sprich der Wahrnehmung der Insassen von mechanischen und akustischen Schwingungen in verschiedenen Fahrsituationen [2], der thermische Komfort eine wichtige Rolle. Die Begriffe „thermischer Komfort“ oder auch „thermische Behaglichkeit“ bezeichnen ein Qualitätsmerkmal oder Bewertungskriterium, das die Zufriedenheit mit der thermischen Umgebung repräsentiert. Bei der Auslegung der Klimatisierung im PKW ist es das Ziel thermische Bedingungen zu schaffen, die von möglichst allen Passagieren als behaglich wahrgenommen werden. Zusätzlich hat der thermische Komfort im Fahrzeug auch einen signifikanten Einfluss auf die Verkehrssicherheit [3].

In den letzten Jahren ist ein deutlicher Anstieg in Bezug auf wissenschaftliche Untersuchungen zum Themenkomplex „komfortable und energieeffiziente Fahrzeugklimatisierung“ zu beobachten. Die Ursache für das gesteigerte Interesse ist der vermehrte Einsatz von Elektromobilität und die Weiterentwicklung des autonomen Fahrens. Für elektrisch betriebene PKWs ist eine effiziente Klimatisierung besonders wichtig [4], da diese die Reichweite des Fahrzeugs direkt [5, 6] beeinflusst. Auch beim autonomen Fahren ergeben sich in Zukunft ganz neue Anforderungen an die Fahrzeugklimatisierung und deren Integration. Aufgrund der zu erwartenden, völlig neu strukturierten Fahrzeuginnenräume werden Belüftungskonzepte benötigt, die den neuen Anforderungen an Design und Komfortempfinden gerecht werden [7, 8].

In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, wie man den thermischen Komfort in einem Fahrzeug vergleichbar und normiert bewerten kann. Hierzu gibt es eine Vielzahl von Methoden und Normen zur Charakterisierung und Bewertung des thermischen Komforts in PKWs. Aktuell sind die am häufigsten verwendeten Normen: EN ISO14505 [9], DIN1946-3 [10] und EN ISO7730 [11]. All diese Normen basieren größtenteils auf den Arbeiten von Fanger [12], Fiala [13], Nilsson [14] und Zhang [15]. (Der folgende Abschnitt 1.2 enthält eine detaillierte und umfassende Übersicht der Normen). Jedoch haben diese Normen ihren Ursprung in der Bewertung des thermischen Komforts bei der Gebäudeklimatisierung. Für den thermischen Komfort in PKWs gibt es in der Regel jedoch deutliche Unterschiede im Vergleich zur Gebäudeklimatisierung [16]. Diese unterschiedlichen Anforderungen werden unter Umständen nicht hinreichend in den bekannten Normen und Bewertungsmethoden berücksichtigt [17]. Im Gegensatz zum Aufenthalt im Gebäude sitzt der Mensch im PKW unter Bedingungen, die unter anderem die Bewegungsmöglichkeiten einschränken. Das be-

deutet, dass der Passagier mit einem großen Anteil seiner Körperrückseite eine Kontaktfläche zu einer relativ luftundurchlässigen Sitzoberfläche bildet. Darüber hinaus ist die Körpervorderseite der Luftströmung und der Strahlungswärme ausgesetzt. Es ergeben sich somit für einzelne Körperregionen unterschiedliche Wärmetransportmechanismen. Für den Bereich der Kontaktfläche ist der vorherrschende Mechanismus die Wärmeleitung, während für den Rest des Körpers der Wärmetransport durch erzwungene Konvektion und Strahlung bestimmt ist. Es hat sich gezeigt, dass die Anwendung der bestehenden Normen für die Bewertung des thermischen Komforts in einem PKW, aufgrund der zuvor beschriebenen Situation, nicht unproblematisch ist [18, 19]. Der Grund dafür ist, dass die Behaglichkeitsbewertung für den thermischen Komfort an den Kontaktflächen und an der freien Oberfläche bei bestimmten Bedingungen durch die bestehenden Normen nicht hinreichend abgebildet ist. Insbesondere hohe Luftmassenströme bei großer Geschwindigkeit werden im Fahrzeug häufig noch als angenehm empfunden, während sie in anderen Umgebungen bereits als unangenehm empfunden werden und nach Definition der Normen auch als unkomfortabel bewertet werden. Der thermische Komfort an den Kontaktstellen zwischen Passagier und Fahrzeugsitz war bereits Thema der von der Forschungsvereinigung Automobiltechnik (FAT) geförderten Studie „ Rechnerische und probandengestützte Untersuchung des Einflusses der Kontaktwärmeübertragung in Fahrzeugsitzen auf die thermische Behaglichkeit “[20]. Hierbei wurde – in Anlehnung an EN ISO14505 [9] – eine Äquivalenttemperatur für Kontaktflächen definiert und das Komfortempfinden als Funktion dieser Kontaktflächenäquivalenttemperatur untersucht und charakterisiert.

Im nächsten Schritt wurde in der hier vorliegenden Studie das Komfortempfinden an den freien Körperoberflächen hinsichtlich der Zugluft und des Strahlungseinflusses untersucht. Hierzu wurden Untersuchungen durchgeführt, um den Grenzbereich des Luftzugempfindens zu identifizieren sowie dessen Einfluss auf den thermischen Komfort zu verifizieren und zu charakterisieren. Basierend auf der Beobachtung, dass das Luftzugempfinden und dessen Auswirkungen auf den thermischen Komfort sowie auf die Bewertung der Behaglichkeit in einem PKW durch die aktuell bestehenden Normen nicht vollständig abgebildet werden, ist das Ziel dieses Forschungsvorhabens die Untersuchung der Auswirkung von Zugluft auf den thermischen Komfort in Abhängigkeit der folgenden Einfluss- und Störgrößen: Lufttemperatur, Strahlung, Luftmassenstrom, Luftgeschwindigkeit und Turbulenzgrad. Hierzu sollen die objektiven und subjektiven Komfortgrößen bestimmt und basierend auf der Methode der Äquivalenttemperatur nach EN ISO14505-2 bewertet werden. Primäres Ziel ist die Identifikation und Verifizierung des Grenzbereiches für die thermische Behaglichkeit bei Zugluft in Abhängigkeit der zuvor aufgelisteten physikalischen Parameter. Die Ergebnisse der Untersuchung werden dann mit den aktuellen Normen verglichen und es wird geprüft inwieweit eine Anpassung bestehender Normen unter Berücksichtigung des Luftzugempfindens möglich und sinnvoll ist.

1.2 Zugluft und Thermischer Komfort

Erste Arbeiten zur Thermophysiologie gehen zurück auf den italienischen Mediziner Santorio Santorio (1561-1636). Santorio führte erstmals systematische Studien

zum menschlichen Stoffwechsel durch [21]. Er postulierte das „perspiratio insensibilis “, das einen wesentlichen Mechanismus des Wärmeaustausches zwischen Mensch und Umwelt beschreibt. Ende des 18. Jahrhunderts charakterisieren dann Antoine-Laurent de Lavoisier (1743-1794) und Pierre-Simon, Marquis de Laplace (1749-1827) den Zusammenhang zwischen Verbrennung und Atmung [22]. Hierzu entwickelten sie ein Eiskalorimeter zur Messung der Wärmemenge, die bei der Atmung freigesetzt wird, und konnten so nachweisen, dass die Atmung ein langsamer Verbrennungsprozess ist. Weitere Arbeiten von Claude Bernard (1813-1978) [23] legten dann die Grundlage, den menschlichen Körper als Wärmekraftmaschine zu beschreiben, die Energie erzeugt, indem sie Nahrung verbrennt und die überschüssige Wärme an die Umgebung abgibt. Hierbei versucht der menschliche Metabolismus die Körperkerntemperatur bei möglichst konstanten 36,6^o C zu halten. Kommt es nun aufgrund von äußeren Einflussgrößen oder einer Änderung der Umgebungstemperatur zu Schwankungen der Körpertemperatur, so steuert der menschliche Körper dagegen. Hierbei wird eine subjektive thermische Unbehaglichkeit durch sogenannte thermische Sensoren oder Rezeptoren detektiert [24]. Die Regulierung der Temperatur erfolgt dann zum Beispiel durch unterschiedlich starke Durchblutung, Schwitzen oder Muskelkontraktionen. Die thermische Behaglichkeit gibt an, wie viel Eigenleistung notwendig ist, um die Temperatur des Körperkerns bei ungefähr 36,6^o C zu halten. Die wichtigsten Faktoren, die den thermischen Komfort beeinflussen, sind diejenigen, die die Wärmeabgabe und den Wärmeeintrag bestimmen: die Stoffwechselrate, die Isolierung der Kleidung, die Lufttemperatur, die mittlere Strahlungstemperatur, die Luftgeschwindigkeit und die relative Luftfeuchtigkeit. Auch psychologische Parameter, wie die individuellen Erwartungen, beeinflussen die thermische Behaglichkeit [25]. Diese Vielzahl von objektiven sowie subjektiven Parametern, die den thermischen Komfort bestimmen, macht eine standardisierte und vergleichbare Bewertung der Behaglichkeit bei unterschiedlichen thermischen Randbedingungen äußerst schwierig. Ziel dieser Studie ist die Charakterisierung des thermischen Komforts im PKW für den Grenzbereich des Zugluftempfindens. In diesem Zusammenhang definieren wir die physikalischen Kenngrößen, die die Thermophysiologie und Umgebungsbedingungen charakterisieren, sowie eine Bewertungsrichtlinie, die eine unabhängige und vergleichbare Bewertung der thermischen Behaglichkeit ermöglicht. Der folgende Abschnitt enthält eine Übersicht, welche Methoden, Normen und wissenschaftlichen Standards es zur Bewertung des thermischen Komforts gibt und inwieweit diese bei der Bewertung von Zugluftempfinden in einem PKW Anwendung finden können. Beginnen werden wir mit einer allgemeinen Historie der wichtigsten Normen und Bewertungsmethoden 1.2.1. Darauf aufbauend werden im Abschnitt 1.2.2 die bestehenden Normen zur Bewertung des thermischen Komforts in Fahrzeugen hinsichtlich der Anwendbarkeit im PKW im Allgemeinen und bei turbulenten Luftströmungen mit einer Geschwindigkeiten $U > 0.2$ m/s im Speziellen diskutiert.

1.2.1 Thermischer Komfort: Methoden, Normen und Standards

Die ersten Standards zur Bewertung der thermischen Umgebungsbedingungen haben ihren Ursprung im Arbeitsschutz in den 1960er-Jahren. In den nationalen Standards ASHRAE 55 (1966, Ausgabe 1) [26] und ACGIH (1962) [27] wurden erstmals verbindliche Grenzwerte für industrielle Arbeitsplätze festgelegt [28]. Ziel dieser Stan-

dards ist es, die Sicherheit sowie die Gesundheit von Menschen an industriellen Arbeitsplätzen sicherzustellen. Die Normen beruhen in großen Teilen auf den Studien zum thermischen Komfort von Adolph Pharo Gagge (1908-1993), einem US-amerikanischen Biophysiker, der sich schon in den 1930er-Jahren mit der Physiologie des menschlichen Körpers unter Einfluss von Kälte und Wärme beschäftigte. So veröffentlichte er 1937 eine Arbeit, die die physikalischen Prozesse beschreibt, die an der Regulierung der Körpertemperatur durch empfindliches Schwitzen beteiligt sind, und die grundlegenden Zusammenhänge zwischen diesem Schwitzen und dem Stoffwechsel, der Verdunstung, der Hauttemperatur, der Trockentemperatur und der relativen Feuchtigkeit [29] erklärt. Vier Jahre später im Jahr 1941 führt er dann ein von SI-Einheiten abweichendes System von Einheiten zur Beschreibung des Wärmeaustausches eines Menschen mit seiner Umgebung sowie zur Charakterisierung der thermischen Behaglichkeit ein [30]. Seine Arbeiten in den folgenden Jahrzehnten zur Komfort- und Wärmeempfindung sowie damit verbundene physiologische Reaktionen [31, 32] sind vielfältig und haben die Normen zur Charakterisierung des thermischen Komforts bis heute maßgeblich beeinflusst.

Neben den Arbeiten von Gagge sind im gleichen Maße die Untersuchungen und theoretischen Überlegungen von Povl Ole Fanger (1934-2006) für den Forschungsbereich zum thermischen Komfort prägend. Seine Erkenntnisse bilden den Maßstab der modernen Raumlufttechnik und sein Buch „Thermal Comfort “von 1970 [12] ist bis heute ein Standardwerk für die Bewertung von Raumluftströmungen. Das von ihm entwickelte Modell Predicted Mean Vote (PMV) ist eins der ersten allgemeinen Modelle für die Bewertung des thermischen Komforts. Hierbei wird der thermische Komfort unter Verwendung von Wärmebilanzgleichungen und empirischen Studien über die Hauttemperatur berechnet. Das Modell berücksichtigt Lufttemperatur, mittlere Strahlungstemperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Luftgeschwindigkeit, Stoffwechselraten und Kleidungsisolierung. Die thermische Behaglichkeit wird auf einer Sieben-Punkte-Skala von kalt (-3) bis warm (+3) bewertet. Um zusätzlich auch Aussagen treffen zu können, welcher Prozentsatz an Menschen bei gegebenen Bedingungen unzufrieden ist, wurde das Modell um die Kategorie Predicted Percentage of Unsatisfied (PPD) erweitert. Heutzutage gilt dieses Modell in vielen Teilen als überholt, obwohl es bis heute in wichtigen Standards wie ANSI/ASHRAE-Standard 55 (2017) [33] oder EN ISO7730 [11] Anwendung findet. Gleiches gilt für den europäischen Standard EN ISO 7730 [34]. Er beruht im Wesentlichen auf den Arbeiten von Fanger. Die Norm EN ISO 7730 gilt eigentlich nur für moderate thermische Umgebungen, verweist aber auch auf Normen bei extremen thermischen Bedingungen [35], [36] und [37]. Alle bisher genannten Normen haben ihren Ursprung in den 1960er- und 1970er-Jahren. Vergleicht man zwei Artikel, die mit einem Abstand von 20 Jahren erschienen sind,- [38] und [39] - lässt sich feststellen, dass sich an der Definition und Anwendung der auf Fangers Wärmebilanzansatz basierenden Modelle und der daraus resultierenden Bewertungsindizes nichts geändert hat. Ferner zeigen aktuelle Arbeiten, wie z.B. von Cheung et al. [40], dass das PMV und PPD eine geringe Vorhersagegenauigkeit liefern. Laut Cheung et al. zeigen Analysen auf Basis der weltgrößten Datenbank zum thermischen Komfort [41], dass PMV nur eine Genauigkeit von 34% hat, was bedeutet, dass nur in einem von drei Fällen korrekte Vorhersagen gemacht werden konnten. Hierbei variiert die Vorhersagegenauigkeit stark mit dem Lüftungskonzept und den Umgebungsbedingungen. In einem PKW - oder auch in Fahrzeugkabinen im All-

gemeinen - ergeben sich jedoch aufgrund der komplexen Wechselwirkung zwischen thermischer und erzwungener Konvektion sowie räumlich und zeitlich variierendem Wärmetransport durch Wärmeleitung und Strahlung deutlich unterschiedliche Randbedingungen im Vergleich zur Raumluftströmung. Daher werden bei der Bestimmung und Bewertung des thermischen Komforts in Fahrzeugen in der Regel weitere Normen angewendet. Die aktuell am häufigsten verwendete Norm ist die EN ISO14505 [9], die im folgenden Abschnitt detaillierter beschrieben wird.

1.2.2 Bewertung des thermischer Komforts im PKW bei Zugluft

Die von Fanger vorgeschlagene Modelle PMV und PPD zur Bewertung des thermischen Komforts werden nunmehr seit mehr als vierzig Jahren nahezu unverändert verwendet, da sie in einer Vielzahl von Anwendungen in der Lage sind, einen allgemeinen Komfortzustand vorherzusagen. Jedoch sei an dieser Stelle angemerkt, dass sich die meisten Arbeiten zur thermischen Behaglichkeit, die sich auf diese Modelle berufen, auf stationäre Zustände konzentrieren. So finden sie häufig Anwendung bei der Bewertung des thermischen Komforts in Innenräumen [42] und bilden aber auch die Grundlage für die wichtigsten Normen zur Bewertung des thermischen Komforts in allen Arten von geschlossenen Räumlichkeiten, in denen sich Menschen aufhalten. Obwohl die Norm ursprünglich für homogene Bedingungen entworfen wurde, wird sie in großen Teilen auf die Fahrzeugkabine angewandt und bildet die Grundlage für die häufig verwendete Norm EN ISO14505 [9] zur Bewertung des thermischen Komforts in Fahrzeugen. Im PKW jedoch unterliegen die thermischen Bedingungen erheblichen Schwankungen wie zum Beispiel: schnelle Änderungen der Lufttemperatur T_{L}, wechselnde Sonneneinstrahlung und Luftbewegungen mit hohem Impuls und hoher Dynamik [43]. Dies führt zu Problemen bei der Bewertung und Vorhersage der thermischen Umgebung in Fahrzeugen. Schließlich wird das Fahrzeugklima in der Kabine, wie schon zum Teil beschrieben, durch eine Vielzahl von Parametern beeinflusst, wie zum Beispiel: die unterschiedlichen Innenoberflächen- und Lufttemperaturen, die Verteilung der Luftgeschwindigkeit über die komplexen Geometrien des Innenraums, die relative Luftfeuchtigkeit, die Sonnenintensität und ihre Streuung über die verschiedenen Materialtypen und Oberflächen in der Kabine oder die Art der Kleidung. Eine allgemeine und umfassende Abhandlung hinsichtlich der Einschränkungen und Probleme, die sich hieraus für die Bewertung des thermischen Komforts in Fahrzeugen ergeben, findet man in Croitoru et al. [17]. Im Folgenden werden wir uns bei der Diskussion auf die besonderen Anforderungen bei der Bewertung des thermischen Komforts bei Zugluft, sprich Luftgeschwindigkeiten von mehr als 0.5 m/s, sowie auf den Einfluss von Strahlungswärme beschränken. Hierbei wird insbesondere die Norm EN ISO14505 hinsichtlich deren Anwendung bei Zugluft analysiert.

Zur Charakterisierung des Einflusses von Zugluft auf den thermischen Komfort haben Fanger und Pedersen [44] gezeigt, dass die Auswirkung der Luftgeschwindigkeitsschwankungen einen signifikanten Einfluss auf das Unbehaglichkeitsempfinden hat. Später stellten Fanger und Christensen [45] einen Zusammenhang zwischen der lokalen Turbulenzintensität der Raumluftströmung und dem thermischen Unbehaglichkeitsempfinden her, der "Draft Rate"(DR), die als

$$DR = (34 - T_{\mathsf{L}})\,(U_{\mathsf{L}} - 0.05)^{0.62}\,(0.37 \cdot I \cdot U_{\mathsf{L}} + 3.14) \tag{1.1}$$

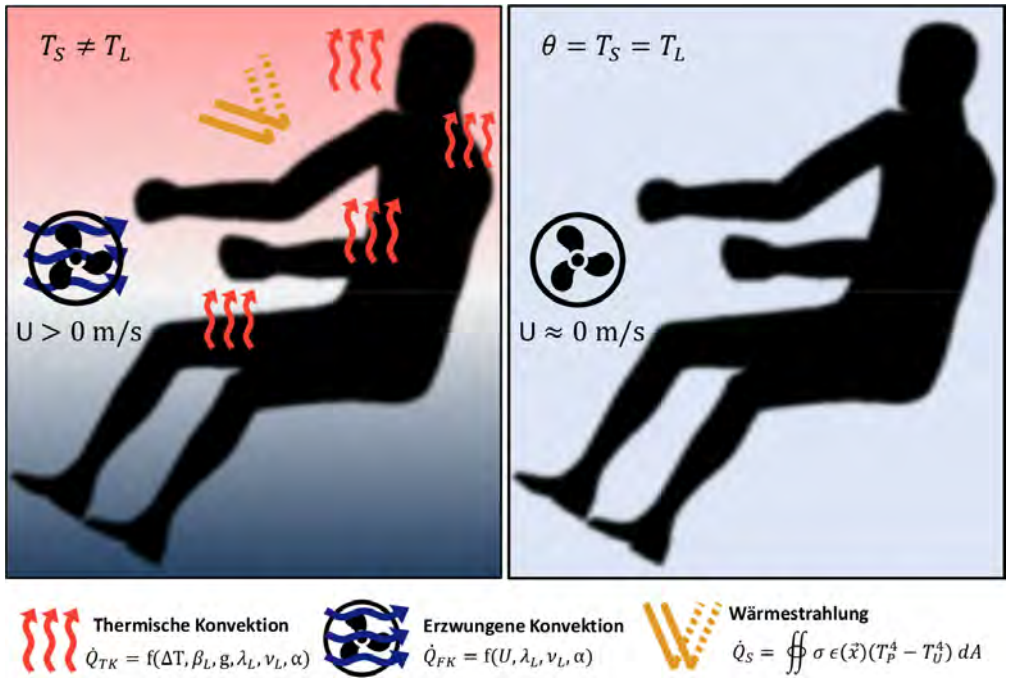


Abbildung 1.1: *Illustration der Definition von Äquivalenttemperatur Θ. Darstellung der einzelnen physikalischen Mechanismen, die den Wärmetransport und somit den thermischen Komfort in einem PKW bestimmen. Links: inhomogener Zustand und Luftgeschwindigkeiten $U > 0$. Rechts: homogener Zustand mit Luftgeschwindigkeit $U \approx 0$.*

definiert ist, wobei U_L die Luftgeschwindigkeit und I die Turbulenzintensität kennzeichnet. Die Draft Rate ist ein Index, der von der mittleren Geschwindigkeit, der Temperatur, aber auch vom Wert der Luftturbulenzintensität abhängt. Ferner wurde in den Studien die Auswirkung der Turbulenzintensität auf die Empfindung des Menschen untersucht. Die Ergebnisse wurden in ein Modell zur Bewertung des lokalen thermischen Komforts umgesetzt, um – unter anderem – Problemzonen im Fall einer schlechten Luftverteilung aufzuzeigen. Außerdem zeigten Tanaka et al. [46], dass das Wärmeempfinden im PKW stark von der Hauttemperatur und deren Änderungsgeschwindigkeit abhängt. Hierbei spielen das Wärmeempfinden und die Hauttemperatur des Gesichts eine wichtige Rolle. Da das Gesicht und der Hals besonders sensitiv reagieren, ist diese Körperregion zur Untersuchung des Komfortempfindens bei Zugluft von wesentlichem Interesse. Im Fall von Zugluft im PKW wird in der Regel Luft mit einer hohen Geschwindigkeit in Höhe des Armaturenbretts in das Fahrzeug eingebracht. Der Luftstrom trifft den Fahrer oder Beifahrer primär im Brustbereich und im Gesicht und somit in dem Bereich, in dem der Mensch hinsichtlich des thermischen Komforts besonders empfindlich ist.

Um nun den Einfluss des sich ändernden Wärmeübergangs an der Grenzfläche zwischen Mensch und Luft als Funktion der Strömungsgeschwindigkeit und des Turbulenzgrads zu berücksichtigen, wurde Anfang der 1990er die sogenannte Äquivalenttemperatur eingeführt. Diese Kenngröße fasst die komplexe Wechselwirkung des Wärmetransports durch Strahlung, erzwungener Konvektion und thermischer Konvek-

tion zu einem einzelnen Komfortmaß zusammen und ist in EN ISO14505 definiert als:

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

Zur Veranschaulichung ist die Definition der Äquivalenttemperatur Θ in Abbildung 1.1 dargestellt. Das linke Bild in Abbildung 1.1 zeigt exemplarisch die drei Wärmetransportmechanismen, die das Klima im Auto bestimmen. In einer Fahrzeugkabine gibt es mehrere Wärmequellen. Eine dieser Quellen sind die Passagiere. Die vom Passagier induzierte thermische Konvektion hat eine Auftriebsströmung zu Folge, die durch die roten Pfeile gekennzeichnet ist. Der Wärmetransport bei thermischer Konvektion $\dot{Q}_{\mathsf{TK}}$ wiederum hängt von einer Reihe von Parametern und Fluideigenschaften ab: der Temperaturdifferenz zwischen Luft und Oberflächen ΔT, der Gravitation g, dem thermischen Ausdehnungskoeffizienten β_{L}, der thermischen Leitfähigkeit λ_{L}, der Viskosität ν_{L} und dem Wärmeübergangskoeffizienten α. Zusätzlich zu den Auftriebskräften entsteht durch die Belüftung erzwungene Konvektion, dargestellt durch den Ventilator und die blauen Pfeile. Der Wärmetransport der erzwungenen Konvektion $\dot{Q}_{\mathsf{EK}}$ wiederum hängt zusätzlich von der Geschwindigkeit ab. In der Regel wird ein Großteil der Luft von der Klimaanlage im PKW auf Höhe des Armaturenbretts in die Kabine eingebracht. Es kommt somit zur Überlagerung der beiden Strömungszustände erzwungene und thermische Konvektion, die die Lufttemperatur in der Kabine determiniert. Hinzu kommt dann noch der Wärmetransport durch Strahlung; dieser ist in der Abbildung durch das gelbe Dreieck gekennzeichnet. Die Strahlung wiederum hängt vom Emissionsgrad ϵ der Oberflächen, der Boltzmann-Konstante σ und den Oberflächentemperaturen ab. All diese Komponenten werden dann in der Äquivalenttemperatur zusammengefasst und entsprechen, wie in Abbildung 1.1 dargestellt, einer homogenen Temperatur in der Umgebung einer Person; in der die Strahlungstemperatur T_{S} gleich der Lufttemperatur T_{L} und die Luftgeschwindigkeit $U = 0$ ist. Die Äquivalenttemperatur ist Teil des Standards EN ISO14505, der nun im Folgenden näher erläutert wird.

Die Norm EN ISO14505 [9] ist im Moment einer der wichtigsten Standards zur Bewertung des thermischen Komforts im PKW und besteht aus drei Teilen. Der erste Teil EN ISO14505-1 [47] enthält Richtlinien für die Bewertung der thermischen Beanspruchung innerhalb von Fahrzeugen bei heißen, kalten sowie gemäßigten thermischen Umgebungen. In den Richtlinien wird auf verschiedene Methoden verwiesen, wie sie in internationalen Normen festgelegt sind. Zusätzlich werden Einschränkungen und notwendige Anpassungen, die für den speziellen Fall der Fahrzeugklimabewertung erforderlich sind, spezifiziert. Im zweiten Teil EN ISO14505-2 [48] wird die bereits beschriebene Äquivalenttemperatur als integriertes physikalisches Maß zur Charakterisierung der thermischen Bedingungen im Fahrzeug definiert. Darüber hinaus enthält die Norm Vorschläge und Richtlinien zur Ermittlung der Äquivalenttemperatur. Abschließend werden im dritten Teil EN ISO14505-3 [49] Richtlinien und spezifizierte Standardprüfverfahren für die Bewertung des thermischen Komforts in Fahrzeugen unter Berücksichtigung von Probandentests eingeführt. Die Norm und die Bewertungskriterien beruhen in wesentlichen Teilen auf DR, PMV und PPD von

Fanger und haben ihren Ursprung in der Bewertung des thermischen Komforts bei stationären Bedingungen. Ferner sind die Verfahren dort sehr allgemein gefasst und nicht auf einen bestimmten Fahrzeugtyp beschränkt, was lediglich eine rudimentäre Beurteilung und Bewertung des thermischen Komforts ermöglicht.

An dieser Stelle ergibt sich die Frage, ob eine Norm, die ihren Ursprung in der Bewertung des thermischen Komforts bei homogenen Bedingungen hat, überhaupt geeignet ist, den thermischen Komfort bei instationären Bedingungen mit Luftgeschwindigkeiten $U > 0.5$ m/s zu bewerten. Hinzu kommt, dass man erstaunlicherweise so gut wie keine Arbeiten zum Thema Zugluft im PKW findet, wohingegen es eine Vielzahl von Untersuchungen und Richtlinien zur Zugluft in Gebäuden gibt, wie z.B. [50, 51]. Eine der wenigen aktuellen Arbeiten, die sich zumindest in Ansätzen mit dem thermischen Komfort bei Zugluft in einem PKW beschäftigt ist die Doktorarbeit von Zhang [52]. Eine der wenigen und daher auch häufig zitierten Normen zum Thema thermischer Komfort als Funktion der Luftgeschwindigkeit und des Turbulenzgrads in Fahrzeugen ist die DIN1946 Teil 3 [10]. In dieser Richtlinie werden Grenzen für den thermischen Komfort bei Zugluft für Personenkraftwagen und Lastkraftwagen definiert. Jedoch stammt die Norm aus dem Jahr 1962. Sie wurde zwar 2006 überarbeitet, jedoch ist sie in großen Teilen bis heute nahezu unverändert. Hinsichtlich des Zugluftempfindens bleibt die Norm jedoch auch sehr allgemein und liefert keine anwendbaren Bewertungskriterien.

> *„Im stationären Automatikbetrieb sollte das direkte starke Anblasen der Personen unterbleiben. Im instationären Betrieb kann dies jedoch kurzzeitig oder bei extremen klimatischen Bedingungen dauerhaft erwünscht sein. Hierzu zählt das Aufheizen der Füße mit warmer Luft im Winter und im Sommer das Anblasen des Oberkörpers zur Vermeidung von übermäßiger Schweißbildung nach dem Einsteigen in ein durch die Sonne aufgeheiztes Fahrzeug. Beim direkten Anblasen steigt mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit der Wärmeübergang am Körper. Das kann als Zugluft empfunden werden. Daher sollte die Luftverteilung in Richtung und der Luftstrom in Betrag variabel sein.“*

Bezüglich des thermischen Komforts als Funktion der Luftgeschwindigkeit und der Kabinentemperatur gibt die Norm aus dem Jahr 2006 zwar einen Zusammenhang an, jedoch ist hier keine Abhängigkeit als Funktion der Turbulenz angegeben, wie sie noch in der Version von 1962 abgebildet war. Allerdings hat der Turbulenzgrad, insbesondere bei höheren Luftgeschwindigkeiten, einen signifikanten Einfluss [53], da er direkt den thermischen Übergangskoeffizienten und somit den Wärmetransfer an der Körperoberfläche beeinflusst. Zusätzlich sei an dieser Stelle angemerkt, dass auch diese Norm auf die EN ISO7730 verweist, obwohl diese eigentlich nicht für instationäre Bedingungen geeignet ist. Außerdem möchten wir noch auf drei weitere Normen hinweisen, die sich mit dem thermischen Komfort als Funktion der Luftgeschwindigkeiten beschäftigen: DIN EN16798 Teil 3 [54] für die Lüftung von Nichtwohngebäuden und DIN EN14750-1 [55] / DIN EN13129 [56] zur Luftbehandlung in Schienenfahrzeugen. Diese Normen beziehen sich nicht direkt auf die Klimatisierung im PKW, jedoch können sie teilweise für die Bewertung des thermischen Komforts im PKW herangezogen werden. Bezüglich des Effekts „Zugluft“ ist insbesondere die DIN EN14750-1 von Interesse. In dieser Norm sind die Grenzen für Zugluft als Funktion der Temperatur für Luftgeschwindigkeiten bis zu $U = 4$ m/s angegeben.

2 Messmethoden und experimenteller Aufbau

2.1 Messmittel thermisches Manikin

In der hier durchgeführten Untersuchung wurden die objektiven Komfortparameter auf Basis des Konzeptes der Äquivalenttemperatur nach EN ISO14505 bestimmt. Als Messmittel haben wir hierzu ein am DLR in Göttingen entwickeltes thermisches Manikin (TM) eingesetzt [57]. Dieses Modell ist gut charakterisiert und findet Anwendung bei einer Vielzahl von Untersuchungen in unterschiedlichsten Konfigurationen [58, 59]. Das TM erfüllt in unserer Untersuchung drei Funktionen: Es bildet eine realitätsnahe Versperrung eines Menschen nach, es simuliert die sensible Wärmeabgabe eines Menschen und es dient als Messinstrument zur Bestimmung sowie Bewertung des thermischen Komforts. Im Folgenden wird die Messmethode, mit deren Hilfe wir die Äquivalenttemperatur und somit den thermischen Komfort bestimmen, vorgestellt. Ferner sei an dieser Stelle angemerkt, dass für die Messungen, in denen der Einfluss von Strahlungswärme untersucht wurde, zusätzlich das Messsystem Equivalent temperature system (Equites) von Comlogo [60] verwendet wurde.

