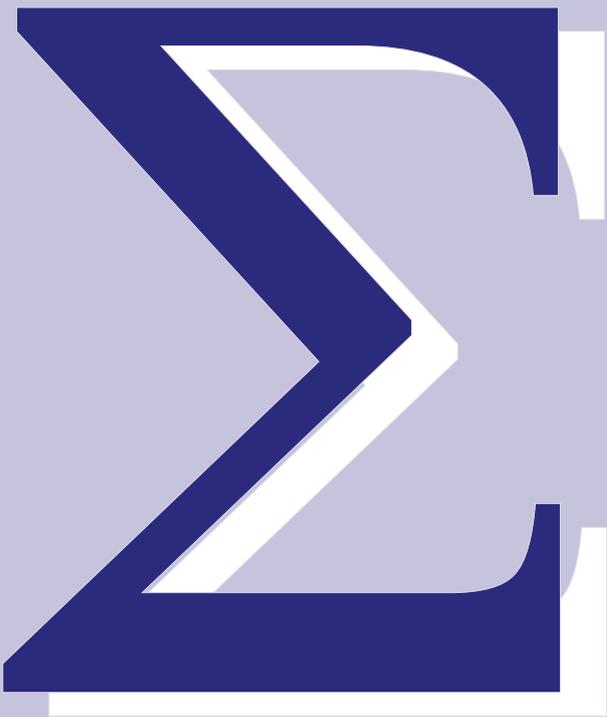


FAT 272



Zusammenhang zwischen
lokalem und globalem
Behaglichkeitsempfinden:
Untersuchung des
Kombinationseffektes
von Sitzheizung und
Strahlungswärmeübertragung
zur energieeffizienten
Fahrzeugklimatisierung



**Zusammenhang zwischen lokalem und globalem
Behaglichkeitsempfinden:
Untersuchung des Kombinationseffektes von
Sitzheizung und Strahlungswärmeübertragung zur
energieeffizienten Fahrzeugklimatisierung**

Forschungsstelle:

Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen e3D
RWTH Aachen University

Autoren:

Carolin Schmidt
Stephanie Veselá
Mariam Nabi Bidhendi
Jana Rudnick
Christoph van Treeck

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

Inhaltsverzeichnis

1	Problemstellung	1
2	Projektziele und Zeitplanung	2
3	Versuchsaufbau und Messtechnik	3
3.1	Vorüberlegungen zum Versuchsaufbau	3
3.2	Komponenten des Versuchsaufbaus	5
3.2.1	Versuchsraum und Fahrzeugstand	5
3.2.2	Strahlungselemente	7
3.2.3	Fahrzeugspezifische Heizelemente	8
3.3	Messtechnische Ausstattung des Versuchsraums	8
3.4	Anordnung aller Komponenten im Versuchscontainer	10
4	Methodik zur Probandenbefragung	10
5	Versuchsdurchführung	12
5.1	Auswahl der Versuchsszenarien	12
5.2	Ablauf eines Versuchstages	13
5.3	Charakteristische Daten der Versuche	16
5.3.1	Daten zu den Probanden	16
5.3.2	Reale Versuchsbedingungen	16
6	Auswertung	17
6.1	Globale Behaglichkeitsaussagen	17
6.1.1	Temperaturwahrnehmung	17
6.1.2	Komfortempfinden (Akzeptanz)	19
6.2	Lokale Behaglichkeitsaussagen	22
6.2.1	Bewertung der lokalen Temperaturwahrnehmung	22
6.2.2	Lokales Komfortempfinden	24
6.3	Oberflächentemperaturen	26
6.4	Elektrische Leistung/Verbrauch der Klimatisierungsmethoden	44
6.6	Energetisch – Thermische Bewertung	46
7	Diskussion und Ausblick	48
8	Verweis und Quellen	51

1 Problemstellung

Die energieeffiziente Bereitstellung von Wärme ist nicht nur ein wichtiger Bereich in der Gebäudeklimatisierung, sondern gewinnt auch in der Automobilbranche an Bedeutung: Insbesondere bei der Umstellung der Antriebstechnik von Verbrennungskraftmaschinen auf Elektromotoren und dem damit einhergehenden veränderten Energiemanagement. Für die Beheizung von Elektrofahrzeugen steht im Gegensatz zu Kraftstoff betriebenen Modellen keine oder nur unzureichend wenig Abwärme zur Beheizung der Fahrzeugkabine zur Verfügung. Aus diesem Grund muss bei aktuellen E-Fahrzeug-Modellen die Luft elektrisch erhitzt werden. Da die dafür erforderliche Energie nicht mehr als Antriebsenergie zur Verfügung steht, reduziert sich folglich die Reichweite der Fahrzeuge erheblich. Um die Reichweitenziele auch im Winterbetrieb zu erreichen, müssen neue Konzepte für die Beheizung von Fahrzeuginnenräumen gefunden werden. Dabei gilt es nicht nur, die Wärme besonders energieeffizient bereitzustellen, sondern auch intelligent zu verteilen, beispielsweise körpernah bei gleichzeitig vergleichbarer Klimawirkung hinsichtlich des Insassenkomforts. In diesem Zusammenhang ist besonders die Beheizung des gesamten Fahrzeuges mit Hilfe einer Luftheizung zu überdenken, da sich diese aufgrund der hierfür benötigten Enthalpie ohne die Nutzung der Abwärme als unwirtschaftlich erweist.

Eine Möglichkeit zur Umsetzung ist die Reduzierung der globalen Lufttemperatur im Fahrzeuginnenraum bei gleichzeitiger Bereitstellung von lokalen Klimatisierungsmaßnahmen z. B. durch Sitzheizung, Lenkradbeheizung oder die Wärmeübertragung durch Strahlungselemente. Hierbei müssen Konzepte bei unterschiedlichen abgesenkten globalen Umgebungstemperaturen hinsichtlich der notwendigen Leistung, Charakteristik, Lokalität und kombinatorischen Wirkung untersucht werden, um ein optimales Erreichen einer äquivalenten thermischen Behaglichkeitswirkung der Insassen zu ermöglichen.

Erste Untersuchungen mit Probanden haben in einer umfangreichen Vorstudie gezeigt, dass die Sitzheizung als alleinige Maßnahme nicht ausreicht, um kalte Umgebungsbedingungen zu kompensieren und dabei die thermische Behaglichkeit der Fahrzeuginsassen zu gewährleisten (Schmidt et al., 2013). Zwar konnte aus thermischer Sicht ein Kompensationseffekt durch das Aufstellen der Wärmebilanz gezeigt werden, jedoch verblieb die Rate der Unzufriedenen bei konsequent 40 %. Dies ist auf die menschliche Thermophysikologie zurückzuführen. Durch thermoregulatorische Mechanismen (Schwitzen, Kältezittern, Vasodilatation und -konstriktion) wird der Körperkern vor dem Auskühlen geschützt. Bei z.B. kalten Umgebungsbedingungen wird die Durchblutung in distalen Regionen (Arme, Hände, Beine und Füße) reduziert und somit der Wärmeverlust an der Körperperipherie verringert. Die lokale Wärmezufuhr der Klimamaßnahme hat sich diese asymmetrischen thermoregulatorischen Prozesse verstärkt. Durch die im Sitzbereich zugeführte Wärme haben sich die zentralen Körperbereiche zunehmend erwärmt und sich die Extremitäten, ganz im Gegenteil der Erwartungen, weiter abgekühlt. Stetig kalte Füße und ein warmer Sitzkontaktbereich haben den Diskomfort merklich beeinflusst und zu keiner zufriedenstellenden Akzeptanz geführt.

Diese Schwachstellen der reinen Beheizung mit einer Sitzheizung dienen nun als Grundlage für die Weiterentwicklung des Versuchskonzeptes. Im aktuellen Vorhaben werden ergänzende Versuche durchgeführt, ebenfalls bei abgesenkter Lufttemperatur. Diesmal wird der thermische Kombinationseffekt von Probanden untersucht, denen neben der Sitzheizung zusätzlich weitere, lokal wirkende Klimatisierungsmaßnahmen zur Verfügung stehen. Es soll geklärt werden, ob eine

gleichmäßigere Verteilung der Wärmezufuhr, auf den gesamten Körper, die Beschwerderate nachhaltig senken kann, um einen zufriedenstellenden Kompensationseffekt dieser lokal wirkenden Klimatechnologien zu erzielen.

2 Projektziele und Zeitplanung

Im ersten Teil beschäftigt sich das Projekt mit der systematischen Analyse des Einflusses verschiedener Kontakt- und Strahlungswärmeübertrager auf die thermische Behaglichkeit von Fahrzeuginsassen bei abgesenkter Umgebungstemperatur. Im zweiten Teil wird zudem der Energieverbrauch bzw. die installierte Leistung der Kontakt- und Strahlungswärmeübertrager in einem Versuchsstand gemessen und analysiert. Zuletzt werden die Ergebnisse der Untersuchung zur thermischen Behaglichkeit und der energetischen Analyse gegenübergestellt.

Die durchgeführten Arbeiten gliederten sich insgesamt in drei Arbeitspakete, die im Folgenden vorgestellt werden. Das Projekt mit einer Gesamtlaufzeit von sechs Monaten wurde zwischen Dezember 2013 und Frühjahr 2014 bearbeitet.

Arbeitspaket 1 - Versuchsvorbereitung

Das erste Arbeitspaket umfasst die Versuchsvorbereitung bzw. den Versuchsaufbau. Dazu wird der Bereich um den Fahrer eines PKWs durch mehrere gleichartige Versuchsbauten nachgebildet. In jedem Versuchsstand werden ein beheizbarer Fahrzeugsitz und ein beheizbares Lenkrad eingebaut. Weiterhin werden flächige Strahlungselemente, die nach entsprechenden Leistungsvorgaben konstruiert und angefertigt wurden, an ausgewiesenen Stellen angebracht. Der genaue Aufbau wurde mit dem FAT-Arbeitskreis 5 Fahrzeugklimatisierung diskutiert und wird in Kapitel 3 dargestellt. Weiterhin umfasst das Arbeitspaket die Überprüfung, Erweiterung und Installation vorhandener Messtechnik in einen Versuchsraum an der RWTH Aachen University. Parallel zum Versuchsaufbau werden elektronische Fragebögen zur Erfassung der thermischen Behaglichkeit der Probanden erstellt. Die Software hierzu wurde an der RWTH Aachen entwickelt.

Arbeitspaket 2 – Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführung ist Teil des zweiten Arbeitspaketes. In Vorversuchen werden Versuchsszenarien ausgewählt, die ein angemessenes Spektrum von Kombinationen der Kontakt- und Strahlungselementen abdecken. Aus diesen Ergebnissen wurde ein Zeitplan für die Versuchsdurchführung mit Probanden erstellt und anschließend die Probandenakquise gestartet. Während der Versuchsdurchführung werden jeweils die raumklimatischen und personenbezogenen Daten (Oberflächentemperaturen, Lufttemperaturen, Luftgeschwindigkeiten, Innenohrtemperatur usw.) aufgezeichnet. Weiterhin werden zur Bewertung des energetischen Gesichtspunktes die elektrische Leistungen und der Energieverbrauch der Komponenten mitgeschrieben.

Arbeitspaket 3 – Auswertung und Dokumentation

Arbeitspaket drei beinhaltet die Auswertung der Versuchsdaten und die Dokumentation der Ergebnisse. Zur Analyse der thermischen Behaglichkeit der Probanden in unterschiedlichen Szenarien werden statistische Signifikantests eingesetzt. Die Leistungs- und Verbrauchsdaten der Kontakt- und

Strahlungswärmeübertrager werden auf Konsistenz untersucht und über Mittelwertbildung zusammengefasst. Basierend auf den Resultaten der thermischen Behaglichkeit und der energetischen Analyse wird ein zusammenfassendes Diagramm erstellt, welches die schnelle Wiedergabe der Ergebnisse ermöglicht. Die vollständige Dokumentation des Projektes rundet das Vorhaben ab.

3 Versuchsaufbau und Messtechnik

Die Arbeiten des ersten Arbeitspaketes umfassen die Planung, Konstruktion und Installation eines geeigneten Versuchsstandes zur Umsetzung der Projektziele (vgl. Kapitel 2). In diesem Kapitel werden die wichtigsten Schritte der Entwicklung des Versuchsstandes (Abschnitt 3.1), die verwendeten Komponenten (Abschnitt 3.2), die Messtechnik (Abschnitt 3.3) und die letztendliche Versuchsanordnung im Versuchsraum (Abschnitt 3.4) erläutert.

3.1 Vorüberlegungen zum Versuchsaufbau

Im Folgenden werden die wichtigsten Vorüberlegungen zum Versuchsaufbau kurz dargestellt.

Flächenstrahlungselemente versus Infrarotstrahler

Strahlungswärme kann mit Hilfe von zwei Systemen nah an den Menschen herangebracht werden:

1. mittels flächigen Strahlungselementen
2. mittels punktförmigen Infrarotstrahlern

Großflächige Wärmestrahlungselemente bringen über eine relativ große Fläche bei moderaten Temperaturen (30 °C – 50 °C) die benötigte Wärme in einen Raum bzw. direkt an einen zu erwärmenden Körper. Infrarotstrahler nutzen heiße (>100 °C) oft keramische Punktstrahler, um Wärme auf eine eingegrenzte Fläche eines Objektes einzutragen. Vorteil der Infrarotstrahler sind die höheren, verfügbaren Temperaturen. Aufgrund der Sicherheitsanforderungen hinsichtlich der sehr heißen Oberflächentemperaturen (vgl. DIN EN ISO 13732-1, 2006) der Keramikteile der Infrarotstrahler kommen diese allerdings für den Einsatz im Automobil nicht ohne weitere konstruktive Maßnahmen in Frage. Aus diesem Grund wurden Flächenstrahlungselemente in Form von Heizfolien für Einbringung der Strahlungswärme gewählt.

Auswahl von zu wärmenden Körperoberflächen

Für die Auswahl der zu wärmenden Körperoberflächen wurden die Ergebnisse der vorangegangenen Studie zur Untersuchung des Kompensationseffekts durch Kontaktwärmeübertragung in Fahrzeugsitzen (Schmidt et al., 2013) herangezogen. Bei der Analyse der lokalen thermischen Behaglichkeit fällt auf, dass bei abgesenkter Umgebungstemperatur vor allem die Gliedmaßen als „kühl“ bis „kalt“ empfunden wurden. Extrema traten an den Händen und Füßen auf. Andererseits wurde von den Probanden der Sitzkontaktbereich bereits als „zu warm“ eingestuft, was auf eine zu hohe Leistung bzw. Wärmeabgabe der Sitzheizung zurückzuführen ist, sodass diese im Folgeprojekt etwas reduziert wird.

Weiterhin wurden bei sehr niedriger Umgebungstemperatur die Oberschenkelvorderseiten und die Arme als „leicht kühl“ bis „kühl“ empfunden. Daraus ergeben sich, ergänzend zur Sitzheizung, drei zu erwärmende Hauptregionen:

1. Füße und Unterschenkel
2. Oberschenkelvorderseiten und Arme
3. Hände

Füße und Unterschenkel werden über die Beheizung des Fußraumes an den Seitenflächen und der Fläche oberhalb der Beine abgedeckt. Hände und sekundär die Körpervorderseite werden mit Hilfe einer Lenkradheizung erwärmt. Als zusätzliche Maßnahme für die Körperseiten sowie zur gleichmäßigeren Verteilung der Wärme werden zudem beheizbare Seitenflächen an den Türen und an der Mittelkonsole angebracht. Die Sitzheizung zum Wärmeeintrag am Rücken wird beibehalten. Zusammenfassend ist die Anordnung der eingebrachten Elemente in Abbildung 1 schematisch dargestellt.

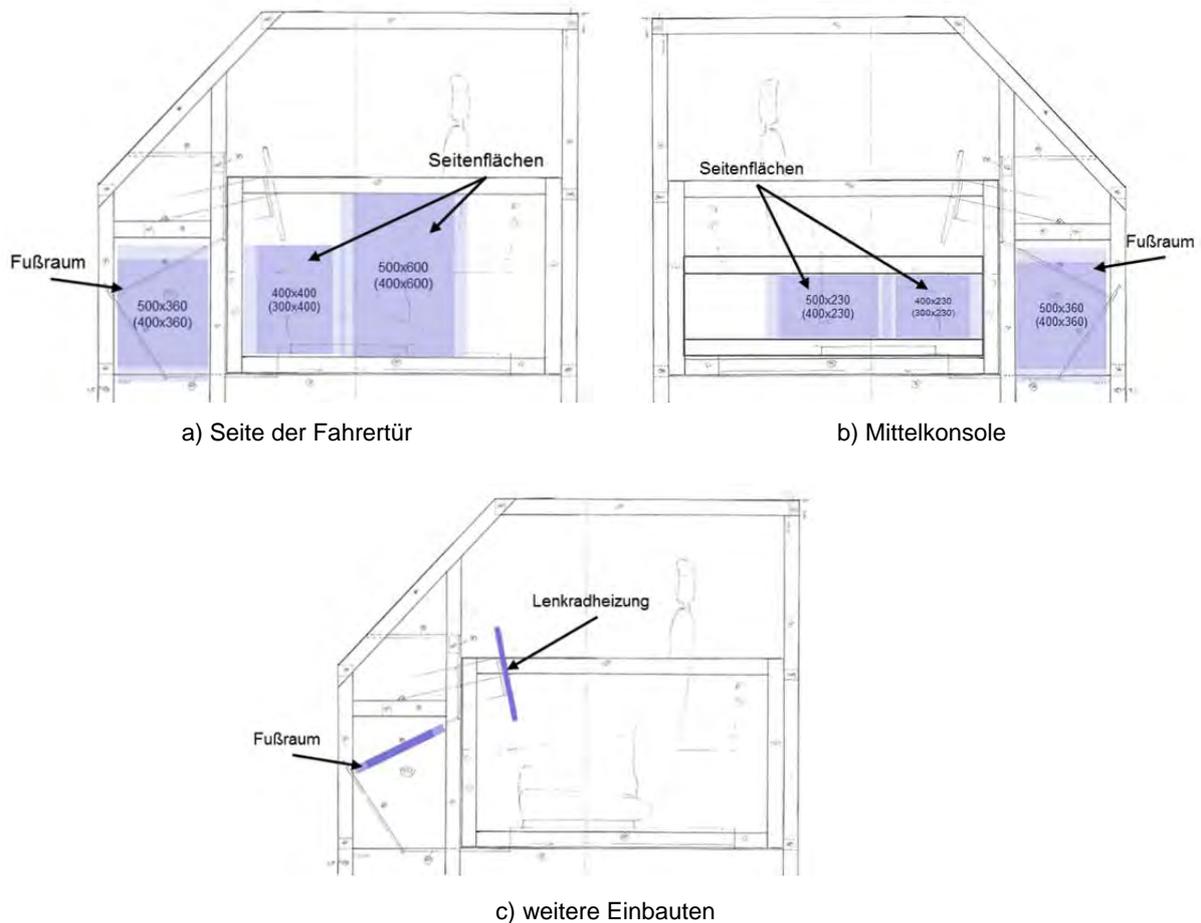


Abbildung 1: Schematische Anordnung der flächigen Strahlungselemente (außer Sitzheizung).

Abbildung der Fahrerkabine

Die ergonomische Anbringung aller Elemente um die Probanden erforderte die Konstruktion einer vereinfachten Fahrerkabine. Die Entscheidung fiel auf die Anfertigung eines Skelettbaus aus Holz, dessen Abmessung auf Maßen eines Standard Mittelklasse Wagens basiert. Die Konstruktion mit Fahrersitz und ohne Klimatisierungstechnologien ist in Abbildung 2 gezeigt. Weitere Details zur Fahrerkabine werden in Kapitel 3.2.1 erläutert.



Abbildung 2: Grundrüst des Versuchsstands mit Fahrersitz ohne eingebaute Klimatisierungstechnologien.

3.2 Komponenten des Versuchsaufbaus

Zur Durchführung der Studie werden Probandenversuche in einem klimatisierten Raum der RWTH Aachen University durchgeführt. Es handelt sich hierbei um einen Wohncontainer, der in Abschnitt 3.2.1 genauer beschrieben wird. Im Container werden insgesamt drei nachgebildete Fahrerkabinen installiert (vgl. Abschnitt 3.2.1), die mit Strahlungselementen, einem Sitz mit 2-Zonen-Sitzheizung und einem Lenkrad mit integrierter Heizung ausgestattet sind (vgl. Abschnitt 3.2.2 und 3.2.3) und parallel betrieben werden können.

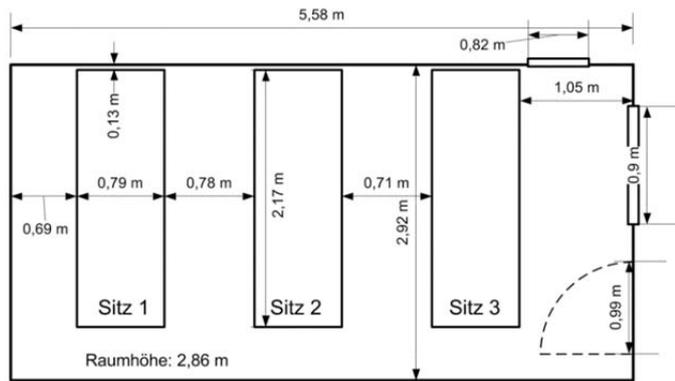
3.2.1 Versuchsraum und Fahrzeugstand

Die Versuche zur Studie finden in einem klimatisierbaren Container statt. Das Innere des Containers ist in einen großen Raum und einen Vorraum aufgeteilt, die durch eine Wand mit Tür und Fenster getrennt sind. Der Vorraum dient zur Unterbringung von benötigten Computern und Datenloggern. Weiterhin erfolgt die Probandenbetreuung der Versuche von dort aus, sodass eine thermische Barriere sichergestellt ist, jedoch der Sichtkontakt zwischen Probanden und Versuchsleiter besteht. Abbildung 3 zeigt zum einen die Außenansicht des Containers (3a) und des Weiteren den Grundriss mit Abmessungen (3b).

Die Klimatisierung erfolgt über ein Daikin Klimasplit-Gerät (Typ FTXS 71 G). Die Kühlleistung des Gerätes beträgt bis zu 6 kW und die Heizleistung bis 7 kW.



a) Außenansicht



b) Abmessungen des Versuchsraums im Container

Abbildung 3: Klimatisierbarer Versuchscontainer.

Der eigentliche Fahrzeugstand besteht, wie bereits beschrieben, aus einem Skelettbau aus Holz. Als Boden wird eine 38 mm Dicke Spannholzplatte eingesetzt, auf der über Kanthölzer der Fahrzeugsitz befestigt wird. Links und rechts vom Sitz befinden sich herausnehmbare Türen. In den Türrahmen sind 9 mm starke Spannholzplatten einsetzbar, die für die Anbringung der Strahlungselemente verwendet werden. Der Fußraum ist ebenfalls mit einer Spannholzplatte von 9 mm verkleidet. Zur Anbringung des Lenkrades wird ein höhenverstellbares Element installiert, das nach hinten offen ist. Letztendlich wurden noch Ablageflächen im vorderen und hinteren Bereich der Fahrerkabine angebracht.

Es werden insgesamt drei gleichartige Fahrzeugstände (vgl. Abbildung 4) eingesetzt. Die maximale Höhe, Breite und Tiefe betragen 155 cm x 79 cm x 217 cm (vgl. Bild b in Abbildung 3).

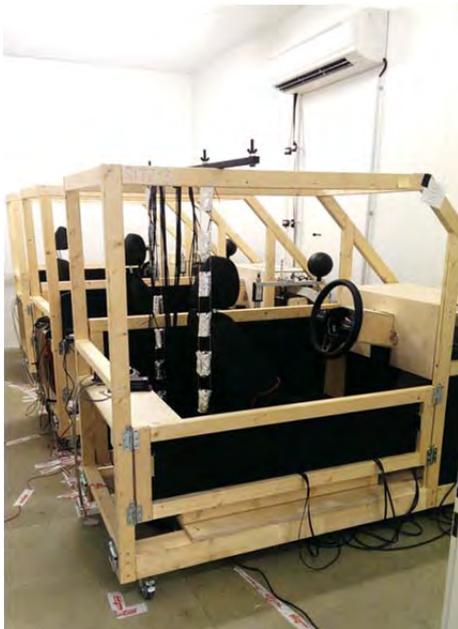


Abbildung 4: Messtechnisch vollständig ausgestattete Fahrzeugstände im Versuchscontainer.

3.2.2 Strahlungselemente

Hauptbestandteil der Strahlungselemente sind Deckenheizungsfolien vom Typ *Ecofilm C* der Firma *FENIX* (Fenixgroup, 2014). Die höchste lieferbare Leistung von 200 W/m^2 wurde sowohl in 400 mm als auch in 500 mm Breite verbaut. Die Anordnung und ungefähren Abmessungen sind in Abbildung 1 zu sehen.

Aufbau

Die Strahlungselemente bestehen aus jeweils fünf Schichten (s. Abbildung 5). Auf der 9 mm dicken Spanplatte ist eine Isolierschicht aus 5 mm *SELITAC* Parkett-/Laminatunterlage und darauf zwei Lagen der Heizfolie aufgeklebt worden. Abschließend werden die kompletten Platten mit schwarzem Stoff überzogen. Der schützt vor allem die Probanden vor möglichen Hitzegefahren durch den direkten Kontakt mit den Heizfolien und deren Anschlüssen. Gleichzeitig wird damit die Oberfläche des Fahrzeuginterieurs nachgebildet.

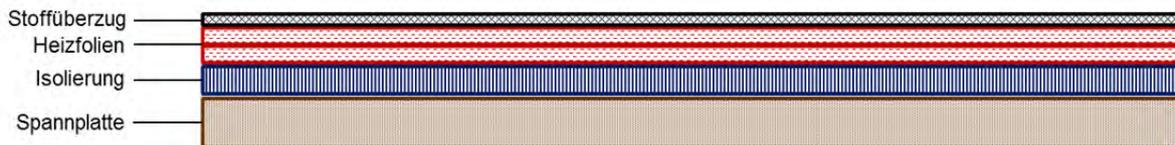


Abbildung 5: Schematischer Schichtaufbau der Strahlungselemente.

Regelung

Pro Versuchsstand werden sieben unabhängig voneinander regelbare Strahlungselemente eingebaut. Dabei befinden sich jeweils zwei Einheiten auf den Türflächen links und rechts vom Fahrer (vgl. Abbildung 1). Jede Regeleinheit besitzt eine eigene Stromversorgung. Zur separaten Regelung der Oberflächentemperaturen werden auf allen Heizelementen Temperatursensoren angebracht. Die Temperaturregelung erfolgt über ein hierfür entwickeltes Labview-Programm und eine angefertigte Steckerleiste (s. Abbildung 6) mit der entsprechenden Leistungselektronik.



Abbildung 6: Steckerleiste zur Regelung der Oberflächentemperatur aller Flächenstrahlungselemente. Die Ansteuerung erfolgt über Labview.

