



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Masterthesis

Jorin Kleimann

**Methodik und Anwendungen der thermografischen
Gesichtsanalyse**

*Fakultät Technik und Informatik
Studiendepartment Informatik*

*Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Computer Science*

Jorin Kleimann

**Methodik und Anwendungen der thermografischen
Gesichtsanalyse**

Masterthesis eingereicht im Rahmen der Masterprüfung

im Studiengang Master of Science Informatik
am Department Informatik
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer: Prof. Dr. Kai von Luck
Zweitgutachter: Dr. Florian Vogt

Eingereicht am: 31. August 2018

Jorin Kleimann

Thema der Arbeit

Methodik und Anwendungen der thermografischen Gesichtsanalyse

Stichworte

Thermografie, Thermografiekamera, Infrarot, Gesicht, Gesichtsanalyse, Analyse, Mensch-Computer-Interaktion, affective computing, Emotionserkennung, Thermografiedaten, emotionaler Zustand, Gesichtstemperatur

Kurzzusammenfassung

Dieses Dokument betrachtet und untersucht mit Hilfe von unterschiedlichen Versuchen die Einflüsse auf Thermografiedaten. Verfahren und Analysemöglichkeiten werden diskutiert. In unterschiedlichen Experimenten mit Probanden werden Anwendungsfälle generiert und anschließend analysiert. Die in den Versuchen generierten Daten werden hinsichtlich ihrer Tauglichkeit für die verschiedenen Anwendungsfälle untersucht. Damit wird ein Beitrag dazu geleistet, dass Thermografiedaten bei der Entwicklung von Systemen aus dem Bereich der Human-Computer Interaction als eine weitere Dimension einbezogen werden können.

Jorin Kleimann

Title of the paper

Methods and Applications for Thermal Facial Analysis

Keywords

thermography, thermal camera, infrared, face, face analysis, analysis, human-computer interaction, affective computing, emotion recognition, thermal data, emotional state, face temperature

Abstract

This document examines the influences on thermographic data with the aid of various tests. Procedures and analytical possibilities are discussed. In different experiments with test persons, use cases are generated and subsequently analysed. The data generated in the tests are considered with regard to their suitability for the different applications. This contributes to the inclusion of thermal data as a further dimension in the development of systems in the field of human-computer interaction.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Zielsetzung	2
1.2. Gliederung	3
2. Analyse	4
2.1. Infrarotthermografie	4
2.1.1. Falschfarbendarstellung	10
2.1.2. Historische Grundlagen	11
2.2. Gesichtsthermografie	13
2.2.1. Thermoregulation im menschlichen Körper	13
2.2.2. Blutverläufe im Gesicht	17
2.2.3. Regions of Interest	18
2.3. Nutzbarmachung von Thermografiedaten	19
2.3.1. Probleme bei Messbarkeit – Grenzen der Infrarotthermografie	20
2.3.2. Mögliche Einflüsse auf Temperaturänderungen	20
2.3.3. Messverfahren und Methodik für Thermografiebilder – Standardbedingungen	24
2.4. Thermografie im Praxis-Einsatz	28
2.5. Verwandte Arbeiten	31
2.5.1. FACIAL SKIN SURFACE TEMPERATURE CHANGES DURING A "CONCEALED INFORMATION" TEST	31
2.5.2. THERMAL IMAGING AS A WAY TO CLASSIFY COGNITIVE WORKLOAD	32
2.5.3. CLASSIFYING AFFECTIVE STATES USING THERMAL INFRARED IMAGING OF THE HUMAN FACE	33
2.5.4. THERMAL FACEPRINT: A NEW THERMAL FACE SIGNATURE EXTRACTION FOR INFRARED FACE RECOGNITION	34
2.5.5. STRESSCAM: NON-CONTACT MEASUREMENT OF USERS' EMOTIONAL STATES THROUGH THERMAL IMAGING	36
2.6. Bestimmung von Anwendungsfällen, Anforderungen und Herausforderungen	36
3. Versuchsaufbau - Szenario	40
3.1. Verwendete Hard- und Software	40
3.1.1. Infratec VarioCam HD 875	41
3.1.2. IRBIS 3.1 Plus	42
3.2. Datenverarbeitungsprozesse	42
3.2.1. KDD - Knowledge Discovery in Databases	43

3.2.2.	Knowledge Discovery in Thermal Data	45
3.3.	Anwendungsfälle - Fragestellungen und Versuche	47
3.3.1.	Anwendungsfall 1: Zusammenhang zwischen der Hautfeuchtigkeit und der Hauttemperatur	47
3.3.2.	Anwendungsfall 2: Zusammenhang zwischen dem Auftragen von Lippenpflege und der Hauttemperatur	48
3.3.3.	Anwendungsfall 3: Zusammenhang zwischen dem Auftragen von Pferdesalbe und der Veränderung der Hauttemperatur	49
3.3.4.	Anwendungsfall 4: Zusammenhang zwischen physiologischer Anstrengung und Gesichtstemperatur	50
3.3.5.	Anwendungsfall 5: Thermoregulation durch Schwitzen	50
3.3.6.	Anwendungsfall 6: Zusammenhang zwischen physiologischer Entspannung und Gesichtstemperatur	51
3.3.7.	Anwendungsfall 7: Symmetrie der Gesichtshälften	52
3.3.8.	Anwendungsfall 8: Echtzeit-Analyse der Regio Orbitalis	53
3.3.9.	Anwendungsfall 9: Emotionserkennung mittels thermographischer Analyse	58
4.	Versuchsergebnisse	67
4.1.	Antworten auf Fragestellungen und Hypothesen	67
4.1.1.	Anwendungsfall 1: Zusammenhang zwischen der Hautfeuchtigkeit und der Hauttemperatur	67
4.1.2.	Anwendungsfall 2: Zusammenhang zwischen dem Auftragen von Lippenpflege und der Hauttemperatur	68
4.1.3.	Anwendungsfall 3: Zusammenhang zwischen dem Auftragen von Pferdesalbe und der Veränderung der Hauttemperatur	69
4.1.4.	Anwendungsfall 4: Physiologische Anstrengung	70
4.1.5.	Anwendungsfall 5: Thermoregulation durch Schwitzen	70
4.1.6.	Anwendungsfall 6: Zusammenhang zwischen physiologischer Entspannung und Gesichtstemperatur	72
4.1.7.	Anwendungsfall 7: Symmetrie der Gesichtshälften	72
4.1.8.	Anwendungsfall 8: ShowCase – Analyse der Regio Orbitalis	74
4.1.9.	Anwendungsfall 9: Emotionserkennung	76
4.2.	Kritische Betrachtung	81
4.3.	Zusammenfassung	82
5.	Schluss	86
5.1.	Zusammenfassung	86
5.2.	Ausblick	87
A.	Anlage 1	89
B.	Anlage 2	92

