

# Abschlussbericht zum Entwicklungsprojekt

Energieeffiziente und automatisierte Klimatisierung von Elektrofahrzeugen unter Verwendung innovativer Sensorik zur Bestimmung des thermischen Komforts als neuartige Regelgröße (EneffThermControl)

Gefördert unter dem Az.: 31078 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Laufzeit:	2 Jahre und 6 Monate
Projektbeginn/Projektende:	01.12.2014 – 31.05.2017
Bewilligungsempfänger:	InfraTec GmbH Gostritzer Str. 61-63 01217 Dresden
Projektleiter:	Hr. Gunnar Dammaß (InfraTec GmbH) Hr. Daniel Wölki (RWTH Aachen, E3D)
Kooperationspartner:	RWTH Aachen, Lehrstuhl E3D, 52074 Aachen Vereta GmbH, 37574 Einbeck Hochschule Ostfalia, IFBW, 38440 Wolfsburg
Assoziierte Partner:	Volkswagen AG, 38436 Wolfsburg

06/02		<b>Projektkennblatt</b> der <b>Deutschen Bundesstiftung Umwelt</b>			
Az	<b>31078/01</b>	Referat	<b>24/2</b>	Fördersumme	<b>248.784 €</b>
<b>Antragstitel</b>		<b>Energieeffiziente und automatisierte Klimatisierung von Elektrofahrzeugen unter Verwendung innovativer Sensorik zur Bestimmung des thermischen Komforts als neuartige Regelgröße (EneffThermControl)</b>			
<b>Stichworte</b>		Regelung, Energieeffizienz			
<b>Laufzeit</b>		Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)	
<b>2 Jahre und 6 Monate</b>		<b>01.12.2014</b>	<b>31.05.2017</b>		
Zwischenberichte					
<b>Bewilligungsempfänger</b>		InfraTec GmbH Gostritzer Str. 61-63 01217 Dresden		Tel 0351/8718620 Fax 0351/8718727	
				Projektleitung Hr. Gunnar Dammaß	
				Bearbeiter	
<b>Kooperationspartner</b>		RWTH Aachen, Lehrstuhl E3D, 52074 Aachen Volkswagen AG, 38436 Wolfsburg Vereta GmbH, 37574 Einbeck Hochschule Ostfalia, IFBW, 38440 Wolfsburg			
<b>Zielsetzung und Anlass des Vorhabens</b>					
<p>Der zunehmende Ausstoß von Treibhausgasen durch eine stetig wachsende Motorisierung der Welt trägt einen wesentlichen Teil zur globalen Erwärmung unseres Ökosystems bei. Deutschland hat sich diesbezüglich dazu bereit erklärt seine CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2050 um mindestens 80 % zu reduzieren. Um dieses Ziel zu erreichen, muss auch der Verkehr einen entscheidenden Beitrag leisten. Die notwendige Energie für den Antrieb eines E-Fahrzeugs kann im großen Stil aus regenerativen Energieträgern gewonnen werden und trägt somit entscheidend zur Reduzierung von Treibhausgasen bei. Intelligentes Thermomanagement und energieeffiziente Klimatisierung sind hierbei Schlüsselpositionen für die Serienreife von effizienten und ökologischen Elektrofahrzeugen. Da Abwärme konventioneller Verbrennungsmotoren bei E-Fahrzeugen nicht zur Verfügung steht, können herkömmliche Klimatisierungssysteme nicht auf E-Fahrzeuge übertragen werden. Der Fokus des Vorhabens liegt dabei auf einer deutlichen Effizienzsteigerung von E-Fahrzeugen hinsichtlich des energetischen Managements basierend auf einer bedarfsorientierten Behaglichkeitserkennung und regelungstechnischer Ansteuerung von Klimasystemen bei zukünftigen E-Plattformen.</p>					
<b>Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden</b>					
<p>Neuartige, innovative Sensorik, die den individuellen Behaglichkeitszustand der Fahrzeuginsassen erfasst und dem Thermomanagement als Regelgröße zur Verfügung stellt, soll in das Elektrofahrzeug integriert werden. Kamera-basierte Sensoren erkennen in diesem Zusammenhang die Gestik und Infrarotsignatur der Insassen. In den Sitz integrierte Klima- sowie Wärme- und Feuchtesensoren erfassen das zonale Mikroklima um eine Person sowie die Feuchte an deren Sitzkontaktstellen und vervollständigen somit das zonal vorherrschende klimatische Gesamtbild. Durch die Erkennung der Infrarotsignatur der Insassen und die gezielte Zuordnung lokaler Behaglichkeitsinformationen, die durch eine Fusion der verschiedenen Sensorinformationen ermöglicht wird, kann auf das individuelle Temperaturempfinden der einzelnen Fahrzeuginsassen eingegangen werden und durch lokale Klimatisierungseinrichtungen entsprechende Maßnahmen getroffen werden, die den Komfortzustand einer Person auf einem konstant hohen Niveau halten. Der Einsatz lokaler Maßnahmen bewirkt dabei, dass die gesamte Fahrzeugklimatisierung auf einem wesentlich niedrigeren energetischen Niveau agiert, was zu einer drastischen Reduzierung des Energieverbrauchs des E-Fahrzeugs führt und eine bedeutende Reichweitensteigerung erzielt werden kann.</p>					
Deutsche Bundesstiftung Umwelt □ An der Bornau 2 □ 49090 Osnabrück □ Tel 0541/9633-0 □ Fax 0541/9633-190 □ <a href="http://www.dbu.de">http://www.dbu.de</a>					

## **Ergebnisse und Diskussion**

Im Kontext von EneffThermControl wurde eine komfortgeführte Regelung entwickelt, welche, lokal am Menschen wirkende Klimatisierungsmaßnahmen verwendet. Der Einsatz von Trackingalgorithmen, Infrarotsignaturerkennung, der Fusionierung diverser und beliebig erweiterbarer Sensorinformation, welche Aufschluss über den aktuellen thermischen Zustand eines menschlichen Individuums und somit über dessen thermischen Komfort geben, wurde erstmals mit einem numerischen Abbild eines Menschen in einem modellprädiktiven Ansatz fusioniert. Eine auf diesem System basierende komfortgeführte Regelung, welche lokal am Menschen wirkender Klimatisierungsmaßnahmen verwendet, ermöglicht die Erzeugung eines auf den Fahrzeuginsassen zugeschnittenen lokalen Komfortbereiches, was vor allem auch vor dem Hintergrund des autonomen Fahrens von hoher Relevanz sein wird. Hier werden künftige Architekturen und Innenraumdesigns so gestaltet sein, dass bestehende Systemansätze der Fahrzeugklimatisierung mit der typischen Anordnung von Klimagerät und Personenausströmern nicht anwendbar sind, wodurch ein fundamentales Problem entsteht, welches es zu lösen gilt. Aus diesem Grund erfordern künftige Ansätze hochmodulare Baukastensysteme, die in der Lage sind ein lokal komfortables Mikroklima um einzelne Insassen zu erzeugen. Die dazu notwendige Technologie wird durch EneffThermControl bereits jetzt bereitgestellt. Gleichzeitig bestehen hohe Anforderungen aus Sicht der Individualisierung, des Bedienkomforts und der Vernetzung. Auch in diesem Zusammenhang liefert die EneffThermControl Technologie einen vielversprechenden Lösungsansatz. Bei der Entwicklung des Gesamtsystems wurde dabei insbesondere auf Portabilität geachtet, das heißt, die verwendeten Hardware-Komponenten (z. B. die Verwendung eines CAN-Interfaces) wurden so ausgewählt, dass das System mühelos in bestehende Regelungskonzepte in aktuellen Fahrzeugen eingebunden werden kann, da entsprechende Schnittstellen zur Serienhardware bereits im System integriert sind. Die in EneffThermControl verwendeten Thermophysiologie- und Behaglichkeitsmodelle, welche in zahlreichen Vorprojekten am Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen entwickelt wurden, konnten im Verlauf des Projekts konsequent weiterentwickelt und getestet werden und sind zur Vorhersage des Behaglichkeitszustandes eines Fahrzeuginsassen einsetzbar. Eine darauf aufbauende, bedarfsorientierte Ansteuerung entsprechender Klimatisierungsaktuatoren konnte in einem von der Volkswagen AG zur Verfügung gestellten Golf VII (Klimaerlebnisfahrzeug) realisiert werden und zeigt die Portierbarkeit des Gesamtsystems sowie die Möglichkeit des Einsatzes in einem seriennahen Fahrzeug. Eine Volkswagen-interne energetische Betrachtung einzelner lokal wirkender Klimatisierungsmaßnahmen zeigt weiterhin deutlich die ökologische und ökonomische Relevanz dieser Technologien für zukünftige Fahrzeugplattformen.

## **Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation**

Ergebnisse aus EneffThermControl sind auf diversen Fachtagungen wie ETA 2016, Building Simulation 2017, CTI 2017, Bauphysiktag Kaiserlautern 2017 sowie in verschiedenen nationalen und internationalen Konferenz- und Journalpublikationen veröffentlicht worden.

## **Fazit**

Das in EneffThermControl entwickelte Gesamtsystem bietet weitreichende und zukunftssträchtige Lösungen zur Reduzierung des Energieverbrauchs und CO<sub>2</sub>-Ausstoßes bestehender und zukünftiger Fahrzeugarchitekturen. Zusammenfassend konnte mit dem in EneffThermControl entwickelten Gesamtsystem eine vielversprechende Ausgangsplattform für weitere zukünftige Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten entwickelt werden, die in Richtung individueller, komfortgeführter Regelungsstrategien abzielen. Ein mögliches Risiko besteht dabei sowohl in der Verfügbarkeit günstiger Infrarotkamarasysteme oder entsprechender Alternativen zur berührungslosen Erfassung des aktuellen thermischen Zustands eines Fahrzeuginsassen, welche in Serienprodukte integriert werden können, als auch in der Nutzerakzeptanz. Letztere ist auch an die Möglichkeit der aktiven Beeinflussung der Klimaregelung gebunden.

## Inhaltsverzeichnis

I.	Abbildungsverzeichnis .....	IV
II.	Tabellenverzeichnis .....	VIII
III.	Abkürzungsverzeichnis .....	IX
1	Einleitung .....	1
1.1	Struktur dieses Berichtes .....	3
2	AP 1: Planungs- und Vorlaufphase .....	4
2.1	Wissenstransfer .....	4
2.1.1	E-Komfort .....	4
2.1.2	FAT I .....	5
2.1.3	FAT II .....	5
2.1.4	Thermische Ergonomie körpernaher Klimatisierungssysteme .....	6
2.2	Erweiterte Literatur- und internationale Patentrecherche unter Einbeziehung aller Partner .....	6
3	AP 2: Erprobung von Regelungsstrategien und Thermomanagement .....	7
3.1	Klimatisierungssysteme .....	8
3.2	Schnittstellen- und Softwareentwicklung, Anbindung an Bussysteme, Sensorfusion .....	10
3.2.1	Datenmodell .....	12
3.2.2	Daten Server .....	13
3.2.3	Datenserver Konfiguration .....	17
3.2.4	Datenserver Interne Berechnungsmodelle .....	19
3.2.5	MORPHEUS Thermophysiologiemodell .....	19
3.2.6	Fahrzeug CAN Bus Software .....	22
3.3	Untersuchung von psychologischen Wechselwirkungen .....	24
3.4	Klima- und Behaglichkeitssensoren .....	25

---

3.4.1	Sitzsensor .....	26
3.4.2	Lenkradsensor .....	29
3.4.3	Kalibriersensor zur Echtzeit-Kalibrierung einer IR-Kamera .....	30
3.4.4	Sensor Gate .....	31
3.5	Erfassung und bildtechnische Verarbeitung der Infrarotsignatur .....	33
3.5.1	Bilderkennungssoftware und Bildakquise.....	35
3.5.2	Bildregistrierung .....	37
3.5.3	Messpunkte und räumliches Pooling.....	41
3.5.4	Referenztemperatur .....	42
3.5.5	Gesichtssegmentierung.....	46
3.5.6	Gesichtserkennung .....	49
3.5.7	Haltungserkennung .....	50
3.5.8	Hintergrund Subtraktion .....	52
4	AP 3: Sensorintegration ins E-Fahrzeug.....	54
4.1	Fahrzeug-Mockup.....	56
4.2	Integration des IR-kamerabasierten Systems ins E-Fahrzeug.....	57
4.3	Technische Aspekte und Randbedingungen bzgl. Serienproduktion.....	57
4.4	Designtechnische Anforderungen.....	58
4.5	Anbindung an bestehende Assistenzsysteme .....	58
4.6	Integration der körpernahen Sensorik.....	58
4.7	Regelungstechnische Ansteuerung der Klimatisierungssysteme.....	59
4.8	Kalibrieralgorithmus für selbstlernendes System .....	63
4.9	Energetische Bewertung des regelungstechnischen Gesamtsystems.....	64
4.9.1	Energetische Bewertung (Heizfall) .....	65
4.9.2	Messreihe zur algorithmischen Steuerung beweglicher Ausströmer.....	66
4.10	Mensch-Maschine Interaktion (MMI).....	70

---

4.11	Feedbacksystem.....	70
4.12	Integration Klimainterface ins Fahrzeuginformationssystem.....	71
5	AP 4: Prototypische Umsetzung und Erprobung im Fahrzeug.....	71
5.1	Einsatz vorhandener Klimamesssysteme zur Bewertung der thermischen Behaglichkeit.....	72
5.1.1	Messbaum für die Erfassung des PMV/PPD Indexes .....	72
5.1.2	Klimamesseinrichtung nach DIN EN ISO 14505-2 .....	74
5.1.3	Hauttemperatursensoren.....	77
6	AP 5: Technologietransfer.....	79
6.1	Übertragung der Lehrinhalte .....	79
6.2	Ableitung von Richtlinien für Entwicklungsprozess von Serienfahrzeugen ...	79
6.3	Begleitende Normungsaktivitäten .....	80
6.4	Ökologische, Technologische und Ökonomische Bewertung .....	80
6.5	Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse .....	82
6.5.1	Analyse der Hauttemperatur mithilfe von thermografischer Bilderkennung...	83
6.5.2	Bewertung des thermischen Komforts mithilfe von thermografischer Bilderkennung und numerischen Modellen .....	85
7	Fazit .....	87
8	Verweise und Quellen .....	89

## I. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Die fünf Arbeitspakete des EneffThermControl Projektvorhabens.....	3
Abbildung 2: Schema des klimatisierten Raumes für Laborversuche (Metzmacher, Wölki, Schmidt, Frisch, & van Treeck, 2017).....	9
Abbildung 3: Schematische Darstellung des entwickelten Gesamtsystems .....	11
Abbildung 4: Übersicht über alle Komponenten des Gesamtsystems. Das System ist um einen zentralen Datenserver herum aufgebaut und wird in mehrere Softwarepakete für optische Sensorik, Temperatur- und Feuchtesensoren, numerische Modelle sowie zusätzliche Evaluations und Kontrollsoftware aufgeteilt (Metzmacher, Wölki, Schmidt, Frisch, & van Treeck, 2017).....	12
Abbildung 5: Datenserver Oberfläche mit der 3D Visualisierung mittels Farbskala. Echtzeit Sensordaten werden auf einem beliebigen 3D Modell basierend auf einer Farbskala abgebildet. Die Steuerelemente im unteren Bereich der Oberfläche erlauben eine leichte Navigation durch existierende Messdaten (Metzmacher, Wölki, Schmidt, Frisch, & van Treeck, 2017) .....	14
Abbildung 6: XML Anfrage von einem Software Client an den Datenserver. Die gesendeten Signale haben den Schlüssel T_IR_01 und T_IR_02. Die abgefragten Signale haben den Schlüssel T_REF_01 und T_REF_02 (Metzmacher, Wölki, Schmidt, Frisch, & van Treeck, 2017).....	16
Abbildung 7: XML Antwort vom Datenserver an einen Software Client. Die Signale sind eine Antwort auf die Signale, welche in Abbildung 6 abgefragt wurden. Der Server setzt die entsprechenden aktuellen Werte ein (Metzmacher, Wölki, Schmidt, Frisch, & van Treeck, 2017) .....	16
Abbildung 8: Die Nutzeroberfläche für die serielle Kommunikation. Serielle Geräte können nach Belieben hinzugefügt und konfiguriert werden. Der Nutzer kann COM Ports entsprechenden Serial Device Gruppen zuordnen und COM Port spezifische Parametern Spalten Begrenzungen und Dezimaltrennzeichen definieren (Metzmacher, Wölki, Schmidt, Frisch, & van Treeck, 2017).....	17
Abbildung 9: Modellierungsschema des numerischen Menschmodells, MORPHEUS (Wölki, 2017) .....	21
Abbildung 10: CAN zu USB Adapter der Firma Vector Informatik .....	23

Abbildung 11: Oberfläche der CAN Bus Software, welche den CAN Bus an den Datenserver anbindet (Metzmacher, Wölki, Schmidt, Frisch, & van Treeck, 2017) .....	24
Abbildung 12: Schematische Zeichnung eines Sitzsensors.....	27
Abbildung 13: Foto der Sitzsensoren.....	28
Abbildung 14: Schematische Zeichnung eines Lenkradsensors.....	29
Abbildung 15: Lenkradsensoren Übersicht.....	30
Abbildung 16: Kalibriersensor.....	31
Abbildung 17: Sensoren-Gate .....	32
Abbildung 18: Gesicht in der thermischen Domäne.....	34
Abbildung 19: Oberkörper in der thermischen Domäne.....	34
Abbildung 20: Gesichtserkennung in der Tiefendomäne .....	35
Abbildung 21: Gesichtserkennung in der Farbdomäne.....	35
Abbildung 22: Nah-Infrarot Muster zur Erzeugung des Tiefenbildes .....	36
Abbildung 23: Umgerechnetes Tiefenbild als Pixelmatrix in Graustufen dargestellt .....	36
Abbildung 24: Prototyp des Thermografiekamera/Tiefenkamera Aufbaus (Metzmacher, Wölki, Schmidt, Frisch, & van Treeck, 2017) .....	38
Abbildung 25: Perspektivische Projektion der Microsoft Kinect und der Thermografiekamera (Metzmacher, Wölki, Schmidt, Frisch, & van Treeck, 2017) .....	39
Abbildung 26: Kalibrierungsgitter in der sichtbaren Domäne .....	40
Abbildung 27: Kalibrierungsgitter in der thermischen Domäne .....	40
Abbildung 28: Referenztemperatursensor im sichtbaren Licht .....	43
Abbildung 29: Referenztemperatursensor in thermografischer Ansicht. Der Referenztemperaturmesspunkt wurde manuell vom Benutzer gesetzt.....	43
Abbildung 30: Spektrale Verteilung der Strahlung eines schwarzen Körpers in Abhängigkeit von der Wellenlänge (Metzmacher, Wölki, Schmidt, Frisch, & van Treeck, 2017) .....	45
Abbildung 31: Thermografiebild eines Gesichtes .....	48
Abbildung 32: Thermografiebild eines Gesichtes mit definierten Regionen.....	48
Abbildung 33: Hintergrundsubtraktion in der Tiefendomäne.....	53
Abbildung 34: Verfolgte Messpunkte in der thermischen Domäne .....	53

Abbildung 35: Schematische Darstellung der Hintergrundsubtraktion bei einem Messpunkt in einer Grenzregion (Metzmacher, Wölki, Schmidt, Frisch, & van Treeck, 2017) .....	54
Abbildung 36: Mockup mit integriertem Fahrsimulator, Tablet zur Abfrage der thermischen Behaglichkeit und Echtzeit Monitoring der Messdaten .....	56
Abbildung 37: Visualisierung der Messdaten körpernaher Sensoren im Fahrzeugsitz und auf dem Lenkrad.....	59
Abbildung 38: Teilmodelle und Schnittstellen zur Erläuterung der Funktionsweise des entstandenen Gesamtsystems .....	60
Abbildung 39: Bewegliche Luftausströmer im Golf VII.....	61
Abbildung 40: Benutzeroberfläche für die heuristische Regelung der Luftausströmer im Golf VII.....	62
Abbildung 41: Aufbau zur algorithmischen Klimasteuerung im Golf VII.....	63
Abbildung 42: Kombinierte Darstellung von 12 Klimatisierungsmaßnahmen zusammen mit der Temperatur und der subjektiven Behaglichkeit (Schmidt, Veselá, Bidhendi, Rudnick, & van Treeck, 2015) .....	65
Abbildung 43: Schema der Golf VII Climatronic Steuerkonsole (Grothe, 2013).....	66
Abbildung 44: LMV und Luftausströmerposition zur Konfiguration 1 der experimentellen Untersuchung der algorithmischen Ansteuerung und der Feedbackschleife desin EneffThermControl entwickelten Gesamtsystems .....	69
Abbildung 45: LMV und Luftausströmerposition zur Konfiguration 2 der experimentellen Untersuchung der algorithmischen Ansteuerung und der Feedbackschleife desin EneffThermControl entwickelten Gesamtsystems .....	69
Abbildung 46: LMV und Luftausströmerposition zur Konfiguration 3 der experimentellen Untersuchung der algorithmischen Ansteuerung und der Feedbackschleife desin EneffThermControl entwickelten Gesamtsystems .....	69
Abbildung 47: Datenformat für die Erstellung von Befragungsabfolgen im Nutzerfeedbacksystem .....	71
Abbildung 48: Behaglichkeitsmessbaum zur messtechnischen Erfassung der thermischen Behaglichkeit nach ISO 7730 (ISO 7730: 2005, 2006) .....	73
Abbildung 49: Klimamesseinrichtung nach ISO 14505-2 Messpuppe (links) und die dazugehörige 3D Darstellung (rechts) .....	75

---

Abbildung 50: Evaluationschema für die Zuordnung von Äquivalenttemperaturen auf den LMV (Sommerfall).....	77
Abbildung 51: Evaluationsschema für die Zuordnung von Äquivalenttemperaturen auf den LMV (Winterfall).....	77
Abbildung 52: PT100 Sensoren werden im EneffThermControl Projekt als Messfühler zur Erfassung der Hautoberflächentemperatur für die Validierung und den Vergleich der Infrarotmessung mit herkömmlichen Messmethoden verwendet (Metzmacher, Wölki, Schmidt, Frisch, & van Treeck, 2017).....	78
Abbildung 53: Foto des Data Taker DT85 Multi-Kanal Datenloggers (Thermo Fisher Scientific Inc., 2017) .....	79
Abbildung 54: Messergebnisse der <i>Forehead center</i> Region vom PT100 Sensor und von der thermografischen Kamera .....	84
Abbildung 55: Temperaturen der Haut- und Bekleidungsschichten gemessen von der Thermografiekamera .....	85
Abbildung 56: Vergleich zwischen den Äquivalenttemperatur $T_{eq}$ für das unbedeckte Gesicht (Metzmacher, Wölki, Schmidt, Frisch, & van Treeck, 2017) .....	86

## II. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Spalten der CSV Konfigurationsdatei für bekannte Signale im Datenserver. 18	
Tabelle 2: Eigenschaften des Registers der Thermografiekamera .....	45
Tabelle 3: Definierte Segmentierung des menschlichen Gesichtes mit der jeweiligen XML Bezeichnung im Datenaustausch Format. Die Nummerierung entspricht der Nummerierung in Abbildung 32. ....	48
Tabelle 4: Definierte Körperregionen mit der jeweiligen XML Bezeichnung im Datenaustausch Format .....	50
Tabelle 5: VW Golf VII Climatronikeinstellung für die experimentelle Untersuchung .....	67
Tabelle 6: Sensoren für Messung klimatischer Parameter beschrieben in ISO 7726 (ISO 7726, 1998). ....	73
Tabelle 7: PMV Skala nach ISO 7730 (ISO 7730: 2005, 2006) .....	74
Tabelle 8: Vorträge und Publikationen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse .....	82

### III. Abkürzungsverzeichnis

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt
EQ (T_EQ)	Äquivalenttemperatur
IR	Infrarot
LMV	Local Mean Vote
LWIR	Long-wavelength infrared, Langwelliger Spektralbereich, ca. 8 $\mu\text{m}$ bis 14 $\mu\text{m}$
MMI	Mensch-Maschine Interaktion
MWIR	Mid-wavelength infrared, Mittelwelliger Spektralbereich, ca. 2 $\mu\text{m}$ bis 5 $\mu\text{m}$
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NETD	Noise-equivalent temperature difference, rauschbegrenzte Temperaturdifferenz
OpenCV	Open Computer Vision (Bibliothek)
PC	Personal Computer
PMV	Predicted Mean Vote
PPD	Predicted Percentage Dissatisfied

## 1 Einleitung

Der zunehmende Ausstoß von Treibhausgasen durch eine stetig wachsende Motorisierung der Welt trägt einen wesentlichen Teil zur globalen Erwärmung unseres Ökosystems bei. Vor diesem Hintergrund wurde ein international gültiges Ziel vereinbart, welches eine Begrenzung der Erderwärmung auf maximal 2°C vorschreibt. Deutschland hat sich diesbezüglich dazu bereit erklärt seine CO<sub>2</sub> Emissionen bis 2050 um mindestens 80% zu reduzieren. Um dieses Ziel zu erreichen muss auch der Verkehr einen entscheidenden Beitrag leisten. In diesem Zusammenhang fördert das Bundesumweltministerium bereits zahlreiche, innovative Projekte, die sich insbesondere mit dem Thema Elektromobilität befassen. Da die Energie für den Antrieb eines E-Fahrzeugs in großem Stil aus regenerativen Energien gewonnen werden kann, trägt die Technologie entscheidend zu einer Reduzierung von Treibhausgasen bei und hat zusätzlich eine Absenkung der Umweltbelastung durch Feinstaub und Lärm zur Folge.

In diesem Zusammenhang stellt die Klimatisierung der Fahrgastzelle einen der größten Nebenverbraucher im Fahrzeug dar. Bei der herkömmlichen Fahrzeugklimatisierung wird zur Vorkonditionierung der Luftmassen die Abwärme der Verbrennungskraftmaschine bzw. die Antriebsenergie zum Betrieb eines Kompressors für den Kältekreislauf genutzt. Da Abwärme und Nutzenergie konventioneller Verbrennungsmotoren bei E-Fahrzeugen nicht zur Verfügung stehen, ist die Integration herkömmlicher Klimatisierungsstrategien in E-Fahrzeuge nicht zielführend, da die zur Konditionierung der Luftmassen erforderliche elektrische Energie im Extremfall eine Halbierung der Reichweite nach sich zieht (Schmidt, Veselá, Bidhendi, Rudnick, & van Treeck, 2015). Zur Verringerung des Energiebedarfs der E-Fahrzeuge werden daher innovative Klimatisierungs- und Regelungsstrategien erforscht, die möglichst körpernah wirken und auf energieeffiziente Weise ein thermisch behagliches Innenraumklima für die Insassen schaffen.

Zu diesen Systemen zählen beispielsweise lokal am Probanden verortete Heiz- und Kühlsysteme, die in Folge einer bedarfsorientierten Behaglichkeitserkennung angesteuert werden können und so zu einer auf das Individuum zugeschnittenen Klimaregelung führen. Diese führt wiederum zu einer deutlichen Effizienzsteigerung hinsichtlich des

energetischen Managements des Fahrzeugs bei gleichzeitiger Sicherstellung des thermischen Insassenkomforts.

Voraussetzung für solch individualisierbare, komfortgeführte Regelungsstrategien ist eine möglichst umfassende sensorische Erfassung des thermischen/energetischen Zustands eines Fahrzeuginsassen. Im Kontext dieses Projekts wurde deshalb eine Gesamtlösung entwickelt, welche die notwendige Sensoranbindung, deren Datenfusion und Datenverarbeitung sowie eine speziell für diese Plattform entwickelte algorithmische Ansteuerung lokal wirkenden Klimatisierungssysteme umfasst.

Die individuelle Erfassung des thermischen Behaglichkeitszustandes von Menschen mithilfe multi-modaler Sensorik erfordert dabei eine große Anzahl an zusammenhängenden Rechen- und Datenverarbeitungsschritten. Die Entwicklung und Anwendung eines solchen Systems setzt ein robustes und übersichtliches Rahmenkonzept voraus. Ein Hauptaspekt in EneffThermControl war dabei die Entwicklung eines solchen Konzepts und dessen soft- und hardwareseitige Umsetzung. Dies wurde in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern der RWTH Aachen University, InfraTec GmbH, Vereta GmbH, FH Ostfalia und dem assoziierten Partner Volkswagen AG durchgeführt. Die in diesem Projekt entwickelte Plattform ist als generische Forschungsplattform konzipiert, in die sich Sensorik beliebiger Modalität einbinden lässt. Sie repräsentiert die Basis zur Kopplung numerischer Modelle, Datenverarbeitungsmodule sowie Aktuatoren, die für eine generische, komfortgeführte Regelung von Klimasystemen notwendig ist. In diesem Zusammenhang wurde darauf geachtet, eine möglichst offene Schnittstellenkommunikation zu schaffen, welche eine Einbindung entwickelter numerischer Modelle sowie weiterer Subsysteme wesentlich vereinfacht. Ein zusätzlich integriertes Daten-Monitoring System unterstützt dabei die Evaluierung des Gesamtsystems. Ein weiterer Kernaspekt dieses Projekts war das Testen des Systems in experimentellen Versuchen und wissenschaftlichen Arbeiten. Erkenntnisse aus diesen Versuchen führten zu einer kontinuierlichen Weiterentwicklung der einzelnen Systemkomponenten.

Dieser Bericht stellt das resultierende Gesamtsystem im Detail vor und beschreibt die für die formulierten Arbeitspakete relevanten Ergebnisse. Weiterhin werden die im Kontext dieses Projekts entstandenen wissenschaftlichen Arbeiten referenziert und entsprechend erläutert.

## 1.1 Struktur dieses Berichtes

Im Rahmen des EneffThermControlEneffThermControl Projektes wurden weitreichende konzeptionelle Softwarepakete sowie prototypische, experimentelle Aufbauten realisiert. Die Arbeiten basieren auf verschiedenen Methoden und Grundlagen der thermischen Ergonomie, menschlichen Thermophysik, Thermografie und Informatik. Der Bericht ist entsprechend der im Projektantrag aufgelisteten Arbeitspakete strukturiert. Abweichungen von dieser Struktur sind gekennzeichnet und referenziert.

Abbildung 1 zeigt eine Übersicht der im EneffThermControl Projekt enthaltenen Arbeitspakete und deren Interaktionen. Das Projekt ist in fünf Arbeitspakete (AP) aufgeteilt: AP 1: Planungs- und Vorlaufphase (siehe Abschnitt 2), AP 2: Erprobung von Regelungsstrategien und Thermomanagement (siehe Abschnitt 3), AP 3: Sensorintegration ins E-Fahrzeug (siehe Abschnitt 44), AP 4: Prototypische Umsetzung und Erprobung im E-Fahrzeug (siehe Abschnitt 5) und AP 5: Technologietransfer (siehe Abschnitt 6).

Zunächst werden in jedem Abschnitt die einzelnen Arbeitsschritte des Paketes aufgelistet. Der Leser wird jeweils auf die entsprechenden Unterabschnitte verwiesen in denen die praktische Umsetzung im Projektverlauf erläutert wird.

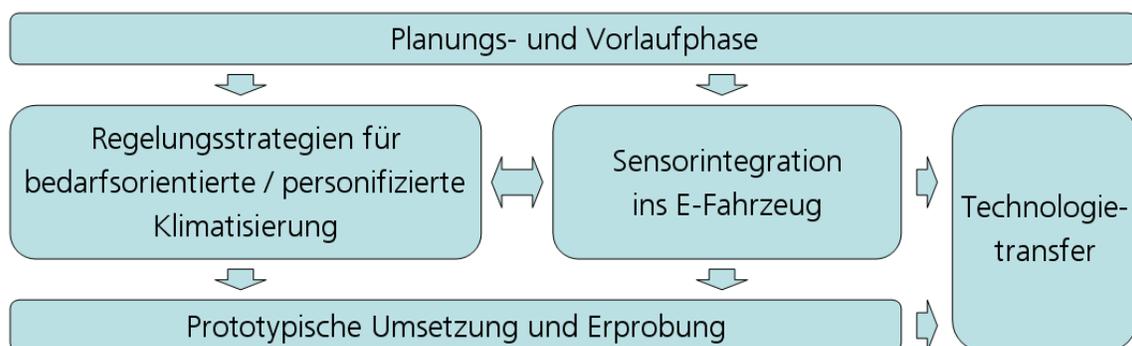


Abbildung 1: Die fünf Arbeitspakete des EneffThermControl Projektvorhabens

## **2 AP 1: Planungs- und Vorlaufphase**

In der Planungs- und Vorlaufphase wurden Erfahrungen aus abgeschlossenen Projekten und vorhandener Literatur genutzt, um die Anforderungen an das im EneffThermControl entwickelte Gesamtsystem zu formulieren.