3.2.3 Fahrzeugspezifische Heizelemente

Sitz und Sitzheizung

In Absprache mit dem FAT Arbeitskreis Fahrzeugklimatisierung wurde die Auswahl geeigneter Fahrzeugsitze auf die Anwendung von Standardsitzen eines Mittelklassewagens eingeschränkt. Um die Kontaktfläche zwischen dem Insassen und dem Fahrzeugsitz zu erhöhen, eignet sich als Sitzform vor allem der körpernahe Schalensitz mit integrierter Sitzheizung.

Spezifikation des Fahrzeugsitzes:

- Sitz mit moderaten Seitenwangen (z.B. Sportsitz)
- Textilbezug
- 2-Zonen Sitzheizung (Sitzfläche und Rückenlehne)
- Regelbare Heizleistungen

Diese Sitze kamen bereits im Vorprojekt, dessen Ergebnisse in der FAT-Schriftenreihe 261 (Schmidt et al., 2013) veröffentlicht worden sind, zum Einsatz.

Lenkräder und Lenkradheizung

Jeder Fahrzeugstand wird mit einem Mittelklassewagen-Lenkrad ausgestattet. Das Airbagsystem wurde aus Sicherheitsgründen entfernt. Die integrierte Lenkradheizung wird mittels eines Netzteils mit Spannung versorgt. Für die durchzuführenden Versuche wird eine Oberflächenendtemperatur von 40 °C angestrebt, die nach einer 30 minütigen Laufzeit (zum Ende der Versuche) erreicht wird. In Vorversuchen wurden die hierfür notwendigen Leistungsdaten bei einer konstanten Spannungsversorgung empirisch ermittelt.

3.3 Messtechnische Ausstattung des Versuchsraums

Durch die messtechnische Ausstattung des Versuchsraumes und Vorversuche wird zum einen sichergestellt, dass die angesetzten thermischen Randbedingungen erreicht werden. Des Weiteren ist eine Analyse von raumklimatischen Effekten und deren Einfluss auf die Ergebnisse möglich. Mittels Leistungsmessern wird zudem der elektrische Verbrauch erfasst.

Für die Durchführung dieser Studie werden folgende Messsysteme eingesetzt:

- Behaglichkeitsmesssystem der Firma *Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH*
- Oberflächensensoren der Firma *Klaus + Holger Krischik KRITEC Temperaturmesstechnik GmbH* im Zusammenspiel mit dem Datenloggersystem *dataTaker* der Firma *Thermo Fisher Scientific Australia Pty Ltd.*
- Leistungsmesser *Technoline Cost Control* der Firma *TechnoTrade Import-Export GmbH*

Eine genauere Beschreibung der einzelnen Messsysteme kann dem Bericht der FAT-Schriftenreihe 261 (Schmidt et al., 2013) entnommen werden. Im folgenden Abschnitt werden deshalb nur ergänzende Messgeräte detailliert vorgestellt.

Behaglichkeitsmesssystem

Das auch als Behaglichkeits-Messbaum bekannte System von *Ahlborn* (Ahlborn, 2011) dient zur Erfassung aller physikalischen Grundklimagrößen, die für eine Vorhersage des thermischen Komforts in Innenräumen notwendig sind. Das System setzt sich grundsätzlich aus einem Stativ und folgenden Sensoren zusammen:

- Feuchte- /Temperaturfühler
- Globethermometer
- Thermoanemometer

Gekoppelt sind die Sensoren über einen Datalogger vom Typ *ALMEMO*[®]. Dieser wird über die Software *AMR WinControl* programmiert und ausgelesen (Ahlborn, 2011).

Oberflächensensoren

Die Anbringung erfolgt an den Oberflächen der Wände, Türen, Sitze, Lenkräder, beheizbaren Seitenteile sowie der menschlichen Haut für Kontrollmessungen und zur Vergleichbarkeit mit Ergebnissen von anderen Studien. Genauere technische Angaben können dem Datenblatt (Kritec, 2012) oder aus dem Abschlussbericht des Vorprojektes (Schmidt et al., 2013) entnommen werden.

Universal-Datenlogger

Mit dem hier verwendeten Datenlogger *dataTaker*, bestehend aus einem Basismodul und sechs Erweiterungsmodulen, sind ausreichend Steckplätze für die Oberflächensensoren und die Lufttemperatursensoren verfügbar (DataTaker, 2011).

Leistungsmesser

Zur zusätzlichen Datenaufnahme für den Energieverbrauch der Lenkrad-, Sitzheizung und der Seitenflächen wird der Leistungsmesser *Technoline Cost Control* (s. Abbildung 7) genutzt. Dieser gibt den Verbrauch in kWh an. Der Messbereich liegt zwischen 4 W und 3600 W. Es werden Daten zum aktuellen und maximalen Leistungsverbrauch aufgezeichnet (Technoline, 2014).



Abbildung 7: Leistungsmesser *Technoline Cost Control* (Technoline, 2014).

3.4 Anordnung aller Komponenten im Versuchscontainer

Eine Gesamtübersicht über die messtechnische Anordnung wird in Abbildung 8 dargestellt. Zusätzliche und nicht in diesem Bild eingezeichnete Messsysteme sind die Oberflächentemperaturfühler der Strahlungselemente am Sitz und Menschen.

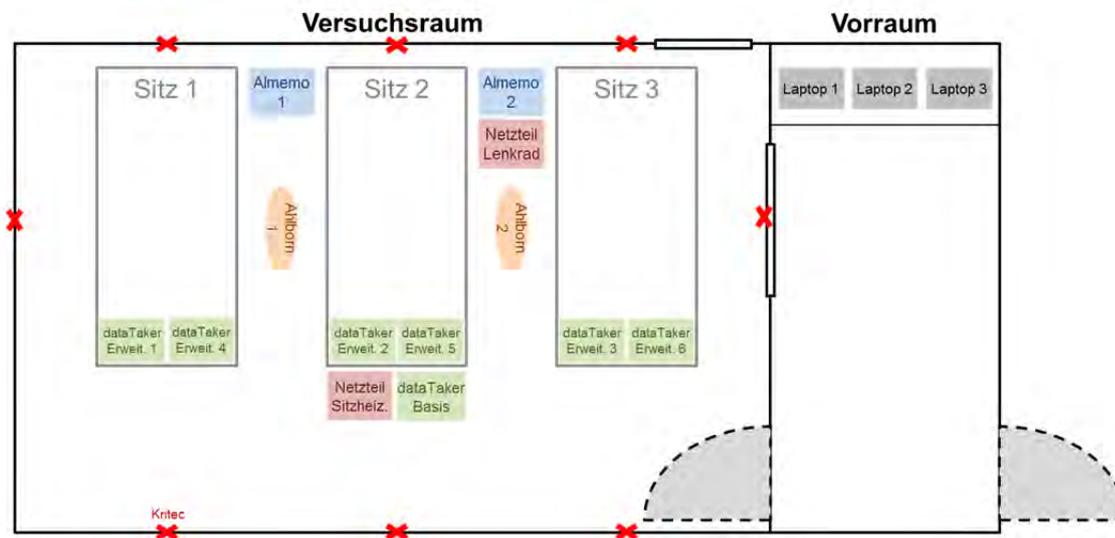


Abbildung 8: Anordnung der messtechnischen Komponenten im Versuchscontainer.

4 Methodik zur Probandenbefragung

In diesem Abschnitt werden kurz das Design des Fragebogens zur Bewertung der thermischen Behaglichkeit sowie der Ablauf der Befragung vorgestellt.

Aufbau der Fragebögen

Die Probanden mussten nach jedem Versuchsszenario eine subjektive Bewertung abgeben. Dies erfolgte über einen elektronischen Fragebogen, der aus drei wesentlichen Abschnitten besteht:

1. Globale Bewertung, d.h. thermische Behaglichkeit aus Sicht des ganzen Körpers
2. Lokale Bewertung, d.h. thermische Behaglichkeit aus Sicht einzelner Körpersegmente (s. Abbildung 9)
3. Bewertung der Raumluftqualität

In den ersten beiden Abschnitten wird nach der Temperaturwahrnehmung, dem Komfortempfinden (Akzeptanz), der thermischen Präferenz und der Toleranz gefragt. Die Fragen des dritten Abschnitts dienen zur olfaktorischen Bewertung der Raumluftqualität, sowie zu den Luftbewegungen und dem ergonomischen Sitzkomfort.

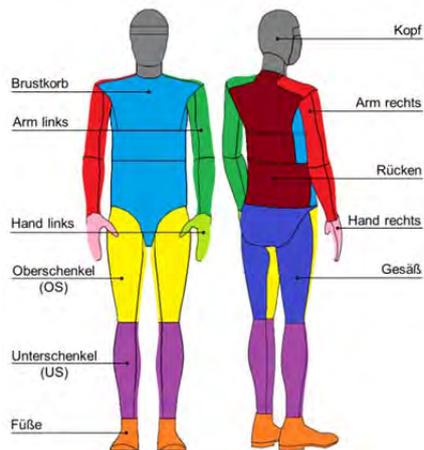


Abbildung 9: Segmentierung des Körpers für die Abfrage der thermischen Behaglichkeit.

Zur subjektiven Bewertung der thermischen Behaglichkeit wurden die Beurteilungsskalen der DIN EN ISO 10551 verwendet (DIN EN ISO 10551, 2002). Diese sind in Abbildung 10 aufgeführt.



Abbildung 10: Skalen zur Bewertung des subjektiven Empfindens (gemäß DIN EN ISO 10551:2002). Von oben nach unten: Temperaturempfinden, thermischer Komfort, Akzeptanz, Präferenz.

Ablauf der Befragung

Nach jedem Versuchsszenario (Dauer: 30 Minuten) wurden die elektronischen Fragebögen ausgeteilt. Dazu wurden die Versuchs-ID und die Probanden-ID vom Versuchsteam voreingestellt und das vorbereitete Tablet an die entsprechende Testperson ausgegeben. Nachdem alle Probanden ihre Bewertung verdeckt abgeben hatten, wurden die Tablets eingesammelt und die Daten gesichert.

5 Versuchsdurchführung

Die probandengestützte Versuchsdurchführung erfolgte, einschließlich Vor- und Nachversuchen, im Zeitraum vom 31. März 2014 bis zum 23. Mai 2014.

Insgesamt wurden zwölf Versuchsszenarien abgedeckt, die in Absprache mit dem FAT-Arbeitskreis Klimatisierung größtenteils festgelegt wurden. Durch Vorversuche wurden detaillierte Bedingungen abgestimmt (vgl. Abschnitt 5.1). Der Ablauf eines Versuchstages ist so ausgelegt, um die Zeit optimal zu nutzen und eine hohe Probandenanzahl zu erhalten (vgl. Abschnitt 5.2).

Ziel bei der Umsetzung der Versuchsszenarien war, dass die angestrebten Umgebungs- und Versuchsbedingungen eingehalten werden. Weiterhin wurden Probanden nach zeitlicher Verfügbarkeit und Geschlecht möglichst optimal auf die Versuche und Testtage verteilt. Auf Grund vieler sekundärer Einflussparameter lassen sich Abweichungen nicht immer vermeiden. Hierzu werden in Abschnitt 5.3 die realen probandenbezogenen Daten sowie die Versuchsbedingungen dargestellt.

5.1 Auswahl der Versuchsszenarien

Durch die zeitlichen Gegebenheiten konnten insgesamt zwölf Versuchsszenarien festgelegt werden. Basierend auf den Versuchen des Vorprojektes (Schmidt et al., 2013), wurden zunächst drei zu untersuchende globale Temperaturwerte festgelegt: 19 °C, 17 °C und 14 °C. Daraus ergeben sich bereits drei Versuchsszenarien, die sogenannten Referenzszenarien, in denen die Probanden nur den globalen Temperaturen ausgesetzt sind ohne zusätzlichen Wärmeeintrag.

Basierend auf den Referenzszenarien werden verschiedene Maßnahmen für den lokalen Wärmeeintrag gewählt:

- Sitzheizung mit unterschiedlichen Stufen
- Lenkradheizung
- Strahlungselemente

In Bezug auf die Sitzheizung werden, basierend auf Erfahrungswerten, für die globalen Temperaturen von 19 °C und 17 °C die Stufe 2 der Sitzheizung und bei 14 °C die Stufe 3 als einzustellende Möglichkeiten ausgewählt. Diese Auswahl trägt zum einem der im Vorprojekt festgestellten zu starken Beheizung des Rückenbereiches und zum anderen den in dieser Konfiguration zur Verfügung stehenden Klimatisierungsoptionen Rechnung.

Die sieben verfügbaren Strahlungselemente werden in zwei Regionen zusammengefasst:

- Fußraum, bestehend aus drei Einzelflächen, und
- Seitenflächen, bestehend aus vier Einzelflächen.

Da es sich bei einer globalen Temperatur von 19 °C um eine mäßige Absenkung der Innenraumtemperatur handelt, werden nur zwei kleinere Einzelmaßnahmen getestet. In einem Szenario wird deshalb nur die Sitzheizung auf Stufe 2 zugeschaltet und dadurch die Anbindung an die Versuche des Vorgängerprojektes ermöglicht. Für ein weiteres Szenario sollte der Effekt der Fußraumheizung bei mäßigem Wärmeeintrag (Oberflächentemperatur von 40 °C) untersucht werden. Eine Übersicht über die Szenarien bei 19 °C ist in Tabelle 1 gezeigt.

Bei den Szenarien mit einer Umgebungstemperatur von 14 °C haben Vorversuche gezeigt, dass ein hohes Maß an Wärmeeintrag notwendig ist, um diese Innenraumtemperatur angenehm zu gestalten. Neben dem Referenzszenario werden deshalb zwei Szenarien gewählt, die (fast) alle Wärmequellen nutzen. Es wird jedoch der Effekt der Seitenflächen näher beleuchtet, die in einem Szenario an und in dem anderen ausgeschaltet sind. Zusammengefasst sind die Parameter der Klimatisierungsmaßnahmen aller Szenarien in Tabelle 1.

Für eine Innenraumtemperatur von 17 °C können neben dem Referenzszenario fünf weitere Testfälle durchgeführt werden. Aufbauend auf den Versuchen des Vorgängerprojektes wird bei allen Szenarien außer dem Referenzszenario die Sitzheizung auf Stufe 2 eingestellt. Zusätzlich wird der Effekt der Lenkradheizung und der Beheizung des Fußraumes sowie deren Kombination untersucht. Die Zuschaltung der Seitenflächen erfolgt zunächst bei 45 °C. In den Vorversuchen sowie bei der Durchführung der ersten Versuche zeigte sich, dass die Kombination mit 40 °C Fußraum und 45 °C Seitenflächen bei einigen Probanden als zu warm eingestuft wurde. Aus diesem Grunde wird ein zwölftes Szenario mit 40 °C Seitenfläche gewählt. Die Details der Szenarien bei 17 °C Innenraumtemperatur sind in Tabelle 1 gezeigt.

Tabelle 1: Übersicht über Umgebungstemperaturen und Parameter der Klimamaßnahmen zu den zwölf Versuchsszenarien.

Einstellungen	Testszenarios											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Lufttemperatur	19	19	19	14	14	14	17	17	17	17	17	17
Sitzheizung	aus	Stufe 2	aus	aus	Stufe 3	Stufe 3	aus	Stufe 2				
Lenkradheizung	aus	aus	aus	aus	9V	9V	aus	9V	aus	9V	9V	9V
Fußraum	aus	aus	40°C	aus	45°C	45°C	aus	aus	40°C	40°C	40°C	40°C
Seitenflächen	aus	aus	aus	aus	aus	45°C	aus	aus	aus	aus	45°C	40°C

5.2 Ablauf eines Versuchstages

Um die Versuchstage möglichst effizient zu nutzen, werden pro Versuchstag zwei Probandengruppen mit je drei Probanden eingeladen. Pro Gruppe werden zwei Versuchsszenarien durchgeführt, wobei eine zeitliche Überschneidung eingeplant ist. Der Versuchsablauf gliedert sich für jede Gruppe in sechs Phasen (vgl. Abbildung 12):

1. Vorbereitung
2. Akklimatisierung 1
3. Versuchsszenario 1
4. Akklimatisierung 2
5. Versuchsszenario 2
6. Nachbereitung

In der ersten Akklimatisierungsphase, die in einem vorkonditionierten Institutsraum stattfindet, werden die Probanden auf die Versuche vorbereitet. Nehmen die Probanden erstmals teil, muss ein Fragebogen zum allgemeinen Gesundheitszustand ausgefüllt werden. Weiterhin werden die Probanden mit dem elektronischen Programm zur Abfrage der thermischen Behaglichkeit vertraut gemacht und die physiologischen Parameter der Probanden aufgenommen. Vor

jedem Versuchsbeginn muss zudem der Fragebogen zum aktuellen Gesundheitszustand ausgefüllt werden. Die zuvor desinfizierten Temperatursensoren (Messpunkte dargestellt in Abbildung 11) werden auf die Haut der Probanden mittels hautverträglichen Pflastern aufgeklebt.

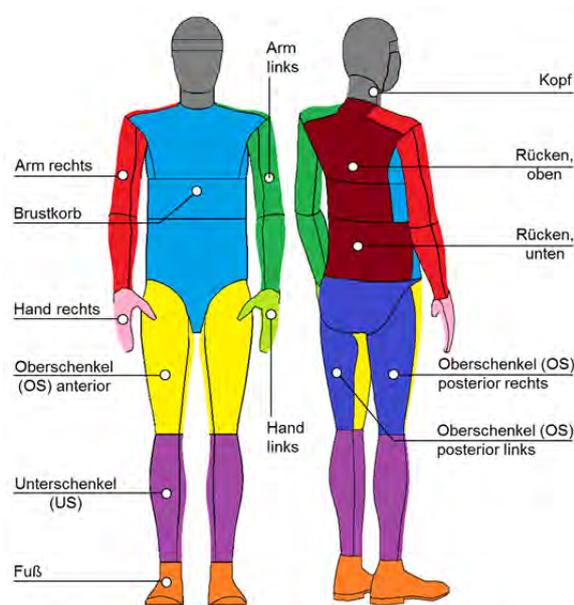


Abbildung 11: Lokale Messpunkte zur Erfassung der Hautoberflächentemperaturen.

Die Versuchsszenarien finden jeweils im Versuchscontainer statt. Die Probanden sitzen während der Versuche bei den ausgewählten Testbedingungen 30 Minuten in den Fahrzeugkabinen. Sie werden darum gebeten ihre Hände konsequent am Lenkrad zu halten. Direkt im Anschluss bewerten sie über den elektronischen Fragebogen ihre thermische Behaglichkeit. Bevor der Versuchsraum gewechselt wird, werden zunächst die thermophysiologicalen Werte (Blutdruck, Innenohrtemperatur und Herzfrequenz) erfasst.

Die Phasen der Versuchsszenarien werden durch eine weitere Akklimatisierungsphase in einem Institutsraum unter thermisch neutralen Umgebungsbedingungen getrennt.

Nach der Durchführung des zweiten Versuchsszenarios werden den Probanden die Sensoren abgenommen und im Anschluss desinfiziert.

Zusammenfassend ist der Tagesablauf in Abbildung 12 dargestellt.

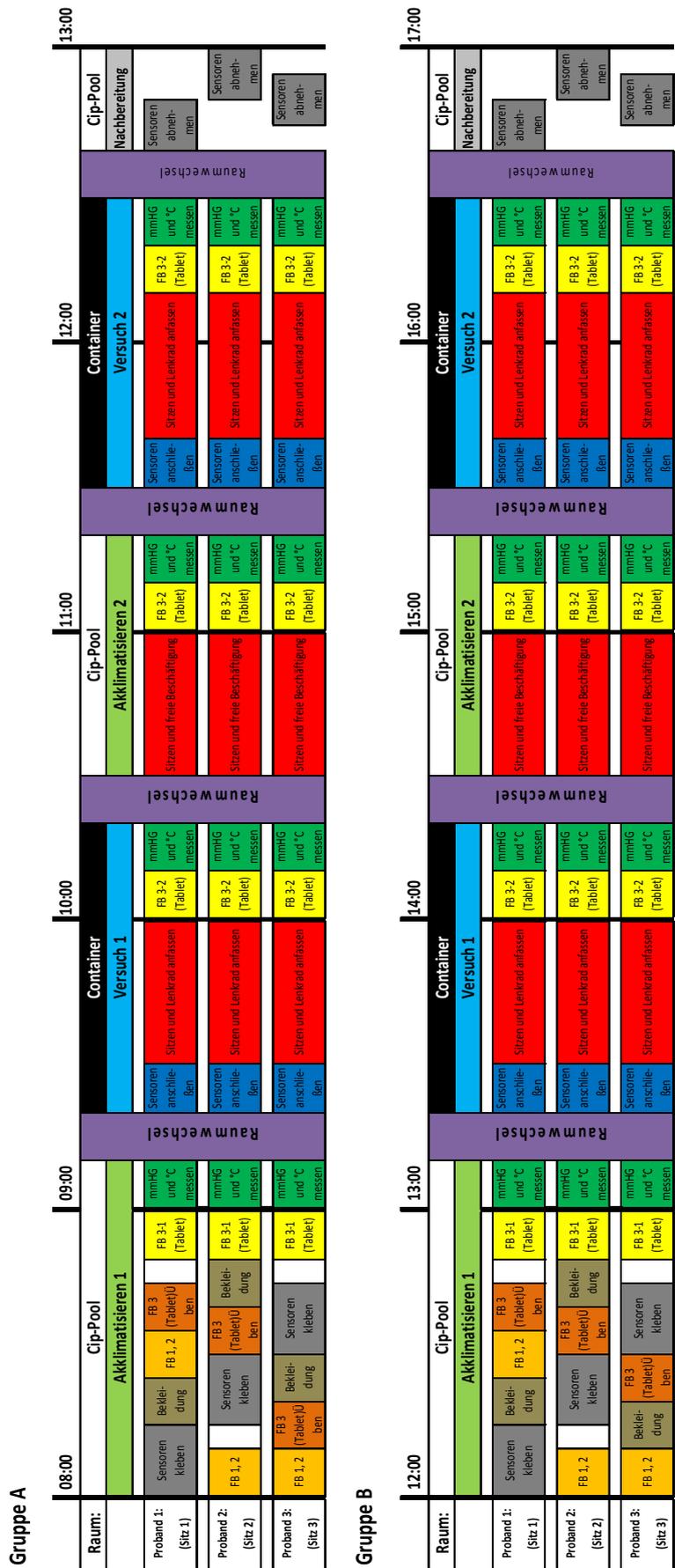


Abbildung 12: Ablaufplan eines typischen Versuchstages bestehend aus zwei Probandengruppen und je zwei Akklimatisierungs- und Versuchsphasen.

5.3 Charakteristische Daten der Versuche

Aufgrund von äußerlich wechselnden klimatischen Begebenheiten, kleineren Veränderungen bei der Durchführung bzw. kurzfristigen Absagen von einzelnen Probanden kam es zu Abweichungen bei den Probandenzahlen und einzelnen Versuchsbedingungen. Diese werden anschließend kurz diskutiert.

5.3.1 Daten zu den Probanden

Die absoluten Probandenzahlen aller Versuchsszenarien sind in Tabelle 2 dargestellt. Bei der Probandeneinteilung wurde eine Gesamtanzahl von 30 angestrebt. Zudem sollten mehr Männer als Frauen teilnehmen um eine gute statistische Auswertung dieser Gruppe zu ermöglichen. Die Probanden mussten an drei oder sechs Versuchstagen teilnehmen, wobei bei den Teilnehmern mit drei Versuchstagen darauf geachtet wurde, möglichst entweder die Szenarien mit 17 °C oder die Szenarien mit 14 °C und 19 °C abzudecken. Aufgrund von Absagen, Ausfall von technischen Elementen oder Fehlern bei der Versuchsdurchführung kam es organisationsbedingt zu Verschiebungen von einzelnen Probanden in ein anderes Szenario oder gar zum Ausschluss einiger Probanden. Die statistischen Tests zur Überprüfung signifikanter Unterschiede zwischen den subjektiven Bewertungen zur thermischen Behaglichkeit der einzelnen Szenarien erfolgten mit den in Tabelle 2 dargestellten Probandenzahlen.

Tabelle 2: Absolute Teilnehmerzahlen aufgeteilt nach Szenarien.

Anzahl Probanden	TestszENARIO											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
alle	27	27	27	24	24	24	25	25	25	25	25	25
Frauen	11	11	11	11	11	11	12	12	12	12	12	12
Männer	16	16	16	13	13	13	13	13	13	13	13	13

5.3.2 Reale Versuchsbedingungen

Die durchschnittlichen realen Versuchsbedingungen sind in Tabelle 3 dargestellt. Durch Einsatz der Klimaanlage wurde versucht, die angestrebten Startbedingungen von 14 °C, 17 °C und 19 °C einzuhalten. Die real im Versuchszeitraum vorliegenden Klimabedingungen aus Tabelle 3 verdeutlichen, dass klimabedingt bei den 14 °C-Szenarien die Starttemperaturen im Durchschnitt nicht exakt eingehalten werden konnten. Dies ist vor allem auf die sehr warmen untypischen Außentemperaturen im Frühjahr 2014 zurückzuführen. Da der Versuchscontainer zwar gut thermisch gedämmt, aber nicht ausreichend vor Sonneneinstrahlung geschützt ist, hatte das Wetter Einfluss auf das Innenraumklima des Containers. Unter diesen Randbedingungen war es je nach Wetterbedingung zu manchen Zeitpunkten schwierig die eingebrachten Lasten vollständig abzuführen. In Tabelle 3 sind die Durchschnitts- und Endtemperaturen im Innenraum ersichtlich. Während der Versuchszeit von 30 Minuten sind diese aufgrund der eingebrachten Wärmelasten angestiegen.

Tabelle 3: Mittelwerte zu den realen klimatischen Versuchsbedingungen der Szenarien.

gemittelte Werte	Testszenario											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Ist-Lufttemperatur [°C]	19,1	19,5	19,0	16,4	17,1	18,2	17,4	18,4	17,6	18,6	18,6	19,0
Standardabweichung [K]	0,83	0,74	0,53	1,16	1,03	1,20	0,92	1,26	0,95	1,02	1,00	0,77
Starttemperatur [°C]	18,7	18,9	18,6	15,7	16,1	16,0	16,9	17,4	16,8	17,5	17,1	17,3
Endtemperatur [°C]	18,9	19,7	19,4	17,2	17,9	19,6	17,9	19,0	18,3	19,9	19,9	20,3
Temperaturerhöhung [K]	0,2	0,8	0,8	1,5	1,8	3,6	1,0	1,6	1,5	2,4	2,8	3,0

6 Auswertung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Versuchsszenarien dargestellt. Beginnend bei der subjektiven Beurteilung der thermischen Behaglichkeit werden zunächst die Temperaturwahrnehmung (vgl. Abschnitt 6.1.1) und die Komfortbewertung (Abschnitt 6.1.2) aus globaler Sicht betrachtet. Daran schließen sich die Ergebnisse zu den einzelnen Körpersegmenten an (vgl. 6.2.1 und 6.2.2).

Zur visuellen und quantitativen Veranschaulichung der Klimawirkung für den Menschen werden im Abschnitt 6.3 der Wärmeeintrag bzw. Wärmeverlust anhand von Thermographie-Bildern und Messwert-Diagrammen dargestellt.