Tabellenverzeichnis

2.1. Spektralbereich des nahen, mittleren und fernen Infrarots	5
2.2. Emissionsgrade verschiedener Materialien	6
2.3. Ergebnisse der Anforderungsanalyse mit herauskristallisierten Anwendungsfällen	39
3.1. Technische Daten der Infratec VarioCam HD 875	42
3.2. Die im Versuch hervorzurufenden Emotionen und deren Temperaturrichtung in den einzelnen ROIs	60
3.3. Untersuchung der technischen Voraussetzungen	65
4.1. Gesichtstemperatur für 2 ROIs über alle Probanden	73
4.2. Unterschiede der Gesichtstemperatur zwischen zwei Seiten in den Regionen Auge und Wange	74
4.3. Beispieldatensatz einer extrahierten ROI	76
4.4. Ergebnisse aus den Anwendungsfällen	85

Abbildungsverzeichnis

2.1.	Der Infrarotbereich im elektromagnetischen Spektrum	5
2.2.	Thermografische Messanordnung [InfraTec (2004)]	8
2.3.	Schaltplan eines Bolometers	9
2.4.	Isotherme des menschlichen Körpers nach Aschoff [Spyra (2010)]	10
2.5.	Verschiedene Falschfarbendarstellungen ein und desselben Bildes	12
2.6.	Darstellung der Thermoregulierung bei einem Außenbandriss	13
2.7.	Regelkreis der Thermoregulation: Die Thermorezeptoren messen die innere und äußere Körpertemperatur und geben sie an das Gehirn weiter. Nach einem Vergleich mit dem Sollwert regt dieses dann über verschiedene Möglichkeiten die Wärmeregulierung an.	15
2.8.	Darstellung verschiedener Venen und Adern im Thermalbild	18
2.9.	Die Gefäßanatomie der menschlichen Haut am Beispiel eines weiblichen Gesichts	19
2.10.	Im Wärmebild erkennbar fehlende Dämmung	28
2.11.	Schritte für die Erstellung eines Gesichtsabdruckes	35
3.1.	Thermografiekamera der InfraTec VarioCam HD 800 Serie	41
3.2.	Der KDD-Prozess mit seinen einzelnen Schritten	43
3.3.	Knowledge Discovery in Thermal Data – ein für Thermografiedaten angepasster KDD-Prozess	46
3.4.	Aufbau des Showcase	55
3.5.	Klassendiagramm	56
3.6.	Verteilungsansicht	57
3.7.	Klassendiagramm der EmoBike-Komponente	62
3.8.	Verteilungsansicht der EmoBike-Komponente	63
3.9.	Schematische Darstellung des Projektaufbaus	64
3.10.	Setup der Komponente im EmoBike	64
4.1.	Temperatur-Zeit-Graph nach Auftragen des (a) kalten Wassers und (b) warmen Wassers	67
4.2.	Unterschied der Temperatur auf der Wange (a) zu Beginn des Versuchs und (b) am Ende es Versuchs mit kaltem Wasser	68
4.3.	Temperaturverlauf der mit Hilfe von Lippenpflege eingefetteten Bereiche	69
4.4.	Durchschnittliche Temperatur des linken Unterarms nach Auftragen der Pferdesalbe	70
4.5.	Plots der Zeitreihen für Temperatur und Puls	71
4.6.	Plot zum Versuch: Thermoregulation durch Schwitzen	71

4.7. Definitionen der ROIs für Wange und Augen	73
4.8. Typische Zeitreihe für das Event zombiesTriggered in der Forest Scene für die periorbitale Region	77
4.9. Typische Zeitreihe für das Event playerDied in der Challenge Scene für die periorbitale Region	79
4.10. Typische Zeitreihe für das Event spiderAttak in der Mountain Scene für die periorbitale Region	80