Gemäß EN ISO14505 [48] wird das TM bei homogenen Umgebungsbedingungen kalibriert. Hierzu verwenden wir eine temperaturgeregelte geschlossenen Box (siehe Abbildung 2a)). Um in der Kalibrierumgebung homogene Temperaturbedingungen zu gewährleisten, werden die Seitenwände sowie der Boden und die Decke isotherm

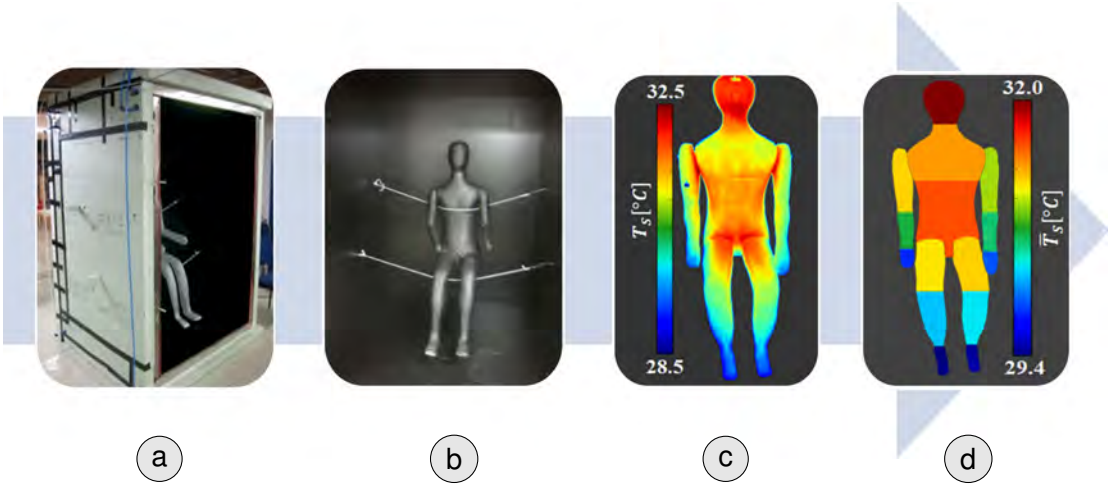
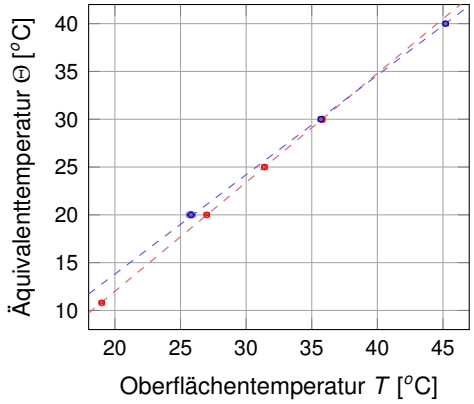


Abbildung 2.1: *Prozesskette zur Kalibrierung des TMs: (a) Kalibrierbox mit isothermen Seitenwänden, (b) TM kontaktlos platziert in der Kalibrierbox, (c) Oberflächentemperatur des TMs gemessen mit Hilfe von Infrarotthermografie und (d) räumlich gemittelter Oberflächentemperatur für die einzelnen Körperregionen.*



(a)

Körperteil [−]	$\dot{Q}_{\text{TM}} = 75$W m [-], b [°C]	$\dot{Q}_{\text{TM}} = 60$W m [-], b [°C]
Kopf	1.136(7), -11.5(4)	1.043(6), -7.7(4)
Brust	1.138(4), -10.8(3)	1.041(5), -7.0(4)
Bauch	1.131(4), -10.8(3)	1.035(5), -7.0(4)
Oberarm (l)	1.126(6), -10.2(3)	1.033(6), -6.6(4)
Oberarm (r)	1.128(9), -10.1(4)	1.034(5), -6.6(4)
Unterarm (l)	1.127(7), -8.6(3)	1.027(6), -5.9(4)
Unterarm (r)	1.120(4), -9.4(3)	1.028(4), -5.9(4)
Hand (l)	1.129(5), -8.7(3)	1.022(6), -5.0(4)
Hand (r)	1.118(9), -8.6(4)	1.027(3), -5.3(4)
Oberschenkel (l)	1.131(6), -10.3(3)	1.034(3), -6.5(4)
Oberschenkel (r)	1.134(4), -10.5(3)	1.035(4), -6.7(4)

(b)

Abbildung 2.2: *Zusammenhang zwischen Äquivalenttemperatur und Oberflächentemperatur für die in dieser Arbeit relevanten Körperregionen: (a) Äquivalenttemperatur als Funktion der Oberflächentemperatur für das Körperteil Brust bei einer Wärmeleistung von $\dot{Q}_{TM} = 60$ W (blau) und $\dot{Q}_{TM} = 75$ W (rot), (b) Tabelle mit den einzelnen Parametern für den linearen Zusammenhang, wobei m die Steigung und b die Ordinate kennzeichnet.*

beheizt oder gekühlt. Hierzu sind zur Überwachung der Oberflächentemperatur 25 PT100-Widerstandsthermometer installiert. Zusätzlich sind alle Wände isoliert. Abbildung 2.1(a) zeigt ein Foto des Aufbaus zur Kalibrierung des TMs. Im Kalibriervolumen ist das TM kontaktlos positioniert (siehe Abb. 2.1(b)). Um mit Hilfe des TMs die Äquivalenttemperatur ermitteln zu können, muss ein funktionaler Zusammenhang zwischen Oberflächentemperatur und Äquivalenttemperatur hergestellt werden. Hierzu wird das TM mit einer konstanten Wärmeleistung betrieben und die Oberflächentemperatur des TMs mittels Infrarotthermografie für verschiedene Umgebungstemperaturen gemessen. Zusätzlich wird die Oberflächentemperatur am Kopf mit Hilfe eines PT100-Sensors bestimmt, mit der die Temperaturen der Infrarotthermografie, wenn nötig, korrigiert werden. Man erhält somit, wie in Abbildung 2.1(3) dargestellt, eine Temperaturverteilung der Oberflächentemperatur des TMs als Funktion der Lufttemperatur. Basierend auf diesen Aufnahmen wird die räumlich gemittelte Oberflächentemperatur für die einzelnen Körperregionen berechnet (siehe Abb. 2.1(d)). In der vorliegenden Arbeit wird zwischen den folgenden 11 Körperregionen unterschieden: Kopf, Brust, Bauch, Oberarm (links/rechts), Unterarm (links/rechts), Hand (links/rechts) und Oberschenkel (links/rechts).

Basierend auf der mittleren Oberflächentemperatur der einzelnen Körperteile und der mittleren Wandtemperatur, die hier der Luft und somit der Äquivalenttemperatur entspricht, erhält man einen linearen Zusammenhang zwischen den beiden Temperaturen. Abbildung 2.2a zeigt die Abhängigkeit exemplarisch für die Brust bei einer Wärmeleistung von $\dot{Q}_{\text{TM}} = 60$ W (blau) und $\dot{Q}_{\text{TM}} = 75$ W (rot). Der lineare Zusammenhang zwischen Oberflächentemperatur und Äquivalenttemperatur ist dabei deutlich zu erkennen. Für beide Heizleistungen ergeben sich unterschiedliche Steigungen und Ordinaten. Die Parameter für die einzelnen Körperteile sind mit m für die Steigung und b für die Ordinate in Tabelle 2.2b aufgelistet. Mit Hilfe dieses einfachen Zusammenhangs kann aus der Oberflächentemperatur die dazugehörige Äquivalent-

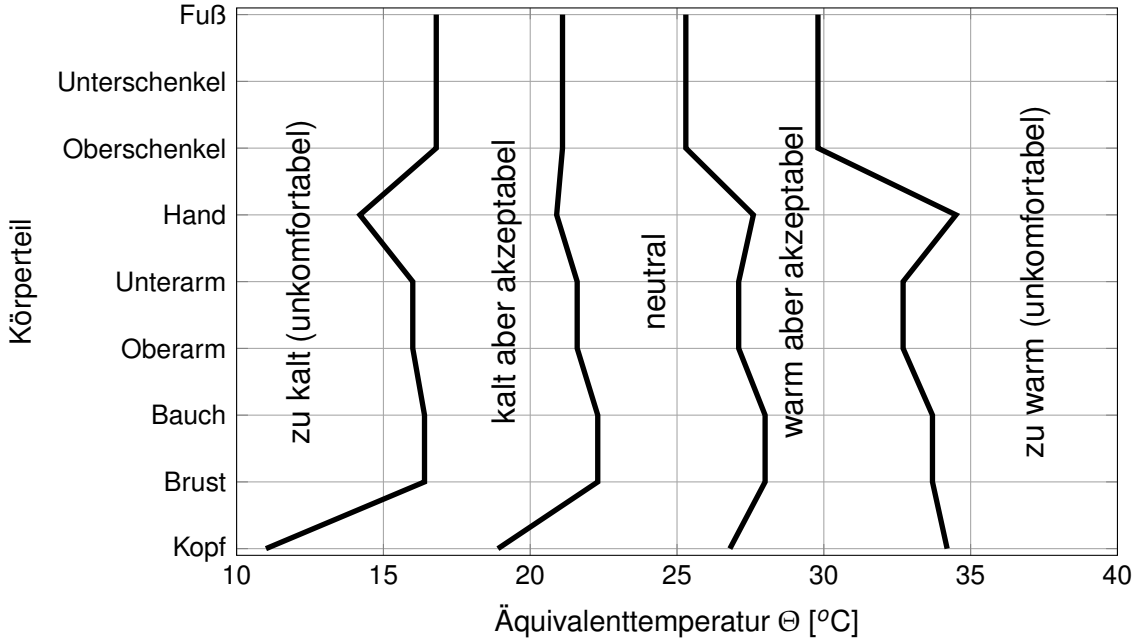


Abbildung 2.3: *Bewertung des thermischen Komforts für die einzelnen Körperregionen nach den Richtlinien der EN ISO14505 für das Klimaszenario Sommer.*

temperatur berechnet und anschließend der thermische Komfort bewertet werden. An dieser Stelle sei angemerkt, dass durch die thermisch induzierte Auftriebsströmung die Luftgeschwindigkeit an der Brust und am Kopf mit bis zu $U = 0.175$ m/s höher ist als die in der Norm vorgeschriebene maximale Geschwindigkeit von $U = 0.1$ m/s. Aus diesem Grund wird eine Korrektur der Oberflächentemperatur mit

$$\tilde{T}_{\mathsf{O}}^{k} = \frac{\alpha(U)}{\alpha_{\mathsf{Ref}}}(T_{\mathsf{O}}^{k} - T_{\mathsf{L}}) + T_{\mathsf{L}}, \tag{2.1}$$

berechnet, wobei hier α_{U} den abgeschätzten Wärmeübergangskoeffizienten als Funktion der Luftgeschwindigkeit U kennzeichnet, α_{Ref} den Wärmeübergangskoeffizienten für $U = 0.1$ m/s und T_{O}^{k} die mittlere Oberflächentemperatur der entsprechenden Körperregion k. Die Wärmeübergangskoeffizienten wurden hierbei auf Basis einer Kennzahlenrelation nach [61] berechnet.

Die Bewertung des thermischen Komforts anhand der Äquivalenttemperatur erfolgt ebenso wie die Bestimmung der Äquivalenttemperatur nach den Vorgaben der EN ISO14505. Die Norm unterscheidet fünf verschiedene Komfortzustände: zu kalt (unkomfortabel), kalt aber akzeptabel, neutral, warm aber akzeptabel und zu warm (unkomfortabel). Außerdem wird hier zwischen einem Sommer- und einem Winterszenario unterschieden. Da in dieser Studie der Einfluss von Zugluft bei sommerlichen Temperaturen untersucht wird, wird der thermische Komfort natürlich auf Basis des Sommerszenarios bewertet. Abbildung 2.3 zeigt den Zusammenhang zwischen Äquivalenttemperatur und thermischem Komfort für die einzelnen Körperteile. Mit diesem Messverfahren sind wir in der Lage den objektiven thermischen Komfort mit Hilfe des TMs zu charakterisieren und gleichzeitig eine realistische Wärmeabgabe eines Menschen zu simulieren.

2.2 Einzelpersonenkabine

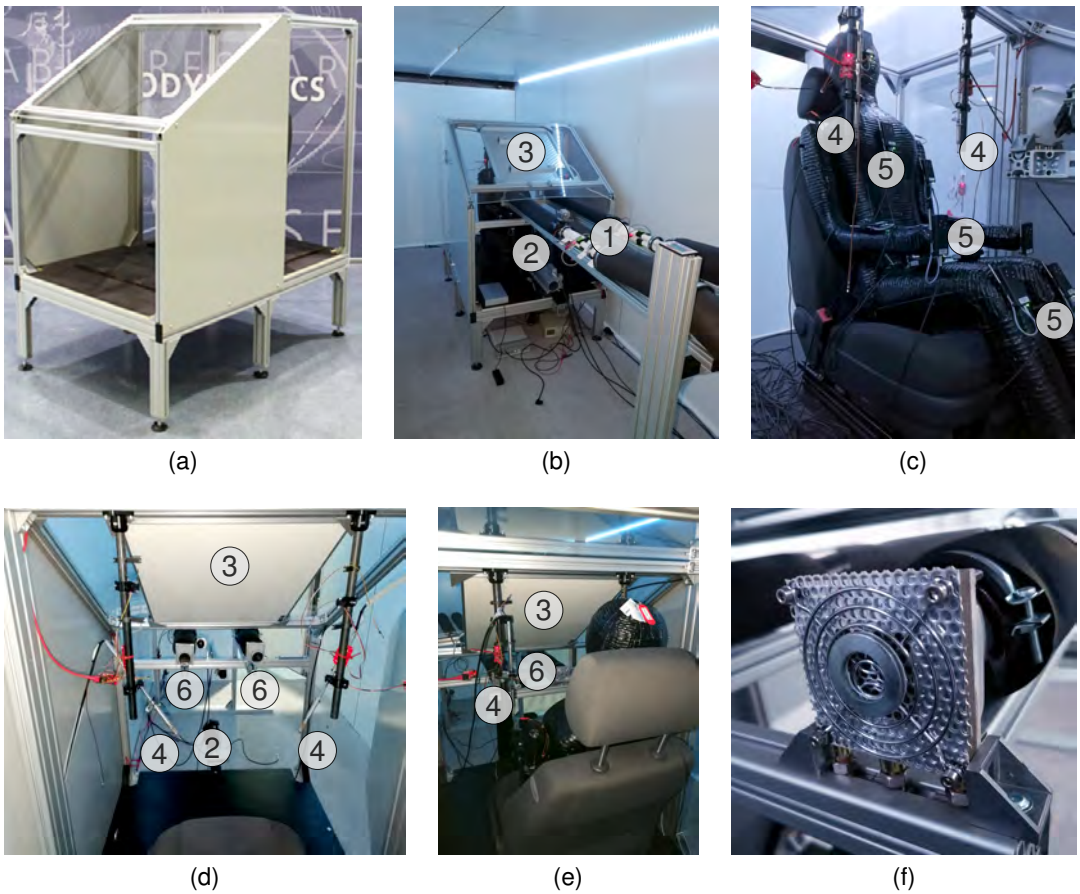


Abbildung 2.4: *Testumgebung Einzelpersonenkabine: (a) Geometrie Einzelpersonenkabine, (b) Gesamtübersicht Aufbau, (c) Innenansicht mit TM und ComLogo Komfortsensoren, (d) Blick von hinten in den Innenraum ohne TM, (e) Blick von hinten in den Innenraum mit TM und (f) Lufteinlass. Die Zahlen kennzeichnen die einzelnen Komponenten: (1) Zuluftstrang mit Volumenstrom-, Feuchte- sowie Temperatursensoren (2) Infrarotkamera, (3) Infrarotpanel, (4) Geschwindigkeitssonden, (5) ComLogo Komfortsensoren und (6) Lufteinlässe.*

Die Untersuchungen des objektiven sowie des subjektiven Komfortempfindens wurden in einer sogenannten Einzelpersonenkabine (EPK) durchgeführt. Abbildung 2.4 zeigt die Kabine mit den dazugehörigen Komponenten. Das Grundgerüst der Kabine ist in (2.4a) dargestellt. Die EPK hat eine fahrzeugähnliche Geometrie mit geschlossenem Boden, Decke und Seitenwänden sowie einer transparenten Windschutzscheibe. Die Abmessungen sind: Breite $B = 1000$ mm, Höhe $H = 1200$ mm und Länge $L = 1500$ mm. In der EPK befindet sich ein Autositz auf dem ein TM platziert ist (siehe Abb. 2.4c und 2.4e). Wie bereits im vorherigen Abschnitt erwähnt, wird die Äquivalenttemperatur mit Hilfe von Infrarotthermografie bestimmt. Hierzu befindet sich eine Infrarotkamera (VarioCam HR von InfraTec) an Position 2 (siehe Abb. 2.4b und 2.4d).

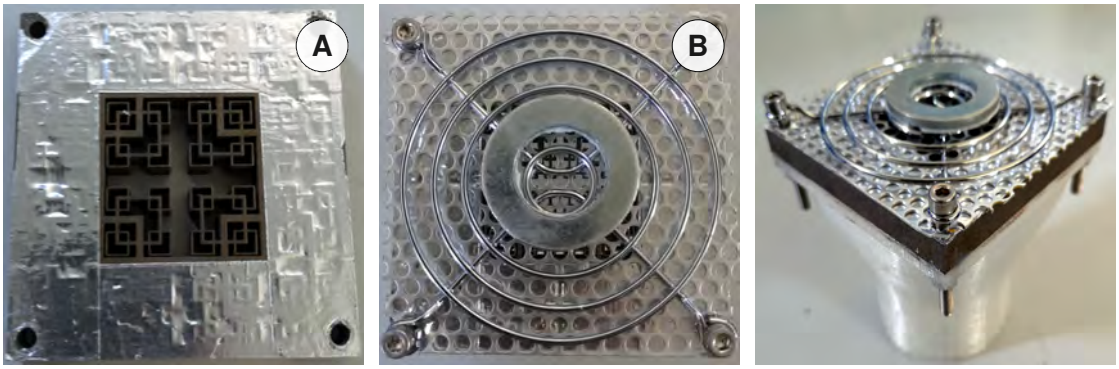
Die EPK ist mit zwei Luftausströmern ausgerüstet. Die Position der beiden Ausströmer ist in Abbildung 2.4d (Position 6) dargestellt. Zusätzlich zeigt das Foto 2.4f eine

Nahaufnahme eines Ausströmers. Die Ausströmer sind mit einem horizontalen Abstand von 0.5 m auf Höhe des Armaturenbretts positioniert und so ausgerichtet, dass das Zentrum der Luftstrahlen jeweils die linke und rechte Seite der Brust des TMs trifft. Der Abstand zwischen Brust und Auslass beträgt $0.7\ m$. In der hier vorgestellten Studie wurde der thermische Komfort bei Zugluft für zwei verschiedene Turbulenzgrade untersucht. Dabei kommen zwei verschiedene Typen von Ausströmern zum Einsatz. Details zu den Luftausströmern und der Erzeugung der unterschiedlichen Turbulenzgrade werden im folgenden Abschnitt 2.3 genauer erörtert. Zusätzlich befinden sich zwei omnidirektionale Hitzdrahtgeschwindigkeitssonden (Position 4) zur Erfassung der lokalen Geschwindigkeit und des Turbulenzgrads auf Brusthöhe des TMs.

Um reproduzierbare und definierte Ausströmbedingungen zu gewährleisten, ist jeder Ausströmer mit einem eigenen Zuluftsystem versehen. Hierzu wird über ein drehzahlgeregeltes Gebläse ein definierter Volumenstrom erzeugt. In der Folge wird die Luft mittels Wärmetauscher dann auf die benötigte Temperatur geregelt und dem thermisch isolierten Zuluftstrang zugeführt. Der Zuluftstrang besteht aus jeweils einem Rohr pro Ausströmer (siehe Foto 2.4b). Die Rohrlänge ist so ausgelegt, dass am Ende des Rohres eine möglichst voll ausgebildete Kanalströmung und somit definierte sowie reproduzierbare Strömungsbedingungen entstehen. Um definierte Bedingungen hinsichtlich Temperatur und Volumenstrom sicherzustellen, werden diese Größen innerhalb des Rohres überwacht (zusätzlich dienen diese Daten der Regelung von Gebläse und Wärmetauscher). Der Volumenstrom wird jeweils für die linke und rechte Seite mit Hilfe eines Messsystems bestehend aus den Massenflussmessern SFM3000 von Sensirion mit einer Genauigkeit 1.5% in Bezug auf den gemessen Massenstrom. Die Temperatur sowie die Luftfeuchte werden mit den Sensoren SHT35 -ebenfalls von Sensirion - mit einer Genauigkeit 1.5% bezüglich der relativen Feuchtigkeit rF und 0.1 K für die Temperatur, erfasst. Die Position der Messinstrumente ist in Abbildung 2.4b mit (1) gekennzeichnet.

Zusätzlich ist auf der Innenseite der Windschutzscheibe ein Infrarotpanel angebracht. Das Panel hat die Funktion, die Strahlungswärme der Sonne zu simulieren. Bei den Messungen mit Strahlung kann die Äquivalenttemperatur nicht mit Hilfe der Infrarotthermografie ermittelt werden. Aus diesem Grund wurde, wie bereits im Abschnitt zuvor erwähnt, für diese Messungen der thermische Komfort mit den Equites-Sensoren von Comlogo bestimmt. Abbildung 2.4c zeigt das TM ausgerüstet mit den Equites-Sensoren, wobei pro Körperregion ein Sensor installiert ist.

Alle Untersuchungen wurden in einer Klimakammer durchgeführt. Die Klimakammer ist mit einer bodenseitigen Niedrigimpulsverdrängungsbelüftung ausgestattet. Dieses Belüftungskonzept ermöglicht homogene Temperaturen bei gleichzeitig mittleren Luftgeschwindigkeiten kleiner 0.1 m/s. Zur Überwachung und Regelung der Lufttemperatur sind die Klimakammer sowie der Innenraum der EPK mit einer Vielzahl Temperatursensoren ausgestattet. Zusätzlich wird mit Feuchtesensoren überprüft, ob sich die relative Luftfeuchtigkeit im, für diese Studie definierten, Toleranzbereich von $rF = 50 \pm 10$ % bewegt.



(a) (b) (c)

Abbildung 2.5: *Luftausströmer: (a) Luftausströmer Typ A (niedriger Turbulenzgrad), (b) Luftausströmer Typ B (hoher Turbulenzgrad) und (c) Gesamtansicht des Luftauslasses.*

2.3 Luftausströmer

Wie schon im Abschnitt 2.2 erwähnt, wird der Einfluss der Zugluft auf die thermische Behaglichkeit für zwei unterschiedliche Turbulenzgrade untersucht. Hierzu werden durch unterschiedliche Blenden zwei Ausströmbedingungen erzeugt. Die Fotos in Abbildung 2.5 zeigen die beiden Blenden sowie eine Gesamtübersicht des Luftausströmers. Auf dem Foto 2.5c ist der generische Luftausströmer mit dem Adapter zum Rohr des Zuluftstranges (unten) und einer montierten Blende (oben) dargestellt. Zur Erzeugung des Strömungszustandes mit einem niedrigen Turbulenzgrad kommt der Luftausströmer Typ A (Abb. 2.5a) und für den Fall höherer Turbulenz der Luftausströmer Typ B (Abb. 2.5b) zum Einsatz.

Zur Zur systematischen Untersuchung des Einflusses der Zugluft auf die thermische Behaglichkeit wurden die beiden Konfigurationen hinsichtlich einer Referenzgeschwindigkeit U_{Ref} sowie der Turbulenz untersucht und charakterisiert. In der durchgeführten Studie ist die Referenzgeschwindigkeit als Maximalgeschwindigkeit des Luftstrahls an der Position, an der die Luft auf die linke sowie rechte Brust des TMs trifft, definiert. Um die Referenzgeschwindigkeit zu bestimmen, wird an den beiden Positionen, an denen sich in den Messungen die Brust des TMs befindet, jeweils eine Hitzdrahtgeschwindigkeitssonde positioniert und die zeitlich mittlere Geschwindigkeit U sowie der Turbulenzgrad

$$I_U = \frac{1}{U}\sqrt{\frac{1}{3}\left(\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2\right)} \tag{2.2}$$

bestimmt, wobei σ_u, σ_v und σ_w den Geschwindigkeitsfluktuationen für die drei Geschwindigkeitskomponenten entsprechen. Abbildung 2.6 zeigt die Referenzgeschwindigkeit als Funktion des Volumenstroms und den Turbulenzgrad als Funktion der mittleren Referenzgeschwindigkeit für die beiden Blenden Typ A und Typ B. Die Referenzgeschwindigkeit als Funktion des Volumenstroms für den linken (l) und rechten (r) Ausströmer ist in 2.6a dargestellt. Hier kennzeichnen die Kreise die Ergebnisse für die Blende Typ A und die Quadrate die Ergebnisse für die Blende Typ B. Die Abbildung zeigt, dass für beide Blenden an der linken und rechten Position der Zusammenhang

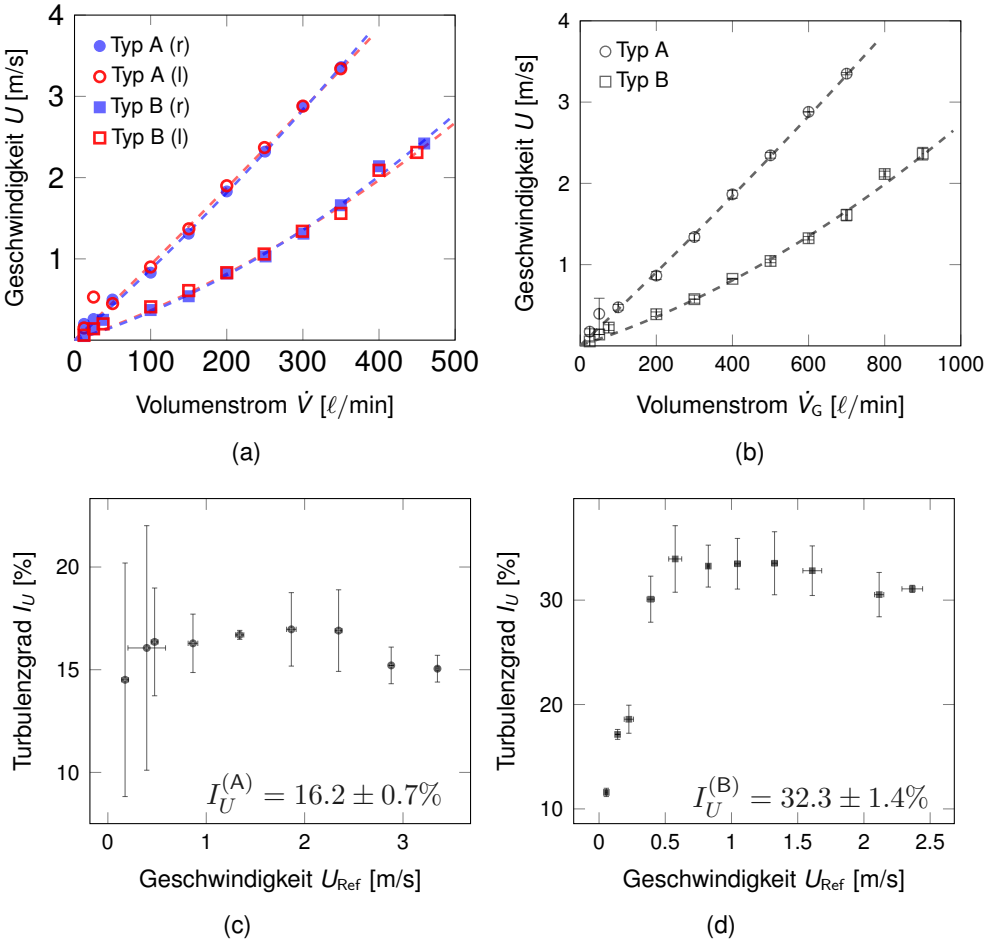


Abbildung 2.6: *Referenzgeschwindigkeit und Turbulenzgrad für die Blenden Typ A und Typ B: (a) Geschwindigkeit als Funktion des Volumenstroms für den rechten (r) und linken (l) Ausströmer, (b) mittlere Geschwindigkeit als Funktion des Gesamtvolumenstroms $\dot{V}_G$, (c) Turbulenzgrad als Funktion der Referenzgeschwindigkeit für Typ A und (d) Turbulenzgrad als Funktion der Referenzgeschwindigkeit für Typ B.*

zwischen Volumenstrom und Geschwindigkeit nahezu identisch ist und somit eine symmetrische Ausrichtung der Ausströmer gewährleistet ist. Die mittlere Geschwindigkeit $U_{\text{Ref}} = 0.5(U_r + U_l)$ als Funktion des Gesamtvolumenstroms $\dot{V}_{\text{G}} = \dot{V}_l + \dot{V}_r$ ist in 2.6b dargestellt. Die Fehlerbalken geben jeweils die Standardabweichung aus der Mittelung der beiden Sensorpositionen sowie die zeitlichen Fluktuationen an. Man erkennt für die Blende Typ A — mit einem geringeren Turbulenzgrad — einen nahezu linearen Zusammenhang zwischen Volumenstrom und Geschwindigkeit. Für die Blende Typ B, die im Vergleich zu Typ A einen höheren Turbulenzgrad aufweist, ergibt sich ein leicht hyperbolischer Zusammenhang. Zur Berechnung der Referenzgeschwindigkeit wurde die Abhängigkeit beider Größen auf Basis eines Polynoms zweiter Ordnung approximiert. Für die Blenden erhalten wir

$$\text{Typ A} : U_{\text{Ref}} = 5(2) \cdot 10^{-7}\,\dot{V}^2 + 4.4(1) \cdot 10^{-3}\,\dot{V} + 6(6) \cdot 10^{-3} \tag{2.3}$$

$$\text{Typ B} : U_{\text{Ref}} = 1.2(1) \cdot 10^{-6}\,\dot{V}^2 + 1.52(7) \cdot 10^{-3}\,\dot{V} + 6(6) \cdot 10^{-3}. \tag{2.4}$$

Charakterisierung der Ausströmer wurde zusätzlich der Turbulenzgrad für die beiden Blenden bestimmt. Die Abbildungen 2.6c und 2.6d zeigen den dazugehörigen mittleren Turbulenzgrad in Abhängigkeit der Referenzgeschwindigkeit. Auch hier kennzeichnen die Fehlerbalken die räumlichen sowie zeitlichen Fluktuationen. Für Typ A erhalten wir im Mittel für alle Geschwindigkeiten einen Turbulenzgrad von $I_U^{(\mathsf{A})} = 16.2 \pm 0.7\%$ und für Typ B $I_U^{(\mathsf{B})} = 32.3 \pm 1.4\%$. Zu Typ B sei noch angemerkt, dass zur Berechnung des mittleren Turbulenzgrads die drei niedrigsten Geschwindigkeiten nicht berücksichtigt wurden, da für Geschwindigkeiten $U_{\mathsf{Ref}} \leq 0.25$ m/s die Strömung trotz Blende noch laminar und der Turbulenzgrad hier primär von der Geschwindigkeit abhängig ist. Erst ab $U_{\mathsf{Ref}} \geq 0.5$ m/s ist der Turbulenzgrad von Geschwindigkeit nahezu unabhängig.

3 Objektiver thermischer Komfort

In dieser Studie zum Thema Zugluftempfinden wurden die objektiven Komfortparameter mit Hilfe der in Abschnitt 2.1 vorgestellten TMs sowie der subjektive Komfort auf Basis einer Probandenstudie untersucht. Das folgende Kapitel 3 beinhaltet die Darstellung und Analyse der Ergebnisse hinsichtlich des objektiven Komforts in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur und der Zulufttemperatur bei isothermen Randbedingungen 3.1 sowie bei einer konstanten Umgebungstemperatur von $T_{\mathsf{U}} = 29^o$ C und Variation der Zulufttemperatur T_{A}. Zusätzlich wird in Abschnitt 3.3 der Einfluss von Strahlungswärme auf den thermischen Komfort analysiert. Die Resultate für das subjektive Komfortempfinden sind im Kapitel 4 dargestellt.

3.1 Isotherme Randbedingungen

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Untersuchung hinsichtlich des objektiven thermischen Komforts bei verschiedenen Temperaturrandbedingungen präsentiert. Hierzu beginnen wir mit der Untersuchung bei isothermen Bedingungen. Isotherme Bedingungen bedeutet, dass die Umgebungstemperatur T_{U} der Luft gleich der Temperatur am Ausströmer T_{A} ist. Für alle hier untersuchten Temperaturniveaus von $T = 17^o$ C, $T = 20^o$ C, $T = 23^o$ C, $T = 26^o$ C und $T = 29^o$ C betrug die Heizleistung, sprich die simulierte Wärmeabgabe des TMs, $\dot{Q}_{\mathsf{TM}} = 75$ W. Die Referenzgeschwindigkeit wurde zwischen $0.1\,\mathrm{m/s} \leq U_{\mathsf{Ref}} \leq 2.5\,\mathrm{m/s}$ variiert. Beginnen werden wir die Ergebnisdarstellung für den Fall $T_{\mathsf{A}} = T_{\mathsf{U}} = 23^o$ C. Für diesen Fall werden die Ergebnisse detaillierter dargestellt, um exemplarisch die Vorgehensweise bei der Auswertung zu illustrieren. Im Anschluss daran werden die Resultate für den gesamten Temperaturbereich diskutiert.