Abschließend erfolgt eine Gegenüberstellung des elektrischen Verbrauchs für die einzelnen Klimamaßnahmen und Szenarien (vgl. Abschnitt 6.4 und 6.5).

6.1 Globale Behaglichkeitsaussagen

In diesem Abschnitt werden die Probandenaussagen in Bezug auf den gesamten Körper dargestellt. Zur besseren Einschätzung der Klimabewertung wurden die Aussagen mittels *Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test* auf statistische Signifikanz (vgl. Schmidt et al., 2013) untersucht. Die signifikanten Unterschiede zwischen zwei Szenarien wurden direkt im Diagramm (vgl. Abbildung 13 und Abbildung 14) durch einen Stern * markiert. Geschlechtsspezifische Unterschiede werden dabei durch die Farben rot (Frauen) und blau (Männer) hervorgehoben. Die eingezeichneten Standardabweichungen beziehen sich auf die gesamte Probandengruppe (schwarz).

6.1.1 Temperaturwahrnehmung

Nachfolgend werden die arithmetischen Mittelwerte (schwarzes Quadrat: alle Probanden, rote Raute: nur Frauen, blaues Dreieck: nur Männer) und die Standardabweichungen bezogen auf das globale Temperaturempfinden dargestellt (s. Abbildung 13). Um den thermisch-neutralen Bereich hervorzuheben, wurde dieser in den Abbildungen grün markiert.

Die kältesten gemittelten Temperaturbewertungen der Abbildung 13 wurden in den Szenarien eins, zwei, vier, sieben und neun gegeben. Deren Mittelwerte, berechnet aus den Bewertungen aller Probanden, befinden sich jeweils im „leicht kühl“ bzw. „kühl“-Bereich.

Als Referenzszenarien ohne Klimatisierungsmaßnahmen gelten die Tests eins, vier und sieben und wurden entsprechend als „kühl“ bewertet. Auffällig ist, dass weibliche Probanden die Referenzszenarien bei 19 °C, 17 °C und 14 °C immer etwas kühler bewerteten als die männlichen Probanden.

Die Ergebnisse des Signifikanztests zeigen, dass sich im Mittel das thermische Empfinden bei einigen Versuchsdesigns aufgrund der zugeschalteten Klimamaßnahmen deutlich verschoben hat.

Zum Beispiel hat die Fußraumheizung in Szenario drei bei einer Umgebungstemperatur von 19 °C das thermische Empfinden bei der Gruppe der Frauen signifikant erhöht. Allerdings weisen die subjektiven Bewertungen der Gruppe der Männer bei den ersten drei Szenarien keine signifikanten Unterschiede auf. Alle drei Szenarien wurden von den Männern im Mittel als „neutral“ bewertet. Deshalb könnte gefolgert werden, dass für Männer eine Umgebungstemperatur von 19 °C bereits ausreichend warm ist und keine weiteren lokalen Heizsysteme notwendig sind für die Gestaltung eines thermisch behaglichen Innenraumklimas.

Einen deutlicheren Kompensationseffekt zeigen die Ergebnisse der Szenarien fünf und sechs. Durch die gewählten lokalen Heizsysteme wurde das „leicht kühl“ Empfinden des Referenzszenarios vier bei einer Umgebungstemperatur von 14 °C signifikant in den „neutral“ und „leicht warm“-Bereich verschoben. Geschlechtsunterschiede wurden durch diese Testergebnisse weniger ersichtlich. Verschiebungen beim Temperaturempfinden waren für Frauen und Männer annähernd gleichwertig.

Auffallend ist, dass die Klimamaßnahmen des Szenarios neun das Temperaturempfinden im Vergleich zum Referenztest (Szenario sieben) nicht signifikant veränderten. Alle anderen Testbedingungen haben die Klimawirkungen der Probanden deutlich kompensiert, was sich an einer Verschiebung des Temperaturempfindens erkennen lässt. Die Probandenvotes liegen größtenteils im „neutral“- bzw. „leicht warm“- Skalenbereich.

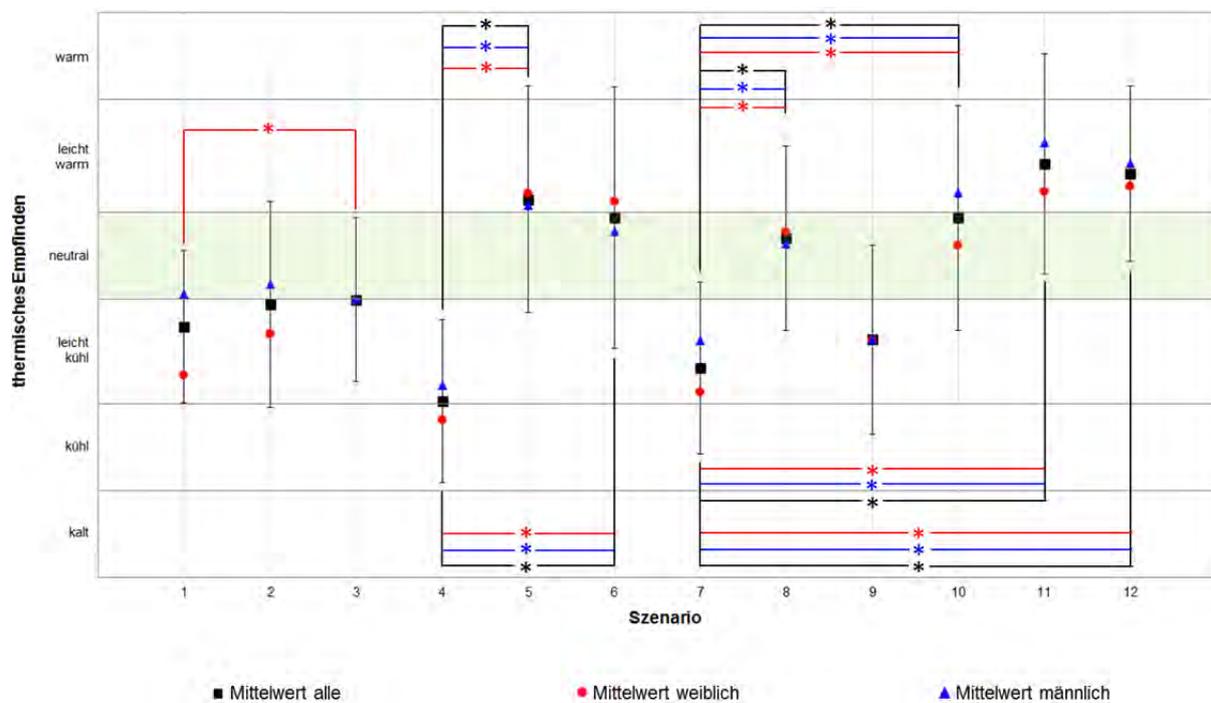


Abbildung 13: Gemittelte Fragebogenwerte und die Standardabweichung zum globalen Temperaturempfinden, grün hervorgehoben wurde der „neutrale“- Skalenbereich. Die Sternchen kennzeichnen jeweils sich signifikant voneinander unterscheidende Szenarien, wobei die Farben entsprechend der Legende gewählt wurden.

6.1.2 Komfortempfinden (Akzeptanz)

Nachfolgend werden die Ergebnisse des globalen Komfortempfindens im Sinne der Akzeptanz vorgestellt. In Abbildung 14 sind die gemittelten Fragebogenwerte (schwarzes Quadrat: alle Probanden, rote Raute: nur Frauen, blaues Dreieck: nur Männer) und deren Standardabweichungen bezogen auf das globale Komfortempfinden dargestellt. Die Grenze zwischen dem „leicht angenehmen“ und „unangenehmen“ Bereich, also zwischen thermischen Komfort und Diskomfort ist als rote, gestrichelte Linie gekennzeichnet.

In Abbildung 14 ist zu sehen, dass Szenario vier und sieben im Mittel als „unangenehm“ empfunden werden. Hinsichtlich des Temperaturempfindens werden diese beiden Szenarien als „leicht kühl“ bewertet, sodass diese als zu kühl gelten. Wobei dies vor allem auf die Bewertungen der Gruppe der Frauen zurückzuführen ist, denn die gemittelten Bewertungen der Gruppe der Männer befinden sich beim Referenzszenario sieben im „leicht angenehmen“ Skalenbereich. Noch eindeutiger wird es beim 19 °C-Referenztest. Hier empfand die Mehrheit der Frauen das Szenario eins als unkomfortabel und die Männer bewerteten es im Mittel als „leicht angenehm“ und damit als komfortabel. Für Männer scheint dementsprechend eine Kompensation nicht erforderlich zu sein. Dies deckt sich mit den bereits erläuterten Ergebnissen zur globalen Temperaturwahrnehmung.

Am angenehmsten (gemessen am Zahlenwert) gelten die Szenarien fünf, sechs, acht, zehn, elf und zwölf. Die Temperaturwahrnehmung der Szenarien fünf, elf und zwölf wurden als „leicht warm“ bewertet, sodass es den Probanden aufgrund der gewählten lokalen Klimamaßnahmen anscheinend ausreichend warm geworden ist.

Alle übrigen Szenarien wurden hinsichtlich des globalen Temperaturempfindens mit „leicht angenehm“ bzw. „neutral“ eingestuft. Anhand der relativ hohen Standardabweichungen lässt sich erkennen, dass Einzelmeinungen stark streuen.

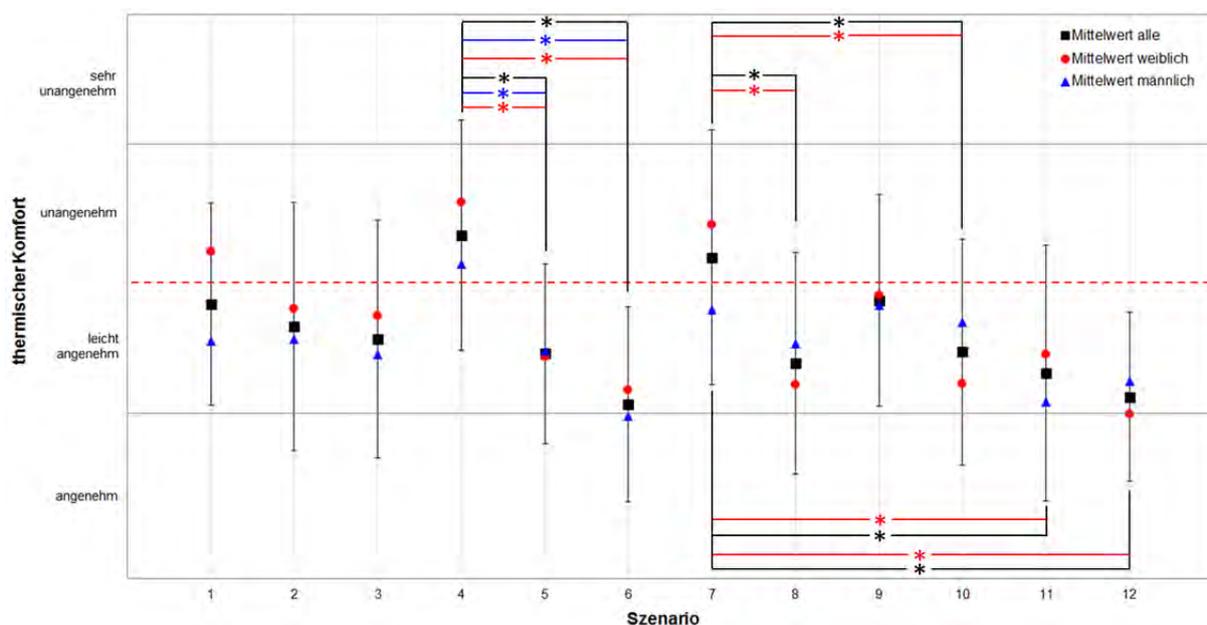


Abbildung 14: Gemittelte Fragebogenwerte und die Standardabweichung zum globalen Komfortempfinden. Die rot-gestrichelte Linie kennzeichnet den Komfort-Diskomfort-Übergang. Die Sternchen kennzeichnen jeweils sich signifikant voneinander unterscheidende Szenarien, wobei die Farben entsprechend der Legende gewählt wurden.

Um diese Streuungen besser interpretieren zu können, wurde die prozentuale Rate der Unzufriedenen bestimmt. Hierfür wurde der prozentuale Anteil der Teilnehmer berechnet, welche die Szenarien mindestens als „unangenehm“, d.h. als diskomfortabel bewerteten. Die Ergebnisse sind in Abbildung 15 als Säulen dargestellt. Dabei wurde die gesamte Gruppe als schwarze, die Gruppe der Männer als blaue und die Gruppe der Frauen als rote Säulen abgebildet.

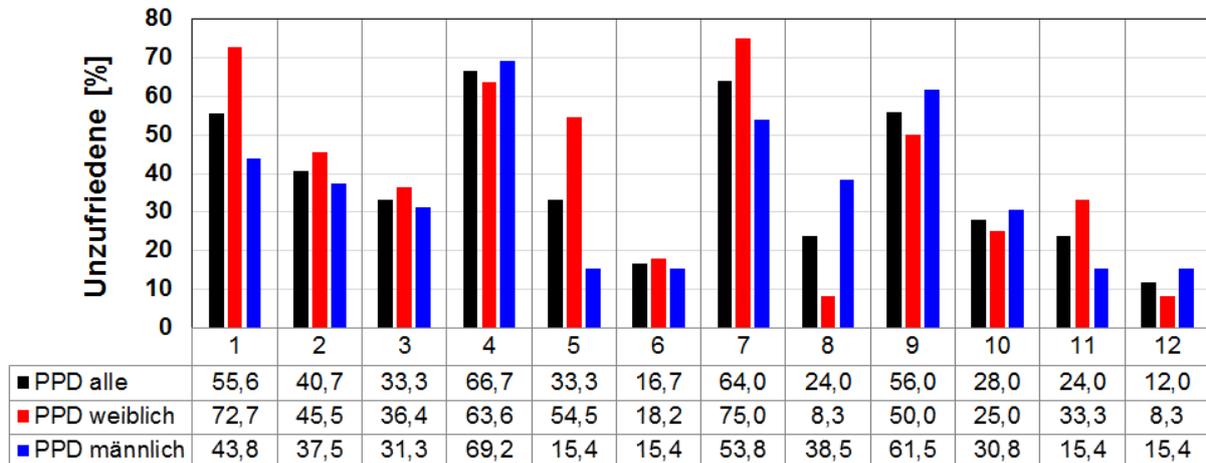


Abbildung 15: Prozentsatz Unzufriedener basierend auf der Anzahl an Probanden, die Szenarien mindestens „unangenehm“ empfanden.

Die Referenztests und Szenario neun brachten die höchsten Raten an unzufriedenen Personen (vgl. Abbildung 15) hervor. Dies passt zu den bisher dargestellten Ergebnissen und bestätigt, dass eine reine Reduzierung der Umgebungstemperatur zwar energiesparend sein kann, aber zu einer sehr hohen Unzufriedenheit der Insassen führt.

Durch die Klimamaßnahmen der 19 °C-Szenarien wurde die Rate der Unzufriedenen deutlich reduziert im Vergleich zu den entsprechenden Referenzwerten. Bei den Szenarien zwei und drei sind im Mittel 15 % bzw. 22 % zufriedener mit der thermischen Umgebung. Die absoluten Zahlen von mehr als 33 % sind jedoch zu hoch um von einem zufriedenstellenden Ergebnis zu sprechen.

Ähnliches zeigt sich bei den Ergebnissen der Szenarien fünf und sechs. Die Rate der Unzufriedenen hat sich im Vergleich zum Referenzszenario um 33 % bei Szenario fünf und um 50 % bei Szenario sechs reduziert. Im Mittel sind bei den Testbedingungen von Szenario fünf immer noch über 33 % unzufrieden. Dies ist kein akzeptables Ergebnis, insbesondere da die Rate des Szenarios sechs mit etwa 17 % Unzufriedenen deutlich besser ist. Das Zuschalten der Seitenflächen hat die Zufriedenheit der Probanden nochmals deutlich erhöht und wird deshalb als komfortables Szenario eingestuft. Aus Sicht der Gruppe der Männer hat Szenario fünf ebenfalls ein vertretbar gutes Ergebnis erbracht. Nur noch 15,4 % der Männer sind unzufrieden mit den Klimaverhältnissen im Innenraum.

Das im Mittel am angenehmsten bewertete Szenario ist Versuch zwölf mit 12 % Unzufriedenen (vgl. Abbildung 15). Für die Gruppe der Frauen scheint Szenario acht ebenfalls gute klimatische Bedingungen zu schaffen, da die Rate der Unzufriedenen gerade 8,3 % beträgt. Als akzeptables Szenario für Männer kann Testbedingungen elf, fünf und sechs gesehen werden, da nur 15,4 % der Männer thermisch unzufrieden sind.

Alle anderen Szenarien bei einer Umgebungstemperatur von 17 °C reduzieren die Diskomfort-Bewertungen zwar im Vergleich zum Referenzszenario, liefern dennoch keine zufriedenstellenden Ergebnisse. Die Rate der Unzufriedenen beträgt bei diesen Tests mindestens 24 % und ist damit nicht akzeptabel.

Folgende Abbildung 16 stellt eine geschlechtsspezifische Aufteilung der Unzufriedenen dar, um ein besseres Verständnis für den Grund der Unzufriedenheit zu erhalten. Damit lässt sich erkennen, ob der Diskomfort durch zu viel oder zu wenig Wärme verursacht wird. Als blaue Säulen wurden die Anzahl der Männer und als rote Säulen die Anzahl der Frauen der Gruppe der Unzufriedenen abgebildet.

Es ist ersichtlich, dass in den meisten Szenarien die Heizenergie nicht ausreicht, um das Temperaturempfinden bei der gesenkten Umgebungstemperatur auszugleichen. Die meisten Probanden empfanden die Szenarien eins, zwei, drei, vier, sieben und neun als „zu kühl“.

In den Szenarien drei (nur Männer), fünf (nur Frauen), sechs, acht (nur Männer), zehn (nur Männer), elf und zwölf treten subjektive Bewertungen auf, die diese Testbedingungen als „zu warm“ einstufen. Aus diesem Grund können vor allem Szenario elf und zwölf teilweise als „zu warm“ definiert werden.

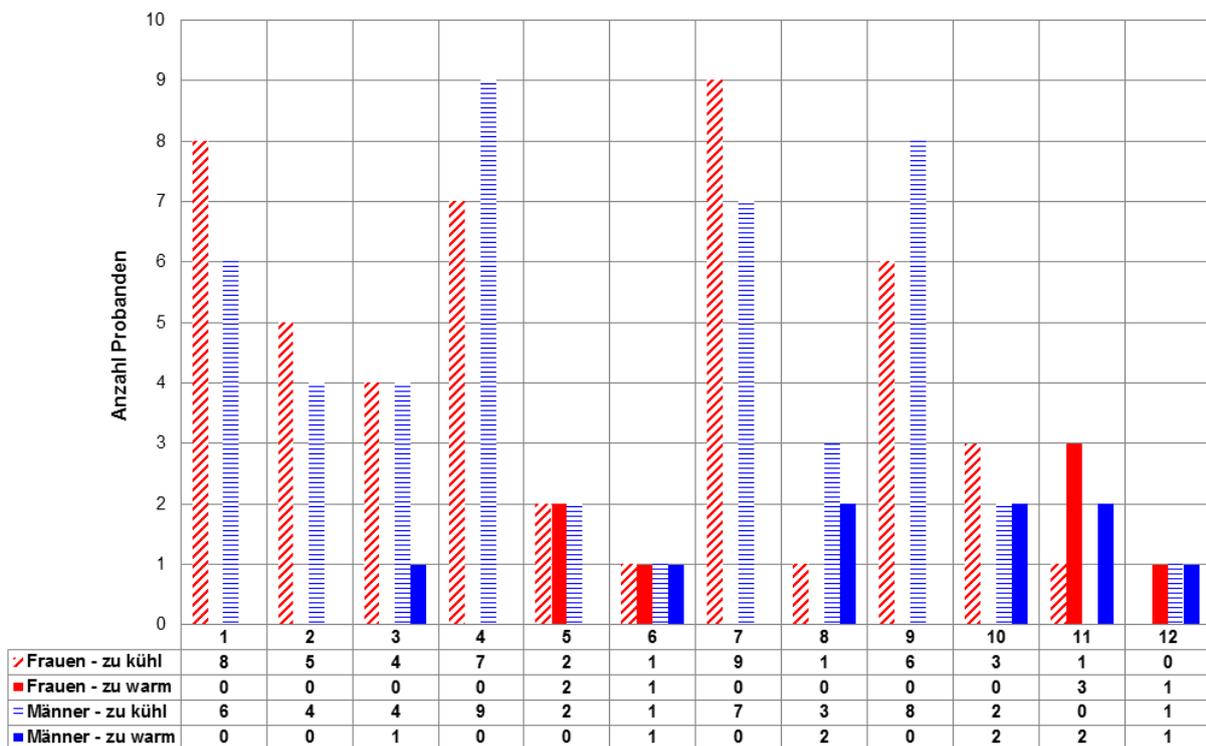


Abbildung 16: Aufteilung der Unzufriedenen in die Anzahl der Personen (rot: Frauen, blau: Männer), die Szenarien als „zu warm“ (gefüllte Säulen) und als „zu kühl“ (gestrichelte Säulen) empfanden.

6.2 Lokale Behaglichkeitsaussagen

Nach der Betrachtung der subjektiven Aussagen aus Sicht des gesamten Körpers werden anschließend die lokalen Bewertungen analysiert.

6.2.1 Bewertung der lokalen Temperaturwahrnehmung

Folgende Diagramme zeigen das thermische Empfinden der einzelnen Körpersegmente. Aus den subjektiven, lokalen Temperaturwahrnehmungen aller Probanden wurde für jedes Segment ein arithmetischer Mittelwert berechnet. Für eine bessere Darstellung sind die Bewertungen in zwei Diagramme aufgeteilt worden. Die Ergebnisse der Szenarien eins bis sechs sind in Abbildung 17 ersichtlich. Entsprechend sind die Resultate der Versuchsszenarien sieben bis zwölf in Abbildung 18 dargestellt. In beiden Diagrammen wurde der „neutrale“-Skalenbereich der Temperaturwahrnehmung farblich durch einen grünen Hintergrund hervorgehoben.

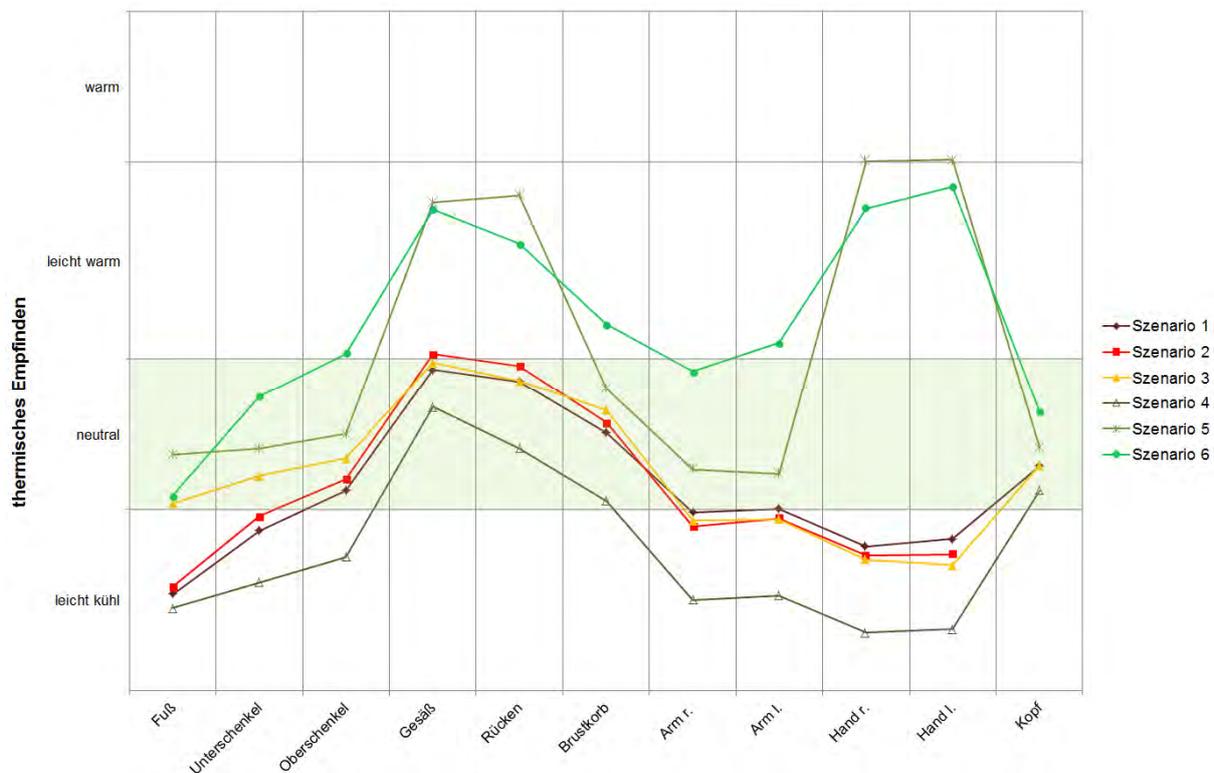


Abbildung 17: Gemittelte Fragebogenwerte der Szenarien eins bis sechs zum lokalen Temperaturempfinden von elf Körpersegmenten, grün hervorgehoben wurde der „neutrale“-Skalenbereich.

Die Bewertungen der Szenarien eins bis drei bei Umgebungstemperaturen von 19 °C zeigen einen ähnlichen Kurvenverlauf. Vor allem wurden die Regionen der oberen Körperhälfte in allen drei Testbedingungen gleichermaßen bewertet. Somit zeigen die Ergebnisse eine Reproduzierbarkeit auf.

Der Kopf, der Oberkörper, Gesäß, Rücken und die Oberschenkel wurden als „neutral“ bewertet. Rücken und Gesäß, die zum Sitzkontaktbereich gehören, erhielten die höchste thermische Bewertung und liegen genau genommen im Grenzbereich zwischen „neutral“ und „leicht warm“. Da kein Unterschied zwischen den subjektiven Bewertungen dieser drei Szenarien zu erkennen ist, kann

letztendlich die Sitzheizung bei Szenario zwei als Kompensationsmaßnahme ausgeschlossen werden. Das lokale Temperaturempfinden wurde nicht beeinflusst.

In diesem Szenario wurden die Extremitäten am kältesten empfunden. Dabei erhielten die Arme Bewertungen zwischen „neutral“ und „leicht kühl“, wodurch die Mittelwerte dieser Regionen ebenfalls im Grenzbereich liegen. Die Hände wurden bei diesen drei Szenarien als „leicht kühl“ eingestuft. Anhand der Bewertungen der unteren Extremitäten (Unterschenkel und Füße) zeigt sich der thermische Einfluss der aktiven Fußraumheizung mit einer Oberflächentemperatur von 40 °C bei Szenario drei. Ohne Fußraumheizung (Szenario eins und zwei) lagen die subjektiven Empfindungen im „leicht kühl“ Bereich. Durch das Zuschalten der Fußraumheizung erhöhten sich die Bewertungen der Füße und Unterschenkel und lagen im Mittel im „neutralen“ Bereich.