1. Einleitung

Seit den späten 1960er Jahren beschäftigt sich die Informatik mit der Nachahmung des menschlichen visuellen Systems, um Computersysteme mit intelligenter Verhaltensweise ausstatten zu können [Szeliski (2010)]. Das Aufnehmen, Verarbeiten, Analysieren und Verstehen von Kamerabildern sowie die Generierung von Daten und Informationen aus aufgezeichneten digitalen Bildern definiert das interdisziplinäre Forschungsgebiet der *Computer Vision*. Die fortschreitende technologische Entwicklung und die damit auch kostengünstiger werdende optische Sensorik erlauben einer zunehmenden Zahl von Anwendern den Zugang zu solcher Technologie. Mit einer erweiterten Verfügbarkeit optischer Geräte nimmt auch die Entwicklung von Algorithmen und unterschiedlicher Hardware für verschiedenste Anwendungsfälle zu. Gleichzeitig steigende Ressourcen und Geschwindigkeit von Computersystemen erweitern die Möglichkeiten, die aufgezeichneten Daten nach Belieben zu verarbeiten. Die Verfügbarkeit dieser Geräte machen eine Nutzung jenseits von militärischer oder behördlicher Anwendung möglich. Klassische optische Systeme und Anwendungen sind dabei rein auf die Verarbeitung von herkömmlichen Kamerabildern fokussiert. Aber auch optische Systeme, die in der Lage sind, andere Bereiche des Lichts, wie beispielsweise das für das Auge nicht sichtbare Infrarotspektrum, aufzunehmen, werden zunehmend günstiger und verfügbarer. So ist eine über die rein visuelle Betrachtung des aufgenommenen Bildes hinausgehende Möglichkeit vorhanden, aus einem Bild – beispielsweise einem Wärmebild – Informationen zu entnehmen. Gesundheitliche Merkmale eines Menschen oder Erkennen von Objekten in völliger Dunkelheit, bei denen herkömmliche optische Systeme eine zusätzliche Lichtquelle benötigen, werden möglich gemacht.

Als der italienische Physiker Macedonio Melloni im Jahre 1826 das erste elektrische Thermoskop entwickelte und damit in der Lage war die Wärmestrahlung in ein elektrisches Signal zu wandeln, war der Weg für die Infrarotthermografie frei. Jedoch erst nach der Freigabe der Technologie für nichtmilitärische Zwecke im Jahre 1960 und dem nahezu gleichzeitig beginnenden Computerzeitalter ist die Infrarotthermografie ein wichtiges bildgebendes Verfahren, bei dem elektrische Signale durch Computer leicht verarbeitet werden können. Die bildgebende Infrarotthermografie misst für den Menschen nicht sichtbare Wärmestrahlung eines Objektes

oder eines Körpers und zeichnet diese kontaktlos, also nichtinvasiv, auf. Die Wärmestrahlung ist ein Teilbereich des regulären Spektrums der Infrarotstrahlung.

Die Körpertemperaturmessung in bestimmten Regionen des menschlichen Körpers ist eine der Anwendungsmöglichkeiten, die mit der Infrarotthermografie realisiert werden können. Der Fokus dieser Arbeit liegt dabei auf der Temperatur des menschlichen Gesichts. Durch eine Analyse der Temperaturinformationen des Gesichts lassen sich unterschiedlichste Anwendungen ableiten. Sowohl Bereiche der medizinischen Diagnostik als auch das Erfassen des emotionalen Zustands von Personen könnten mit Hilfe von Temperaturdaten realisiert werden. Die Ermittlung, inwiefern Stress, Freude oder Angst einen Einfluss auf diese Temperaturdaten haben, wird möglich gemacht.

Die Entwicklung von Systemen, die in der Lage sind, Emotionen zu erkennen und zu interpretieren, um anschließend auf diesen mentalen Zustand zu reagieren, bildet den Kernbereich des *affective computing* und ist ein interdisziplinäres Feld zwischen Informatik, Psychologie und Kognitionswissenschaft. Die Gesichtsthermografie kann hierzu einen Beitrag leisten, indem solche Systeme mit Temperaturdaten angereichert werden. Systeme, bei denen das Gesicht frontal aufgenommen werden kann, sind ein potenzielles Anwendungsfeld. Assistenzsysteme, wie etwa Fahrassistenzsysteme, oder Systeme, die Menschen bei der Betätigung von Maschinen begleiten, können bei Überlastungssymptomen wie etwa aufkommender Müdigkeit warnen oder die Steuerung komplett übernehmen. Für solche Anwendungen gilt: Je mehr Daten für die Annäherung an die Bestimmung eines emotionalen oder physischen Zustands in geeigneter Weise aufbereitet werden können, desto robuster kann ein solcher Zustand erkannt und darauf reagiert werden.

1.1. Zielsetzung

Um die zusätzlichen Temperaturinformationen verlässlich verwertbar zu machen, müssen Einflüsse und Störgrößen der Infrarotthermografie sowie Methodiken der Gesichtsanalyse bekannt sein. In dieser Arbeit sollen mit Hilfe von Versuchen die Einflüsse auf, Verfahren mit und Analysemöglichkeiten von Thermografiedaten herausgefiltert und untersucht werden. In unterschiedlichen Experimenten mit Probanden sollen Anwendungsfälle generiert und anschließend einer Analyse unterzogen werden. Die Experimente sollen aufgrund einer einschlägigen Literaturrecherche erarbeitet werden und wissenschaftliche Vorarbeiten aufnehmen.

Des Weiteren sollen die Thermografiekamera als Komponente in das System EMOTION-BIKE der HAW Hamburg implementiert und die dort generierten Daten hinsichtlich ihrer Tauglichkeit für eine Erkennung von Emotionen in Thermografiebildern untersucht werden.

Damit soll ein Beitrag dazu geleistet werden, bei der Entwicklung entsprechender Systeme Thermografiedaten als eine weitere Dimension einbeziehen zu können.