Abbildung 3.1 zeigt die mit Hilfe der IR-Thermografie ermittelten Temperaturen T_{IR} an der TM-Oberfläche als Funktion der Referenzgeschwindigkeit $0.5\,\mathrm{m/s} \leq U_{\mathsf{Ref}} \leq 2.25\,\mathrm{m/s}$. Für diese Abbildung sowie für die folgenden zwei Abbildungen, 3.2 und 3.3, sind in der ersten und dritten Reihe die Ergebnisse für die Blende Typ A (niedriger Turbulenzgrad) und in der zweiten und vierten Reihe die Ergebnisse für die Blende Typ B (hoher Turbulenzgrad) aufgelistet. Die jeweiligen Geschwindigkeiten U_{Ref} für Typ A und für Typ B sind oberhalb des entsprechenden Bildes angegeben. Wie bereits im Abschnitt 2.3 beschrieben, sind die Luftausströmer so ausgerichtet, dass das Zentrum des Freistrahls jeweils die linke und rechte Brust des TMs trifft und die Referenzgeschwindigkeit U_{Ref} der Maximalgeschwindigkeit im Zentrum des Strahls entspricht. Als Resultat sind die höchsten Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich der Brust, der Oberarme und zu Teilen am Kopf zu beobachten. Somit ergibt sich für diese Körperteile ein erhöhter Wärmeübergangskoeffizient und somit auch ein höherer Wärmestrom. Der höhere Wärmestrom führt dann zu niedrigeren Oberflächentemperaturen in diesen Bereichen im Vergleich zu den anderen Körperregionen, die

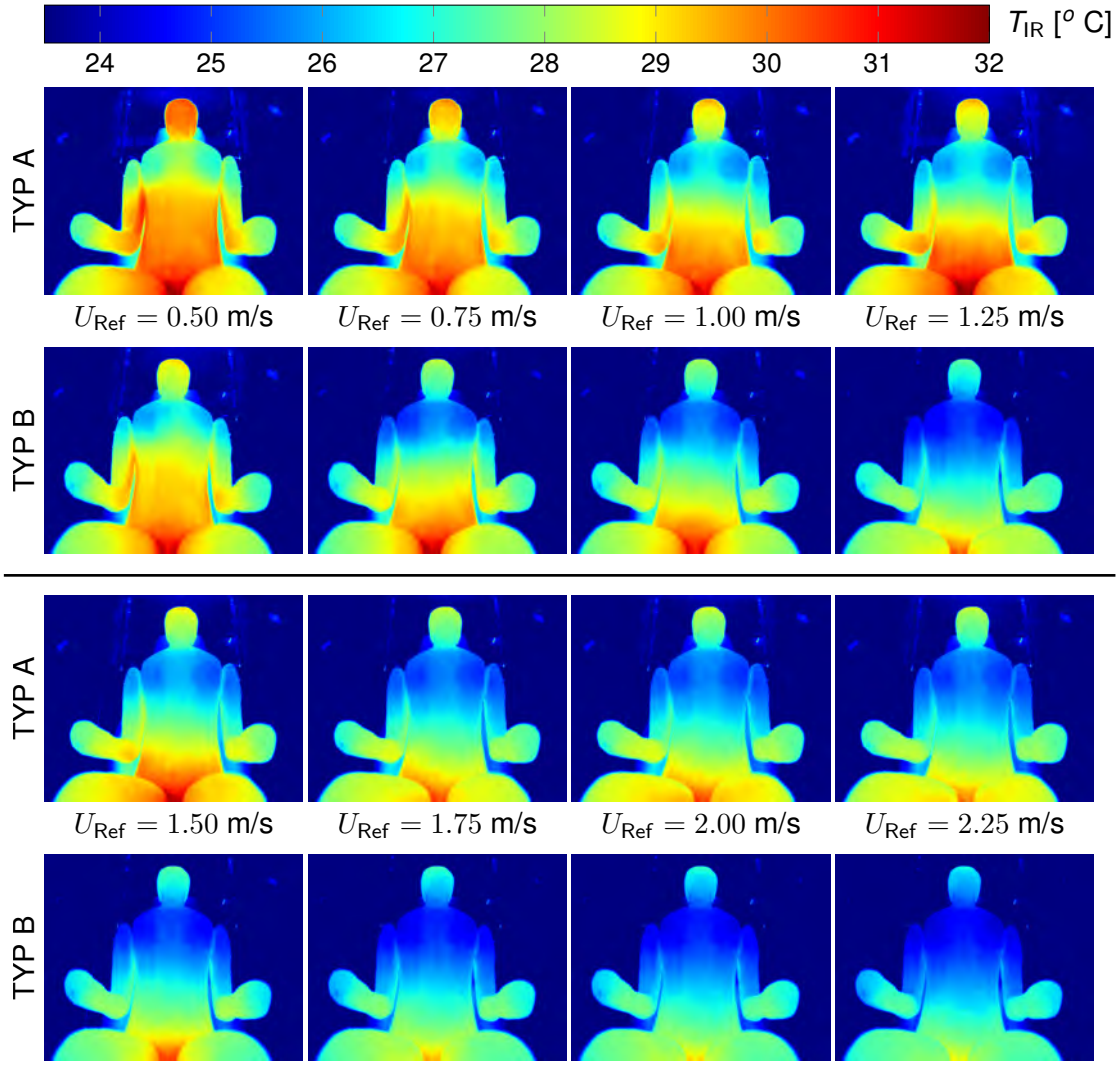


Abbildung 3.1: *Infrarotaufnahmen: Oberflächentemperatur T_O für die Referenzgeschwindigkeiten $0.5\,\mathrm{m/s} \leq U_{Ref} \leq 2.25\,\mathrm{m/s}$ und die beiden Blenden: Typ A (Reihe 1 und 3) und Typ B (Reihe 2 und 4).*

nicht direkt angeströmt werden. Dies lässt sich an den IR-Aufnahmen in Abbildung 3.1 deutlich erkennen. Ferner ist eine eindeutige Abhängigkeit der Temperaturverteilung von der Geschwindigkeit U_{Ref} zu erkennen. Mit steigender Referenzgeschwindigkeit ist zum einen durch den größeren Enthalpiestrom sowie zum anderen durch den erhöhten Wärmeübergangskoeffizienten ein Absinken der Temperaturen für alle Körperregionen zu beobachten. Hierbei ist die Temperaturabnahme im Bereich der Brust und der Oberarme am stärksten. Zusätzlich ist ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Blenden zu erkennen. Für den Fall mit dem größeren Turbulenzgrad ergeben sich signifikant geringere Temperaturen über die gesamte Oberfläche des TMs im Vergleich zur Blende mit der niedrigen Turbulenz. Die Ursache hierfür ist, dass bei einem höheren Turbulenzgrad auch der Wärmetransportkoeffizient an der TM-Oberfläche größer ist. Ein höherer Wärmetransportkoeffizient führt zu einem stärkeren Wärmetransport und dementsprechend deutlich niedrigeren Temperaturen

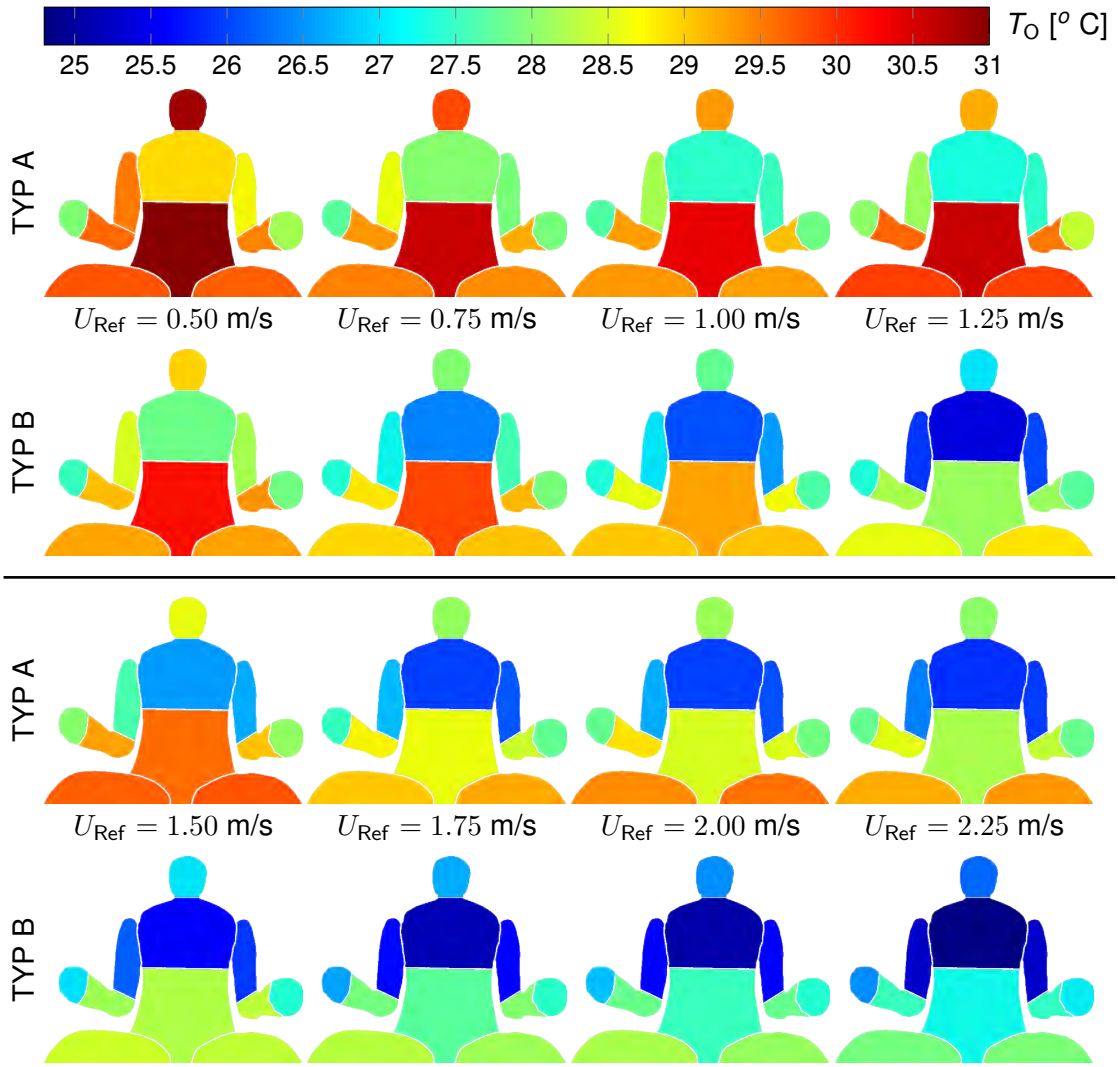


Abbildung 3.2: *Räumlich gemittelte Oberflächentemperatur T_O für die verschiedenen Körperregionen bei den Referenzgeschwindigkeiten $0.5\,\mathrm{m/s} \leq U_{Ref} \leq 2.25\,\mathrm{m/s}$ und die beiden Blenden: Typ A (Reihe 1 und 3) und Typ B (Reihe 2 und 4).*

im Vergleich zum Fall mit niedrigerem Turbulenzgrad. Darüber hinaus verursacht der höhere Turbulenzgrad eine Aufweitung des Luftstrahls, was dazu führt, dass auch die anderen Körperregionen, die nicht direkt angeströmt werden, sich stärker abkühlen.

Um nun auf Basis der IR-Aufnahmen die Äquivalenttemperatur zu bestimmen, wird die mittlere Oberflächentemperatur für die einzelnen Körperteile ermittelt. Die zonengemittelten Temperaturen für die jeweiligen Strömungsfälle sind, in gleicher Anordnung wie zuvor, in Abbildung 3.2 aufgelistet. Hier lassen sich die zuvor qualitativ beschriebenen Effekte deutlich erkennen. Man sieht, dass für Kopf, Brust und Oberarme die Temperaturänderung als Funktion der Referenzgeschwindigkeit am größten ist. Im Fall der Blende A ergibt sich eine Temperaturänderung $\Delta T = T_O(U_{Ref} = 0.5\mathrm{m/s}) - T_O(U_{Ref} = 2.5\mathrm{m/s})$ von $\Delta T = 3.0^o$C für die Brust, $\Delta T = 2.9^o$C für die Oberarme und $\Delta T = 2.7^o$C für den Kopf. Für die anderen Körperteile sind die Temperaturänderungen im Bereich von 0.5^o C $\leq \Delta T \leq 1.0^o$ C deutlich geringer. Ein vergleichbares Bild

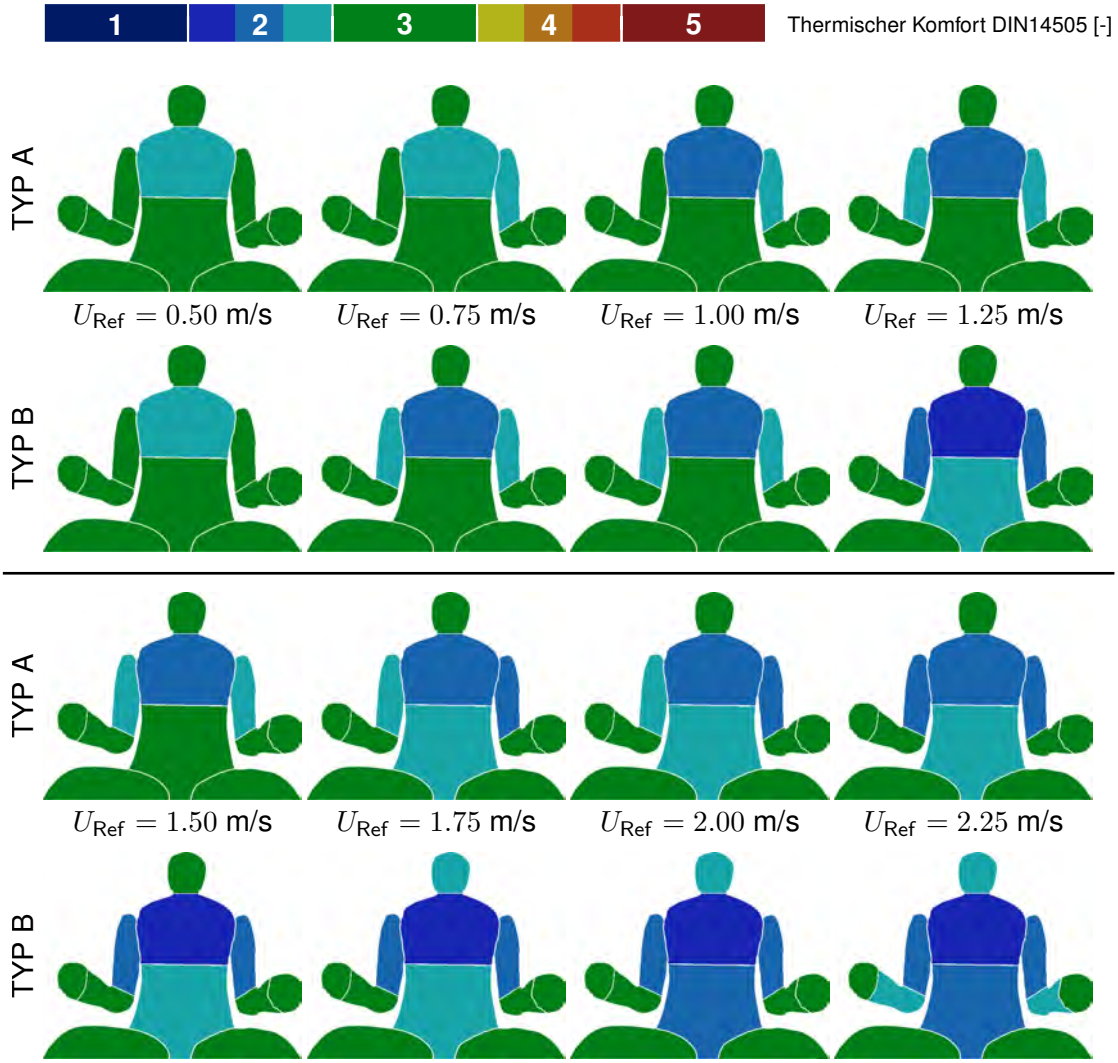


Abbildung 3.3: *Thermischer Komfort nach DIN14505 (Sommerszenario) für die verschiedenen Körperregionen bei den Referenzgeschwindigkeiten* $0.5\,\text{m/s} \leq U_{\text{Ref}} \leq 2.25\,\text{m/s}$ *und die beiden Blenden Typ A (niedriger Turbulenzgrad) und Typ B (hoher Turbulenzgrad).*

zeigt sich für Blende B. Hier ist die Temperaturänderung für die Brust $\Delta T = 2.8^o$C, für den Kopf $\Delta T = 2.6^o$C, für die Oberarme $\Delta T = 3.0^o$C und für die anderen Körperteile, mit Ausnahme der Unterarme, liegt die Änderung im Bereich 0.5^o C $\leq \Delta T \leq 1.0^o$ C. Im Fall der Unterarme beträgt die Temperaturänderung für Blende B $\Delta T = 1.7^o$C und ist somit deutlich größer im Vergleich zu Blende A mit $\Delta T = 1.0^o$C. Die Ursache hierfür ist die aus der höheren Turbulenz resultierende Strahlverbreiterung. Somit ist der Volumenstrom an Luft, der auf die Unterarme trifft, und dementsprechend auch der Wärmestrom, im Fall des höheren Turbulenzgrads signifikant größer als im Fall der niedrigeren Turbulenz. An dieser Stelle sei noch angemerkt, dass es für $T = 23^o$ C einen Unterschied in der mittleren Temperatur zwischen linkem und rechtem Oberarm gibt. Dadurch, dass die beiden Freistrahlen aus den Ausströmern zum einen oszillieren und zum anderen auch miteinander wechselwirken, kann es sein, dass die Strah-

len nicht immer exakt an der gleichen Stelle auf das TM auftreffen. In der Regel sind die Temperaturdifferenzen zwischen linkem und rechtem Arm kleiner 0.4 K, so dass diese Asymmetrie keine Auswirkung auf die Bewertung und Analyse des thermischen Komforts hat. Basierend auf der mittleren Temperatur der jeweiligen Körperzonen wird dann mit den in Tabelle 2.2 aufgelisteten Parametern die Äquivalenttemperatur berechnet und hinsichtlich des thermischen Komforts bewertet. Der thermische Komfort nach DIN14505 ist in Abbildung 3.3 dargestellt. Hier und im Folgenden bedeutet (1) zu kalt, (2) kalt aber akzeptabel, (3) neutral, (4) warm aber akzeptabel und (5) zu warm.

Für eine genauere Analyse des thermischen Komforts wird nun das Komfortempfinden als Funktion der Geschwindigkeit und Temperatur für die einzelnen Körperteile diskutiert. Hierzu ist in den Abbildungen 3.4, 3.5, 3.6 und 3.7 die Äquivalenttemperatur Θ als Funktion der Referenzgeschwindigkeit U_{Ref} dargestellt. Die Ergebnisse für Blende A sind mit einem Kreis und die für Blende B mit einem Dreieck gekennzeichnet. Die Fehlerbalken stellen den Gesamtfehler dar, der sich aus den Messfehlern sowie der Standardabweichung der mittleren Temperatur des Körperteils ergibt. Jede Spalte zeigt die Ergebnisse für ein Körperteil. Die Bezeichnung des Körperteils ist jeweils in jeder Spalte oben angeben. In jeder Zeile sind von oben nach unten die Ergebnisse bei isothermen Bedingungen für die Temperaturen 17^o C, 20^o C, 23^o C, 26^o C und 29^o C aufgelistet. Die dazugehörigen Temperaturen sind in jeder Abbildung in der oberen rechten Ecke zu finden. Zusätzlich sind die Komfortbereiche farbig hinterlegt und die dazugehörigen Grenzen sowie die Mitte des neutralen Komfortbereiches mit einer gestrichelten Linien gekennzeichnet.

Oberkörper

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse für den Bereich des Oberkörpers diskutiert, der direkt von dem Luftstrahl angeströmt wird. Zum Oberkörper gehören der Kopf, die Brust und die Oberarme. Abbildung 3.4 zeigt in der linken Spalte die Ergebnisse für den Kopf und in der rechten die für den Brustbereich sowie Abbildung 3.5 in der linken und rechten Spalten jeweils den linken und rechten Oberarm. Die Umgebungstemperaturen sind in der linken oberen Ecke jeder Abbildung angegeben und sind von oben nach unten von kalt zu warm angeordnet. Die Kreise kennzeichnen die Blende Typ A (niedrige Turbulenz) und die Dreiecke die Blende Typ B (hohe Turbulenz). Anhand der Abbildungen 3.4 und 3.5 werden die Ergebnisse hinsichtlich des thermischen Komforts als Funktion der Referenzgeschwindigkeit und Umgebungs- sowie Ausströmtemperatur diskutiert und analysiert.

Bei einer Temperatur von $T = 17^o$ C ist für beide Blenden bei steigender Geschwindigkeit ein kontinuierliches Absinken der Äquivalenttemperatur über den gesamten Geschwindigkeitsbereich zu beobachten, wobei die Änderungen mit zunehmender Geschwindigkeit immer kleiner werden. Im Fall der Blende Typ A steigt bei der niedrigen Geschwindigkeit die Äquivalenttemperatur erst leicht an, bevor sie kontinuierlich abfällt. Aufgrund der komplexen Wechselwirkung von der durch den TM induzierten thermischen Auftriebsströmung und der Zuluft sowie der Wechselwirkung der beiden Freistrahlen selbst ist die exakte Ursache für dieses Verhalten schwer zu benennen. Jedoch ist anzunehmen, dass für den Geschwindigkeitsbereich 0.25 m/s $\leq U_{\mathsf{Ref}} \leq$ 0.50 m/s die thermisch induzierten Auftriebskräfte und die Trägheitskräfte der Frei-

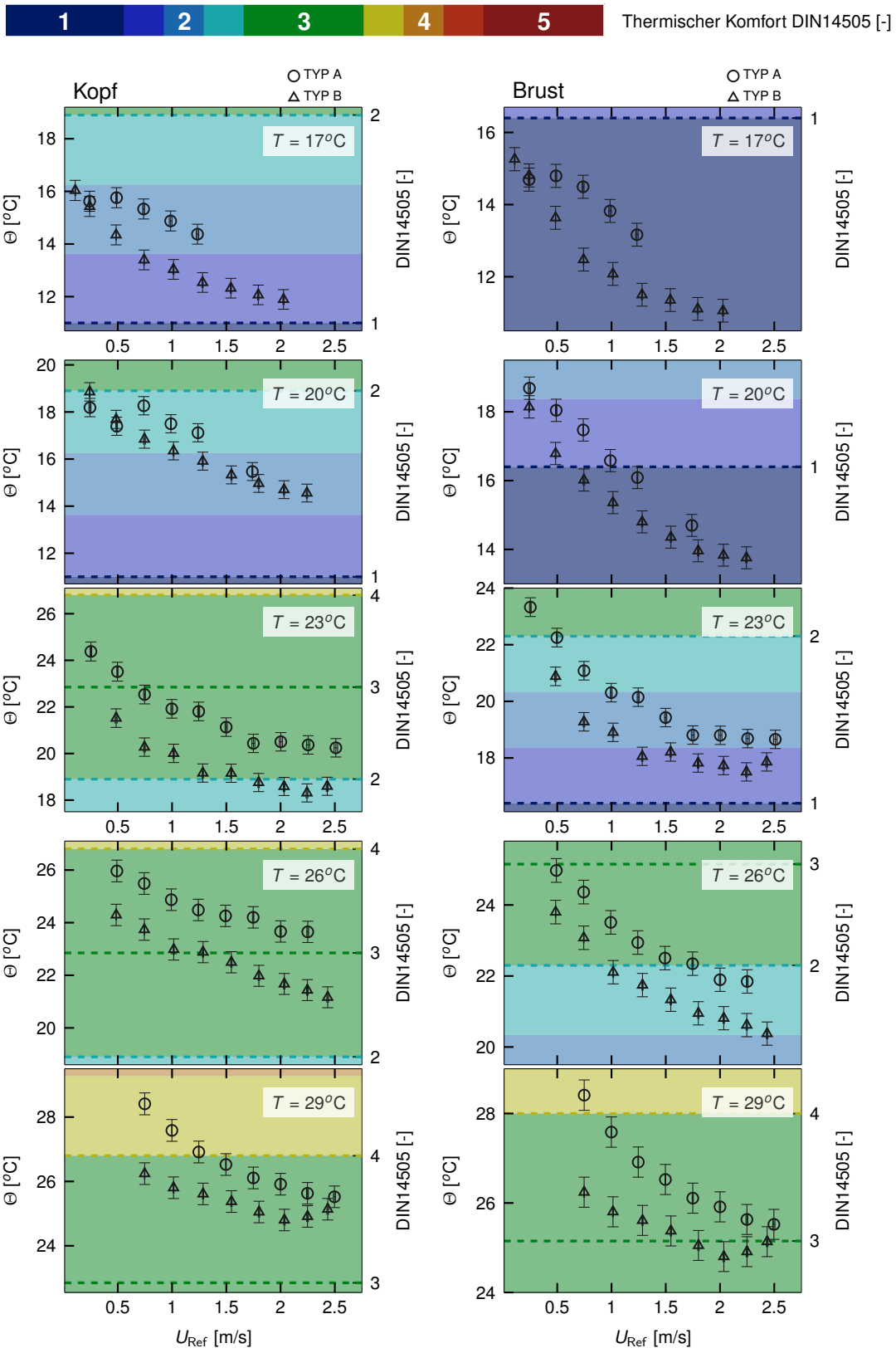


Abbildung 3.4: *Äquivalenttemperatur* Θ *als Funktion der Referenzgeschwindigkeit* U_{Ref} *für* 17^o *C* $\leq T_{\mathrm{A}} = T_{\mathrm{U}} \leq 29^o$ *C (Temperatur aufsteigend von oben nach unten), wobei (*$\circ$*) die Blende Typ A und (*$\triangle$*) die Blende Typ B kennzeichnet: Linke Spalte:Kopf, rechte Spalte: Brust.*

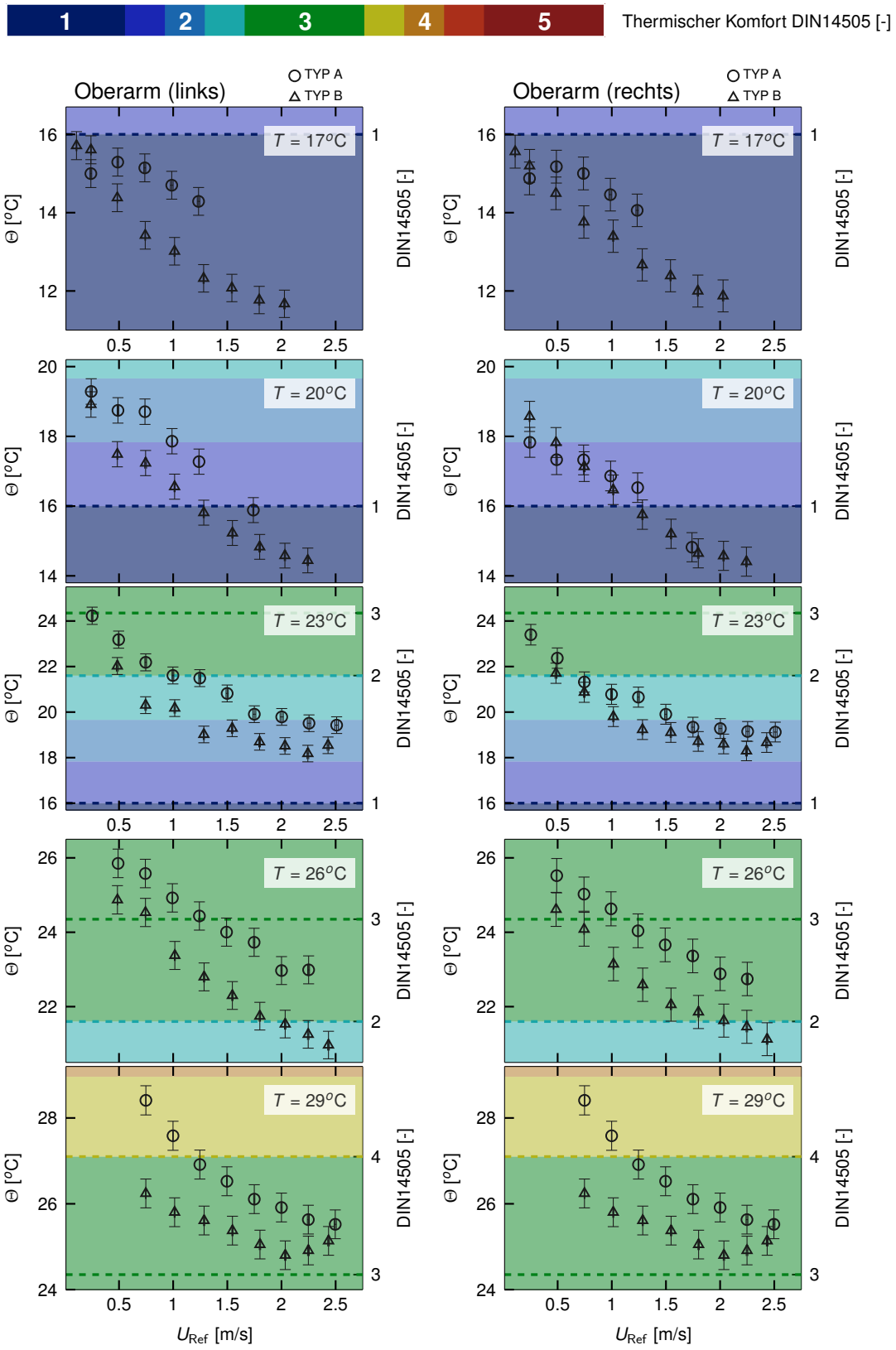


Abbildung 3.5: *Äquivalenttemperatur Θ als Funktion der Referenzgeschwindigkeit U_{Ref} für 17^o C $\leq T_{\text{A}} = T_{\text{U}} \leq 29^o$ C (von oben nach unten), wobei (○) die Blende Typ A und (△) die Blende Typ B kennzeichnet: Linke Spalte: linker Oberarm,d rechte Spalte: rechter Oberarm.*

strahlen von derselben Größenordnung sind, so dass die aus dem Schoßbereich und den Oberschenkeln aufsteigende warme Luft sich mit der kälteren Zuluft durchmischt. Somit wäre ein möglicher Erklärungsansatz für den leichten Temperaturanstieg bei niedriger Geschwindigkeit im Fall der Blende A, dass für $U_{\text{Ref}} = 0.50$ m/s ein größerer Anteil der aufsteigenden warmen Luft in den Bereich des Oberkörpers transportiert wird. Für höhere Geschwindigkeiten überwiegen dann wieder die Trägheitskräfte, so dass hier dieser Effekt keine signifikante Rolle mehr spielt. Dass dieser Effekt bei Blende B mit dem höheren Turbulenzgrad nicht zu beobachten ist, lässt sich auf den höheren Enthalpiestrom bei gleicher Geschwindigkeit sowie der auch bei kleineren Geschwindigkeiten besseren Durchmischung aufgrund der höheren Turbulenz zurückführen. Bezüglich des thermischen Komforts ergeben sich für den gesamten Geschwindigkeitsbereich im Bereich des Kopfes kalte aber akzeptable Bedingungen, wohingegen für die Brust und die Oberarme das Empfinden als unkomfortabel zu kalt bewertet wird.

Für die isothermen Bedingungen bei $T = 20^o$ C zeigt sich ein ähnlicher Zusammenhang zwischen Äquivalenttemperatur und Geschwindigkeit wie im Fall $T = 17^o$ C. Mit zunehmender Geschwindigkeit ist ein deutliches Absinken der Äquivalenttemperatur für beide Blenden zu beobachten. Für den Fall mit der höheren Turbulenz wurden auch Messungen mit $U_{\text{Ref}} \geq 1.75$ m/s durchgeführt. Hier zeigt sich, dass in diesem Geschwindigkeitsbereich die Temperaturänderung geringer ausfällt, während für den Geschwindigkeitsbereich $U_{\text{Ref}} \leq 1.75$ m/s die Temperaturabnahme als Funktion der Geschwindigkeit einen nahezu linearen Zusammenhang aufweist. Ebenso zeigt sich auch hier für $U_{\text{Ref}} \leq 0.50$ m/s im Fall der Blende A mit der niedrigen Turbulenz an den Oberarmen und am Kopf ein unterschiedliches Verhalten im Vergleich zur Blende mit der höheren Turbulenz. Eine mögliche Ursache hierfür wurde bereits im Abschnitt zuvor erläutert. Ebenso zeigt sich bei Blende A ein deutlicher Temperaturunterschied zwischen dem linken und rechten Oberarm. Inwieweit dieser Unterschied auf die Strömung oder auf einen systematischen Fehler zurückzuführen ist, lässt sich hier nicht mehr feststellen. Jedoch hat dies hinsichtlich der Komfortbewertung keinen entscheidenden Einfluss. Für beide Oberarme liegt die Komfortbewertung für Blende A im Bereich $U_{\text{Ref}} \leq 1.25$ m/s und für Blende B $U_{\text{Ref}} \leq 1.00$ m/s bei kalt aber akzeptabel, wobei man sich über den ganzen Geschwindigkeitsbereich bereits am unteren Ende dieses Komfortbereiches bewegt. Für die höheren Geschwindigkeiten hingegen ist der Komfort mit zu kalt bewertet. Für die Brust ergibt sich eine ähnliche Bewertung, wobei hier schon ab einer Geschwindigkeit von $U_{\text{Ref}} = 1.00$ m/s (Blende A) und $U_{\text{Ref}} = 0.75$ m/s (Blende B) der unkomfortable Bereich zu kalt erreicht wird. Im Bereich des Kopfes ergibt sich für beide Blenden, im ganzen Geschwindigkeitsbereich, eine Bewertung von kalt aber akzeptabel, wobei sich hier die Äquivalenttemperaturen in der oberen Hälfte des Bewertungsbereiches bewegen.

Im Fall $T = 23^o$ C zeigt sich für Kopf, Brust und Oberarme ein Zusammenhang zwischen Äquivalenttemperatur und Geschwindigkeit, der sich schon bei $T = 17^o$ C und $T = 20^o$ C angedeutet hat. Hier lässt sich im Fall von Blende A ein nahezu lineares Absinken der Äquivalenttemperatur als Funktion der Geschwindigkeit für $U_{\text{Ref}} \leq 1.75$ m/s und im Fall von Blende B für $U_{\text{Ref}} \leq 1.50$ m/s erkennen. Danach jedoch sind im Geschwindigkeitsbereich bis zu $U_{\text{Ref}} = 2.50$ m/s nur noch relativ geringe Temperaturänderungen zu beobachten. Hier hat der doch deutlich steigende Enthalpiestrom bei höheren Geschwindigkeiten anscheinend keinen signifikanten Einfluss auf den Wär-

mestrom zwischen TM und der Strömung. Der Grund hierfür ist auf den IR-Aufnahmen in Abbildung 3.1 und 3.2 klar zu erkennen. Für die höheren Geschwindigkeiten beträgt die Körpertemperatur am Oberkörper ungefähr 23^o C was der Umgebung- und Zulufttemperatur entspricht. Da der Wärmestrom zwischen TM und Umgebung linear von der Temperaturdifferenz abhängt, ist der Wärmestrom in diesem Bereich relativ gering, so dass auch mit steigender Geschwindigkeit nicht signifikant mehr Wärme abgeführt werden kann. Bezüglich des thermischen Komforts lässt sich festhalten, dass für beide Blenden und nahezu den gesamten Temperaturbereich der thermische Komfort am Kopf als neutral beurteilt wird. Nur im Fall der Strömung mit dem höheren Turbulenzgrad ergeben sich für den Kopf Äquivalenttemperaturen, die als kalt aber akzeptabel kategorisiert sind, jedoch auch nur knapp unterhalb des neutralen Komfortbereichs liegen. Für die Brust und Oberarme hingegen wird der thermische Komfort über einen weiten Temperaturbereich als kalt aber akzeptabel beurteilt. Nur bei kleinen Geschwindigkeiten wird der Komfort als neutral eingeschätzt und dies auch primär für den Fall der Blende A.

Im Fall von Blende B ist bei einer Temperatur von $T = 26^o$ C in der Körperregion Kopf ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen Äquivalenttemperatur und Geschwindigkeit zu erkennen. Im Vergleich hierzu zeigt sich für Blende A, wie zuvor bei $T = 23^o$ C, für höhere Geschwindigkeiten $U_{\mathsf{Ref}} \geq 1.5$ m/s eine deutlich geringere Änderung der Äquivalenttemperatur. Hier scheint die aus der höheren Turbulenz resultierende Strahlverbreiterung zu einem größeren Volumenstrom und somit Wärmestrom im Bereich des Kopfes zu führen. Im Fall der niedrigeren Turbulenz reicht der Luftstrom am Kopf nicht mehr aus, um die am Kopf vom TM abgegebene Wärme schnell genug abzutransportieren. Dieser Unterschied zwischen den beiden Strömungsfällen ist für die anderen Bereiche des Oberkörpers – Brust und Oberarme – so nicht zu beobachten. Hier besteht für beide Blenden ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen Äquivalenttemperatur und Referenzgeschwindigkeit. Diese Körperregionen werden, im Gegensatz zum Kopf, direkt angeströmt und somit ist die Kapazität der Luft die Wärme abzutransportieren auch für Blende A größer als die Wärmemenge, die vom TM an die Umgebung abgegeben wird. Bezüglich des thermischen Komforts lässt sich festhalten, dass für Blende A der Komfort für Kopf, Brust und Oberarme über den ganzen Geschwindigkeitsbereich als neutral eingestuft wird – mit Ausnahme der beiden höchsten Geschwindigkeiten im Bereich der Brust. Hier liegen die Äquivalenttemperaturen knapp unterhalb des neutralen Bereiches und werden als kalt aber akzeptabel bewertet. Im Fall von Blende B ist der Kopf ebenfalls über den ganzen Geschwindigkeitsbereich als neutral bewertet. Für die Brust hingegen wird der thermische Komfort für den Bereich $U_{\mathsf{Ref}} \geq 1.0$ m/s als kalt aber akzeptabel eingeordnet. Für die Oberarme herrschen bis zu einem Wert von $U_{\mathsf{Ref}} = 1.75$ m/s neutrale Komfortbedingungen. Erst oberhalb dieser Geschwindigkeit fallen die Äquivalenttemperaturen unterhalb der Grenze für den neutralen Bereich.