Die Körpersegmente in Szenario vier wurden durchweg am kältesten bewertet (s. Abbildung 17). Außer den Temperaturwahrnehmungen des Sitzbereiches (Gesäß und Rücken) und des Kopfes, welche im Mittel als „neutral“ beurteilt wurden, liegen alle anderen Körpersegmente im „leicht kühlen“ Bereich. Global betrachtet hat Szenario vier die kälteste Bewertung bekommen. Dies stimmt mit dem lokalen Temperaturempfinden überein. Letztendlich kann es wie erhofft als „zu kühles“ Szenario angesehen werden.

In den beiden Szenarien fünf und sechs liegen, die Bewertungen aller Körpersegmente mindestens im „neutralen“ Bereich bzw. darüber. Der Einfluss der Klimatisierung war demzufolge spürbar für die Probanden. Neben der Sitzheizung hat die Lenkradheizung das lokale Temperaturempfinden der Hände deutlich um knapp zwei Skalenbereiche (von „leicht kühl“ auf „leicht warm“) erhöht.

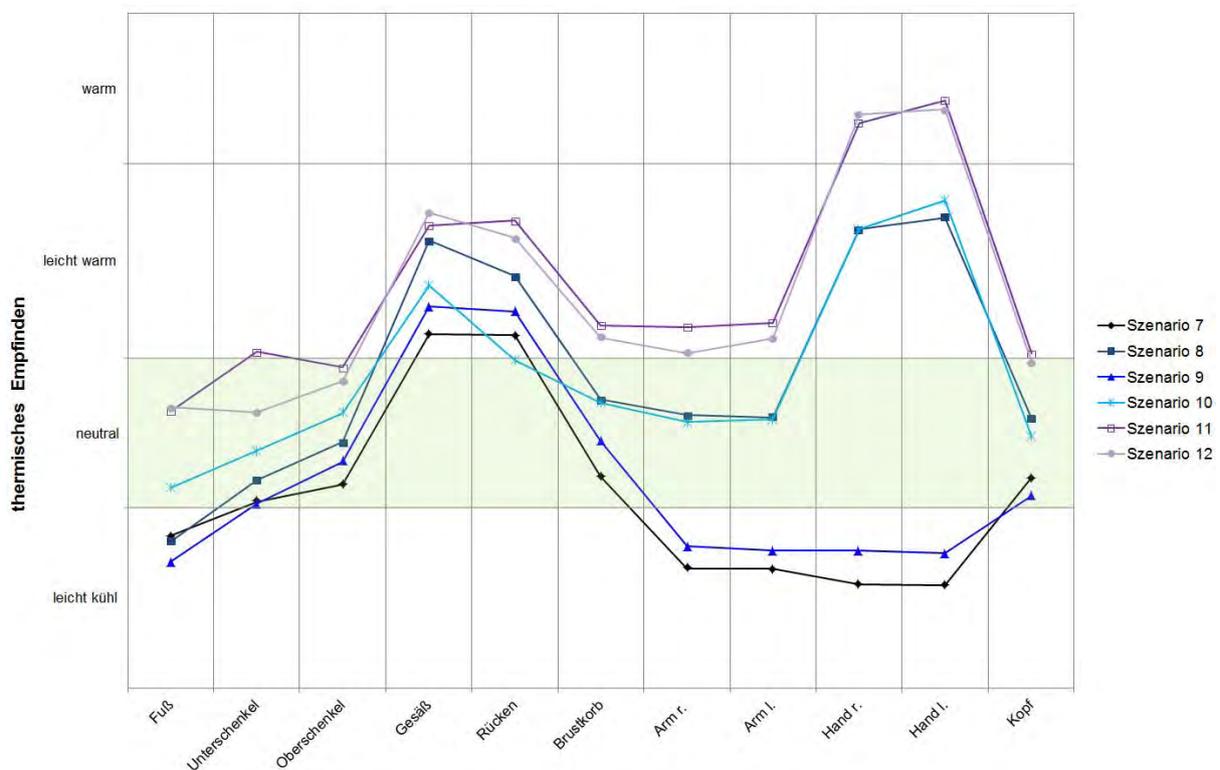


Abbildung 18: Gemittelte Fragebogenwerte der Szenarien sieben bis zwölf zum lokalen Temperaturempfinden von elf Körpersegmenten, grün hervorgehoben wurde der „neutrale“- Skalenbereich.

In Abbildung 18 sind die gemittelten Fragebogenwerte der Szenarien sieben bis zwölf abgebildet.

Das Szenario sieben hat von den 17 °C-Szenarien die kältesten lokalen Temperaturbewertungen erhalten. Gesäß und Rücken wurden als „leicht warm“, Oberkörper, Oberschenkel und Kopf als „neutral“ und die restlichen Körpersegmente als „leicht kühl“ empfunden. Aus globaler Sicht wurde dieses Referenzszenario ebenfalls als „leicht kühl“ eingestuft und stimmt somit mit den lokalen Bewertungen überein.

Das Szenario neun wurde ähnlich dem Referenzszenario bewertet. Nur die Füße wurden etwas wärmer empfunden, was an der zugeschalteten Fußraumheizung lag. Die Sitzheizung auf Stufe 2 erhöhte den Zahlenwert des Sitzkontaktbereichs ebenfalls, allerdings bleiben die lokalen Bewertungen im Skalenbereich „leicht warm“. Die Klimamaßnahmen haben die absoluten Zahlenwerte der meisten Körpersegmente aus Szenario neun erhöht. Aus Sicht der neun-Skalenbereiche des Temperaturempfindens nach DIN EN ISO 10551:2002 sind die subjektiven Bewertungen beider Szenarien als identisch einzustufen.

Aus globaler Sicht haben Szenario sieben und neun die „leicht kühl“ Bewertung erhalten, was sicherlich auf die abkühlenden Extremitäten zurückzuführen ist.

Unter den Testbedingungen des Szenarios acht und zehn resultieren ähnliche Kurvenverläufe. In beiden Szenarien ist die Sitz- und Lenkradheizung eingeschaltet, im Szenario zehn ist zusätzlich der Fußraum beheizt. Dies wird auch in den Temperaturbewertungen sichtbar. Bei beiden Szenarien wurden Gesäß und Rücken, sowie die Hände mit „leicht warm“ und die restlichen Körpersegmente mit „neutral“ beurteilt. Bei Szenario acht, bei dem die Fußraumheizung inaktiv war, wurden die Füße als „leicht kühl“ empfunden. Das Zuschalten der Heizung im Fußraum bei Szenario zehn kompensiert dieses lokale Kälteempfinden. Die gemittelten subjektiven Bewertungen lagen entsprechend im „neutralen“ Skalenbereich.

Die Bewertung der Körpersegmente im Szenario elf und zwölf wurden mit Abstand am wärmsten empfunden und sind aus Sicht der neun Skalenbereiche deckungsgleich. Der Kopf, die Füße, Unterschenkel und Oberschenkel haben die Bewertung „neutral“ erhalten, die Hände wurden als „warm“ und die restlichen Körpersegmente als „leicht warm“ bewertet. Aus globaler Sicht haben beide Testbedingungen die „leicht warm“-Beurteilung erhalten. Dies deckt sich mit den zuvor dargestellten Ergebnissen.

6.2.2 Lokales Komfortempfinden

Des Weiteren werden die Ergebnisse der Fragebögen bezüglich des lokalen Komfortempfindens vorgestellt. Die Ergebnisse der Szenarien eins bis sechs sind in Abbildung 19 zu sehen. Entsprechend sind die Resultate der Versuchsszenarien sieben bis zwölf in Abbildung 20 dargestellt. Jeweils farblich hervorgehoben (rot) wurde der Übergang vom Komfort- in den Diskomfortbereich.

Im Gegensatz zum globalen Komfortempfinden werden die einzeln abgefragten Körpersegmente durchweg als „angenehm“ bzw. „leicht angenehm“ bewertet. Nur bei den Referenzszenarien vier und sieben wurden die Füße, Arme bzw. Hände als „unangenehm“ bewertet. Vorstellbar wäre, dass eine zu detaillierte Abfrage bezüglich der thermischen Behaglichkeit deutlich schwieriger zu bewerten ist und die Ergebnisse deshalb dicht beieinander liegen. Die Aussagekraft ist an dieser Stelle begrenzt. Zur Vervollständigung werden die Ergebnisse dennoch in diesem Bericht gezeigt.

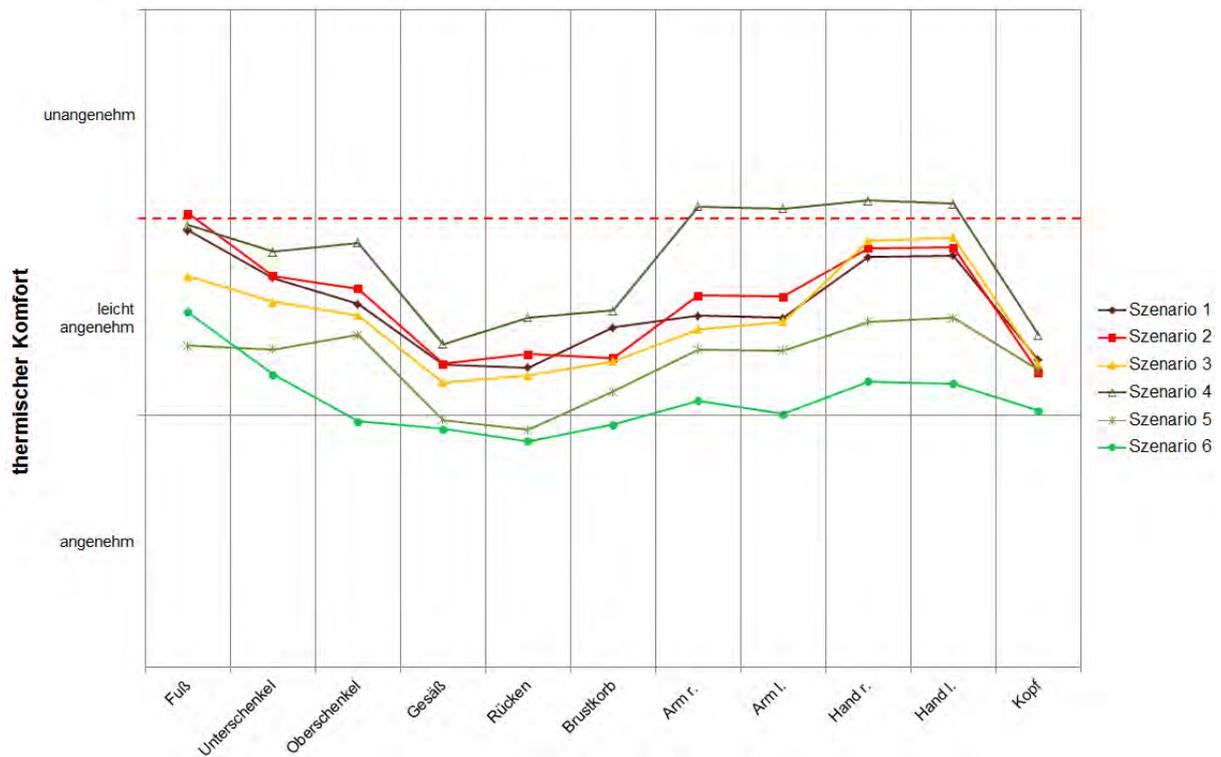


Abbildung 19: Gemittelte Fragebogenwerte der Szenarien eins bis sechs zum lokalen Komfortempfinden von elf Körpersegmenten. Die rot-gestrichelte Linie kennzeichnet den Komfort-Diskomfort-Übergang.

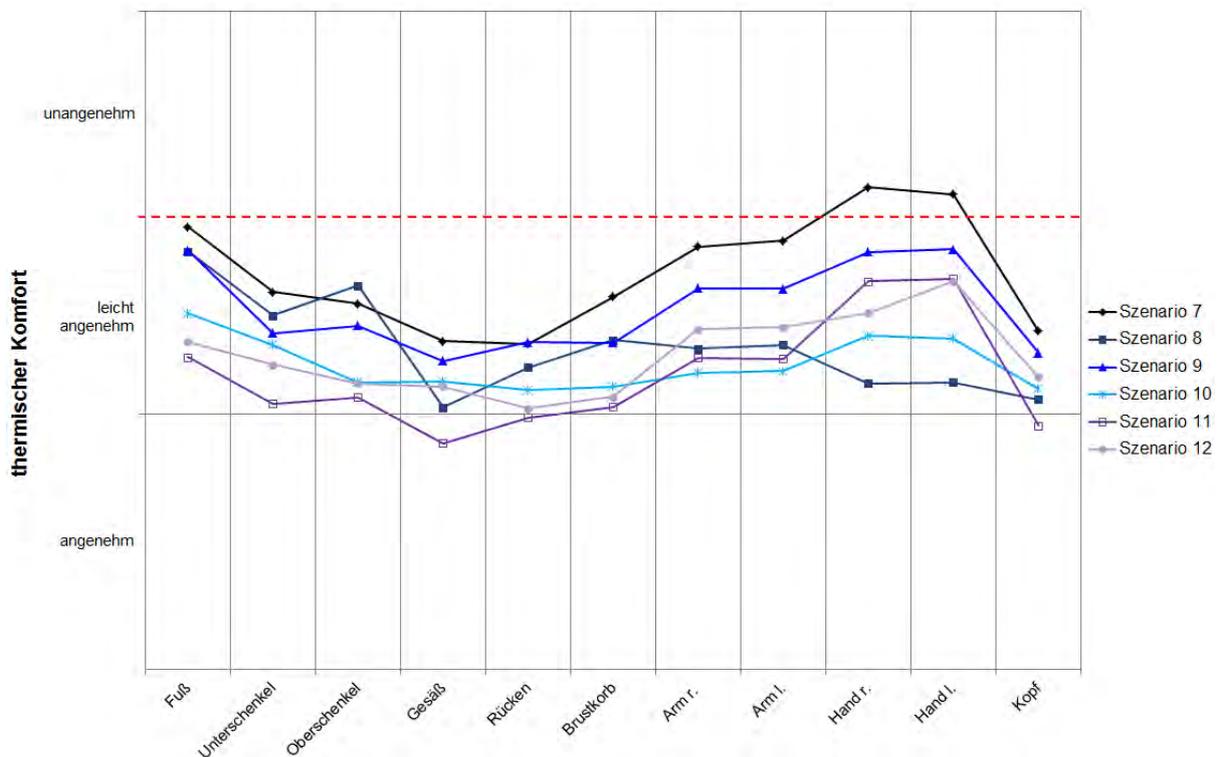


Abbildung 20: Gemittelte Fragebogenwerte der Szenarien sieben bis zwölf zum lokalen Komfortempfinden von elf Körpersegmenten. Die rot-gestrichelte Linie kennzeichnet den Komfort-Diskomfort-Übergang.

6.3 Oberflächentemperaturen

Zur Verdeutlichung der Klimawirkung auf den Menschen werden nachfolgend die Oberflächentemperaturen für alle Szenarien nacheinander dargestellt. Die Thermographiebilder visualisieren die klimatischen Bedingungen zu Beginn (0 Minuten) und zum Ende (30 Minuten) des Versuchs. Eine quantitativere Darstellung zur Wirkung der Klimamaßnahmen auf den Menschen ermöglicht die Gegenüberstellung der gemessenen Start- und Endhautoberflächentemperaturen. Die integrierten farbigen Balken verdeutlichen die Abweichungen zwischen Start- und Endwert (jeweils arithmetisch gemittelt über die auswertbaren Messwerte aller Probanden). Rote Balken stehen für lokale Erwärmungen und blaue Balken repräsentieren Abkühlungen und den damit verbundenen Wärmeverlust an dem Körpersegment. Um die Streubreite der Messwerte zu verdeutlichen, wurden ebenfalls die Standardabweichungen σ zu den gemittelten Werten der Start- und Endtemperaturen dargestellt. Normalerweise wird damit die Streuung um den arithmetischen Mittelwert ($\pm \sigma$) veranschaulicht. In diesem Fall wurden, die sich überschneidenden Streuungen weggelassen, um die Standardabweichungen den Start- und Endtemperaturen optisch besser zu ordnen zu können.

Die Infrarot-Bilder wurden nachträglich zu den durchgeführten Probandentests mit einzelnen Personen aufgenommen, um den Informationsgehalt zu erhöhen indem die Klimawirkung auf den Menschen ersichtlicher wird. Dennoch könnten kleinere Abweichungen zwischen den gemessenen lokalen Hautoberflächentemperaturen und den farblich dargestellten Oberflächentemperaturen bestehen, die bei der Interpretation der Daten zu beachten sind.

Szenario 1

In diesem Referenzszenario, bei einer mittleren Umgebungstemperatur von 19 °C, waren alle lokal wirkenden Klimamaßnahmen deaktiviert. Die Thermographiebilder in Abbildung 21 visualisieren die sich einstellenden Oberflächentemperaturen der Fahrzeugkabine und der Körperoberfläche.

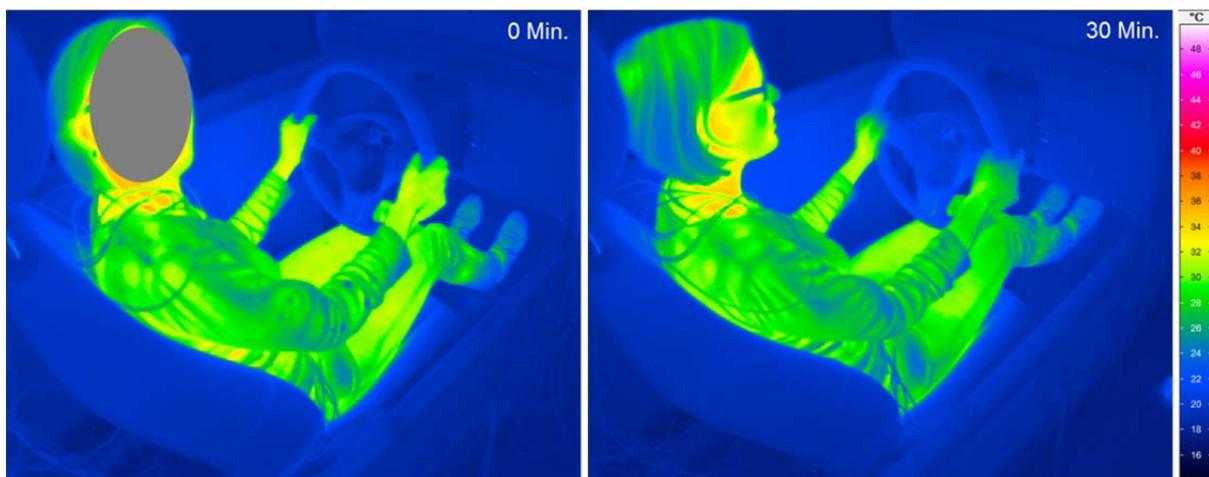


Abbildung 21: Thermographiebilder zur Darstellung der Oberflächentemperaturen des Szenarios eins (19 °C Soll-Lufttemperatur, ohne Klimatisierung). Links: zum Versuchsbeginn (0 Minuten), rechts: nach 30 Minuten.

Zu Beginn des Versuchs (linkes Bild) ist der Körper, aus einer thermisch neutralen Umgebung kommend, gleichmäßig temperiert. Gut zu erkennen ist dies an den warmen Händen, Oberschenkeln und Oberkörper. Das rechte Bild verdeutlicht die

thermoregulatorischen Mechanismen des Körpers. Durch die kühle Umgebung setzt die Wärmeregulation ein. Aufgrund der kühlen Lufttemperatur (dennoch nahe der thermischen Neutralität) verengen sich die Blutgefäße, um den Körperkern vor Wärmeverlusten zu schützen (vgl. Aschoff et al., 1971). Aufgrund der verringerten Durchblutungsrate reduziert sich die Oberflächentemperatur der Füße, Beine, Hände und Arme, beginnend in den Extremitäten. Dies ist deutlich zu erkennen am Farbwechsel der entsprechenden Körperregionen von gelb-grün in blau im rechten Bild von Abbildung 21.

Abbildung 22 verdeutlicht diese Theorien quantitativ durch gemittelte Messwerte der Hautoberflächentemperaturen. Die „Zentrale“ der Thermoregulation (vgl. Aizawa und Cabanac, 2000), der Hypothalamus (Körperregion Kopf), ist die einzige Region an der die Hautoberflächentemperatur weder steigt noch sinkt. Im Mittel beträgt die Oberflächentemperatur des Kopfes 32,8 °C. Der Körperkern (Torso, Rücken) und der Sitzkontaktbereich (Oberschenkel posterior) gehören zu den Körperregionen, deren Oberflächentemperatur innerhalb der 30 Minuten gestiegen ist. Alle Extremitäten (Arme, Unterschenkel ohne Sitzkontakt, Hände und Füße) sind den kühlen Umgebungsbedingungen ausgesetzt. Die thermophysiological Schutzmechanismen des Körperkerns bewirken, dass sich die Oberflächentemperaturen der Extremitäten über die 30 Minuten senken. Resultierend verringert der Körper dadurch den Wärmeverlust, was allerdings als Kälteempfinden wahrgenommen wird.

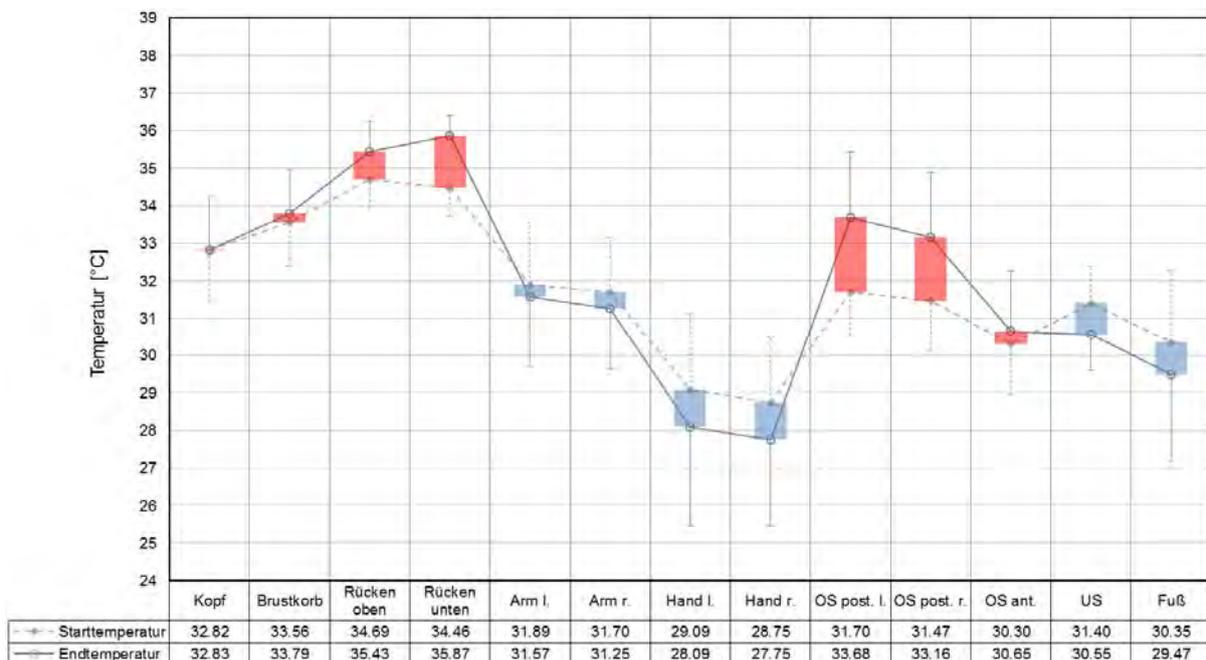


Abbildung 22: Gegenüberstellung der gemittelten Start- und Endhautoberflächentemperaturen, sowie deren Streubreite des Szenario eins (19 °C Soll-Lufttemperatur, ohne Klimatisierung) mit integrierten farbigen Balken zum Markieren der thermischen Abweichungen (rote Balken: lokale Erwärmung, blaue Balken: lokale Abkühlung) an den Körpersegmenten.

Szenario 2

Im Unterschied zu dem Referenztest (Szenario eins) ist in diesem Versuch die Sitzheizung aktiv und heizt konstant auf Stufe 2. Die Thermographiebilder in Abbildung 23 zeigen aus physiologischer Sicht ein vergleichbares Thermoregulationsverhalten des Körpers wie unter den klimatischen Bedingungen des ersten (Referenz-) Szenarios.

Aus der thermischen Neutralität kommend (linkes Bild), ist der Körper gleichmäßig warm temperiert. Nach einer Sitzzeit von 30 Minuten beginnen die Extremitäten langsam auszukühlen, um den Wärmeverlust des Körpers zu verringern. Das Auskühlen ist vor allem im rechten Bild der Abbildung 23 an den Händen, Armen und Füßen zu erkennen.

Der thermische Einfluss der Sitzheizung ist dagegen kaum zu erkennen. Dieser lokale Wärmeeintrag auf den Körperkern sollte den Wärmeverlust des Körpers in einer kühlen Umgebung schützen. Diese Heizmaßnahme allein, reicht nicht aus, um das Kalteempfinden des gesamten Körpers zu kompensieren. Dies bestätigen zum einen die Blaufärbung der Extremitäten im Thermographiebild zu Versuchsende (rechtes Bild), was auf ein Abkühlen der Oberflächentemperaturen an den Extremitäten (Füße und Hände) zurückzuführen ist.

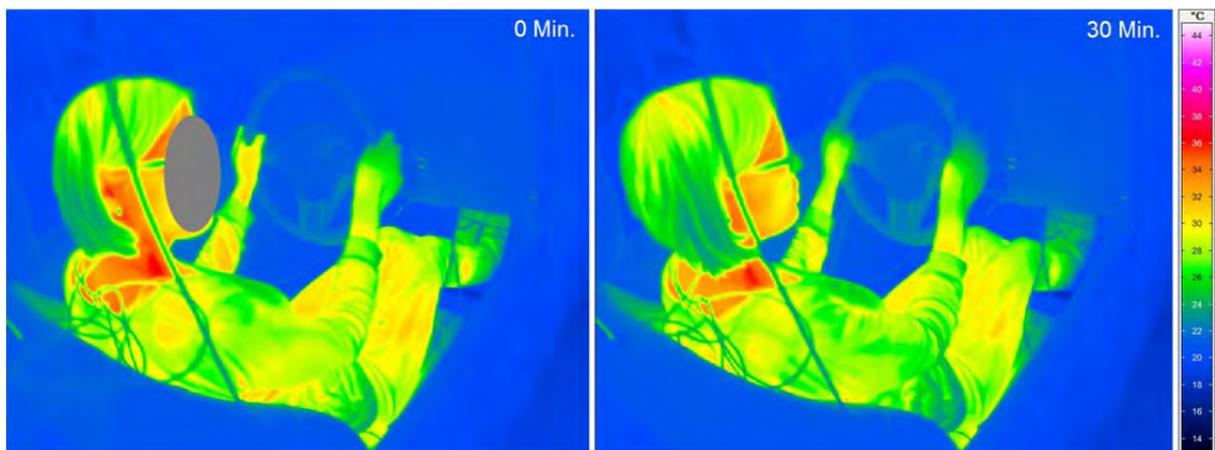


Abbildung 23: Thermographiebilder zur Darstellung der Oberflächentemperaturen des Szenarios zwei (19 °C Soll-Lufttemperatur, Sitzheizung auf Stufe 2). Links: zum Versuchsbeginn (0 Minuten), rechts: nach 30 Minuten.