1.2. Gliederung

Diese Masterarbeit ist in fünf Teile unterteilt. Nach dieser Einleitung, die das Thema in den Bereich der Informatik einordnet und die Ziele der Arbeit beschreibt, wird im zweiten Teil „Analyse“ die Infrarotthermografie als zugrundeliegende Technologie beschrieben. Außerdem wird die Gesichtsthermografie und deren Anwendung untersucht. Hierzu werden mögliche Einflüsse und Probleme der nichtinvasiven Temperaturmessung mittels Thermografie ermittelt. Außerdem werden Methodiken und Standards erarbeitet, die für Versuche und Experimente im diesem Bereich sinnvoll sind. Eine Recherche einschlägiger Literatur unterstützt die Hypothesenbildung und die Entwicklung von Anwendungsfällen zu ihrer Untersuchung. Darauf aufbauend werden anschließend in einer Art Zielanalyse Versuche definiert, mit denen jeweils bestimmten Zusammenhänge untersucht werden sollen.

Der dritte Teil „Versuchsaufbau - Szenario“ beschreibt zunächst die verwendete Technik, weiter wird der Prozess der *Knowledge Discovery in Thermal Data* – vom Thermografiebild bis zur Wissensgewinnung aus Thermografiedaten – beschrieben. Danach werden die einzelnen Versuche, die aufgrund des analytischen Kapitels 2 entwickelt wurden, in ihrem Aufbau und ihrer Durchführung beschrieben.

Im vierten Teil „Versuchsergebnisse“ findet die Auswertung der im Zuge der Versuche angefallenen Daten an. Eine Bewertung hinsichtlich Sinnhaftigkeit und Plausibilität der Ergebnisse findet ebenfalls statt.

Im „Schluss“ werden die Ergebnisse der vorangegangenen Kapitel noch einmal zusammengefasst und ein Ausblick für Möglichkeiten weiterer Forschung geboten.

2. Analyse

In diesem Abschnitt der Arbeit werden Möglichkeiten und Grenzen analysiert, die für die thermografische Gesichtsanalyse bestehen. Außerdem werden Voraussetzungen, Anforderungen und weitere Aspekte der Infrarotthermografie betrachtet.

Unterteilt ist das Kapitel „Analyse“ in fünf Unterkapitel. Im ersten Kapitel „Infrarotthermografie“ werden die physikalischen Eigenschaften auf denen die Infrarotthermografie beruht dargelegt. Außerdem wird hier ein kurzer Einblick in die Historie dieser Technologie gewährt. Das darauf folgende Kapitel „Gesichtsthermografie“ behandelt physiologische sowie medizinische Grundlagen, die eine Thermografieanalyse möglich machen. Das Kapitel „Nutzbarmachung von Thermografiedaten“ erläutert mögliche Einflüsse auf Temperaturänderungen im menschlichen Körper und bewertet deren Effekt auf die thermografische Analyse. Außerdem werden in diesem Abschnitt Messverfahren, Methodiken und die Grenzen der Infrarottechnologie aufgezeigt. Vorbereitend für die Anwendung der thermografischen Gesichtsanalyse stelle ich im Unterkapitel „Thermografie im Praxis-Einsatz“ ausgewählte bereits vorhandene und genutzte, sowohl wissenschaftliche als auch wirtschaftliche Anwendungen vor, welche die Analyse von Thermografiebildern zur Hilfe nehmen. Anschließend findet im letzten Abschnitt „Verwandte Arbeiten“ ein *Literature Review* statt, dessen Ergebnisse und Erkenntnisse in diese Arbeit eingeflossen sind.

In der für den weiteren Verlauf der Arbeit wichtigen „Bestimmung von Anwendungsfällen, Anforderungen und Herausforderungen“ werden die sich aus den vorhergehenden Kapiteln ergebenden Anwendungsfälle und daraus resultierende Experimente vorgestellt.

2.1. Infrarotthermografie

Die physikalische Grundlage, auf der die Technologie der Thermografiekamera beruht, ist die Eigenschaft jedes Körpers, oberhalb des absoluten Nullpunkts (0 K, -273,15 °C) eine bestimmte elektromagnetische Strahlung auszustrahlen. Die Infrarotstrahlung, die durch eine Linse von speziellen Sensoren der Thermografiekamera aufgenommen werden kann, befindet sich auf einer Wellenlänge zwischen 1 μm und 100 μm und ist somit als Wellenlänge zwischen dem sichtbaren Licht und den Mikrowellen angesiedelt, wie in Abbildung 2.1 zu sehen.

2. Analyse

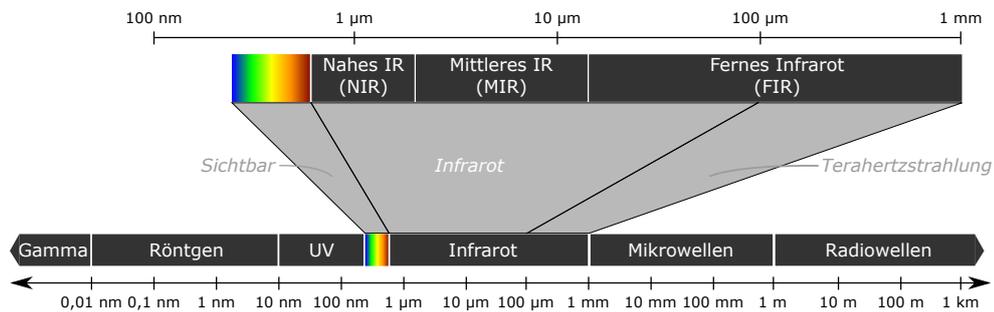


Abbildung 2.1.: Der Infrarotbereich im elektromagnetischen Spektrum

Aus der Abbildung 2.1 wird auch deutlich, dass der Infrarotbereich nochmals unterteilt ist. Diese Unterteilung in Nahes Infrarot (NIR), Mittleres Infrarot (MIR) und Fernes Infrarot (FIR oder LIR, langwelliges Infrarot) definiert die einzelnen infraroten Strahlungsbereiche bezüglich ihrer Wellenlänge im Infrarotbereich. Diese Einteilung der Infrarotstrahlung ist in der DIN 5030-2 bestimmt [DIN5030-2].