Ziele dieses Arbeitspaketes:

- Wissenstransfer von Hintergrundwissen und von Erfahrungen aus abgeschlossenen öffentlichen Projekten zwischen den Projektpartnern (siehe Abschnitt 2.1)
- Erweiterte Literatur- und internationale Patentrecherche unter Einbeziehung aller Partner (siehe Abschnitt 2.2)
- Kick-Off Meeting mit Workshop

### **2.1 Wissenstransfer**

Für das EneffThermControl Projekt konnten Hintergrundwissen und Erfahrungen aus verschiedenen abgeschlossenen Projekten genutzt werden. Dies schließt Erfahrungen in Bezug auf angewandte Messtechnik, Fahrzeugtechnik sowie theoretisches Hintergrundwissen zu den Themen thermischer Komfort, thermische Ergonomie, Thermophysiologie, Bekleidungsphysiologie, Klimatisierungstechnik und Sensorik ein. Im Folgenden wird erläutert, welche vorangegangenen, relevanten Projekte als notwendige Voraussetzung zur erfolgreichen Bearbeitung des EneffThermControl Projektes eingebracht wurden.

#### **2.1.1 E-Komfort**

Das Ziel dieses Projektes (BMBF, 2012 – 2014) bestand darin ein neuartiges thermisches Behaglichkeitsmodell zu entwickeln, welches globale sowie lokale Behaglichkeitsvorhersagen aufgrund einer erweiterten Energiebilanzgleichung ermöglicht. Das Modell ist in der Lage zeitlich veränderliche und räumlich nicht-uniforme, klimatische Bedingungen zu berücksichtigen. Weiterhin kann der Einfluss der Kontaktwärmeübertragung durch temperierte Flächen abgebildet werden. Das Modell kann mit dem im EneffThermControl entwickelten System zusammen verwendet werden,

um die energetische Effizienz und die ergonomische Akzeptanz individueller und körpernaher Klimatisierung zu bewerten. In einer Feedbackschleife werden die Auswirkungen der aktuellen Klimatisierungskonfiguration kontrolliert und Änderungen aufgrund der Modellausgabe automatisch vorgenommen.

### **2.1.2 FAT I**

Die beiden FAT Projekte (FAT I: Schmidt, Praster, Wölki, Wolf, & van Treeck, 2013; FAT II: Schmidt, Veselá, Bidhendi, Rudnick, & van Treeck, 2015) analysierten anhand umfangreicher Probandenversuche in Klimakammern den thermischen Einfluss lokaler Heizsysteme auf die thermische Ergonomie der Testpersonen. Im ersten FAT I Projekt wurde experimentell und simulativ untersucht, ob durch eine Sitzheizung die thermische Behaglichkeit einer kühleren Umgebung (gesenkte operative Temperaturen) kompensiert werden kann. Als Ergebnis wurde in diesem Projekt ein Kennlinienmodell entwickelt, welches eine theoretische Kompensation aus thermodynamischer Sicht nachweist. Mithilfe von Kontaktwärme ist es demnach theoretisch möglich Raumtemperaturen bis zu maximal 15 °C auszugleichen. In Probandenversuchen wurde hier allerdings festgestellt, dass die Rate an Unzufriedenen ansteigt, dass aufgrund der entstehenden Asymmetrien beheizter Körperteile zu erklären ist. Es wurde gezeigt, dass die Sitzheizung als alleinige lokale Maßnahme nicht ausreichend ist, um global reduzierte Raumtemperaturen auszugleichen.

### **2.1.3 FAT II**

Das Folgeprojekt FAT II (Schmidt, Veselá, Bidhendi, Rudnick, & van Treeck, 2015) knüpfte direkt an die Arbeit von FAT I an. In diesem Projekt wurden die die Sitzheizung um weitere lokale Heizsysteme erweitert (Lenkradheizung und Flächenheizungen im Fußraum, an der Mittelkonsole und der Seitenvertäfelung der Fahrertür). Testpersonen wurden mit demselben Fragenkatalog befragt wie in FAT I um ein vergleichbares Ergebnis zu erzielen. Im FAT II Projekt konnte gezeigt werden, dass ein niedrigeres Raumklima durch mehrere lokale Maßnahmen kompensiert werden kann und diese Kompensation von Probanden auch als thermisch komfortabel empfunden wird. Diese Erkenntnisse

liegen bei der Entwicklung des Systems in EneffThermControl zugrunde, welches die lokalen Maßnahmen in ein Gesamtsystem integriert und in eine automatisierte Steuerung überführt.

#### **2.1.4 Thermische Ergonomie körpernaher Klimatisierungssysteme**

Dieses Industrieprojekt befasste sich mit dem Messverfahren, welches im internationalen Standard ISO14505-2 definiert ist. Die entsprechende Messeinrichtung wird im nachfolgenden Abschnitt 5.1.2 beschrieben. Mit diesem Messsystem wurden umfassende Versuche durchgeführt, die unter stationären als auch instationären Bedingungen im stehenden und fahrenden Fahrzeug stattfanden. Das Projekt lieferte Erfahrungen hinsichtlich des Umgangs mit der Klimamesseinrichtung, des Verhaltens der Äquivalenttemperatur und dem Local Mean Vote (LMV, Beschreibung siehe Abschnitt 5.1.2). Diese Messeinrichtung wurde in EneffThermControl als bewährtes Referenzsystem für die Bewertung der thermischen Behaglichkeit verwendet.

### **2.2 Erweiterte Literatur- und internationale Patentrecherche unter Einbeziehung aller Partner**

Vor Projektbeginn wurde eine umfassende internationale Patentrecherche durchgeführt. Diese sowie der amtliche Rücklauf einer deutschen und internationalen Patentprüfung haben ergeben, dass bis auf die zum Zeitpunkt der Antragstellung laufende Patentprüfung (van Treeck, Wölki) eine Lösung zur Erfassung individueller Behaglichkeitszustände von Insassen im Fahrzeug mit Hilfe fusionierter Sensorik zu Beginn des Forschungsvorhabens nicht existent war. Die Anforderung an die Recherche war dabei unter anderem, dass der Behaglichkeitszustand des Menschen als Stellgröße für das Klimaregelungskonzept verwendet wird. Es wurden wie im Antrag dargestellt vor Beginn des Projektes Schutzrechte angemeldet, die im Verlauf des Projekts sowohl auf nationaler als auch auf internationaler Ebene genehmigt wurden (Deutschland Patent No. DE102011077522A1, 2012).

Durch eine umfassende Literaturrecherche wurden die zuvor erarbeiteten theoretischen Grundlagen maßgeblich erweitert und umgesetzt. Hierbei wurde ebenfalls überprüft,

welche Anforderungen die Systemarchitektur erfüllen muss und welche Software- und Hardwarekomponenten hierzu notwendig sind.

Wichtige Literatur die in EneffThermControl zur Anwendung kam umfasst die Themen menschliche Thermoregulation und thermische Behaglichkeit (Fiala, Lomas, & Stohrer, 1999), (Fiala, Lomas, & Stohrer, 2001), (Paulke & Wagner, 2007), (ANSI/Ashrae, 2013), (ISO 7730: 2005, 2006), (ISO 14505-2, 2004) sowie Teile des Forschungsbereiches Computer Vision (Shotton, et al., 2013), (Zhang Z. , 2000), (Smolyanskiy, Huitema, Liang, & Anderson, 2014) und (Krig, 2014).

### **3 AP 2: Erprobung von Regelungsstrategien und Thermomanagement**

Teil des zweiten Arbeitspaketes war es die Maßnahmen lokaler Klimatisierung festzulegen und Klimatisierungssysteme für die Entwicklung, experimentelle Untersuchungen des Gesamtsystems sowie mögliche Regelstrategien auszuwählen. Weitere Maßnahmen dieses Arbeitspaketes umfassen die Auswahl der Sensorik, die software- und hardwareseitige Entwicklung des Systems zur Sensordatenfusion und die Modellanbindung.

Ziele dieses Arbeitspaketes:

- Festlegung von situationsgerechten Anforderungen zur Klimatisierung im E-Fzg. (i.W. durch Übertragung von vorhandenen Erkenntnissen aus anderen Forschungsvorhaben, siehe Abschnitt 3.1)
- Auswahl und Klassifizierung lokaler Klimatisierungssysteme (siehe Abschnitt 3.1)
- Definition von E-Fzg. spezifischen Anforderungsprofilen und deren Wirkungsweise bzgl. Minimalklimatisierung (Batterieerhaltung), Normalbetrieb (maximale Effizienz bei maximaler Reichweite) und komfortoptimierter Klimatisierung (siehe Abschnitt 4.7)
- Feedback: Untersuchung psychologischer Wechselwirkungen (siehe Abschnitt 3.3)
- Sicherheitsaspekte: sicherheitsrelevante Regelungsstrategien speziell für E-Fzg. (siehe Abschnitt 4.12)
- Erfassung der Infrarotsignatur des Menschen im E-Fahrzeug (siehe Abschnitt 3.5)
- Auswahl IR Kamerasystem für Sensorfusion (technische Spezifikation, fertigungstechnische Gesichtspunkte, siehe Abschnitt 3.5)

- Kamerabasierte Verarbeitung der Infrarotsignatur bzgl. Gestenerkennung, Korrelation mit Infrarotsignatur, Zuordnung von Körperteilen, Temperaturerkennung, Anbindung an physiologisches Modell, Aktivitätserkennung, Belegungserkennung, Bekleidungserkennung sowie Anbindung an vorhandenes Behaglichkeitsmodell (siehe Abschnitt 3.5)
- Schnittstellenentwicklung, softwaretechnische Anbindung Bussystem usw. (siehe Abschnitt 3.2)
- Erfassung des Mikroklimas durch Behaglichkeitssensoren im E-Fahrzeug (siehe Abschnitt 3.4)
- Klimasensoren: Allgemeine Überlegungen zu Platzierung, Ansprechzeiten, Auswahl von sinnvollen körpernahen Positionen sowie Evaluation von technischen Möglichkeiten einer Platzierung im körpernahen Bereich bzgl. Serienproduktion (siehe Abschnitt 3.4)
- Kontaktsensoren: Auswahl bzgl. Wärmeübergang und Feuchte, Auswahl Sensortyp für Umsetzung in den Bereichen Sitz, Lenkrad, Fußbereich (siehe Abschnitte 3.4)

### 3.1 Klimatisierungssysteme

Während des EneffThermControl Projektes standen zwei Testumgebungen mit verschiedenen Klimatisierungsmaßnahmen zur Verfügung.

Die erste Umgebung war ein VW Golf VII (Diesel), der mit prototypischen, beweglichen Luftausströmern sowie belüftbaren und beheizbaren Sitzen ausgestattet ist. Diese Klimatisierungsmaßnahmen werden von der entwickelten Software direkt angesprochen und in die Heuristik integriert. Aufgrund OEM-seitiger Vorschriften bestand im Projekt allerdings kein Zugriff auf die VW Klimaanlage "Climatronik". Folglich steuerte die Anlage den Luftstrom durch die Auslässe weiterhin und verhinderte, dass Parameter wie Solltemperatur und Gebläsestufe, die von der EneffThermControl Software vorgeschlagen wurden, automatisch eingestellt werden können. Dies erforderte somit eine manuelle Einstellung der Klimaanlage.

Diese Vorgehensweise wurde genutzt, um experimentell die Effektivität des Systems zu prüfen. Die zur Verfügung stehenden Klimatisierungssysteme waren im Projekt ausreichend, um das Verhalten einer algorithmisch gesteuerten Klimatisierung in einer realen Umgebung zu testen. An dieser Stelle ist anzumerken, dass Klimatisierungsmaßnahmen abstrakt als generische Aktuatoren mit  $n$  Eingabeparametern

je Zeiteinheit im System definiert sind und sich weitere Maßnahmen problemlos in das Gesamtsystem integrieren ließen.

Die zweite Umgebung welche im EneffThermControl Projekt genutzt wurde, war ein klimatisierter Laborraum an der RWTH Aachen University in dem die Sensordatenfusion sowie einzelne Subsysteme kontrolliert getestet und weiterentwickelt wurden. Störeffekte bei der Datenerfassung werden minimiert. Abbildung 2 zeigt eine schematische Darstellung des Testraumes. Für die gesamte Anpassung des Raumklimas standen zwei Deckenkühlkonvektoren der Marke Airwell Residential zur Verfügung. Zusätzlich wurde im Projektverlauf ein Fahrzeug-Mockup konstruiert, welches in den Raum eingebracht wurde (siehe Abschnitt 4.1). Im Mockup wurde ein Autositz identisch zum Sitzmodell eines VW Golf VII installiert, sodass ein beheizbarer und belüftbarer Sitz vom System angesteuert und als Aktuator in der Heuristik getestet werden konnte.

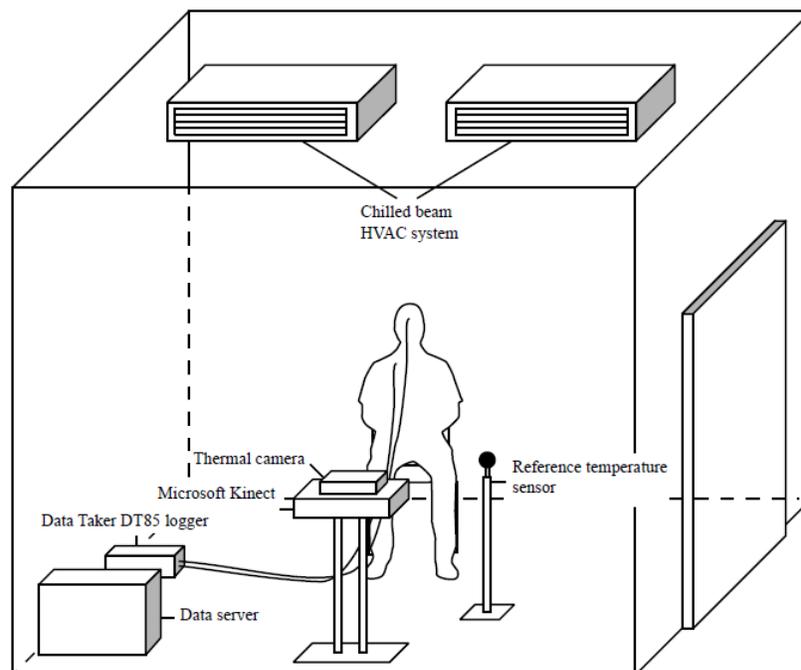


Abbildung 2: Schema des klimatisierten Raumes für Laborversuche (Metzmacher, Wölki, Schmidt, Frisch, & van Treeck, 2017)

## **3.2 Schnittstellen- und Softwareentwicklung, Anbindung an Bussysteme, Sensorfusion**

Die Softwareentwicklung beinhaltet eine Reihe von Softwarepaketen zur multi-modalen Sensorfusion, Datenakquise und Modellanbindung, die im EneffThermControl Projekt entwickelt wurden. Diese sind über eine zentrale Schnittstelle mit dem Gesamtsystem verknüpft. In der Planungsphase des Projektes und bei der Entwicklung von Softwareprototypen hat sich herausgestellt, dass eine Serverstruktur zur Verknüpfung von dezentralen, spezialisierten Softwarekomponenten der effektivste und am einfachsten zu realisierende Ansatz ist. Monolithische Softwarestrukturen in denen hardwarenahe und High-Level Funktionen direkt miteinander verknüpft sind, haben sich in frühen Projektphasen als nicht praktikabel herausgestellt und wären programmiertechnisch nur schwer zu realisieren gewesen. Eine dezentrale Softwarestruktur, die einzelne spezialisierte Softwarekomponenten über einen zentralen Kommunikations- und Datenserver verknüpft, hat den Vorteil sehr flexibel und erweiterbar zu sein sowie Konflikte in Treiber- und Compilerabhängigkeiten zu minimieren.

Abbildung 3 zeigt eine schematische Darstellung des im EneffThermControl Projekt entwickelten Gesamtsystems. Die Sensorfusion steht im Mittelpunkt des Gesamtsystems und wird durch den Datenserver realisiert. Diese zentralisierte Implementierung ermöglicht die Kommunikation zwischen zugehörigen Soft- und Hardwarekomponenten, sorgt für eine generelle Unabhängigkeit aller Komponenten untereinander und stärkt die erhöhte Kompatibilität des Systems.

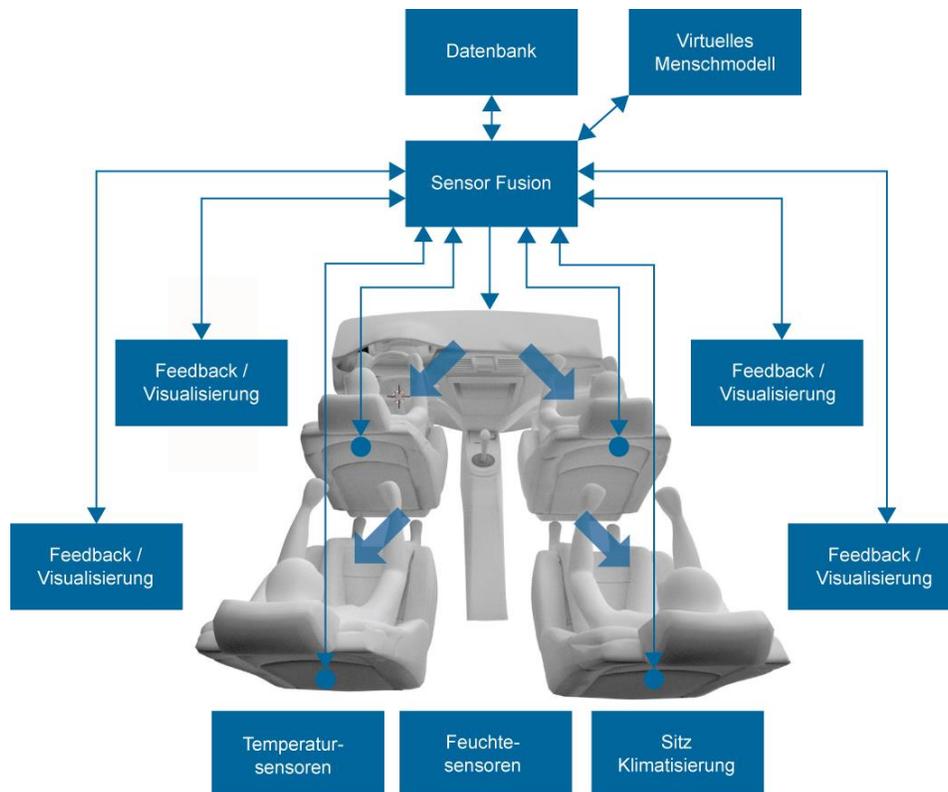


Abbildung 3: Schematische Darstellung des entwickelten Gesamtsystems

Das System wurde zunächst als Forschungsplattform konzipiert, Teilkomponenten können jedoch durchaus in eingebettete Systeme überführt werden. Das System ist aufgeteilt in verschiedene Softwarekomponenten, die für die Sammlung und Speicherung von Daten, die numerische Modellierung sowie grafische Visualisierung zuständig sind. Softwarekomponenten für die Erfassung von Sensordaten haben direkten Hardwaretreiberzugriff. Hierbei wurde darauf geachtet, dass jede Komponente möglichst nur einen und maximal zwei Hardwaretreiber gleichzeitig anspricht. Jede Softwarekomponente kommuniziert mit einem einzelnen zentralen Datenserver und kann indirekt auch Daten von jeweils anderen Softwarekomponenten anfordern. Der Datenserver fungiert als zentraler Proxy und ermöglicht eine robuste Hardwareabstraktionsebene, die Abhängigkeiten minimiert. Dies hat den Vorteil, dass an verschiedenen Softwarekomponenten unabhängig gearbeitet werden kann, vorausgesetzt ein definiertes Kommunikationsprotokoll wird eingehalten. Die Kommunikation erfolgt über das herkömmliche TCP/IP Protokoll über Ethernet, welches implizit eine Verteilung des Systems auf mehrere Rechner ermöglicht. Tatsächlich kann

der Datenserver auch direkt als Webserver mit einem Browser angesprochen werden, um manuell Datenpakete abzurufen oder zu senden (siehe Abschnitt 3.2.2). Abbildung 4 zeigt eine vollständige Übersicht über das Gesamtsystem und visualisiert den Datenfluss zwischen den einzelnen Softwarekomponenten.

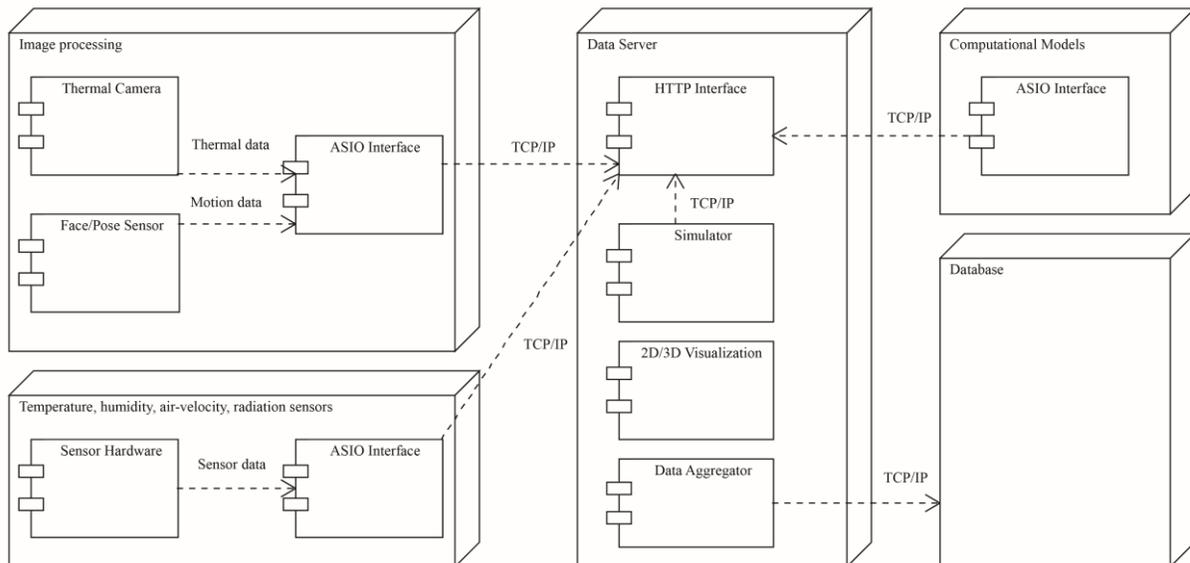


Abbildung 4: Übersicht über alle Komponenten des Gesamtsystems. Das System ist um einen zentralen Datenserver herum aufgebaut und wird in mehrere Softwarepakete für optische Sensorik, Temperatur- und Feuchtesensoren, numerische Modelle sowie zusätzliche Evaluations und Kontrollsoftware aufgeteilt (Metzmacher, Wölki, Schmidt, Frisch, & van Treeck, 2017)

### 3.2.1 Datenmodell

Die Kommunikation und Datenspeicherung beruht auf einem Schlüssel-Wert basierten Datenmodell. Dies ermöglicht den allgemeinen Zugriff auf Daten durch assoziative Datenfelder, bei denen mithilfe eines nichtnumerischen Schlüssels, Datenpunkte nachgeschlagen werden. Die große Anzahl von verschiedenen Sensoren und Datenpunkten wird so mit spezifischen Bezeichnern versehen und hält die Arbeit mit dem System übersichtlich. Weiterhin wurde eine Namenskonvention für die Beschreibung der beschriebenen Datenstruktur eingeführt. Jeder Datenpunkt wird dabei als Signal bezeichnet. Ein Signal besteht aus einem Namen, welcher den Schlüssel im Schlüssel-

Wert System repräsentiert, einem Wert und einer Signalgruppe. Ein Signal kann einen Datenpunkt mit einem willkürlichen Wert darstellen, wobei der Wert eine beliebige Folge alphanumerischer Zeichen annehmen kann und nicht zwingend rein numerisch sein muss. Jede Softwarekomponente ist verantwortlich für die korrekte Interpretation und Weiterverarbeitung des Wertes.

Die Signalgruppe erlaubt die Gruppierung von mehreren Signalen. Dies ist wichtig für den Fall, dass Sensoren des gleichen Typs an mehreren Stellen in einem experimentellen Aufbau existieren. Wenn, zum Beispiel, zwei Temperatursensoren des Typs PT100 an zwei verschiedenen Messpunkten im Fahrzeug angebracht werden, können diese in Signalgruppen wie zum Beispiel *FAHRERSITZ* oder *BEIFAHRERSITZ* eingeordnet werden.

### **3.2.2 Daten Server**

Der Datenserver fungiert als zentraler Kommunikationsproxy und Hardwareabstraktionsebene. Die Software ist imstande Daten zu verarbeiten sowie persistent zu speichern. Weiterhin wird der Server für die Echtzeit Beobachtung von Daten in einem experimentellen Aufbau genutzt. Dabei ermöglicht der Datenserver Visualisierung mittels 2D Diagrammen und interaktiven 3D Falschfarbenbildern, die den reellen Aufbau nachbilden (vgl. Abbildung 5).

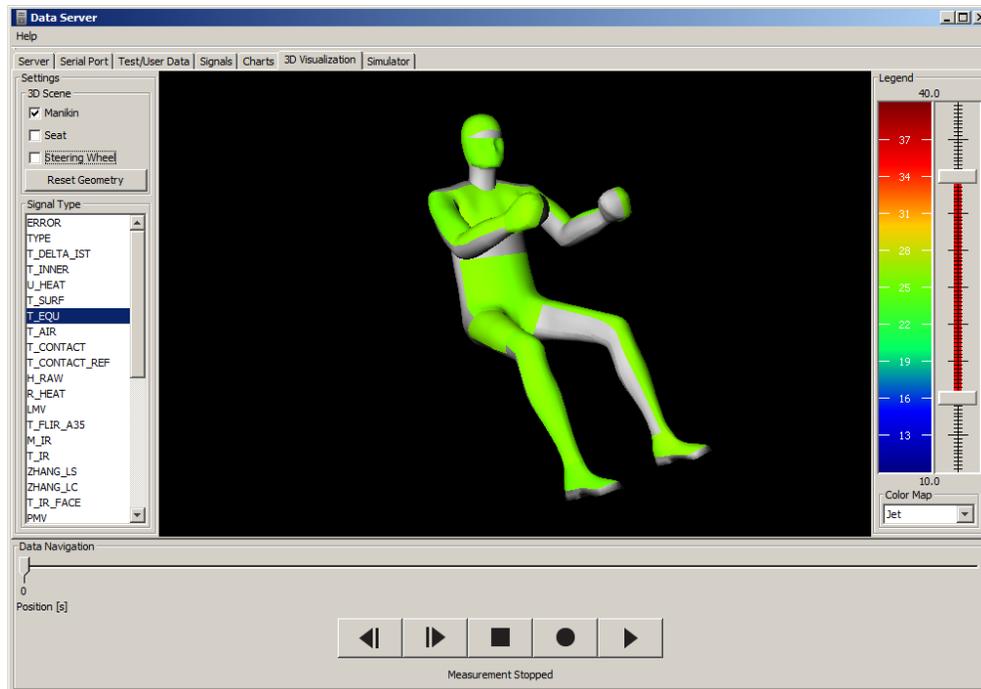


Abbildung 5: Datenserver Oberfläche mit der 3D Visualisierung mittels Farbskala. Echtzeit Sensordaten werden auf einem beliebigen 3D Modell basierend auf einer Farbskala abgebildet. Die Steuerelemente im unteren Bereich der Oberfläche erlauben eine leichte Navigation durch existierende Messdaten (Metzmacher, Wölki, Schmidt, Frisch, & van Treeck, 2017)

Die Software ist in der Programmiersprache JAVA implementiert. JAVA eignet sich als Sprache, da sie eine weitreichende und robuste Bibliothek für Internet und Kommunikationstechnik beinhaltet. Zudem ist JAVA plattformunabhängig und benötigt keine zusätzlichen nativen Bibliotheken.

Der Datenserver besteht aus vier Hauptmodulen (vgl. Abbildung 4): Das HTTP Interface stellt die Kommunikationsschnittstelle mit den Softwarekomponenten dar. Die Kommunikation erfolgt implizit bi-direktional, da eine HTTP Anfrage einen Antwort Datensatz legitimiert. Der Simulator erlaubt die Einbindung von virtuellen, simulierten Signalen, die bei der Entwicklung hilfreich sind, wenn eine vollständige Sensorik benötigt wird, aber nicht verfügbar ist. Die 2D Diagramm Visualisierung sowie die 3D Visualisierung werden über grafische Oberflächen abgerufen und entsprechend der Daten, die von Interesse sind, konfiguriert. Das vierte Hauptmodul ist der Daten-

Aggregator, der eine interne, chronologische Liste von Hash Maps beinhaltet, welcher alle Schlüssel-Wert Paare die kommuniziert werden umfasst. Hash Maps eignen sich für die Softwareimplementierung des beschriebenen Datenmodells und sind auch bei einer größeren Anzahl von Signalen effizient und komfortabel zu handhaben. Die interne Hash Map kann auch genutzt werden, um am Ende einer Messung Messreihen in beliebige Datenformate wie das CSV Format oder Datenbank Systeme zu exportieren.