Zusätzlich bestätigen die gemittelten Messwerte der Hautoberflächentemperaturen die abgeleitete Hypothese über absolute Zahlen. Nicht nur die Zahlenwerte zu Versuchsbeginn und -ende gleichen sich, sondern auch die sich daraus ergebenden Differenzen (s. Abbildung 24) sind vergleichbar mit den Messergebnissen aus dem Referenztest (Szenario eins).

Dementsprechend ist der thermische Einfluss der Sitzheizung sehr gering. Lediglich die Endtemperaturen im Sitzkontaktbereich (vor allem des unteren Rückens) sind etwas höher als im Referenzszenario eins (36,45 °C anstatt 35,87 °C). Der zusätzliche lokale Wärmeeintrag der Sitzheizung hat keinen messbaren Einfluss auf die restlichen Körpersegmente. An den Extremitäten erfolgt weiterhin eine thermoregulatorische Reduzierung der Oberflächentemperaturen als Schutzmaßnahme vor Wärmeverlust wie bereits im Referenzszenario. Im Mittel werden die lokalen Temperaturen der Füße und Hände um 0,6 K bis 0,9 K gesenkt. Damit sind die Differenzen der lokalen

Hauttemperaturen zwischen dem Sitzkontaktbereich und den Extremitäten größer geworden. Bei Szenario eins betrug die Differenz zwischen der minimalsten und maximalsten lokal gemessenen Hauttemperatur etwa 8,12 K und bei Szenario zwei sind es 9,11 K. Diese Erkenntnisse decken sich mit den bereits veröffentlichten Ergebnissen aus dem vorangegangenen Projekt (vgl. FAT-Schriftenreihe 261).

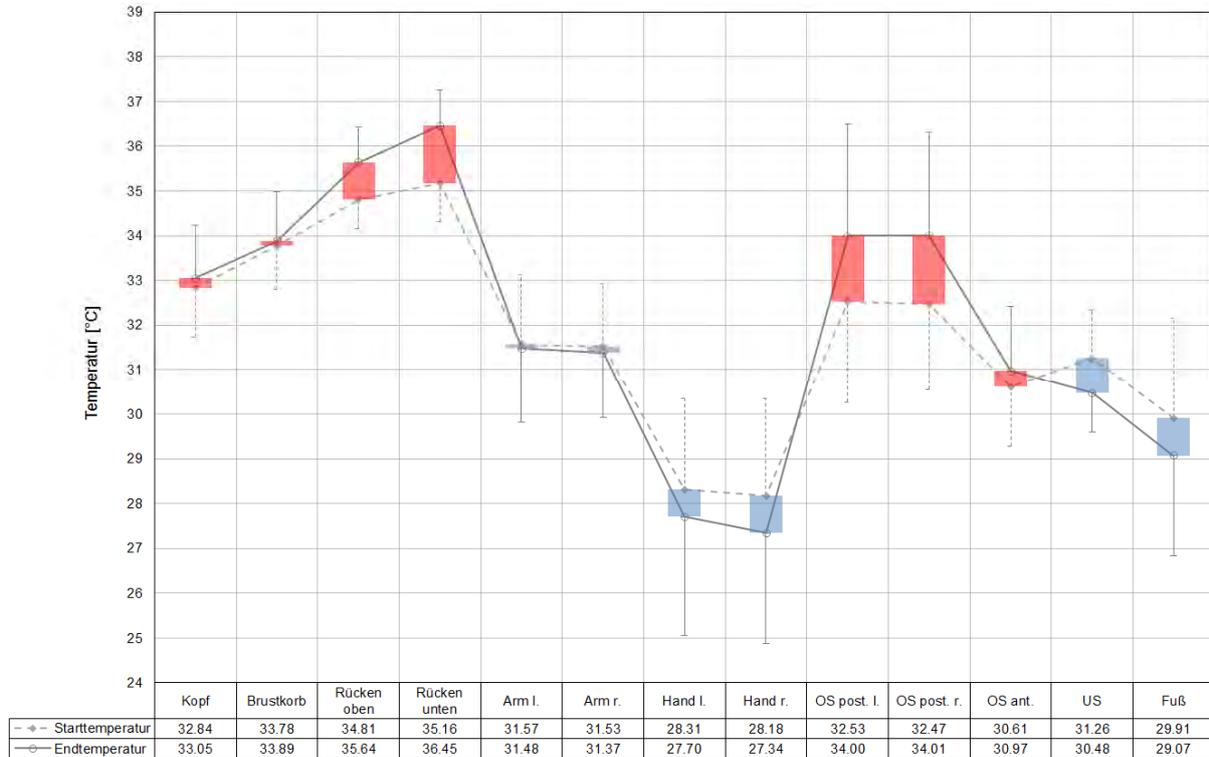


Abbildung 24: Gegenüberstellung der gemittelten Start- und Endhautoberflächentemperaturen, sowie deren Streubreite des Szenario zwei (19 °C Soll-Lufttemperatur, Sitzheizung auf Stufe 2) mit integrierten farbigen Balken zum Markieren der thermischen Abweichungen (rote Balken: lokale Erwärmung, blaue Balken: lokale Abkühlung) an den Körpersegmenten.

Szenario 3

In diesem Fall wurde bei einer Umgebungstemperatur von 19 °C und bei aktiver Fußraumheizung die thermische Behaglichkeit der Probanden untersucht. Abbildung 25 hebt die Wirkung der Fußraumheizung anhand der graphischen Darstellung der Oberflächentemperaturen hervor.

Im linken Bild sind zu Versuchsbeginn, aus der thermischen Neutralität kommend, die Füße etwas ausgekühlt. Der restliche Körper ist gleichmäßig temperiert. Das rechte Bild (nach 30 Minuten) zeigt die gleiche Person zum Versuchsende. Besonders gut lässt sich die aktive Fußraumheizung, die auf eine Oberflächentemperatur von 40 °C geregelt wird, und deren thermische Wirkung auf die Unterschenkel und Füße erkennen. Lediglich die Hände scheinen in diesem Szenario, aufgrund der kühlen Umgebungstemperatur von 19 °C, leicht auszukühlen.

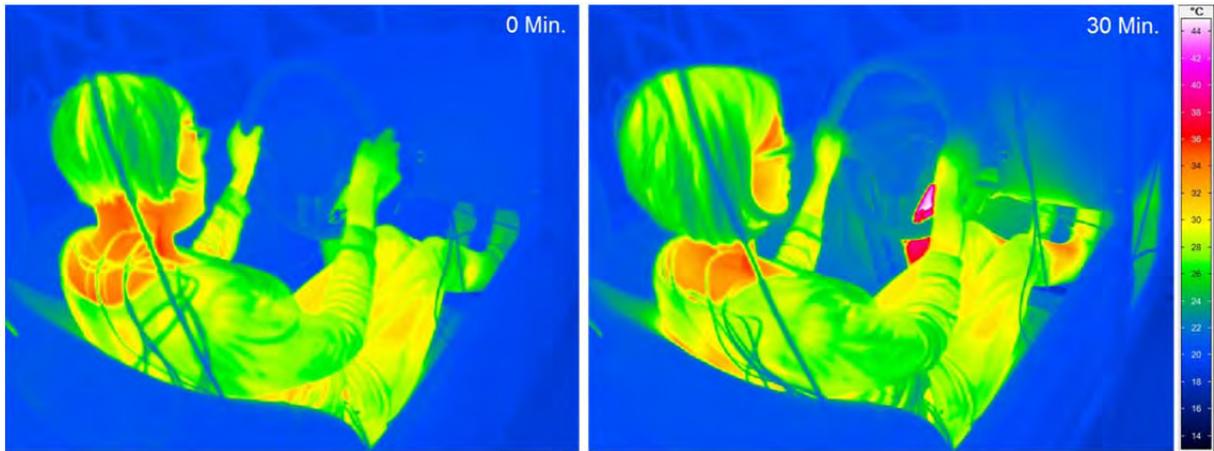


Abbildung 25: Thermographiebilder zur Darstellung der Oberflächentemperaturen des Szenarios drei (19 °C Soll-Lufttemperatur, Oberflächen der Seitenteile im Fußraum beheizt auf 40 °C). Links: zum Versuchsbeginn (0 Minuten), rechts: nach 30 Minuten.

Diese Vermutung wird durch die Messergebnisse in Abbildung 26 bestätigt. Der Wärmeeintrag der Fußraumheizung bewirkt im Vergleich zum Referenztest (Szenario eins) eine Erhöhung der lokalen Hautoberflächentemperaturen an Unterschenkel (ca. 1,5 K) und Füße (0,4 K). Lediglich die oberen Extremitäten (Arme und Hände) stehen merklich unter dem Einfluss des Thermoregulationssystems, denn die Hauttemperaturen sinken an diesen Regionen als Schutzmaßnahme vor zu hohem Wärmeverlust und dem resultierendem Auskühlen des Körpers.

Das Absinken der lokalen Oberflächentemperatur an Händen und Armen durch eine reduzierte Durchblutungsrate deckt sich mit den gemittelten Differenzwerten aus Szenario eins und zwei.

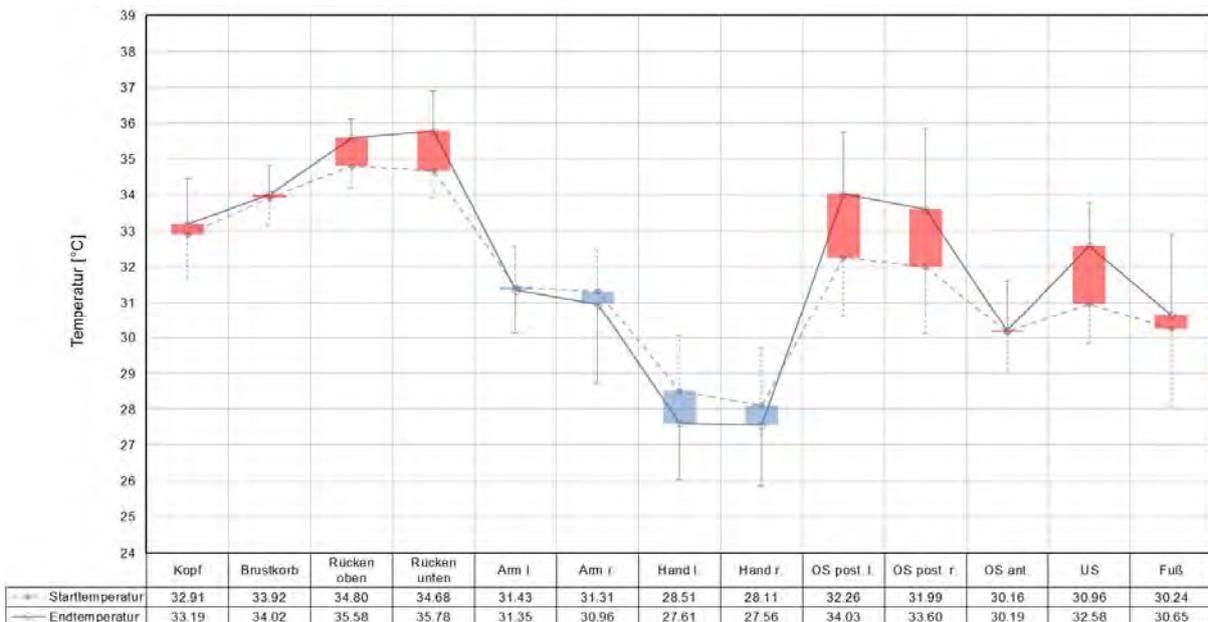


Abbildung 26: Gegenüberstellung der gemittelten Start- und Endhautoberflächentemperaturen, sowie deren Streubreite des Szenario drei (19 °C Soll-Lufttemperatur, Oberflächen der Seitenteile im Fußraum beheizt auf 40 °C) mit integrierten farbigen Balken zum Markieren der thermischen Abweichungen (rote Balken: lokale Erwärmung, blaue Balken: lokale Abkühlung) an den Körpersegmenten.

Szenario 4

Als Referenzszenario waren die Probanden 30 Minuten einer Umgebungstemperatur von 14 °C ausgesetzt. Abbildung 27 visualisiert das Szenario in Form einer Darstellung der Oberflächentemperaturen zu Beginn und am Ende (nach 30 Minuten) des Versuchs.

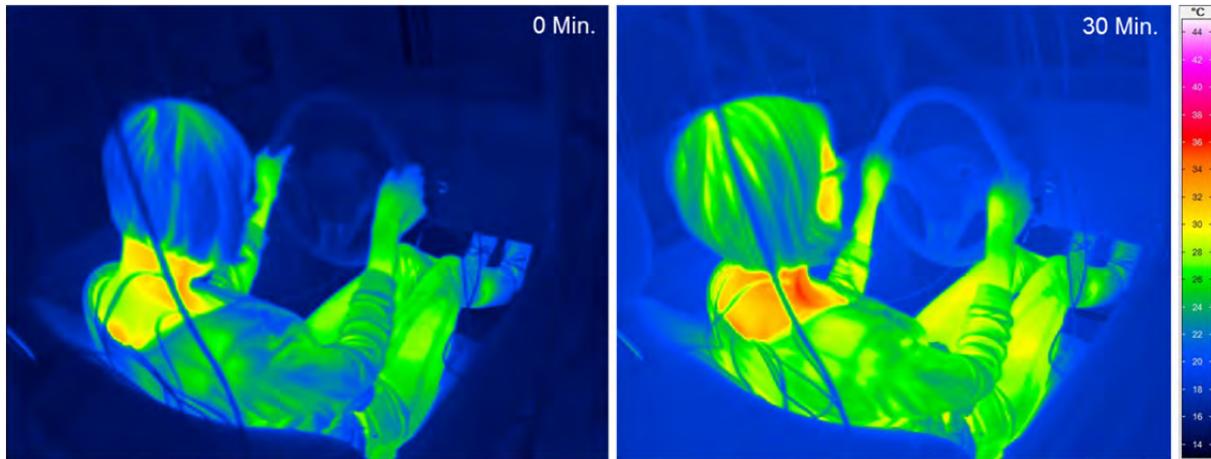


Abbildung 27: Thermographiebilder zur Darstellung der Oberflächentemperaturen des Szenarios vier (14 °C Soll-Lufttemperatur, ohne Klimatisierung). Links: zum Versuchsbeginn (0 Minuten), rechts: nach 30 Minuten.

Trotz inaktiver Klimamaßnahmen entsteht der Eindruck, dass sich der Körper über die Testzeit von 30 Minuten gleichmäßig erwärmt. Nach Aschoff (Aschoff et al., 1971, S. 60-67) ist die Isolierung der Körperschale aufgrund der Vasokonstriktion bei unveränderter Wärmebildung nur bis zu einem gewissen Temperaturwert (d.h. einer kritischen Temperatur) möglich. Durch weiteres Absinken der Umgebungstemperatur unter diesen kritischen Punkt sind zur Aufrechterhaltung der konstanten Körperkerntemperatur gesteigerte metabolische Umsätze notwendig, um die Wärmeproduktion von Innen zu erhöhen.

Dabei nimmt die innere Wärmeerzeugung linear zur absinkenden Umgebungstemperatur zu und setzt große Wärmemengen durch z.B. zitterfreie Wärmebildung (gesteigerte Muskelaktivität in großen Gewebemassen) oder sichtbares Kältezittern der Skelettmuskulatur frei (vgl. Aschoff et al., 1971). Da die Muskelaktivität oder die metabolische Rate in diesen Versuchen nicht gemessen wurde, kann diese Annahme nur durch die Literatur gestützt werden. Zusätzlich werden die thermoregulatorischen Prozesse nur vom Hypothalamus gesteuert und nicht von den subkutanen Temperatursensoren (vgl. Aizawa und Cabanac, 2000), sodass trotz eines möglichen Anstiegs der Hautoberflächentemperatur die innere Wärmeproduktion erhalten bleibt, sollte der Wärmeverlust des Körpers an die Umgebung weiterhin zu hoch sein.

Allerdings zeigen die Messwerte der Hautoberflächentemperaturen in Abbildung 28 den typischen Thermoregulationsprozess und damit das Abkühlen der Extremitäten. Zum Schutz des Körperkerns vor dem Auskühlen wurde die Durchblutung in den Extremitäten gedrosselt. Demzufolge sinken die Oberflächentemperaturen an diesen Körperregionen. An den Armen wird die Temperatur im Mittel um etwa 0,4 K gesenkt, an den Händen reduziert sie sich um ca. 1,7 K und an den Füßen nimmt die Temperatur um etwa 0,8 K ab. Im Vergleich zum Referenzszenario eins, mit einer Umgebungstemperatur von 19 °C, haben sich vor allem die Temperaturen an den Händen und Füßen deutlicher reduziert.

Sank die lokale Hauttemperatur im Szenario eins im Durchschnitt um 0,9 K bis 1,0 K beträgt die Temperaturdifferenz im Mittel im Szenario vier 1,0 K bis 1,8 K.

Im Gegensatz dazu staut sich die abgegebene körpereigene Wärme im Sitzkontaktbereich, was zu einer Erhöhung der Hauttemperaturen in diesem Bereich führt. Dies betrifft die Rückseite der Oberschenkel und sowie den oberen und unteren Rücken.

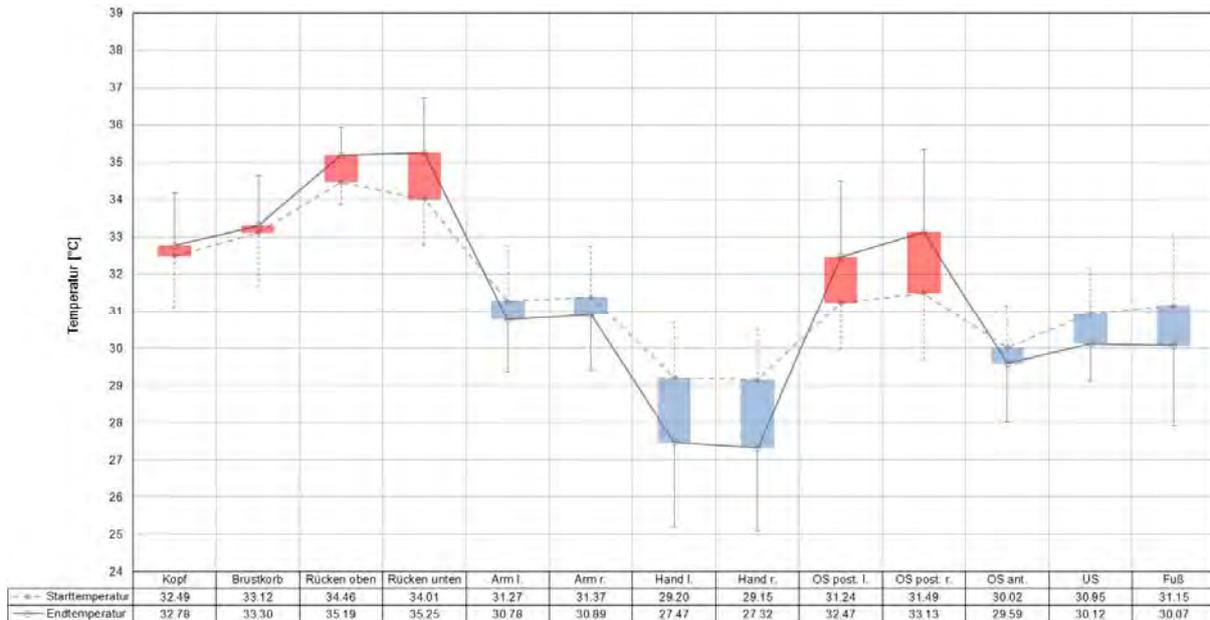


Abbildung 28: Gegenüberstellung der gemittelten Start- und Endhautoberflächentemperaturen, sowie deren Streubreite des Szenario vier (14 °C Soll-Lufttemperatur, ohne Klimatisierung) mit integrierten farbigen Balken zum Markieren der thermischen Abweichungen (rote Balken: lokale Erwärmung, blaue Balken: lokale Abkühlung) an den Körpersegmenten.

Szenario 5

Bei einer Umgebungstemperatur von 14 °C wurde das folgende Szenario fünf durchgeführt. Als Klimamaßnahmen standen die Sitz- und Lenkradheizung, sowie die beheizten Seitenteile im Fußraum mit einer Oberflächentemperatur von 45 °C zur Verfügung.

Abbildung 29 veranschaulicht das Szenario in Thermographiebildern. Links ist der Versuchsbeginn dargestellt. Rechts im Bild zeichnet sich die aktive Lenkradheizung ab. Ebenfalls gut zu erkennen ist die Reflektion der Wärmestrahlung von den Seitenflächen des Fußraums auf die Unterschenkel und die Füße. Insgesamt scheint der Körper gleichmäßig erwärmt zu werden.

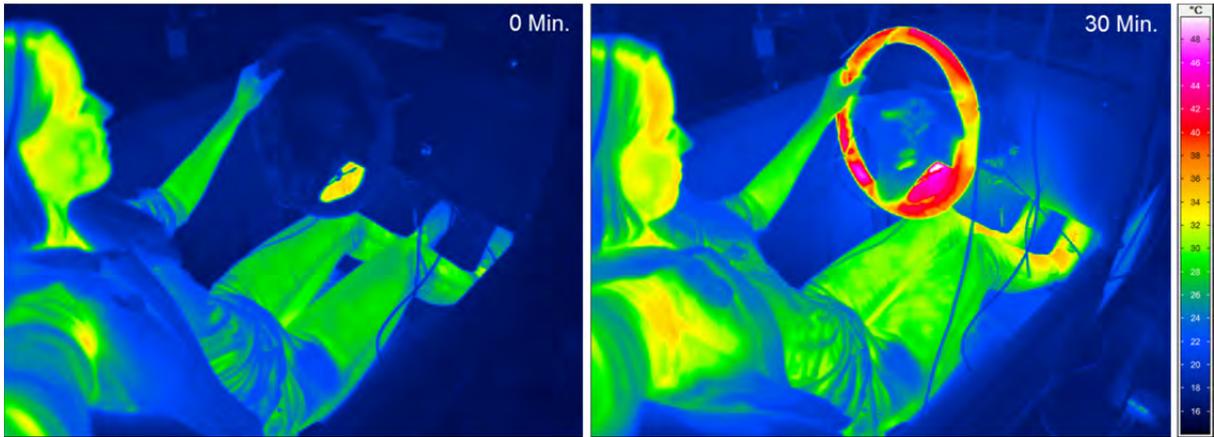


Abbildung 29: Thermographiebilder zur Darstellung der Oberflächentemperaturen des Szenarios fünf (14 °C Soll-Lufttemperatur, Sitzheizung auf Stufe 3, aktive Lenkradheizung, Oberflächen der Seitenteile im Fußraum beheizt auf 45 °C). Links: zum Versuchsbeginn (0 Minuten), rechts: nach 30 Minuten.

Eine quantitativere Aussagekraft besitzen die Messergebnisse zu den gemittelten lokalen Hautoberflächentemperaturen (s. Abbildung 30) zu Versuchsbeginn und -ende. Die eingezeichneten Säulen heben die Temperaturdifferenzen farblich hervor. Es ist gut zu erkennen, dass der Körper bei diesem Szenario gleichmäßig an fast allen Körpersegmenten erwärmt wird. Lediglich die Temperatur der Arme reduziert sich im Mittel um ca. 0,3 K. Die Temperaturdifferenz zwischen der kältesten (Arm rechts) und wärmsten (unterer Rücken) gemessenen Stelle beträgt ca. 7,34 K.

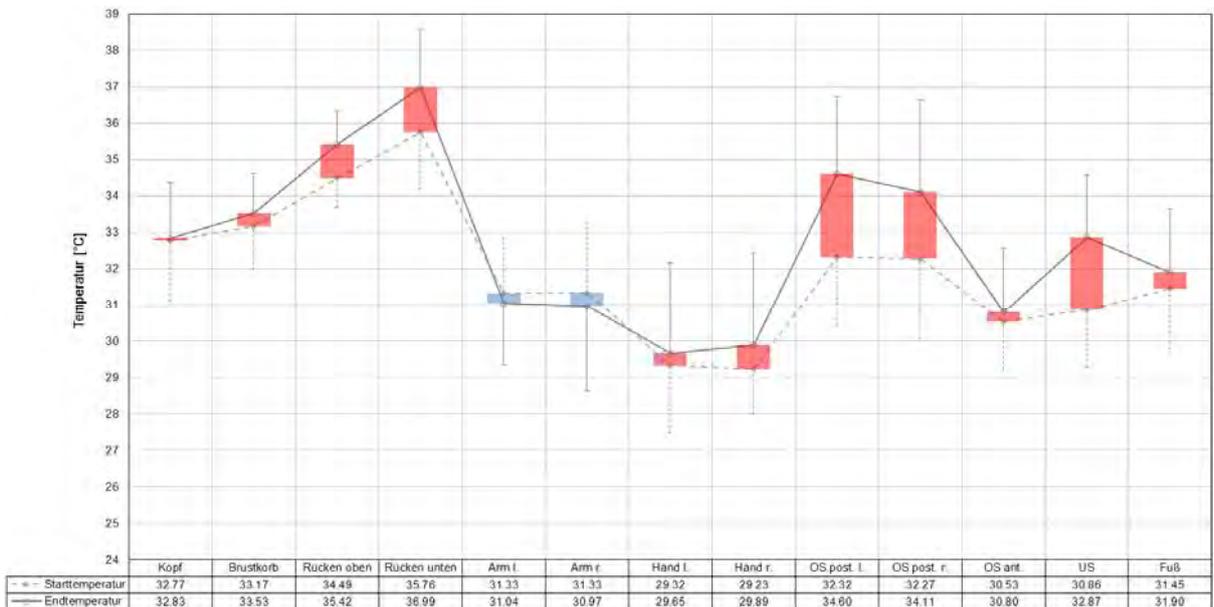


Abbildung 30: Gegenüberstellung der gemittelten Start- und Endhautoberflächentemperaturen, sowie deren Streubreite des Szenario fünf (14 °C Soll-Lufttemperatur, Sitzheizung auf Stufe 3, aktive Lenkradheizung, Oberflächen der Seitenteile im Fußraum beheizt auf 45 °C) mit integrierten farbigen Balken zum Markieren der thermischen Abweichungen (rote Balken: lokale Erwärmung, blaue Balken: lokale Abkühlung) an den Körpersegmenten.