Zum Schluss betrachten wir noch den Fall für $T = 29^o$ C. Für Blende A erhält man kontinuierlich fallende Äquivalenttemperaturen über den gesamten Geschwindigkeitsbereich, wobei bei größer werdenden Geschwindigkeiten die Änderung der Temperatur immer geringer ausfällt. Dies zeigt, dass auch hier ab einem gewissen Punkt der konvektive Wärmetransport über den Luftstrom in Sättigung geht und die Möglichkeit der Wärmeabgabe vom TM beschränkt ist. Im Fall der Blende B ist jedoch bei hohen Geschwindigkeiten ein weiterer Effekt zu beobachten. Während die

Äquivalentgeschwindigkeit bis zu $U_{\mathsf{Ref}} = 2.0$ m/s absinkt, steigt sie für $U_{\mathsf{Ref}} \geq 2.0$ m/s wieder, wenn auch nur um wenige Zehntelgrad, an. Die Ursache dieses Anstiegs ist wahrscheinlich mit der Tatsache zu begründen, dass bei den höchsten Geschwindigkeiten warme Luft aus dem Bereich des Unterkörpers in den Bereich des Oberkörpers transportiert wird. Der thermische Komfort für Blende B wird an Kopf, Brust und Oberarmen über den gesamten Geschwindigkeitsbereich als neutral bewertet. Auch im Fall der Blende A sind die Äquivalenttemperaturen für fast alle Geschwindigkeiten im neutralen Bereich. Nur bei den niedrigeren Geschwindigkeiten wird der Komfort teilweise als warm aber akzeptabel bewertet, wobei die Äquivalenttemperaturen im unteren Drittel dieses Bereiches nahe dem neutralen Bereich sind.

Unterkörper

Im vorherigen Abschnitt wurde der thermische Komfort als Funktion der zwei Turbulenzgrade in Abhängigkeit der Referenzgeschwindigkeit für den Oberkörper, der zu großen Teilen von den Ausströmern direkt angeblasen wird, diskutiert. Im Folgenden werden nun die Ergebnisse für die Körperteile, die nicht direkt angeströmt werden, dargestellt und erörtert. Hierzu ist in Abbildung 3.6 die Äquivalenttemperatur für die Unterarme (linke Spalte) und die Hände (rechte Spalte) sowie in Abbildung 3.7 die Äquivalenttemperatur für den Bauch (linke Spalte) und die Oberschenkel (rechte Spalte) als Funktion der Referenzgeschwindigkeit gezeigt. Für die beiden Unterarme, Hände und Oberschenkel ist jeweils der Mittelwert angegeben. Wie bereits in der Ergebnisdarstellung für den Oberkörper sind auch hier die Temperaturniveaus der Umgebungsbedingungen von kalt nach warm von oben nach unten angeordnet und die Ergebnisse für den Fall mit niedriger Turbulenz sind durch Kreise und die Ergebnisse für die hohe Turbulenz mit Dreiecken gekennzeichnet.

An den Händen ändert sich für die Temperaturniveaus $T = 17^o$ C und $T = 20^o$ C die Äquivalenttemperatur mit steigender Geschwindigkeit kaum. Hier ist für beide Turbulenzgrade die Differenz zwischen maximaler und minimaler Äquivalenttemperatur im gesamten Geschwindigkeitsbereich immer kleiner 1.2^o C. Ebenso ist, mit Ausnahme von $T = 29^o$ C, kein klarer Trend in Abhängigkeit der Geschwindigkeit sowie kein eindeutiger Unterschied zwischen den beiden Fällen mit unterschiedlichem Turbulenzgrad zu erkennen. Der Grund hierfür ist, dass die Hände lediglich vom Luftstrom des äußeren Randbereichs der Freistrahlen erfasst werden. Dort ist die Geschwindigkeit deutlich geringer im Vergleich zum Zentrum des Freistrahls. Hier scheint der Wärmetransport durch die Auftriebs- und Trägheitskräfte der Luftströmung im Gleichgewicht mit der Wärmeabgabe des TMs zu sein, so dass kaum eine Temperaturänderung zu beobachten ist. Eine Ausnahme bildet der Fall für $T = 29^o$ C. Hier sind die Temperaturänderungen ebenfalls gering. Es ist jedoch ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Äquivalenttemperatur und Referenzgeschwindigkeit zu erkennen, der sich so für die anderen Temperaturniveaus nicht gezeigt hat. Ebenso sind im Fall der niedrigen Turbulenz die Äquivalenttemperaturen höher im Vergleich zu den Äquivalenttemperaturen bei hoher Turbulenz. Eine Ursache hierfür könnte sein, dass die Temperaturdifferenz zwischen der Oberfläche des TMs und der Lufttemperatur aufgrund der hohen Umgebungstemperaturen, so viel geringer ist, dass hier auch die thermische Auftriebsströmung weniger stark ausgeprägt ist und somit die erzwungene Konvektion durch den Freistrahl die Strömung an den Händen dominiert. Zusätzlich lässt sich

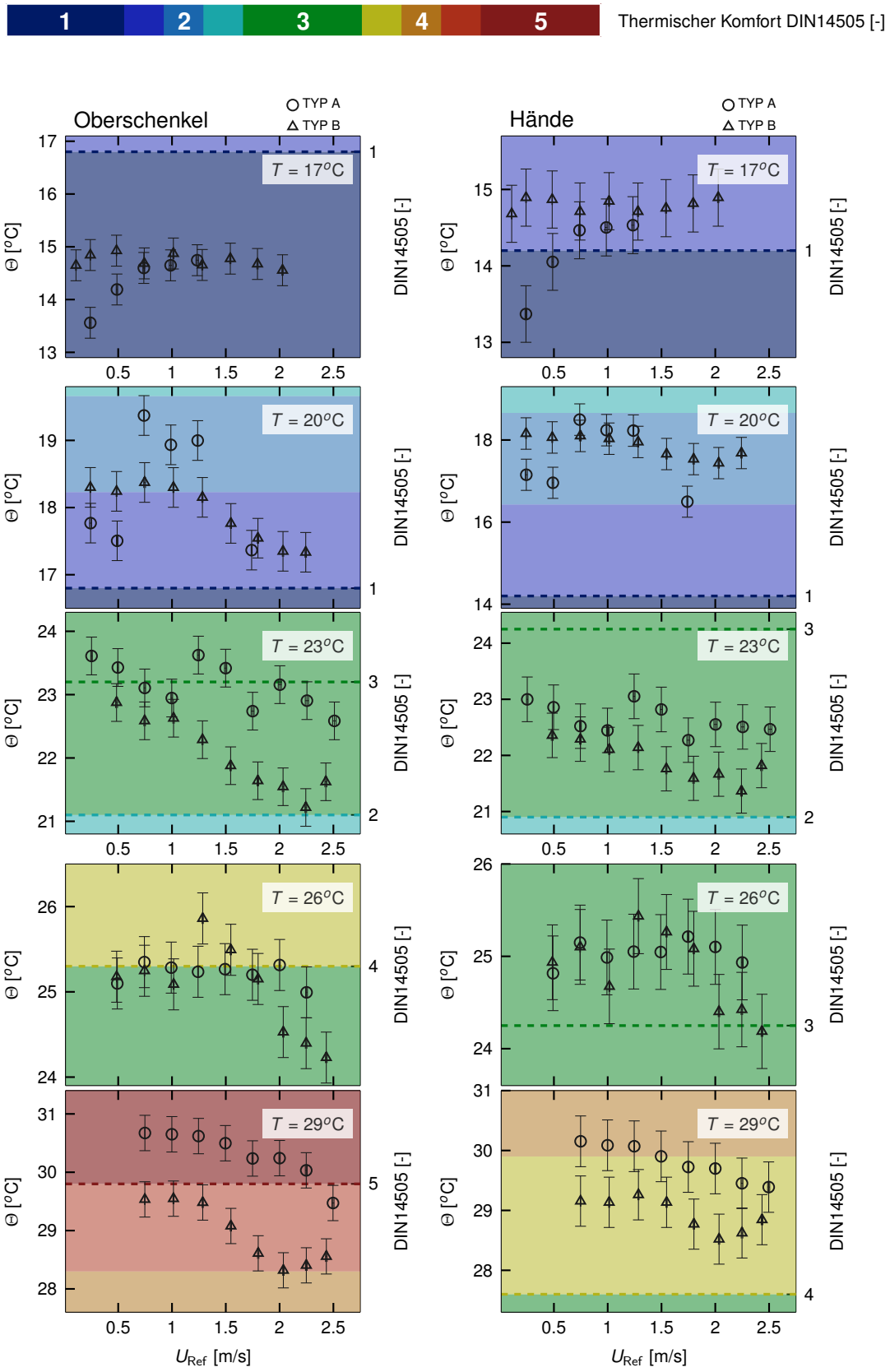


Abbildung 3.6: *Äquivalenttemperatur Θ als Funktion der Referenzgeschwindigkeit U_{Ref} für 17^o C $\leq T_{\text{A}} = T_{\text{U}} \leq 29^o$ C (von oben nach unten), wobei ($\circ$) die Blende Typ A und ($\triangle$) die Blende Typ B kennzeichnet: Linke Spalte der Mittelwert aus den Unterarme und rechte Spalte der Mittelwert aus den beiden Händen.*

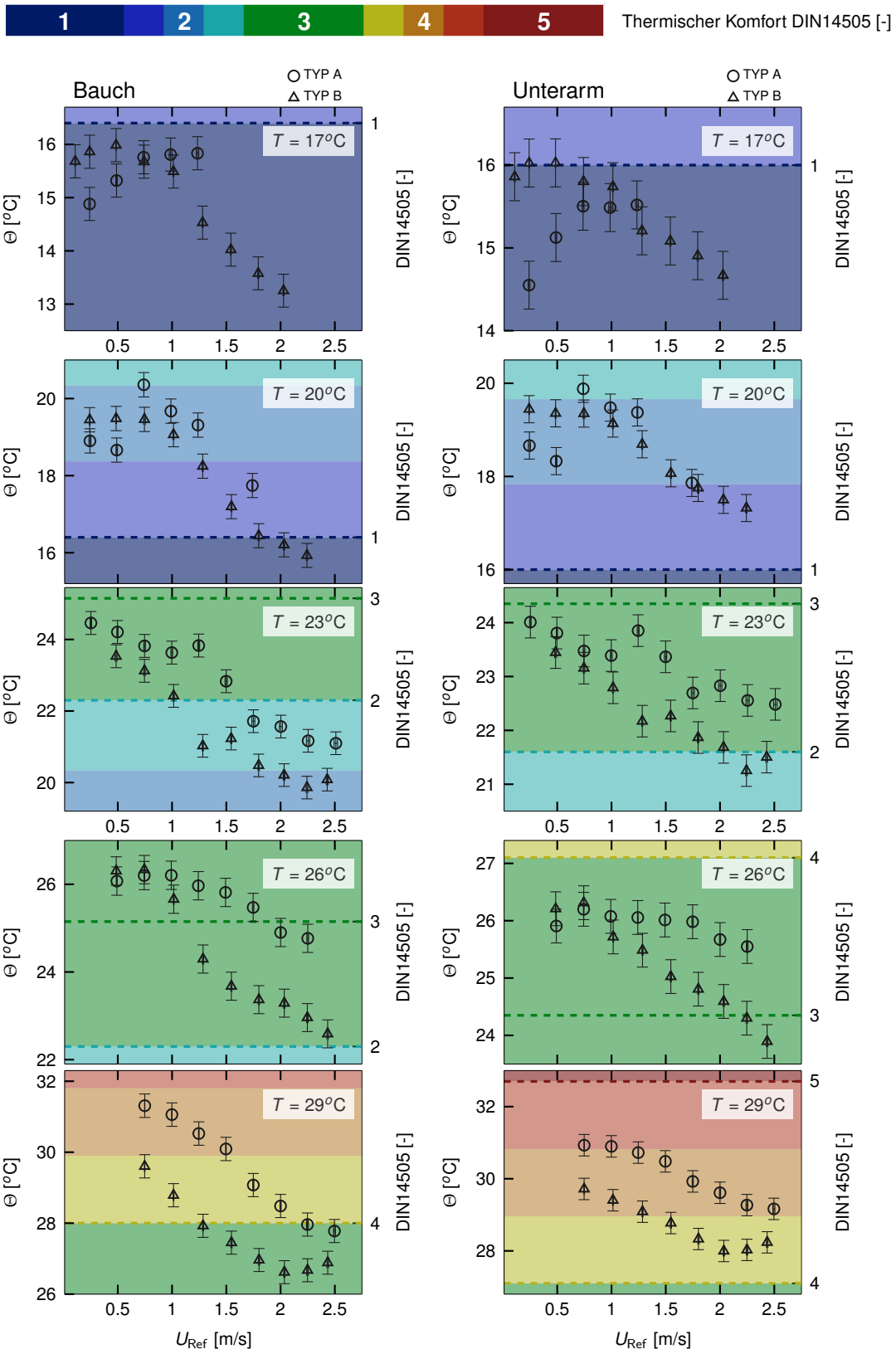


Abbildung 3.7: *Äquivalenttemperatur Θ als Funktion der Referenzgeschwindigkeit U_{Ref} für 17^o C $\leq T_{\mathrm{A}} = T_{\mathrm{U}} \leq 29^o$ C, wobei ($\circ$) die Blende Typ A und ($\triangle$) die Blende Typ B kennzeichnet. Die linke Spalte zeigt die Ergebnisse für den Bauch und die rechte den Mittelwert für die beiden Oberschenkel.*

bei $T = 29^o$ C für den Fall der hohen Turbulenz auch der Effekt ansteigender Äquivalenttemperaturen für $T_{\text{Ref}} > 2.0$ m/s, der auch schon für den Oberkörper identifiziert wurde, beobachten. Dieser Effekt ist nicht nur auf die Hände beschränkt, sondern zeigt sich ebenso für die Oberarme, den Bauch und die Oberschenkel. Hinsichtlich des thermischen Komforts an den Händen lässt sich für beide Turbulenzgrade festhalten: für $T = 17^o$ C ergibt sich eine Bewertung von zu kalt oder kalt aber komfortabel, wobei sich hier die Äquivalenttemperaturen nur knapp oberhalb der Grenze zum Bereich zu kalt befinden. Für $T = 20^o$ C wird der thermische Komfort als kalt aber akzeptabel bewertet, für $T = 23^o$ C und $T = 26^o$ C sind die Äquivalenttemperaturen im Bereich neutral. Und für den Fall der höchsten Temperatur $T = 29^o$ C ergibt sich eine Beurteilung von warm aber akzeptabel.

Ein ähnliches Bild, im Vergleich mit den Händen, ergibt sich auch für die Oberschenkel mit dem Unterschied, dass die Temperaturdifferenzen mit bis zu 2.0^o C größer sind. Zwar werden auch die Oberschenkel nicht direkt angeströmt und befinden sich außerhalb des Freistrahls, jedoch trifft ein größerer Luftstrom die Oberschenkel dadurch, dass die Luft, die auf die Brust trifft, in Teilen auch nach unten abgelenkt wird. Dieser Luftstrom trifft dann dort auf die aufsteigende warme Luft, so dass der Wärmestrom und somit die Äquivalenttemperatur von der Wechselwirkung zwischen erzwungener und thermischer Konvektion determiniert wird. Je nach Verhältnis der beiden Wärmtransportmechanismen ergibt sich eine Vielzahl verschiedener Strömungszustände, was wiederum zu unterschiedlichstem Verhalten der Äquivalenttemperatur als Funktion der Geschwindigkeit für die unterschiedlichen Umgebungstemperaturen führt. Für $T = 17^o$ C ist am Oberschenkel, insbesondere für den Fall hoher Turbulenz, kaum eine Änderung der Äquivalenttemperatur zu beobachten. Bei einer Umgebungstemperatur von $T = 20^o$ C lässt sich für den Fall der höheren Turbulenz im Geschwindigkeitsbereich 1.0 m/s $\leq U_{\text{Ref}} \leq 2.0$ m/s ein deutliches Absinken der Äquivalenttemperatur mit steigender Geschwindigkeit feststellen. Im Bereich 0.25 m/s $\leq U_{\text{Ref}} \leq 1.0$ m/s hingegen scheint die Geschwindigkeitsänderung keinen großen Einfluss auf die Äquivalenttemperatur zu haben. Hier sind die Volumenströme und somit der Enthalpiestrom anscheinend zu gering, um den Wärmestrom signifikant zu beeinflussen. Das Verhalten für den Fall mit der niedrigeren Turbulenz hingegen ist widersprüchlich. Auch hier ist, wie schon für $T = 20^o$ C, ein uneinheitliches Verhalten der Äquivalenttemperatur für den Fall mit Blende A zu erkennen. Für Blende B ist, mit Ausnahme von $U_{\text{Ref}} \approx 2.5$ m/s, ein kontinuierliches Absinken der Äquivalenttemperatur mit steigender Geschwindigkeit zu erkennen. Im Fall $T = 26^o$ C lässt sich, wie an den Händen, eine nahezu konstante Äquivalenttemperatur für den Fall mit Blende A und im Fall Blende B ein uneinheitliches Verhalten beobachten. Für den Fall der höchsten Temperatur $T = 29^o$ C ergibt sich dann für die Oberschenkel, wie schon bei den Händen, eine deutlich erkennbare Abhängigkeit der Äquivalenttemperatur von der Geschwindigkeit sowie vom Turbulenzgrad. Hier ergibt sich für beide Blenden bei niedrigen Geschwindigkeiten ein konstantes Temperaturniveau für die Äquivalenttemperatur und anschließend ein kontinuierliches Absinken der Äquivalenttemperatur als Funktion der Referenzgeschwindigkeit für Referenzgeschwindigkeiten $U_{\text{Ref}} > 1.0$ m/s. Im Fall der höheren Turbulenz steigt die Äquivalenttemperatur für $U_{\text{Ref}} > 2.0$ m/s wieder leicht an.

Zum Abschluss der Betrachtung des Unterkörpers werfen wir einen kurzen Blick auf den Bauch und die Unterarme. Der Bauch und die Unterarme zeigen über den ge-

samten Temperaturbereich einen sehr ähnlichen Zusammenhang zwischen Äquivalenttemperatur und Referenzgeschwindigkeit. Für beide Körperteile ist für $T = 17^o$ C, im Fall der Blende A, im Geschwindigkeitsbereich $U_{\text{Ref}} \leq 0.75$ m/s ein signifikanter Anstieg der Äquivalenttemperatur mit steigender Geschwindigkeit zu beobachten. Dieser Temperaturanstieg liegt wahrscheinlich daran, dass die thermisch induzierte Auftriebsströmung von den Füßen, Unterschenkeln und Oberschenkeln sich mit den Freistrahlen aus den Ausströmern vermischt und es zu einem Temperaturanstieg der Luft im Bereich des Bauches und des Unterarmes kommt. Im Bereich $U_{\text{Ref}} \leq 0.75$ m/s scheint dieser Effekt dann stärker zu sein als der Effekt des erhöhten Wärmetransports durch die höhere Geschwindigkeit. Für 0.75 m/s $\leq U_{\text{Ref}} \leq 1.25$ m/s stellt sich dann ein Gleichgewicht ein, so dass die Äquivalenttemperatur hier nahezu konstant ist. Im Fall des größeren Turbulenzgrades ist im niedrigen Geschwindigkeitsbereich auch zunächst ein leichter Anstieg von ungefähr 0.4 K zu verzeichnen. Für die höheren Geschwindigkeiten $U_{\text{Ref}} \geq 1.25$ m/s überwiegt dann wieder der Wärmetransport durch die erzwungene Konvektion. Als Folge sinkt die Äquivalenttemperatur kontinuierlich mit steigender Geschwindigkeit ab. Mit steigender Umgebungs- und Ausströmtemperatur izeigt sich deutlich, dass aufgrund der geringeren Temperaturdifferenz zwischen der Oberfläche des TMs und der Lufttemperatur der Umgebung die Auftriebskräfte geringer werden und die Strömung und somit der Wärmetransport durch die erzwungene Konvektion der Freistrahlen bestimmt wird. Ab einem Temperaturniveau von $T = 23^o$ C ist für beide Blenden wieder ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Referenzgeschwindigkeit und Äquivalenttemperatur zu erkennen. Für die Bewertung des thermischen Komforts lässt sich festhalten, dass dieser am Bauch und Unterarmen bei $T = 17^o$ C über den ganzen Geschwindigkeitsbereich als kalt aber akzeptabel bewertet wird. Nur im Fall der Blende B bei hohen Geschwindigkeiten wird der Komfort als zu kalt bewertet. Ferner wurde beobachtet, dass bei $T = 23^o$ C für $U_{\text{Ref}} \leq 1.0$ m/s ein Absinken der Äquivalenttemperatur für beide Blendentypen zu beobachten ist. Bei der Referenzgeschwindigkeit $U_{\text{Ref}} = 1.25$ m/s hingegen ist im Fall der Blende A ein Ansteigen der Äquivalenttemperatur und im Fall der Blende B ein überproportionales Absinken zu erkennen. Was die Ursache hierfür ist, ist schwer zu sagen. Da dieses Phänomen jedoch an den Unterarmen und am Bauch im gleichen Maße auftritt, lässt sich vermuten, dass die Wechselwirkung von erzwungener und thermischer Konvektion zur Ausbildung eines kohärenten Strömungszustands führt, der zum einen im Fall der Blende A wärmere Luft in diese Region transportiert und zum anderen im Fall der Blende B kältere. Für $U_{\text{Ref}} \geq 1.75$ m/s zeigt sich im Fall der niedrigen Turbulenz eine leichte Abnahme der Äquivalenttemperatur als Funktion der Geschwindigkeit am Bauch und nahezu konstante Werte an den Unterarmen. Hieraus ergibt sich für den Bereich des Bauches bei niedrigeren Geschwindigkeiten eine neutrale Komfortbewertung und für die höheren Geschwindigkeiten eine Bewertung von kalt aber akzeptabel. Für $T = 26^o$ C, im Fall mit der höheren Turbulenz, ergibt sich eine kontinuierliche Abnahme der Äquivalenttemperatur für die Bereiche Bauch und Unterarme. Im Fall der niedrigen Turbulenz ist die Äquivalenttemperatur für den Unterarm nahezu konstant über den gesamten Geschwindigkeitsbereich, während für den Bauch bei $U_{\text{Ref}} \leq 1.00$ m/s keine größere Änderung zu erkennen ist. Hingegen lässt sich bei den größeren Geschwindigkeiten ein leichtes Absinken der Äquivalenttemperatur beobachten. Alle bei $T = 26^o$ C ermittelten Äquivalenttemperaturen, für den Bauch sowie für den Unterarm, befinden sich im neutralen Komfortbereich. Bei

einem Temperaturniveau von $T = 29^o$ C ergeben sich für den Bauch und den Unterarm für nahezu den gesamten Geschwindigkeitsbereich kontinuierlich abnehmende Äquivalenttemperaturen mit Ausnahme der Blende B und $U_{\mathsf{Ref}} \geq 2.0$ m/s. Hier ist, wie für den gesamten Unterkörper, ein leichter Anstieg der Äquivalenttemperatur bei hohen Geschwindigkeiten zu verzeichnen. Ferner lässt sich bei $T = 29^o$ C ein deutlicher Unterschied in den Äquivalenttemperaturen bei gleicher Geschwindigkeit für die beiden Turbulenzgrade feststellen. Die Äquivalenttemperaturen für die Blende B sind im gesamten Geschwindigkeitsbereich immer deutlich niedriger als im Fall der Blende A. Da auf diesem Temperaturniveau der Wärmetransport auch im Bauchbereich und an den Oberschenkeln primär durch die erzwungene Konvektion der Freistahlen bestimmt wird, führt die bessere Durchmischung der Luft in diesem Bereich, bei höherer Turbulenz auch zu einem größeren Wärmetransport. Als Resultat ist hier, im Gegensatz zu den anderen Temperaturniveaus, ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Blendentypen zu erkennen. Hinsichtlich des Komfortempfindens sind für den Unterarm alle Äquivalenttemperaturen im Bereich warm aber akzeptabel. Für den Bauch ergeben sich für die Blende A ebenfalls Äquivalenttemperaturen, die als zu warm bewertet werden, mit Ausnahme der beiden höchsten Geschwindigkeiten; hier wird der Komfort als neutral beurteilt. Bei dem höheren Turbulenzgrad hingegen sind nur die beiden Fälle mit der niedrigsten Geschwindigkeit als warm aber akzeptabel kategorisiert. Alle anderen Äquivalenttemperaturen bei höheren Geschwindigkeiten sind im neutralen Komfortbereich.

Zusammenfassend lässt sich für den Oberkörper festhalten, dass für alle Temperaturen – bis auf wenige Ausnahmen – die Äquivalenttemperaturen bei gleicher Geschwindigkeit für die Blende B aufgrund des höheren Turbulenzgrades niedriger sind als die für Blende A. Es zeigt sich, dass der Turbulenzgrad einen messbaren Einfluss auf die Äquivalenttemperatur hat. Außerdem ist für einen Großteil des Parameterbereichs ein klarer Zusammenhang zwischen Äquivalenttemperatur und Geschwindigkeit zu erkennen. Grundsätzlich führen höhere Geschwindigkeiten aufgrund des höheren Volumen- und somit Enthalpiestroms zu einem größeren Wärmetransport zwischen der Oberfläche des TMs und der Luftströmung in der Umgebung. Hierbei ergeben sich jedoch deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Temperaturniveaus, die zum einen ihre Ursache in der komplexen Wechselwirkung von thermischer Konvektion (induziert vom TM) und erzwungener Konvektion (Freistrahlen) sowie zum anderen in der Wechselwirkung der Freistrahlen selbst haben. Ferner kommt zum Tragen, dass die vom TM abgegebene Wärme bei hoher Umgebungstemperatur nicht im gleichen Maße abgeführt werden kann. Dieser Effekt konnte nicht nur für die Bereiche des Oberkörpers, sondern auch für den Unterkörper beobachtet werden. In einem solchen Fall würde der Mensch anfangen zu schwitzen, um über latenten Wärmetransfer weitere Körperwärme abzuführen. Dies wird mit dem hier verwendeten Menschmodel jedoch nicht hinreichend abgebildet, da dieses nicht schwitzen kann. Für den späteren direkten Vergleich mit den subjektiven Komfortbewertungen sind diese Parameterbereiche daher nicht geeignet. Im Vergleich hierzu ergibt sich für den Unterkörper ein weniger eindeutiges Gesamtbild. Hier ist der Einfluss der erzwungenen Konvektion aufgrund der Tatsache, dass dieser Bereich nicht direkt angeströmt wird, deutlich geringer und die thermische Auftriebsströmung hat hier einen deutlich stärkeren Einfluss auf den Wärmetransport zwischen der Oberfläche des TMs sowie der umgebenden Luft und somit natürlich auch auf den thermischen Komfort. Durch

die Überlagerung von thermischer und erzwungener Konvektion ergeben sich, je nach Verhältnis von Auftriebs- und Trägheitskräften eine Vielzahl von Strömungszuständen. Diese hieraus resultierenden Strömungsstrukturen bestimmen dann wiederum den Wärmestrom und haben damit einen entscheidenden Einfluss. Hinsichtlich der Analyse und Bewertung des Einflusses von Zugluft am Oberkörper auf den thermischen Komfort hat dies später jedoch keine wesentliche Bedeutung, da die Strömungen im Bereich des Unterkörpers bei hohen Geschwindigkeiten keinen entscheidenden Einfluss auf die Strömung im Bereich des Oberkörpers haben.

3.2 Umgebungstemperatur 29^o C und Variation der Zulufttemperatur

Im Abschnitt zuvor wurden die Ergebnisse der Untersuchung des thermischen Komforts als Funktion der Referenzgeschwindigkeit bei isothermen Randbedingungen dargestellt. Zusätzlich zu diesen Untersuchungen wurde der Einfluss der Zugluft bei einer Umgebungstemperatur von $T_{\mathsf{U}} = 29^o$ C sowie bei Temperaturen am Ausströmer von $T_{\mathsf{A}} = 14^o$ C und $T_{\mathsf{A}} = 17^o$ C für den Geschwindigkeitsbereich 0.75 m/s $\leq U_{\mathsf{Ref}} \leq$ 2.0 m/s untersucht. Die Untersuchungen wurden nur für die Blende B mit dem hohen Turbulenzgrad von $I_U = 32\%$ durchgeführt. Ferner beträgt hier die Heizleistung des TMs, im Vergleich zur Wärmeabgabe von 75 W bei isothermen Randbedingungen, nur 60 W. Die um 15 W reduzierte Heizleistung entspricht ungefähr der latenten Wärme (Verdunstungskälte), die der Mensch durch Schwitzen bei diesen Temperaturen erzeugen würde. Diese Reduzierung ist – wie die Ergebnisse der Untersuchung bei isothermen Randbedingungen zeigen – notwendig, um sicherzustellen, dass die vom TM abgegebene Wärme auch hinreichend von der Luftströmung abtransportiert werden kann und es nicht an einzelnen Körperteilen zu einem Wärmestau kommt. Die Ergebnisse für die Körperzonen sind in Abbildung 3.8 dargestellt. Die einzelnen Bezeichnungen für die Körperregionen sind in der rechten oberen Ecke angegeben. Hierbei steht (l) sowie (r) jeweils für die rechte und linke Körperseite. Die Äquivalenttemperaturen für $T_{\mathsf{A}} = 14^o$ C sind mit einem Viereck und die für $T_{\mathsf{A}} = 17^o$ C mit einer Raute gekennzeichnet.

Es zeigt sich für alle Körperteile ein kontinuierliches Absinken der Äquivalenttemperatur bei steigender Geschwindigkeit, mit Ausnahme von $U_{\mathsf{Ref}} = 2.0$ m/s an der Brust sowie am rechten und linken Oberarm. Dies sind die Körperregionen, die primär von den Freistrahlen angeströmt werden. Hier steigt bei $U_{\mathsf{Ref}} = 2.0$ m/s und $T_{\mathsf{A}} = 17^o$ C die Äquivalenttemperatur leicht an. Für die vier Regionen Kopf, Brust sowie rechter und linker Oberarm wird der thermische Komfort überwiegend als neutral bewertet. Nur für den Fall $T_{\mathsf{A}} = 14^o$ C ergibt sich für die Brust ab $U_{\mathsf{Ref}} = 1.5$ m/s eine Komfortbewertung von kalt aber akzeptabel, wobei die Äquivalenttemperaturen nur knapp unterhalb der Grenze zum neutralen Bereich liegen. Außerdem fällt auf, dass die Unterschiede in der Äquivalenttemperatur, mit Werten mehrheitlich kleiner als 0.5 K, im Verhältnis zur Differenz der Zuluft zwischen den beiden Temperaturniveaus von 3.0 K relativ gering ausfallen. Nur für den Brustbereich ergibt sich ein Unterschied von bis zu 1.0 K für die beiden unterschiedlichen Ausströmtemperaturen. Insgesamt lässt sich festhalten, dass trotz der hohen Strömungsgeschwindigkeiten und der niedrigen Zulufttemperaturen der Komfort nach DIN14505 noch als komfortable bewertet wird.

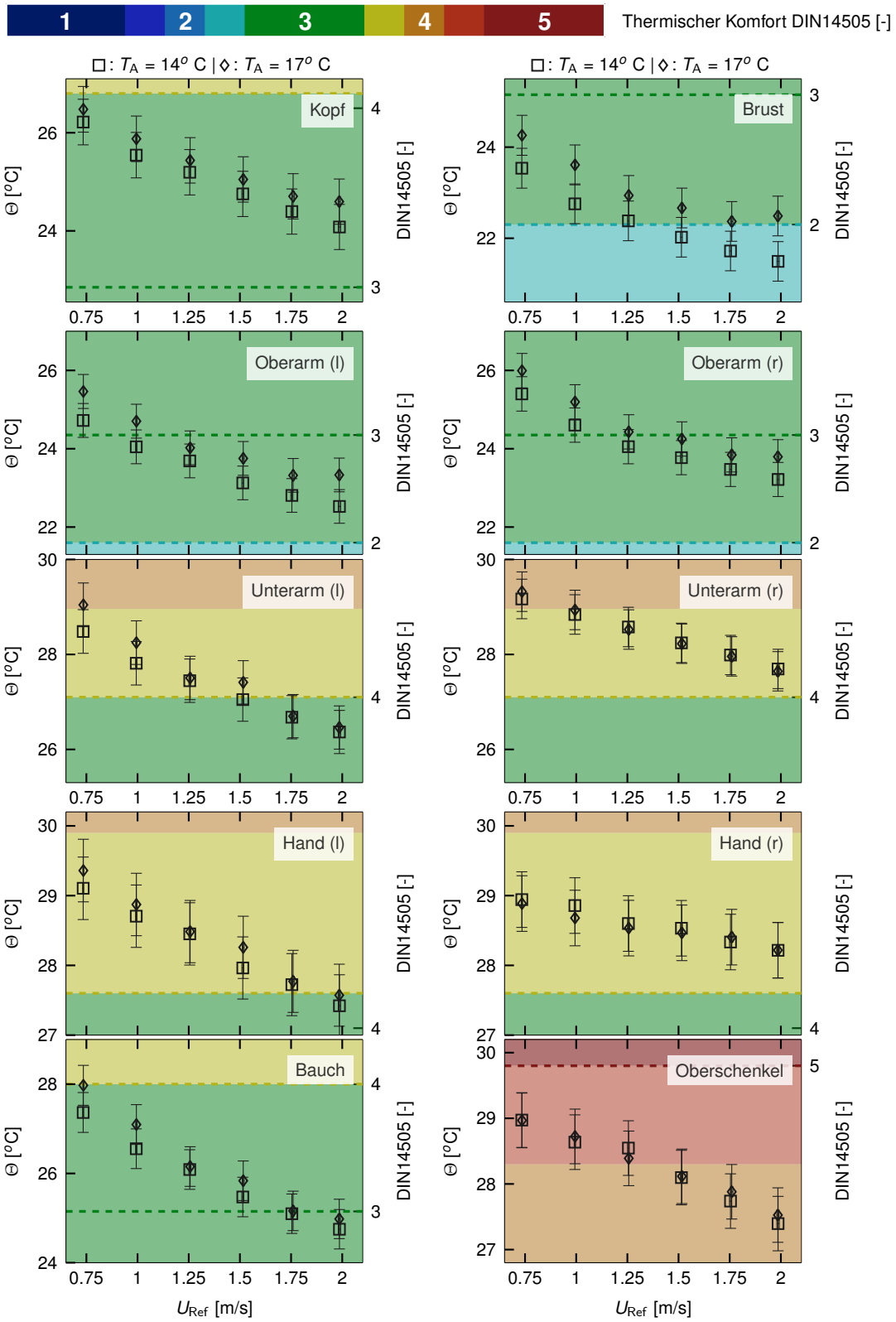


Abbildung 3.8: *Äquivalenttemperatur Θ als Funktion der Referenzgeschwindigkeit U_{Ref} für $T_U = 29^o$ C für $T_A = 14^o$ C (□) und $T_A = 17^o$ C (◇). Der Komfortbereich ist farbig dargestellt und die gestrichelten Linien kennzeichnen die Grenzen der einzelnen Bereiche. Das Körperteil, auf das sich die Abbildung bezieht, ist in der oberen rechten Ecke angegeben.*

Für die Unterarme und Hände verschiebt sich die Komfortbewertung hin zu warm aber akzeptabel. Nur im Fall der linken Seiten ergibt sich bei höheren Geschwindigkeiten teilweise eine neutrale Komfortbewertung. Diese Körperteile werden nicht direkt angeströmt und somit ist dort auch der Wärmetransfer zwischen der Oberfläche des TMs und der Umgebung deutlich geringer und die Äquivalenttemperaturen fallen erheblich höher aus/sind erheblich höher. Außerdem ist hier der Unterschied in der Äquivalenttemperatur zwischen den beiden Zulufttemperaturen nochmals deutlich geringer im Vergleich zu Kopf, Brust und Oberarmen. Ferner fällt bei genauer Betrachtung auf, dass sich die Äquivalenttemperaturen auf der linken und rechten Seite bei gleicher Geschwindigkeit für Unterarm und Hand signifikant unterscheiden. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass der linke und rechte Unterarm inklusive der Hand etwas unterschiedlich positioniert waren und somit auch leicht unterschiedlich angeströmt wurden.