Bezeichnung	Abkürzung	Wellenlänge in μm	Erläuterung
Nahes Infrarot	NIR	0,78–3,0	Kurzwellige IR-Strahlung, der Bereich hinter dem sichtbaren Licht
Mittleres Infrarot	MIR	3,0–50	Thermische Strahlung bei irdischen Temperaturen
Fernes Infrarot	FIR oder LIR	50–1000	An der Grenze zum Bereich der Mikrowellen

Tabelle 2.1.: Spektralbereich des nahen, mittleren und fernen Infrarots

Bestimmt man die Intensität der ausgesendeten elektromagnetischen Strahlung eines Objekts, so lässt sich daraus die Temperatur berührungslos ermitteln. Daher spricht man bei dem Thermografie-Verfahren auch von einem nicht-invasiven Verfahren.

Ein Schwarzer Körper, auch Schwarzer Strahler, ist eine idealisierte thermische Strahlungsquelle, für den postuliert wird, dass er jegliche auf ihn eintreffende Strahlung vollständig absorbiert. Die Absorption besagt in diesem Fall, dass die auf den Körper eintreffende Strahlung weder reflektiert noch gestreut wird.

Zwar gibt es kein Material, welches diese Eigenschaft besitzt, jedoch lässt sich mit dem sogenannten Hohlraumstrahler ein nahezu vollständig absorbierender Körper herstellen. Damit

entsteht eine experimentelle Möglichkeit, die Beziehung zwischen energetischer Strahlung und Temperatur deutlich zu machen.

In einem kugelförmigen Hohlraum, dessen Wände rußgeschwärzt sind (Ruß weist einen hohen Absorptionsgrad auf), besteht ein Strahlungsgleichgewicht. Die vom Hohlraum absorbierte Strahlung ist also gleich der emittierten Strahlung. Dies bedeutet, dass der Hohlraumkörper sich in einem thermischen Gleichgewicht befindet (sofern es keine externen Wärmequellen gibt und der Hohlraumkörper thermisch abgeschottet ist). Stattet man diesen Hohlraumkörper nun mit einer im Verhältnis zu seiner Größe sehr kleinen Öffnung aus, so lässt sich die spezifische thermische Ausstrahlung, also das Verhältnis der echten Strahlung des Körpers zu seiner aktuellen Temperatur, messen. Durch das Strahlungsgleichgewicht wird bewirkt, dass die spezifische Strahlung des Körpers eben nicht von der chemischen Zusammensetzung des Materials, aus dem er besteht, abhängt, sondern die reine Funktion seiner Temperatur darstellt.

Nach dem Gesetz von Stefan-Boltzmann berechnet sich die spezifische Ausstrahlung des Schwarzen Strahlers an der angebrachten Öffnung wie folgt:

$$M_{bb} = \frac{\Phi}{A_1} = \sigma \cdot T^4 \quad (2.1)$$

Die Stefan-Boltzmann-Konstante σ steht also im Zusammenhang mit der Temperatur in der vierten Potenz. So hätte eine Verdoppelung der Temperatur des Schwarzen Körpers (M_{bb} : bb steht für black body) eine 16-fache Strahlung an der Strahlungsöffnung zur Folge. Dies macht das Experiment des Schwarzen Strahlers so anschaulich und aussagekräftig für das Verständnis vom Verhältnis der Temperatur zur spezifischen Strahlungsemission.

Der Emissionsgrad ε eines Körpers gibt an, wie viel Wärmestrahlung von einem Körper abgegeben, also emittiert wird. Dieser Wert wird stets im Verhältnis zum Emissionsgrad eines Schwarzen Körpers ermittelt, welcher einen Emissionsgrad ε von 1 aufweist. Die Ermittlung des Emissionsgrades eines Körpers findet meist experimentell statt, wobei ein rußgeschwärzter Körper gleicher Temperatur eine Referenzstrahlung aussendet.

Material	Emissionsgrad ε
Menschliche Haut	0,98
Zink weiß	0,95
Ziegel	0,93
Beton	0,92
Eisen unbearbeitet	0,74
Asphalt	0,69

Tabelle 2.2.: Emissionsgrade verschiedener Materialien nach [Schuster und Kolobrodov \(2004\)](#)

Wenn der Emissionsgrad eines Körpers bekannt ist, so lässt sich die Berechnungsformel aus 2.1 um ε erweitern und man erhält die Berechnungsformel für die Strahlungsintensität bzw. die spezifische Ausstrahlung, welche in der Gleichung 2.2 aufgezeigt ist:

$$M = \varepsilon_{ges} \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (2.2)$$

Die Kennzahl Emissionsgrad ε ist die spezifische Ausstrahlung eines realen Körpers im Verhältnis zu der eines Schwarzen Körpers. σ ist die erwähnte Stefan-Boltzmann-Konstante, mit der Einheit $\frac{W}{m^2 \cdot K^4}$. Durch den Zusammenhang dieser Konstanten σ und der Variablen ε mit der Temperatur in der vierten Potenz würde ein Temperaturanstieg auf das Doppelte eine Versechzehnfachung der Abstrahlung bewirken. So ist an der Gleichung 2.2 schnell zu erkennen, dass schon kleinste Temperaturänderungen als thermische Strahlung sichtbar gemacht werden können.