Szenario 6

Die Erweiterung des Szenarios fünf um die beheizten Seitenteile mit einer Oberflächentemperatur von 45 °C wird in Szenario sechs untersucht. Der Proband, visualisiert in Abbildung 31, wird durch die Klimamaßnahmen am gesamten Körper erwärmt. Im Thermographie Bild rechts sind die meisten Segmente gelblich-grün eingefärbt. Zu Versuchsbeginn (linkes Bild) war der Körper noch etwas kühler (grün-blau gefärbt). Auffallend ist die Verfärbung des Kopfes von gelb zu rot-orange, was für eine deutliche Steigerung der mittleren Hauttemperatur des Kopfes spricht. Das könnte bedeuten, dass dem Körper insgesamt zu viel Wärme zugeführt wird, sodass die Thermoregulationsprozesse zum Abführen der überschüssigen thermischen Energie beginnen. Das Einsetzen des Schwitzens als effektivste Form der Wärmeabgabe würde sich negativ auf das Temperatur- und Komfortempfinden auswirken und sollte deshalb vermieden werden.

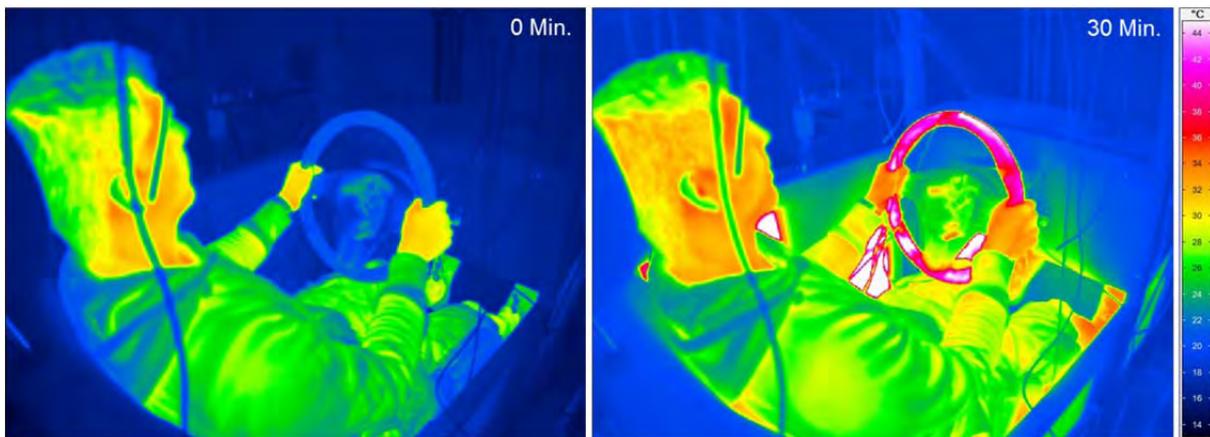


Abbildung 31: Thermographiebilder zur Darstellung der Oberflächentemperaturen des Szenarios sechs (14 °C Soll-Lufttemperatur, Sitzheizung auf Stufe 3, aktive Lenkradheizung, Oberflächen aller Seitenteile beheizt auf 45 °C). Links: zum Versuchsbeginn (0 Minuten), rechts: nach 30 Minuten.

Die Messwerte zu den Hauttemperaturen beziffern die Menge der lokal zugeführten thermischen Energie. Am gesamten Körper findet bei diesem Szenario eine Erhöhung der Oberflächentemperaturen statt. An den Händen, dem Sitzkontaktbereich, dem Unterschenkel und dem linken Arm ist der Temperaturanstieg am größten. Das sind die Körperregionen, die den jeweiligen Klimatechnologien am nächsten waren. Auch die Temperatur an der Oberfläche des Kopfes hat sich in diesem Szenario um etwa 0,5 K erhöht. Dies würde die These, dass dem Menschen zu viel Wärme appliziert wird, bestätigen. Allerdings wird dies nicht zwingend durch die Rate der Unzufriedenen (vgl. Abbildung 15 und Abbildung 16) bestätigt, sodass in diesem Fall von einem ausreichend großem Wärmeeintrag ausgegangen werden kann.

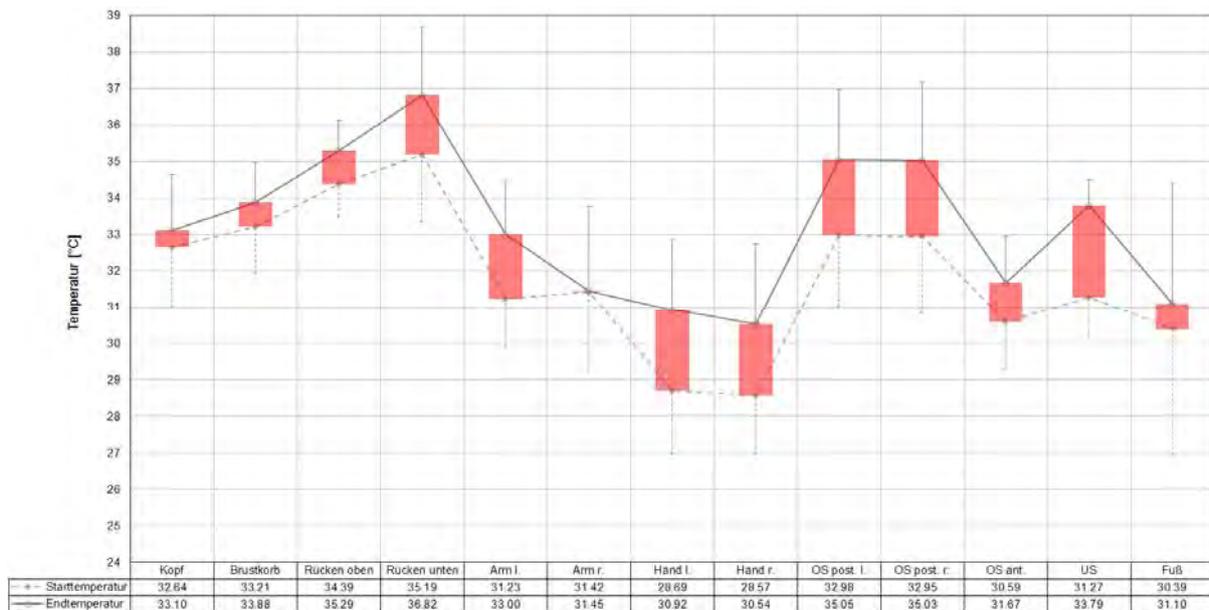


Abbildung 32: Gegenüberstellung der gemittelten Start- und Endhautoberflächentemperaturen, sowie deren Streubreite des Szenario sechs (14 °C Soll-Lufttemperatur, Sitzheizung auf Stufe 3, aktive Lenkradheizung, Oberflächen aller Seitenteile beheizt auf 45 °C) mit integrierten farbigen Balken zum Markieren der thermischen Abweichungen (rote Balken: lokale Erwärmung, blaue Balken: lokale Abkühlung) an den Körpersegmenten.

Szenario 7

In diesem Versuch wird die thermische Behaglichkeit bei einer Umgebungstemperatur von 17 °C ohne Klimamaßnahme getestet. Dieses Szenario diene erneut als Referenz.

Die Thermographiebilder in Abbildung 33 veranschaulichen die Oberflächentemperaturen des Probanden und der Fahrzeugkabine zu Versuchsbeginn (links) und zum Versuchsende (rechts). Der thermische Zustand des Probanden hat sich leicht verändert. Wie schon bei Szenario vier entsteht der Eindruck, dass sich der Körperkern durch interne Wärmeerzeugungsprozesse (zitterfreie Muskelaktivität, Kältezittern) durch das Unterschreiten eines kritischen Temperaturwertes (vgl. Aschoff et al., 1971) gleichmäßig erwärmt. Dies zeigen die rötlichen Färbungen des Kopfes und Oberkörpers. Dagegen haben sich die Hände und Füße leicht bläulich verfärbt, dass für ein leichtes Abkühlen dieser Körpersegmente spricht.

Die These der inneren metabolischen Erwärmung kann jedoch nicht durch Messwerte bestätigt werden, da thermophysiologische Werte der Kerntemperatur oder des kalorimetrischen Energieverbrauchs nicht vorliegen.

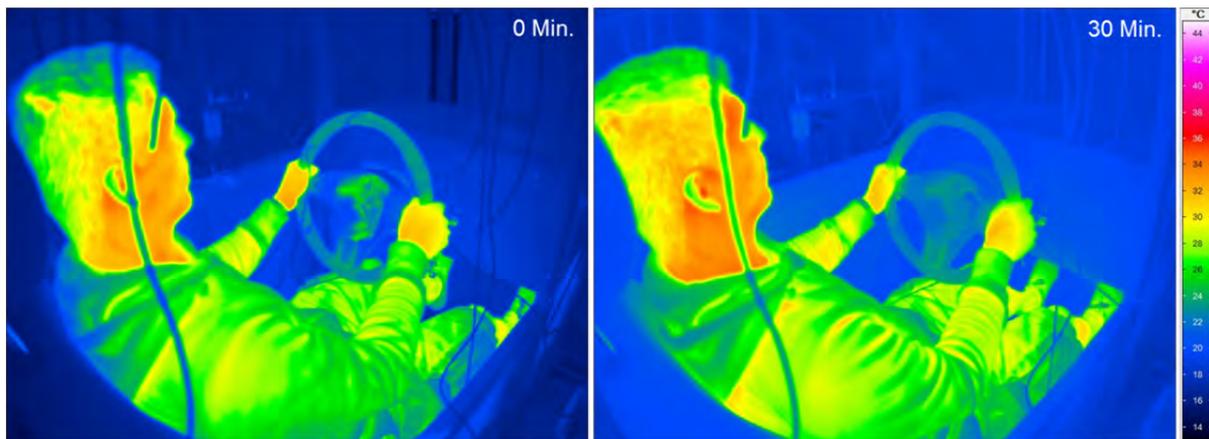


Abbildung 33: Thermographiebilder zur Darstellung der Oberflächentemperaturen des Szenarios sieben (17 °C Soll-Lufttemperatur, ohne Klimatisierung). Links: zum Versuchsbeginn (0 Minuten), rechts: nach 30 Minuten.

Die dazugehörigen quantitativen Hautoberflächentemperaturen visualisieren erneut den thermoregulatorischen Prozess des Körpers. Um den Kern vor einer Auskühlung bei dieser kühlen Umgebungstemperatur zu bewahren, wird zunächst die Durchblutungsrate der Extremitäten reduziert. Dementsprechend sinkt die Oberflächentemperatur der Arme, Hände, Unterschenkel und Füße, die sich im direkten „Kontakt“ und thermischen Austausch mit der Umgebung befinden. Nur die Körpersegmente des Sitzkontaktbereichs sind von der kühlen Lufttemperatur isoliert und somit vorm Wärmeaustausch geschützt. Aufgrund der Stauwärme zwischen Mensch und Sitz erhöht sich die Hautoberflächentemperatur sogar.

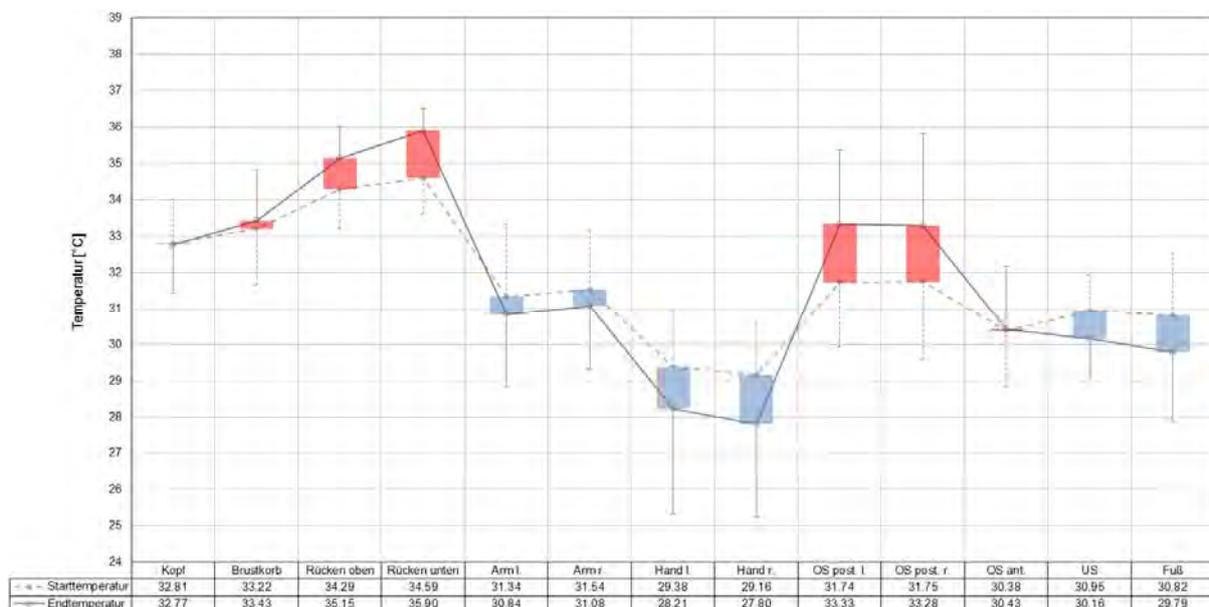


Abbildung 34: Gegenüberstellung der gemittelten Start- und Endhautoberflächentemperaturen, sowie deren Streubreite des Szenario sieben (17 °C Soll-Lufttemperatur, ohne Klimatisierung) mit integrierten farbigen Balken zum Markieren der thermischen Abweichungen (rote Balken: lokale Erwärmung, blaue Balken: lokale Abkühlung) an den Körpersegmenten.

Sollte diese vasomotorische Isolation des Körpers als Regulationsmaßnahme nicht ausreichen, werden zusätzliche thermoregulatorische Prozesse gestartet. Neben

der zunehmenden (passiven) Wärmedämmung werden die aktiven Thermoregulationsmechanismen gestartet und durch Muskelaktivität zusätzlich inneren Wärmemenge erzeugt (vgl. Aschoff et al., 1971). Diese sind durch die gezeigten Diagramme allerdings nicht direkt nachweisbar.

Der Kopf und der Torso, die zum Körperkern zuzuordnen sind (Aschoff und Wever, 1958) sind in der Lage ihre Oberflächentemperaturen weiterstehend konstant zu halten. Dementsprechend gering sind die Temperaturdifferenzen an diesen Körperregionen.

Szenario 8

Bei diesem Versuchsszenario wurden bei einer Umgebungstemperatur von 17 °C die Sitz- und Lenkradheizung bereitgestellt und das entsprechende Komfortempfinden abgefragt. Die Thermographiebilder in Abbildung 35 zeigen die sich einstellenden Oberflächentemperaturen zu Versuchsbeginn (links) und am Ende (rechts, nach 30 Minuten). Im linken Bild entsteht der Eindruck, dass speziell die Hände, Füße und der Oberkörper auskühlen. Durch die gewählten Klimamaßnahmen kann dies jedoch verhindert werden. Das rechte Bild zeigt, dass sich der Oberkörper und die Oberschenkel gleichmäßig erwärmen. Die Lenkradheizung scheint die Hände ebenfalls positiv zu beeinflussen, da sich diese erwärmen. Nur die Füße sind weiterhin kühl.

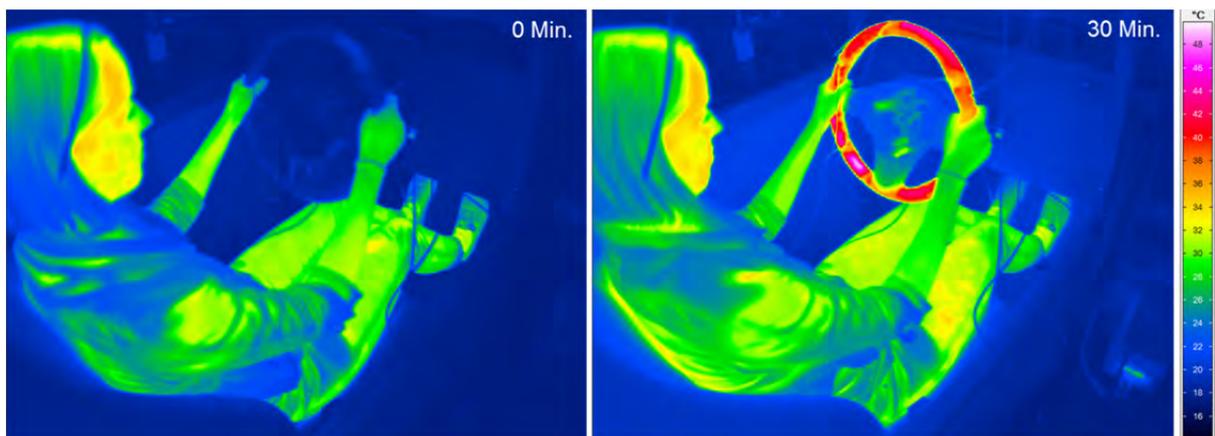


Abbildung 35: Thermographiebilder zur Darstellung der Oberflächentemperaturen des Szenarios acht (17 °C Soll-Lufttemperatur, Sitzheizung auf Stufe 2, aktive Lenkradheizung). Links: zum Versuchsbeginn (0 Minuten), rechts: nach 30 Minuten.

In Zahlen ausgedrückt wird der lokale Wärmeeintrag auf den Körper deutlich sichtbar. Die Oberflächentemperaturen in Abbildung 36 zeigen, dass sich fast alle Körperbereiche erwärmen. Lediglich an den Füßen und am rechten Arm sinken die Temperaturen um je ca. 0,9 K bzw. 0,3 K.

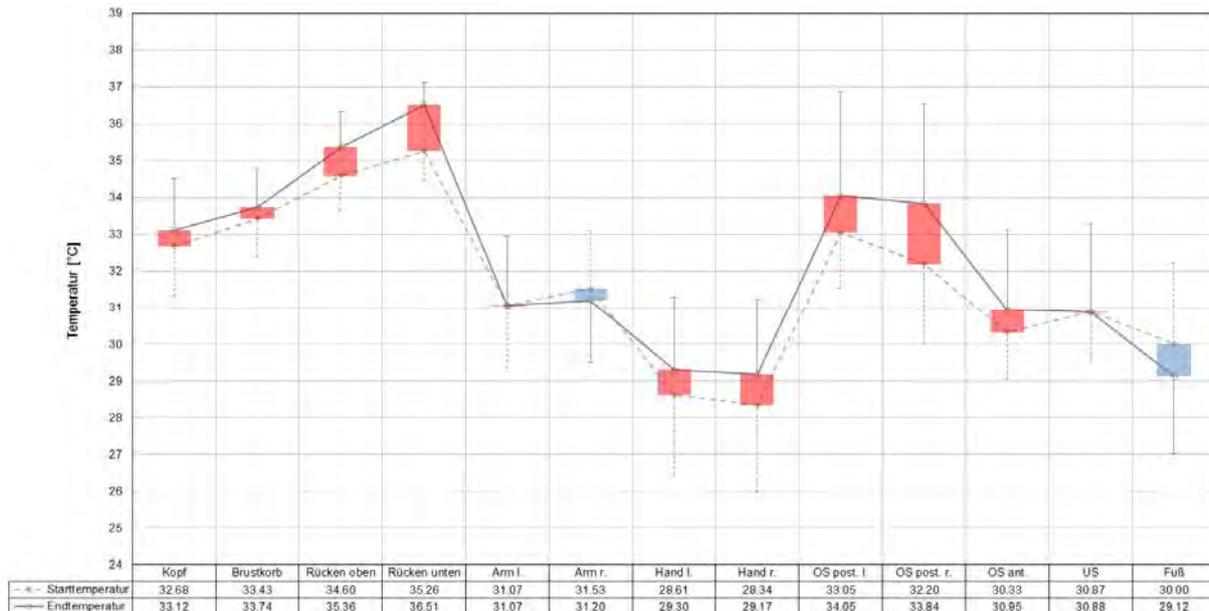


Abbildung 36: Gegenüberstellung der gemittelten Start- und Endhautoberflächentemperaturen, sowie deren Streubreite des Szenario acht (17 °C Soll-Lufttemperatur, Sitzheizung auf Stufe 2, aktive Lenkradheizung) mit integrierten farbigen Balken zum Markieren der thermischen Abweichungen (rote Balken: lokale Erwärmung, blaue Balken: lokale Abkühlung) an den Körpersegmenten.

Szenario 9

Bei diesem Versuch wurden den Probanden die Sitzheizung und die Fußraumheizung mit einer Oberflächentemperatur von 40 °C bereitgestellt. Anhand der subjektiven Bewertungen ist dieses Szenario dem Referenztest gleichzusetzen. Trotz lokaler Klimatisierungssysteme empfanden die Probanden dieses Szenario aus globaler Sicht als zu kühl.

Die Bilder der Oberflächentemperaturen dieses Szenarios (s. Abbildung 37) können diesen Eindruck auf thermischer Ebene nicht erklären. Im linken Bild, zu Versuchsbeginn, ist die Probandin gleichmäßig temperiert. Es scheint, als wenn die Füße beginnen auszukühlen. Das rechte Bild zeigt dieselbe Person, nachdem sie 30 Minuten den Klimamaßnahmen bei einer Umgebungstemperatur von 17 °C ausgesetzt war. Die Oberflächentemperatur des Kopfes, des Oberkörpers und der unteren Extremitäten haben sich merklich erhöht. Dies liegt in den Wärmeeintrag der lokalen Klimamaßnahmen begründet. Allerdings haben sich die Hände und Arme etwas abgekühlt, sodass die Vermutung entsteht, dass dieses lokale Kälteempfinden die globale Temperaturwahrnehmung und das Komfortempfinden beeinflusst.

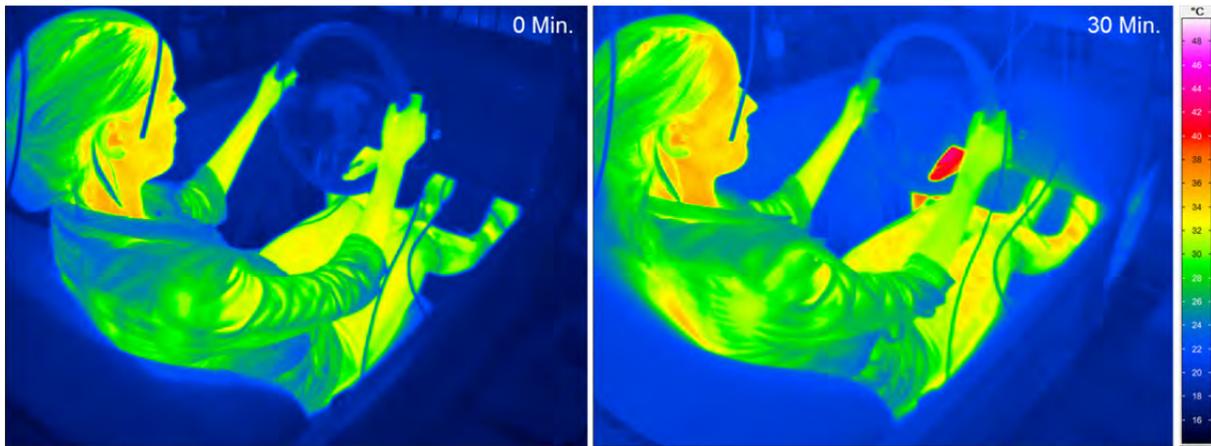


Abbildung 37: Thermographiebilder zur Darstellung der Oberflächentemperaturen des Szenarios neun (17 °C Soll-Lufttemperatur, Sitzheizung auf Stufe 2, Oberflächen der Seitenteile im Fußraum beheizt auf 40 °C). Links: zum Versuchsbeginn (0 Minuten), rechts: nach 30 Minuten.

Gleiches lässt sich durch die Messwerte der lokalen Hautoberflächentemperaturen in Abbildung 38 bestätigen. Der Wärmeeintrag des gesamten Körpers ist im Vergleich zum Referenzszenario größer geworden, vor allem an den unteren Extremitäten. Neben dem Sitzkontaktbereich erhöhen sich die Temperaturen am Unterschenkel und den Füßen aufgrund der aktiven Fußraumheizung. Nur an den Händen und Armen sinken die Hauttemperaturen.

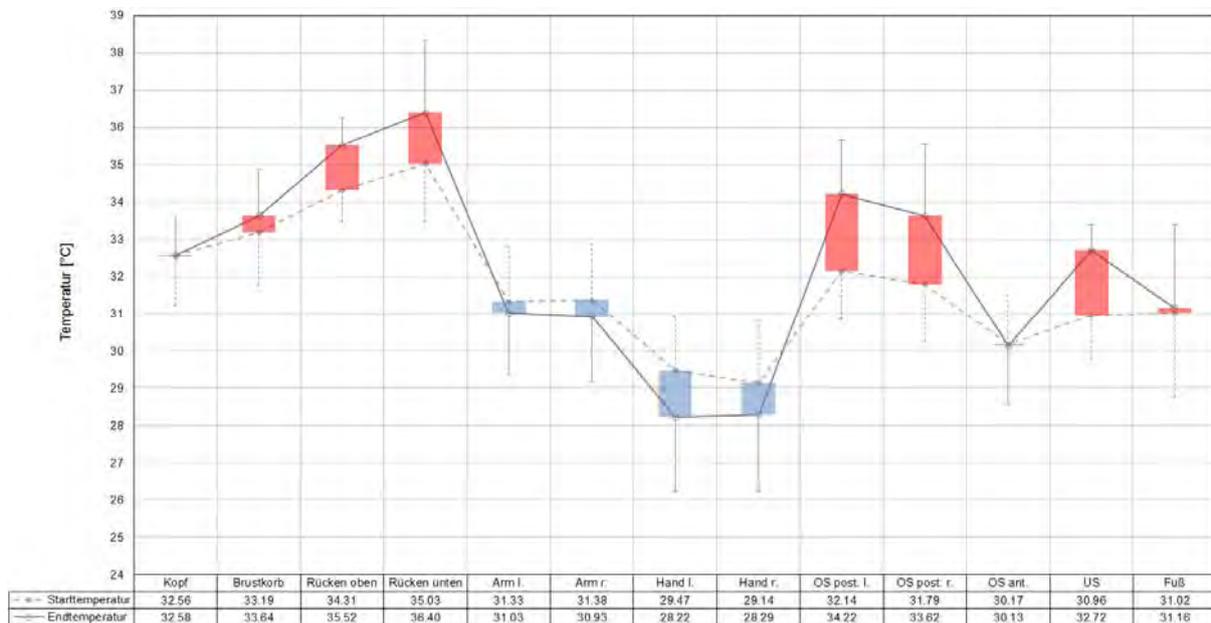


Abbildung 38: Gegenüberstellung der gemittelten Start- und Endhautoberflächentemperaturen, sowie deren Streubreite des Szenario neun (17 °C Soll-Lufttemperatur, Sitzheizung auf Stufe 2, Oberflächen der Seitenteile im Fußraum beheizt auf 40 °C) mit integrierten farbigen Balken zum Markieren der thermischen Abweichungen (rote Balken: lokale Erwärmung, blaue Balken: lokale Abkühlung) an den Körpersegmenten.

Szenario 10

In diesem Testfall wurden die Sitz- und Lenkradheizung, sowie die Flächenstrahler im Fußraum eingeschaltet. Im Fußraum wurde eine Oberflächentemperatur von 40 °C eingeregelt. Abbildung 39 zeigt das Szenario aus der thermographischen Perspektive und verdeutlicht die Klimawirkung der lokalen Heiztechnologien auf den Menschen.