Das Kommunikationsmodul implementiert ein reguläres HTTP Interface und akzeptiert und verarbeitet Anfragen der verschiedenen Softwarekomponenten. Der Server agiert hier wie ein herkömmlicher Webserver, bei dem Client Anfragen zum Datenaustausch verwendet werden. Als Austauschformat wird ein XML Schema verwendet welche das beschriebene Schlüssel-Wert Datenmodell (siehe Abschnitt 3.2.1) implementiert.

```
<?xml version="1.1" encoding="UTF-8"?>
<data>
  <send>
    <signal>
      <name>T_IR_01</name>
      <value>29.5</value>
      <group>ROOM_01</group>
    </signal>
    <signal>
      <name>T_IR_02</name>
      <value>26.3</value>
      <group>ROOM_01</group>
    </signal>
  </send>

  <request>
    <signal>
      <name>T_REF_01</name>
      <group>ROOM_01</group>
    </signal>
    <signal>
      <name>T_REF_02</name>
      <group>ROOM_01</group>
    </signal>
  </request>
</data>
```

```
</request>
</data>
```

Abbildung 6: XML Anfrage von einem Software Client an den Datenserver. Die gesendeten Signale haben den Schlüssel T\_IR\_01 und T\_IR\_02. Die abgefragten Signale haben den Schlüssel T\_REF\_01 und T\_REF\_02 (Metzmacher, Wölki, Schmidt, Frisch, & van Treeck, 2017)