Thermische Auflösung Die thermische Auflösung ist die innerhalb des Objekts kleinste mögliche auflösbare Temperaturdifferenz. Die *Noise Equivalent Temperature Difference*, kurz NETD, wird hauptsächlich von der Charakteristik des optischen Empfängers bestimmt [Schuster und Kolobrodov (2004)]. Der Parameter ist – wie der Name schon sagt – entscheidend für die Bildqualität, also den Anteil des Rausches im Infrarotbild [InfraTec (2004)]. Die thermische Auflösung wird in Millikelvin angegeben. Je geringer der NETD-Wert, desto rauschärmer ist das Thermografie für den Betrachter, da der Temperaturunterschied der gemessenen Pixel zueinander besonders klein, die thermische Auflösung also besonders hoch ist.

Da es sich bei diesem System um ein kontaktloses Verfahren zur Wärmemessung handelt, muss die Oberfläche des Messobjekts für das Messgerät sichtbar sein. Zu beachten ist dabei, dass für eine adäquate Infrarotmessung die Beschaffenheit der Messstrecke sowie des Messaufbaus von hoher Bedeutung ist. So kann die Oberflächentemperatur von der sog. Störstrahlung beeinflusst werden. Störstrahlungen können dabei Sonnenstrahlen, aber auch andere in der Nähe des Messobjekts befindliche Wärmequellen sein, die das Messobjekt von außen erwärmen. Es gilt daher, Störstrahlung möglichst zu vermeiden. Ebenso durchdringt die Infrarotstrahlung keine (oder nur geringe Mengen) Glasmaterialien. Eine Wärmemessung von Materialien aus Glas (oder durch Glasflächen hindurch) sollte daher unbedingt vermieden werden.

In der Entwicklung von Wärmebildgeräten haben sich in im Laufe der Zeit verschiedenste Detektoren und Geräte zur Aufnahme und Anzeige etabliert. Im folgenden Teil soll kurz auf die wichtigsten thermischen Empfänger- bzw. Detektorentypen eingegangen werden. Der

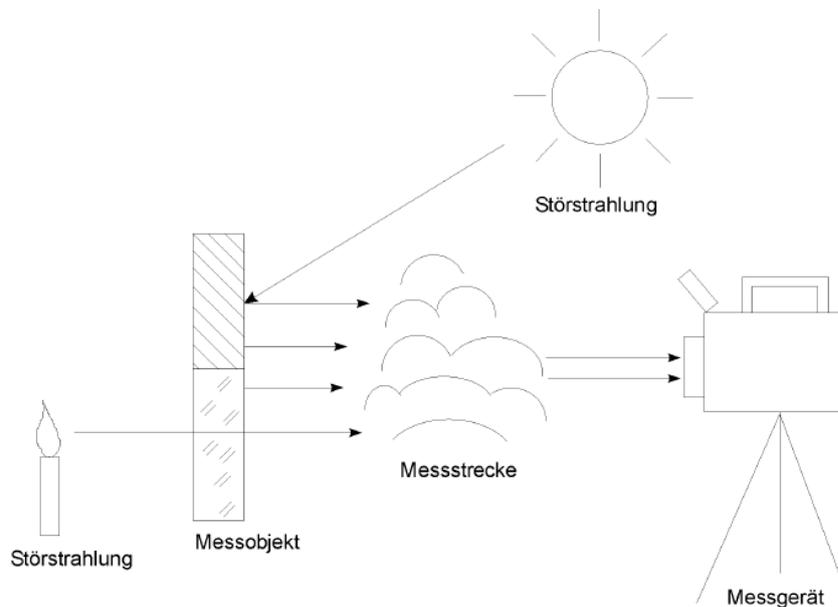


Abbildung 2.2.: Thermografische Messanordnung [InfraTec (2004)]

historisch-zeitliche Ablauf dieser Entwicklung ist im Kapitel [2.1.2 Historische Grundlagen](#) skizziert.

Thermische Eielementempfänger kommen in Geräten ohne eine visuelle Ausgabe zum Einsatz, wobei das Wirkprinzip dieser Empfänger – meist in abgewandelter Form – auch in modernen Wärmebildgeräten Anwendung findet. Die Grundidee dieser Eielementempfänger ist es, die durch die Temperaturänderung hervorgerufenen physikalischen oder elektrischen Effekte in eine messbare Signaländerung umzuwandeln. Sogenannte Thermosäulen bestehen aus einer in Reihe geschalteten Menge aus verschiedenen Metallen, wobei jeweils das Ende eines Metalls als Verbindungsstelle an den Anfang des nächsten Metallstücks gesetzt wird. An den Kontaktstellen entsteht eine elektrische Spannung. Diese wird verursacht durch den Seebeck-Effekt, der besagt, dass in einem Stromkreis aus unterschiedlichen Leitern (der im Falle der Thermosäule aus unterschiedlichen Metallen besteht) bei einer Temperaturdifferenz an den Kontaktstellen eine elektrische Spannung entsteht. Somit wandelt eine Thermosäule, die aus vielen Thermoelement-Paaren besteht, die Temperaturänderung ΔT in eine Spannungsänderung ΔU . Als Material für die verwendeten unterschiedlichen Metalle haben sich die chemischen Elemente Antimon und Wismut etabliert. Die jeweiligen Paare liegen mit der warmen Verbindungsstelle – also derjenigen, die der warmen IR-Strahlung zugewandt ist – auf einem Empfängerelement (Detektor) und mit der kalten auf einem Bezugssegment. Nun kann

2. Analyse

die Spannungsänderung bei einfallender IR-Strahlung am Ende des letzten Elements gemessen und ein Resultat generiert werden [Schuster und Kolobrodov (2004)].