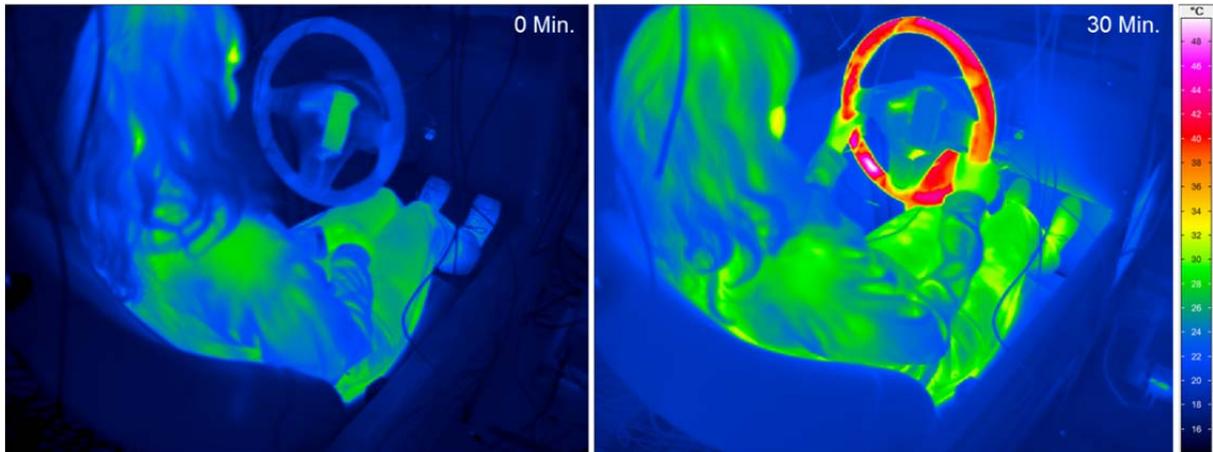


Abbildung 39: Thermographiebilder zur Darstellung der Oberflächentemperaturen des Szenarios zehn (17 °C Soll-Lufttemperatur, Sitzheizung auf Stufe 2, aktive Lenkradheizung, Oberflächen der Seitenteile im Fußraum beheizt auf 40 °C). Links: zum Versuchsbeginn (0 Minuten), rechts: nach 30 Minuten.

Im linken Bild, zu Beginn des Versuchs, wirkt die Probandin etwas ausgekühlt. Das zeigen nicht nur die grün-blauen Oberflächen, sondern dafür spricht auch ihre zusammengekauerte Körperhaltung. Das rechte Bild veranschaulicht dieselbe Person nach einer 30-minütigen Versuchsphase mit den Klimamaßnahmen bei einer Umgebungstemperatur von 17 °C. An der gleichmäßigen grünen Einfärbung der Körperoberfläche wird eine einheitliche Erwärmung des Körpers ersichtlich. Neben den Kernregionen Kopf und Torso werden auch die Extremitäten durch die Klimamaßnahmen miterwärmt.

Dies wird durch die Messwerte zu den lokalen Hautoberflächentemperaturen (s. Abbildung 40) bestätigt. Lediglich die gemittelten Temperaturen der Arme sind über die Versuchszeit von 30 Minuten etwas gesunken (max. 0,3 K) bzw. blieben konstant.

Alle anderen Körperregionen werden durch die gezielten Klimamaßnahmen thermisch beeinflusst, was sich im Anstieg der Hautoberflächentemperaturen äußert.

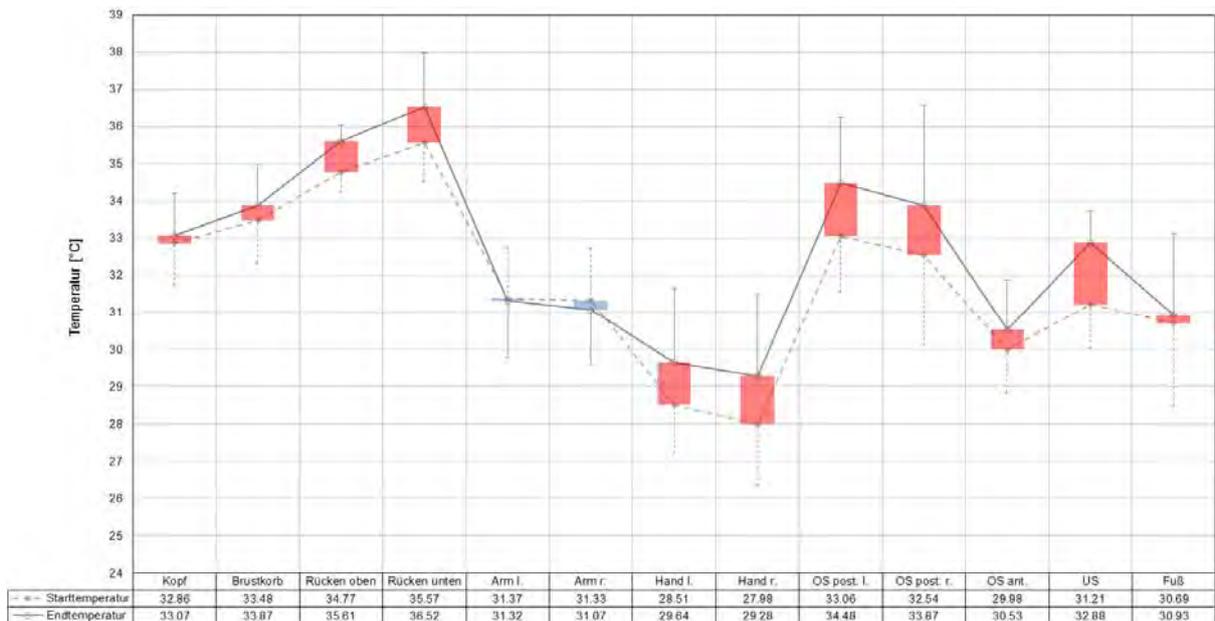


Abbildung 40: Gegenüberstellung der gemittelten Start- und Endhautoberflächentemperaturen, sowie deren Streubreite des Szenario zehn (17 °C Soll-Lufttemperatur, Sitzheizung auf Stufe 2, aktive Lenkradheizung, Oberflächen der Seitenteile im Fußraum beheizt auf 40 °C) mit integrierten farbigen Balken zum Markieren der thermischen Abweichungen (rote Balken: lokale Erwärmung, blaue Balken: lokale Abkühlung) an den Körpersegmenten.

Szenario 11

In diesem Testfall wurde dem Probanden die komplette Bandbreite der bereitstehenden Heizsysteme dargeboten. Die visuell dargestellten Oberflächen dieses Szenarios in Abbildung 41 veranschaulichen eine gleichmäßige Erwärmung des Körpers über den Testverlauf (rechts: zu Versuchsbeginn, links: zum Versuchsende nach 30 Minuten).

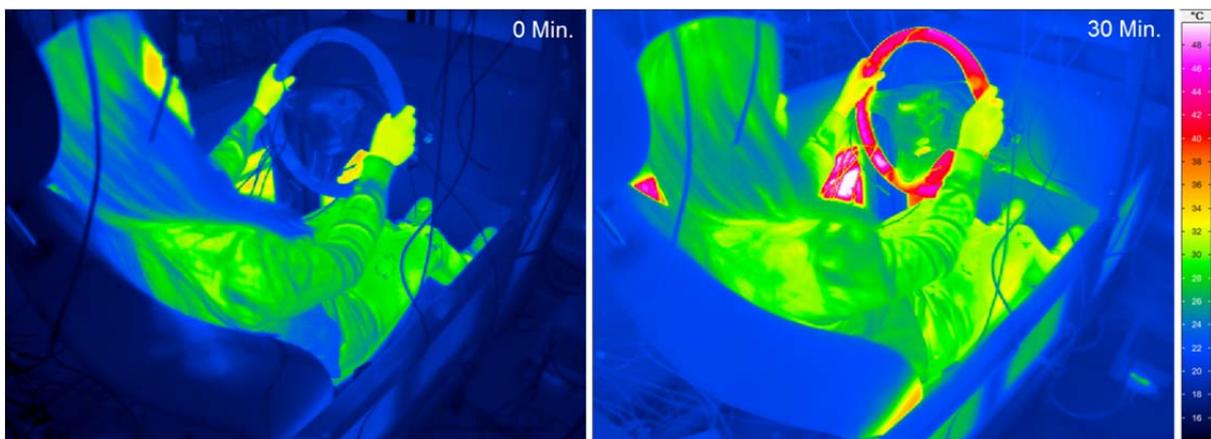


Abbildung 41: Thermographiebilder zur Darstellung der Oberflächentemperaturen des Szenarios elf (17 °C Soll-Lufttemperatur, Sitzheizung auf Stufe 2, aktive Lenkradheizung, Oberflächen der Seitenteile im Fußraum beheizt auf 40 °C und der Seitenteile an Türverkleidung und Mittelkonsole beheizt auf 45 °C). Links: zum Versuchsbeginn (0 Minuten), rechts: nach 30 Minuten.

Konsequenterweise steigen die Oberflächentemperaturen am gesamten Körper (vgl. Abbildung 42) merklich an. Der Wärmeeintrag ist am linken Arm, dem Unter- und Oberschenkeln sowie den Händen am größten, da an diesen Segmenten die Temperatur am stärksten ansteigt (zwischen 0,9 K bis 2,1 K).

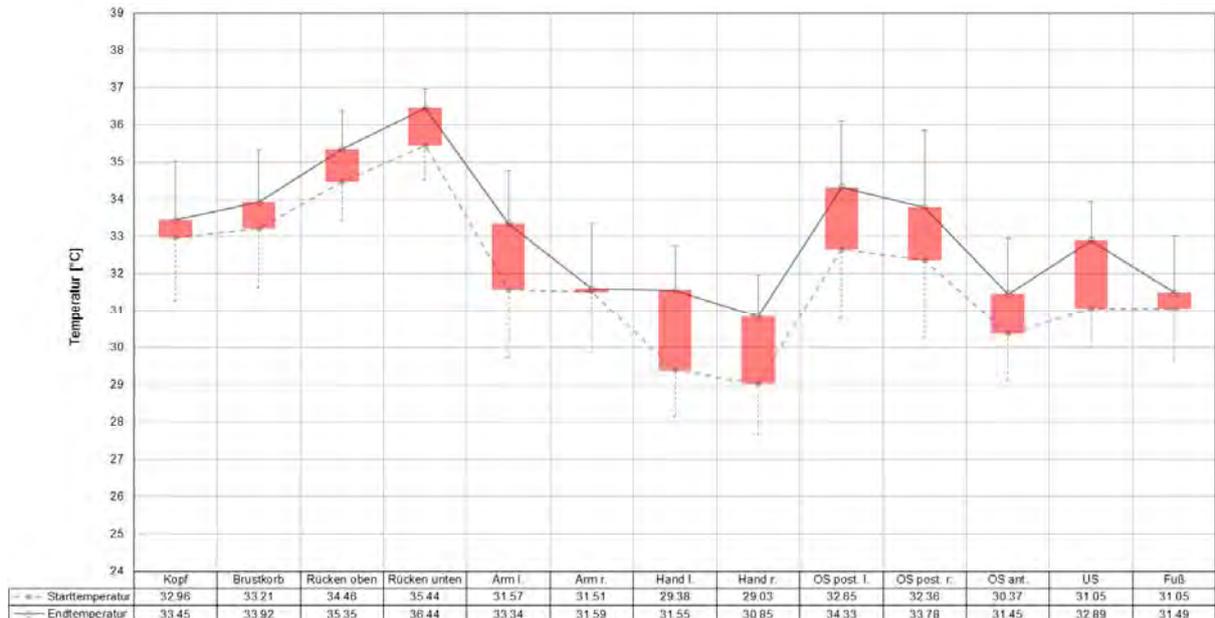


Abbildung 42: Gegenüberstellung der gemittelten Start- und Endhautoberflächentemperaturen, sowie deren Streubreite des Szenario elf (17 °C Soll-Lufttemperatur, Sitzheizung auf Stufe 2, aktive Lenkradheizung, Oberflächen der Seitenteile im Fußraum beheizt auf 40 °C, Oberflächen der Seitenteile der Türverkleidung und Mittelkonsole beheizt auf 45 °C) mit integrierten, farbigen Balken zum Markieren der thermischen Abweichungen (rote Balken: lokale Erwärmung, blaue Balken: lokale Abkühlung) an den Körpersegmenten.

Szenario 12

Ein vergleichbares Verhalten zeigt sich bei Szenario zwölf. Dem Probanden standen in diesem Testfall alle Heiztechnologien zur Verfügung. Im Vergleich zum Szenario elf wurde die Oberflächentemperatur des Fußraums von 45 °C auf 40 °C reduziert.

Trotz der etwas reduzierten Flächenstrahlung im Fußraum scheint die Person ausreichend langwellige Strahlungsleitung der Heizung auf die Füße und Unterschenkel zu erhalten (s. linkes Bild der Abbildung 43). Die Thermographiebilder in Abbildung 43 des Szenarios zu Beginn (rechtes Bild) und zum Versuchsende (linkes Bild) visualisieren die gleichmäßige Erwärmung der Testperson durch die lokalen Klimamaßnahmen.

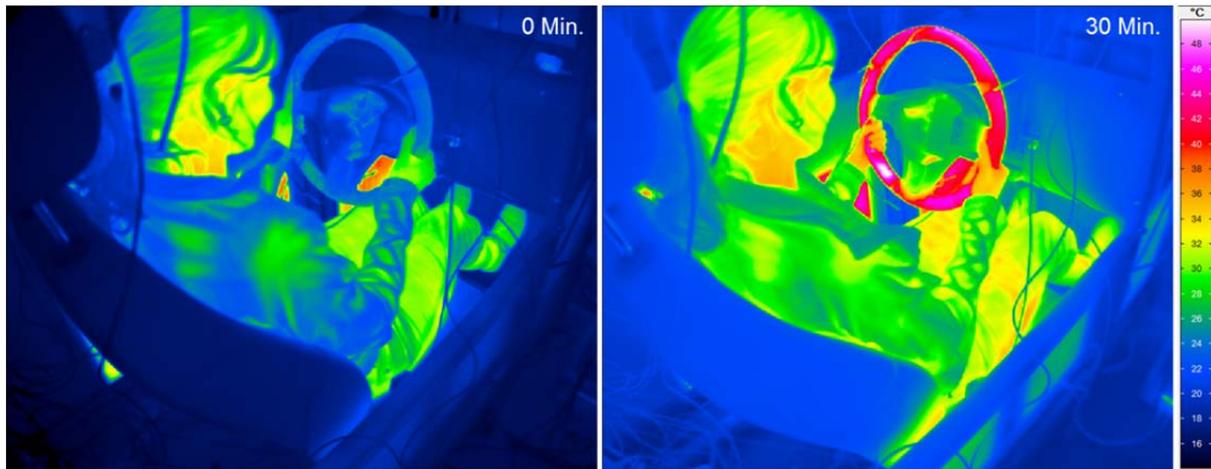


Abbildung 43: Thermographiebilder zur Darstellung der Oberflächentemperaturen des Szenarios zwölf (17 °C Soll-Lufttemperatur, Sitzheizung auf Stufe 2, aktive Lenkradheizung, Oberflächen aller Seitenteile beheizt auf 40 °C). Links: zum Versuchsbeginn (0 Minuten), rechts: nach 30 Minuten.

Die Messwerte der Hautoberflächentemperaturen von diesem Szenario zwölf (s. Abbildung 44) quantifizieren den gleichmäßigen Wärmeeintrag auf den Menschen. An allen Körperregionen, mit Ausnahme des rechten Arms, erhöht sich die Oberflächentemperatur merklich. Den größten Anstieg von etwa 2,0 K verzeichnen die Hände. Daran schließen sich die Unter- und Oberschenkel sowie der linke Arm an, deren Temperaturerhöhung im Mittel ca. 1,5 K beträgt.

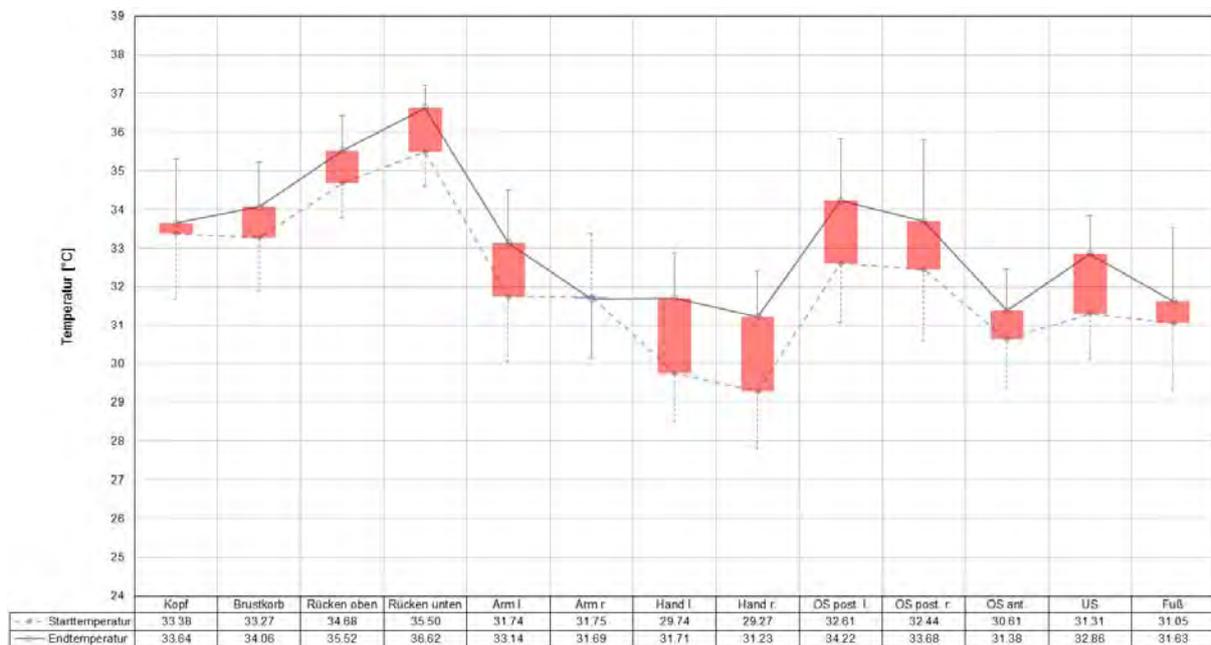


Abbildung 44: Gegenüberstellung der gemittelten Start- und Endhautoberflächentemperaturen, sowie deren Streubreite des Szenario zwölf (17 °C Soll-Lufttemperatur, Sitzheizung auf Stufe 2, aktive Lenkradheizung, Oberflächen aller Seitenteile beheizt auf 40 °C) mit integrierten farbigen Balken zum Markieren der thermischen Abweichungen (rote Balken: lokale Erwärmung, blaue Balken: lokale Abkühlung) an den Körpersegmenten.

6.4 Elektrische Leistung/Verbrauch der Klimatisierungsmethoden

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse des Leistungsverbrauchs aller Szenarien einzeln unter Einstellung der jeweiligen lokalen Maßnahmen analysiert.

Der Energieverbrauch der Heizfolien wurde durch die Auswertung der Labview-Daten ermittelt, und mit dem Leistungsmesser *Thermoline Cost Control* überprüft. Bei der Sitz- und Lenkradheizung wurden mit dem Leistungsmesser Daten aufgenommen.

Die Heizfolien verbrauchen einzeln 200 W/m². Durch die doppelte Schichtung der Heizfolien werden somit 400 W/m² benötigt. Dabei unterscheidet sich der Flächeninhalt zwischen Fußraum und Seitenflächen (s. Abbildung 1). Einen entscheidenden Einfluss haben die Flächen der Heizfolien im Sinne der zu übertragenden Strahlungsleistung. Der Fußraum, bei dem drei Heizflächen eingebaut wurden, nimmt insgesamt einen Flächeninhalt von 0,63 m² ein. Allerdings wird nur eine effektiv Fläche von 0,51 m² für die Klimatisierung genutzt. Aus diesem Grund wird bei der Berechnung des Leistungsverbrauches nur die effektive Fläche mit einbezogen. In den Seitenflächen sind vier Heizfolien eingebaut, deren Größe verglichen mit den Heizfolien im Fußraum größer ist. Mit einem gesamten Flächeninhalt von ca. 0,63 m² ist die Heizung über die Seitenteile der markanteste Energieverbraucher von den getesteten Klimatisierungsmaßnahmen.

In Abbildung 45 werden die elektrischen Verbräuche der Szenarien getrennt nach den einzelnen Klimatechnologien dargestellt. Den jeweils größten Anteil haben die Heizfolien der Seitenflächen, gefolgt von den Heizfolien der Seitenteile im Fußraum. Die Sitzheizung benötigt insgesamt am wenigsten elektrische Energien.

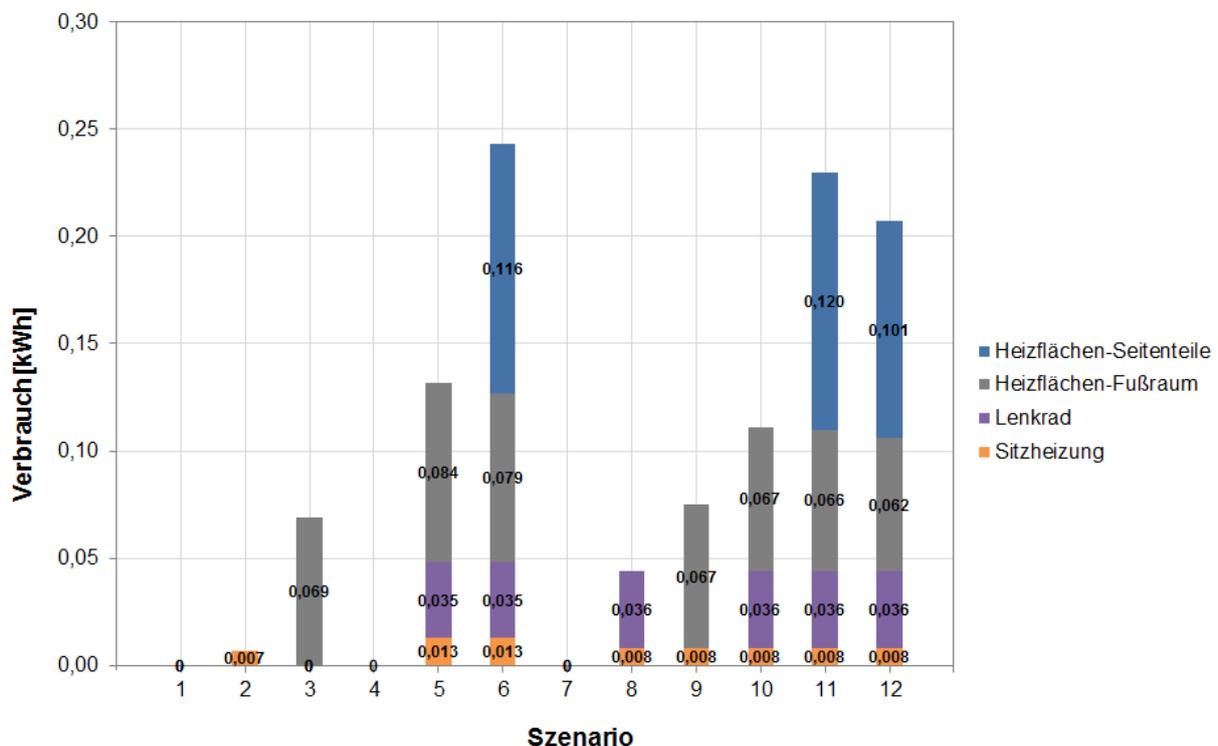


Abbildung 45: Elektrischer Energieverbrauch der lokalen Klimatisierungsmaßnahmen in kWh über einen 30-minütigen Zeitraum, separiert nach Heizflächen des Fußraums (graue Säule), den Heizflächen der Seitenteile (blaue Säulen), dem Lenkrad (lilafarbene Säule) und Sitzheizung (orangefarbene Säule).

19 °C-Szenario

Für das 30-minütige Betreiben der Sitzheizung auf Stufe 2 bei einer Umgebungstemperatur von 19 °C werden 7 Wh benötigt. Der Verbrauch des Szenarios zwei, in dem keine weiteren Klimageräte aktiv waren, ist damit der geringste.

Deutlich höher ist der Verbrauch des Szenarios drei. Durch das Einschalten der Fußraumheizung mit einer Oberflächentemperatur von 40 °C wurde versucht das thermische Kälteempfinden der kühlen Umgebungstemperatur (19 °C) für 30 Minuten zu kompensieren. Dazu sind 70 Wh aufzubringen.

14 °C-Szenario

Der Leistungsverbrauch von den drei lokalen Klimamaßnahmen des Szenarios fünf beträgt insgesamt 133 Wh über 30 Minuten. Die Sitzheizung verbraucht bei 14 °C auf Stufe 3 rund 13 Wh und für das beheizte Lenkrad werden weitere 36 Wh innerhalb dieser halben Stunde benötigt. Den größten Anteil an der Leistung erfordern jedoch die Heizflächen im Fußraum. Mit 84 Wh ist deren Verbrauch fast doppelt so hoch wie der von Lenkrad- und Sitzheizung zusammen.

Beim sechsten Szenario steigt der Leistungsaufwand bedingt durch die Heizflächen an den Seiten an. Die Sitz- und Lenkradheizung verbrauchen genauso wie in Szenario fünf rund 49 Wh, welche durch 79 Wh im Fußraum und 116 Wh an den Seitenflächen ergänzt werden. Der parallele Heizbetrieb der Seitenflächen hat den Energieverbrauch der Heizfolien im Fußraum um 5 Wh reduziert. Jedoch wird beim Szenario sechs, mit 0,244 kWh für alle lokalen Maßnahmen, fast doppelt so viel Energie benötigt wie im Szenario fünf. Der Energieverbrauch für die lokalen Maßnahmen ist bei diesem Szenario nicht nur im Vergleich zu dem anderen 14 °C-Szenario, sondern auch zu den übrigen Szenarien am höchsten.

17 °C-Szenario

Der Energieverbrauch in Szenario acht liegt insgesamt bei 0,044 kWh. Die Sitzheizung verbraucht auf Stufe 2 und bei 17 °C ca. 8 Wh. Somit wird 1 Wh mehr verbraucht innerhalb einer halben Stunde im Vergleich zu einer Umgebungstemperatur von 19 °C. Jedoch verringert sich der Energieverbrauch der Sitzheizung im Vergleich zu den 14 °C-Szenarien, bei denen die Heizung auf Stufe 3 lief, um 5 Wh. Zusätzlich ist der Verbrauch der Lenkradheizung mit 36 Wh bemessen. Damit liegt der gesamte Stromverbrauch für die lokalen Maßnahmen bei 0,044 kWh innerhalb der Versuchszeit. Dieser Wert ist durch den Einsatz der lokalen Maßnahmen verhältnismäßig gering im Vergleich des Energieverbrauchs bei Szenario zwei bei einer Umgebungstemperatur von 19 °C.