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<data>
  <send>
    <signal>
      <name>T_REF_01</name>
      <value>24.0</value>
      <group>ROOM_01</group>
    </signal>
    <signal>
      <name>T_REF_02</name>
      <value>24.5</value>
      <group>ROOM_01</group>
    </signal>
  </send>
</data>
```

Abbildung 7: XML Antwort vom Datenserver an einen Software Client. Die Signale sind eine Antwort auf die Signale, welche in Abbildung 6 abgefragt wurden. Der Server setzt die entsprechenden aktuellen Werte ein (Metzmacher, Wölki, Schmidt, Frisch, & van Treeck, 2017)

Der Datenserver verfügt zusätzlich über eine interne Datenbank bestehend aus bekannten Signalen, die in einer CSV Datei hinterlegt werden. In dieser Datenbank sind zusätzliche Meta Informationen über die einzelnen Signale gespeichert, die beispielsweise Einheiten, minimale und maximale Werte beinhalten und Bezug auf Regionen in der 3D Visualisierungsumgebung nehmen. Unbekannte Signale, die von Klienten gesendet werden, werden ebenfalls von der internen Daten Hash Map akzeptiert, um einen Verlust von wichtigen Informationen zu vermeiden.

Zusätzlich bietet der Datenserver eine serielle Schnittstelle, sodass Geräte über COM Ports angeschlossen werden können. In der Praxis hat es sich als praktisch erwiesen dies direkt in den Server zu integrieren. Der Datenserver unterstützt serielle Geräte, die ein CSV typisches Format schicken, d.h. mit definierten Spaltenbegrenzungen. Serielle Geräte sind einer COM Port Gruppe zugeordnet die wiederum beschreibt, welche Spalte auf welchen Signalschlüssel zeigt. Die entsprechenden Angaben sind ebenfalls als Meta Informationen in der Signaldatenbank hinterlegt.

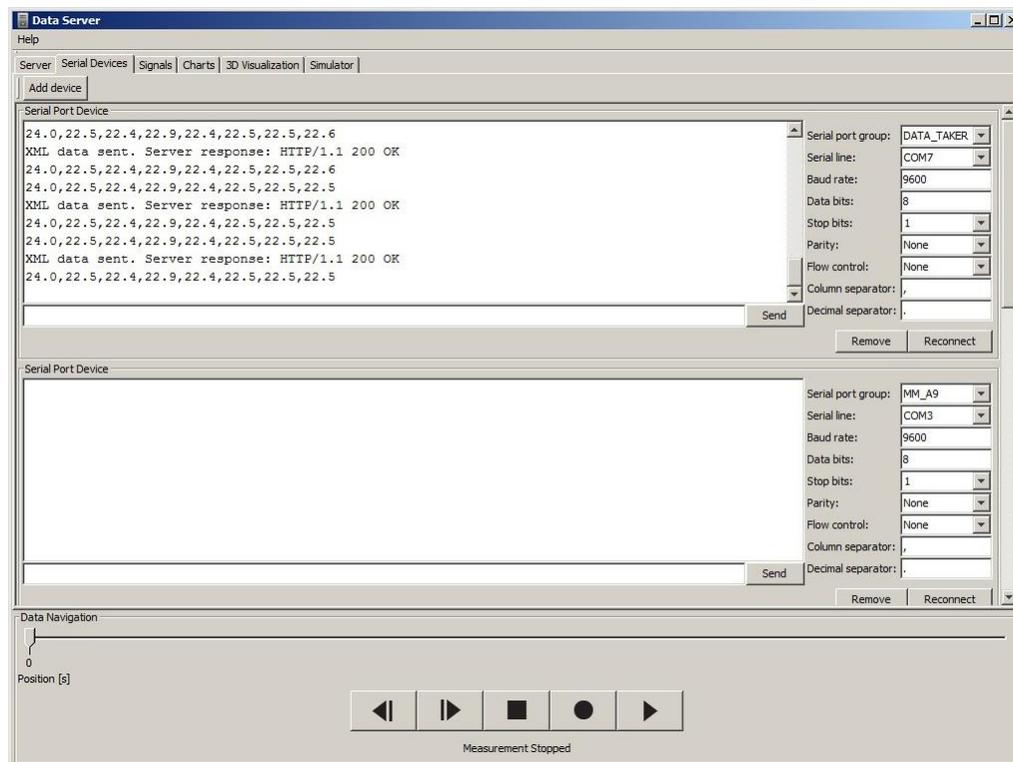


Abbildung 8: Die Nutzeroberfläche für die serielle Kommunikation. Serielle Geräte können nach Belieben hinzugefügt und konfiguriert werden. Der Nutzer kann COM Ports entsprechenden Serial Device Gruppen zuordnen und COM Port spezifische Parametern Spalten Begrenzungen und Dezimaltrennzeichen definieren (Metzmacher, Wölki, Schmidt, Frisch, & van Treeck, 2017)

### 3.2.3 Datenserver Konfiguration

Die Datenserverkonfiguration ist aufgeteilt in eine global genutzte INI Datei, welche grundlegende Serverkonstanten speichert sowie eine global genutzte CSV Datei, welche

Signal und Sensordaten speichert. Die INI Datei speichert Netzwerkkonfigurationen wie Host und Port sowie UI Parameter. Die CSV Datei speichert bekannte Sensorsignale und beliebig nutzbare Metadaten (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Spalten der CSV Konfigurationsdatei für bekannte Signale im Datenserver.

<b>CSV Feld</b>	<b>Beschreibung</b>
name	Name des Signals
display_name	Angezeigter Name des Signals
type	Typ des Signals (z.B. Typ des Sensors)
signal_group	Signalgruppe (z.B. ein bestimmter Raum oder Position im Fahrzeug)
serial_port_group	Jedes Signal kann einer Gruppe der seriellen Schnittstelle zugeordnet sein welche wiederum einen variablen COM Port hat
serial_port_index	Der Index in der Gruppe der seriellen Schnittstelle. Ist das serielle Format CSV beschreibt dieser die Position der CSV Spalte. Ein Logger muss dementsprechend konfiguriert werden.
zhang_segment	Segment in der Zhang Zuordnung.
zhang_segment_name	Name des Signals in der Zhang Zuordnung.
nilsson_segment	Segment in der Nilsson Zuordnung.
nilsson_segment_name	Name des Signals in der Nilsson Zuordnung.
iso14505_segment_name	Name des Segment basierend auf ISO14505
mesh_name	Name des Meshes in der 3D Visualisierung. Die Daten des Signals werden mit der eingestellten Falschfarbenskala auf das Mesh aufgebracht.
unit	Einheit des Signals.
min	Minimum Wert des Signals.
max	Maximum Wert des Signals.
can_message_id	ID einer zugeordnet CAN Nachricht auf dem CAN Bus.

can_message_name	Name einer zugeordneten CAN Nachricht.
------------------	--

### 3.2.4 Datenserver Interne Berechnungsmodelle

Die Architektur des Datenservers erlaubt es interne Modellklassen zu erstellen, welche Zugriff auf die Daten Hash Map haben und diese mit eigenen Werten augmentieren können. Diese Werte werden mithilfe von XML Requests abgerufen und ebenfalls in die persistente Datenspeicherung, zum Beispiel in der CSV Ausgabe, mit eingeschlossen. Ebenfalls haben die Modellklassen Zugriff auf die Liste von Daten Hash Maps, in der vorangegangene Messwerte gespeichert sind.

Die Modellklassen sind jeweils als Empfänger von Messdaten implementiert, welche je Messintervall benachrichtigt werden. Die Schnittstelle ist leicht erweiterbar und wird für wenig rechenintensive Umformungen von Messwerten genutzt, z.B. Umformungen, die auf einer statistischen Grundlage beruhen und keine komplexen Iterationen benötigen.

Für Simulationen oder komplexere Analysen der gemessenen Daten werden numerische Modelle wie Softwarekomponenten an den Datenserver angeknüpft und tauschen über das Datenformat relevante Werte mit ihm aus. Da die Kommunikation auch hier implizit bi-direktional ist, werden im Modell errechnete Werte wieder zurück an den Datenserver geschickt und hier visualisiert. Ebenso ist es möglich CAN fähige Signale an den Datenserver zu schicken, welche an die CAN Software weitergeleitet werden, sodass ein Modell CAN Steuergeräte direkt ansprechen kann.

### 3.2.5 MORPHEUS Thermophysiologiemodell

Das am Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen entwickelte numerische Menschmodell, MORPHEUS (Morphable Human Energy Simulator) (Wölki, 2017), wurde im Rahmen des Projekts EneffThermControl verwendet, um den individuellen thermischen Zustand eines Fahrzeuginsassen virtuell abbilden zu können. Basierend auf diesen mit MORPHEUS generierten Prognosen erfolgt eine Bewertung der zugehörigen thermischen Behaglichkeit des entsprechenden Individuums. MORPHEUS selbst ist in der akausalen

Programmiersprache Modelica entwickelt und wurde in Kombination mit der Simulationsumgebung Dymola implementiert. Für die Anbindung an den entwickelten Datenserver sowie zur Fusionierung mit dem Thermografiesystem, welches zur messtechnischen Bewertung des thermischen Komforts einer realen Person verwendet wurde, ist das gesamte Modell als sogenannte Functional Mockup Unit (FMU) exportiert worden. Vor dem Export wurde die entsprechende FMU speziell für Co-Simulationsanwendungen konfiguriert (Andersson, Åkesson, & Führer, 2016).

MORPHEUS kombiniert dabei das mathematische Basismodell von (Fiala, Lomas, & Stohrer, 1999) mit Ansätzen von (Tanabe, Kobayashi, Nakano, Ozeki, & Konishi, 2002) und bildet instationäre Wärme-/Feuchteauschprozesse des menschlichen Körpers mit dessen Umgebung ab. Der anatomische Teil des menschlichen Körpers wird dabei mithilfe von 18 zylindrischen Elementen (Arme, Hände, Beine etc.) sowie einer Halbkugel für den Kopf mathematisch approximiert. Jedes zylindrische Element ist in mehrere sogenannte Sektoren unterteilt, die den Einsatz des Modells in asymmetrischen Umgebungsszenarien ermöglicht. Die zugehörigen Körpersegmente (Arm, Beine, Kopf, etc.) sind weiterhin aus einer Kombination von sieben numerisch approximierten Gewebematerialien (Knochen, Muskeln, Fett, Haut, Lunge, Gehirn und Blutgefäße) aufgebaut und mit einem zentralen Blutreservoir verbunden, welches den Wärmeaustausch zwischen den verschiedenen Segmenten/Sektoren nachbildet.

Ein Blutflussmodell implementiert den Wärmeaustausch zwischen arteriellen und venösen Blutströmen (Extremitäten und Schulter) basierend auf dem Gegenstromprinzip, sodass eine realistische Abbildung des Abkühlvorgangs des arteriellen Blutstroms sowie der Erwärmung des venösen Blutstroms in den einzelnen Gewebeschichten erreicht werden. Der Wärmeaustausch zwischen MORPHEUS und dessen Umgebung basiert auf Konvektion, Strahlung, Verdunstung und Atmung. Es berücksichtigt weiterhin trockene und feuchte Wärmeverluste durch Bekleidungsmaterialien für jeden Sektor des simulierten Körpers. Die aktiven Thermoregulationsmechanismen, welche die Reaktionen des zentralen Nervensystems eines Menschen nachbilden, sind in einem Aktiven System (AS) modelliert. Letzteres ist das Ergebnis Multi-linearer Regressionen, welche die vier Thermoregulationsmechanismen Schwitzen, Zittern, Vasodilatation und Vasokonstriktion

eines Menschen nachbilden. Sie schützen den Körper allgemein vor Hypo-/Hyperthermie. Abbildung 9 zeigt eine Übersicht über die einzelnen Modellkomponenten von MORPHEUS.

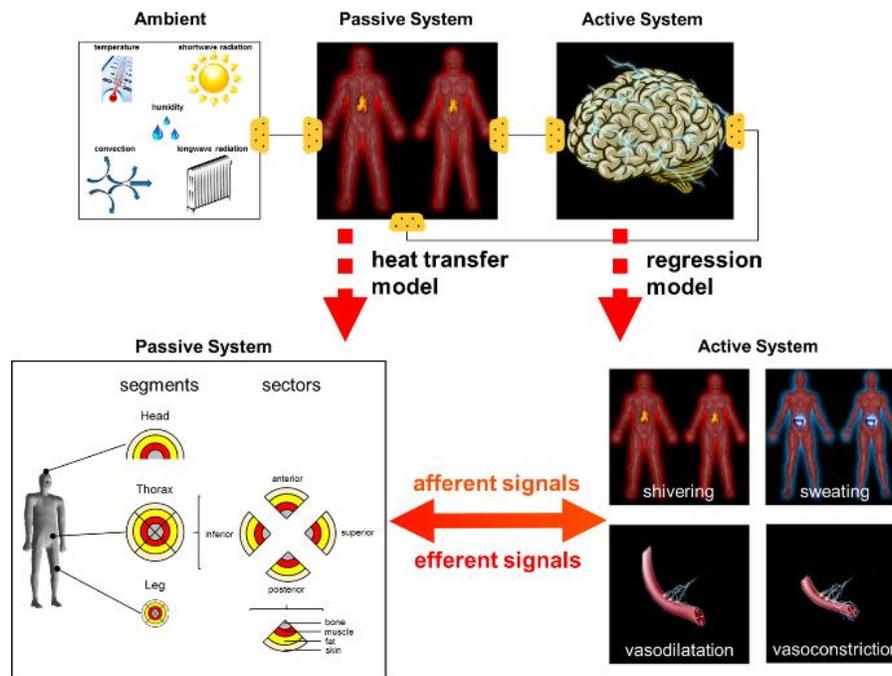


Abbildung 9: Modellierungsschema des numerischen Menschmodells, MORPHEUS (Wölki, 2017)

Die Erprobung von MORPHEUS im Rahmen von EneffThermControl zeigt, dass das Modell eine robuste numerische Methode darstellt, um fehlende Sensorinformationen im Gesamtkonzept zu ergänzen. Hierdurch kann ein vollständigeres Bild vom thermischen Zustand eines Individuums erzielt werden. Notwendige Umgebungsparameter wurden mit Hilfe messtechnischer Methoden erfasst (siehe Abschnitt 5.1.1). Der Einsatz von Co-Simulation erlaubt die Annäherung menschlicher Hautoberflächentemperaturen und körperinterner Wärmeaustauschprozesse, welche zur vollständigen Beurteilung des thermischen Komforts genutzt werden.

Zusätzlich können mit MORPHEUS Äquivalenttemperaturen abgeleitet werden, welche zusätzlich mit einer Klimamessereinrichtung nach ISO14505 gemessen werden können (siehe Abschnitt 5.1.2). Die Gleichung zur Bestimmung der Äquivalenttemperatur  $T_{eq}$  [°C]

wurde hierzu um den lokalen evaporativen Wärmeverlust  $q_e \left[ \frac{W}{m^2} \right]$  erweitert, welcher durch MORPHEUS berechnet wird. Die zugehörige Gleichung lautet wie folgt:

$$T_{eq} = T_{sf} - \frac{q_c + q_r + q_e}{h_{c,mix} + h_r}$$

Für die Berechnungen in MORPHEUS wurden die lokalen Oberflächentemperaturen  $T_{sf} [^{\circ}C]$  gleich den lokal berechneten Hautoberflächentemperaturen  $T_{sk} [^{\circ}C]$  der Körpersegmente gesetzt. Letztere sind das Ergebnis der Co-Simulation unter Verwendung der in Echtzeit gemessenen Umgebungsbedingungen sind. Um körperteilspezifische Komfortbewertungen wie das in EneffThermControl verwendete Lokale Mittlere Votum (LMV) zu erhalten, wurde weiterhin die Oberflächentemperatur  $T_{sf}$  in obiger Gleichung für jedes Körpersegment eines realen Menschen durch die mit Hilfe des eingesetzten Thermografiekamerasystems gemessene Hautoberflächentemperatur  $T_{IR}$  ersetzt. Die lokalen Wärmeströme der Körpersegmente sowie die resultierende Wärmeübertragungskoeffizienten wurden ebenfalls mit Hilfe von MORPHEUS berechnet und als Grundlage für die Berechnung der  $T_{eq}$  verwendet.

### 3.2.6 Fahrzeug CAN Bus Software

Für das Abrufen und Ansteuern von Komponenten im Fahrzeug wird in vielen Fällen das CAN (Controller Area Network) Bus Protokoll verwendet. Für die Ansteuerung des CAN Bus ist entsprechende Hardware notwendig, die die Anbindung über eine herkömmliche USB-Schnittstelle ermöglicht. Im Zuge des EneffThermControl Projektes wurden hierfür die Übersetzermodule der Firma Vector Informatik verwendet (vgl. Abbildung 10).



Abbildung 10: CAN zu USB Adapter der Firma Vector Informatik

Für die Ansteuerung der entsprechenden Geräte sind verschiedene Softwarepakete vorhanden. Gleichzeitig war es wichtig, dass für das in diesem Projekt entworfene Gesamtsystem eine Anbindung an den Datenserver möglich ist. Eine Voraussetzung hierfür ist die Einbindung der CAN Software als HTTP Client an den Server. Für diesen Zweck wurde eine eigenständige Softwarekomponente geschrieben, welche die Vector Informatik Treiberbibliothek Vector XL nutzt, um den binären Datenfluss abzurufen. Die Software liest sogenannte DBC Datenbanken ein, welche die Signale auf dem CAN Bus dekodiert und einzelne CAN Signale mit Namen versieht, welche äquivalent zu den Signalen des Datenservers sind. Das Lesen des CAN Bus erfolgt in einem separaten Thread, der die CAN Datenpakete abrufen und die entsprechenden Werte aus der binären Kodierung ausliest. Dieser Thread leitet die extrahierten Daten an den Hauptthread weiter, welcher gleichzeitig die Benutzeroberfläche steuert (vgl. Abbildung 11). Der Nutzer kann die Signalhierarchie einsehen in der jedes Signal mit dem entsprechenden aktuellen Wert angezeigt wird. Dabei beinhaltet eine CAN Nachricht jeweils vier CAN Signale, welche in einer Baumstruktur dargestellt werden.

Im nächsten Schritt werden die extrahierten Daten an einen Netzwerkthread weitergeleitet, der diese in das Datenserver XML Format überführt und dann als HTTP Request an den Datenserver schickt. Die Namen der CAN Signale in der DBC Datenbank und in der Datenserver Konfiguration sind dabei identisch, was die Übertragung unkompliziert gestaltet. Es ist weiterhin möglich CAN fähige Signale vom Datenserver zu erfragen, um diese direkt wieder auf den CAN Bus zu schicken. Dies wird genutzt um u.a.

die automatischen ansteuerbaren Luftauslassdüsen in der algorithmischen Klimasteuerung anzusprechen. An dieser Stelle ist anzumerken, dass die Ansteuerung des CAN Bus demnach als „Pull“ Methode implementiert ist, um das Kommunikationsmodell einfach und konsistent zu halten. Das heißt, dass CAN Signale zur Ansteuerung von Akteuren im Fahrzeug vorher bekannt sein müssen und in einer separaten CAN DBC Datei vermerkt sind.

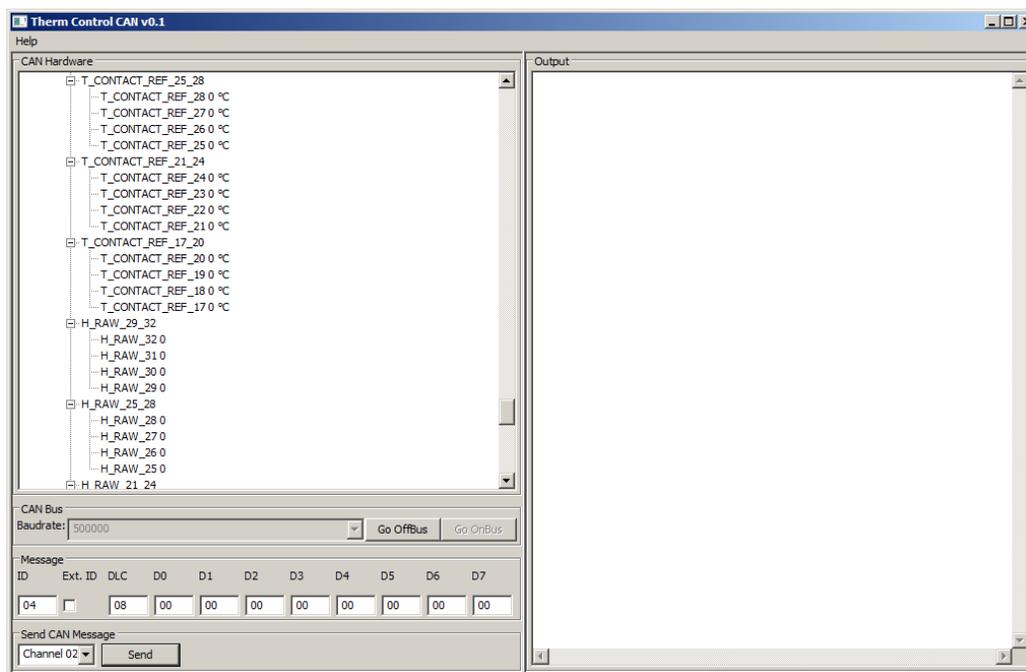


Abbildung 11: Oberfläche der CAN Bus Software, welche den CAN Bus an den Datenserver anbindet (Metzmacher, Wölki, Schmidt, Frisch, & van Treeck, 2017)

### 3.3 Untersuchung von psychologischen Wechselwirkungen

Die Untersuchung psychologischer Wechselwirkungen wird durch eine Android basierte Tablet-Anwendung (siehe Abschnitt 3.2) realisiert, die es Fahrzeuginsassen ermöglicht eine subjektive Einschätzung ihres aktuellen thermischen Komfortempfindens abzugeben und an das System zu schicken. Die Anwendung agiert dabei als Client des Datenservers wie die anderen Softwarekomponenten, sodass subjektive Daten genau wie Sensordaten in Echtzeit zur Verfügung stehen und verwertet werden können.

### 3.4 Klima- und Behaglichkeitssensoren

Klima- und Bekleidungssensoren wurden in diesem Projekt von der Firma Vereta konzipiert und hergestellt. Die Firma Vereta hat sich bei der anfänglichen Recherche insbesondere an den nationalen und internationalen aktuellen Entwicklungsstand, innovativen Technologien und neuesten Patentenveröffentlichungen orientiert. Dadurch hat Vereta für das Projekt den notwendigen und aktuellsten Wissensniveaus der nationale und internationale Entwicklungsstand in diesem Bereich erreicht.

Nach gemeinsamer Feststellung mit den Projektpartnern von situationsgerechten Anforderungen zur Klimatisierung im E-Fahrzeug, notwendiges Bussystem und die Softwareschnittstellen hat Vereta mit der Entwicklung von Sensorsystemen begonnen.

Eine große Herausforderung war die Entwicklung eines Sensorkonzeptes, welches den Sensoren eine reversierte Steuerung, verlustfreie Daten-Erfassung und -Transfer beinhaltet. Weiterhin hat diese konzeptionelle Lösung die Aufgabe, eine systematische Korrelation zwischen zwei dynamischen Systemen wie Mensch und seiner nächsten Umgebung (Klimafaktoren) zu erfassen. Die aus dieser Korrelation abgeleiteten Daten sollten als Basis für die Regelungsvorgänge einer Behaglichkeitssteuerung dienen. Ein wichtiger Aspekt bestand zudem darin, das Verfahren in Anlehnung an DIN EN ISO 14505-2 (ISO 14505-2, 2004) „Bestimmung der Äquivalenttemperatur“ zu nutzen und durch neue Sensoren direkt und indirekt zu referenzieren.

Um die Daten-Effektivität und deren nützlichen Informationsbestand nicht zu verlieren, sind die direkten Subjekt-Kontakt-Verfahren für die neuen Sensoren als Subjekt-Reaktion-Erfasser ausgewählt worden.

Als eine Grundlage für die Entwicklung neuartiger Kontakttemperatursensoren zur Untersuchung des trockenen und feuchten Wärmeaustauschs zwischen Mensch und Sitzoberflächen wurde die Dünnschichtsensoren-Technologie angewendet. Die Vereta Sensoren erfassen integriert Umgebung-, bzw. Kontakt-Temperatur und die Kontakt-Feuchte. Eine besondere Anfertigung der NiAu-Kontaktfolie (Ni.>1,5mkm, Au\_>0,03mkm) gewährleistet eine stabile und zuverlässige Funktionalität des Sensors (vgl. Abbildung 12

und Abbildung 13). Das zweite Teil besteht aus einer programmierbaren elektronischen Einheit in einer Miniatur-Ausführung. Diese Lösung bringt die „physikalische Intelligenz“ und höchste Flexibilität bei der Daten-Erfassung bzw. Bearbeitung. Weiterhin ermöglicht die mechanische Flexibilität des Sensors eine Platzierung direkt am menschlichen Körper, im Autositz oder auf dem Autolenkrad.

Gleichzeitig wurde auch ein Konzept zur Echtzeit-Kalibrierung im Zusammenhang mit einer IR-Kamera im E-Fahrzeug entwickelt. Das Konzept basiert auf einer „intelligenten“ Elektronik und flexiblen Programmierung des Auswertungsprozessors.

Nach einem Vergleich von bekannten Produktionsverfahren und verfügbaren Bereitstellungsmöglichkeiten wurden die neuartigen Kontakttemperatursensoren hergestellt. Es wurde die entsprechende Sensor-Elektronik-Software für die Untersuchung des trockenen und feuchten Wärmeaustauschs zwischen Mensch und Sitzoberfläche und Mensch und Lenkrad entwickelt. U.a. wird durch Sensorfusion eine Auswertung und Verarbeitung von Sensorinformationen erreicht. Durch Datenintegration wurde eine Korrelation zwischen Sensor-Signal und lokaler Klimawirkung definiert. Die Voraussetzungen für die regeltechnische Ansteuerung des Klimatisierungssystem wurden dadurch erstellt.

Weiterhin wurden die Kalibriersensoren incl. der notwendigen Software zur Echtzeit-Kalibrierung einer IR-Kamera im Mockup entwickelt und bereitgestellt (vgl. Abbildung 16). Ferner wurde auch eine zentrale Sensoren-Gate-Einrichtung konzipiert, entwickelt, programmiert und bereitgestellt. Dieses Gate hat eine Verwaltungsaufgabe für den Sensoren-Datenfluss und die Koordination übernommen. Die notwendige Schnittstelle für die Datenvorbereitung und die Weiterleitung wurde entsprechend ins Gate implementiert (vgl. Abbildung 17).

### **3.4.1 Sitzsensor**

Um die mechanische Flexibilität zu gewährleisten, wurde ein biegsamer Sensorträger auf der Basis von Polyimid ausgewählt. Der entwickelte mehrschichtige Sensor (vgl.

Abbildung 12) hat ein Maß von 62 mm x 271 mm und stellt eine Personen-Kontakt-Fläche von 53 mm x 43 mm für die Erfassung von informativen integrierten Parametern des menschlichen Zustandes dar. Die mehrschichtige Sensorstruktur gewährleistet die notwendige mechanische Robustheit mit dem gleichzeitigen Schutz der elektrischen Leitungen und der anderen Bestandteile des Sensors (vgl. Abbildung 12).

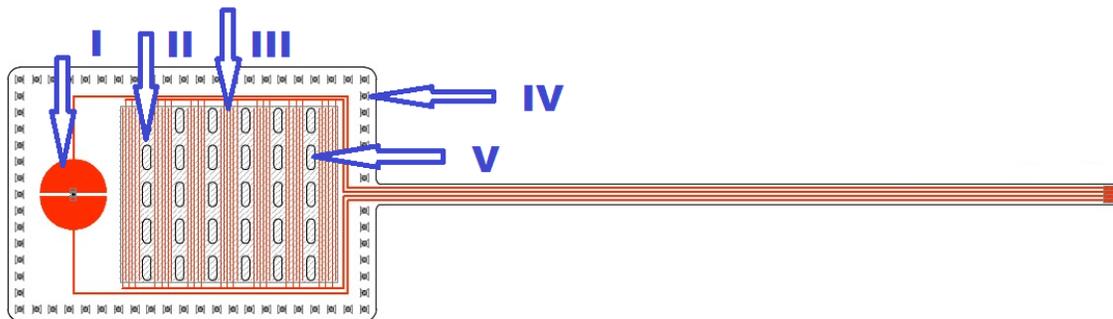


Abbildung 12: Schematische Zeichnung eines Sitzsensors

Die Kammstruktur (Abbildung 12 - Abbildung 14) des Sitz-Sensors wurde nach den effektivitätsbasierten Vergleichsmessungen von den diversen Aufbauten in einer Form wie in Abbildung 12 dargestellt entwickelt. Diese stellt eine Reihe von an zwei Seiten ineinander geführten Kammzahn-Strukturen dar. Die effektivste Breite von einem einzelnen Kammzahn beträgt 0,3 mm. Der effektivste Abstand zwischen zwei benachbarten Kammzähnen beträgt 0,5 mm.

Um die Umgebungs-/Kontakttemperatur zu messen ist die Temperatur-Messstelle als „geschnittene“ Kreisfläche mit einem Durchmesser von 16 mm (I in Abbildung 12) realisiert worden. Zur Vermeidung der Bildung einer thermischen- bzw. Fluss-Barriere durch den Sensor selbst, wurde der Sensor-Träger mit Perforationsöffnungen (V in Abbildung 12) versehen. Jeder der sechs Kammerzahnreihen wurde eine Perforationsreihe (II in Abbildung 12) mit je 5 Öffnungen (1,9 mm x 5,9 mm) zugewiesen. Am Perimeter jedes Sensors wurde eine ununterbrochene Reihe von Öffnungen mit einem Durchmesser von 1 mm eingearbeitet.

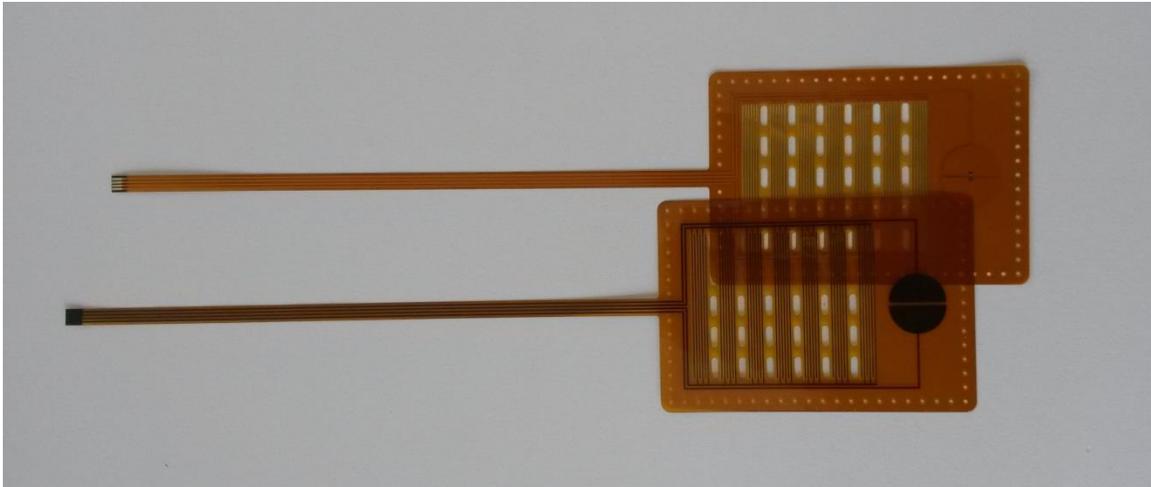


Abbildung 13: Foto der Sitzsensoren

Der Sensoraufbau setzt sich aus folgenden Bestandteilen zusammen:

- Abdeckfolien Epoxid-PI (20/25)
- Polyimid (25 mkm)
- NiAu (Ni.>1,5 mkm, Au\_>0,03 mkm)
- Leitmaterial Cu (80 mkm) – 1 Lage
- Klebeschichten

Die Signalerfassung und primäre Bearbeitung wurde durch einen leistungsfähigen Harvard-Architektur M8C Prozessor (24 MHz) durchgeführt. Die dafür entwickelten Algorithmen und die Software ermöglichen nicht nur die Datenverarbeitung, sondern auch deren Transfer zum Sensor Gate (siehe Abschnitt 3.4.4) nach einem vordefinierten Übertragungsprotokoll. Als Kommunikationsschnittstelle beinhaltet jeder Sensor ein RS485 Interface.

Um die relative Änderung des thermischen Zustands einer Person zu erfassen, wurde die Kalibrierung in einem digitalen Bereich von 0 (trocken) bis 10.000 Digits (100% relative Feuchte) festgelegt. Damit lässt sich zum einen der „Comfort- Point“ definieren und des Weiteren kann der „Comfort- Point“ entsprechende relative Änderungen erfassen und weiterleiten.

Spezifikation:

- NiAu-Kontaktfolie (Ni.>1,5 mkm, Au\_>0,03 mkm)
- Anfertigung nach besonderer Dünnschichttechnologie

- Mehrschichten Verfahren
- Signal Erfassung und Verarbeitung auf der Basis von M8C (24MHz) Prozessor
- RS485-Bus Schnittstelle

### 3.4.2 Lenkradsensor

Die Lenkradsensoren sind einem anderen bzw. einem intensiveren Umgebungseinfluss als die Sitzsensoren ausgesetzt. Der am Lenkrad zu Verfügung stehende Platz ist ebenfalls sehr begrenzt. Dementsprechend sind die Lenkradsensoren kleiner (62 mm x 181 mm) als die Sitzsensoren (vgl. Abbildung 14). Eine Personen-Kontaktfläche beträgt 32 x 36 mm. Die Temperatur-Messtabelle wurde wie bei dem Sitzsensor als eine „geschnittene“ Kreisfläche von 16 mm Durchmesser realisiert.

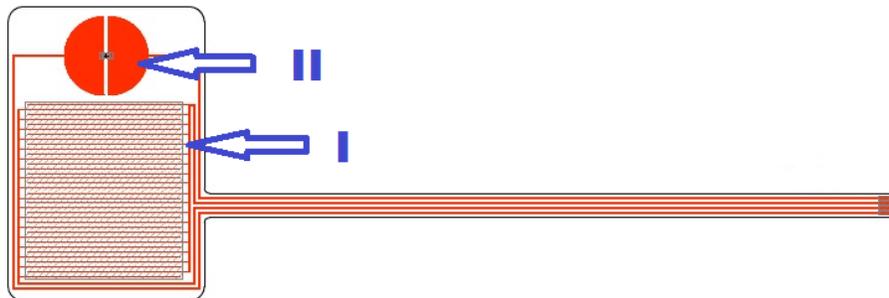


Abbildung 14: Schematische Zeichnung eines Lenkradsensors

Die effektivste Breite von einem einzelnen Kammzahn beträgt 0,3 mm. Der Abstand zwischen zwei benachbarten Kammzähnen wurde vergrößert bis zu 0,7 mm. Dadurch wurde die Sensorempfindlichkeit auf die Empfindlichkeit vom Sitzsensor abgestimmt.

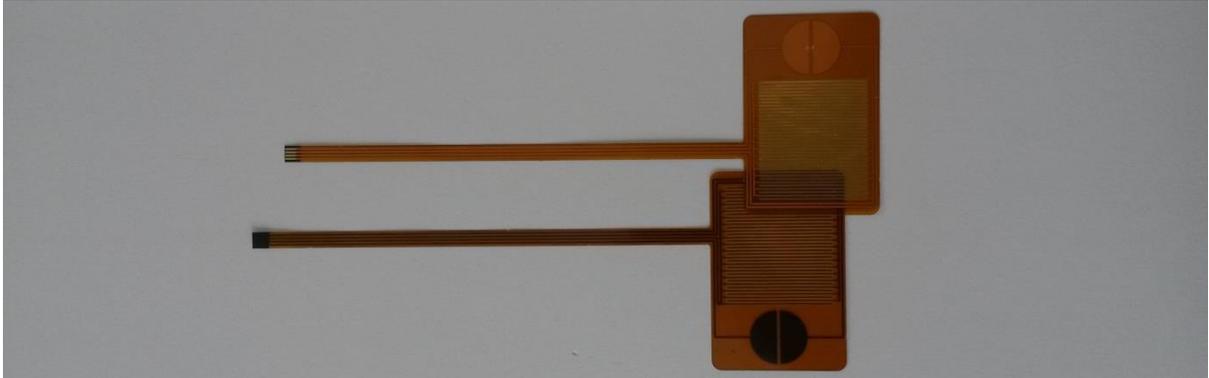


Abbildung 15: Lenkradsensoren Übersicht

Die Aufbau-Bestandteile:

- Abdeckfolien Epoxid-PI (20/25)
- Polyimid (25 mkm)
- NiAu (Ni.>1,5 mkm, Au\_>0,03 mkm)
- Leitmaterial Cu (80 mkm) – 2 Lagen
- Kleberschichten

Die Signalerfassung und primäre Bearbeitung wurde durch einen M8C Prozessor (24 MHz) realisiert. Als Kommunikationsschnittstelle beinhaltet der Sensor ein RS485 Interface. Durch die Kalibrierung wurde ein digitaler Bereich von 0 (trocken) bis 10.000 Digits (100% relative Feuchte) festgelegt.

Spezifikation:

- NiAu-Kontaktfolie (Ni.>1,5mkm, Au\_>0,03mkm)
- Anfertigung nach besonderer Dünnschichttechnologie
- Mehrschichten Verfahren
- Signal Erfassung und Verarbeitung auf der Basis von M8C (24MHz) Prozessor
- RS485-Bus Schnittstelle

### 3.4.3 Kalibriersensor zur Echtzeit-Kalibrierung einer IR-Kamera

Der Sensor ist als Referenzfläche mit einem 33 mm Querschnitt realisiert (vgl. Abbildung 16). Die spezielle Segment-Aufteilung (3 + 2/8 bzw. 3x90° + 2x45°) und Lackierung (Abbildung 16 I) gewährleistet die Voraussetzungen für die Darstellung von notwendigen Referenzdaten für die Echtzeit-Kalibrierung einer IR-Kamera.

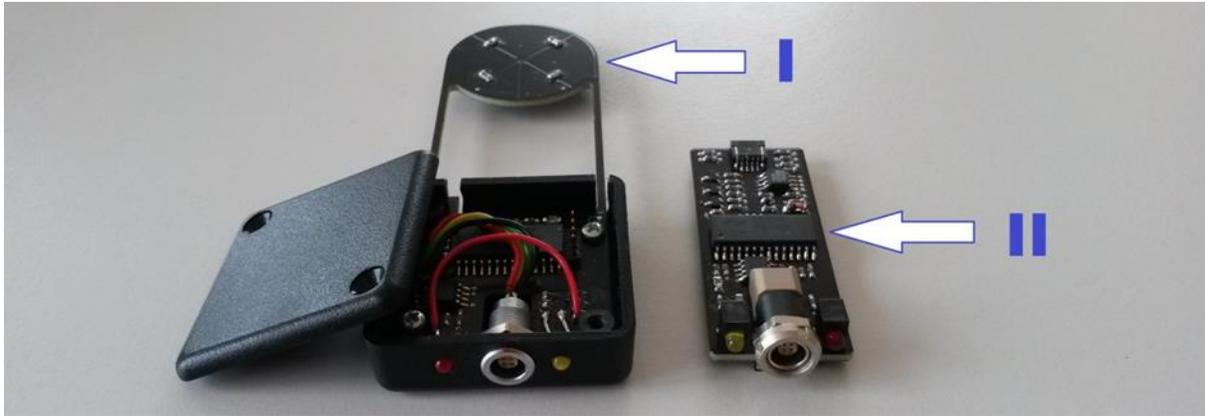


Abbildung 16: Kalibriersensor

Die Signalerfassung der Referenzfläche und einem ausgesetzten Referenztemperatursensor wurde mithilfe eines M8C Prozessors (24 MHz) durchgeführt (Abbildung 16 I - II). Durch eine Kommunikationsschnittstelle (RS485) mit einem dafür entwickelten Datenprotokoll wurde die Referenzinformation zum Gate für die Weiterentwicklung übermittelt.

Spezifikation:

- Temperaturbereich  $-50\text{ °C}$  bis  $+130\text{ °C}$
- Temperaturkoeffizient  $TK = 3850\text{ ppm/K}$
- Toleranz  $R0: \pm 0,12\%$
- Messstrom  $0,1$  bis  $0,3\text{ mA}$
- Signal Erfassung und Verarbeitung auf der Basis von M8C (24MHz) Prozessor
- RS485-Bus Schnittstelle

### 3.4.4 Sensor Gate

Das entwickelte Sensor Gate (vgl. Abbildung 17) besitzt Anschlüsse für 16 Sensoren und verwaltet den Datentransfer sowie die Spannungsversorgung aller angeschlossenen Sensoren. Weiterhin ermöglicht das Gate eine verlustfreie Datenweiterleitung an eine PC-Schnittstelle. Das Gate beinhaltet 16 normale Anschlüsse, einen Service und einen erweiterten Anschluss. Eine duale Prozessor-Lösung gewährleistet eine unabhängige Kommunikation bzw. Steuerung von unterschiedlichen Typen von Sensoren. Zusätzlich

bietet das Sensor Gate eine CAN Schnittstelle zu der alle Sensordaten weitergeleitet werden.



Abbildung 17: Sensoren-Gate

Die Multiprozessor-Lösung des Sensor Gates basiert wiederum auf M8C Prozessoren (24 MHz). Die zahlreichen ICs unterstützen die Prozessoren bei einem sicheren Datenempfang, der Weiterverarbeitung und dem weiteren Versand zu definierten Empfängern.

Mehrere Systemeinsbauten und zahlreiche Tests wurden mit effizienter Anpassung der zugrundeliegenden Sensorelektronik, Softwareänderung und wirksamen Konzeptionierung von Vereta durchgeführt bzw. begleitet. Die integrierte Konzeptionierung der gesamten Regelungsstrategien zur effizienten Fahrzeugklimatisierung wurde auf eine Basis von den Zwischenergebnissen weiter sequenziell verfeinert und erweiterte Bestandteile und Funktionalitäten definiert. Die Referenztemperatursensoren zur Echtzeit-Kalibrierung des IR-Kamerasystems, die Gate-Einrichtung und das Systemprogramm wurden entsprechend der ausgewerteten Testergebnisse und der daraus folgenden Anforderungen weiterentwickelt und

bereitgestellt. Es wurden alle Hardware-Voraussetzungen für die Anbindung des Gesamtsystems an das Bussystem entwickelt, programmiert und für das EneffThermControl Projekt bereitgestellt.

Spezifikation:

- Anschlüsse für 16 Sensoren
- Multiprozessor-System (M8C - 24MHz)
- Basis - RS485-Bus/-Schnittstelle
- Eigenes spezifisches Protokoll
- Universale Anschlüsse an VBus und PC
- Stromversorgung 12V (extern)
- Service Anschluss

### **3.5 Erfassung und bildtechnische Verarbeitung der Infrarotsignatur**

Die Erkennung der Infrarotsignatur sowie eine gezielte Zuordnung lokaler, thermischer Behaglichkeitsinformation des Fahrzeuginsassen waren ein Kernaspekt des EneffThermControl Projektes. Bilderkennungsalgorithmen werden genutzt, um Körperregionen des Insassen zu verfolgen und entsprechende lokale Temperaturen kontaktfrei zu messen. Die Bilderkennung in dem System wird in Gesichtserkennung und Haltungserkennung aufgeteilt. Die Gesichtserkennung wird verwendet, um die Position und Proportionen des Gesichts zu erkennen. Einzelne Regionen des Gesichtes werden identifiziert und unabhängig von den Gesichtsproportionen verfolgt. Die Erkennung der Körperhaltung wird angewandt, um den gesamten Körper des Menschen zu verfolgen. Ähnlich der Gesichtserkennung werden verschiedene Körperregionen identifiziert und verfolgt. Beide Tracking Verfahren werden zur kontaktlosen Erfassung der Oberflächentemperaturen genutzt.

Hochauflösende Infrarotkameras ermöglichen zwar eine exakte Bilderkennung, sind allerdings extrem kostenintensiv. Aus diesem Grund sind sie für die praktische Anwendung zur Erkennung von thermischer Behaglichkeit in Fahrzeugen eher nicht geeignet. Für dieses Projekt wurde deshalb ein System mit zwei verschiedenen Kamerasystemen verwendet, die jeweils für die Erkennung der Infrarotsignatur und der

Gesichts und Posen Erkennung zuständig sind. Diese Trennung ermöglicht es, die bildtechnische Verfolgung des Insassen unabhängig von der Qualität und Auflösung der Infrarotsensorik zu halten. Demnach ist es sogar möglich, die in diesem Projekt verwendete Infrarotkamera durch niedrig auflösende Infrarotsensor-Arrays zu ersetzen. Ein weiterer Vorteil eines solchen Systems mit zwei unabhängigen Kameras ist, dass für die Erkennung des Menschen Bildinformationen im Nah-Infrarotbereich verwendet werden können, die das Verfolgen von Gesicht und Körper temperaturunabhängig macht. Die Erkennungsalgorithmik kann entsprechend der erforderlichen Domäne angepasst werden. Ist zum Beispiel nur der Oberkörper des Menschen in sitzender Position zu verfolgen, lässt sich die Datengrundlage des Algorithmus entsprechend anpassen und parametrisieren. Abbildung 18 zeigt die Gesichtserkennung mit entsprechenden Markierungen in der thermischen Domäne. Abbildung 19 zeigt den Oberkörper eines Probanden mit Markierungen und extrahierter Pose in der thermischen Domäne. Abbildung 20 zeigt die Gesichtserkennung in der Tiefendomäne und Abbildung 21 in der Farbdomäne (Metzmacher, Wölki, Schmidt, Frisch, & van Treeck, 2017).

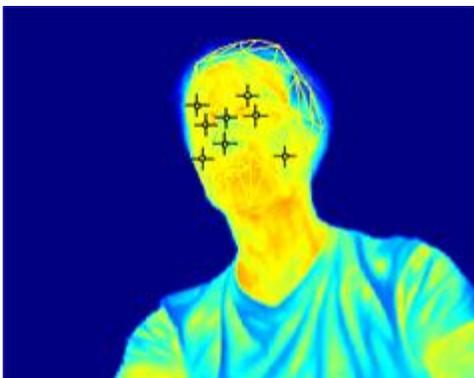


Abbildung 18: Gesicht in der thermischen Domäne

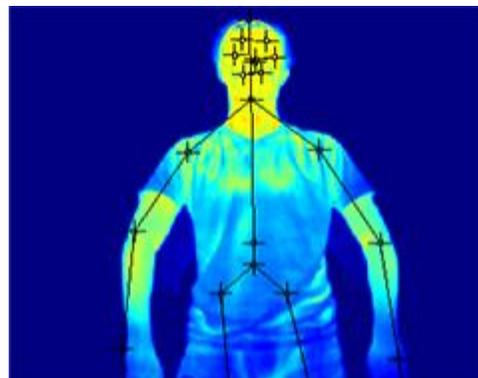


Abbildung 19: Oberkörper in der thermischen Domäne



Abbildung 20: Gesichtserkennung in der Tiefendomäne