Ein Bolometer wandelt im Gegensatz zur Thermosäule eine Temperaturänderung in eine Widerstandsänderung ΔR um. Hierzu werden zwei Thermistoren (temperaturempfindliche Widerstände) R_T verwendet, deren Leitfähigkeit sich mit der Temperatur ändert. Das Besondere am Bolometer ist, dass sich die beiden Thermistoren R_T über eine Brückenschaltung angebracht sind. Die Strahlungsöffnung ist so angebracht, dass nur auf einen der beiden Thermistoren Strahlung einfällt. Fällt keine Strahlung ein, so ist die Brücke über die beiden Widerstände R_2 und R_3 ausgeglichen. Bei einfallender Strahlung ändert sich der Widerstandswert des Thermistors an der Strahlungsöffnung um ΔR_T und es entsteht ein Spannungsabfall über R_1 , der maßgeblich auf den Strahlungseinfall bezogen werden kann [Schuster und Kolobrodov (2004)].

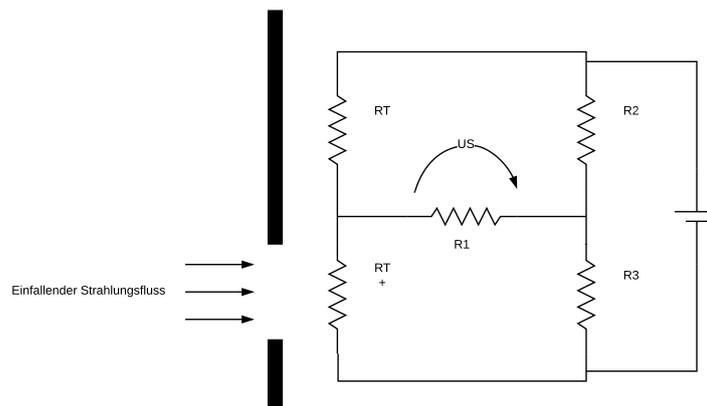


Abbildung 2.3.: Schaltplan eines Bolometers

In heutigen bildgebenden Wärmebildgeräten werden die oben genannten Prinzipien angewendet und meist in Form von Arrays angebracht, um ohne eine optomechanische Abtastung Bilder mit mehreren Zeilen und zwei Dimensionen, also einer großen Anzahl von Pixeln zu generieren. Mikrobolometerarrays kommen als thermischer Sensor ohne eine weitere Kühlung der Sensorplatine aus. Die bisher notwendige Kühlung der Empfänger war kostspielig und schränkte die mobile Nutzung der Wärmebildgeräte aufgrund ihrer Größe ein. Bei heutigen

Detektoren werden für jeden Pixel alle Komponenten eines Bolometers mikromechanisch hergestellt, miteinander verbunden und auf einer Bezugsplatte aufgesetzt. Als Abhängigkeitsgröße für die Vergrößerung des Pixelbereichs eines Wärmebildgerätes mit Mikrobolometerarrays gilt auch hier: Je kleiner die einzelnen Bolometerelemente hergestellt werden können, desto höher ist die mögliche Anzahl an Pixeln. Anfängliche Geräte besaßen noch Elementgrößen von $100\mu\text{m}$ bei einer Auflösung von 128×128 Pixeln (Hersteller: NEC), inzwischen haben sich bereits Geräte mit Elementgrößen von $40\text{--}17\mu\text{m}$ etabliert [Butler u. a. (1995)]. So gibt es auf dem Markt bereits Wärmebildgeräte mit Bolometerarrays mit einer Auflösung von 640×480 Pixeln, auch Geräte mit einer Auflösung von 1024×768 sind keine Seltenheit mehr. Die Bolometerarrays werden im Englischen auch Focal Plane Array (kurz: FPA) genannt.

Im menschlichen Körper unterliegt die Intensität der Wärme bzw. Infrarotstrahlung einem Temperaturverteilungsmuster, das den Körperregionen unterschiedliche Temperaturen zuordnet. Vom Körperkern bis hin zu den Extremitäten nimmt die Temperatur ab. Man spricht hier auch von einem Temperaturgefälle. Die Temperaturverteilung im gesunden Körper erfolgt dabei seitengleich [Spyra (2010)].

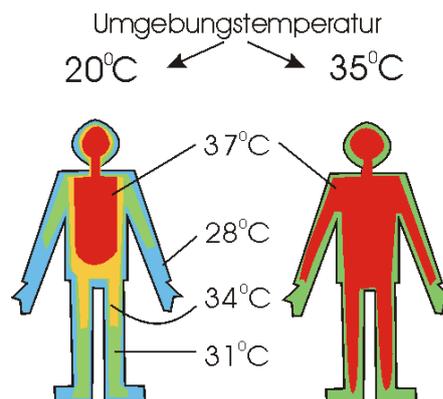


Abbildung 2.4.: Isotherme des menschlichen Körpers nach Aschoff [Spyra (2010)]

Nach einer Studie von Uematsu et. al aus dem Jahre 1988 ist die Temperaturstabilität des menschlichen Körpers außerordentlich präzise und konnte sogar über einen längeren Zeitraum von 5 Jahren in Untersuchungen sicher festgestellt werden [Uematsu u. a. (1988)].