Für den Bauch fällt die Komfortbewertung dann wieder neutral aus. Hier ist der Luftstrom, der von der Brust nach unten abgelenkt wird, groß genug, um diesen Bereich hinreichend zu kühlen. Auch hier fällt allerdings auf, dass insbesondere bei den höheren Geschwindigkeiten kaum ein Unterschied in der Äquivalenttemperatur für die verschiedenen Zulufttemperaturen zu beobachten ist. Dies zeigt sich auch für die Oberschenkel. Hier ist quasi kaum ein Unterschied zwischen den beiden Zulufttemperaturen zu erkennen. Teilweise lassen sich sogar geringfügig höhere Äquivalenttemperaturen trotz geringer Zulufttemperaturen feststellen. Die Ursache für dieses auf den ersten Blick widersprüchliche Verhalten ist, dass die Oberschenkel sich außerhalb der Freistrahlen befinden und der Wärmetransport durch erzwungene Konvektion dort nur über Sekundärströmungen stattfindet und nicht direkt durch die Zuluft. Der Wärmetransport ist dort primär oder zumindest in wesentlichen Teilen durch die thermische Konvektion bestimmt. Der konvektive Wärmetransport hängt somit primär von der Temperaturdifferenz der Oberflächentemperatur und der Umgebungstemperatur ab, die sich für beide Fälle kaum unterscheidet. An den Oberschenkeln lässt sich aus diesem Grund auch für die unterschiedlichen Ausströmtemperaturen kaum ein Unterschied feststellen. Somit ergeben sich für die Oberschenkel Äquivalenttemperaturen im oberen Bereich der Komfortbewertung warm aber akzeptabel, die bei niedrigen Geschwindigkeiten nur knapp unterhalb der Grenze zum Bereich unkomfortabel warm liegen.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass der thermische Komfort für die Körperteile Kopf, Brust und Oberarm, die direkt angeströmt werden, überwiegend als neutral bewertet wird und zwar über den gesamten Geschwindigkeitsbereich. Die Änderung der Äquivalenttemperatur für den Geschwindigkeitsbereich 0.75 m/s $\leq U_{\text{Ref}} \leq 2.0$ m/s beträgt ungefähr nur 2.0 K. Jedoch scheint der Einfluss durch die Geschwindigkeit größer zu sein als der Einfluss der Temperaturvariation der Zuluft von 3.0 K. Dies gilt auch für die anderen Körperteile. Insbesondere an den Händen und den Oberschenkeln hat die Temperatur der Zuluft, für den hier untersuchten Parameterbereich, kaum eine Auswirkung.

3.3 Strahlungswärme

Ein weiterer wesentlicher Faktor, der neben der Luftströmung, den thermischen Komfort im PKW bestimmt ist die Strahlungswärme durch Sonneneinstrahlung. Bei entsprechendem Sonnenstand führt die in das Fahrzeug eingebrachte Wärme durch Strahlung zu starken Temperaturänderungen an der Körperoberfläche, sowie den Oberflächen. Um den thermischen Komfort bei Zugluft bewerten zu können ist es daher notwendig zu eruieren wie groß der Einfluss der Strahlungswärme bei höheren Luftgeschwindigkeiten ist. Hierzu wurde über eine Infrarotheizung im Bereich der Windschutzscheibe (Details siehe Abschnitt 2.2) das TM einer definierten Strahlungsleistung ausgesetzt. Die Bestimmung des thermischen Komforts erfolgte hier dann mit Hilfe der Equites-Sensoren von Comlogo. Hierzu ist an den einzelnen Körperteilen jeweils ein Sensor positioniert. Die Messung des thermischen Komforts mit Hilfe der IR-Thermografie ist im Fall mit Wärmestrahlung nicht möglich, da die vom IR-Panel emitierte Infrarotstrahlung in Teilen von der Oberfläche des TM reflektiert werden würde und somit die IR-Aufnahmen unbrauchbar wären. Ferner wurden die Untersuchungen hier ohne Wärmeabgabe des TMs durchgeführt, da das Messprinzip der Sensoren weder dafür ausgelegt und noch kalibriert ist auf beheizten Oberflächen zu messen.

Um den Einfluss der Wärmestrahlung auf den thermischen Komfort zu untersuchen, wurde jeweils eine Messreihe ohne Strahlung (Referenzfall) und eine mit einer Strahlungsleistungsdichte am IR-Panel von 200 W/m^2 in Abhängigkeit der Geschwindigkeit und für zwei verschiedenen Temperaturrandbedingungen von $T_\mathsf{U} = T_\mathsf{A} = 17^o$ C und $T_\mathsf{U} = T_\mathsf{A} = 20^o$ C durchgeführt. Die Ergebnisse für die Körperregionen am Oberkörper sind in Abbildungen 3.9 und jene für die Regionen am Unterkörper in Abbildung 3.10 dargestellt. Die einzelnen Abbildung zeigen die Äquivalenttemperatur Θ als Funktion der Referenzgeschwindigkeit U_Ref. Der Fall mit Strahlung ist mit einem Quadrat gekennzeichnet und der Referenzfall mit einem Dreieck. In der linken Spalte sind die Ergebnisse für den Temperaturrandbedingung $T_\mathsf{U} = T_\mathsf{A} = 17^o$ C und in der rechten Spalte für $T_\mathsf{U} = T_\mathsf{A} = 20^o$ C aufgelistet. Die jeweiligen Körperteile sind in der rechten oberen Ecke jeder Abbildung angegeben. Zusätzlich wird die Differenz

$$\Delta\Theta = \hat{\Theta}_\mathsf{IR} - \hat{\Theta}_\mathsf{Ref} \tag{3.1}$$

zwischen der Äquivalenttemperatur bei Strahlung und jener bei der Referenzmessung ohne Strahlung als rote Linie mit abgebildet. Hierbei sind $\hat{\Theta}_\mathsf{IR}$ und $\hat{\Theta}_\mathsf{Ref}$ die, mit Hilfe von $\hat{\Theta}_i = C \cdot e^{a \cdot U}$, approximierten Zusammenhängen zwischen der Referenzgeschwindigkeit und Äquivalenttemperatur für jeweils den Fall mit IR-Strahlung und den Referenzfall ohne Strahlung.

Bevor wir mit der Ergebnisdiskussion beginnen sei an dieser Stelle Angemerkt, dass es teilweise große Unterschiede in der Äquivalenttemperatur für die Messung mit den Equites-Sensoren und der Messung auf Basis der IR-Thermographie gibt. Während für kleine Geschwindigkeiten von $U_\mathsf{Ref} \leq 0.75$ der Großteil der Ergebnisse in guter Übereinstimmung sind, so hat man mit steigender Geschwindigkeit für die Equites-Sensoren deutlich geringere Äquivalenttemperaturen und somit auch teilweise eine unterschiedliche Bewertung des thermischen Komforts. Mögliche Gründe für die Diskrepanz bei höheren Geschwindigkeiten sind vielfältig. Ein möglicher Einflussfaktor ist, dass die Untersuchungen, wie bereits oben erwähnt, hier ohne Wärmeab-

gabe der TM durchgeführt wurde. Die Wärmeabgabe des TM führt zu leicht höheren Lufttemperaturen in der Umgebung des TM und somit auch zu etwas höheren Äquivalenttemperaturen. Dies alleine erklärt aber nicht die Abweichungen der Messergebnisse in der Äquivalenttemperatur von teilweise mehreren Kelvin bei den hohen Geschwindigkeiten. Hinzu kommt, dass die Equites-Sensoren nur lokal ein einer Stelle des Körperteils den thermischen Komfort bestimmen. Im Fall der IR-Thermografie hingegen wird der über die ganze Körperregion gemittelte und auf Basis dieses Flächenmittels der thermische Komfort berechnet. Wie die IR-Aufnahmen zeigen, ergeben sich große räumliche Temperaturgradienten an der TM-Oberfläche, die durch die lokale Messung mit den Equites-Sensoren nicht abgebildet werden. Der entscheidende Faktor jedoch scheint zu sein, dass die Equites-Sensoren die Äquivalenttemperaturen bei hohen Geschwindigkeiten unterschätzen, da die Sensoren für diesen Geschwindigkeitsbereich nicht kalibriert sind. Es wird daher auf eine Diskussion und Einordnung des thermischen Komforts auf Basis der mit den Equites-Sensoren ermittelten Äquivalenttemperaturen verzichtet. Trotzdem sind, wie in den Abbildungen zuvor, zur grundsätzlichen Orientierung die Komfortbereiche auch hier eingezeichnet. Da im Folgenden der Einfluss der Wärmestrahlung anhand des Unterschieds zwischen dem Fall mit und ohne Strahlungswärme diskutiert wird und er Einfluss der Geschwindigkeit bei beiden Messungen gleich sein sollte hat dies für die grundsätzliche Bewertung des Einflusses der Strahlung hier keinen Einfluss. Hierzu werden die Ergebnisse

Beginnen wollen wir mit der Ergebnisdiskussion für die Körperteilen, die direkt angeströmt werden und hier als erstes mit dem Kopf (Abb. 3.9 obere Reihe). Für den Kopf ist, im Fall mit und ohne Strahlung sowie für beide Temperaturbedingungen, ein kontinuierliches absinken der Äquivalenttemperatur mit steigender Geschwindigkeit ist zu beobachten. Jedoch erkennt man deutliche Unterschiede für die beiden Umgebungstemperaturen für die Äquivalenttemperaturdifferenz $\Delta\Theta$. Im Fall $T = 20^o$ C ergibt sich eine exponentielle Abnahme von $\Delta\Theta$ als Funktion der Geschwindigkeit. Hier ist für niedrige Geschwindigkeiten ein deutlicher Einfluss der IR-Strahlung auf die Äquivalenttemperatur mit $\Delta\Theta \approx 3.0$ K zu beobachten. Für den Geschwindigkeitsbereich bis $U_{\text{Ref}} \approx 0.75$ m/s nimmt die Differnz $\Delta\Theta$ mit einer durchschnittlichen Änderungsrate von $\partial\Delta\Theta/\partial U_{\text{Ref}} \approx 3.2$ Ks/m deutlich ab. Für Geschwindigkeiten $U_{\text{Ref}} > 0.75$ m/s ist die Änderungsrate $\partial\Delta\Theta/\partial U_{\text{Ref}} \approx 1.2$ Ks/m wieder deutlich geringer und gei einer Geschwindigkeit von $U_{\text{Ref}} \approx 2.0$ m/s ist die Äquivalenttemperatur für den Fall mit und ohne Strahlung nahezu gleich. Für die Temperaturrandbedingung $T = 17^o$ C ist für den Geschwindigkeitsbereich $U_{\text{Ref}} < 1.25$ m/s die Abnahme $\partial\Delta\Theta/\partial U_{\text{Ref}} \approx 1.0$ Ks/m und somit deutlich kleiner als im Fall $T = 20^o$ C. In der Folge ist sogar ein Anstieg von $\Delta\Theta$ zu beobachten. Das abweichende Verhalten für den $T = 17^o$ C im Vergleich zu $T = 20^o$ C lässt sich mit den vorliegenden Daten nicht eindeutig erklären. Für den Fall $T = 17^o$ C ist die Differenz $\Delta\Theta$ teilweise unterhalb der Messgenauigkeit der Sensoren, so dass eine Aussage über mögliche Ursachen schwierig ist. Jedoch ist, wie schon im Abschnitt zuvor vermutet, anzunehmen, dass die resultierenden Strömungszustände aus der Wechselwirkung der thermischen Auftriebsströmung und der Freistrahlen der Zuluft einen Einfluss auf den Wärmetransport und somit natürlich auch die Äquivalenttemperatur haben. Auch wenn hier das TM nicht direkt beheizt wurde, so kommt es doch durch die IR-Strahlung zu einem Aufheizen der schwarzen Oberfläche des TMs und somit auch zu einer thermisch induzierten Auftriebsströ-

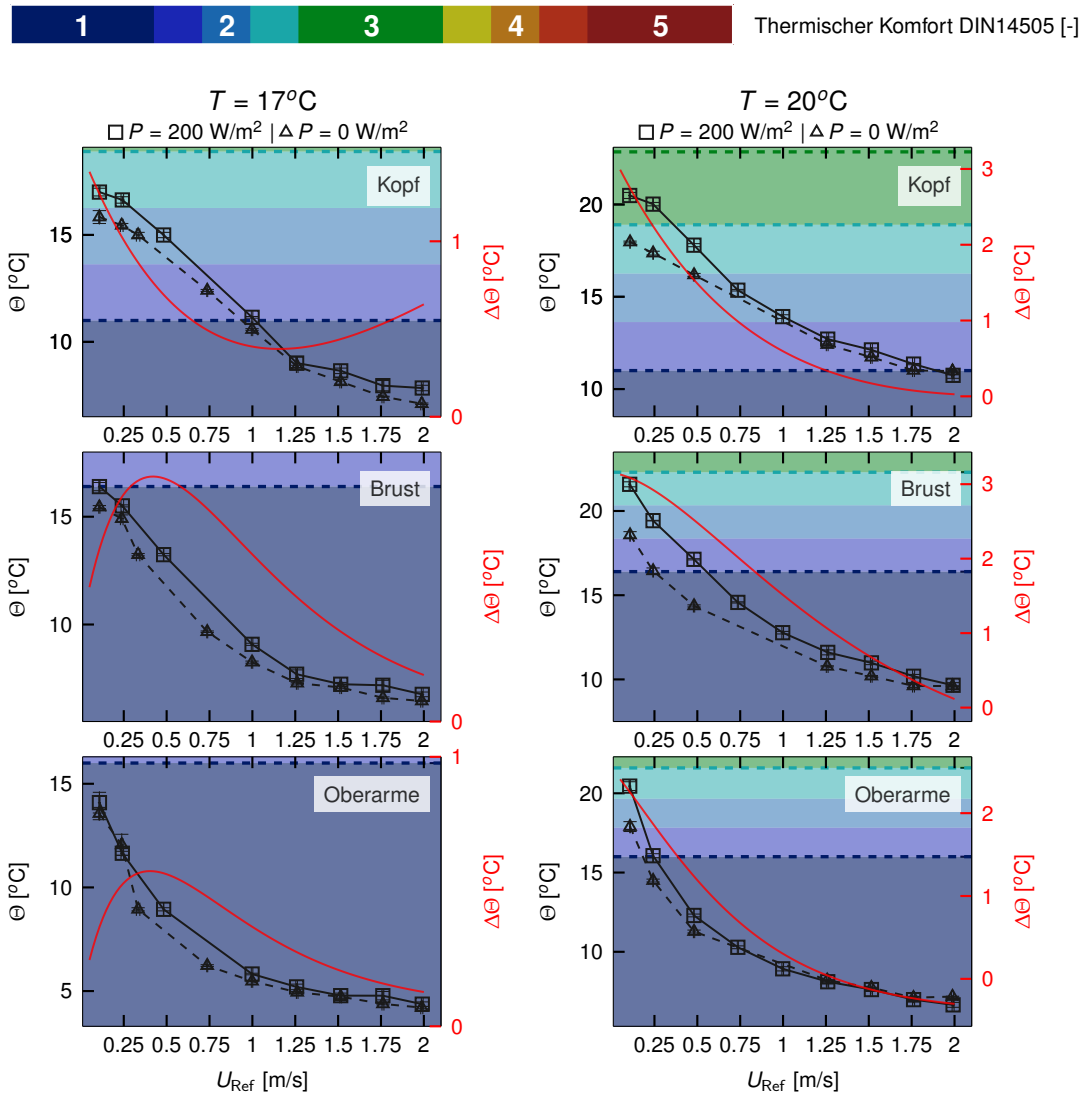


Abbildung 3.9: *Einfluss von Strahlungswärme auf die Äquivalenttemperatur* Θ *als Funktion der Referenzgeschwindigkeit* U_{Ref} *für* $T_{\text{U}} = T_{\text{A}} = 17^o$ *C und* $T_{\text{U}} = T_{\text{A}} = 20^o$ *C. Das Ergebnis bei einer Strahlungswärme von* 200 *W/m*^{2} *ist mit* □ *und der Referenzfall ohne Strahlung mit* △ *gekennzeichnet. Farblich unterlegt ist der Komfortbereich und die gestrichelten Linien kennzeichnen die Grenzen der einzelnen Bereiche. Das Körperteil, auf das sich die Abbildung bezieht, ist in der oberen rechten Ecke angegeben. Zusätzlich zeigt die rote Linie den Verlauf der Differenz* $\Delta\Theta$.

mung. Insbesondere für den Bereich in dem erzwungene und thermische Konvektion dann ungefähr gleich groß sind, kann dies unvorhersehbare Auswirkungen haben.

Für den Bereich der Brust (Abb. 3.9 mittlere Reihe) erhält man, wie auch für den Kopf, eine kontinuierliche Abnahme der Äquivalenttemperatur Θ bei steigender Referenzgeschwindigkeit U_{Ref}. Ferner ist für beide Temperaturbedingungen die Äquivalenttemperatur für den Fall mit IR-Strahlung fast immer größer als für den Fall ohne IR-Strahlung. Nur für die Parameterkombination $T = 20^o$ C und $U_{\text{Ref}} = 2.0$ m/s, wie

bereits schon am Kopf beobachtet, ist kein signifikanter Unterschied zu erkennen. Hinsichtlich $\Delta\Theta$ ist im Bereich der Brust für beide Temperaturniveaus eine kleiner werdende Differenz mit steigender Geschwindigkeit zu beobachten, wobei auch hier die Temperaturdifferenzen für den Fall $T = 20^o$ C deutlich größer sind im Vergleich zu $T = 17^o$ C. Zusätzlich fällt auf, dass im Brustbereich für $U_{\text{Ref}} > 0.5$ m/s ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen $\Delta\Theta$ und U_{Ref} existiert, wobei für $T = 20^o$ C dieser Zusammenhang sogar für den ganzen Temperaturbereich gilt sowie auch hier die Differenz und die Änderungsrate deutlich größer ist verglichen mit den Ergebnissen für $T = 17^o$ C. Für die Brust ergibt sich eine mittlere Änderungsrate für $T = 17^o$ C von $\partial\Delta\Theta/\partial U_{\text{Ref}} \approx 0.4$ Ks/m und für $T = 20^o$ C von $\partial\Delta\Theta/\partial U_{\text{Ref}} \approx 1.6$ Ks/m.

Im Bereich der Oberarme (Abb. 3.9 untere Reihe) erkennt man, wie auch bei der Brust, einen exponentieller Zusammenhang zwischen Äquivalenttemperatur und Referenzgeschwindigkeit. Bezüglich des Einflusses der IR-Strahlung ist auch hier wieder eine deutlich stärkere Ausprägung im Fall $T = 20^o$ C zu beobachten. Die hier gemessene maximale Differenz $\Delta\Theta \approx 2.3$ K ist deutlich größer als jene bei $T = 17^o$ C mit $\Delta\Theta \approx 0.5$ K. Ferner ist $\Delta\Theta$ im Fall für $T = 20^o$ C bei kleinen Geschwindigkeiten $U_{\text{Ref}} < 0.75$ m/s deutlich größer als für den Geschwindigkeitsbereich $U_{\text{Ref}} \geq 0.75$ m/s. Für $U_{\text{Ref}} \geq 0.75$ m/s ist $\Delta\Theta \approx 0$ K, sprich die IR-Strahlung führt hier zu keiner signifikanten Änderung der Äquivalenttemperatur. Für den Fall $T = 17^o$ C ergibt sich hinsichtlich $\Delta\Theta$ ein uneinheitliches Bild. Hier lässt sich für die beiden kleinsten Geschwindigkeiten kaum ein Einfluss der IR-Strahlung identifizieren. Für den mittleren Geschwindigkeitsbereich bis $U_{\text{Ref}} \approx 1.0$ m/s ist ein leichter Einfluss zu erkennen und für größere Geschwindigkeiten ist dann der Einfluss der IR-Strahlung auf den thermischen Komfort wieder vernachlässigbar. Insgesamt ist die Auswirkung der IR-Strahlung am Oberarm für $T = 17^o$ C sehr gering. Die hier bestimmte Differenz zur Referenzäquivlaenttemperatur $\Delta\Theta$ ist über den gesamten Geschwindigkeitsbereich immer kleiner 1 K.

Für den Bereich der nicht direkt von der Zuluft angeströmt wird ergeben sich abweichende Ergebnisse im Vergleich zu den Bereichen am Oberkörper der direkt durch die Zuluft angeblasen werden. Für den Fall $T = 17^o$ C (Abb. 3.10 linke Spalte) zeigt sich für die Unterarme ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen Äquivalenttemperatur und Referenzgeschwindigkeit für den Fall mit und ohne IR-Strahlung. Auch die Differenz $\Delta\Theta$ ist hier im Mittel, verglichen mit den anderen Körperregionen, am geringsten und ändert sich über den ganzen Geschwindigkeitsbereich kaum. Im Gegensatz hierzu hat man für den Bauch und den Oberschenkel im Bereich $U_{\text{Ref}} < 0.30$ m/s keine signifikante Beeinflussung der Äquivalenttemperatur. In der Folge nimmt dann auch für diese Körperregionen die Äquivalenttemperatur mit steigender Geschwindigkeit nahezu linear ab. Für Geschwindigkeiten $U_{\text{Ref}} > 1.25$ m/s sind jedoch deutliche Unterschiede für den Fall mit und ohne IR-Strahlung zu erkennen. Während im Fall ohne IR-Strahlung die Äquivalenttemperatur mit steigender Geschwindigkeit weiter kontinuierlich absinkt lässt sich für den Fall mit Strahlung ein signifikantes Ansteigen der Äquivalenttemperatur beobachten. Ein möglicher Grund für diesen Anstieg ist in der Tatsache zu finden, dass ein Teil der Luft, der auf die Brust trifft und sich dort erwärmt in Richtung Bauch und Oberschenkel abgelenkt wird. Dies hat zur Folge, dass dort die Oberflächentemperatur am TM ansteigt und man somit höhere Äquivalenttemperaturen hat. Für diese Vermutung spricht, dass dieser Effekt nur bei höheren Geschwindigkeiten auftritt, bei denen der nach unten gerichtete Impuls der abge-

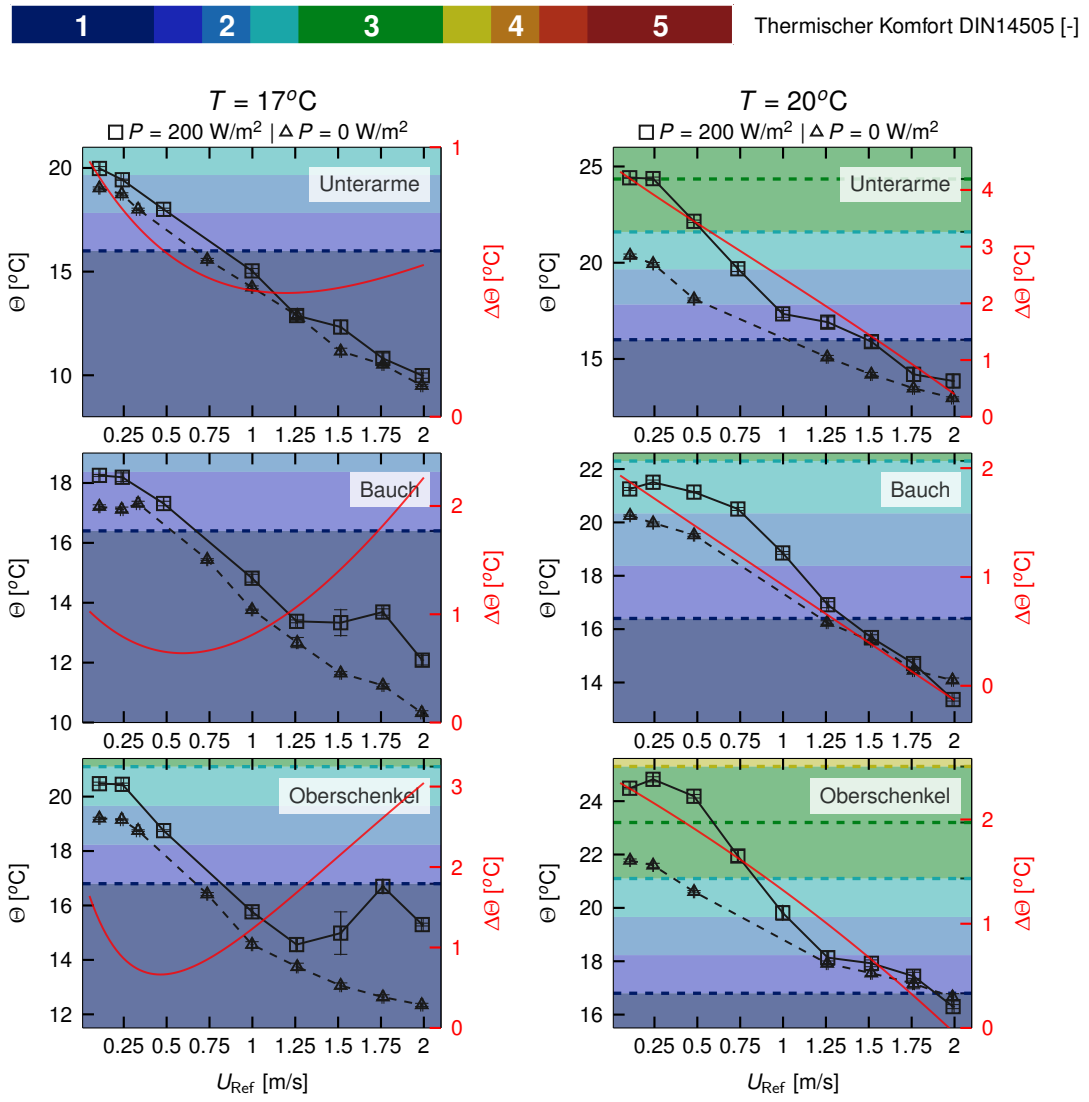


Abbildung 3.10: *Einfluss von Strahlungswärme auf die Äquivalenttemperatur Θ als Funktion der Referenzgeschwindigkeit U_{Ref} für $T_{\text{U}} = T_{\text{A}} = 17^o$ C und $T_{\text{U}} = T_{\text{A}} = 20^o$ C. Das Ergebnis bei einer Strahlungswärme von 200 W/m^2 ist mit □ und der Referenzfall ohne Strahlung mit △ gekennzeichnet. Farblich unterlegt ist der Komfortbereich und die gestrichelten Linien kennzeichnen die Grenzen der einzelnen Bereiche. Das Körperteil, auf das sich die Abbildung bezieht, ist in der oberen rechten Ecke angegeben. Zusätzlich zeigt die rote Linie den Verlauf der Differenz $\Delta\Theta$.*

lenkten Strömung groß genug ist die wärmere Luft aus Brustbereich in den Schoßbereich zu transportieren. Im Fall $T = 20^o$ C ist für die Unterarme, den Bauch und die Oberschenkel im Referenzfall ohne IR-Strahlung ein nahezu linearer Verlauf für die Äquivalenttemperatur zu erkennen. Für den Fall mit IR-Strahlung hingegen sind, im Vergleich zum Referenzfall deutlich erhöhte Äquivalenttemperaturen zu erkennen. Hier ergeben sich für die beiden niedrigsten Geschwindigkeiten für die Oberarme ein $\Delta\Theta > 4$ K und im Bereich Bauch sowie Oberschenkel ein $\Delta\Theta \approx 2$ K. Mit zunehmender Geschwindigkeit ist in der Folge eine lineare Abnahme von $\Delta\Theta$ zu beobachten.

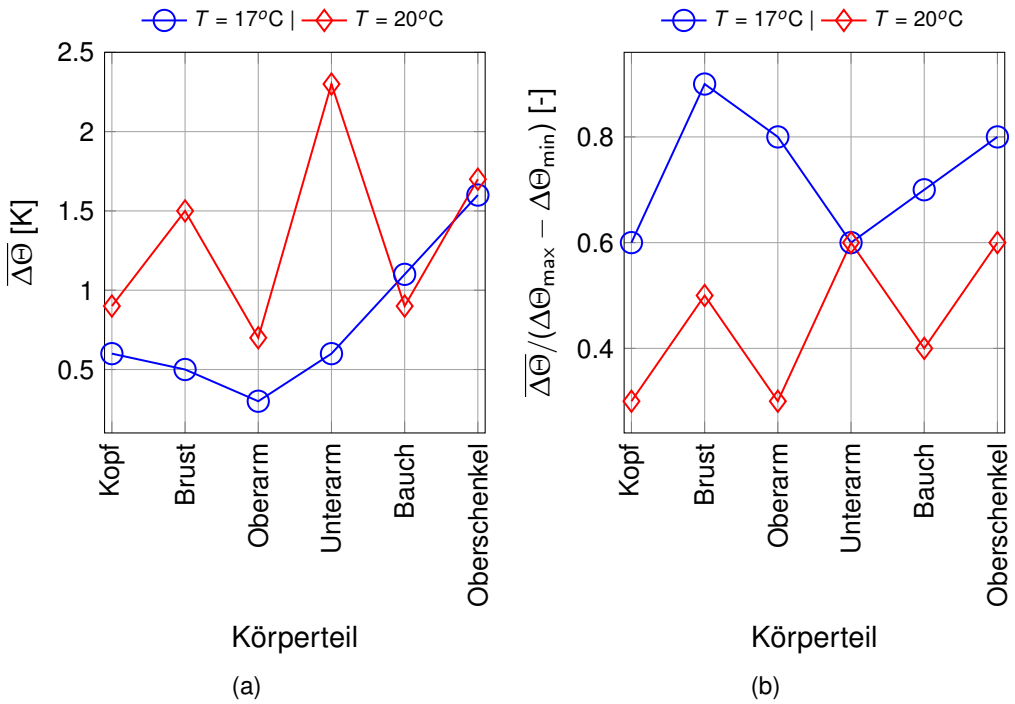


Abbildung 3.11: *(a) Mittlere Äquivalenttemperaturdifferenz $\overline{\Delta\Theta}$ und (b) Mittlere Äquivalenttemperaturdifferenz $\overline{\Delta\Theta}$ normiert auf den maximalen Unterschied $\Delta\Theta_{max} - \Delta\Theta_{min}$ als Funktion der einzelnen Körperregionen für die Temperaturrandbedingungen $T = 17^o$ C (○) und $T = 20^o$ C (◇).*

Im Fall der höchsten Geschwindigkeit $U_{Ref} \approx 2.0$ m/s kein oder nur noch ein geringer Einfluss der IR-Strahlung zu beobachten ist. Auch ist, im Gegensatz zu $T = 17^o$ C, für den Bauch und die Oberschenkel kein Anstieg der Äquivalenttemperatur bei größeren Geschwindigkeiten zu beobachten.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass für alle Körperregionen ein messbarer Einfluss der IR-Strahlung auf die Äquivalenttemperatur zu beobachten ist. Jedoch hängt die Änderung der Äquivalenttemperatur durch die IR-Strahlung stark von der Körperregion, der Geschwindigkeit und der Temperatur ab. Allgemein lässt sich aber festhalten, dass der Einfluss der IR-Strahlung für den Fall $T = 20^o$ C, insbesondere für den Bereich des Oberkörpers, deutlich stärker ist als im Fall $T = 17^o$ C. Um dies zu verdeutlichen ist in Abbildung 3.11a die über den gesamten Geschwindigkeitsbereich gemittelte Änderung der Äquivalenttemperatur aufgrund der IR-Strahlung $\overline{\Delta\Theta}$ für die einzelnen Körperbereiche dargestellt. Die Ergebnisse für die Temperaturrandbedingung $T = 17^o$ C sind mit einem Kreis und jene für $T = 20^o$ C mit einer Raute gekennzeichnet. Hier zeigt sich deutlich, dass im Mittel der Einfluss der IR-Strahlung auf die Äquivalenttemperatur für den Kopf, die Brust und die Arme im $T = 20^o$ C deutlich größer ist als für $T = 17^o$ C. Der Unterschied in der Äquivalenttemperatur zwischen den beiden Temperaturrandbedingungen beträgt für den Kopf und die Oberarme ungefähr 0.4 K. Für die Differenz an der Brust mit einem 1.0 K, und insbesondere für den Unterarm mit 1.7 K, sind die Unterschiede jedoch deutlich größer. Für die Oberschenkel und

den Bauch hingegen ist kaum noch ein Unterschied zu erkennen. Diese Körperteile werden nicht direkt vom Zuluftstrahl getroffen und zeigen daher bei gleicher Leistung an IR-Strahlung eine ähnliche Änderung der Äquivalenttemperatur. Diese Ergebnisse zeigen, dass im Bereich der direkten Anströmung keine allgemeingültige Aussage über die den Einfluss der Wärmestrahlen gemacht werden kann. Die Strömungszustände, die sich in diesem Bereich einstellen, und den Wärmetransport determinieren, hängen von einer Vielzahl von Parametern ab. Insbesondere die Wechselwirkung von erzwungener und thermischer Konvektion führt zu Strömungsstrukturen, die sich zeitlich wie räumlich stark ändern können und somit je nach Strömungszustand zu einem unterschiedlichen Wärmetransport an der TM-Oberfläche führen können. Neben der mittlere Änderung $\overline{\Delta\Theta}$ ist in Abbildung 3.11b die mittlere Änderung normiert auf die maximale Änderung $\Delta\Theta_{\mathsf{max}} - \Delta\Theta_{\mathsf{min}}$ innerhalb des hier untersuchten Geschwindigkeitsbereiches dargestellt. Diese Darstellung ist ein Maß für Änderung der Äquivalenttemperatur durch die IR-Strahlung als Funktion der Geschwindigkeitsänderung. Kleinere Werte deuten auf eine höhere und größere auf eine geringere Dynamik hin. Hier zeigt sich, dass bis auf die Unterarme die Dynamik für $T = 17^o$ C deutlich geringer ist als für $T = 20^o$ C. Dies gilt insbesondere für den Kopf, Brust und Oberarme. Hier ist der Einfluss der IR-Strahlung auf die Äquivalenttemperatur bei $T = 20^o$ C im Mittel nicht nur deutlich stärker ausgeprägt, sondern auch die Dynamik ist deutlich größer, sprich es gibt eine stärke Abhängigkeit von der Geschwindigkeit im Vergleich zu $T = 17^o$ C. Einen deutlichen Unterschied in der Dynamik ist auch für den Bauch zu erkennen, obwohl hier $\overline{\Delta\Theta}$ für beide Temperaturen fast identisch ist.