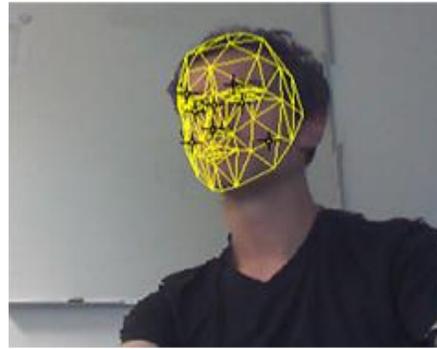


Abbildung 21: Gesichtserkennung in der Farbdomäne

### 3.5.1 Bilderkennungssoftware und Bildakquise

Akquise und Verarbeitung von bildtechnischen Informationen werden von einer separaten Softwarekomponente behandelt, welche die vorbereiteten Daten an den Datenserver transferiert. Die Software ist in der Programmiersprache C++ implementiert, da ein direkter Treiberzugriff auf die Kamerahardware erforderlich ist. Die Software arbeitet mit mehreren parallel laufenden Threads, da zwei verschiedene Kamerasysteme gleichzeitig angesprochen werden. In dem prototypischen Aufbau welcher in diesem Projekt verwendet wurde, wurde das Microsoft Kinect System als Sensor für Gesichts- und Haltungserkennung verwendet. Die Infrarotsignatur wird mithilfe einer Thermografiekamera mit ungekühltem Mikrobolometer-Detektor mit 320 x 256 Bildpixeln erfasst, welche die Firma InfraTec zur Verfügung stellte.

Die Microsoft Kinect Plattform erzeugt Tiefenbilder der IR-Signatur, die von den Erkennungsalgorithmen verwendet werden. Hierzu wird ein Referenzmuster im Nah-Infrarotbereich in den Raum projiziert und von einem Nah-Infrarot Sensor aufgenommen. Das erfasste Abbild des projizierten Musters wird in ein Tiefenbild umgerechnet, welches als Pixelmatrix aus relativen Tiefenwerten besteht (vgl. Abbildung 22 und Abbildung 23) (Metzmacher, Wölki, Schmidt, Frisch, & van Treeck, 2017).

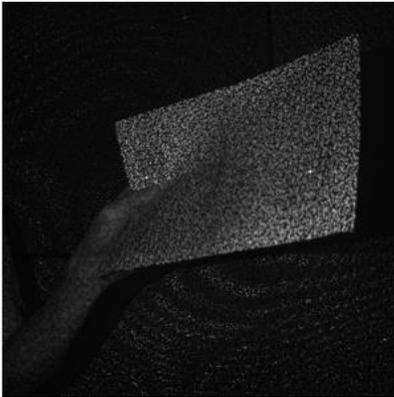


Abbildung 22: Nah-Infrarot Muster zur Erzeugung des Tiefenbildes

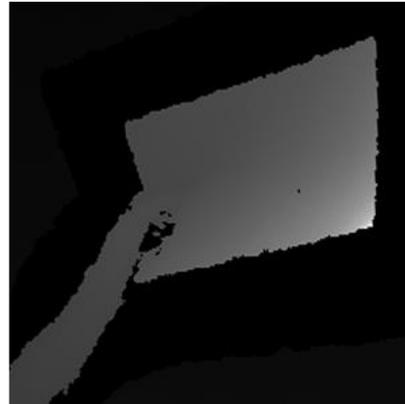


Abbildung 23: Umgerechnetes Tiefenbild als Pixelmatrix in Graustufen dargestellt

Die Nutzung von Tiefenbildern in der algorithmischen Bilderkennung löst eine Reihe von Problemen, die Farbbilder oder Bilder ähnlicher Domänen aufwerfen in denen unterschiedliche Lichtverhältnisse herrschen. Durch die Analyse der Tiefeninformation werden die Erkennungsgenauigkeit erhöht und Probleme wie veränderte Lichtverhältnisse, unterschiedliche Oberflächenfarben sowie affine Mehrdeutigkeit gelöst. Weiterhin lässt sich mit Tiefenbildern eine robustere Trennung zwischen Hintergrund Pixeln und gewünschten Vordergrund (Subjekt) Pixeln erzielen. Durch die Erzeugung des Tiefenbildes mithilfe eines Nah-Infrarot Projektors ist die Erkennungsmethode unabhängig von externen Lichtquellen.

Die Thermografiekamera wird durch die Unterstützung des GigE Vision Standards für Hochleistungskameras in die Bilderkennungssoftware eingebunden. Der Standard erlaubt das Übertragen von Bilddaten über ein Ethernet Netzwerk und stellt hierfür ein spezielles Protokoll zu Verfügung, das für die Bildakquise genutzt wird. Das Pleora eBUS SDK stellt hierfür eine passende C Bibliothek zur Verfügung, die es ermöglicht auf die Bilddaten der Thermografiekamera sowie auf interne Parameter zuzugreifen.

Die Bilderkennungssoftware besteht aus einem Haupt Thread, einem Kommunikationsthread, der für die Übertragung von Daten an den Datenserver zuständig ist und zwei separaten Threads jeweils einen für die Microsoft Kinect und die Thermografiekamera. Alle Threads laufen asynchron, da die Kamerasysteme

verschiedene Bildfrequenzen besitzen, der Kommunikationsthread langsamer läuft und eine höhere Anzahl an HTTP Requests in dem Projekt nicht notwendig ist. Eine Datenübertragung an den Datenserver von einer Sekunde bis fünf Sekunden hat sich als ausreichend für die Komfort Domäne erwiesen.

Die Software nutzt die Matrix Datenstrukturen der OpenCV Bibliothek zur Speicherung, Analyse und internen Übertragung von Bildinformation. Die Thermografiekamera kann so konfiguriert werden, dass diese eine temperaturlineare Matrix ausgibt, welche an den Hauptthread geschickt wird. Gleichzeitig werden Farbmatrix, Nah-Infrarotmatrix, Tiefenmatrix und die erkannten Subjektpixel zusammen mit erkannten Gesichts- und Poseninformationen an den Hauptthread gesendet.

Die Daten werden vom Haupt Thread zusammengeführt. Dies erfolgt in mehreren Schritten:

1. Das Koordinatensystem aller Bildmatrizen wird normalisiert anhand von vorher berechneten Kalibrierungsparametern
2. Iteration durch die erkannten relevanten Pixel und Sammlung der entsprechenden Infrarot Daten aus der Infrarot Matrix. Dies beinhaltet die Trennung zwischen Vordergrund- (das Subjekt) und Hintergrundpixeln sowie das Filtern von Bildrauschen durch Spatial Pooling
3. Extrahierung von reellen Temperaturdaten durch die Nutzung von Referenz Temperatur Sensoren
4. Vorbereitung der analysierten Daten zum Übertragen ins Datenserver XML Format.
5. Übertragung des erzeugten XML Textes an den Kommunikations Thread. Der Kommunikationsthread kann die Übertragung der XML Daten verweigern, sollte sein Intervall noch nicht abgelaufen sein. So wird ein Überfluss an Daten vermieden.

### **3.5.2 Bildregistrierung**

Die Bildregistrierung ist ein Prozess, bei dem Bilder aus einem oder mehreren Kameras in einem Koordinatensystem zusammengeführt und normalisiert werden. Die Microsoft

Kinect ist unterhalb der Thermografiekamera angebracht (vgl. Abbildung 24). Deren Objektiv ist vertikal abgestimmt mit der Position des Nah-Infrarot Sensors der Microsoft Kinect. Letztere nimmt die Information für das Tiefenbild auf. Beide Kameras haben verschiedene intrinsische Parameter, welche durch die Brennweite und das Format des digitalen Bildsensors bestimmt werden. Weiterhin hat die Microsoft Kinect eine zusätzliche herkömmliche digitale Kamera, die neben dem Nah-Infrarot Detektor angebracht ist und sichtbares Licht aufnimmt. Für die Darstellung des Farbbildes wird dieses ebenfalls normalisiert.



Abbildung 24: Prototyp des Thermografiekamera/Tiefenkamera Aufbaus (Metzmacher, Wölki, Schmidt, Frisch, & van Treeck, 2017)

Abbildung 25 zeigt das Sichtfeld der Thermografie Kamera und der Nah-Infrarot Kamera der Microsoft Kinect. In der Abbildung ist zu erkennen, dass das projizierte Bild der Thermografiekamera sehr viel kleiner ist als das projizierte Tiefenbild. Demnach existiert für jeden Pixel des Tiefenbildes mindestens ein Pixel im Thermografiebild, aber nicht anders herum. Das Koordinatensystem des Tiefenbildes wird aus diesem Grund als Basis für die Bildregistrierung genutzt. Das Thermografiebild sowie das Farbbild und das Nah-Infrarotbild der Microsoft Kinect werden nach der Kalibrierung in dieses Koordinatensystem überführt. Die Bildregistrierung der Microsoft Kinect Kameras erfolgt

mithilfe von Funktionen der Microsoft Kinect Programmier Bibliothek. Diese beinhaltet interne Kalibrierungsparameter, die sich nicht ändern lassen, da alle Kameras fest in der Hardware verbaut sind.

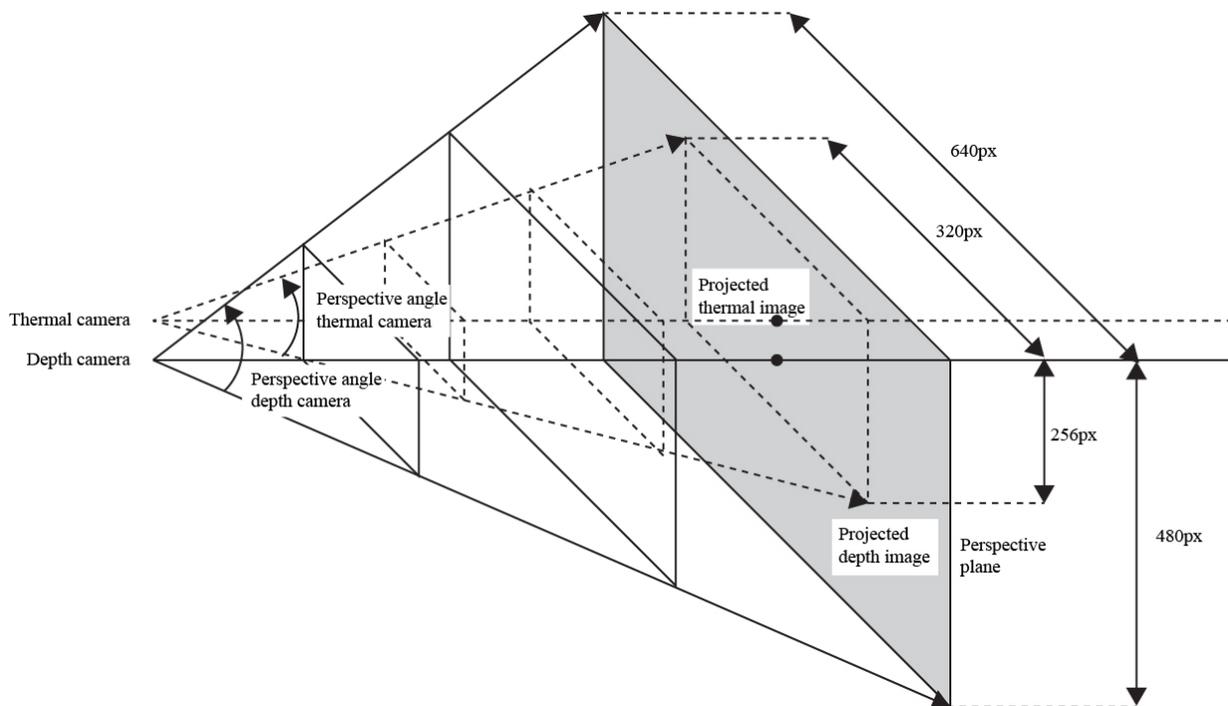


Abbildung 25: Perspektivische Projektion der Microsoft Kinect und der Thermografiekamera (Metzmacher, Wölki, Schmidt, Frisch, & van Treeck, 2017)

Die Pixelauflösung der Microsoft Kinect beträgt (640 x 480) Pixel und die der Thermografiekamera (320 x 256) Pixel. Die Überführung des Thermografiebildes in das Koordinatensystem des Tiefenbildes benötigt einen Bildregistrierungsprozess, da für diese Umformung relative extrinsische Parameter beider Kameras bekannt sein müssen. Der Bildregistrierungsprozess besteht aus einer geometrischen Kalibrierung beider Kameras mithilfe einer globalen Optimierungsmethode, die den Reprojektionsfehler von einem Bild in das andere minimiert und basiert auf einer Reihe von bekannten Referenzpunkten in beiden Bildern. Für die Erzeugung dieser Punkte wird ein Kreisraster aus Holz (vgl. Abbildung 26) vor die Kameras gehalten, welches von der OpenCV Bibliothek mithilfe eines Blob Detection Algorithmus (vgl. Abbildung 27) erkannt wird (Metzmacher, Wölki, Schmidt, Frisch, & van Treeck, 2017). Die Nutzung des Kreisrasters ist eine Standard Kalibrierungsmethode der OpenCV Bibliothek. In der thermischen

Domäne müssen sich die Kreise vom Temperaturniveau von der restlichen Oberfläche abheben. Dies wird entweder durch reale Temperaturunterschiede realisiert oder durch die Veränderung des Emissionsgrades an den entsprechenden Stellen (z.B. durch das Auftragen entsprechender Farbe). In diesem Projekt wurden Löcher in eine helle Holzplatte gestanzt und von einem Menschen vor die Kamera gehalten. Die Infrarotsignatur des Menschen scheint durch die Löcher, sodass diese klar hervorgehoben und mithilfe der Blob Detection Methode erkannt werden (vgl. Abbildung 27).

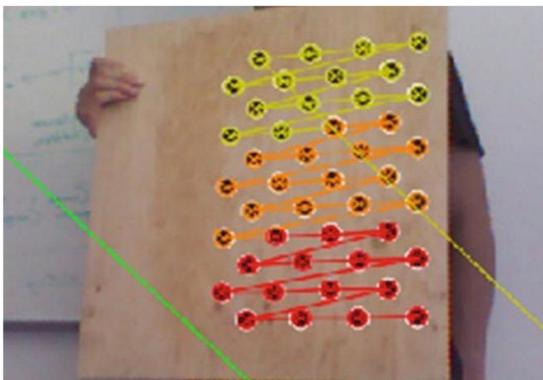


Abbildung 26: Kalibrierungsgitter in der sichtbaren Domäne

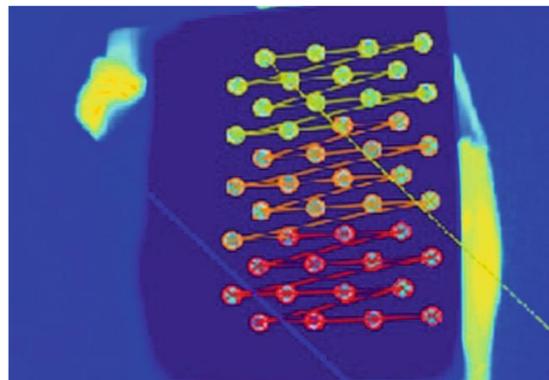


Abbildung 27: Kalibrierungsgitter in der thermischen Domäne

Die OpenCV Bibliothek beinhaltet eine Implementierung des Levenberg-Marquardt Algorithmus für eine iterative Minimierung des Reprojektionsfehlers. Um die Parameter der Kalibrierung zu speichern, wird das sogenannte Lochkamera Modell verwendet. Beide Kameras werden als Lochkamera repräsentiert, um intrinsische und extrinsische Kameraparameter zu speichern. Das Modell hat die folgende Form:

$$sm^T = A[R|t]M^T$$

Oder

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

Hier sind  $X, Y, Z$  3D-Punkte im Welt Koordinatensystem,  $u$  und  $v$  sind Punkte im Bildkoordinatensystem,  $A$  ist die Kamera Matrix,  $c_x, c_y$  sind die Bildmittelpunkte,  $f_x, f_y$  sind die Brennweiten in Pixeleinheiten und  $R|t$  die gemeinsame Rotations-Translationsmatrix (Matrix der externen Kameraparameter).

Nach dem Kalibrierungsvorgang werden die ermittelten extrinsischen Kameraparameter genutzt, um die Pixel des Thermografiebildes in die Pixel des Microsoft Kinect Tiefenbildes zu überführen. Nach diesem Vorgang sind beide Bildmatrizen im gleichen Koordinatensystem. Das heißt, dass Punkte, die auf dem Subjekt durch die Microsoft Kinect erkannt werden, genau auf das Thermografiebild übertragen werden zum Extrahieren der entsprechenden Temperaturen. Beide Bilder werden bei dem Kalibrierungsvorgang auf die gleiche Auflösung skaliert, sodass bei der Extrahierung von Pixelinformation keine zusätzlichen Skalierungsparameter notwendig sind. Abbildung 18 und Abbildung 21 zeigen die Erkennung und das akkurate Überführen der erkannten Gesichtskordinaten jeweils in der thermischen und sichtbaren Domäne. Abbildung 19 zeigt die erkannten Koordinaten auf dem Körper nach dem Kalibrierungsvorgang.

### 3.5.3 Messpunkte und räumliches Pooling

Ein Messpunkt in der Bilderkennungssoftware ist definiert als zweidimensionaler Punkt mit einer  $x$  und  $y$  Koordinate, deren Zentrum im normalisierten Koordinatensystem nach der Kamerakalibrierung repräsentiert ist. Jedem Messpunkt ist ein Name zugeordnet, der auch als Schlüssel im XML Kommunikationsschema genutzt wird. Dies ermöglicht eine Nutzung jedes Messpunktes als einzelnen Sensor. Ein Messpunkt hat einen fest definierten Radius, welcher alle Pixel umfasst, die zu dem Messpunkt gehören. Als Temperaturwert wird der Durchschnittstemperaturwert der Pixel im Radius des Messpunktes verwendet. Dies implementiert das räumliche Pooling, welches für eine Reduktion des Bildrauschens und daraus resultierende Ausreißer minimiert. Ein Messpunkt kann vom Nutzer manuell an einer fixen Position  $p_{x,y}$  gesetzt oder automatisch positioniert werden, in dem einem Messpunkt die Koordinaten der Gesichts- oder Haltungserkennung zugeordnet werden. Bei der Erkennung der Körperposition wird der

Messpunkt einem Gelenkpunkt des erkannten Skeletts zugeordnet. Der Punkt speichert dabei die Emissivität der zugewiesenen Oberfläche, damit er anschließend kategorisiert werden kann, denn theoretisch kann ein Messpunkt verschiedenen Oberflächen zugewiesen werden (Hautoberfläche des Menschen, Kleidungsflächen oder Sensoroberflächen der Referenzsensoren).

Ein Messpunkt mit einem Radius von 8 Pixel x 8 Pixel wurde als guter Kompromiss zwischen Reduktion von Bildrauschen und resultierender Unschärfe, durch Vergrößern des Radius bei einer Thermografiebild Auflösung von 320 Pixel x 256 Pixel und einer normalisierten Auflösung von 640 Pixel x 480 Pixel, festgelegt

### **3.5.4 Referenztemperatur**

Die Thermografiekamera funktioniert auf der Basis eines ungekühlten Vanadiumoxid (VOx) Bolometers als Fokalebeneanordnung. Ungekühlte Thermografiekameras sind generell einem niedrigeren Preissegment zuzuordnen und haben dementsprechende Einbußen in der Temporaufklärung gegenüber teuren Thermografiekameras mit gekühlten Detektoren. Entsprechend der Spezifikation der verwendeten Thermografiekamera wird eine Temperaturgenauigkeit von  $\pm 5$  °C erreicht. Dafür benötigt die Kamera eine Aufwärm-Periode von etwa 5 Minuten, bevor Messungen zuverlässige Werte liefern.

Durch die Nutzung von Referenztemperatursensoren bei denen die Temperatur einer Oberfläche bekannt ist, ist es möglich die Messgenauigkeit der Kamera zu erhöhen. Zusätzlich zur internen Kalibrierung der Thermografiekamera erfolgt eine kontinuierliche Kalibrierung mithilfe des Referenzsensors bei jedem Bild, das die Kamera aufnimmt. Der Referenztemperatursensor hat eine flache, runde Oberfläche mit vier PT4000 Sensoren (Temperaturbereich -50 °C bis + 130 °C, Toleranz  $\pm 0,12\%$ ) und ist mit speziellem matten, schwarzen Lack überzogen. Der Emissionsgrad dieser Oberfläche wurde mit einem Wert von  $\epsilon = 0,992$  approximiert.

Der Emissionsgrad muss vor Beginn einer Messung überprüft werden, da die Referenztemperatursensoren nicht perfekt orthogonal zur Kamera ausgerichtet sind und sich der Einfallswinkel auf die Messung auswirkt. Dieser Effekt wird zudem durch die nicht vollständig matte Oberfläche des Referenztemperatursensors verstärkt.

Der Referenztemperatursensor muss während einer Messung für die Thermografiekamera sichtbar bleiben. Die Position des Referenztemperatursensors wird vor einer Messung manuell in der Bilderkennungssoftware auf dem Thermografiebild gesetzt (vgl. Abbildung 29) (Metzmacher, Wölki, Schmidt, Frisch, & van Treeck, 2017).

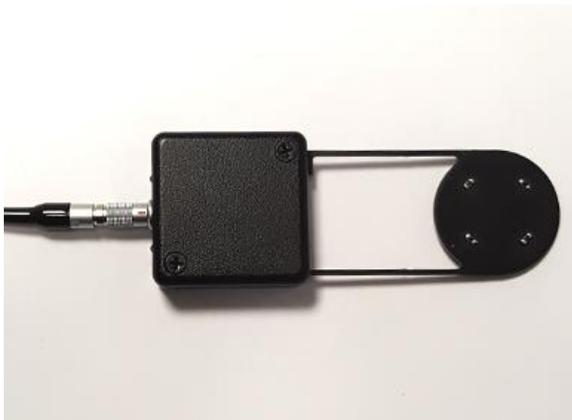


Abbildung 28: Referenztemperatursensor im sichtbaren Licht



Abbildung 29: Referenztemperatursensor in thermografischer Ansicht. Der Referenztemperaturmesspunkt wurde manuell vom Benutzer gesetzt

Die Temperaturmessung und die nachfolgende Kalibrierung basiert auf den Grundlagen der thermografischen Bildverarbeitung. Nach dem Planck'schen Strahlungsgesetz wird die spektrale Verteilung der Strahlung eines schwarzen Körpers, ein idealisierter physischer Körper, der alle eintreffende elektromagnetische Strahlung absorbiert, durch folgende Formel beschrieben:

$$W_{\lambda b} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left( e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)} \times 10^{-6} \left[ \frac{\text{Watt}}{\text{m}^2}, \mu\text{m} \right]$$

Hier  $W_{\lambda b}$  ist das spektrale Emissionsvermögen des schwarzen Körpers bei der Wellenlänge  $\lambda$  ( $\mu\text{m}$ ),  $c$  ist die Lichtgeschwindigkeit,  $h$  ist die Planck Konstante,  $k$  ist die Boltzmann Konstante und  $T$  ist die absolute Temperatur (K).

Zur Bestimmung der Temperatur, wenn die spezifische Strahlungsintensität und die elektromagnetische Frequenz bekannt sind, wird die Formel umgestellt. Der spektrale Bereich des verwendeten Kameramodells liegt zwischen  $7.5 \mu\text{m}$  und  $13 \mu\text{m}$  (vgl. Abbildung 30).

Für die Anwendung in reeller Thermografie müssen der Gleichung weitere Parameter hinzugefügt werden: Spektrale Absorption (Emissivität) ( $\alpha_\lambda$ ), spektrale Reflektivität ( $\rho_\lambda$ ), und spektrale Transmissivität ( $\tau_\lambda$ ). Die Thermografiekamera speichert interne Kalibrierungseinstellungen und verwaltet ein Konstantenregister, welches genutzt wird, um thermische Pixel in echte Temperaturwerte umzuwandeln. Das Register und resultierende Gleichungen basieren auf dem Planck'schen Gesetz. Ein Wert in der thermischen Pixelmatrix wird mithilfe der folgenden Formel, welche die internen Einstellungen integriert, umgewandelt:

$$T_{[K]} = \frac{B}{\ln\left(\frac{R}{S-O} + F\right)}$$

Hier,  $S$  ist ein 14-Bit digitales Signal der Thermografiekamera,  $R$  ist die Planck Konstante,  $B$ ,  $F$  und  $O$  sind interne Kalibrierungseinstellungen der verwendeten Kamera entsprechend der Bedienungsanleitung.

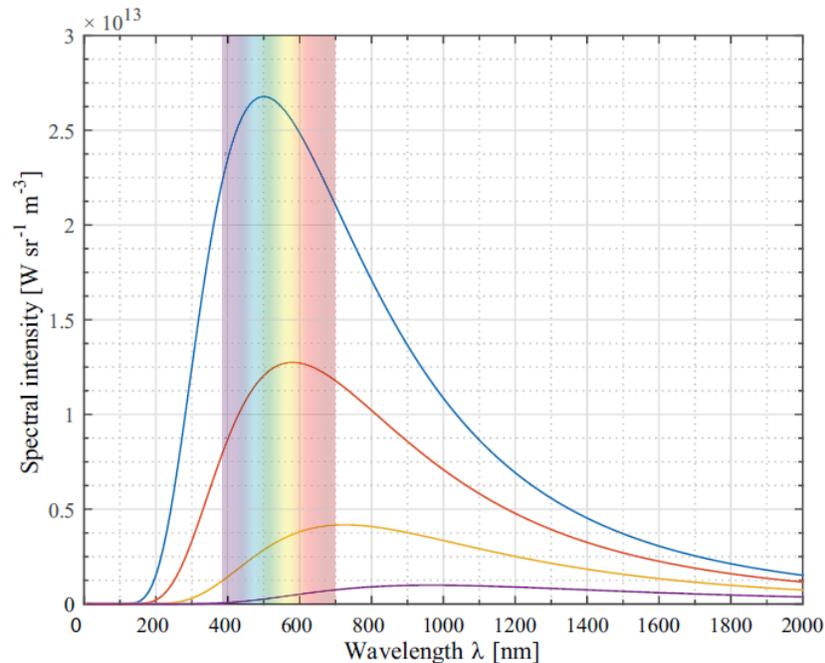


Abbildung 30: Spektrale Verteilung der Strahlung eines schwarzen Körpers in Abhängigkeit von der Wellenlänge (Metzmacher, Wölki, Schmidt, Frisch, & van Treeck, 2017)

Standardwerte für den entsprechenden Versuchsaufbau sowie Objekteigenschaften werden im Register der Thermografiekamera gespeichert. Die Register bestehen aus den Eigenschaften, die in Tabelle 2 aufgelistet sind

Tabelle 2: Eigenschaften des Registers der Thermografiekamera

ReflectedTemperature	Reflektierte Hintergrundtemperatur
ObjectEmissivity	Angenäherte Emissivität des Zielobjektes
WindowTransmission	Transmissivität des optischen Materials
WindowTemperature	Temperatur des optischen Materials
AtmosphericTransmission	Transmissionsfaktor für das atmosphärische Fenster
AtmosphericTemperature	Temperatur des atmosphärischen Fenster (Umgebungstemperatur)

Mithilfe der internen Kalibrierungsparameter der Thermografiekamera sowie der Position des Referenztemperatursensors wird nun ein Pixelwert in eine reale Temperatur umgerechnet. Die resultierende Temperatur wird im Anschluss mit dem eigentlichen Temperaturwert, der vom Referenztemperatursensor stammt, verglichen und ein linearer Offset mit folgender Formel berechnet:

$$t_{\text{offset}} = t_{\text{known}} - t_{\text{measured}}$$

Hier  $t_{\text{known}}$  ist der gemessene Wert des Referenztemperatursensors,  $t_{\text{measured}}$  ist der von der IR Kamera gemessene Wert mithilfe der internen Kalibrierung,  $t_{\text{offset}}$  ist das resultierende Offset. Dieser Wert wird zu jeder gemessenen Pixeltemperatur addiert, welche mit den internen Kalibrierungseinstellungen gemessen wurde. Der Wert kann negativ sein, wenn die vom Referenztemperatursensor gemessene Temperatur unter dem von der IR Kamera gemessenen Wert liegt. Das Korrekturdelta liegt typischerweise zwischen 0,05 °C und 0,50 °C.

### 3.5.5 Gesichtssegmentierung

In der praktischen Anwendung der bildtechnischen Verfolgung von Hautoberflächentemperaturen am Menschen ist das Gesicht die Region, die mit höchster Wahrscheinlichkeit sichtbar für die Kamera ist. Im EneffThermControl Projekt wurde deshalb eine logische und konsistente Segmentierung definiert, die eine Vergleichbarkeit von Daten und Ergebnissen ermöglicht.

Die gewählte Segmentierung basiert auf der Temperaturheterogenität des menschlichen Gesichtes sowie der möglichen bildtechnischen Stabilität von einzelnen verfolgten Regionen. Verfolgungspunkte, die am Rande einer Region liegen, zum Beispiel am Übergang zwischen Gesicht und Hintergrund sind zu vermeiden, da eine Verwechslung von Pixeln wahrscheinlicher wird.

Ariyaratnam & Rood zeigen in ihrer Arbeit, dass die Stirn, Wangen und das Kinn häufig verschiedene Temperaturen annehmen (Ariyaratnam & Rood, 1990). In ihrer Arbeit

messen sie die höchste Temperatur auf der Stirn und die niedrigste Temperatur in der Wangenregion. Die Temperatur der Kinnregion liegt meist zwischen diesen beiden Werten. Die höhere Temperatur der Stirn kann möglicherweise der höheren metabolischen Aktivität des Gehirns zugeschrieben werden. Die niedrigere Temperatur der Wangenregion ist durch den isolierenden Effekt der Fettschicht in dieser Region erklärt. Weiterhin ist diese Region metabolisch weniger aktiv.

In Bezug auf Versuche, die im Verlauf des EneffThermControl Projektes durchgeführt wurden, wurden die Augenregion, innere Augenregion, Nase und Mundregionen als Gesichtssegmente hinzugefügt, da sich diese in verschiedenen Messungen deutlich voneinander abgrenzten.

Alle Bezeichnungen sind in Englisch gewählt, um in der Programmierung konsistent umgesetzt zu werden. Die Stirn ist in drei Zonen unterteilt: *Forehead left*, *Forehead center*, *Forehead right*. Die Augenregionen sind in jeweils zwei Teilbereiche unterteilt: *Eye left*, *Eye inner corner left*, *Eye right*, *Eye inner corner right*. Die Wangenregionen sind definiert als *Cheek left* und *Cheek right*. Basierend auf der Arbeit von Ariyaratnam & Rood wurden die verbleibenden Gesichtsregionen als *Nose*, *Mouth* und *Chin* definiert. Für die Nase ist es am wahrscheinlichsten, dass diese die niedrigste Temperatur annimmt, da hier weniger Blutzirkulation sowie eine kontinuierliche Kühlung durch die Atmung besteht. Die Einteilung der Gesichtsregionen ist in Abbildung 32 zu sehen (Metzmacher, Wölki, Schmidt, Frisch, & van Treeck, 2017).

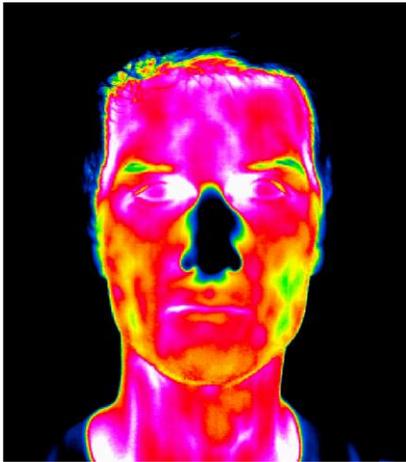


Abbildung 31: Thermografiebild eines Gesichtes

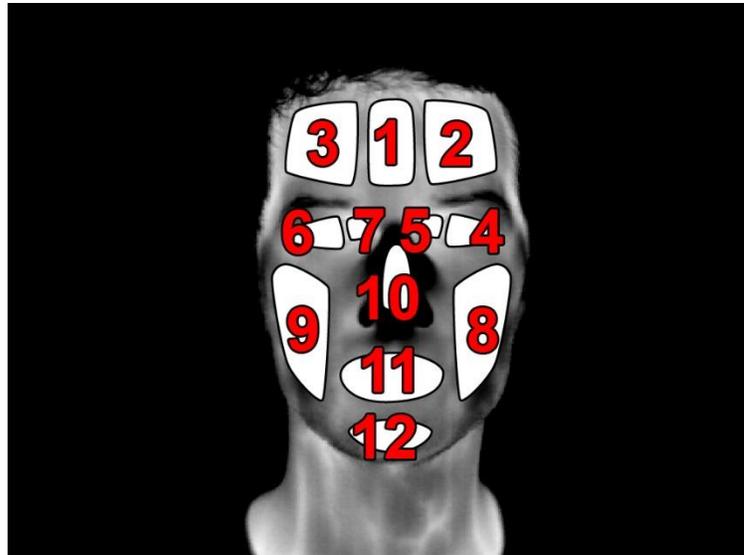


Abbildung 32: Thermografiebild eines Gesichtes mit definierten Regionen

Tabelle 3 zeigt die definierten Gesichtsegmente jeweils mit ihrem bestimmten XML Namen, die in der Serverumgebung genutzt werden. Der beispielhafte IR\_ Präfix zeigt, dass die Werte mit der IR Kamera gemessen werden. Für Gesichtstemperaturen, die mit anderen Sensoren gemessen werden (z.B. PT100 Sensoren) kann ein anderer Präfix verwendet werden wie z.B. PT100\_.

Tabelle 3: Definierte Segmentierung des menschlichen Gesichtes mit der jeweiligen XML Bezeichnung im Datenaustausch Format. Die Nummerierung entspricht der Nummerierung in Abbildung 32.

Segment	XML Name
1: Forehead center	IR_FOREHEAD_CENTER
2: Forehead left	IR_FOREHEAD_LEFT
3: Forehead right	IR_FOREHEAD_RIGHT
4: Eye left	IR_EYE_LEFT
5: Eye inner corner left	IR_EYE_INNER_CORNER_LEFT
6: Eye right	IR_EYE_RIGHT

7: Eye inner corner right	IR_EYE_INNER_CORNER_RIGHT
8: Cheek left	IR_CHEEK_LEFT
9: Cheek right	IR_CHEEK_RIGHT
10: Nose	IR_NOSE
11: Mouth	IR_MOUTH
12: Chin	IR_CHIN

### 3.5.6 Gesichtserkennung

Für die Gesichtserkennung wird ein Algorithmus verwendet, der auf der Arbeit von Smolyanskiy et al. basiert (Smolyanskiy, Huitema, Liang, & Anderson, 2014). Die Publikation beschreibt eine Methode zur Gesichtserkennung unter Einsatz eines Adaptive Appearance Models (AAM). Hier wird die Tiefeninformation für eine vollständige 3D Verfolgung des menschlichen Gesichtes verwendet. Die extrahierten Gesichtskoordinaten werden innerhalb des Koordinatensystems der Bilderkennungssoftware genutzt und auf das Thermografiebild, auf das Tiefenbild sowie zur Visualisierung auf das Farbbild aufgebracht. Die AAM Methode basiert auf einem generativen Modell, welches iterativ auf das gegebene Tiefenbild des Gesichtes angepasst wird. Der Algorithmus beginnt mithilfe der Erkennung der gesamten Gesichtsregion. Der ungefähre Mittelpunkt des Gesichtes kann als Prior gegeben werden. Danach werden zunächst Gesichtspunkte, Kopfskalierung, die vorkonfigurierte 2D AAM Form sowie visuelle Merkmale detektiert. Im Anschluss wird eine Energiefunktion minimiert, welche die Differenz zwischen dem Tiefenbild (hier dann als 3D Punktwolke visualisiert) und der 2D AAM Form dargestellt. In jedem Schritt des Algorithmus wird die Energiefunktion validiert. Entspricht die Übereinstimmung nicht den Abbruchkriterien wird die Verfolgung re-initialisiert. Die Energiefunktion ist wie folgt definiert:

$$E = w_{2D} E_{2D} + w_{2D3D} E_{2D3D} + w_{depth} E_{depth} + w_{temp} E_{temp} + w_{f\ seg} E_{f\ seg} + w_{reg} E_{reg}$$

Hier  $E_{2D}$  ist die Energiefunktion für die Anpassung der Modell Gesichtsmerkmale an die Eingangsmerkmale und  $w_{2D}$ ,  $w_{2D3D}$ ,  $w_{depth}$ ,  $w_{temp}$ ,  $w_{f\ seg}$  und  $w_{reg}$  sind skalare Gewichtungen.  $E_{2D3D}$  minimiert die Distanzen zwischen den 3D Punkten der 2D AAM

Form und des projizierte 3D Gesichtsmodells.  $E_{\text{depth}}$  ist der 3D Euklidischer Abstand zwischen den Gesichtsmodell Vertizen und dem jeweils nächstliegenden Tiefenpunkt in der 3D Punktwolke. Abbildung 18 zeigt die Verteilung von Messpunkten, die von der Gesichtsverfolgung gesteuert werden sowie die resultierende 3D Maske der AAM-Methode.

### 3.5.7 Haltungserkennung

Zur Erkennung der Körperhaltung kann die zuvor erläuterte Methodik der Gesichtserkennung genutzt werden, sobald das Koordinatensystem nach dem Kalibrierungsvorgang vereinheitlicht wurde, sodass erkannte Gelenkpositionen in das normalisierte Koordinatensystem übertragen werden können. Bei der Segmentierung in Körperbereiche wird im Gegensatz zur Gesichtssegmentierung auf einen weitreichenden Fundus wissenschaftlicher Arbeiten des Lehrstuhls für Energieeffizienten Bauens im Bereich der thermischen Behaglichkeit und der menschlichen Physiologie zurückgegriffen. Tabelle 4 führt die im EneffThermControl definierten Körperregionen auf.

Tabelle 4: Definierte Körperregionen mit der jeweiligen XML Bezeichnung im Datenaustausch Format

Körpersegment	XML Name
Head	T_IR_HEAD
Face	T_IR_FACE
Neck	T_IR_NECK
Chest	T_IR_CHEST
Pelvis	T_IR_PELVIS
Upper arm left	T_IR_UPPER_ARM_LEFT
Upper arm right	T_IR_UPPER_ARM_RIGHT
Lower arm left	T_IR_LOWER_ARM_LEFT
Lower arm right	T_IR_LOWER_ARM_RIGHT
Hand left	T_IR_HAND_LEFT

Hand right	T_IR_HAND_RIGHT
Thigh left	T_IR_THIGH_LEFT
Thigh right	T_IR_THIGH_RIGHT
Lower leg left	T_IR_LOWER_LEG_LEFT
Lower leg right	T_IR_LOWER_LEG_RIGHT
Foot left	T_IR_FOOT_LEFT
Foot right	T_IR_FOOT_RIGHT

Das Posenverfolgungssystem, welches in diesem Projekt genutzt wurde, basiert auf einer Datenbank von beschrifteten Tiefenbildern. Beschriftet bedeutet hier, dass zu jedem Tiefenbild in der Datenbank die Posendaten hinterlegt sind, welche dann zum statistischen Lernen genutzt werden. Für die Synthetisierung von Posendaten basierend auf Beispielen von erfassten Bewegungsdaten wurde folgende Methode entwickelt (Shotton, et al., 2013). Jedes Tiefenbild wird in eine Reihe von vergleichbaren Tiefenbildermerkmalen zerlegt, die genutzt werden, um einen sogenannten „Random Forest“, eine Menge von unkorrelierten Entscheidungsbäumen zu trainieren. Ein einzelner Merkmalspunkt ist wie folgt konstruiert:

$$f_{\Theta}(I, x) = d_I(x + \frac{u}{d_I(x)}) - d_I(x + \frac{v}{d_I(x)})$$

Hier ist  $d_I(x)$  die relative Intensität eines Tiefenpixels  $x$  in einem Bild  $I$ .  $\Theta=(u,v)$  beschreibt den entsprechenden Versatz  $u$  und  $v$ . Jedes Merkmal benötigt lediglich drei Tiefenpixel der Tiefenmatrix für die entsprechenden arithmetischen Operationen. Nach der Extrahierung der Bildmerkmale wird der randomisierte Decision Forest, welcher aus Ensembles von Entscheidungsbäumen besteht, mit den beschrifteten Daten und extrahierten Merkmalen trainiert. Jeder Endknotenpunkt eines Entscheidungsbaumes speichert eine gelernte Distribution  $P_t(c|I, x)$ , welche aus der Merkmalkonfiguration an diesem Knotenpunkt resultiert.  $x$  ist hierbei ein Pixel im Bild  $I$  und  $c$  sind Körperbeschriftungen. Die Distributionen werden gemittelt, sodass folgende Gleichung entsteht:

$$P(c|I,x) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T P_t(c|I,x)$$

Der Trainingsvorgang lässt sich in folgende Schritte aufteilen:

1. Zufällige Generierung von Teilungskandidaten  $\phi=(\Theta,\tau)$  (Teilung hier bezieht sich auf die Teilung eines Baumknotens in zwei neue Stränge).  $\Theta$  ist der Merkmalparameter und  $\tau$  ist der Schwellwert für die Teilung.
2. Aufteilung der Beispielmenge in linke und rechte Teilmengen  $Q_l(\phi)=\{(I,x)|f_{\Theta}(I,x)<\tau\}$  und  $Q_r(\phi)=Q \setminus Q_l(\phi)$ .
3. Berechnung des  $\phi$ , welche den höchsten Informationsgewinn einer Entscheidungsteilung erbringt.
4. Wenn der höchste Informationsgewinn  $G(\phi^*)$  ausreichend ist und der aktuelle Strang unterhalb der maximalen Anzahl von Rekursionen liegt, wird eine neue Rekursion für die jeweils linke und rechte Teilmenge initialisiert.

Für eine vollständige Aufführung der Methode wird der Leser auf die zugrundeliegende Arbeit von Shotton et al. verwiesen (Shotton, et al., 2013).

### 3.5.8 Hintergrund Subtraktion

Verfolgte Messpunkte auf den Körperregionen unterliegen Ungenauigkeiten in der Positionierung durch den Algorithmus. Diese Ungenauigkeiten resultieren aus dem Bildrauschen infolge der Konvertierung vom Nah-Infrarot Bild in das Tiefenbild, aus dem Bildrauschen der Infrarot Kamera und aus generellen Problemen, die bei der Verfolgung aufgrund von Unsicherheiten im Klassifizierungsprozess auftreten. Diese Ungenauigkeiten sind tolerierbar, wenn die verfolgten Messpunkte in einer größeren Region liegen, in der die Temperaturverteilung homogen ist, da Verschiebungen innerhalb einer Region die Messung nur geringfügig beeinflussen. Probleme erzeugen Ungenauigkeiten in der Verfolgung, wenn die Messpunkte an Grenzregionen zwischen verschiedenen Temperaturfeldern liegen. Dies tritt häufiger auf, wenn die verfolgte Person weiter entfernt von der Kamera ist und die absolute Anzahl pro Region sinkt. Ein Messpunkt, dessen Position ungenau bestimmt wird, kann Pixel enthalten, die einerseits