Im Szenario neun werden erneut 8 Wh aufgrund der Sitzheizung verbraucht. Weitere 67 Wh werden für die Benutzung der Fußraumheizflächen aufgewendet. Summiert ergibt sich ein Leistungsverbrauch von insgesamt 0,075 kWh für beide lokalen Heizsysteme.

Die Verbrauchswerte sind beim Szenario zehn um 0,036 kWh zum neunten Szenario gestiegen aufgrund des Zuschaltens der Lenkradheizung. Daher werden insgesamt 0,111 kWh innerhalb der Versuchszeit von 30 Minuten für die lokalen Klimatisierungsmaßnahmen benötigt.

Die Leistungen, die für das Betreiben der eingesetzten lokalen Maßnahmen in Szenario elf erforderlich sind, sind besonders durch die Heizflächen an den Seiten geprägt. Die Sitzheizung auf Stufe 2 und die aktive Lenkradheizung verbrauchen zusammen erneut rund 44 Wh. Beeinflusst durch die Seitenheizflächen wird im Fußraum ein Watt weniger innerhalb der halben Stunde benötigt als bei Szenario

neun und zehn. Der Verbrauch beläuft sich somit auf 66 Wh im Fußraum und auf weitere 120 Wh an den Seitenflächen. Die benötigte Energiemenge beträgt insgesamt 0,230 kWh und ist somit mehr als doppelt so hoch wie der Verbrauch des Szenarios zehn und dreimal so hoch wie die benötigte Heizleistung des Szenarios neun.

Ähnlich wie im elften Szenario ist der Energieverbrauch aufgrund der Nutzung der gesamten lokalen Maßnahmen höher als bei den restlichen 17 °C-Szenarien. Die Lenkrad- und Sitzheizung verbrauchen 44 Wh. Die benötigte Energie für die Heizflächen im Fußraum sind vier Wattstunden geringer als bei Szenario elf, da die Oberflächentemperatur im Fußraum im Szenario zwölf fünf Grad kühler ist. Der verminderte Verbrauch der Heizfolien wirkt sich entsprechend auf den Gesamtwert aus. Zum Betreiben der lokalen Klimamaßnahmen im Szenario zwölf werden insgesamt 0,207 kWh benötigt.

6.5 Energetisch – Thermische Bewertung

Zusammenfassend veranschaulicht Abbildung 46 für alle Szenarien das globale thermische Empfinden und den benötigten Energieverbrauch zu den lokalen Heizsystemen in einem gemeinsamen Diagramm. Zur besseren Orientierung sind zudem die Start- und Endlufttemperaturen der Szenarien angegeben.

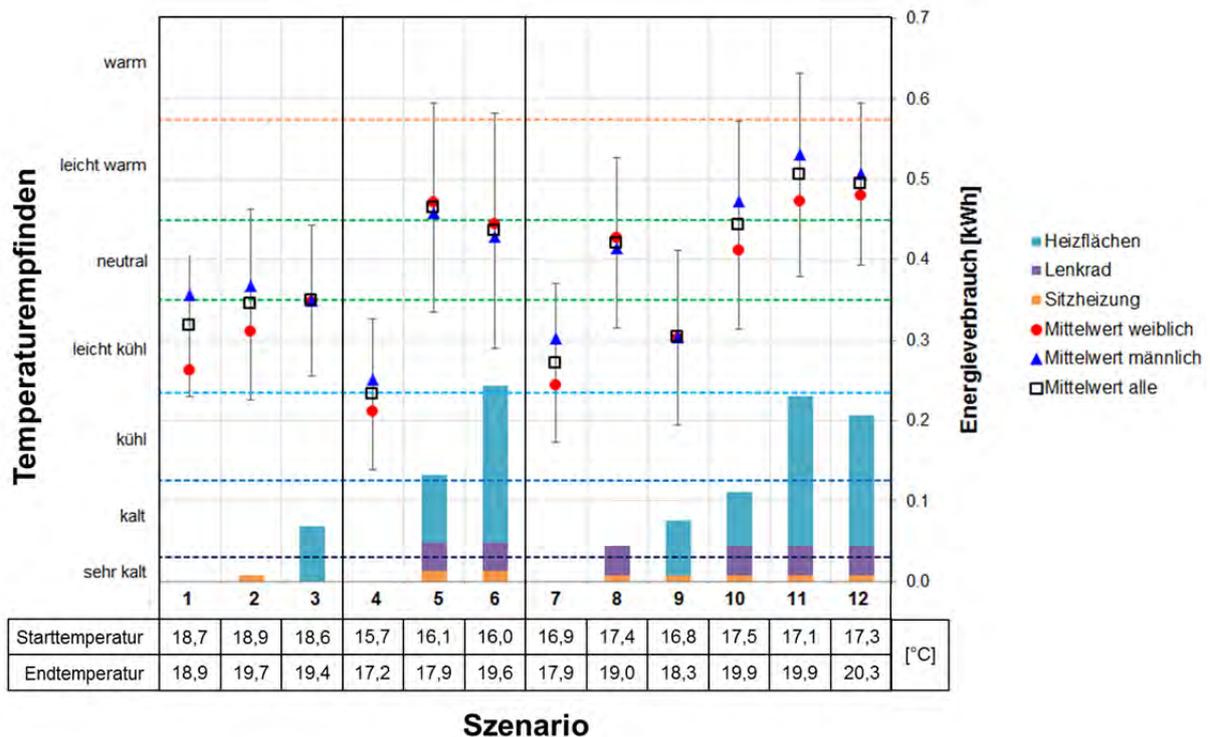


Abbildung 46: Kombinierte Darstellung der zwölf Szenarien mit dem globalen thermischen Empfinden und dem entsprechenden Energieverbrauch der Klimamaßnahmen sowie der Start- und Endlufttemperaturen (über einen Zeitraum von 30 Minuten).

Letztendlich haben die Szenarien, die im Mittel als „leicht kühl“ empfunden worden den geringsten Energieverbrauch. Zudem fällt auf, dass in diesen Szenarien nur jeweils zwei Klimasysteme aktiv waren. Um das thermische Empfinden in den

„neutralen“ oder „leicht warmen“ Skalenbereich zu verschieben und damit das Kaltempfinden der kühleren Lufttemperatur zu kompensieren, ist ein gewisser energetischer Aufwand unerlässlich.

Ferner stellt Szenario acht in diesem Zusammenhang eine Ausnahme dar. Trotz des geringen Energieaufwands (44 Wh für einen Betrieb von 30 Minuten) wird das globale Temperaturempfinden signifikant in den thermisch „neutralen“ Bereich verschoben. Gleichzeitig reduziert sich die Rate der Unzufriedenen im Vergleich zum Referenzszenario um 40 % (vgl. Abbildung 15, schwarz: alle Probanden). Es entsteht der Eindruck, dass die Lenkradheizung aus thermischer Sicht sehr effektiv zu sein scheint. Durch den direkten Kontakt bemerkt der Proband die thermische Unterstützung des Lenkrads, seine Erwartungshaltung wird bestätigt und wirkt sich direkt auf seine Temperaturwahrnehmung aus. Mit nur wenig energetischem Aufwand kann somit das Kälteempfinden neutralisiert und ein komfortables Innenraumklima geschaffen werden.

Unter Testbedingung acht ist der energetische Verbrauch dementsprechend am geringsten, um das thermische Empfinden merklich zu erhöhen. Daran schließen sich Szenario zehn und fünf an. Bei diesen beiden Testfällen beschränkt sich die Klimatisierung auf die Sitz- und Lenkradheizung, sowie die eingeschalteten Heizfolien im Fußraum. Wobei sich die subjektiven Aussagen zum thermischen Empfinden und der Komfortbewertungen von Szenario acht und zehn nicht merklich voneinander unterscheiden. Dies würde ebenfalls für eine thermische Effektivität der Lenkradheizung sprechen. Trotz der zugeschalteten Fußraumheizung bei Szenario zehn verändert sich das subjektive Empfinden der Probanden hinsichtlich Temperaturwahrnehmung und Komfort nicht so deutlich wie vergleichsweise die Bewertungen des achten Szenarios.

Bei den Szenarien sechs, elf und zwölf ist der thermische Kompensationseffekt ebenfalls anhand der Rate der Unzufriedenen (vgl. Abbildung 15) feststellbar. Allerdings handelt es sich bei diesen um die drei Szenarien mit dem höchsten energetischen Verbrauch. Anhand der Bewertungen zur globalen Temperaturwahrnehmung können diese Szenarien bereits als „leicht warm“ eingestuft werden.

7 Diskussion und Ausblick

Die durchgeführten probandengestützten Versuche knüpften direkt an den Arbeiten des Vorprojektes (FAT-Schriftenreihe 261, Schmidt et al., 2013) an und führen die Fragestellung der Erweiterung auf zusätzliche innovative Klimatisierungsmaßnahmen fort. Das übergeordnete Ziel ist die Energieeinsparung von E-Fahrzeugen zur Reichweitenoptimierung unter gleichzeitiger Aufrechterhaltung eines behaglichen Innenraumklimas durch die Verwendung lokaler, körpernaher Heizsysteme.

Bisher wird im Winter die mittlere Lufttemperatur des Fahrzeuginnenraums auf ca. 22 – 26 °C aufgeheizt. Dabei wird die Abwärme des Verbrennungsmotors sowie ggf. Zusatzheizer genutzt, denn die Wärme steht als Nebenprodukt des exothermen Verbrennungsvorgangs zur Verfügung sowie die Antriebsleistung zur Erzeugung elektrischer Energie. Bei einer äquivalenten Übertragung des Klimatisierungsverhaltens auf die Fahrzeuge mit Elektromotor würde sich die Reichweite des Elektroautos im Heizfall um bis zu 50 % reduzieren. Da weniger Motorabwärme zur Verfügung steht, geht die elektrische Erwärmung des gesamten Fahrzeuginnenraumes für ein thermisch behagliches Innenraumklima auf Kosten der Reichweite. Aus energetischer Sicht ist deshalb ein alternatives Konzept anzustreben. Eine deutlich energieeffizientere Methode ist die Reduzierung der Luftinnenraumtemperatur und die gleichzeitige Bereitstellung von alternativen Heizsystemen, die körpernah Wärme an den Menschen übertragen.

In dieser Laborstudie wurde untersucht, ob die Möglichkeit besteht, mit einer sinnvollen Kombination von lokalen Klimatechnologien ein thermisch zufriedenstellendes Innenraumklima zu erreichen. Dazu waren Probanden zwölf verschiedenen Szenarien ausgesetzt und wurden am Ende jedes Versuchs zu ihrer thermischen Präferenz mittels Fragebögen befragt. Insgesamt wurden drei abgesenkte Lufttemperaturen und jeweils verschiedene Kombinationen von alternativen elektrischen Klimatisierungsverfahren getestet. Neben dem Erreichen eines komfortablen Innenraumklimas gehört ebenso der elektrische Verbrauch der lokalen Heizmaßnahmen (Sitzheizung, Lenkradheizung und Flächenstrahlungselemente) zum Forschungsinteresse.

Vor Versuchsbeginn war zunächst der Aufbau eines entsprechenden neutralen Fahrzeugteststandes erforderlich. Insgesamt drei Nachbauten einer halben Fahrzeugkabine wurden errichtet. Anschließend wurden diese mit den verschiedenen körpernah wirkenden Heizsystemen und zahlreichen Sensoren zur messtechnischen Begleitung der Versuche ausgestattet. Ab Ende März 2014 fanden an 34 Tagen 134 Versuche mit insgesamt 42 Probanden statt.

Aus thermischer Sicht konnte ein Kompensationseffekt durch die lokal applizierte Wärme nachgewiesen werden. Die Mittelwerte der subjektiven Bewertungen hinsichtlich der globalen Temperaturwahrnehmung haben sich signifikant verändert. Das „leicht kühle“ Empfinden bei reduzierten Lufttemperaturen wurde durch sechs Szenarien mit verschiedenen Kombinationseffekten der lokalen Heizsysteme kompensiert. Die entsprechenden Bewertungen wurden mindestens in den „neutralen“ Bereich der Fragenbogenskala verschoben.

Über die Rate der Unzufriedenen sind detailliertere Abstufungen der Testszenarien möglich. Nur zwei Klimatisierungskombinationen (Szenario sechs und zwölf, Betrachtung aller Probanden) haben ein thermisch behagliches Innenraumklima erreicht und gleichzeitig die Anzahl der Unzufriedenen auf ein akzeptables Maß (max. 16 %) reduziert. Besonders effektiv scheint dabei die Lenkradheizung zu

sein, die durch wenig energetischen Aufwand das thermische Empfinden sowie den Komfort der Probanden deutlich verbesserte.

Auffällig ist weiterhin, dass bei diesen thermisch behaglichen Szenarien (geringe Rate an Unzufriedenen) mindestens drei lokale Heizsysteme (Sitz-, Lenkradheizung und Heizflächen im Fußraum und/oder den Seitenteilen) gleichzeitig aktiv waren.

Letztendlich bestätigen sich damit die Vermutungen aus dem Vorprojekt, dass die Sitzheizung ein asymmetrisches Temperaturempfinden erzeugt, das beim Sinken der Lufttemperatur mit einem deutlichen Anstieg an Unzufriedenen einhergeht. Eine geringe Wärmezufuhr, gleichmäßig verteilt auf mehrere Körpersegmente, konnte die Asymmetrien und folglich die Beschwerderate deutlich reduzieren. Damit gilt die Möglichkeit das Kälteempfinden des Menschen in einer gesenkten Lufttemperatur zu kompensieren, als bewiesen.

Für eine gleichmäßige Klimatisierung rund um den Körper muss zwar mehr elektrische Energie bereitgestellt werden. Aus energetischer Sicht ist dies dennoch vorteilhaft, da der elektrische Verbrauch dieser lokal wirkenden Heizsysteme deutlich geringer sein kann, als die vollständige Vorkonditionierung des Luftmassenstroms im Innenraum auf eine komfortable Innenraumtemperatur.

Eine exakte Quantifizierung der Energieeinsparung ist aufgrund der zahlreichen Einflussgrößen (z.B. Spezifikation des Klimagerätes, Außentemperaturen, Fahrzeugdimensionen, Fahrverhalten usw.) nur bedingt realisierbar. Aufgrund der gezielten Nachfrage wurde im Rahmen einer Bachelorarbeit das Einsparpotenzial dennoch abgeschätzt. Die entsprechenden Berechnungen wurden in Anlehnung an die Werte des Forschungsprojektes von Konz et al. (FAT-Schriftenreihe 233, 2011) durchgeführt. Über einen Zeitraum von 30 Minuten wurden jeweils die Energieverbräuche der herkömmlichen Fahrzeugklimatisierung mit einem Aufheizvorgang der Innenraumtemperatur auf 20 °C und den getesteten Szenarien (Energieverbrauch für Innenraumtemperierung und lokale Heizsysteme) ermittelt. Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass über einen 30-minütigen Zeitraum zwischen 40 Wh und 300 Wh durch die innovative Klimatisierungsmethodik eingespart werden können. Allerdings ist an dieser Stelle erneut zu betonen, dass diese Werte Ungenauigkeiten aufweisen, vor allem da es sich bei den durchgeführten Versuchen um eine Laborstudie handelte.

Ein weiterer positiver Nebeneffekt der lokalen Klimamaßnahmen ist die gleichzeitige Lufttemperaturerhöhung. Insbesondere wenn die thermische Wärmemenge nicht abgeführt wird, sondern die Luftkonditionierung über einen Umluftbetrieb bzw. ggf. künftig einen Lüftungsbetrieb mit Wärmerückgewinnung vorgenommen wird, ist ein Anstieg der Innenraumtemperatur, so wie in den Versuchen, um mehrere Kelvin vorstellbar.

Unter den Laborbedingungen konnte das Kälteempfinden bis zu einer Lufttemperatur von 15 °C kompensiert werden. Da einzelne Probanden die klimatischen Versuchsbedingungen bereits als zu warm (z.B. Szenario 5, 10 und 11, vgl. Abbildung 16) empfanden, ist eine weitere Reduzierung der Temperatur denkbar.

Als nächster Schritt ist die Übertragung des Testdesigns in reale Fahrzeugumgebungen zu nennen. Wechselwirkungen, die in diesem Versuchsdesign gezielt vernachlässigt wurden, können die thermische Behaglichkeit der Insassen zusätzlich beeinflussen. Dazu zählen insbesondere die kalten Oberflächen der Fenster aufgrund der deutlich kühleren Umgebung (negativer Temperaturbereich), die Solarstrahlung durch die Fensterscheiben und

das Zugluftrisiko der Lufteinlässe. Diese unter vorwettbewerblichen Bedingungen schwer nachzustellenden Klimaverhältnisse und deren Wechselwirkung mit dem Menschen sind sinnvoll herstellerseitig in einer realen Fahrzeugumgebung zu analysieren.

Hinzufügend ist zu beachten, dass die Daten, insbesondere für den Energieverbrauch, aufgrund der getroffenen Annahmen für eine numerische Berechnung ungenau sind und in einem Fahrzeugmodell an die entsprechenden Randbedingungen angepasst werden müssen. Der Einbau der Heizflächen wurde in diesem Projekt einfach gehalten. Diese Studie wurde mit dem Ziel der Effizienzsteigerung durch neue Beheizungsarten durchgeführt und sollte bei der Umsetzung in die Praxis weiter optimiert werden. Die Ergebnisse liefern dennoch wertvolle Hinweise zur grundlegenden Dimensionierung und Auslegung von körpernahen Klimatisierungssystemen.

8 Verweis und Quellen

Ahlborn, 2011: Gesamtkatalog – Messgeräte und Sensoren. Ausgabe 2011/2012, 1-270.

Aizawa, S., Cabanac, M., 2000: *Temperature gradient across the skin`s layer has no influence on local skin vasomotor responses*. In: Journal of Thermal Biology, 25, Elsevier, 313-316.

Aschoff, J., Günther, B., Kramer, K., 1971: Band 2 - *Energiehaushalt und Thermoregulation*. In: Physiologie des Menschen, Gauer, Kramer, Jung (Hrsg.), Urban & Schwarzenberg.

Aschoff, J., Wever, R., 1958: *Kern und Schale im Wärmehaushalt des Menschen*. In: *Die Naturwissenschaften*. 45 (20), Heidelberg, S. 477–485.

DataTaker, 2011: Technical Specifications - DT85 Series 3 Data Logger.

DIN EN ISO 10551, 2002-01: *Ergonomie des Umgebungsklimas – Beurteilung des Einflusses des Umgebungsklimas unter Anwendung subjektiver Bewertungsskalen (ISO 10551:1995)*. Beuth Verlag, Berlin.

DIN EN ISO 13732-1, 2006: *Ergonomie der thermischen Umgebung – Bewertungsverfahren für menschliche Reaktionen bei Kontakt mit Oberflächen – Teil 1: Heiße Oberflächen (ISO 13732-1:2006)*; Deutsche Fassung EN ISO 13732-1:2006. Deutsche Norm, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag, Berlin.

Fenixgroup, 2014: *Produktkatalog Oktober 2014 – Fenix: Spezialist für Strahlungsheizung*. Jeseník, Tschechische Republik.

Internet: http://www.fenixgroup.cz/sites/default/files/katalog_de.pdf

Zugriffsdatum: 02.10.2014

Konz, M., Lemke, N., Försterling, S., Eghtessad, M., 2011: *Spezifische Anforderungen an das Heiz- Klimasystem elektromotorisch angetriebener Fahrzeuge*. In: FAT-Schriftenreihe 233, Verband für Automobilindustrie, Berlin (Hrsg.), TLK-Thermo GmbH und TU Braunschweig, Braunschweig.

Kritec, 2012: *Auftragsbestätigung zwischen der Kritec Temperaturmesstechnik und dem Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen der RWTH Aachen University*, 31.07.2012.

Schmidt, C., Praster, M., Wölki, D., Wolf, S., van Treeck, C., 2013: *Rechnerische und probandengestützte Untersuchung des Einflusses der Kontaktwärmeübertragung in Fahrzeugsitzen auf die thermische Behaglichkeit*. In: FAT-Schriftenreihe 261, Verband für Automobilindustrie, Berlin (Hrsg.), Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen, RWTH Aachen University, Aachen.

Technoline, 2014: *Technoline, Betriebsanleitung, Cost Controller, Stromverbrauchs-Überwachung*.

Internet: http://www.technolineberlin.de/manual/4029665033617_DE.pdf

Zugriffsdatum: 10.08.2014

www.sensorshop24.de/Temperaturfuehler/Kabelfuehler/Kabelfuehler-Pufferfuehler-PVC-Leitung/Durchmesser-5mm/Kabelfuehler-5x50mm-Pufferfuehler-bis-105-C-oxid.html

Zugriffsdatum: 29.09.2014

Bisher in der FAT-Schriftenreihe erschienen (ab 2010)

Nr.	Titel
227	Schwingfestigkeitsbewertung von Nahtenden MSG-geschweißter Dünnbleche aus Stahl, 2010
228	Systemmodellierung für Komponenten von Hybridfahrzeugen unter Berücksichtigung von Funktions- und EMV-Gesichtspunkten, 2010
229	Methodische und technische Aspekte einer Naturalistic Driving Study, 2010
230	Analyse der sekundären Gewichtseinsparung, 2010
231	Zuverlässigkeit von automotive embedded Systems, 2011
232	Erweiterung von Prozessgrenzen der Bonded Blank Technologie durch hydromechanische Umformung, 2011
233	Spezifische Anforderungen an das Heiz-Klimasystem elektromotorisch angetriebener Fahrzeuge, 2011
234	Konsistentes Materialmodell für Umwandlung und mechanische Eigenschaften beim Schweißen hochfester Mehrphasen-Stähle, 2011
235	Makrostrukturelle Änderungen des Straßenverkehrslärms, Auswirkung auf Lästigkeit und Leistung, 2011
236	Verbesserung der Crashsimulation von Kunststoffbauteilen durch Einbinden von Morphologiedaten aus der Spritzgießsimulation, 2011
237	Verbrauchsreduktion an Nutzfahrzeugkombinationen durch aerodynamische Maßnahmen, 2011
238	Wechselwirkungen zwischen Dieselmotortechnik und -emissionen mit dem Schwerpunkt auf Partikeln, 2012
239	Überlasten und ihre Auswirkungen auf die Betriebsfestigkeit widerstandspunktgeschweißter Feinblechstrukturen, 2012
240	Einsatz- und Marktpotenzial neuer verbrauchseffizienter Fahrzeugkonzepte, 2012
241	Aerodynamik von schweren Nutzfahrzeugen - Stand des Wissens, 2012
242	Nutzung des Leichtbaupotentials von höchstfesten Stahlfeinblechen durch die Berücksichtigung von Fertigungseinflüssen auf die Festigkeitseigenschaften, 2012
243	Aluminiumschaum für den Automobileinsatz, 2012
244	Beitrag zum Fortschritt im Automobilleichtbau durch belastungsgerechte Gestaltung und innovative Lösungen für lokale Verstärkungen von Fahrzeugstrukturen in Mischbauweise, 2012
245	Verkehrssicherheit von schwächeren Verkehrsteilnehmern im Zusammenhang mit dem geringen Geräuschniveau von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben, 2012
246	Beitrag zum Fortschritt im Automobilleichtbau durch die Entwicklung von Crashabsorbieren aus textil-verstärkten Kunststoffen auf Basis geflochtener Preforms und deren Abbildung in der Simulation, 2013
247	Zuverlässige Wiederverwendung und abgesicherte Integration von Softwarekomponenten im Automobil, 2013
248	Modellierung des dynamischen Verhaltens von Komponenten im Bordnetz unter Berücksichtigung des EMV-Verhaltens im Hochvoltbereich, 2013
249	Hochspannungsverkopplung in elektronischen Komponenten und Steuergeräten, 2013
250	Schwingfestigkeitsbewertung von Nahtenden MSG-geschweißter Feinbleche aus Stahl unter Schubbeanspruchung, 2013

- 251 Parametrischer Bauraum – synchronisierter Fahrzeugentwurf, 2013
- 252 Reifenentwicklung unter aerodynamischen Aspekten, 2013
- 253 Einsatz- und Marktpotenzial neuer verbrauchseffizienter Fahrzeugkonzepte – Phase 2, 2013
- 254 Qualifizierung von Aluminiumwerkstoffen für korrosiv beanspruchte Fahrwerksbauteile unter zyklischer Belastung (Salzkorrosion), 2013
- 255 Untersuchung des Rollwiderstands von Nutzfahrzeugreifen auf echten Fahrbahnen, 2013
- 256 Naturalistic Driving Data, Re-Analyse von Daten aus dem EU-Projekt euroFOT, 2013
- 257 Ableitung eines messbaren Klimasummenmaßes für den Vergleich des Fahrzeugklimas konventioneller und elektrischer Fahrzeuge, 2013
- 258 Sensitivitätsanalyse rollwiderstandsrelevanter Einflussgrößen bei Nutzfahrzeugen, Teile 1 und 2, 2013
- 259 Erweiterung des Kerbspannungskonzepts auf Nahtübergänge von Linienschweißnähten an dünnen Blechen, 2013
- 260 Numerische Untersuchungen zur Aerodynamik von Nutzfahrzeugkombinationen bei realitätsnahen Fahrbedingungen unter Seitenwindeinfluss, 2013
- 261 Rechnerische und probandengestützte Untersuchung des Einflusses der Kontaktwärmeübertragung in Fahrzeugsitzen auf die thermische Behaglichkeit, 2013
- 262 Modellierung der Auswirkungen verkehrsbedingter Partikelanzahl-Emissionen auf die Luftqualität für eine typische Hauptverkehrsstraße, 2013
- 263 Laserstrahlschweißen von Stahl an Aluminium mittels spektroskopischer Kontrolle der Einschweißtiefe und erhöhter Anbindungsbreite durch zweidimensional ausgeprägte Schweißnähte, 2014
- 264 Entwicklung von Methoden zur zuverlässigen Metamodellierung von CAE Simulations-Modellen, 2014
- 265 Auswirkungen alternativer Antriebskonzepte auf die Fahrdynamik von PKW, 2014
- 266 Entwicklung einer numerischen Methode zur Berücksichtigung stochastischer Effekte für die Crashsimulation von Punktschweißverbindungen, 2014
- 267 Bewegungsverhalten von Fußgängern im Straßenverkehr - Teil 1, 2014
- 268 Bewegungsverhalten von Fußgängern im Straßenverkehr - Teil 2, 2014
- 269 Schwingfestigkeitsbewertung von Schweißnahtenden MSG-geschweißter Feinblechstrukturen aus Aluminium, 2014
- 270 Physiologische Effekte bei PMW-gesteuerter LED-Beleuchtung im Automobil, 2015
- 271 Auskunft über verfügbare Parkplätze in Städten, 2015
- 272 Zusammenhang zwischen lokalem und globalem Behaglichkeitsempfinden: Untersuchung des Kombinationseffektes von Sitzheizung und Strahlungswärmeübertragung zur energieeffizienten Fahrzeugklimatisierung, 2015

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) 2015

VDA

Verband der
Automobilindustrie

FAT

Forschungsvereinigung
Automobiltechnik

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