4 Subjektiver Komfort

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Probandentests zur Bestimmung der subjektiven Komfortparameter vorgestellt. Das Kapitel ist in zwei Abschnitte unterteilt. Im ersten Abschnitt 4.1 wird die Versuchsdurchführung erläutert und im zweiten Teil (4.2) werden die Ergebnisse der Probandenbefragung dargestellt. Es folgt ein erstes Fazit zu den Ergebnissen im Abschnitt 4.3 sowie eine Bewertung der Ergebnisse im Abgleich mit den Daten zum objektiven Komfort im Kapitel 5.3.

4.1 Versuchsdurchführung

Zur Untersuchung des subjektiven Komforts in einem klimatisierten PKW wurden in der beschriebenen EPK Probandenversuche durchgeführt. Die Versuche zeichnen sich durch eine hohe Standardisierung aus. Es wurden jeweils vier Klimafälle realisiert (s. Tabelle 4.1), für deren Abfolge zwei Varianten (A und B) gewählt wurden, um Reihenfolgeeffekte zu kontrollieren. Bei konstanter Temperatur von $T_{\mathrm{U}} = 26^{o}$ C und Luftfeuchtigkeit von $rF = 45\%$ wurden unterschiedlich starke Luftgeschwindigkeiten vorgegeben: $U_{\mathrm{Ref}} = 0.5$ m/s, $U_{\mathrm{Ref}} = 1.0$ m/s, $U_{\mathrm{Ref}} = 1.5$ m/s und $U_{\mathrm{Ref}} = 2.0$ m/s.

In der Versuchsdurchführung konnten die geplanten Werte der Klimaparameter gut realisiert werden. Für Umgebungs- und Zulufttemperatur sowie Luftgeschwindigkeit ergaben sich lediglich geringe Abweichungen von $\partial T \approx 0.2^{o}$ C bzw. $\partial U_{\mathrm{Ref}} \approx 0.1$ m/s. Für die Luftfeuchtigkeit zeigten sich Schwankungen im Bereich von etwa $\pm 5\%$. Alle Untersuchungen wurden für den Fall mit dem höheren Turbulenzgrad von $I = 32\%$ durchgeführt.

Stichprobe

Insgesamt 13 Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen des DLR Standorts Göttingen (8 Männer, 5 Frauen) wurden zum thermischen Komfort in der EPK befragt. Zwei Personen zwischen 18 und 30 Jahren, sechs Personen zwischen 31 und 45 Jahren sowie fünf Personen älter als 46 Jahre nahmen teil. Sie trugen am Versuchstag leichte Arbeitskleidung (entspricht etwa 0.6 clo).

Parameter	Fall 1-1	Fall 1-2	Fall 1-3	Fall 1-4
Variante A | U_{Ref} [m/s]	0.5	2.0	1.5	1.0
Variante B | U_{Ref} [m/s]	1.0	1.5	2.0	0.5

Tabelle 4.1: *Versuchsdesign für Probandenversuche mit untersuchten Klimafällen in zwei Varianten (A und B).*

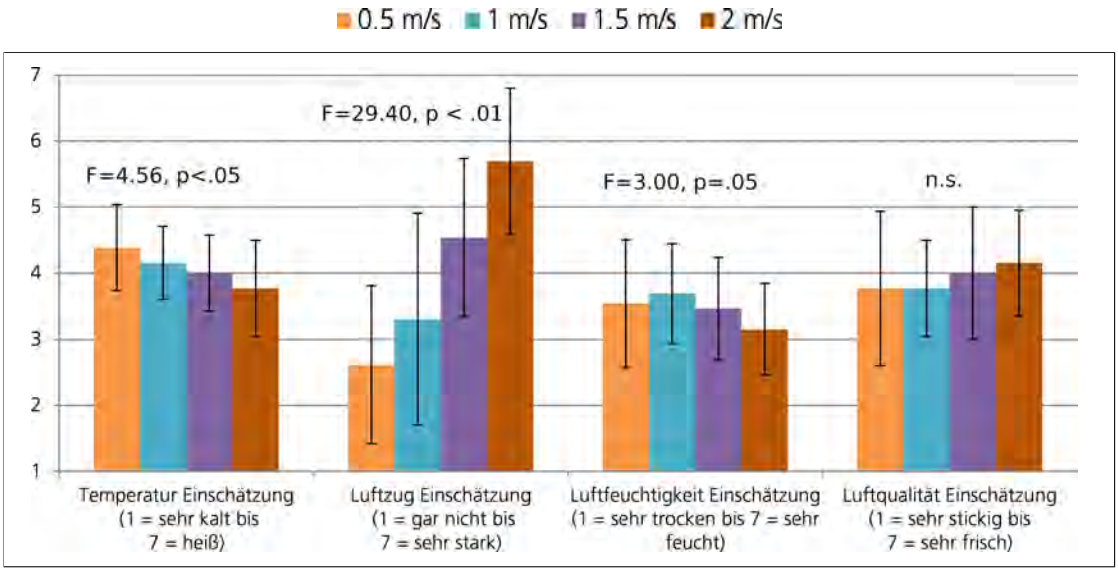


Abbildung 4.1: *Klimaparametereinschätzungen*

Versuchsablauf

Zu Versuchsbeginn nahmen die Probanden in der EPK Platz. Sie wurden mit dem Ablauf und der Beantwortung des Fragebogens auf Tablets vertraut gemacht und beantworteten Fragen zu ihrer Person und ihren Klimapräferenzen hinsichtlich Temperatur und Luftzug. Währenddessen wurde die erste Versuchsbedingung eingestellt. Im Laufe der Versuchsdurchführung machten die Probanden pro Klimafall nach einer fünfminütigen Einwirkzeit des Klimas bei andauernder Klimatisierung Angaben zum Erleben des Klimas und zu ihrem aktuellen Befinden ($5 - 10$ Minuten). Insgesamt dauerte ein Versuch etwa 60 Minuten.

In den Versuchen kam ein etabliertes Fragebogeninventar zur Erfassung des thermischen Komforts zum Einsatz [62]. Die erhobene „Subjektive Klimabewertung“ setzte sich aus einer Einschätzung der erlebten Klimasituation (Intensität/Qualität des Parameters) sowie einer Klimabewertung (Komfortbewertung des Klimas) zusammen. Diese wurden als Gesamteindruck sowie für die Parameter Temperatur und Luftzug jeweils auch lokal pro Körperbereich abgefragt. Um den Einfluss stabiler Merkmale auf den subjektiven thermischen Komfort zu untersuchen, wurden demographische Variablen zur Person sowie das Merkmal Klimapräferenzen erfasst.

4.2 Komfortbeurteilung

Globale Komfortbeurteilung

Dargestellt sind im Folgenden zentrale Ergebnisse des Probandenversuchs, die Aussagen für die Komfortbewertung der im Hinblick auf die Luftgeschwindigkeit variierten Fälle liefern. Wie Abbildung 4.1 zu entnehmen ist, wird die Temperatur mit zunehmender Luftgeschwindigkeit als kühler eingeschätzt eingeschätzt (F-Test = Mittelwertver-

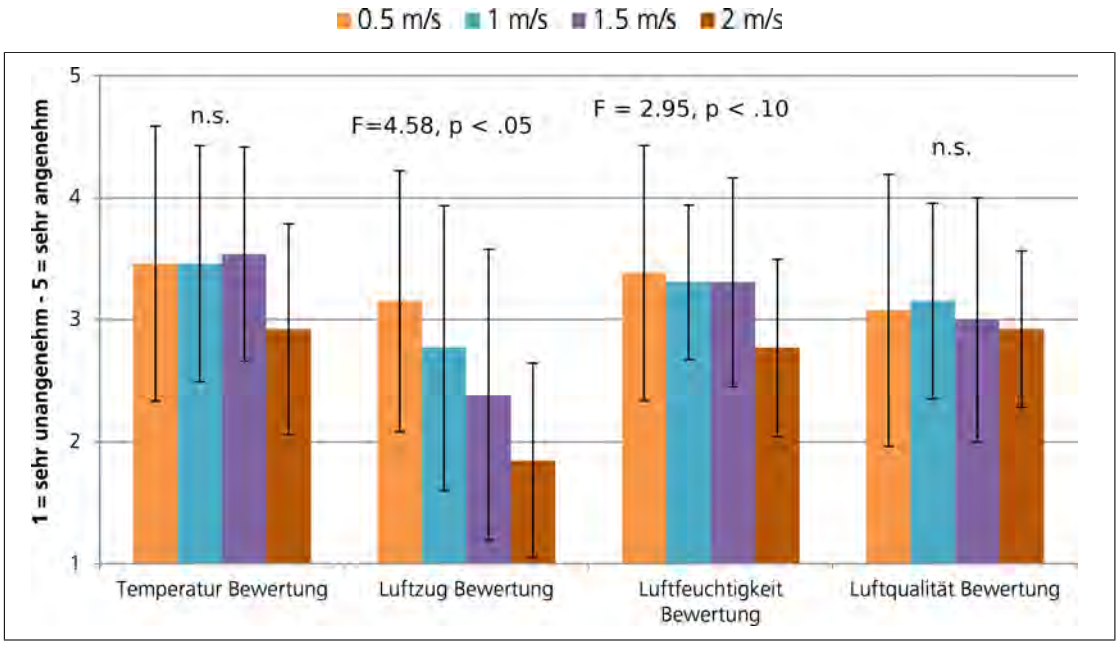
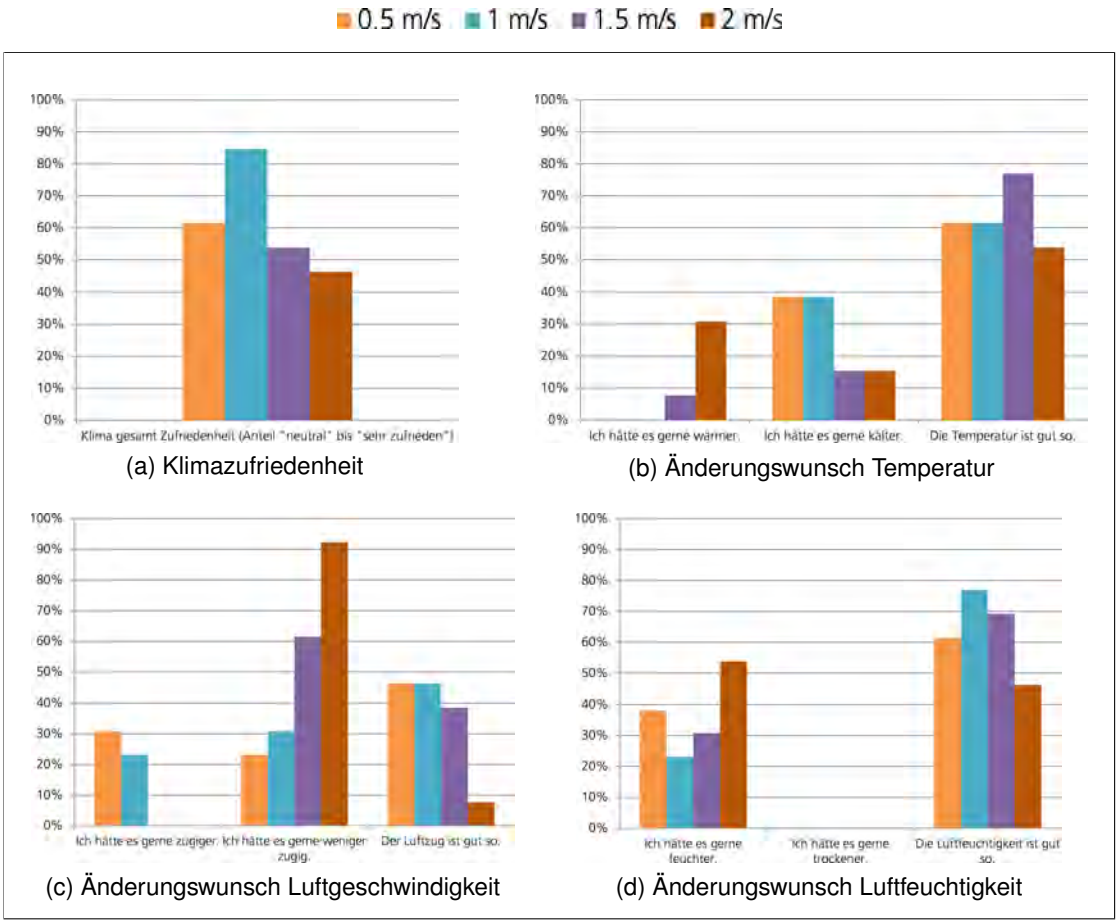


Abbildung 4.2: *Klimaparameterbewertung*

gleich durch Varianzanalyse, p = Signifikanzniveau, n.s. = non significant [63]). Dabei ergibt sich ein Minimum für den Fall $U_{\text{Ref}} = 2.0$ m/s, das allerdings noch als durchschnittlich temperiert eingestuft wird. Der Luftzug wird mit objektiv höherer Luftgeschwindigkeit als stärker erlebt. Hier liegt der Maximalwert für den Fall $U_{\text{Ref}} = 2.0$ m/s bei einer Skalenausprägung von „stark“. Die Luftfeuchtigkeit wird für alle Fälle fast einheitlich als durchschnittlich eingeschätzt, dabei weicht der Wert für $U_{\text{Ref}} = 2.0$ m/s als niedrigster Feuchtigkeitswert etwas ab. Die Luftqualität wird in allen vier Fällen gleich – „neutral“ eingeschätzt und ist der einzige Parameter, für den sich keine signifikanten Unterschiede in der Einschätzung der Zugluftfälle zeigen. In Abbildung 4.2 sind die Komfortbewertungen für die einzelnen Klimaparameter dargestellt. Im Hinblick auf die Temperaturbewertung ergeben sich keine signifikanten Unterschiede: Alle Fälle werden mit „eher angenehmer“ Temperatur bewertet. Rein deskriptiv liegt die Komfortbewertung der Temperatur für den Fall $U_{\text{Ref}} = 2.0$ m/s mit starkem Luftzug bei „neutral“ und hat damit den niedrigsten Wert. Das Komforterleben des Luftzugs nimmt mit zunehmender Luftzugstärke ab – es bestehen bedeutsame Unterschiede für die Zufriedenheit mit der Zugluft. Das Minimum liegt hier für den Fall $U_{\text{Ref}} = 2.0$ m/s bei „unangenehm“. Die Luftfeuchtigkeit wird überwiegend als „eher angenehm“ erlebt. Tendenziell weniger angenehm fällt sie lediglich für den Fall $U_{\text{Ref}} = 2.0$ m/s aus. Für das Erleben der Luftqualität zeigen sich keine Unterschiede zwischen den untersuchten Luftgeschwindigkeitsfällen. Bei allen vier Fällen liegt es im Bereich von „neutral“.

Ergänzend zur Beurteilung des Klimas hinsichtlich der einzelnen Parameter wurde auch der erlebte Gesamtkomfort als Klimazufriedenheit erhoben. Ausgewertet sind hier die Bewertungen von Versuchspersonen, die das Klima als „neutral“ bis „sehr zufrieden“ bewerten (Abb. 4.3a). Das Ergebnis zeigt, dass dieser Anteil von Probanden über alle vier untersuchten Zugluftfälle hinweg zwischen 46% und 85% liegt. In der Raumklimaforschung ist ein Raumzustand als komfortabel und behaglich definiert,



(a) Klimazufriedenheit

(b) Änderungswunsch Temperatur

(c) Änderungswunsch Luftgeschwindigkeit

(d) Änderungswunsch Luftfeuchtigkeit

Abbildung 4.3: *(a) Klimazufriedenheit und Änderungswünsche bezüglich (b) der Temperatur, (c) der Luftgeschwindigkeit sowie (d) der Luftfeuchte.*

wenn 90% der Personen die Bedingungen als akzeptabel bezeichnen. Wenn diese Orientierung aus der Forschung zum thermischen Komfort in Gebäuden nach Fanger [12] auf das Auto übertragen wird, ist mit dem Klimafall $U_{\text{Ref}} = 1.0$ m/s eine annähernd behagliche Klimasituation hergestellt. Hier zeigt sich der absolut höchste Anteil zufriedener Versuchspersonen von 85% und im Vergleich ein Komfortvorteil gegenüber den anderen Zugluftfällen.

Weiterhin sind 61.5% der Probanden mit schwacher Luftgeschwindigkeit von $U_{\text{Ref}} = 0.5$ m/s bei der herrschenden warmen Temperatur von 26^o C zufrieden. Im Vergleich niedriger liegt der Anteil Zufriedener für die Fälle mit höherer Luftgeschwindigkeit von $U_{\text{Ref}} = 1.5$ m/s und $U_{\text{Ref}} = 2.0$ m/s. Bei stärkster Zugluft von $U_{\text{Ref}} = 2.0$ m/s bewerten weniger als die Hälfte der befragten Personen das Klima als angenehm.

Für die weitere Aufklärung des subjektiven Komforterlebens wurden Änderungswünsche der Versuchspersonen bezüglich der Klimaparameter Temperatur, Luftzug und Luftfeuchte in der Kabine erfragt (Abb. 4.3). Pro Klimafall kann aufgezeigt werden, wieviel Prozent der Versuchspersonen sich eine wärmere bzw. kältere Temperatur (Abb. 4.3b), stärkeren oder schwächeren Luftzug (Abb. 4.3c) bzw. mehr oder weniger Luftfeuchtigkeit (Abb. 4.3d) wünschten. Es bestand auch die Möglichkeit anzugeben,

dass kein Veränderungsbedarf vorliegt.

Aus Abbildung 4.3b ist ersichtlich, dass der größte Anteil der Probanden mit der Temperatur im Fall $U_{\text{Ref}} = 1.5$ m/s zufrieden ist (knapp 80%). Bei der höchsten Luftgeschwindigkeit mit $U_{\text{Ref}} = 2.0$ m/s ist der Anteil der Befragten, die die Temperatur so belassen möchten, am niedrigsten und liegt absolut über 50%. Veränderungswünsche hinsichtlich einer kälteren Temperierung bestehen für die beiden Fälle mit schwächerem Luftzug. Diesen Änderungswunsch äußern jeweils knapp 40%. Bei der höchsten Luftgeschwindigkeit äußern 30% der Versuchspersonen den Wunsch nach mehr Wärme. Der Bedarf für mehr Kälte liegt für diesen Fall entsprechend kaum vor.

Bei der höchsten Luftgeschwindigkeit wünschen über 90% der Versuchspersonen einen geringeren Luftzug (Abb. 4.3c) und es zeigen sich entsprechend kaum Zufriedene mit diesem Fall. Weiterhin geben bei $U_{\text{Ref}} = 1.5$ m/s etwa 60% an, dass der Luftzug zu stark ist. Der Wunsch nach einem stärkeren Luftzug besteht nur für die Fälle mit geringer Luftgeschwindigkeit von $U_{\text{Ref}} = 0.5$ m/s und $U_{\text{Ref}} = 1.0$ m/s.

In den drei Fällen mit einer Luftgeschwindigkeit von $U_{\text{Ref}} = 0.5$ m/s bis $U_{\text{Ref}} = 1.5$ m/s ist der größte Anteil der Befragten zufrieden mit der Luftfeuchte (Abb. 4.3d). Mehr Luftfeuchtigkeit wird für den stärksten Luftzug gewünscht. Bei $U_{\text{Ref}} = 2.0$ m/s hätten über 50% der Probanden es gerne feuchter, ansonsten sind die Testpersonen größtenteils zufrieden mit der Luftfeuchtigkeit in der Kabine. Trockener sollte es aber in keinem Fall werden.

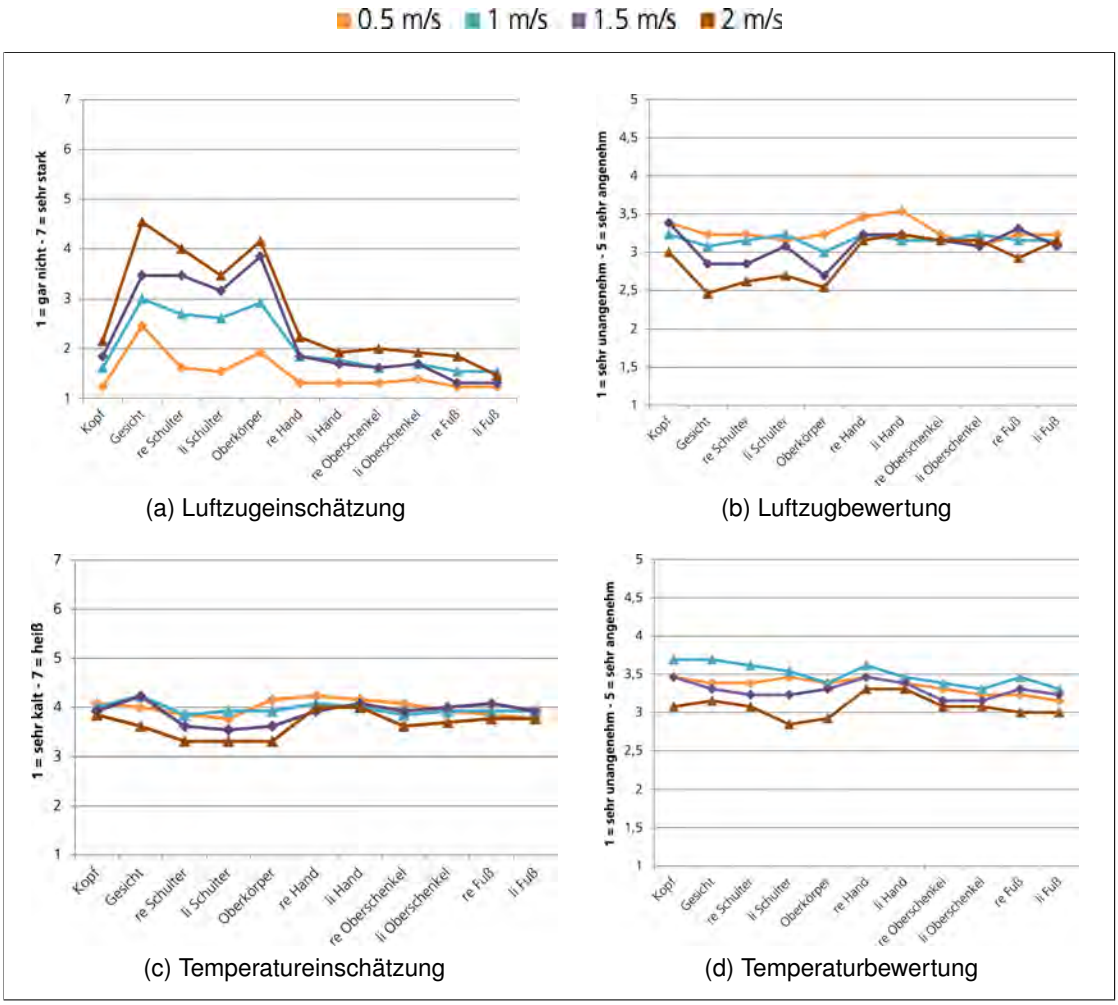
Lokale Komfortbeurteilung

Die weiteren Ergebnisse betreffen die Klimabeurteilungen für einzelne Körperbereiche. Auch hier wird zum einen die erlebte Ausprägung des Parameters und zum anderen die Komfortbewertung berichtet.

Der Luftzug wird insgesamt am oberen Teil des Körpers am stärksten wahrgenommen, wobei die Beurteilungen für die Fälle mit höheren Luftgeschwindigkeiten stärker und für die niedrigste Luftgeschwindigkeit nur schwach ausfallen (Abb. 4.4a). Am stärksten wird der Luftzug im Bereich des Gesichtes und des Oberkörpers eingeschätzt. Von Hand bis Fuß abwärts wird ein einheitlich schwacher Luftzug erlebt. Diese Beurteilungen entspricht den Erwartungen, da die Ausrichtung der Luftausströmer in der EPK so konfiguriert ist, dass der Freistrahl an Frischluft primär den Oberkörper trifft.

Obwohl sich für die Einschätzung der Luftzugstärke (Abb. 4.4a) deutliche Unterschiede zwischen Ober- und Unterkörper zeigen, besteht für die Bewertung der Luftzugstärke insgesamt betrachtet ein einheitlicheres Bild (Abb. 4.4b). Im Einzelnen zeigt sich dies für die Fälle mit geringer Luftgeschwindigkeit ($U_{\text{Ref}} = 0.5$ m/s und $U_{\text{Ref}} = 1.0$ m/s). Hier wird über alle Körperbereiche hinweg ein gleich verlaufend durchschnittliches Komforterleben deutlich. Bei stärkerem Luftzug von $U_{\text{Ref}} = 1.5$ m/s und vor allem bei $U_{\text{Ref}} = 2.0$ m/s wird der Luftzug am Gesicht und am Oberkörper etwas weniger komfortabel als „neutral“ bis „eher unkomfortabel“ erlebt.

Hinsichtlich der Temperatureinschätzung pro Körperbereich liegen die Werte insgesamt zwischen „durchschnittlich“ und „leicht warm“. Dabei werden kaum Unterschiede zwischen den Körperbereichen deutlich. Für die Fälle mit einer hohen Geschwindigkeit von $U_{\text{Ref}} = 1.5$ m/s und $U_{\text{Ref}} = 2.0$ m/s zeigen sich im oberen Körperbereich, vor



(a) Luftzugeinschätzung

(b) Luftzugbewertung

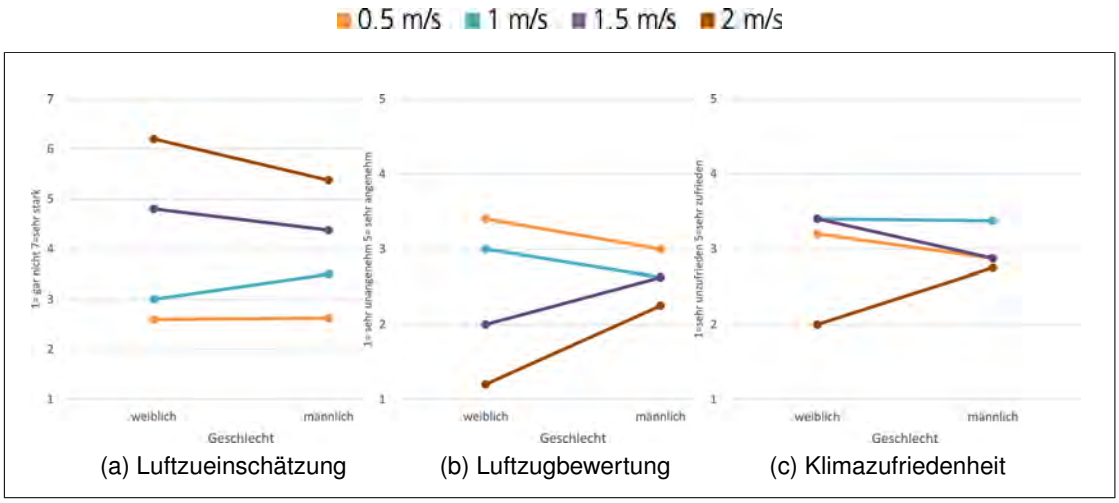
(c) Temperatureinschätzung

(d) Temperaturbewertung

Abbildung 4.4: *(a) Luftzugeinschätzung, (b) Luftzugbewertung, (c) Temperatureinschätzung und (d) Temperaturbewertung der einzelnen Körperbereiche.*

allem direkt für die Schultern und den Oberkörper, die niedrigsten Einschätzungen auf einem durchschnittlichen Niveau.

Die Bewertung der Temperatur für die einzelnen Körperbereiche fällt ähnlich der Temperatureinschätzung eher einheitlich aus (Abb. 4.4d). Die Temperatur wird tendenziell als angenehm empfunden. Abweichungen zeigen sich für den Fall mit einer Luftgeschwindigkeit von $U_{\text{Ref}} = 1.0$ m/s. Für Kopf und Gesicht geben die Versuchspersonen hier den höchsten Komfort an – leichter Luftzug wirkt hier komfortabel. Am wenigsten angenehm wird der Fall mit $U_{\text{Ref}} = 2.0$ m/s erlebt. Die niedrigsten Komfortbewertungen liegen hier für die linke Schulter und den Oberkörper vor, wobei das Temperaturerleben insgesamt dennoch als „neutral“ bis „eher komfortabel“ bewertet wird.



(a) Luftzueinschätzung (b) Luftzugbewertung (c) Klimazufriedenheit

Abbildung 4.5: *(a) Luftzugeinschätzung, (b) Luftzugbewertung und (c) Klimazufriedenheit nach Geschlecht.*

Differentielle Effekte

Geschlechtsunterschiede

Differentielle Analysen des Luftzugkomforts und der Klimazufriedenheit liegen für das Merkmal Geschlecht vor. Bei beiden Geschlechtern zeigt sich, dass die Luftzugstärke der Fälle entsprechend der objektiven Unterschiede abgestuft beurteilt wird (Abb. 4.5a). Frauen schätzen die Fälle mit stärkerem Luftzug jedoch extremer ein als Männer. Bei einer Geschwindigkeit von $U_{\text{Ref}} = 2.0$ m/s empfinden Frauen den Luftzug als deutlich stark. Im Fall $U_{\text{Ref}} = 0.5$ m/s beurteilen Frauen und Männer den Luftzug vergleichbar als schwach. Darüber hinaus ergeben sich für Frauen mehr Unterschiede in der Bewertung des Komforts als für Männer (Abb. 4.5b). Männer erleben den Luftzug insgesamt als durchschnittlich angenehm. Frauen erleben leichteren Luftzug ($U_{\text{Ref}} = 0.5$ m/s und $U_{\text{Ref}} = 1.0$ m/s) als angenehm und damit positiver als Männer. Die Fälle mit stärkerem Luftzug werden hingegen von Frauen im Vergleich als deutlich unkomfortabler beurteilt. Der Fall $U_{\text{Ref}} = 2.0$ m/s erhält von ihnen sogar die Luftzugbewertung „sehr unangenehm“.

Weiterhin wird bei der Bewertung des Klimas insgesamt deutlich, dass Männer überwiegend durchschnittlich mit der Klimatisierung zufrieden sind (Abb. 4.5c). Eine Ausnahme stellt die Bedingung $U_{\text{Ref}} = 1.0$ m/s dar. Sie wird von ihnen am positivsten mit etwas überdurchschnittlicher Zufriedenheit bewertet. Frauen bewerten das Klima in drei der untersuchten Fälle ($U_{\text{Ref}} = 0.5$ m/s, $U_{\text{Ref}} = 1.0$ m/s, $U_{\text{Ref}} = 1.5$ m/s) mit etwas überdurchschnittlicher Zufriedenheit. Unter der Bedingung mit der stärksten Zugluft bei $U_{\text{Ref}} = 2.0$ m/s sind Frauen jedoch unzufrieden mit dem Klima in der EPK.

Klimapräferenzen im Zusammenhang mit Klimazufriedenheit

Zur weiteren Analyse individueller Unterschiede wurden als stabil anzusehende Klimapräferenzen der Versuchspersonen erfasst, da diese Klimabeurteilungen beein-

flussen können [64]. In diesem Zusammenhang wurden die Werte über alle vier Zugluftfälle hinweg gemittelt. Generell zeigt sich, dass die ermittelten Korrelationen zwischen Klimapräferenzen und Klimabewertungen mit zunehmender Luftgeschwindigkeit des betrachteten Falls deutlicher ausfallen. Im Einzelnen wird deutlich, dass Personen, die Wärme präferieren, den Luftzug als tendenziell weniger angenehm beurteilen ($r = -.48$, $p < .10$; r = Korrelationskoeffizient, Maß für den Grad des linearen Zusammenhangs; p = Signifikanzniveau [63]). Mit der Temperaturbewertung zeigt sich hingegen keine bedeutsame Korrelation. Für den Zusammenhang mit der Klimazufriedenheit ergibt sich, dass die Klimabedingungen in der EPK von Personen, die Wärme präferieren, als weniger zufriedenstellend empfunden werden ($r = -.59$, $p < .05$). Für Personen, die Luftzug präferieren, besteht ein bedeutsamer Zusammenhang mit der Klimazufriedenheit in positiver Richtung ($r = .62$, $p < .05$). So wird bei hoher Präferenz für Luftzug das Klima auch als angenehmer erlebt. Damit einhergehend besteht erwartungskonform eine bedeutsame positive Korrelation zwischen der Vorliebe für Luftzug und der Luftzugbewertung ($r = .81$, $p < .01$). Zur Temperaturbewertung liegt auch hier kein signifikanter Zusammenhang vor.