zur gewünschten Körperregionen gehören, andererseits Pixel des Hintergrundes von einer Oberfläche, die sich von der Temperatur des Körpers abheben.

Für die Trennung von Personenpixeln und Hintergrundpixeln existieren effizientere und robustere Algorithmen im Vergleich zur exakten Verfolgung von einzelnen Körpersegmenten. Diese Algorithmen nehmen an, dass der Hintergrund statisch ist (Han, Shao, Xu, & Shotton, 2013). Nach der Trennung von Vordergrund und Hintergrund wird eine zusätzliche OpenCV Matrix generiert, welche positive Werte für Personenpixel beinhaltet und Nullen für Hintergrundpixel einfügt. Diese Matrix wird im Anschluss als Maske für die Tiefenmatrix genutzt, um relevante Pixel zu extrahieren (vgl. Abbildung 33) (Metzmacher, Wölki, Schmidt, Frisch, & van Treeck, 2017).

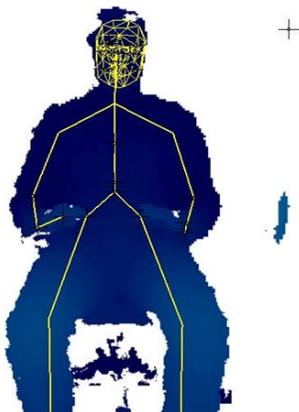


Abbildung 33: Hintergrundsabstraktion in der Tiefendomäne

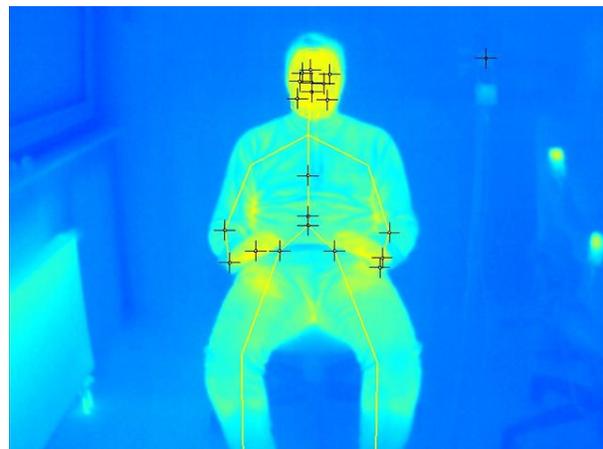


Abbildung 34: Verfolgte Messpunkte in der thermischen Domäne

Wenn die Bilderkennungssoftware ein neues Bild der Thermografiekamera erhält, iteriert jeder Messpunkt gleichzeitig die Pixel in der normalisierten thermischen Matrix und in der Benutzerpixelmatrix innerhalb seines Radius. Pixel in der thermischen Matrix, welche zu Hintergrundpixeln in der Benutzerpixelmatrix gehören, werden bei der Berechnung des durchschnittlichen Temperaturwertes im Radius des Messpunktes ignoriert.

Zum Beispiel kann ein großer Messradius für den Messpunkt T\_IR\_HAND\_LEFT (vgl. Abbildung 34) dazu führen, dass Hintergrundpixel mit in die Temperaturberechnung einbezogen werden, da sich der Messpunkt nahe einer Grenzregion befindet und die

Person relativ weit von der Kamera entfernt sitzt. Wird der Messpunkt durch die Pixel in der maskierten Tiefenmatrix (vgl. Abbildung 33) iteriert, werden die Temperaturen in den weißen Bereichen ignoriert und das Ergebnis bleibt genau. Abbildung 35 zeigt eine schematische Darstellung für einen Messpunkt in einer Grenzregion im Gesicht.

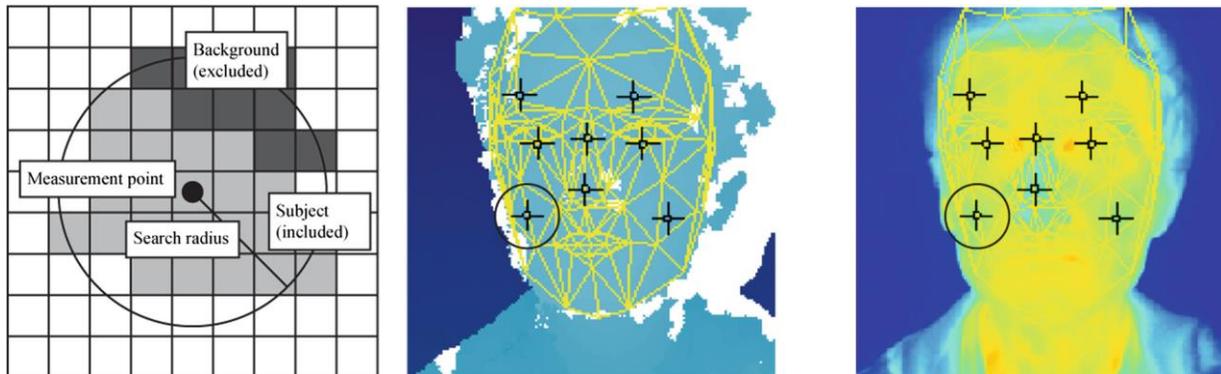


Abbildung 35: Schematische Darstellung der Hintergrundsubtraktion bei einem Messpunkt in einer Grenzregion (Metzmacher, Wölki, Schmidt, Frisch, & van Treeck, 2017)

#### 4 AP 3: Sensorintegration ins E-Fahrzeug

Das Ziel dieses Arbeitspaketes bestand darin, die entwickelte Hardware und Software in das Fahrzeug zu überführen und unter möglichst realen Bedingungen zu testen. Als Fahrzeugprototyp wurde während des Projektes vom assoziierten Projektpartner, der Volkswagen AG, ein Fahrzeug vom Typ Golf VII zur Verfügung gestellt. Da die Fahrzeugkabine zum größten Teil identisch mit der E-Golf Plattform ist, konnten der Einbau, die Bedienung sowie das Verhalten des entwickelten Systems realitätsnah getestet werden.

Zudem wurden während der gesamten Projektlaufzeit die einzelnen Softwarekomponenten kontinuierlich weiterentwickelt. Für diese Fälle wurde zusätzlich ein Fahrzeug Mockup (siehe Abschnitt 4.1) aufgebaut, da sich die Weiterentwicklung eines im Fahrzeug verbauten Systems als schwierig herausstellte. In dem Mockup wurden alle Hardwarekomponenten ähnlich wie im realen Fahrzeug eingebaut und

anschließend im Klimaraum (siehe Abschnitt 3.1) getestet.. Die Messergebnisse dienen auch als Grundlage für wissenschaftliche Veröffentlichungen.

Ziele dieses Arbeitspaketes:

- Integration des IR-kamerabasierten Systems ins E-Fahrzeug (siehe Abschnitt 0)
- Technische Aspekte und Randbedingungen bzgl. Serienproduktion (siehe Abschnitt 4.3)
- Designtechnische Anforderungen, auch hinsichtlich Akzeptanzproblemen (siehe Abschnitt 4.4)
- Anbindung an bestehende Assistenzsysteme (Aufmerksamkeit, UDS, etc., siehe Abschnitt 4.5)
- Technische Anbindung an Bussystem (siehe Abschnitt 3.2.6)
- Integration von thermischen Behaglichkeitssensoren in E-Fzg. Prototyp im Sitz als körpernaher Bereich (siehe Abschnitt 4.6)
- Integration von Kontaktsensoren in E-Fzg. Prototyp in den Sitz, das Lenkrad und den Fußraum (siehe Abschnitt 4.6)
- Umsetzung des regelungstechnischen Konzepts (siehe Abschnitt 4.7)
- durch Sensorfusion: Auswertung und Verarbeitung von Sensorinformationen (siehe Abschnitt 3.2)
- durch Datenintegration: Korrelation zwischen Sensorposition, -signal und lokaler Klimawirkung (siehe Abschnitt 3.2)
- Regelungstechnische Ansteuerung der Klimatisierungssysteme (siehe Abschnitt 4.7)
- Kalibrierungsalgorithmus für selbstlernendes System (personalisierte Klimatisierung, siehe Abschnitt 4.8)
- Energetische Bewertung des regelungstechnischen Systems im E-Fzg. (siehe Abschnitt 4.9)
- Mensch-Maschine Interaktion (siehe Abschnitt 4.10)
- Integration Klimainterface im Fahrzeuginformationssystem (Feedback-System, siehe Abschnitt 4.12)
- Darstellung aktivierter Klimamaßnahmen am Bildschirm (siehe Abschnitt 4.12)
- Benutzerführung (Mensch am Bildschirm, Wahrnehmung farblich intuitiv dargestellt, siehe Abschnitt 4.12)
- Benutzerdefinierte Kalibrierung mit Profilspeicherung im Fahrzeugschlüssel (Nutzerbasierte E-Fzg. Signatur: thermischer Komfort, Fahrprofil, usw., siehe Abschnitt 4.8)
- Hardwareintegration durch Anbindung des Gesamtsystems an Bussysteme (siehe Abschnitte 3.2.6, 4.5 und 4.11)

## 4.1 Fahrzeug-Mockup

Für die Erprobung des Gesamtsystems wurde im EneffThermControl Projekt ein Fahrzeug-Mockup sowie ein integrierter Fahrsimulator realisiert (vgl. Abbildung 36). Die sensortechnische Ausstattung, optische Sensorik, das Feedbacksystem sowie das Echtzeit Monitoring konnten so in einem realitätsnahen Umfeld getestet werden. Weiterhin ist es durch den Versuchsaufbau möglich, Erkenntnisse über den Einfluss von Bewegungsabläufen auf die optische Verfolgung von Haltung und Gesicht während des Fahrens zu erhalten. Der integrierte Fahrsimulator ist mit einem realen Fahrzeuglenkrad, mit nachgebauten Gaspedalen und einer 6-Gang Kupplung mit Rückwärtsgang ausgestattet. Die Positionen dieser Komponenten sind an reale Fahrzeuge angelehnt. Weiterhin ist der Fahrzeugsitz auf einem Schienensystem vergleichbar zu einem realen Fahrzeug montiert. Die Höhenverstellung des Sitzes sowie die Einstellbarkeit der Rückenlehne und Kopfstütze erlauben Untersuchungen zum Einfluss von verschiedenen Abständen und Sitzpositionen auf die Algorithmen zur Gesichts- und Haltungserkennung.



Abbildung 36: Mockup mit integriertem Fahrsimulator, Tablet zur Abfrage der thermischen Behaglichkeit und Echtzeit Monitoring der Messdaten

## **4.2 Integration des IR-kamerabasierten Systems ins E-Fahrzeug**

Die als modulares und portables System entwickelte IR Sensorik (vgl. Abbildung 24) des Fahrzeug-Mockups wurde zu Testzwecken herausgelöst und in das Fahrzeug eingebaut. Hierfür wurde der herkömmliche Rückspiegel entfernt und durch ein flexibles Montagesystem ersetzt. Die Infrarotkamera sowie die Microsoft Kinect konnten wie im Prototyp vertikal übereinander angebracht und an die Frontscheibe montiert werden. Hierbei ist anzumerken, dass eine deutliche Verkleinerung des Kamerasystems möglich ist, wenn Tiefenkamera und IR Kamera auf einer Platine verlötet und ausschließlich für das gegebene Szenario im E-Fahrzeug optimiert werden. Dieses „Downscaling“ wurde im Rahmen dieses Forschungsprojektes nicht weiter beachtet.

## **4.3 Technische Aspekte und Randbedingungen bzgl. Serienproduktion**

Die genutzte Sensorik, optische Hardware sowie die komplexe, generische Softwarearchitektur sind zunächst für die Weiterentwicklung und wissenschaftliche Untersuchung algorithmischer, lokaler Klimatisierung vorgesehen. Vor allem die IR Sensorik ist durch die hohen Kosten noch nicht einmal im Niedrigpreissegment für die Serienproduktion geeignet. Voraussetzung für die Anwendung in der Serie ist es, dass eine Werkzeugkette und einige ausgewählte Sensoren aus dem im EneffThermControl Projekt entwickelten Gesamtsystems herausgelöst und in ein möglichst monolithisches, eingebettetes System überführt werden. Die verwendete Klima- und Kontaktsensorik wird hierbei in ähnlicher Form verwendet. Die optische Sensorik muss hingegen weiter vereinfacht werden, sodass anstelle einer Thermografiekamera lediglich ein thermografisches Sensor Array verwendet wird (Downscaling). Beides sollte möglichst kompakt auf einer Platine angebracht und entsprechend auf die jeweiligen Insassen ausgerichtet werden. Das entwickelte System unterstützt durch seinen modularen Aufbau die Skalierung auf kostengünstige Hardware.

#### **4.4 Design-technische Anforderungen**

Die optische Sensorik sollte möglichst in die Oberfläche der I-Tafel, des Fahrzeughimmels oder für die zweite Reihe in die Rückseite der Sitze eingelassen werden. Wie in Abschnitt 4.3 beschrieben sollte die Kamera zur Personenerkennung und die IR-Sensorik auf einer Platine verlötet sein. Es ist zu empfehlen, die Bilddaten möglichst auf derselben Platine vorzuverarbeiten, sodass relevante Daten über den Fahrzeug CAN Bus an das Hauptsystem verschickt und mit den Klimasensordaten verrechnet werden. Jegliche Art von beweglichen Teilen ist mit Hinblick auf die Lebensdauer des Systems zu vermeiden. Weiterhin sollte die Sensorik mit einer soliden Hülle geschützt werden, die einem angemessenen Grad an mechanischer Belastung widersteht.

#### **4.5 Anbindung an bestehende Assistenzsysteme**

Ein direkter Zugriff auf die realen Assistenzsysteme des VW Golf VII wurden in diesem Projekt aus sicherheitstechnischen Gründen nicht hergestellt. Jedoch ist durch die vollständige CAN Anbindung des Datenservers gewährleistet, dass dem Fahrzeug alle Parameter zur Verfügung gestellt werden. Umgekehrt können jegliche Art von bekannten CAN Signalen der Assistenzsysteme von den Softwarekomponenten genutzt werden. Eine mögliche Idee für zukünftige Architekturen könnte beispielsweise die Anbindung an ein Warnsystem zur Fahrerermüdung sein, welches die verarbeitete Infrarotsignatur als Datenquelle für eine genauere Analyse nutzt.

#### **4.6 Integration der körpernahen Sensorik**

Die Integration der körpernahen Sensorik, die die thermischen Behaglichkeitssensoren und Kontaktsensoren in den Bereichen Sitz, Lenkrad sowie Fußraum beinhaltet, erfolgte im Fahrzeug Mockup, um die entsprechende Sensorik unter Laborbedingungen testen zu können. Die Sensorik wurde von der Firma Vereta entwickelt und wurde bereits im Abschnitt 3.4 beschrieben. Die Sensordaten sind wie die Daten der anderen Sensoren über den Datenserver abrufbar. Abbildung 37 zeigt die Visualisierung der Kontaktsensoren im Fahrzeugsitz und am Lenkrad.

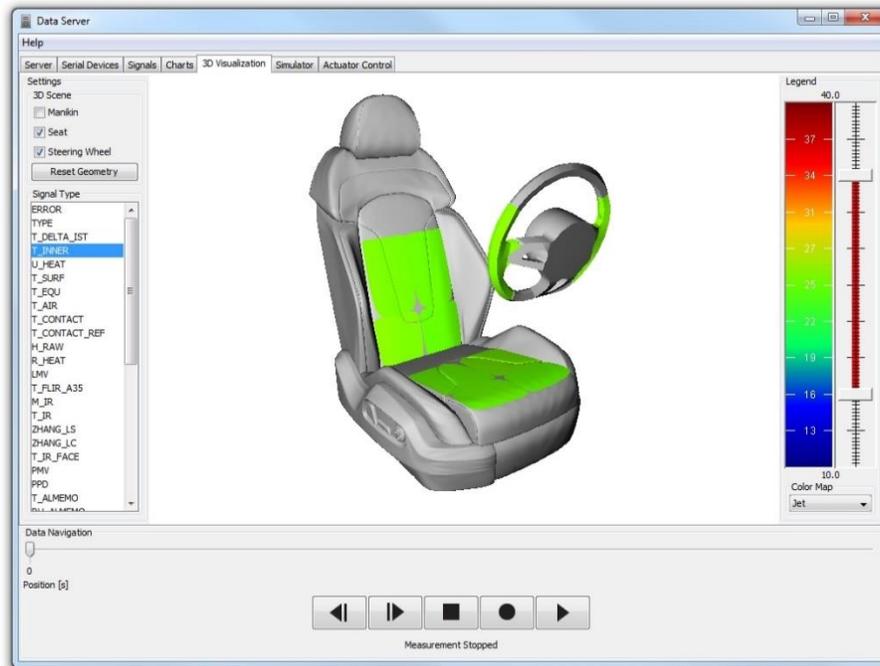


Abbildung 37: Visualisierung der Messdaten körpernaher Sensoren im Fahrzeugsitz und auf dem Lenkrad

#### 4.7 Regelungstechnische Ansteuerung der Klimatisierungssysteme

Die vollständige in EneffThermControl entwickelte Werkzeugkette stellt eine geeignete Abstraktionsebene für das effiziente Implementieren und Testen von Algorithmen und Regelungsstrategien für die komfortgeführte Klimaregelung in Fahrgastzellen zur Verfügung. Abbildung 38 zeigt schematisch die Funktionsweise des Gesamtsystems mit vollständiger Integration von Thermophysiologiemodell (MORPHEUS), thermischem Komfortmodell sowie der regelungstechnischen Ansteuerung der Klimaaktuatoren. Durch die Fusionierung aller einzeln entwickelten Systemkomponenten sowie deren simultaner Verfügbarkeit konnte im Projekt die Klimaregelung mit einer Reihe von Einflussparametern getestet werden. Zur Erprobung der algorithmischen Klimasteuerung wurde das zuvor beschriebene Behaglichkeitsmaß, LMV, als Klimasummenmaß zur Bewertung des lokalen thermischen Komforts einer Person gewählt. Das in Abschnitt 5.1.2 beschriebene Messverfahren nach ISO 14505-2 wurde dabei als Referenz verwendet.

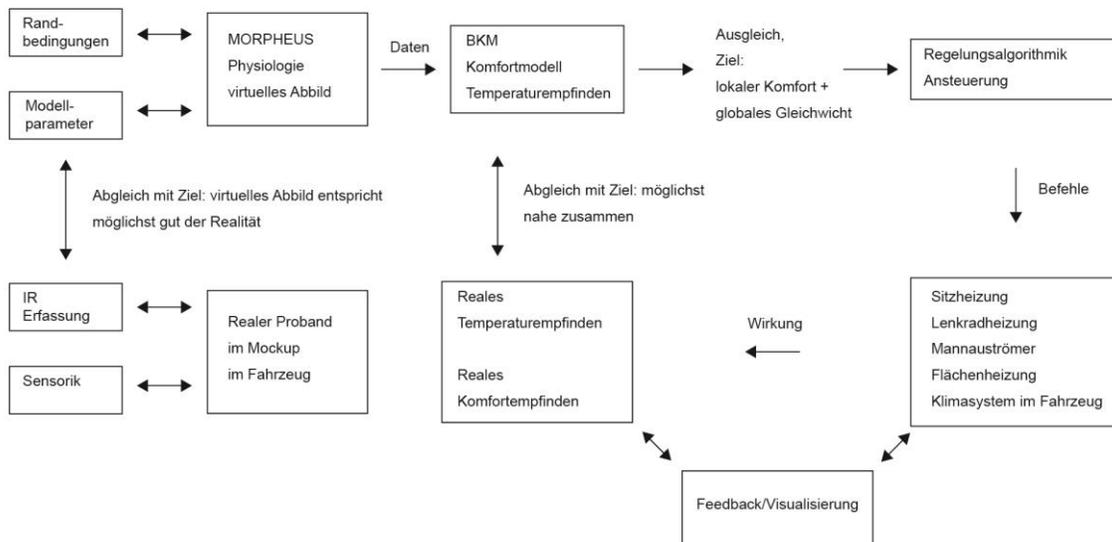


Abbildung 38: Teilmodelle und Schnittstellen zur Erläuterung der Funktionsweise des entstandenen Gesamtsystems

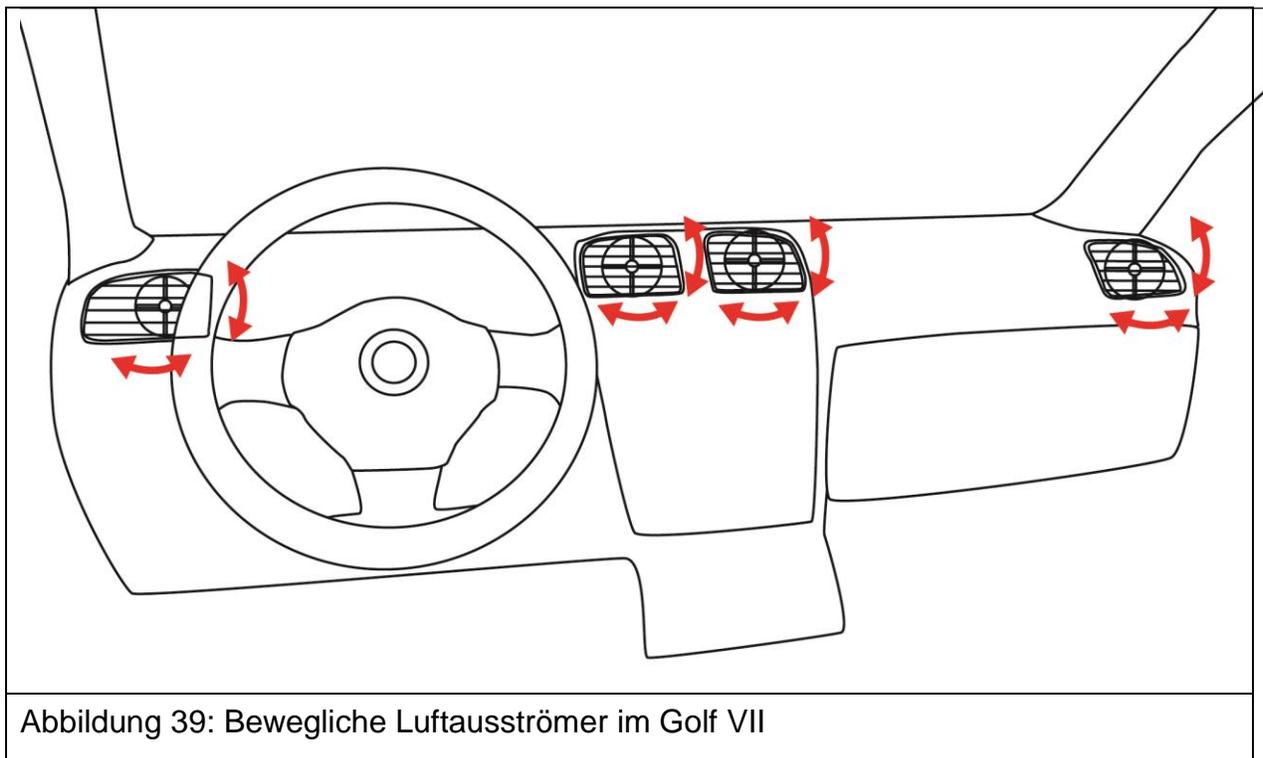
Das dargestellte Gesamtsystem überführt in einem ersten Schritt die gemessenen Sensordaten in das virtuelle Thermophysiologiemodell und dient dort zunächst zur Kalibrierung der Co-Simulation. Auf Basis des Physiologiemodells wird dann eine realistische Komfortaussage ermittelt, die zum Vergleich in das Behaglichkeitsmaß LMV umgewandelt wird (vgl. Abbildung 38).

Einwirkungen klimatischer Maßnahmen werden dementsprechend direkt lokal am Menschen gemessen und ermöglichen dann eine Feedbackschleife für das Gesamtsystem. Eingaben, die über das subjektive Feedbacksystem (Tablet PC) von Insassen gemacht werden, stehen im Datenserver ebenfalls zur Verfügung und können bei Bedarf die mit Hilfe abgeleiteter Gewichtungsfaktoren die Klimaregelung auf ein Individuum anpassen.

Mithilfe des LMV lässt sich für jedes Körpersegment berechnen, ob die entsprechende Körperregion sich im thermisch neutralen, zu warmen oder zu kühlen Zustand befindet. Aus den Bewertungen leiten sich folglich Algorithmen ab, mit denen beispielsweise die beweglichen Luftausströmer so positioniert werden können, dass diese auf die thermisch unkomfortabelste Körperstellen ausgerichtet sind. Befindet sich die Klimaanlage im

Heizmodus so werden die Luftausströmer auf die jeweils kühlsste Position am Körper gerichtet. Ist die Klimaanlage im Kühlmodus so werden die Ausströmer auf die jeweils wärmste Körperregion ausgerichtet. Zum Test der Feedbackschleife wurde der Datenserver auf eine Abtastrate von einer Sekunde gestellt. Dies ermöglichte eine schnelle Erfassung der thermischen Behaglichkeit (LMV) der einzelnen Körperstellen. Bei einer Änderung lokal auftretender Minima oder Maxima konnten so die Ausströmer schnell justiert werden.

Ein Aspekt in EneffThermControl war die der regelungstechnischen Ansteuerung der Klimavorrichtungen im bereitgestellten Golf VII. Das sogenannte „Klimaerlebnisauto“ wurde neben der herkömmlichen Climatronik mit prototypischen, beweglichen Luftausströmern ausgestattet, welche auf verschiedene Zonen am Körper des Menschen gerichtet werden können (vgl. Abbildung 39).



Die beweglichen Luftausströmer sind an ein separates CAN-System angeschlossen und werden über die CAN Anbindung vom Datenserver angesteuert. Zur Justierung sind die Ausströmer selbst mit einem Servomotor ausgestattet, welcher eine horizontale

Bewegung zulässt. Letztere ist jeweils einem CAN Signal zugeordnet und basiert auf relativen Werten zur Einstellung der entsprechenden Lüfterposition. Für die vertikale Bewegung ist ein weiterer Servomotor an die Abdeckklappen der Ausströmer angebracht. An dieser Stelle ist anzumerken, dass durch diese Konstruktionsweise der Turbulenzgrad der Luftströmung erhöht wird, da die Luft stärker abgelenkt wird. Abbildung 40 zeigt die Benutzeroberfläche zur heuristischen Ansteuerung der beweglichen Luftausströmer. In der gezeigten Konfiguration werden die Ausströmer jeweils auf die Körperregionen mit dem unbehaglichsten Komfortwert ausgerichtet.

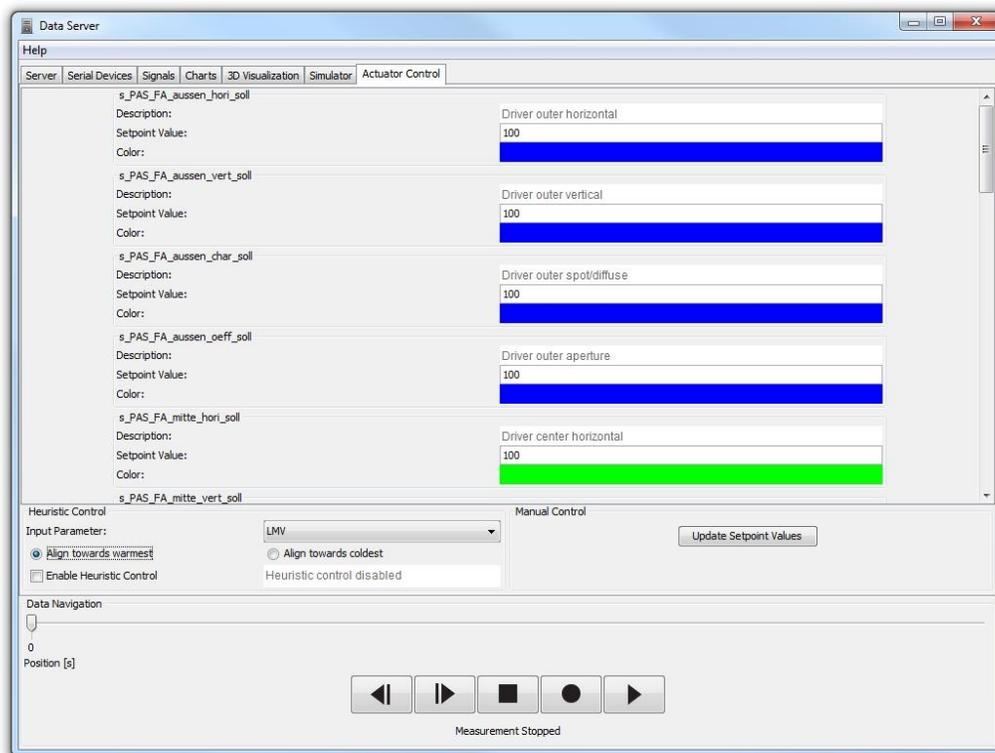


Abbildung 40: Benutzeroberfläche für die heuristische Regelung der Luftausströmer im Golf VII

Abbildung 41 zeigt den experimentellen Aufbau zur algorithmischen Klimasteuerung mithilfe der ISO 14505 Klimamessereinrichtung. Die LMV Werte, welche als Eingangsgröße für die Regelung der beweglichen Luftauslasse dienen, stammen direkt von den Messwertaufnehmern der Klimamessereinrichtung (siehe hierzu Abschnitt 3.4). Zum Testen

und Überprüfen des Gesamtsystems wurde ein zusätzlicher Monitor im Golf VII integriert, um visuelles Feedback bezüglich der erfassten Messwerte zu erhalten.

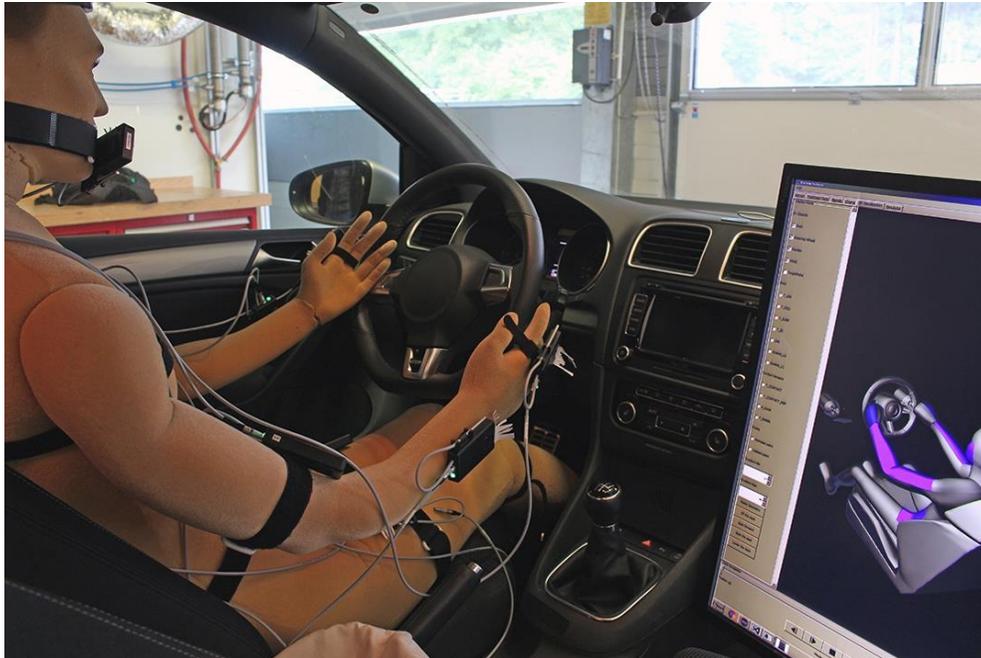


Abbildung 41: Aufbau zur algorithmischen Klimasteuerung im Golf VII

Aufbauend auf den Erfahrungen aus den vorangegangenen Projekten FAT I (Schmidt, Praster, Wölki, Wolf, & van Treeck, 2013) und FAT II (Schmidt, Veselá, Bidhendi, Rudnick, & van Treeck, 2015) wurden weitere lokale Heiz- und Kühlmaßnahmen als aktive Aktuatoren an des Gesamtsystem angebunden. Hierzu mussten zunächst die entsprechenden statistischen Modelle an die prädiktive Regelung angebunden werden, um Klimatisierungsmaßnahmen wie Strahlungsheizung, Lenkradheizung, körpernahe Heizflächen oder Ventilatoren zur Kühlung berücksichtigen zu können und in die Bewertung der thermischen Behaglichkeit einfließen zu lassen. Ein funktionaler Test wurde im Kontext von EneffThermControl am Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen erfolgreich durchgeführt.

#### **4.8 Kalibrieralgorithmus für selbstlernendes System**

Als Kalibrieralgorithmus für das selbstlernende System dient das zuvor beschriebene numerische Menschmodell, MORPHEUS. Durch die Möglichkeit der Individualisierung

bzw. der Anpassung der Modellparameter an die anatomischen und morphologischen Kenndaten eines abzubildenden menschlichen Individuums, kann die Vorhersagegenauigkeit des thermischen Komforts einer Einzelperson durch das Gesamtsystem erheblich gesteigert werden (Wölki, 2017). In diesem Zusammenhang wurden anatomische und morphologische Daten von insgesamt 280 Personen aus einer Datenbank des Lehrstuhls für Energieeffizientes Bauen verwendet um einen typisch männlichen und einen typisch weiblichen Probanden modelltechnisch in MORPHEUS abzubilden. Entsprechende Modelldaten sind in (Wölki, 2017) detailliert beschrieben. Die entsprechenden Modelle sind dabei anwendbar für die Vorhersage geschlechtsspezifischer Unterschiede hinsichtlich des thermischen Komforts in Fahrzeugen. Eine entsprechende Ankopplung an das Gesamtsystem ist im Kontext des Projekts erfolgreich umgesetzt worden, um die Voraussetzung für die weitere Umsetzung eines selbstlernenden Algorithmus zu schaffen.

#### **4.9 Energetische Bewertung des regelungstechnischen Gesamtsystems**

In einer experimentellen Untersuchung am Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen wurde eine heuristische Ansteuerung (siehe Abschnitt 4.7) der beweglichen Luftauslässe in einem Versuchsfahrzeug der Golf VII Plattform unter Verwendung verschiedener Climatronik-Einstellungen und der in Abschnitt 5.1.2 beschriebenen Klimakomfortmesseinrichtung durchgeführt. Zugehörige Klimakomfortwerte, Climatronik-Einstellungen sowie die aktuelle Luftausströmerposition wurden diesbezüglich aufgezeichnet und ausgewertet. Hierzu wurde das Fahrzeug in verschiedenen Szenarien auf eine Fahrzeuginnenraumtemperatur von 40 °C aufgeheizt und anschließend mit Hilfe der steuerbaren Luftausströmer, die an das in EneffThermControl entwickelten Gesamtsystems (siehe Abschnitt 4.7) angekoppelt wurden, definiert abgekühlt. Die Ergebnisse geben Aufschluss darüber wie schnell der thermische Insassenkomfort in Form des LMV bei der jeweiligen Climatronik-Einstellung wieder normalisiert werden kann. Die energetische Bewertung des Fahrzeuggesamtsystems erfolgte intern beim assoziierten Partner Volkswagen.

### 4.9.1 Energetische Bewertung (Heizfall)

Für die energetische Bewertung im Heizfall wurden im vorangegangenen FAT Projekt bereits der Einfluss von lokalen Maßnahmen auf den thermischen Komfort experimentell an einer entsprechenden Testeinrichtung des Lehrstuhls für Energieeffizientes Bauen untersucht. Folgende lokale Maßnahmen wurden hierzu betrachtet: beheizte Flächen, Lenkrad- sowie Sitzheizung (Schmidt, Veselá, Bidhendi, Rudnick, & van Treeck, 2015). Abbildung 42 zeigt den Einfluss der Maßnahmen auf das subjektive Behaglichkeitsempfinden von Personen.

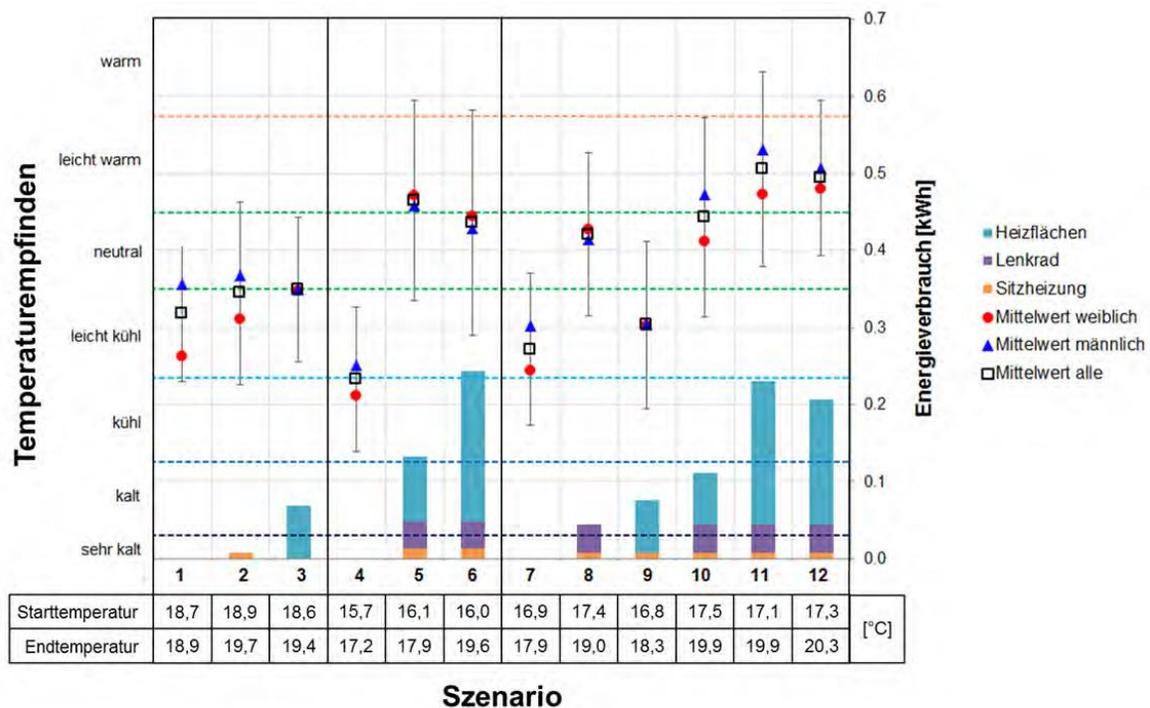


Abbildung 42: Kombinierte Darstellung von 12 Klimatisierungsmaßnahmen zusammen mit der Temperatur und der subjektiven Behaglichkeit (Schmidt, Veselá, Bidhendi, Rudnick, & van Treeck, 2015)

Herkömmlich wird die Lufttemperatur des Fahrzeuginnenraums auf etwa 22 – 26 °C aufgeheizt (Schmidt, Veselá, Bidhendi, Rudnick, & van Treeck, 2015). In Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor steht die Wärme des exothermen Verbrennungsvorgangs sowie die Antriebsleistung zur Erzeugung elektrischer Energie zur Verfügung. Bei einem Elektrofahrzeug würde sich hingegen bei gleicher Klimatisierung die Reichweite in der

Größenordnung von bis zu 50% reduzieren. Eine Quantifizierung des Einsparpotentials durch die algorithmische Ansteuerung der genannten Aktuatoren für den Heizfall wurde prototypisch realisiert. Hier wurde jeweils die herkömmliche Fahrzeugklimatisierung mit einem Aufheizvorgang der Innenraumtemperatur auf 20 °C mit den Szenarien definiert von Schmidt et al. (Schmidt, Veselá, Bidhendi, Rudnick, & van Treeck, 2015) verglichen. Letztere zeigen ein mögliches Einsparpotential zwischen 40 Wh und 300 Wh durch den Einsatz der beschriebenen Aktuatoren.

#### 4.9.2 Messreihe zur algorithmischen Steuerung beweglicher Ausströmer

Zur Demonstration der algorithmischen Ansteuerung und der Feedbackschleife des Systems wurde im EneffThermControl Projekt experimentell die heuristische Ansteuerung beweglicher Ausströmer getestet und im Golf VII getestet. Der zugehörige Verlauf des LMV Komfortindexes gemessen mit der Klimamesseinrichtung nach ISO14505-2 sowie der aktuellen Luftausströmerausrichtung und die Konfiguration der Climatronic wurden dabei aufgezeichnet. Hierbei wurde das Fahrzeug jeweils auf eine hohe Temperatur aufgeheizt (ca. 40 °C) und dann mit den verschiedenen Climatronic-Konfigurationen mit laufender automatischer Ausrichtung der Strömer abgekühlt. Die Ergebnisse geben Aufschluss darüber wie schnell der Komfort im Fahrzeug mit der entsprechenden Einstellung wieder in einen neutralen Bereich gebracht werden kann.

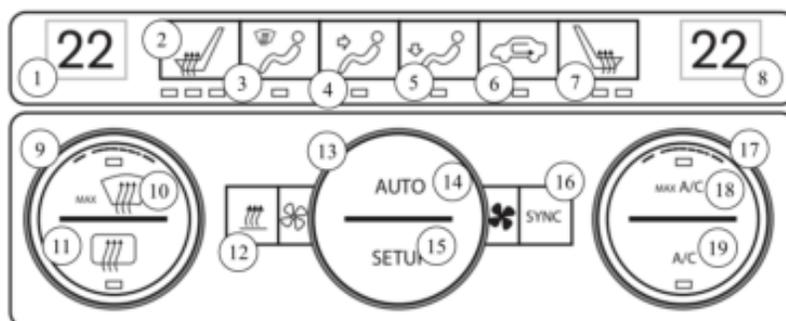


Abbildung 43: Schema der Golf VII Climatronic Steuerkonsole (Grothe, 2013)

Die Messreihe besteht aus drei Messungen mit jeweils verschiedenen Einstellungen der VW Climatronic Konsole. Wie bereits erwähnt muss diese Einstellung manuell vorgenommen werden da im Projekt kein direkter CAN Zugriff auf die Climatronic Steuersignale möglich war. Abbildung 43 zeigt die schematische Darstellung der Climatronic-Konsole. Die für die Messung hauptsächlich relevanten Einstellungen sind die Solltemperatur und die Gebläsestufe, welche ausschlaggebend sind für den Energieverbrauch der Klimaanlage im Fahrzeug.

Tabelle 5 listet die drei Konfigurationen auf. Die rot markierte Spalte zeigt die Einstellung mit maximaler Kühlung und höchster Gebläsestufe. Diese Einstellung hat den höchstmöglichen Energieverbrauch und kühlt den Insassen am stärksten und schnellsten runter. Konfiguration 2 und 3 haben die gleiche Solltemperatur bei 22 °C was die Standardeinstellung der Climatronic ist. Hier soll lediglich der Einfluss der Gebläsestärke auf den Abkühlvorgang untersucht werden und der dadurch resultierende LMV. Konfiguration 3 ist die energiesparendste Einstellung in dieser Messreihe.

Die Ausrichtung der Auslässe wird während der gesamten Versuchsdurchführung durch die Heuristik kontrolliert, welche stets eine Ausrichtung auf den Punkt am Körper mit dem *höchsten* LMV festlegt. Die vertikale Ausrichtung der Auslässe ist hier ausschlaggebend, da diese zwischen Kopfbereich, Ober- und Unterkörper unterscheidet. Die horizontale Ausrichtung der Auslässe verändert sich nur minimal und ist durch die diffuse Charakteristik der Auslässe auch im Spot Modus eher zu vernachlässigen. Sie wird deshalb nicht aufgeführt.

Tabelle 5: VW Golf VII Climatronic-Einstellung für die experimentelle Untersuchung

	Konfiguration 1	Konfiguration 2	Konfiguration 3
Solltemperatur	Low	22	22
Gebläsestufe im Bedienteil	7	7	2
Ausströmer Modus	Spot	Spot	Spot
Auto	Aus	Aus	Aus
Luftverteilung	Manuell (Oberkörper)	Manuell (Oberkörper)	Manuell (Oberkörper)

Sonneneinstrahlung	Keine	Keine	Keine
Außentemperatur	24°C	24°C	24°C

Abbildung 44 (Konfiguration 1), Abbildung 45 (Konfiguration 2) und Abbildung 46 (Konfiguration 3) zeigen jeweils den Verlauf des LMV Indexes für die Stirn, das Gesicht und den Oberkörperbereich sowie die vertikale Auslassausrichtung auf die Klimamesseinrichtung. Es ist ersichtlich, dass Konfiguration 1 nach kürzester Zeit so weit kühlt, dass der komfortable LMV Bereich überschritten wird hin zum kalt unkomfortablen Bereich. In Konfiguration 3 erreicht lediglich die Brustregion die komfortable Zone, Stirn und Gesicht bleiben zu warm. In Konfiguration 2 sind alle drei Zonen dem komfortablen Bereich am Ende der Messung am nächsten.

Bei der Messung für Konfiguration 2 und 3 wurde die Kühlung nach etwa 400 Sekunden Versuchsdauer eingeschaltet. Dabei ist auffallend, dass die vertikale Ausrichtung des Auslasses treppenartig absinkt (Bewegung vertikal nach unten). Der Grund hierfür ist, dass die Auslässe mit der Position der Ausrichtung auf die Kopfregion beginnen, die entsprechenden Regionen abkühlen und dann den Unterkörper entlang bis hin zu den Beinen kühlen. Die vertikale Luftrichtung wird bei den beweglichen Auslässen durch das teilweise Öffnen und Schließen von Frontblenden realisiert. Hierzu ist zu sagen, dass durch die halb geschlossenen Blenden der Luftauslässe die entsprechenden Luftströme gedrosselt werden, wodurch die Beinregion länger braucht um abzukühlen.

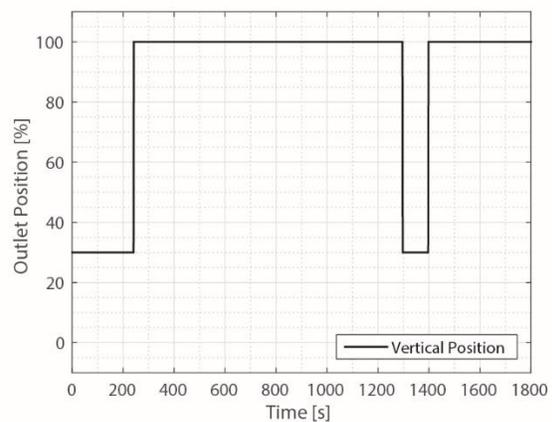
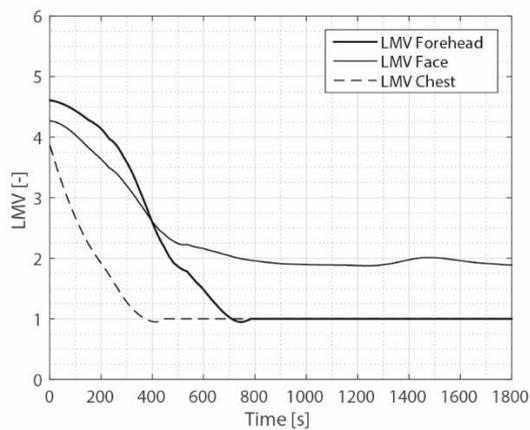


Abbildung 44: LMV und Luftausströmerposition zur Konfiguration 1 der experimentellen Untersuchung der algorithmischen Ansteuerung und der Feedbackschleife des in EneffThermControl entwickelten Gesamtsystems

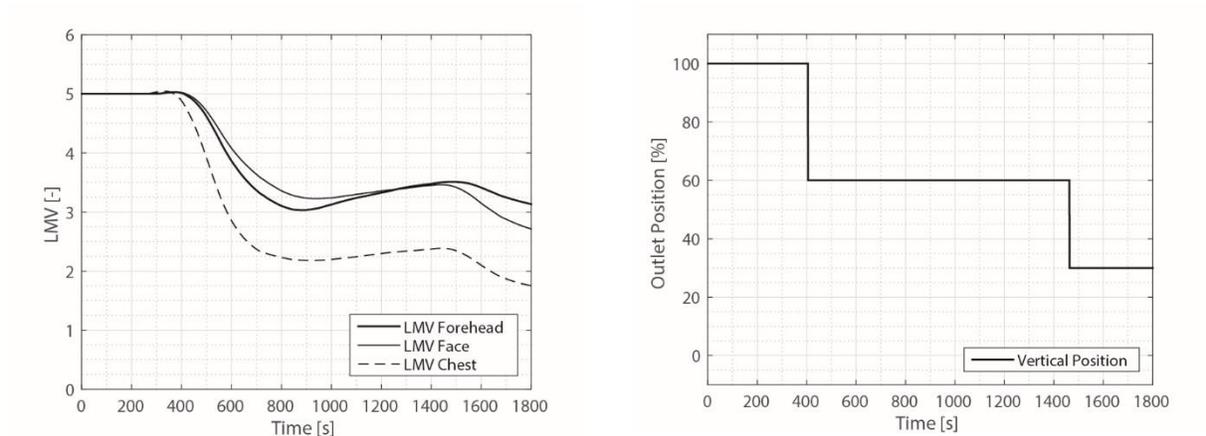


Abbildung 45: LMV und Luftausströmerposition zur Konfiguration 2 der experimentellen Untersuchung der algorithmischen Ansteuerung und der Feedbackschleife des in EneffThermControl entwickelten Gesamtsystems

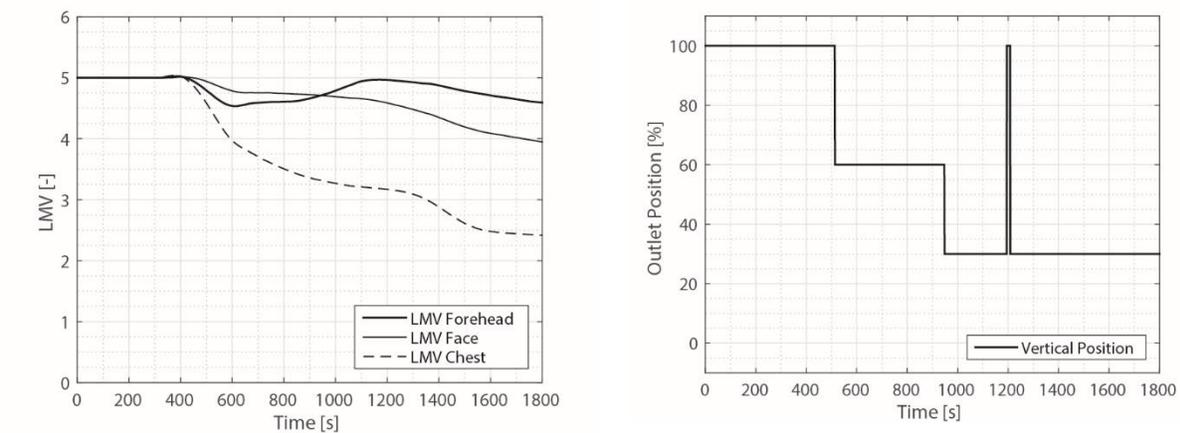


Abbildung 46: LMV und Luftausströmerposition zur Konfiguration 3 der experimentellen Untersuchung der algorithmischen Ansteuerung und der Feedbackschleife des in EneffThermControl entwickelten Gesamtsystems

## 4.10 Mensch-Maschine Interaktion (MMI)

Die offene Datenserver Plattform erlaubt die effiziente Anbindung von beliebig gearteten Softwarekomponenten welche dem Nutzer die Einstellung von ausgewählten Parametern über eine grafische Oberfläche ermöglichen. Sollen zum Beispiel Parameter auf dem CAN Bus optisch dargestellt werden und vom Nutzer manipulierbar sein so kann eine Anwendung verschiedenen grafischen Feldern jeweils ein CAN Signal mit Minimum und Maximum Werten zuordnen. Bei veränderter Benutzereingabe wird diese Information an den Server gesendet welcher wiederum von der CAN Softwarekomponente befragt wird ob eine Veränderung stattgefunden hat. Der aktualisierte Wert wird dann wieder in das CAN Netzwerk eingespeist.

## 4.11 Feedback-System

Nutzer-Feedback kann ähnlich wie die Sensorik im System über das Kommunikationsprotokoll eingebunden werden. Dies kann durch Tablets, Smartphones oder eingebettete Systeme erfolgen die als HTTP Klient Zugriff auf das Netzwerk haben. Durch das gewählte Schlüssel-Wert Datenmodell kann jede Art von Nutzer-Feedback in einer dafür festgelegten Namensgebung sowie durch numerische oder alphanumerische Antwortmöglichkeiten festgelegt werden. Die grafische Präsentation für den jeweiligen Probanden kann entsprechend vorkonfiguriert werden.

Im EneffThermControl Projekt wurde dies durch eine Tablet Android Applikation realisiert. Die Applikation hat die gleichen 3D Visualisierungsmöglichkeiten wie der Datenserver selbst und kann dem Benutzer entsprechend eine Darstellung der errechneten Komfortgrößen geben. Weithin stellt die Applikation ein XML Framework für die Erstellung von Abfragefolgen zur Verfügung welche konform sind mit dem benötigten Datenformat.

Abbildung 47 zeigt ein XML Beispiel für eine einzelne Nutzerbefragung. Die Befragung ist eine Mehrfachauswahl und besitzt fünf Antwortmöglichkeiten zu denen zusätzlich eine Darstellungsfarbe festgelegt ist. Der Name der Frage ist USER\_GLOBAL\_KOMFORT. Dieser wird als Schlüssel im Schlüssel-Wert Format angesehen und in der Datenübertragung an den Datenserver genutzt. Als Wert wird der Frage je nach Auswahl

der Index der Antwort (1 – 5) zugeordnet. Das gesamte Vorgehen stellt entsprechend ein vollständiges Signal dar.

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" ?>
<questionnaire>
  <question type="multiple choice" name="USER_GLOBAL_KOMFORT"
text="Globaler Komfort">
    <answer text="Zu warm" color="#ed1c24">0</answer>
    <answer text="Warm" color="#f7931e">1</answer>
    <answer text="Neutral" color="#fcee21">2</answer>
    <answer text="Kühl" color="#39b54a">3</answer>
    <answer text="Zu kalt" color="#006837">4</answer>
  </question>
</questionnaire>
```

Abbildung 47: Datenformat für die Erstellung von Befragungsabfolgen im Nutzerfeedbacksystem

## 4.12 Integration Klima-Interface ins Fahrzeuginformationssystem

Im Rahmen des EneffThermControl Projektes wurde ein Bedien- und Feedback-System entwickelt, welches in der Lage ist, jegliche Parameter visuell darzustellen. Eine Anbindung direkt an das Fahrzeug erfordert eine darüber hinausgehende entsprechende Konfigurierung des Fahrzeuginformationssystems. Um die Integration des Klima-Interfaces in das Fahrzeuginformationssystem zu ermöglichen, wurde im Projekt eine CAN-Bus Schnittstelle zum Datenserver und Klima-Interface des ThermControl Systems implementiert. Auf Basis dieser Schnittstelle ist die Integration nun möglich.

## 5 AP 4: Prototypische Umsetzung und Erprobung im Fahrzeug

Ziele dieses Arbeitspaketes:

- Festlegung der Anforderungen an die Serienproduktion bzgl. Wechselwirkung mit Innenraumdesign, Einbauort, Lebensdauer (siehe Abschnitt 4.4)
- Hardwareumsetzung (siehe Abschnitt 4.3, 4.4 und 4.6)
- System IR Sensorik (siehe Abschnitt 3.5)
- System Sitz und Sensorik (siehe Abschnitt 3.4 und 4.6)

- System EneffThermControl / Thermomanagement (siehe Abschnitt 3.2)
- Überprüfung der Wirksamkeit des regelungstechnischen Systems (siehe Abschnitt 4.7)
- Einsatz und Test der Technologie im Klimakanal (Aufheiz- und Abkühlvorgänge, siehe Abschnitt 3.1)
- Abschließende Bewertung durch Testpaneel (begrenzter Umfang, siehe Abschnitt 4.12)
- Einsatz vorhandener Klimamesssysteme zur Bewertung der thermischen Behaglichkeit (Nutzung des fertigen Systems aus dem BMBF Projekt E-Komfort, kritischer Meilenstein, siehe Abschnitt 5.1)
- Monitoring des Energieverbrauchs durch kalorimetrische Messungen am Gesamtsystem und Bewertung der Energieeffizienz (siehe Abschnitt 4.12)

## **5.1 Einsatz vorhandener Klimamesssysteme zur Bewertung der thermischen Behaglichkeit**

Vorhandene Klimamesssysteme zur Behaglichkeitsbewertung kamen im Verlauf des Projektes als etablierte Referenzsysteme zum Einsatz. Diese Messsysteme wurden in das ThermControlSystem integriert, sodass in Echtzeit Vorhersagen des entwickelten Systems mit Bewertungen bestehender Methoden verglichen werden konnten.

### **5.1.1 Messbaum für die Erfassung des PMV/PPD Indexes**

Eine Vergleichsmessmethode im EneffThermControl Projekt war ein Behaglichkeitsmessbaum zur messtechnischen Erfassung der thermischen Behaglichkeit nach ISO 7730 (vgl. Abbildung 48) (ISO 7730: 2005, 2006).

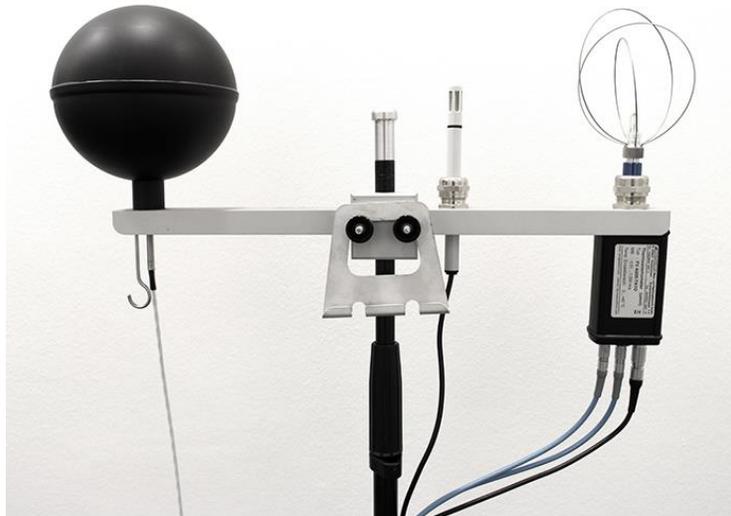


Abbildung 48: Behaglichkeitsmessbaum zur messtechnischen Erfassung der thermischen Behaglichkeit nach ISO 7730 (ISO 7730: 2005, 2006)

Die ISO 7730 beinhaltet Messmethoden zur Erfassung unterschiedlicher klimatischer Parameter, die in der ISO 7726 ebenso beschrieben sind. Die einzelnen benötigten Sensoren sowie die zugehörige Messwerte sind in Tabelle 6 aufgelistet.

Tabelle 6: Sensoren für Messung klimatischer Parameter beschrieben in ISO 7726 (ISO 7726, 1998).

Sensor	Messwert	Zeichen	Einheit
Thermoanemometer	relative Luftgeschwindigkeit	$v_{rel}$	[m/s]
Globethermometer	mittlere Strahlungstemperatur	$\vartheta_g$	[°C]
Feuchte- und Temperatursensoren	Relative Feuchte	r.F	[%]
	Mischungsverhältnis	MH	[g/kg]
	Taupunkttemperatur	$\vartheta_s$	[°C]
	mittlere Umgebungstemperatur	$\vartheta_a$	[°C]

Die ISO 7730 definiert einen Index namens PMV (Predicted Mean Vote), welcher die thermische Behaglichkeit ordinal anhand einer 7-Punkte Skala von -3 bis 3 einteilt (vgl. Tabelle 7).

Tabelle 7: PMV Skala nach ISO 7730 (ISO 7730: 2005, 2006)

+3	heiß
+2	warm
+1	leicht warm
0	neutral
-1	leicht kühl
-2	kühl
-3	kalt

Nach ISO 7730 wird der PMV mithilfe folgenden physikalischen Parametern errechnet: Lufttemperatur (hier die mittlere Umgebungstemperatur), mittlere Strahlungstemperatur, relative Luftgeschwindigkeit und dem Wasserdampfpartialdruck (Berechnungsvorschrift siehe ISO 7730) sowie der geschätzten metabolischen Rate des Menschen und der Wärmewiderstand der Bekleidung. Weiterhin kann der PMV in einen Wert namens PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) überführt werden, welcher den durchschnittlichen prozentualen Anteil an Menschen beschreibt, die sich thermisch unkomfortabel fühlen.

### 5.1.2 Klimamessereinrichtung nach DIN EN ISO 14505-2

Eine Vergleichsmessmethode im EneffThermControl Projekt für die Bewertung der lokalen thermischen Behaglichkeit stellt die Methode der Äquivalenttemperatur als Klimasummenmaß dar. Das System verwendet beheizte Sensoroberflächen, die die Wärmeabgabe der menschlichen Haut emulieren. Die Messmethode ist in der Normenreihe ISO 14505-2 definiert (ISO 14505-2, 2004), welche einen Standard für die Bewertung des lokalen thermischen Komforts in Fahrzeugen festlegt. Abbildung 49 zeigt die Klimamessereinrichtung im Einsatz (links) zusammen mit der Echtzeit Darstellung im Datenserver gemäß Farbskala (rechts).

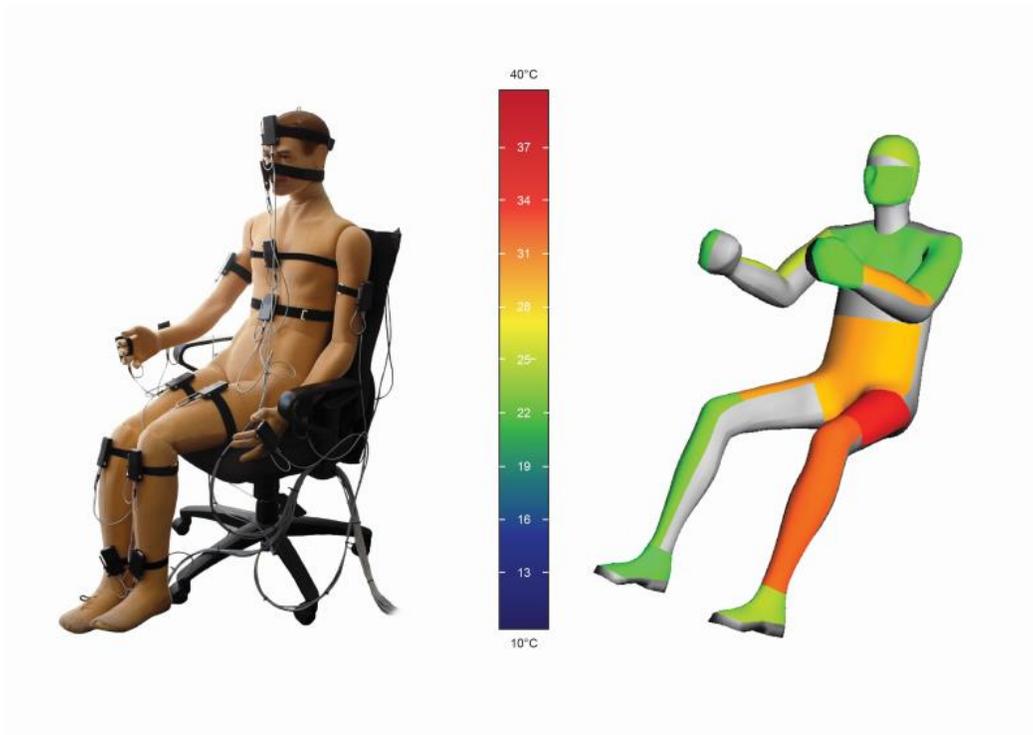


Abbildung 49: Klimamesseinrichtung nach ISO 14505-2 Messpuppe (links) und die dazugehörige 3D Darstellung (rechts)

Die Evaluierung des thermischen Komforts nach ISO 14505-2 basiert auf der messtechnischen Ermittlung der sogenannten Äquivalenttemperatur, welche im engen Bezug zum thermischen Komfort des Menschen steht. Die Äquivalenttemperatur ist wie folgt definiert: sie ist „die uniforme Temperatur eines gedachten Raums mit Luftgeschwindigkeit gleich Null in der eine Person den gleichen trockenen Wärmeaustausch durch Strahlung hat wie in der eigentlichen nicht-uniformen Umgebung“ (ISO 14505-2, 2004). Die Berechnung basiert auf folgenden Gleichungen für den Wärmetransport durch Strahlung und den konvektiven Wärmetransport, die an der Oberfläche der bekleideten Personen stattfinden.

$$R = h_r \times (t_{sk} - \bar{t}_r)$$

$$C = h_c \times (t_{sk} - t_a)$$

$R$  ist der Wärmeaustausch durch Strahlung in  $W/m^2$ ,  $C$  ist der Wärmeaustausch durch Konvektion in  $W/m^2$ ,  $h_c$  ist der konvektive Wärmeübergangskoeffizient in  $W/Km^2$ ,  $t_{sk}$  ist

die Hautoberflächentemperatur in °C,  $\bar{t}_r$  ist die mittlere Strahlungstemperatur in °C und  $t_a$  ist die mittlere Umgebungstemperatur in °C.

In der Anwendung wird die Äquivalenttemperatur mit folgender Formel bestimmt:

$$t_{eq} = t_s - \frac{Q}{h_{cal}}$$

Wobei gilt:

$$Q = R + C$$

Q ist der gemessene Wärmeverlust durch Konvektion und Strahlung unter realen Bedingungen,  $h_{cal}$  ist der kombinierte Wärmeübergangskoeffizient, bestimmt durch die Kalibrierung in einer Umgebung entsprechend den Bedingungen des standardisierten Raumes (wie oben beschrieben),  $t_s$  ist die Oberflächentemperatur des Sensors und  $t_{eq}$  ist die Temperatur des standardisierten Raumes. Der standardisierte Raum besitzt homogene, uniforme thermische Bedingungen mit  $t_a = \bar{t}_r$  und einer Luftgeschwindigkeit kleiner 0,1 m/s. In der ISO 14505-2 sind verschiedene Typen der Äquivalenttemperatur definiert, wobei von den. Mit dem verwendeten Messwertempfänger wird eine lokale, gerichtete Äquivalenttemperatur  $t_{eq, direct}$  gemessen. Die Berechnung der gerichteten Äquivalenttemperatur basiert auf den beschriebenen Gleichungen. Für eine genaue Beschreibung der Berechnung wird der Leser auf die Norm ISO 14505-2 verwiesen (ISO 14505-2, 2004).

Den gemessenen Äquivalenttemperaturen werden mithilfe eines Beurteilungsschemas, welches ebenfalls in der ISO 14505-2 aufgeführt ist, in subjektive Bewertungswerte überführt. Die Bewertung wird als LMV (Local Mean Vote) bezeichnet und ist eine einheitslose Größe zwischen 1 (zu kalt) und 5 (zu warm). Ein Wert von 3 beschreibt die thermische Neutralität.

Hierzu kommen statistisch errechnete, lineare Funktionen zur Verwendung, welche auf einer breiten Grundlage von Probandendaten beruhen. Diese Funktionen sind dargestellt in Abbildung 50 und Abbildung 51 (links für den Sommerfall und rechts für den Winterfall).

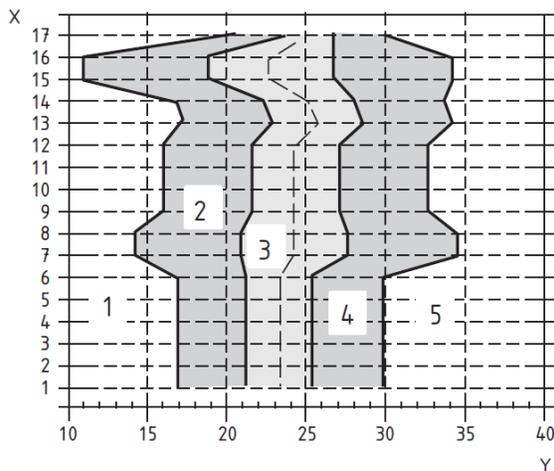


Abbildung 50: Evaluationschema für die Zuordnung von Äquivalenttemperaturen auf den LMV (Sommerfall)

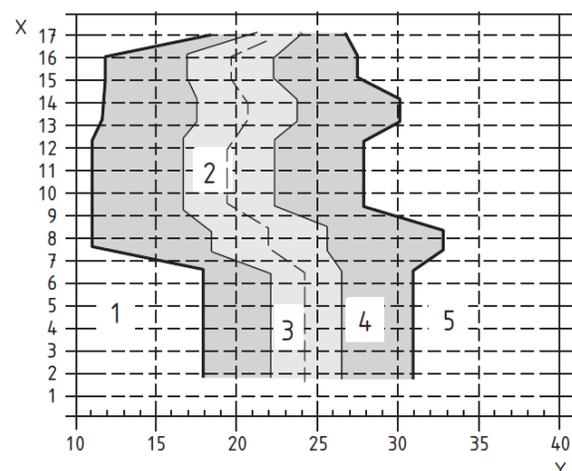


Abbildung 51: Evaluationschema für die Zuordnung von Äquivalenttemperaturen auf den LMV (Winterfall)

Die Klimamesseinrichtung wird über die CAN Software an den Datenserver angeschlossen und liefert die entsprechenden Äquivalenttemperaturen für jeden Messwertaufnehmer. Weitere Daten die optional abrufbar sind, sind die Oberflächentemperatur, die Lufttemperatur und die elektrische Leistung jedes Messwertaufnehmers. Die Berechnung des LMV ist als interne Modellklasse in den Datenserver integriert, da die Berechnung in linearer Zeit erfolgen kann (siehe Abschnitt 0).

### 5.1.3 Hauttemperatursensoren

Für den Vergleich und die Validierung mit herkömmlichen Messmethoden des thermischen Komforts wurden im EneffThermControl Projekt zur Ermittlung von Hautoberflächentemperaturen PT100 Sensoren (Platin-Widerstandssensoren) mit einer einseitigen Kontaktfläche verwendet (vgl. Abbildung 52). Die Sensoren werden mit

medizinischem Klebepflaster an der Hautoberfläche befestigt (vgl. Abbildung 52). Die hautabgewandte Seite ist zusätzlich mit einer Kleberbeschichtung isoliert. Durch die gleichzeitige Zusammenführung der Daten im Datenserver kann eine genaue Analyse der Messeigenschaften oder eine Fusion beider Systeme erfolgen.



Abbildung 52: PT100 Sensoren werden im EneffThermControl Projekt als Messfühler zur Erfassung der Hautoberflächentemperatur für die Validierung und den Vergleich der Infrarotmessung mit herkömmlichen Messmethoden verwendet (Metzmacher, Wölki, Schmidt, Frisch, & van Treeck, 2017)

Daten der PT100 Sensoren werden über die serielle COM Schnittstelle in den Datenserver integriert. Hierzu wird ein Multi-Kanal Datenlogger (Data Taker DT85, dataTaker) verwendet (vgl. Abbildung 53). Der Datenlogger wird entsprechend konfiguriert, sodass ein passendes CSV Format über die COM Schnittstelle geschickt, welches vom Datenserver anschließend interpretiert werden kann.



Abbildung 53: Foto des Data Taker DT85 Multi-Kanal Datenloggers (Thermo Fisher Scientific Inc., 2017)

## **6 AP 5: Technologietransfer**

Ziele dieses Arbeitspaketes:

- Übertragung in Lehrinhalte (schwerpunktmäßig FH Ostfalia, auch andere Hochschulen u. Univ.) (siehe Abschnitt 0)
- Ableitung von Richtlinien für Entwicklungsprozess von Serienfahrzeugen (siehe Abschnitt 6.2)
- Begleitende Normungsaktivitäten (siehe Abschnitt 6.3)

### **6.1 Übertragung der Lehrinhalte**

Die im EneffThermControl Projekt gewonnen Erkenntnisse wurden in verschiedene Lehrveranstaltungen integriert. In der vom Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen an der RWTH angebotenen Veranstaltung “Energiemonitoring und Raumklimawirkung” wird das körpernahe Klimatisierungskonzept zur Reduzierung von Energieverbräuchen sowie die erprobte Sensorfusion vermittelt. Weiterhin werden hier Aspekte zur gekoppelten Simulation menschlicher Thermophysiologie gelehrt. Darüber hinaus wurden Lehrinhalte aus dem EneffThermControl Projekt an der FH Ostfalia übertragen.

### **6.2 Ableitung von Richtlinien für Entwicklungsprozess von Serienfahrzeugen**

Auf Basis der im EneffThermControl Projekt gewonnen Erkenntnisse konnten Erkenntnisse für die Einbindung in realen Serienfahrzeugen erstellt werden. Wichtige Erfahrungen aus dem Projekt sind hier die abgeleiteten hardware- und softwaretechnischen Anforderungen sowie Anforderungen an die Nutzerinteraktion, die im Fahrzeug Mockup und im Testfahrzeug untersucht wurden. Im EneffThermControl Projekt wurde darauf geachtet eine möglichst generische Plattform zu schaffen die es ermöglichte, entsprechend skalierte Architekturen abzuleiten die für eine Überführung im Serienfahrzeug geeignet sind. Weiterhin konnten Erkenntnisse einfließen über die

Anbindung des Systems an bestehende Assistenzsystem im Fahrzeug sowie über die mögliche Echtzeit Interaktion mit Fahrzeuginsassen.

### **6.3 Begleitende Normungsaktivitäten**

Im Zuge des Projektes wurden begleitende Normungsaktivitäten initiiert. Diese betreffen die Normierung einer neuen Methodik zur Bewertung von Kontaktwärmeproblemen mit Hilfe einer neuartigen Größe, der sogenannten Äquivalenten Kontakttemperatur. Prof. van Treeck und Dr. Wölki sind Mitglieder im internationalen Gremium ISO TC 159 SC 5 WG 1 und federführend zuständig für die Überarbeitung der Normenreihe ISO 14505. Die weitere Ausarbeitung erfolgt in einem gemeinsamen vorwettbewerblichen Projekt mit der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT).

### **6.4 Ökologische, Technologische und Ökonomische Bewertung**

Auf Basis der Projekterfahrungen, des in Abschnitt 4.7 vorgestellten Experiments sowie der Erfahrungen, die in den Projekten FAT I (Schmidt, Praster, Wölki, Wolf, & van Treeck, 2013) und FAT II (Schmidt, Veselá, Bidhendi, Rudnick, & van Treeck, 2015) mit dem Einsatz lokal am Menschen wirkender Klimatisierungseinrichtungen gesammelt werden konnten, wird deutlich, dass das in EneffThermControl entwickelte Gesamtsystem einen vielversprechenden Ansatz zur deutlichen Verbesserung der energetischen Effizienz der Fahrzeugklimatisierung darstellt. Dies ist nicht nur im Kontext neuer Fahrzeugarchitekturen zu sehen, sondern auch vor dem Hintergrund konventioneller Antriebstechnologien bzw. Plug-In Hybridlösungen. Auch hier ist durch den Einsatz des entwickelten Systems mit einer energetischen Optimierung zu rechnen und somit auch mit einer Absenkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen. Kennwerte bezüglich des Einsparpotentials von Klimageräten, welche auf einer komfortgeführten Regelungsstrategie basieren, wurden in internen Studien des assoziierten Partners, Volkswagen AG, ermittelt.

Besonders bedeutend ist die in EneffThermControl entwickelte Technologie vor dem Hintergrund neuer Fahrzeugarchitekturen im Kontext des autonomen Fahrens und vor dem Hintergrund neuer Assistenzsysteme zu bewerten. In künftigen Architekturen und

Innenraumdesigns werden Insassen während der Fahrt andere Sitzpositionen (Liegen, gedrehter Sitz zur Kommunikation, Meeting etc.) einnehmen. Bestehende Systemansätze der Fahrzeugklimatisierung mit der typischen Anordnung von Klimagerät und Personenausströmern sind auf diese neuen Architekturen nicht übertragbar. Hier besteht ein fundamentales und zu lösendes Problem. Künftige Ansätze erfordern hochmodulare Baukastensysteme, die in der Lage sind, vor dem Kontext der Veränderungen, ein lokal komfortables Mikroklima um einzelne Insassen zu erzeugen. Hierfür liefert die EneffThermControl Technologie eine passende Antwort und schafft die notwendigen Voraussetzungen zur Ansteuerung lokaler Klimasysteme. Gleichzeitig bestehen hohe Anforderungen aus Sicht der Individualisierung, des Bedienkomforts und der Vernetzung (Internet of Things). Auch in diesem Zusammenhang liefert die EneffThermControl Technologie einen vielversprechenden Lösungsansatz.

Ein weiterer wichtiger Punkt der im Kontext von EneffThermControl eine zentrale Rolle spielte ist die Akzeptanzsteigerung von E-Fahrzeugen, welche unter anderem auch an eine deutliche Reichweitensteigerung der Fahrzeuge gebunden ist. Vor diesem Hintergrund und unter Berücksichtigung der energieeffizienteren Klimatisierung von Fahrzeuginsassen mit Hilfe körpernaher Klimasysteme (Schmidt C. , 2016) wird deutlich, dass das in EneffThermControl entwickelte Gesamtsystem auch in Zukunft für die Serienreife von Elektrofahrzeugen von hoher Relevanz ist. Die Kombination aus Personentracking, Infrarotsignatuererkennung, Sensordatenfusion, lokaler Klimatisierungsmaßnahmen sowie einem voll skalierbaren/individualisierbaren Thermoregulationsmodell (Wölki, 2017), welches den thermischen Zustand eines menschlichen Individuums in einem Modellprädiktiven Ansatz prognostiziert und somit erstmalig eine komfortgeführte Klimaregelungsstrategie verwendet, stellt dabei einen entsprechenden Regelungsansatz dar.