4.3 Fazit

Die Untersuchung des subjektiven Luftzugkomforts erfolgte, um bisher geltende Empfehlungen für die Luftgeschwindigkeit im PKW zu prüfen. Unter anderem wurde erwartet, dass bei höheren Temperaturen im Fahrzeug eine höhere Toleranz für größere Luftgeschwindigkeiten beziehungsweise eine bessere Komfortbewertung für stärkeren Luftzug vorliegt [65]. Die Ergebnisse basieren auf einer Probandenstudie mit einer Stichprobe von $N = 13$ und vier unterschiedlichen Luftgeschwindigkeiten. Die getroffenen Aussagen bieten erste Hinweise für die Klimabewertung von Zugluft im PKW bei einer Umgebungs- und Zulufttemperatur von 26^o C. Es zeigte sich, dass in den Probandenversuchen in der EPK, bezogen auf Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftqualität, ein durchschnittlich komfortables Klima vorherrschte. Die gewählten Luftgeschwindigkeitsfälle bedingten jedoch unterschiedliches Komforterleben.

Ein zentrales Ergebnis ist, dass Zugluft mit $U_{\text{Ref}} = 1.0$ m/s als behaglich empfunden wurde. Für die schwächere Beströmung mit $U_{\text{Ref}} = 0.5$ m/s zeigte sich eine ebenfalls positive Komfortbewertung, die jedoch im Vergleich etwas niedriger ausfiel. Bei stärkerem Luftzug mit $U_{\text{Ref}} = 1.5$ m/s und vor allem bei $U_{\text{Ref}} = 2.0$ m/s wurde das Klima aufgrund der starken Luftströmung als unkomfortabler beurteilt (nur $54\ \%$ bzw. $46\ \%$ Zufriedene). Nach ihren Änderungswünschen hinsichtlich des Klimas befragt, wünschten über $90\ \%$ der Versuchspersonen für den Fall $U_{\text{Ref}} = 2.0$ m/s eine niedrigere Luftgeschwindigkeit. Der Wunsch nach mehr Luftzug bestand nur für die beiden niedrigsten Luftgeschwindigkeit $U_{\text{Ref}} = 0.5$ m/s und $U_{\text{Ref}} = 1.0$ m/s.

Die Komfortbewertung für die einzelnen Körperregionen fiel unterschiedlich aus: Die direkte Anströmung an Gesicht und Oberkörper wirkte weniger komfortabel in den Fällen mit stärkerer Zugluft, lag dabei aber auf einem durchschnittlichen Niveau. Das Klima an Beinen und Füßen wurde hingegen einheitlich als eher angenehm erlebt. Die Temperaturbewertung lag mit einer Abweichung in allen Fällen für alle Körperbereiche auf einem leicht überdurchschnittlichen Niveau. Bei $U_{\text{Ref}} = 2.0$ m/s zeigte sich am Oberkörper etwas schwächere Zufriedenheit mit der Temperatur.–

Bei der Interpretation der Ergebnisse zu den differentiellen Merkmalen (Geschlecht, Klimapräferenzen) ist die geringe Größe der Untergruppen zu beachten. Die ermittelten Tendenzen liefern dennoch vielversprechende Hinweise. So variierten die Beurteilungen des Klimas von Frauen stärker als die der Männer. Schwacher Luftzug wird von ihnen angenehmer, stärkerer Luftzug unangenehmer erlebt. Für den Fall $U_{\text{Ref}} = 2.0$ m/s wird von Frauen deutliches Unbehagen berichtet. Weiterhin erlebten Personen, die warme Temperaturen präferieren, die Klimafälle aufgrund der Luftzugbedingungen unangenehmer als andere. Hingegen empfanden luftzugpräferierende Probanden die Klimafälle als komfortabler.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass eine etwas höhere Luftgeschwindigkeit $U_{\text{Ref}} \geq 1.0$ m/s bei einer wärmeren Temperatur von 26^o C komfortabel empfunden wird. Bei Ausrichtung der Luftauslässe auf den Oberkörper ist mit Komfortnachteilen ebendort zu rechnen.

5 Bewertung und Zusammenfassung

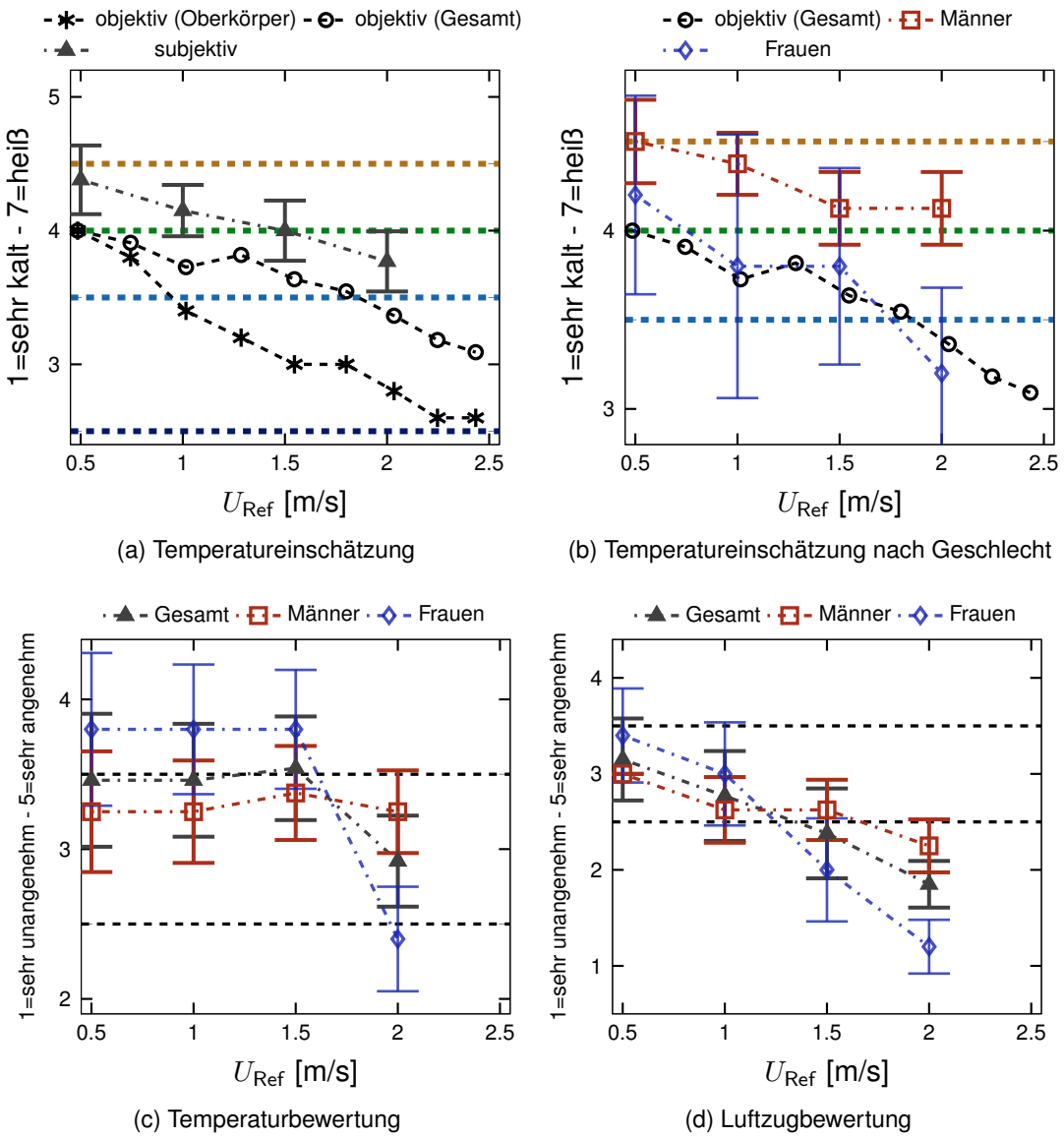
Im Rahmen der hier durchgeführten Studie wurde untersucht wie sich hohe Luftgeschwindigkeiten auf den thermischen Komfort in einem PKW auswirken. Die Untersuchung basiert auf der These, dass der Luftzug in einem PKW anders wahrgenommen wird sowie deutlich höhere Luftgeschwindigkeiten als angenehm eingeschätzt werden im Vergleich zu Räumen oder anderen Transportmitteln. Hierzu wurde der objektive thermische Komfort nach EN ISO14505 als Funktion der Temperatur, der Luftgeschwindigkeit und des Turbulenzgrads erfasst und bewertet. Zusätzlich wurde in dieser Untersuchung eine Probandenstudie mit einer Stichprobe von $N = 13$ Personen durchgeführt. Die Probandentests mit der relativ geringen Teilnehmerzahl dienten als Voruntersuchung, um mögliche Tendenzen hinsichtlich des Komforts bei Zugluft zu identifizieren.

Das folgende Kapitel 5 ist in drei Abschnitte unterteilt: Im ersten Abschnitt (5.1) werden die Ergebnisse der Untersuchung des subjektiven und objektiven Komforts miteinander verglichen und diskutiert. Abschnitt 5.2 behandelt den Grenzbereich des Zugluftempfindens und abschließend werden im Abschnitt 5.3 die Ergebnisse in Relation zu aktuellen Normen gesetzt.

5.1 Vergleich und Bewertung subjektiver/objektiver Komfort

Zum Vergleich der Ergebnisse des subjektiven Komforts mit den Ergebnissen aus der Untersuchung zum objektiven Komfort sind in Abbildung 5.1 und 5.2 die wichtigsten Ergebnisse für den Klimafall bei isothermen Bedingungen 26^o C dargestellt. Die Abbildungen 5.1a und 5.1b zeigen die Einschätzung der Temperatur durch die Probanden sowie die Ergebnisse des objektiven thermischen Komforts als Funktion der Referenzgeschwindigkeit. Hierzu wurde – aus Gründen der Vergleichbarkeit der Ergebnisse – der objektive Komfort von der fünfteilige Bewertungsskala aus EN ISO14505 in eine äquidistante siebenteilige Skala, vergleichbar mit der Temperatureinschätzung aus der Untersuchung zum subjektiven Komfort, umgerechnet.

Der Vergleich der Temperatureinschätzung ist in Abbildung 5.1a dargestellt. Hier kennzeichnen die Sterne und die Kreise die objektive Temperatureinschätzung gemittelt für die obere Körperhälfte (Kopf, Brust, Bauch und Oberarm) sowie den Durchschnitt über alle gemessenen Körperzonen. Die über alle Probanden gemittelte subjektive globale Temperatureinschätzung ist durch die Dreiecke gekennzeichnet und die Fehlerbalken repräsentieren hier und in allen weiteren Abbildungen in diesem Abschnitt die jeweilige Standardabweichung. Für die subjektive und für die objektive Temperatureinschätzung zeigen die Ergebnisse einen Trend mit zunehmender Geschwindigkeit von neutral hin zum Bereich, in dem die Temperatur als kalt eingeschätzt wird. Der Verlauf der subjektiven Einschätzung deckt sich im Wesentlichen mit der über alle Körperzonen gemittelten objektiven Komfortbewertung, wobei über den



(a) Temperatureinschätzung

(b) Temperatureinschätzung nach Geschlecht

(c) Temperaturbewertung

(d) Luftzugbewertung

Abbildung 5.1: *Vergleich der subjektiven und objektiven Temperatureinschätzung (a) über alle Probanden gemittelt, (b) nach Geschlecht unterschieden sowie die subjektive Komfortbewertung für (c) die Temperatur und (d) den Luftzug.*

gesamten Geschwindigkeitsbereich die objektive Einschätzung um 0.25 Punkte niedriger ist und somit die Temperatur niedriger eingeschätzt wird. Jedoch ist die objektive Temperatureinschätzung nahezu kongruent mit den Bewertungen der weiblichen Probanden (◇) wie in Abbildung 5.1b zu erkennen ist. Letztendlich könnte man hier argumentieren, dass die Differenz zwischen der objektiven und globalen subjektiven Einschätzung sich darauf zurückführen lässt, dass zum einen die Stichprobe relativ klein ist und zum anderen weniger Frauen als Männer an den Probandentests teilgenommen haben, die die Temperatur für alle Geschwindigkeiten als kälter eingeschätzt haben als die männlichen Probanden. Um diesen Bias zu vermeiden erscheint es da-

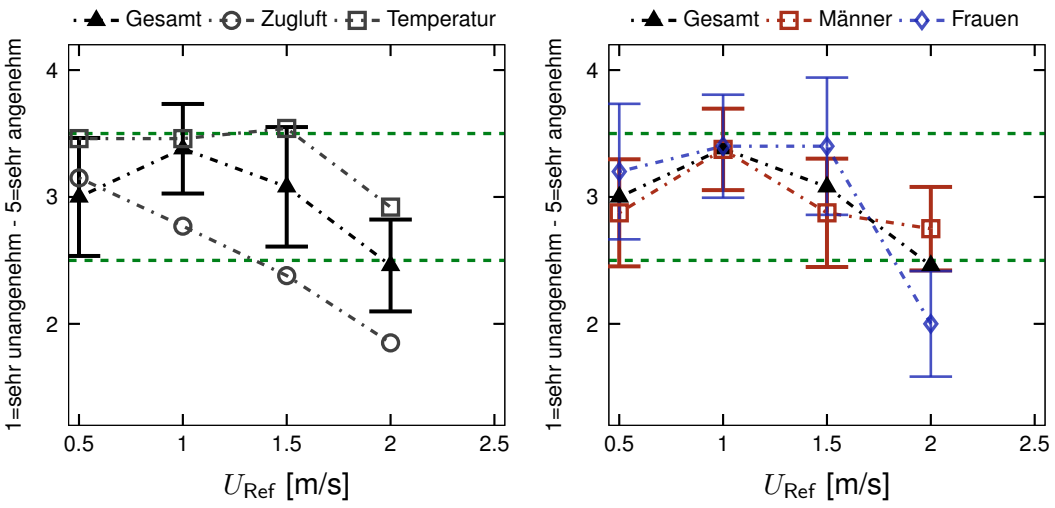
her notwendig in zukünftigen Probandenstudien in jedem Fall einen Gleichanteil an Frauen und Männer einzubinden. Insgesamt muss man aber festhalten, dass, auf den ganzen Körper bezogen, die Unterschiede zwischen der subjektiven und objektiven Temperatureinschätzung, insbesondere für die Geschwindigkeiten $U_{\text{Ref}} \geq 1.5$ m/s, unerwartet gering sind. Berücksichtigt man nur die Äquivalenttemperaturen an der oberen Körperhälfte, so liegt die objektive deutlich unter der subjektiven Einschätzung.

Für eine weiterführende Analyse ist die subjektive Temperaturbewertung in Abbildung 5.1c und die Luftzugbewertung in Abbildung 5.1d dargestellt. Der neutrale Komfortbereich liegt zwischen den gestrichelten Linien. Oberhalb dieses Bereiches wird die Temperatur als angenehm empfunden, unterhalb als unangenehm.

Hinsichtlich der Temperaturbewertung zeigt sich, dass im Mittel die Temperatur von den Probanden bis zu einer Geschwindigkeit von $U_{\text{Ref}} = 1.5$ m/s als neutral bis angenehm bewertet wird. Auch bei der höchsten Geschwindigkeit von $U_{\text{Ref}} = 2.0$ m/s ist die Temperatur insgesamt noch als neutral eingestuft. Jedoch zeigen sich deutliche Unterschiede in der Bewertung zwischen Männern und Frauen. Wie in Abbildung 5.1c zu erkennen, wird die Temperatur von Männern (□) für alle Geschwindigkeiten die Temperatur als neutral bewertet. Auch bei einer Geschwindigkeit von $U_{\text{Ref}} \geq 2.0$ m/s ist kein klarer Unterschied zu den anderen Geschwindigkeiten zu erkennen. Etwas anders sieht es bei den Frauen aus: Hier wird die Temperatur bis zu einer Geschwindigkeit von $U_{\text{Ref}} = 1.5$ m/s als angenehm wahrgenommen, bei einer Geschwindigkeit von $U_{\text{Ref}} = 2.0$ m/s jedoch als unangenehm.

Betrachtet man die Luftzugbewertung (Abb. 5.1d) über alle Probanden gemittelt, zeigt sich ein nahezu linearer Verlauf von einer neutralen Bewertung hin zu einer Bewertung im unangenehmen Bereich. Hierbei fällt auf, dass der Luftzug in einigen Fällen deutlich unangenehmer bewertet wird als die Temperatur. Während die Temperatur über den ganzen Geschwindigkeitsbereich als neutral empfunden wird, ergibt sich für den Luftzug ab einer Geschwindigkeit von $U_{\text{Ref}} \geq 1.5$ m/s die Bewertung „unangenehm“. Zusätzlich sei hier noch erwähnt, dass es auch hier erkennbare Unterschiede zwischen den Geschlechtern gibt. Während Männer die beiden niedrigsten Geschwindigkeiten als etwas unangenehmer bewerten als die Frauen, ergibt sich für die beiden höchsten Geschwindigkeiten das Bild, dass hier die Frauen den Luftzug als deutlich unangenehmer beurteilen, wobei die Frauen für $U_{\text{Ref}} = 2.0$ m/s den Luftzug sogar als sehr unangenehm bewerten.

Für die Ergebnisse der gesamte Probandenstudie gilt, dass aufgrund der kleinen Stichprobe nur vorläufige Aussagen zum Komfortempfinden bei Zugluft ableiten lassen. Jedoch lassen sich mögliche Trends erkennen, die man in einer umfangreicheren Studie näher untersuchen müsste. Nichtsdestotrotz möchten wir in einem kurzen Zwischenfazit die wichtigsten Ergebnisse zum Vergleich der objektiven mit den subjektiven Daten zusammenfassen. Bezogen auf die Temperatureinschätzung ergibt sich auf den ersten Blick der Eindruck, dass das Klimasummenmaß Äquivalenttemperatur ein gutes Werkzeug für die Einordnung des thermischen Komforts zu sein scheint. Eine genauere Betrachtung zeigt aber, dass Temperatur und Luftzug unterschiedlich wahrgenommen werden und nicht notwendigerweise korrelieren. Hier stellt sich die Frage, ob und wie dies in einem Klimasummenmaß berücksichtigt werden kann. Ein weiteres Ergebnis, das allerdings aufgrund der geringen Anzahl von Frauen in der Probandenstudie mit Vorsicht zu betrachten ist, zeigt, dass Frauen die Luftströmung und auch die Temperatur bei höheren Geschwindigkeiten als deutlich unangenehmer



(a) Klimazufriedenheit/Bewertung

(b) Klimazufriedenheit Geschlecht

Abbildung 5.2: *(a) Klimazufriedenheit (gesamt), Luftzug- sowie Temperaturbewertung und (b) Klimazufriedenheit Geschlecht.*

bewerten und auch die Lufttemperatur deutlich niedriger einschätzen als die männlichen Probanden. Sollte sich dieser Effekt in einer weiteren Studie bestätigen, stellt sich die Frage, ob und wie bestehende Komfortmodelle auf Basis von Klimasummenmaßen diese geschlechtsspezifischen Unterschiede in deren Bewertungssystem berücksichtigen können oder müssen.

Abschließend werden Ergebnisse zur Zufriedenheit mit dem Klima betrachtet. Hierzu ist den Abbildungen 5.2a und 5.2b jeweils die globale Klimazufriedenheit (▲) im Vergleich zur Luftzug- und Temperaturbewertung sowie die globale Klimazufriedenheit geschlechtsspezifisch gezeigt. Klimafall 1.0 wird gemittelt über alle Versuchspersonen am komfortabelsten bewertet und dies auch unabhängig vom Geschlecht (siehe Abb. 5.2b). Werden Geschlechtsunterschiede betrachtet, so zeigt sich, dass die Frauen, insbesondere bei $U_{\text{Ref}} = 2.0$ m/s einen stärkeren Luftzug negativer wahrnehmen. Bei $U_{\text{Ref}} = 2.0$ m/s ergibt sich im Mittel eine etwas niedrigere Zufriedenheit, wobei die Männer mehrheitlich zu einer neutralen Bewertung tendieren und von Frauen in der subjektiven Komfortuntersuchung teilweise deutliches Unbehagen berichtet wird. Insgesamt lässt sich festhalten, dass eine etwas höhere Luftgeschwindigkeit $U_{\text{Ref}} = 1.0$ m/s bei einer Temperatur von 26^oC für die Mehrzahl der Probanden komfortabel ist.

Eine weitere wichtige Erkenntnis ist, dass sich Luftzug-, Temperatur- und Klimazufriedenheit teilweise stark unterscheiden. So wird bei $U_{\text{Ref}} = 0.5$ m/s das Klima insgesamt weniger angenehm bewertet als der Luftzug oder die Temperatur. Für die Geschwindigkeiten $U_{\text{Ref}} \geq 1.0$ m/s ist die Temperatur in jedem untersuchten Fall angenehmer bewertet als der Luftzug. Die Höhe der Bewertung des Klimas liegt in diesem Geschwindigkeitsbereich immer zwischen der Temperatur- und Luftzugbewertung. Hier stellt sich die Frage, wie und in welchem Verhältnis die Temperatur und der Luftzug die Bewertung des Klimas insgesamt beeinflussen. Vergleicht man nun die

Ergebnisse der Probandenstudie mit Ergebnissen der Untersuchungen zum objektiven Komfort, so lässt sich festhalten: Bezogen auf die Einschätzung der Temperatur sind die Ergebnisse aus der Probandenstudie in guter Übereinstimmung mit jenen auf Basis der Äquivalenttemperatur. Ferner stellt sich hier die Frage, welche Körperregionen man bei der Bewertung berücksichtigen muss. Die Gewichtung der Parameter sollte in zukünftigen Studien aufgeklärt werden. Ferner zeigt sich deutlich Unterschiede bei der objektiven Temperatureinschätzung für die Körperregionen die direkt dem Luftzug ausgesetzt sind im Vergleich mit der Einschätzung für den ganzen Körper.

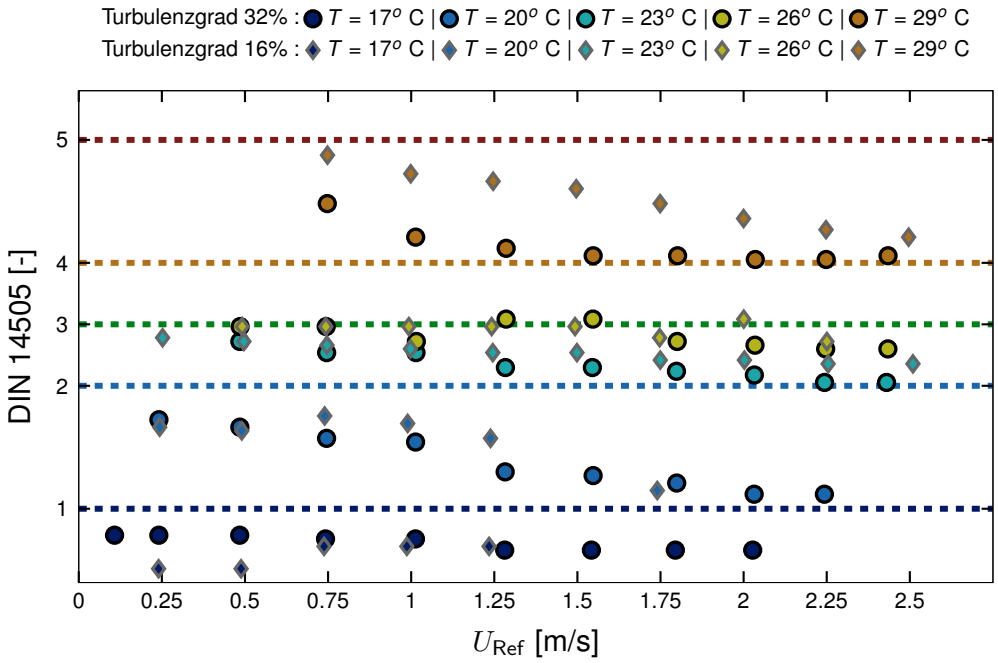
5.2 Grenzbereich des Zugluftempfindens

Ein weiteres Ziel dieser Studie ist die Identifikation des Grenzbereiches von Zugluftempfinden im PKW und dessen Einordnung. Hierzu ist in Abbildung 5.3 die Bewertung des thermischen Komforts nach EN ISO14505 für alle isotherm gemessenen Fälle als Funktion der Geschwindigkeit U_{Ref} und des Turbulenzgrads zusammengefasst. Die einzelnen Komfortbereiche sind durch die gestrichelten Linien gekennzeichnet. Der neutrale Komfortbereich befindet sich zwischen der hellblauen und der orangenen Linie. Die jeweiligen Komfortbereiche — kalt und warm – befinden sich unterhalb der hellblauen sowie oberhalb der orangenen Linie. Werte unterhalb beziehungsweise oberhalb der dunkelblauen und roten Linie liegen im heißen und sehr kalten Bereich. Die Grenzbereiche des Zugluftempfindens sind hier in der Folge die Bereiche am Rand von der neutralen Zone zum warmen oder kalten Bereich.

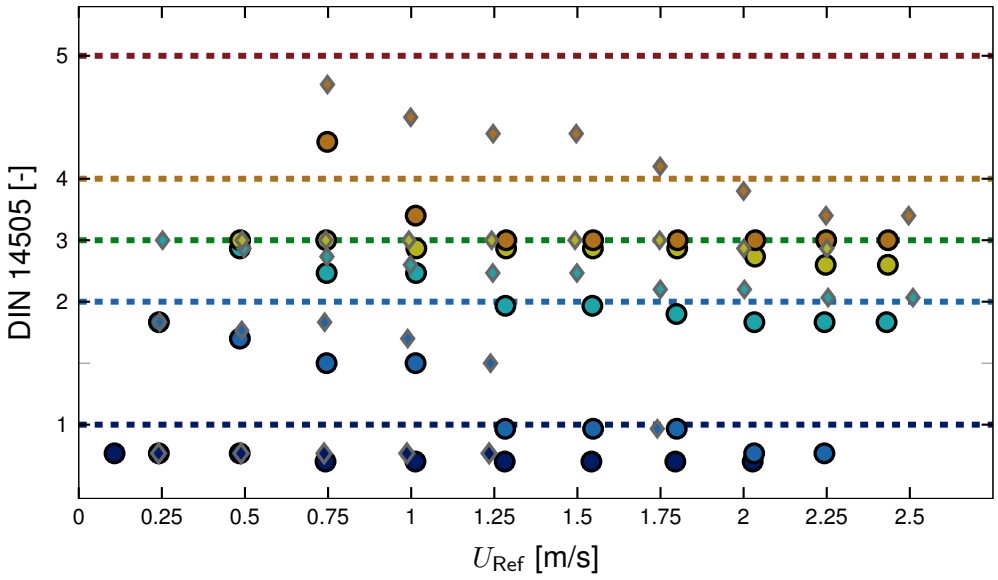
In der Darstellung 5.3a ist der über alle Körperregionen gemittelte objektive thermische Komfort abgebildet. Es zeigt sich, dass für die Temperatur von $T = 26^o$ C der thermische Komfort für alle Geschwindigkeiten als behaglich bewertet wird. Bei dieser Temperatur scheint es keine starke Abhängigkeit von der Geschwindigkeit sowie vom Turbulenzgrad zu geben. Eine leichte Tendenz zu einer Bewertung als kalt ist für $T = 26^o$ C ab $U_{\text{Ref}} \approx 1.5$ m/s aber zu erkennen. Berücksichtigt man nun zur Bewertung nur die obere Körperhälfte, so zeigt sich bei einer Temperatur von $T = 26^o$ C kaum ein Unterschied zu dem Ergebnis für den ganzen Körper. Auch hier erhält man eine nahezu gleichbleibende Bewertung für den gesamten Geschwindigkeitsbereich (Abb. 5.3b).

Für eine Lufttemperatur von $T = 23^o$ C ist mit zunehmender Geschwindigkeit ein deutlicher Trend vom Behaglichkeitsbereich in den Bereich „kalt“ zu erkennen. Für den Fall mit der niedrigeren Turbulenz $I = 16\%$ wird für die obere Körperhälfte auch bei hohen Geschwindigkeiten der Komfort als behaglich bewertet, wobei für den Turbulenzgrad $I = 32\%$ ab einer Geschwindigkeit von $U_{\text{Ref}} \approx 2.25$ m/s der Komfort schon als kalt eingeschätzt wird. Für die Betrachtung der oberen Körperhälfte zeigt sich ein ähnliches Bild. Wobei hier bei einem Turbulenzgrad von $I = 32\%$ die Grenze zum kalten Bereich bereits bei $U_{\text{Ref}} \approx 1.25$ m/s erreicht wird. Und auch für den Fall mit der niedrigeren Turbulenz wird ab einer Geschwindigkeit von $U_{\text{Ref}} \approx 2.25$ m/s die Grenze zum kalten Bereich gestreift.

Für den Fall mit der höchsten Lufttemperatur von $T = 29^o$ C lässt sich ein starker positiver Effekt mit steigender Luftgeschwindigkeit beobachten. Ebenso ist hier ein signifikanter Einfluss des Turbulenzgrades festzustellen. Betrachtet man die Komfortbewertung gemittelt über alle Körperregionen, zeigt sich bei der niedrigeren Turbulenz



(a) Gemittelt über alle gemessenen Körperregionen



(b) Gemittelt über die obere Körperhälfte

Abbildung 5.3: *Thermischer Komfort bewertet nach EN ISO14505 für verschiedene Temperaturniveaus als Funktion der Referenzgeschwindigkeit U_{Ref} sowie die beiden unterschiedlichen Turbulenzgrade (a) gemittelt über alle gemessenen Körperregionen und (b) gemittelt über die obere Körperhälfte.*

eine Bewertung im zu warmen Komfortbereich für den gesamten Geschwindigkeitsbereich, wobei für $U_{\text{Ref}} \approx 0.75$ m/s die Bewertung an der Grenze zu zum Bereich unkomfortable warm ist. Bei der höchsten hier untersuchten Geschwindigkeit von $U_{\text{Ref}} \approx 2.5$ m/s wird dann die Grenze zu dem Bereich erreicht, in dem der thermische Komfort als behaglich eingeschätzt wird. Im Fall mit der hohen Turbulenz wird bis zu $U_{\text{Ref}} \approx 1.6$ m/s der Komfort als warm bewertet. Mit steigender Geschwindigkeit bewegt sich die Komfortbewertung an der Grenze zum Behaglichkeitsbereich, überschreitet die Grenze jedoch nicht. Für den Fall mit der niedrigen Turbulenz wird die Grenze zum behaglichen Bereich erst bei einem Luftzug von $U_{\text{Ref}} \approx 2.0$ m/s erreicht. Zusätzlich sei hier noch angemerkt, dass für $T = 29^o$ C bei keiner der hier untersuchten Geschwindigkeiten das Klima als kalt eingeschätzt wird.

Bei einer Temperatur von $T = 20^o$ C ist bei niedrigen Geschwindigkeiten bis $U_{\text{Ref}} \approx 1.0$ m/s die Komfortbewertung mit kalt für die obere Körperhälfte und den gesamtem Körper nahezu gleich, wobei sich die Bewertung für $U_{\text{Ref}} \approx 0.25$ m/s im Grenzbereich von behaglich und kalt bewegt. Mit zunehmendem Luftzug verschiebt sich die Bewertung hin zu unkomfortabel kalt und bezogen auf die obere Körperhälfte, wird ab einer Geschwindigkeit von $U_{\text{Ref}} \approx 1.25$ m/s, der thermische Komfort dann als sehr kalt und unkomfortabel bewertet. Bezüglich des Einflusses der Turbulenz auf den thermischen Komfort konnte bei einer Geschwindigkeit von $U_{\text{Ref}} \approx 1.25$ m/s im Mittel kein großer Unterschied identifiziert werden.

Bei einer Temperatur von $T = 17^o$ C wird der Komfort über den ganzen Geschwindigkeitsbereich gemittelt für den gesamten Körper sowie nur für die obere Körperhälfte als unkomfortabel kalt bewertet. Zusätzlich hat die Luftgeschwindigkeit hier keinen signifikanten Einfluss mehr auf die Bewertung des thermischen Komforts basierend auf dem Bewertungsmaßstab nach EN ISO14505.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass sich auf Basis der hier vorliegenden Ergebnisse zum objektiven Komfort kein klarer Grenzbereich des Zugluftempfindens definieren lässt. Es zeigt sich jedoch, dass für Temperaturen von $T \geq 26^o$ C der Luftzug auch bei hohen Geschwindigkeiten noch als behaglich eingeschätzt wird. Dies deckt sich auch mit den Ergebnissen aus der Probandenstudie, die bei einer Temperatur von $T = 26^o$ C durchgeführt wurde. Auch hier ist im Mittel die Klimazufriedenheit bis zu einer Geschwindigkeit von$U_{\text{Ref}} = 2.00$ m/s als neutral bewertet. Die Ergebnisse legen somit den Schluss nahe, dass die These, Menschen akzeptieren im PKW deutlich höhere Luftgeschwindigkeiten im Vergleich zu anderen Umgebungen, richtig sein könnte. In den Probandentests ist aber, wie bereits zuvor diskutiert, eine starke Geschlechterabhängigkeit sowie eine deutlich unterschiedliche Bewertung hinsichtlich des Luftzugs und der Temperatur festgestellt worden. Diese Geschlechterabhängigkeit und die deutlich differenzierte Wahrnehmung von Luftzug und Temperatur wird in bestehenden Normen jedoch so nicht abgebildet.

An dieser Stelle seien noch drei weitere wichtige Erkenntnisse zum Grenzbereich des Luftzugempfindens erwähnt, die in dieser abschließenden Bewertung und Zusammenfassung nicht im Detail diskutiert werden: (1) Wie im Abschnitt 3.1 dargestellt, gab es für die einzelnen Körperbereiche teilweise größere Unterschiede hinsichtlich der Bewertung des objektiven thermischen Komforts. Die Körperregionen, die direkt angeströmt oder über eine Sekundärströmung höheren Geschwindigkeiten ausgesetzt waren, wurden im Durchschnitt immer als kälter bewertet. (2) Ferner zeigen die Ergebnisse zum objektiven Komfort für die Fälle $T_{\text{U}} = 29^o$ C und kalte Zulufttempe-

raturen von $T_A = 14^o$ C und $T_A = 17^o$ C, dass hier, insbesondere an Körperregionen die direkt angeströmt werden, bei hohen Geschwindigkeiten eine Verbesserung des thermischen Komforts erreicht werden kann. Details hierzu sind im Abschnitt 3.1 dargestellt. (3) Zusätzlich wurde festgestellt, dass es einen messbaren Einfluss der IR-Strahlung auf die Äquivalenttemperatur gibt. Die Stärke des Einflusses auf die Äquivalenttemperatur durch IR-Strahlung unterscheidet sich teilweise stark für die einzelnen Körperregion und ist abhängig von den Luftzuggeschwindigkeiten und der Temperatur. Allgemein lässt sich festhalten, dass der Einfluss der IR-Strahlung für den Fall mit den niedrigsten Temperaturen $T = 17^o$ C und $T = 20^o$ C am stärksten ist. Details zum Einfluss der Strahlungswärme sind im Abschnitt 3.3 zu finden.