Weiterhin ist aufgrund des zunehmenden Preisverfalls hinsichtlich verfügbarer Informationstechnologien mit einem Anstieg der verfügbaren Rechenleistung (Computertechnologie) zu rechnen. Dies bedingt wiederum, dass die entsprechende Technologie der breiten Masse zur Verfügung gestellt werden kann.

Die zusätzliche Verfügbarkeit nutzerspezifischer Information wie Alter, Geschlecht, Gewicht oder physiologischer Kennwerte wie Puls oder Aktivität einer Person kann schließlich genutzt werden um den Rechenalgorithmus der modellprädiktiven Regelung

zu optimieren und somit den Klimakomfort eines Individuums anzupassen. Als Konsequenz ist wiederum mit einer Steigerung der Energieeffizienz von zukünftigen Fahrzeugtechnologien zu rechnen.

## 6.5 Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse

Die folgenden Publikationen sind bereits eingereicht. Weitere Publikationen werden auf dem in diesem Projekt entwickelten Gesamtsystem aufbauen.

Tabelle 8 enthält eine Übersicht über Vorträge und Publikationen die aus dem EneffThermControl Projekt hervorgehen.

Tabelle 8: Vorträge und Publikationen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse

<b>Titel</b>	<b>Tagungsort</b>	<b>Jahr</b>
Bewertung vertikaler Belüftungskonzepte hinsichtlich des thermischen Komforts (Boughanmi, Enke, & van Treeck, 2016)	Stuttgart	2016
Numerical evaluation of vertical air ventilation systems for future car cabins (Boughanmi, Enke, Frisch, & van Treeck, 2016)	Ghent	2016
Individualisierung des Klimakomforts (van Treeck, Individualisierung des Klimakomforts, 2016)	Stuttgart	2016
Thermische Behaglichkeit in Elektrofahrzeugen (Schmidt & van Treeck, 2016)	Stuttgart	2016
Energy-Efficient Climate Control in Electric Vehicles Through Innovative Sensor Technology and Novel Methods for Thermal Comfort	Berlin	2016

Evaluation (Metzmacher, Wölki, Schmidt, Frisch, & van Treeck, 2016)		
Real-time human skin temperature analysis using thermal image recognition for thermal comfort assessment (Metzmacher, Wölki, Schmidt, Frisch, & van Treeck, Eingereicht) (siehe Abschnitt 6.5.1)	Journal-Artikel	Eingereicht
Real-time Assessment of Human Thermal Comfort Using Image Recognition in Conjunction with a Detailed Numerical Human Model (Metzmacher, Wölki, Schmidt, Frisch, & van Treeck, 2017) (siehe Abschnitt 6.5.2)	San Francisco	2017
Human Centered Closed Loop Comfort Control (HCCLC) – Energieeffiziente Komfortmodellbasierte Fahrzeugklimatisierung (van Treeck, 2017)	München	2017

### **6.5.1 Analyse der Hauttemperatur mithilfe von thermografischer Bilderkennung**

Diese Publikation beschäftigt sich mit der thermografischen Messung und Verfolgung von Hauttemperaturen und beinhaltet eine Reihe von Versuchen welche die thermografische Vorgehensweise mit herkömmlichen Methoden vergleicht. Die Versuche wurden innerhalb des EneffThermControl Projektes durchgeführt um die Richtigkeit der Thermografiemessung in diesem System zu validieren. Dies ist wichtig, da die akkurate Bestimmung der Hauttemperatur bei der kontaktlosen Komfortbewertung ausschlaggebend für die Richtigkeit der anschließenden Umformungen ist.

Speziell wurde in der Publikation die Nutzung des Referenztemperatursensors validiert (siehe Abschnitt 3.5.4), ein Vergleich mit PT100 Hauttemperatur Sensoren angestellt (siehe 5.1.3), Temperaturverteilung auf der Haut sowie Auswirkung von Bekleidungsschichten auf die gemessene Temperatur untersucht

Für die Versuchsdurchführung wurde das im EneffThermControl Projekt entwickelte Gesamtsystem genutzt. Versuche wurden in der Laborumgebung (siehe Abschnitt 3.1) durchgeführt. Abbildung 54 zeigt den Vergleich zwischen einer Messung mit der IR Kamera und einem PT100 Sensor. Hierbei wurde beispielhaft die Körperregion Stirn oder „Forehead Center“ gewählt. Der PT100 Sensor wurde bei einer Testperson angebracht, auf die gleichzeitig die IR Kamera mit der angeschlossenen Bilderkennungssoftware gerichtet war.

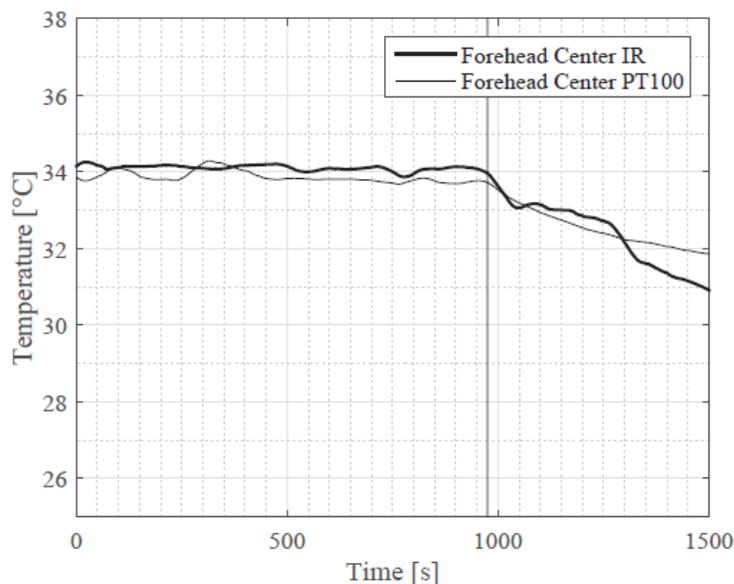


Abbildung 54: Messergebnisse der *Forehead center* Region vom PT100 Sensor und von der thermografischen Kamera

Abbildung 55 zeigt einen Auszug aus dem Versuch um den Effekt von Bekleidungsschichten auf die Infrarotmessung der Haut zu bewerten. In der praktischen Anwendung ist der menschliche Körper von Kleidung bedeckt sodass es nötig ist die entsprechenden Einflüsse zu untersuchen. Das Experiment wurde durchgeführt mit drei verschiedenen Bekleidungsschichten welche gleichzeitig an leicht unterschiedlichen

Positionen im Brustbereich angebracht wurden. Für eine ausführliche Beschreibung der Experimente und Ergebnisse siehe (Metzmacher, Wölki, Schmidt, Frisch, & van Treeck, 2017).

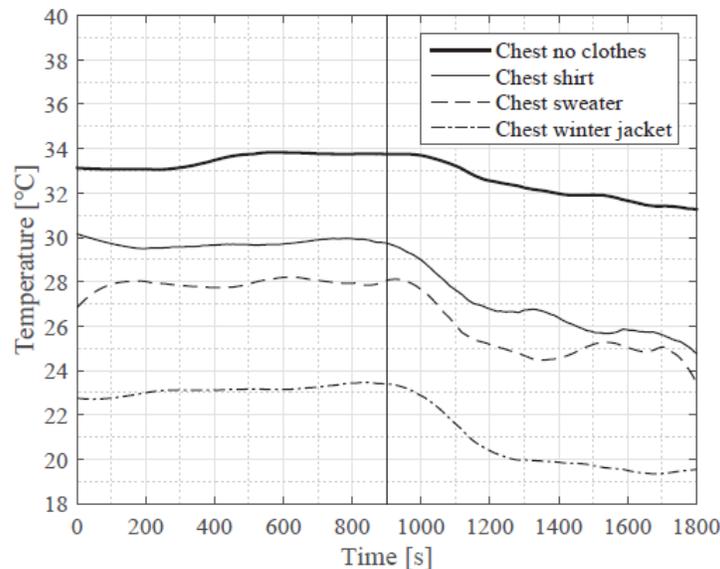


Abbildung 55: Temperaturen der Haut- und Bekleidungsschichten gemessen von der Thermografiekamera

### 6.5.2 Bewertung des thermischen Komforts mithilfe von thermografischer Bilderkennung und numerischen Modellen

Diese Publikation stellt das im EneffThermControl-Projekt entwickelte Gesamtsystem vor und zeigt, wie für die IR-Kamera nicht sichtbare Körperbereiche mit einem Physiologiemodell „MORPHEUS“ (Wölki, 2017) ergänzt werden können. Dies erlaubt eine vollständige lokale und globale Komfortbewertung bei unvollständigen Informationen der Thermografiekamera. Diese Publikation ist wichtig, um die Robustheit der Komfortbewertung im Fahrzeug sicherzustellen und eine Augmentierung der optischen Erkennung durch zusätzliche Sensorik zu ermöglichen. Wird das Infrarotsignal gestört muss das Thermophysiologiemodell greifen und anhand einer Teilmenge der gesamten möglichen Information eine möglichst genaue Aussage treffen.

Abbildung 56 zeigt einen Vergleich zwischen der errechneten Äquivalenttemperatur auf Basis der IR Kamera Information und der Äquivalenttemperatur wie sie vom MORPHEUS Modell bestimmt wurde. Zwar besteht ein vertikaler Offset zwischen den Werten jedoch kann ein gute Voraussage getroffen werden die die sensorische Abfrage in der praktischen Anwendung unterstützen wird. Für weitere Informationen wird der Leser an die Original Publikation verwiesen (Metzmacher, Wölki, Schmidt, Frisch, & van Treeck, Real-time Assessment of Human Thermal Comfort Using Image Recognition in Conjunction with a Detailed Numerical Human Model, 2017) (eingereicht).

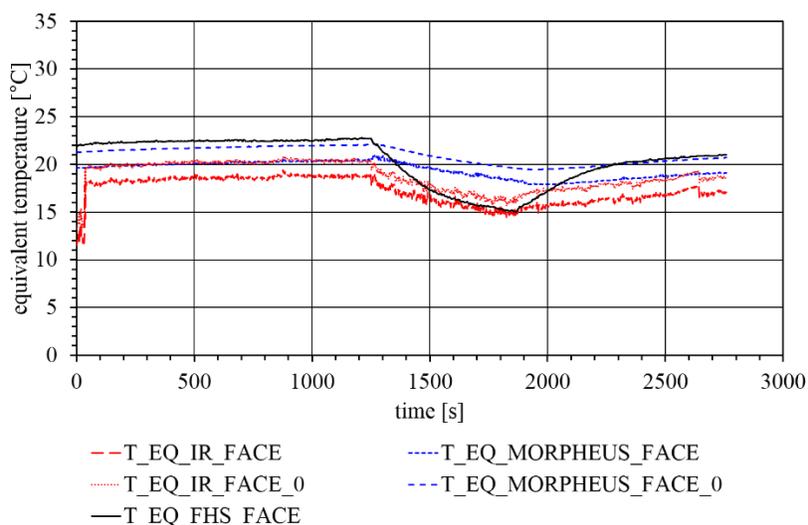


Abbildung 56: Vergleich zwischen den Äquivalenttemperatur  $T_{eq}$  für das unbedeckte Gesicht (Metzmacher, Wölki, Schmidt, Frisch, & van Treeck, 2017)

## 7 Fazit

Das in EneffThermControl entwickelte Gesamtsystem bietet weitreichende und zukunftssträchtige Lösungen zur Reduzierung des Energieverbrauchs und CO<sub>2</sub>-Ausstoßes bestehender und zukünftiger Fahrzeugarchitekturen.

Der Einsatz von Trackingalgorithmen, Infrarotsignatuererkennung, der Fusionierung diverser und beliebig erweiterbarer Sensorinformation, welche Aufschluss über den aktuellen thermischen Zustand eines menschlichen Individuums und somit über dessen thermischen Komfort geben, wurde erstmals mit einem numerischen Abbild eines Menschen in einem modellprädiktiven Ansatz fusioniert.

Eine auf diesem System basierende komfortgeführte Regelung, welche lokal am Menschen wirkender Klimatisierungsmaßnahmen verwendet, ermöglicht die Erzeugung eines auf den Fahrzeuginsassen zugeschnittenen lokalen Komfortbereiches, was vor allem auch vor dem Hintergrund des autonomen Fahrens von hoher Relevanz sein wird. Hier werden künftige Architekturen und Innenraumdesigns so gestaltet sein, dass bestehende Systemansätze der Fahrzeugklimatisierung mit der typischen Anordnung von Klimagerät und Personenausströmern nicht anwendbar sind, wodurch ein fundamentales Problem entsteht, welches es zu lösen gilt. Aus diesem Grund erfordern künftige Ansätze hochmodulare Baukastensysteme, die in der Lage sind ein lokal komfortables Mikroklima um einzelne Insassen zu erzeugen. Die dazu notwendige Technologie wird durch EneffThermControl bereits jetzt bereitgestellt. Gleichzeitig bestehen hohe Anforderungen aus Sicht der Individualisierung, des Bedienkomforts und der Vernetzung (Internet of Things). Auch in diesem Zusammenhang liefert die EneffThermControl Technologie einen vielversprechenden Lösungsansatz.

Bei der Entwicklung des Gesamtsystems wurde dabei insbesondere auf Portabilität geachtet, das heißt, die verwendeten Hardware-Komponenten (z.B. die Verwendung eines CAN-Interfaces) wurden so ausgewählt, dass das System mühelos in bestehende Regelungskonzepte in aktuellen Fahrzeugen eingebunden werden kann, da entsprechende Schnittstellen zur Serienhardware bereits im System integriert sind.

Die Konzipierung und Umsetzung innovativer Sensorik zur berührungslosen, kamerabasierten Erfassung der Gestik und Infrarotsignatur eines Fahrzeuginsassen und dessen daraus abgeleitetem individuellen Behaglichkeitszustand ist dabei in enger Zusammenarbeit mit den einzelnen Projektpartnern erfolgt. Aus diesem Entwicklungsprozess sind bei den KMUs neuartige Technologien zur Kalibrierung von Infrarotkamarasystemen sowie zur objektivierten Messung des Behaglichkeitszustands einer Person nach (ISO 14505-2, 2004) hervorgegangen.

Die in EneffThermControl verwendeten Thermophysiologie- und Behaglichkeitsmodelle, welche in zahlreichen Vorprojekten am Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen entwickelt wurden, konnten im Verlauf des Projekts konsequent weiterentwickelt und getestet werden und sind zur Vorhersage des Behaglichkeitszustandes eines Fahrzeuginsassen einsetzbar. Eine darauf aufbauende, bedarfsorientierte Ansteuerung entsprechender Klimatisierungsaktuatoren konnte in einem von der Volkswagen AG zur Verfügung gestellten Golf VII (Klimaerlebnisfahrzeug) realisiert werden und zeigt die Portierbarkeit des Gesamtsystems sowie die Möglichkeit des Einsatzes in einem seriennahen Fahrzeug. Eine Volkswagen-interne energetische Betrachtung einzelner lokal wirkender Klimatisierungsmaßnahmen zeigt weiterhin deutlich die ökologische und ökonomische Relevanz dieser Technologien für zukünftige Fahrzeugplattformen.

Zusammenfassend konnte mit dem in EneffThermControl entwickelten Gesamtsystem eine vielversprechende Ausgangsplattform für weitere zukünftige Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten entwickelt werden, die in Richtung individueller, komfortgeführter Regelungsstrategien abzielen. Ein mögliches Risiko besteht dabei sowohl in der Verfügbarkeit günstiger Infrarotkamarasysteme oder entsprechender Alternativen zur berührungslosen Erfassung des aktuellen thermischen Zustands eines Fahrzeuginsassen, welche in Serienprodukte integriert werden können, als auch in der Nutzerakzeptanz. Letztere ist auch an die Möglichkeit der aktiven Beeinflussung der Klimaregelung gebunden.

## 8 Verweise und Quellen

- Alfaro, M., Paez, G., & Strojnik, M. (2008). Calibration and evaluation of EuTTA fluorescence as active medium for IR-to-visible conversion. 7082, 70820U-70820U-10. doi:10.1117/12.796972
- Andersson, C., Åkesson, J., & Führer, C. (2016). *PyFMI: A Python package for simulation of coupled dynamic models with the functional mock-up interface*. Tech. rep., Centre for Mathematical Sciences, Lund University.
- ANSI/Ashrae. (2004). Standard 55-2004, Thermal environmental conditions for human occupancy. *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineering, Atlanta, GA*.
- ANSI/Ashrae. (2013). Standard 55-20013, Thermal environmental conditions for human occupancy. *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineering, Atlanta, GA*.
- Ariyaratnam, S., & Rood, J. P. (1990). Measurement of facial skin temperature. *Journal of dentistry, 18*, 250-253.
- ASHRAE Standard, 5. (2013). *Thermal environmental conditions for human occupancy*.
- Balaras, C. A., & Argiriou, A. A. (2002). Infrared thermography for building diagnostics. *Energy and Buildings*, 34, 171-183. doi:http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00105-0
- Banhazi, T., Kitchen, J., & Tivey, D. (2009). Potential of using infrared thermography for determination of skin wetness and thus perceived thermal comfort of pigs. *Australian Journal of Multi-disciplinary Engineering, 7*, 47-54.
- Barreira, E., & de Freitas, V. P. (2007). Evaluation of building materials using infrared thermography. *Construction and Building Materials*, 21, 218-224. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.06.049
- Boughanmi, N., Enke, L., & van Treeck, C. (2016). Bewertung vertikaler Belüftungskonzepte hinsichtlich des thermischen Komforts. *VDI-Fachkonferenz. Leinfelden-Echterdingen bei Stuttgart*.
- Boughanmi, N., Enke, L., Frisch, J., & van Treeck, C. (2016). Numerical evaluation of vertical air ventilation systems for future car cabins. *The 14th International Conference Of Indoor Air Quality And Climate*. Ghent.

- Bradski, G., & Kaehler, A. (2008). *Learning OpenCV: Computer vision with the OpenCV library*. " O'Reilly Media, Inc."
- Bradski, G., & others. (2000). The opencv library. *Doctor Dobbs Journal*, 25, 120-126.
- Bulcao, C. F., Frank, S. M., Raja, S. N., Tran, K. M., & Goldstein, D. S. (2000). Relative contribution of core and skin temperatures to thermal comfort in humans. *Journal of Thermal Biology*, 25, 147-150.
- Chu, S., & Majumdar, A. (2012). Opportunities and challenges for a sustainable energy future. *Nature*, 488, 294-303. doi:doi:10.1038/nature11475
- Clark, R. P., Mullan, B. J., & Pugh, L. G. (1977). Skin temperature during running--a study using infra-red colour thermography. *The Journal of physiology*, 267, 53.
- Clarke, J. (2015). A vision for building performance simulation: a position paper prepared on behalf of the IBPSA Board. *Journal of Building Performance Simulation*, 8, 39-43. doi:DOI:10.1080/19401493.2015.1007699
- Colonna, M., Moncalero, M., Nicotra, M., Pezzoli, A., Fabbri, E., Bortolan, L., . . . Schena, F. (2014). Thermal Behaviour of Ski-boot Liners: Effect of Materials on Thermal Comfort in Real and Simulated Skiing Conditions. . *Procedia Engineering* , 72, 386-391. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2014.06.066
- Dai, C., Zheng, Y., & Li, X. (June 2005). Layered Representation for Pedestrian Detection and Tracking in Infrared Imagery. *Computer Vision and Pattern Recognition - Workshops, 2005. CVPR Workshops. IEEE Computer Society Conference on*, (S. 13-13). doi:10.1109/CVPR.2005.483
- (2014). *Data Sheet eBUS SDK*. Pleora Technologies Inc. Von <http://www.pleora.com/support-center/documentation-and-downloads/ebus-sdk-data-sheet> abgerufen
- Dear, D. a., Brager, G. S., Reardon, J., Nicol, F., & others. (1998). Developing an adaptive model of thermal comfort and preference/Discussion. *ASHRAE transactions*, 104, 145.
- DIN EN ISO, 7. (2006). *Ergonomics of the thermal environment: Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria (ISO 7730:2005)*.
- DIN EN ISO, 9. (2007). *Ergonomics of the thermal environment: Estimation of thermal insulation and water vapour resistance of a clothing ensemble (ISO 9920:2007)*.

- Dirac, P. A. (1953). The lorentz transformation and absolute time. *Physica* , 19, 888-896.  
doi:10.1016/S0031-8914(53)80099-6
- Fayazbakhsh, M. A., & Bahrami, M. (2013). *Comprehensive modeling of vehicle air conditioning loads using heat balance method*. SAE Technical Paper.
- Feynman, R. P., & Jr., F. L. (1963). The theory of a general quantum system interacting with a linear dissipative system. *Annals of Physics* , 24, 118-173.  
doi:10.1016/0003-4916(63)90068-X
- Fiala, D., Lomas, K. J., & Stohrer, M. (1999). A computer model of human thermoregulation for a wide range of environmental conditions: the passive system. *J Appl Physiol*, 87, 1957–1972.
- Fiala, D., Lomas, K. J., & Stohrer, M. (2001). Computer prediction of human thermoregulatory and temperature responses to a wide range of environmental conditions. *Int J Biometeorol*, 45, 143-159.
- Gagge, A. P., Stolwijk, J. A., & Hardy, J. D. (1967). Comfort and thermal sensations and associated physiological responses at various ambient temperatures. *Environmental research*, 1, 1-20.
- Goody, R. M., & Yung, Y. L. (1989). Atmospheric radiation: theoretical basis. *Atmospheric radiation: theoretical basis, 2nd ed., by Richard M. Goody and YL Yung*. New York, NY: Oxford University Press, 1989, 1.
- Grothe, C. (2013). *Evaluation und Konzeption einer neuartigen Klimabedienung im Fahrzeug*.
- Han, J., Shao, L., Xu, D., & Shotton, J. (2013). Enhanced computer vision with microsoft kinect sensor: A review. *IEEE transactions on cybernetics*, 43, 1318-1334.
- Hartley, R. I. (1999). Theory and practice of projective rectification. *International Journal of Computer Vision*, 35, 115-127.
- He, W., Yuan, K., Xiao, H., & Xu, Z. (Aug 2011). A high speed robot vision system with GigE vision extension. *Mechatronics and Automation (ICMA), 2011 International Conference on*, (S. 452-457). doi:10.1109/ICMA.2011.5985700
- Herschel, W. (1800). Experiments on the Refrangibility of the Invisible Rays of the Sun. By William Herschel, LL. DFRS. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 90, 284-292.

- Hirschmüller, H. (2008). Stereo processing by semiglobal matching and mutual information. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 30, 328-341.
- Hooshmand, H., Hashmi, M., & Phillips, E. M. (2001). Infrared thermal imaging as a tool in pain management-An 11 year study, Part I of II. *Thermology International*, 11, 53-65.
- ISO 14505-2. (2004).
- ISO 7726. (1998). *Ergonomics of the thermal environment-Instruments for measuring physical quantities (ISO 7726: 1998)*.
- ISO 7730: 2005. (2006). *Ergonomics of the thermal environment. Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*.
- Janson, S., & Welle, R. (2013). The NASA optical communication and sensor demonstration program.
- Klare, B. F., & Jain, A. K. (2013). Heterogeneous face recognition using kernel prototype similarities. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 35, 1410-1422.
- Konz, M., Lemke, N., Försterling, S., & Eghtessad, M. (2011). Spezifische Anforderungen an das Heiz-Klimasystem elektromotorisch angetriebener Fahrzeuge. *FAT-Schriftenreihe*.
- Krig, S. (2014). *Computer Vision Metrics: Survey, Taxonomy, and Analysis*. Apress.
- Ludwig, N., Formenti, D., Gargano, M., & Alberti, G. (2014). Skin temperature evaluation by infrared thermography: Comparison of image analysis methods. *Infrared Physics & Technology*, 62, 1-6.
- Ludwig, N., Trecroci, A., Gargano, M., Formenti, D., Bosio, A., Rampinini, E., & Alberti, G. (2016). Thermography for skin temperature evaluation during dynamic exercise: a case study on an incremental maximal test in elite male cyclists. *Applied Optics*, 55, D126--D130.
- Mayer, H., & Höpfe, P. (1987). Thermal comfort of man in different urban environments. *Theoretical and applied climatology*, 38, 43-49.
- Meola, C., & Carlomagno, G. M. (2004). Recent advances in the use of infrared thermography. *Measurement science and technology*, 15, R27.

- Metzmacher, H., Wölki, D., Schmidt, C., Frisch, J., & van Treeck, C. (2016). Energy-Efficient Climate Control in Electric Vehicles Through Innovative Sensor Technology and Novel Methods for Thermal Comfort Evaluation. *1st ETA Conference*. Berlin, Germany: Springer.
- Metzmacher, H., Wölki, D., Schmidt, C., Frisch, J., & van Treeck, C. (2017). Real-time Assessment of Human Thermal Comfort Using Image Recognition in Conjunction with a Detailed Numerical Human Model. *15th International Conference of the International Building Performance Simulation Association, BS2017*. San Francisco.
- Metzmacher, H., Wölki, D., Schmidt, C., Frisch, J., & van Treeck, C. (2017). Real-time human skin temperature analysis using thermal image recognition for thermal comfort assessment. *Energy and Buildings*.
- Metzmacher, H., Wölki, D., Schmidt, C., Frisch, J., & van Treeck, C. (Eingereicht). Real-time human skin temperature analysis using thermal image recognition for thermal comfort assessment.
- Moré, J. J. (1978). The Levenberg-Marquardt algorithm: implementation and theory. In *Numerical analysis* (S. 105-116). Springer.
- Nadel, E. T., Bullard, R. O., & Stolwijk, J. A. (1971). Importance of skin temperature in the regulation of sweating. *J Appl Physiol*, 31, 80-87.
- Nielsen, R., & Nielsen, B. (1984). Influence of skin temperature distribution on thermal sensation in a cool environment. *European Journal of Applied physiology and occupational physiology*, 53, 225-230.
- Olesen, B. W., & Fanger, P. O. (1973). The skin temperature distribution for resting man in comfort. *Archives des sciences physiologiques*, 27, 385.
- Oliveira, F. D., Moreau, S., Gehin, C., & Dittmar, A. (Aug 2007). Infrared Imaging Analysis for Thermal Comfort Assessment. *2007 29th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, (S. 3373-3376). doi:10.1109/IEMBS.2007.4353054
- Paulke, S., & Wagner, S. (2007). Some considerations on global and local thermal comfort based on Fiala's thermal manikin in THESEUS-FE. EUROSIM 2007.

- Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., & Pout, C. (2008). A review on buildings energy consumption information . *Energy and Buildings* , 40, 394-398. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.03.007>
- Planck, M. (1914). *The theory of radiation*. Blakiston's Son.
- Ramanathan, N. L. (1964). A new weighting system for mean surface temperature of the human body. *Journal of applied physiology*, 19, 531-533.
- Rangel, J., Soldan, S., & Kroll, A. (2014). 3D thermal imaging: Fusion of thermography and depth cameras. *International Conference on Quantitative InfraRed Thermography*.
- Rao, P. (2008). Infrared thermography and its applications in civil engineering. *The Indian Concrete Journal*, 82, 41-50.
- Revel, G. M., Sabbatini, E., & Arnesano, M. (2012). Development and experimental evaluation of a thermography measurement system for real-time monitoring of comfort and heat rate exchange in the built environment. *Measurement Science and Technology*, 23, 035005. Von <http://stacks.iop.org/0957-0233/23/i=3/a=035005> abgerufen
- Ring, E. F. (2006). The historical development of thermometry and thermal imaging in medicine. *Journal of medical engineering & technology*, 30, 192-198.
- Ruddock, W. (2003). Advanced infrared resources. *Infrared Thermography vs. Visible Light*.
- Sakoi, T., Tsuzuki, K., Kato, S., Ooka, R., Song, D., & Zhu, S. (2007). Thermal comfort, skin temperature distribution, and sensible heat loss distribution in the sitting posture in various asymmetric radiant fields. *Building and environment*, 42, 3984-3999.
- Schlenz, D. (2000). *PKW-Klimatisierung: Klimakonzepte, Regelungsstrategien und Entwicklungsmethoden für Fahrzeuge mit deutlich reduziertem Kraftstoffverbrauch*. expert Verlag.
- Schmidt, C. (2016). *Entwicklung eines Modellansatzes zur Bewertung der thermischen Behaglichkeit unter inhomogenen Klimabedingungen*. RWTH Aachen University.
- Schmidt, C., & van Treeck, C. (2016). Thermische Behaglichkeit in Elektrofahrzeugen. 9. *CTI-Jahrestagung*. Stuttgart.

- 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. *FAT Schriftenreihe*.
- Schmidt, C., Veselá, S., Bidhendi, M. N., Rudnick, J., & van Treeck, C. (2015). Zusammenhang zwischen lokalem und globalem Behaglichkeitsempfinden: Untersuchung des Kombinationseffektes von Sitzheizung und Strahlungswärmeübertragung zur energieeffizienten Fahrzeugklimatisierung. *FAT-Schriftenreihe*.
- Sedlbauer, K., Treeck, C. v., & Wölki, D. (2012). *Deutschland Patentnr. DE102011077522A1*.
- Shotton, J., Sharp, T., Kipman, A., Fitzgibbon, A., Finocchio, M., Blake, A., . . . Moore, R. (2013). Real-time human pose recognition in parts from single depth images. *Communications of the ACM*, 56, 116-124.
- Slabaugh, G. G. (1999). Computing Euler angles from a rotation matrix. *Retrieved on August, 6*, 39-63.
- Smolyanskiy, N., Huitema, C., Liang, L., & Anderson, S. E. (2014). Real-time 3D face tracking based on active appearance model constrained by depth data. *Image and Vision Computing*, 32, 860-869.
- Sruthi, S., & Sasikala, M. (2015). A low cost thermal imaging system for medical diagnostic applications. *Smart Technologies and Management for Computing, Communication, Controls, Energy and Materials (ICSTM), 2015 International Conference on*, (S. 621-623).
- Stillwagon, G., & Stillwagon, K. L. (1998). Vertebral subluxation correction and its affect on thermographic readings: a description of the advent of the visi-therm as applied to chiropractic patient assessment. *Journal of Vertebral Subluxation Research*, 2, 137-140.
- Tanabe, S. I., Kobayashi, K., Nakano, J., Ozeki, Y., & Konishi, M. (2002). Evaluation of thermal comfort using combined multi-node thermoregulation (65MN) and radiation models and computational fluid dynamics (CFD). *Energy and Buildings*, 34, 637-646.

- Tanabe, S., Arens, E. A., Bauman, F., Zhang, H., & Madsen, T. (1994). Evaluating thermal environments by using a thermal manikin with controlled skin surface temperature. *Ashrae Transactions*, 100.
- Thermo Fisher Scientific Inc. (2017). DT85 Series 4 Data Logger.
- van Treeck, C. (2016). Individualisierung des Klimakomforts. *Tagung Mobile Klimatisierung, Haus der Technik*. Stuttgart.
- van Treeck, C. (2017). Human Centered Closed Loop Comfort Control (HCCLC) – Energieeffiziente Komfortmodell-basierte Fahrzeugklimatisierung. 10. *CTI-Jahrestagung*. München.
- Vidas, S., Lakemond, R., Denman, S., Fookes, C., Sridharan, S., & Wark, T. (2012). A mask-based approach for the geometric calibration of thermal-infrared cameras. *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, 61, 1625-1635.
- Wang, D., Zhang, H., Arens, E., & Huizenga, C. (2007). Observations of upper-extremity skin temperature and corresponding overall-body thermal sensations and comfort. *Building and Environment*, 42, 3933-3943.
- Webb, P. (1992). Temperatures of skin, subcutaneous tissue, muscle and core in resting men in cold, comfortable and hot conditions. *European journal of applied physiology and occupational physiology*, 64, 471-476.
- Wölki, D. (2017). *MORPHEUS: Modelica-based implementation of a numerical human model considering individual human aspects*. RWTH Aachen University.
- Zhang, H. (2003). Human thermal sensation and comfort in transient and non-uniform thermal environments. *Center for the Built Environment*.
- Zhang, H., Arens, E., Huizenga, C., & Han, T. (2010). Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments, part II: local comfort of individual body parts. *Building and Environment*, 45, 389-398.
- Zhang, Y. F., Wyon, D. P., Fang, L., & Melikov, A. K. (2007). The influence of heated or cooled seats on the acceptable ambient temperature range. *Ergonomics*, 586-600.
- Zhang, Z. (2000). A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 22, 1330-1334.
- Zhang, Z. (2012). Microsoft kinect sensor and its effect. *MultiMedia, IEEE*, 19, 4-10.