5.3 Vergleich mit bestehenden Normen

Abschließend werden die Erkenntnisse zum objektiven Komfort nach EN ISO14505 sowie die Komfortbewertungen aus den Probandentests mit bestehenden Normen verglichen. Die Normen, die im Folgenden diskutiert werden, sind: DIN1946:2006 Raumlufttechnik Teil 3: Klimatisierung von Personenkraftwagen und Lastkraftwagen [10], EN13129:2016 Bahnanwendungen - Behaglichkeitsparameter und Typprüfungen [56], EN14750-1 Railway applications-air conditioning for urban and suburban rolling stock [55], EN16798-3:2017 Energetische Bewertung von Gebäuden Teil 3: Lüftung von Nichtwohngebäuden [54] und EN14813-1 [66] Bahnanwendung - Luftbehandlung in Führerräumen - Teil 1: Behaglichkeitsparameter. Bei der Aufzählung der Normen fällt auf, dass sich nur die Norm DIN1946:2006 direkt auf die Klimatisierung von PKW bezieht. Die anderen Normen beziehen sich auf Bahnanwendungen oder ganz allgemein auf Nichtwohngebäude. Dies ist in der Tatsache begründet, dass es für die Behandlung von Luftzug in Fahrzeugen keine weiteren relevanten Normen gibt und auch aktuelle Forschungsarbeiten, wie z.B. die Untersuchung von Großmann [67], sich immer wieder auf diese Norm berufen. Zusätzlich sei an dieser Stelle angemerkt, dass sich der objektive Komfort im folgenden Abschnitt immer auf die obere Körperhälfte bezieht.

Beginnen wollen wir mit einem Vergleich der Ergebnisse mit der Norm DIN1946. Die erste Ausgabe dieser Norm stammt aus dem Jahr 1962 und wurde im Laufe der Zeit immer wieder korrigiert. Die aktuelle Ausgabe ist aus dem Jahr 2006 und dient als Grundlage für die folgende Diskussion. In Norm DIN1946:2006 wird für den Temperaturbereich von $T \approx 18^o$ C bis $T \approx 26^o$ C eine Geschwindigkeit angegeben, bei der das Klima in einem Personenkraftwagen und Lastkraftwagen als behagliche Luftströmung empfunden wird. Zur Bewertung des thermischen Komforts wird in dieser Norm der PMV nach EN ISO7730 [11] angewandt.

Die Geschwindigkeit, die als behaglich empfunden wird, ist bei einer Temperatur von $T = 20^o$ C mit $U = 0.20$ m/s angegeben. Bei der hier durchgeführten Studie wurde für diese Temperatur der objektive Komfort jedoch nur bis zu einer Geschwindigkeit von $U = 0.25$ m/s untersucht. Bei dieser Geschwindigkeit wird der Komfort noch als kalt bewertet, befindet sich aber schon an der Grenze zum Behaglichkeitsbereich, sodass man sagen kann, dass sich für diesen Temperaturbereich die Norm im Wesentlichen mit den Ergebnissen dieser Studie deckt. Mit steigender Temperatur ergeben sich bei der Bewertung jedoch deutliche Unterschiede zwischen den Normen

DIN1946:2006 und EN ISO14505.

Für eine Temperatur von $T = 23^o$ C ist in DIN1946:2006 eine Geschwindigkeit von $U \approx 0.40$ m/s angeben. Aus den hier durchgeführten Messungen ergibt sich jedoch eine Grenzgeschwindigkeit, bis zu der der thermische Komfort noch als behaglich eingestuft wird, von $U \approx 1.25$ m/s für den Fall mit der höheren Turbulenz und $U \approx 2.25$ m/s für den Fall mit der niedrigeren Turbulenz. Dies ist ein deutlicher Unterschied in der Bewertung des thermischen Komforts in Abhängigkeit der Luftgeschwindigkeit.

Bei einer Temperatur von $T \approx 26^o$ C beträgt nach DIN1946-3 die Geschwindigkeit $U \approx 0.80$ m/s. In der hier durchgeführten Bewertung nach EN ISO14505 konnte für dieses Temperaturniveau jedoch keine Grenzgeschwindigkeit identifiziert werden, da der thermische Komfort für alle Geschwindigkeiten als behaglich bewertet wird. Die Probandenstudie zeigt jedoch ein differenziertes Bild und ermöglicht eine bessere Einschätzung der Zufriedenheit mit dem Klima bei $T = 26^o$ C. Nach dem Bewertungskriterium, das die Behaglichkeit als das Klima, das von mehr als 80% der Probanden von neutral bis sehr zufrieden bewertet wird, definiert, ergibt sich aus der Probandenstudie eine Geschwindigkeit von $U = 1.00$ m/s (siehe Abb. 4.3a). Nimmt man jedoch die über alle Probanden gemittelte Klimazufriedenheit als Maßstab, so wird bis zu einer Geschwindigkeit von $U \approx 2.00$ m/s der Komfort noch als neutral bewertet. Beide Geschwindigkeiten liegen über der, die in der Norm DIN1946-3 angegeben ist. Dies ist ein weiteres Indiz für die These, dass im PKW höhere Geschwindigkeiten als behaglich empfunden werden. Aufgrund der geringen Stichprobenmenge kann dieses Ergebnis hier allerdings nur einen Trend andeuten.

Für Temperaturen $T > 26^o$ C macht die Norm keine konkrete Aussage hinsichtlich der Geschwindigkeit und somit ist ein direkter Vergleich nicht möglich. Es heißt nur allgemein:

> *„Erreicht die Lufttemperatur im Fahrzeuginnenraum jedoch Werte, die im Bereich der Hautoberflächentemperatur liegen, kann allein durch eine Erhöhung der Luftgeschwindigkeit keine Verbesserung des thermischen Empfindens erreicht werden. Thermisches Wohlbefinden kann bei hoher Lufttemperatur und Sonneneinstrahlung im Fahrzeuginnenraum nur durch den Einsatz einer Kälteanlage erreicht werden. “*

Diese Aussage deckt sich nur in Teilen mit den Ergebnissen der hier durchgeführten Studie. Es zeigt sich, dass bei $T = 29^o$ C ein stärkerer Luftzug für Geschwindigkeiten $U \geq 1.00$ m/s dazu führt, dass der thermische Komfort sich von warm auf behaglich verändert. Jedoch wurde auch beobachtet, dass eine weitere Erhöhung der Geschwindigkeit in der Folge keine signifikante Änderung in der Komfortbewertung mehr bewirkte. Dies deckt sich mit der Aussage der Norm. Ferner sei hier noch angemerkt, dass in der Version der Norm DIN1946-3 aus dem Jahr 2006 die Geschwindigkeiten, die als behaglich bewertet werden, im Vergleich zur ursprünglichen Fassung von 1962 deutlich nach oben korrigiert wurden.

Neben der DIN1946:2006 wird häufig die Norm EN16798-3:2017 zur Bewertung des Komforts in Fahrzeugen herangezogen. Diese Norm bezieht sich im Grunde auf die Gebäudeklimatisierung, jedoch werden im Teil 3 auch Standards zur Lüftung von Nichtwohngebäuden angegeben. Zur Bewertung der Luftgeschwindigkeit werden hier Höchstgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Temperatur dargestellt, bis zur der das Klima als behaglich eingeschätzt wird. Neben der Luftgeschwindigkeit gibt es in dieser Norm auch eine weitere Unterteilung nach Turbulenzgraden. Grundsätzlich sind die

dort angegebenen Geschwindigkeiten noch niedriger als die aus DIN1946:2006 und somit noch einmal weiter entfernt von den Temperaturen, die in dieser Studie ermittelt wurden. Insbesondere für Temperaturen $T \geq 23^o$ C ergeben sich doch recht große Unterschiede in der objektiven Komfortbewertung. Zum Beispiel wird bei $T = 23^o$ C für einen Turbulenzgrad $I = 40\%$ eine Geschwindigkeit von $U \approx 0.15$ m/s und für $I = 20\%$ eine Geschwindigkeit von $U \approx 0.25$ m/s angegeben. Vergleicht man die Angaben des Turbulenzgrads $I = 40\%$ mit den Ergebnissen von $I = 32\%$ aus dieser Studie, so ergibt sich ein Unterschied von ungefähr 1.00 m/s. Noch deutlicher ist der Unterschied für die Geschwindigkeiten aus der Norm für $I = 20\%$ und $I = 16\%$ aus der vorliegenden Studie. Hier ergibt sich sogar ein Unterschied von 2.00 m/s. Auch bei einem Vergleich mit der Probandenstudie sind deutliche Unterschiede zu erkennen. Für $T = 26^o$ C und $I = 40\%$ ergibt sich aus der Norm eine Geschwindigkeit von $U \approx 0.25$ m/s. Diese Geschwindigkeit ist um mindestens 0.75 m/s geringer als die Geschwindigkeit von $U = 1.00$ m/s bei der der Großteil der Probanden das Klima als neutral oder angenehm bewerteten.

Abschließend werden nun noch die Ergebnisse in Relation zu Normen gesetzt, die aus der Bahnanwendung kommen. In Norm EN14813-1 ist die maximale Luftgeschwindigkeit als Funktion der Temperatur in einem Führerstand angegeben. Diese Konfiguration lässt sich noch am besten mit einer Fahrzeugkabine gleichsetzen. Auch hier zeigen sich ähnliche Unterschiede wie zuvor bei der Norm EN16798-3:2017. Die Maximalgeschwindigkeiten für den Behaglichkeitsbereich, die in den Normen EN14750-1 und EN14813-1 angegeben werden (insbesondere bei Temperaturen $T \geq 23^o$ C), weisen deutliche Unterschiede auf. Eine Ausnahme bildet hier die Bewertung des thermischen Komforts in einer Straßenbahn. Hier wird die maximale Geschwindigkeit bei $T = 26^o$ C mit 0.90 m/s angegeben und ist somit nahe an der Bewertung aus der Probandenstudie - bezogen auf den Wert, bei dem der Großteil der Probanden den Komfort als neutral oder angenehm bewertet.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass für alle Normen und über den gesamten Temperaturbereich die Geschwindigkeiten, die in der Norm als Maximal- oder Behaglichkeitsgeschwindigkeit angegeben werden unter den Geschwindigkeitswerten liegen, die in dieser Studie die in dieser Studie als komfortabel ermittelt wurden. Während bei niedrigen Temperaturen der Unterschied noch relativ gering ist, so wird dieser mit steigender Lufttemperatur in der Regel größer. Es stellt sich hier natürlich die Frage, ob ein simpler Vergleich, wie er hier vorgenommen wurde, überhaupt berechtigt ist oder belastbare Aussagen ermöglicht. Die wesentlichen Gründe hierfür sind, dass bei der Ermittlung der Geschwindigkeitstemperaturrelationen nicht dasselbe Vorgehen angewendet wurde und in Teilen in den Normen Angaben zu den Methoden, nach denen die Relationen ermittelt wurden, fehlen und somit eine Einordnung/ein Vergleich nur bedingt möglich ist. Jedoch ergibt sich aus diesem Vergleich eine starke Tendenz, die die These stützt: Menschen im PKW haben eine höhere Toleranz für größere Luftgeschwindigkeiten beziehungsweise bewerten den Komfort bei hohen Geschwindigkeiten als angenehmer im Vergleich zu Gebäuden.

Literaturverzeichnis

[1] Dae-Ho Byun. The ahp approach for selecting an automobile purchase model. *Information & Management*, 38(5):289–297, 2001.

[2] Wolfgang Sauer, Klaus Kramer, and Metin Ersoy. Fahrkomfort. In *Fahrwerkhandbuch*, pages 207–243. Springer, 2017.

[3] Josef Temming. Fahrzeugklimatisierung und Verkehrssicherheit. Auswirkungen sommerlichen Klimas in Kfz auf die Leistungsfaehigkeit der Fahrer (Ergebnisse einer Literaturstudie). *FAT-Schriftenreihe*, (177), 2003.

[4] Zhenying Zhang, Jiayu Wang, Xu Feng, Li Chang, Yanhua Chen, and Xingguo Wang. The solutions to electric vehicle air conditioning systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91:443–463, 2018.

[5] R Farrington and John Rugh. Impact of vehicle air-conditioning on fuel economy, tailpipe emissions, and electric vehicle range. Technical report, National Renewable Energy Lab., Golden, CO (US), 2000.

[6] Jose Rizalino M Delos Reyes, Robert V Parsons, and Ray Hoemsen. Winter happens: The effect of ambient temperature on the travel range of electric vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 65(6):4016–4022, 2016.

[7] Shih-Chieh Lin, Yunqi Zhang, Chang-Hong Hsu, Matt Skach, Md E Haque, Lingjia Tang, and Jason Mars. The architectural implications of autonomous driving: Constraints and acceleration. In *Proceedings of the Twenty-Third International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems*, pages 751–766, 2018.

[8] Sagar Behere and Martin Törngren. A functional reference architecture for autonomous driving. *Information and Software Technology*, 73:136–150, 2016.

[9] ISO ISO et al. Ergonomics of the thermal environment - evaluation of thermal environments in vehicles -. 2006.

[10] ISO ISO et al. Raumlufttechnik - Teil 3: Klimatisierung von Personenkraftwagen und Lastkraftwagen. 2006.

[11] ENISO DIN. 7730 (1995–09): Gemäßigtes Umgebungsklima–Ermittlung des PMV und des PPD und Beschreibung der Bedingungen für thermische Behaglichkeit (ISO 7730: 1994). *Deutsche Fassung EN ISO*, 7730, 1995.

[12] PO Fanger. Thermal comfort, danish technical press. *Copenhagen, Denmark*, 1970.

[13] Dusan Fiala. *Dynamische Simulation des menschlichen Wärmehaushalts und der thermischen Behaglichkeit*. PhD thesis, Fachhochsch., 1998.

[14] Håkan O Nilsson. *Comfort climate evaluation with thermal manikin methods and computer simulation models*. 2004.

[15] Hui Zhang, Edward Arens, Charlie Huizenga, and Taeyoung Han. Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments: Part i -

iii. *Building and Environment*, 45(2):380–410, 2010.

[16] Yuanda Cheng, Jianlei Niu, and Naiping Gao. Thermal comfort models: A review and numerical investigation. *Building and environment*, 47:13–22, 2012.

[17] Cristiana Croitoru, Ilinca Nastase, Florin Bode, Amina Meslem, and Angel Dogeanu. Thermal comfort models for indoor spaces and vehicles-current capabilities and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44: 304–318, 2015.

[18] Ken Parson. Human thermal environments: The effects of hot, moderate, and cold environments on human health, comfort, and performance, 2014.

[19] Simon G Hodder and Ken Parsons. The effects of solar radiation on thermal comfort. *International journal of biometeorology*, 51(3):233–250, 2007.

[20] Carolin Schmidt, Maximilian Praster, Daniel Wölki, Sebastian Wolf, and Christoph van Treeck. Rechnerische und probandengestützte Untersuchung des Einflusses der Kontaktwärmeübertragung in Fahrzeugsitzen auf die thermische Behaglichkeit. *FAT-Schriftenreihe*, 261:1–76, 2013.

[21] Werner E Gerabek, Bernhard D Haage, Gundolf Keil, and Wolfgang Wegner. *Enzyklopädie Medizingeschichte*. Walter de Gruyter, 2011.

[22] Marco Beretta and Francesco Citti. New dictionary of scientific biography. (4): 215, 2008.

[23] Claude Bernard. *Leçons sur les phénomènes de la vie communs aux animaux et aux végétaux: cours de physiologie générale du Museum d'histoire naturelle*. Billière, 1879.

[24] TH Benzinger. The physiological basis for thermal comfort. *Indoor climate*, pages 441–476, 1979.

[25] Richard De Dear and Gail Schiller Brager. Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. 1998.

[26] N Ashrae. Thermal comfort conditions, 1966.

[27] ACGIH. Documentation of the threshold limit values (tlvs): Vinyl chloride. American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 1962.

[28] B Olesen, FR D'Ambrosio-Alfano, KC Parsons, and Boris I Palella. The history of international standardization for the ergonomics of the thermal environment. In *9th International Windsor Conference, Cumberland Lodge, Windsor, UK*, pages 7–10, 2016.

[29] Adolf Pharo Gagge. A new physiological variable associated with sensible and insensible perspiration. *American Journal of Physiology-Legacy Content*, 120(2): 277–287, 1937.

[30] Adolf Pharo Gagge, Alan Chadburn Burton, and Henry Cuthbert Bazett. A practical system of units for the description of the heat exchange of man with his environment. *Science*, 94(2445):428–430, 1941.

[31] A Pharo Gagge, JAJ Stolwijk, and JD Hardy. Comfort and thermal sensations and associated physiological responses at various ambient temperatures. *Environmental research*, 1(1):1–20, 1967.

[32] A Pharo Gagge, AP Fobelets, LoG Berglund, et al. A standard predictive index of human response to the thermal environment. *ASHRAE trans*, 92(2):709–731, 1986.

[33] Refrigerating American Society of Heating and Air-Conditioning Engineers. *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy: ANSI/ASHRAE Standard 55-2017 (Supersedes ANSI/ASHRAE Standard 55-2013) Includes ANSI/ASHRAE Addenda Listed in Appendix N*. ASHRAE, 2017.

[34] BSI. En iso 7730: 2005: Ergonomics of the thermal environment. analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the pmv and ppd indices and local thermal comfort criteria, 2005.

[35] ISO ISO. 7243. *Hot environments Á estimation of the heat stress on working man based in the WBGT-index (wet bulb globe temperature). Geneva, Switzerland: International Organization for Standards*, 1989.

[36] International Organization for Standardization (ISO). Iso 7933. ergonomics of the thermal environment analytical determination and interpretation of heat stress using calculation of the predicted heat strain, 2004.

[37] ISO Standard. Iso 11079. ergonomics of the thermal environment - determination and interpretation of cold stress when using required clothing insulation and local cooling effects. *International Standardization Organization: Geneva, Switzerland*, 2007.

[38] M Fountain. Laboratory studies of the effect of air movement on thermal comfort: a comparison and discussion of methods. 1991.

[39] Noël Djongyang, René Tchinda, and Donatien Njomo. Thermal comfort: A review paper. *Renewable and sustainable energy reviews*, 14(9):2626–2640, 2010.

[40] Toby Cheung, Stefano Schiavon, Thomas Parkinson, Peixian Li, and Gail Brager. Analysis of the accuracy on pmv–ppd model using the ashrae global thermal comfort database ii. *Building and Environment*, 153:205–217, 2019.

[41] Veronika Földváry Ličina, Toby Cheung, Hui Zhang, Richard De Dear, Thomas Parkinson, Edward Arens, Chungyoon Chun, Stefano Schiavon, Maohui Luo, Gail Brager, et al. Development of the ashrae global thermal comfort database ii. *Building and Environment*, 142:502–512, 2018.

[42] Joost Van Hoof. Forty years of fanger's model of thermal comfort: comfort for all? *Indoor air*, 18(3):182–201, 2008.

[43] J. Temming. Comfort requirements for heating, ventilation and air conditioning in motor vehicles. *HUMAN FACTORS IN TRANSPORT RESEARCH EDITED BY DJ OBORNE, JA LEVIS*, 2, 1980.

[44] PO Fanger. Discomfort due to air velocities in spaces. In *Proc. of Meeting of Commission B1, B2, E1, of Instit. Refrig.*, volume 4, pages 289–296, 1977.

[45] Povl Ole FANGER and NK Christensen. Perception of draught in ventilated spaces. *Ergonomics*, 29(2):215–235, 1986.

[46] Hisashi Tanaka, Motohiro Kitada, Yousuke Taniguchi, Yumi Ohno, Tutomu Shinagawa, and Hiroshi Aoki. Study on car air conditioning system controlled by car occupants' skin temperatures-part 2: Development of a new air conditioning system. Technical report, SAE Technical Paper, 1992.

[47] ISO ISO. 14505-1: Ergonomics of the thermal environment - evaluation of thermal environments in vehicles-part 1: Principles and methods for assessment of thermal stress. *International Standard Organization*, 2007.

[48] EN ISO. 14505-2. ergonomics of the thermal environment - evaluation of ther-

mal environments in vehicles-part 2: Determination of equivalent temperature. *Geneva (Switzerland)*, 2006.

[49] EN ISO. 14505-3. ergonomics of the thermal environment - evaluation of thermal environments in vehicles-part 3: Evaluation of thermal comfort using human subjects. *Geneva (Switzerland)*, 2006.

[50] Bjarne W Olesen. Guidelines for comfort. *Ashrae Journal*, 42(8):41–47, 2000.

[51] Hugo SLC Hens. Thermal comfort in office buildings: Two case studies commented. *Building and Environment*, 44(7):1399–1408, 2009.

[52] Hui Zhang. Human thermal sensation and comfort in transient and non-uniform thermal environments. 2003.

[53] Yuemei Wang, Zhiwei Lian, and Li Lan. The effect of turbulence intensity on local skin temperature and subjective responses to draft. *Energy and Buildings*, 43 (10):2678–2683, 2011.

[54] EN ISO DIN. 16798-3:2017-11 Energetische Bewertung von Gebäuden - Lüftung von Gebäuden - Teil 3: Lüftung von Nichtwohngebäuden - Leistungsanforderungen an Lüftungs- und Klimaanlagen und Raumkühlsysteme (Module M5-1, M5-4). *Deutsche Fassung EN ISO*, 2017.

[55] EN DIN. 14750-1: 2006-08 railway applications-air conditioning for urban and suburban rolling stock-part. 1, 2006.

[56] EN DIN. 13129:2016-12 Bahnanwendungen - Luftbehandlung in Schienenfahrzeugen des Fernverkehrs - Behaglichkeitsparameter und Typprüfungen. 2016.

[57] Pascal Lange, Andreas Westhoff, Daniel Schmeling, and Tobias Dehne. Low-cost thermal manikin-a competitive instrument to simulate thermal loads and to determine thermal passenger comfort. In *12th International Manikin and Modelling Meeting 2018*, 2018.

[58] Tobias Dehne and Andreas Westhoff. Experimental evaluation of the cooling and heating dynamics for a vertical ventilation concept in a generic car cabin. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, volume 609, page 042048. IOP Publishing, 2019.

[59] Daniel Schmeling and Johannes Bosbach. Influence of shape and heat release of thermal passenger manikins on the performance of displacement ventilation in a train compartment. *Indoor and Built Environment*, page 1420326X19856673, 2019.

[60] Comlogo GmbH. Equivalent temperature system (Equites). `http://www.comlogo.com`. Sensor System.

[61] Hans Dieter Baehr and Karl Stephan. *Wärme- und Stoffübertragung*, volume 7. Springer, 1994.

[62] Claudia Marggraf-Micheel, Carina Piewald, Julia Winzen, and Jana Berg. Thermischer Komfort in der Flugzeugkabine-Forschung im Do 728 Kabinen-Mock-Up. *DLR Forschungsbericht*, 2010.

[63] Jürgen Bortz and Christof Schuster. *Statistik für Human-und Sozialwissenschaftler: Limitierte Sonderausgabe*. Springer-Verlag, 2011.

[64] Julia Winzen and Claudia Marggraf-Micheel. Climate preferences and expectations and their influence on comfort evaluations in an aircraft cabin. *Building and environment*, 64:146–151, 2013.

[65] Dragan Ruzic. Improvement of thermal comfort in a passenger car by localized air distribution. *ACTA Technica Corviniensis-Bulletin of Engineering*, 4(1): 63, 2011.

[66] EN DIN. DIN EN14813-1:2011-01 Bahnanwendung - Luftbehandlung in Führerräumen - Teil 1: Behaglichkeitsparameter . *Deutsche Fassung EN ISO*, 2011.

[67] Holger Großmann. Straßenversuche. In *Pkw-Klimatisierung*, pages 249–254. Springer, 2013.

Bisher in der FAT-Schriftenreihe erschienen (ab 2016)

Nr.	Titel
283	Verformungs- und Versagensverhalten von Stählen für den Automobilbau unter crashartiger mehrachsiger Belastung, 2016
284	Entwicklung einer Methode zur Crashsimulation von langfaserverstärkten Thermoplast (LFT) Bauteilen auf Basis der Faserorientierung aus der Formfüllsimulation, 2016
285	Untersuchung des Rollwiderstands von Nutzfahrzeugreifen auf realer Fahrbahn, 2016
286	χMCF - A Standard for Describing Connections and Joints in the Automotive Industry, 2016
287	Future Programming Paradigms in the Automotive Industry, 2016
288	Laserstrahlschweißen von anwendungsnahen Stahl-Aluminium-Mischverbindungen für den automobilen Leichtbau, 2016
289	Untersuchung der Bewältigungsleistung des Fahrers von kurzfristig auftretenden Wiederübernahmesituationen nach teilautomatischem, freihändigem Fahren, 2016
290	Auslegung von geklebten Stahlblechstrukturen im Automobilbau für schwingende Last bei wechselnden Temperaturen unter Berücksichtigung des Versagensverhaltens, 2016
291	Analyse, Messung und Optimierung des Ventilationswiderstands von Pkw-Rädern, 2016
292	Innenhochdruckumformen laserstrahlgelöteter Tailored Hybrid Tubes aus Stahl-Aluminium-Mischverbindun für den automobilen Leichtbau, 2017
293	Filterung an Stelle von Schirmung für Hochvolt-Komponenten in Elektrofahrzeugen, 2017
294	Schwingfestigkeitsbewertung von Nahtenden MSG-geschweißter Feinbleche aus Stahl unter kombinierter Beanspruchung, 2017
295	Wechselwirkungen zwischen zyklisch-mechanischen Beanspruchungen und Korrosion: Bewertung der Schädigungsäquivalenz von Kollektiv- und Signalformen unter mechanisch-korrosiven Beanspruchungsbedingungen, 2017
296	Auswirkungen des teil- und hochautomatisierten Fahrens auf die Kapazität der Fernstraßeninfrastruktur, 2017
297	Analyse zum Stand und Aufzeigen von Handlungsfeldern beim vernetzten und automatisierten Fahren von Nutzfahrzeugen, 2017
298	Bestimmung des Luftwiderstandsbeiwertes von realen Nutzfahrzeugen im Fahrversuch und Vergleich verschiedener Verfahren zur numerischen Simulation, 2017
299	Unfallvermeidung durch Reibwertprognosen, 2017
300	Thermisches Rollwiderstandsmodell für Nutzfahrzeugreifen zur Prognose fahrprofilspezifischer Energieverbräuche, 2017
301	The Contribution of Brake Wear Emissions to Particulate Matter in Ambient Air, 2017
302	Design Paradigms for Multi-Layer Time Coherency in ADAS and Automated Driving (MULTIC), 2017
303	Experimentelle Untersuchung des Einflusses der Oberflächenbeschaffenheit von Scheiben auf die Kondensatbildung, 2017
304	Der Rollwiderstand von Nutzfahrzeugreifen unter realen Umgebungsbedingungen, 2018
305	Simulationsgestützte Methodik zum Entwurf intelligenter Energiesteuerung in zukünftigen Kfz-Bordnetzen, 2018

306 Einfluss der Kantenbearbeitung auf die Festigkeitseigenschaften von Stahl-Feinblechen unter quasistatisch und schwingender Beanspruchung, 2018

307 Fahrerspezifische Aspekte beim hochautomatisierten Fahren, 2018

308 Der Rollwiderstand von Nutzfahrzeugreifen unter zeitvarianten Betriebsbedingungen, 2018

309 Bewertung der Ermüdungsfestigkeit von Schraubverbindungen mit gefurchtem Gewinde, 2018

310 Konzept zur Auslegungsmethodik zur Verhinderung des selbsttätigen Losdrehens bei Bauteilsystemen im Leichtbau, 2018

311 Experimentelle und numerische Identifikation der Schraubenkopfverschiebung als Eingangsgröße für eine Bewertung des selbsttätigen Losdrehens von Schraubenverbindungen, 2018

312 Analyse der Randbedingungen und Voraussetzungen für einen automatisierten Betrieb von Nutzfahrzeugen im innerbetrieblichen Verkehr, 2018

313 Charakterisierung und Modellierung des anisotropen Versagensverhaltens von Aluminiumwerkstoffen für die Crashsimulation, 2018

314 Definition einer „Äquivalenten Kontakttemperatur“ als Bezugsgröße zur Bewertung der ergonomischen Qualität von kontaktbasierten Klimatisierungssystemen in Fahrzeugen, 2018

315 Anforderungen und Chancen für Wirtschaftsverkehre in der Stadt mit automatisiert fahrenden E-Fahrzeugen (Fokus Deutschland), 2018

316 MULTIC-Tooling, 2019

317 EPHoS: Evaluation of Programming - Models for Heterogeneous Systems, 2019

318 Air Quality Modelling on the Contribution of Brake Wear Emissions to Particulate Matter Concentrations Using a High-Resolution Brake Use Inventory, 2019

319 Dehnratenabhängiges Verformungs- und Versagensverhalten von dünnen Blechen unter Scherbelastung, 2019

320 Bionischer LAM-Stahlleichtbau für den Automobilbau – BioLAS, 2019

321 Wirkung von Systemen der aktiven, passiven und integralen Sicherheit bei Straßenverkehrsunfällen mit schweren Güterkraftfahrzeugen, 2019

322 Unfallvermeidung durch Reibwertprognosen - Umsetzung und Anwendung, 2019

323 Transitionen bei Level-3-Automation: Einfluss der Verkehrsumgebung auf die Bewältigungsleistung des Fahrers während Realfahrten, 2019

324 Methodische Aspekte und aktuelle inhaltliche Schwerpunkte bei der Konzeption experimenteller Studien zum hochautomatisierten Fahren, 2020

325 Der Einfluss von Wärmeverlusten auf den Rollwiderstand von Reifen, 2020

326 Lebensdauerberechnung hybrider Verbindungen, 2020

327 Entwicklung der Verletzungsschwere bei Verkehrsunfällen in Deutschland im Kontext verschiedener AIS-Revisionen, 2020

328 Entwicklung einer Methodik zur Korrektur von EES-Werten, 2020

329 Untersuchung zu den Einsatzmöglichkeiten der Graphen- und Heuristikbasierten Topologieoptimierung zur Entwicklung von 3D-Rahmenstrukturen in Crashlastfällen, 2020

330 Analyse der Einflussfaktoren auf die Abweichung zwischen CFD und Fahrversuch bei der Bestimmung des Luftwiderstands von Nutzfahrzeugen, 2020

331 Effiziente Charakterisierung und Modellierung des anisotropen Versagensverhaltens von LFT für Crashsimulation, 2020

332 Charakterisierung und Modellierung des Versagensverhaltens von Komponenten aus duktilem Gusseisen für die Crashsimulation, 2020

333 Charakterisierung und Meta-Modellierung von ungleichartigen Punktschweißverbindungen für die Crashsimulation, 2020

334 Simulationsgestützte Analyse und Bewertung der Fehlertoleranz von Kfz-Bordnetzen, 2020

335 Absicherung des autonomen Fahrens gegen EMV-bedingte Fehlfunktion, 2020

336 Auswirkung von instationären Anströmeffekten auf die Fahrzeugaerodynamik, 2020

337 Analyse von neuen Zell-Technologien und deren Auswirkungen auf das Gesamtsystem Batteriepack, 2020

338 Modellierung der Einflüsse von Mikrodefekten auf das Versagensverhalten von Al-Druckguss-komponenten mit stochastischem Aspekt für die Crashsimulation, 2020

339 Stochastisches Bruchverhalten von Glas, 2020

340 Schnelle, breitbandige Datenübertragung zwischen Truck und Trailer als Voraussetzung für das hochautomatisierte Fahren von Lastzügen, 2021

341 Wasserstoffkompatibilität von Aluminium-Legierungen für Brennstoffzellenfahrzeuge, 2021

342 Anforderungen an eine elektrische Lade- und Wasserstoffinfrastruktur für gewerbliche Nutzfahrzeuge mit dem Zeithorizont 2030, 2021

343 Objective assessment of database quality for use in the automotive research and development process, 2021

344 Review of non-exhaust particle emissions from road vehicles, 2021

345 Ganzheitliche Betrachtung von Rollwiderstandsverlusten an einem schweren Sattelzug unter realen Umgebungsbedingungen, 2021

346 Studie zur Abschätzung der Anwendungspotentiale, Risiken und notwendigen Forschungsbedarfe bei der Verwendung von Glashohlkugeln in Kombination mit thermoplastischem Schaumspritzguss, 2021

347 Typgenehmigungsanforderungen an Level-3-Autobahnsysteme - Hintergrundbetrachtungen zu technischen Anforderungen für eine automatisierte Fahrfunktion, 2021

348 Einfluss der Kantenbearbeitung von Aluminiumblechen auf das Restumformvermögen sowie die Festigkeitseigenschaften unter quasistatischer und schwingender Beanspruchung, 2021

349 Verstärkung dünner formgehärteter Bauteile mittels FVK-Verrippungen, 2021

350 HMI Anforderungen für den automatisierten Individualverkehr unter Berücksichtigung von Leistungsmöglichkeiten und -grenzen älterer Nutzer, 2021

351 Compatibility of polymers for fuel cell automobiles, 2021

352 Entwicklung einer gewichtsoptimierten Batteriegehäusestruktur für Volumenfahrzeuge, 2021

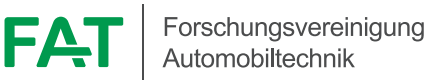
353 Charakterisierung und Modellierung des Deformations- und Versagensverhaltens von nicht-faserverstärkten Thermoplasten unter mehrachsiger Crashbelastung, 2021

354 Untersuchung zum thermischen Komfort im Pkw für den Grenzbereich des Luftzugempfindens, 2021

Impressum

Herausgeber	FAT Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. Behrenstraße 35 10117 Berlin Telefon +49 30 897842-0 Fax +49 30 897842-600 www.vda-fat.de
ISSN	2192-7863

Copyright Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) 2021

Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA)
Behrenstraße 35, 10117 Berlin
www.vda.de
Twitter @VDA_online

Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT)
Behrenstraße 35, 10117 Berlin
www.vda.de/fat