2.1.1. Falschfarbendarstellung

Mit dem bildgebendem Verfahren Thermografie werden keine visuellen Informationen aufgezeichnet, vielmehr wird die Intensität der Infrarotstrahlung – die von einem einzelnen Punkt

ausgeht – als Temperatur an diesem Punkt gedeutet. Dabei wird die für das menschliche Auge unsichtbare Infrarotstrahlung in elektrische Signale umgewandelt. Damit das menschliche Auge die Informationen die mittels dieses Verfahrens aufgezeichnet werden erfassen kann, werden den einzelnen Punkten in Abhängigkeit von der gemessenen Temperatur ein Farbwert zugewiesen. Die Zuweisung dieser Farbwerte wird als sog. Falschfarben-Darstellung oder farbkodierte Darstellung bezeichnet. Die Farbe gibt dabei keinen Aufschluss über die tatsächliche Temperatur. Sie dient lediglich zur kontrastreicheren Abgrenzung für das menschliche Auge. **Schuster und Kolobrodov (2004)**

Die Bilder in Abbildung 2.5 beinhalten beispielsweise alle dieselben Informationen. Auf den verschiedenen Fotos wurde lediglich eine andere Farbkodierung gewählt. Die Legende eines Bildes gibt erst den Aufschluss, bei welchem Farbton es sich um welche Temperatur handelt. Dabei ist zu beachten, dass für das menschliche Auge verschiedene Farbtöne bzw. Nuancen der Abstufung nicht erkennbar sind. Für einen Computer hingegen schon. Somit kann eine für das menschliche Auge gleichmäßige Färbung trotzdem verschiedene Temperaturen repräsentieren. Diese gleichmäßige Einfärbung von unterschiedlichen Temperaturwerten lässt das menschliche Auge Temperaturunterschiede sehr schnell und intuitiv erfassen und gegebenenfalls interpretieren.

In diesem Zusammenhang wird häufig auch der Begriff *Heatmap* verwendet. Eine Heatmap zeichnet sich ebenfalls dadurch aus, dass bestimmte Datenpunkte auf einen bestimmten Wert „gemappt“, also abgebildet werden. Meist findet diese Abbildung mit Hilfe von Einfärbungen statt, die nicht nur reine Farben beinhaltet, sondern auch Sättigung, Helligkeit und Transparenz.

2.1.2. Historische Grundlagen

Als im Jahre 1800 William Herschel die für das menschliche Auge nicht sichtbare Wärmestrahlung entdeckte, indem er Sonnenlicht durch ein Dispersionsprisma fallen ließ und die Strahlung mit einem Thermometer nachwies, war eine Entwicklung hin zu den heutigen modernen, hochauflösenden Infrarotdetektoren noch nicht abzusehen. Erst als der italienische Physiker Macedonio Melloni mit einer Thermosäule in der Lage war, die IR-Strahlung in ein elektrisches Signal zu wandeln, war der Weg geebnet, die Änderung des elektrischen Widerstands mit der Temperatur zur Detektion von Infrarotstrahlung zu benutzen.

Durch den permanenten technischen Fortschritt und die Herstellung der ersten Quantendetektoren führten die ersten Wärmebildgeräte in den 1920er Jahren zu höheren Empfindlichkeiten und kürzeren Reaktionszeiten, wobei zu erwähnen ist, dass sich ihr Empfindlichkeitsbereich im NIR (Nahes Infrarot) befand. Der Evapograph gilt hier als erstes Wärmebildgerät, bei dem mit Belichtungszeiten von 30 Sekunden Temperaturlösungen bis 1 Kelvin erreicht wurden.

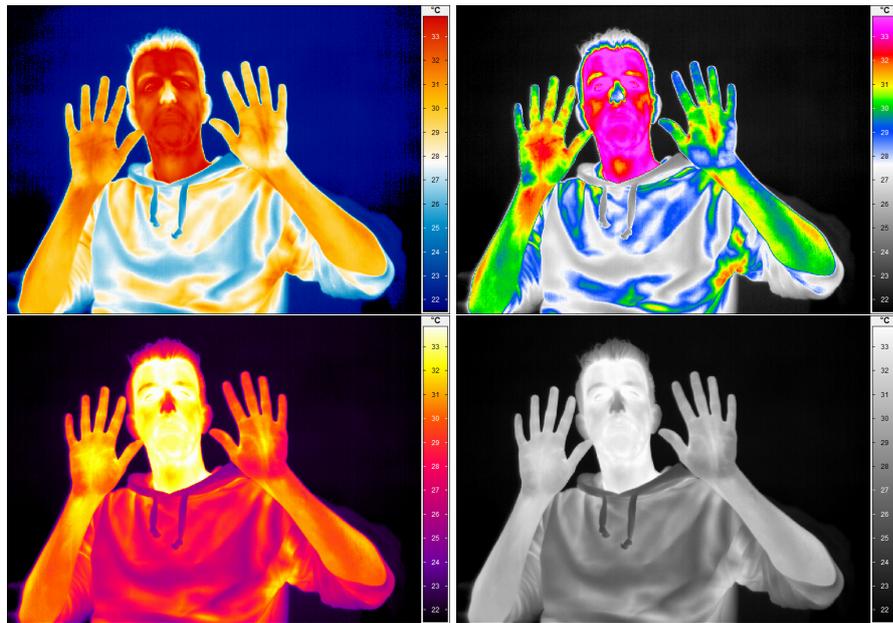


Abbildung 2.5.: Verschiedene Falschfarbendarstellungen ein und desselben Bildes

Zunächst fanden Wärmebildgeräte ab den 1950er Jahren ihren nicht-wissenschaftlichen Einsatz im Militärwesen, welches die Weiterentwicklung der Quantendetektoren zwar maßgeblich vorantrieb, aber gleichzeitig bis in die 1950er Jahre Forschung in diesem Bereich nur unter hohen Geheimhaltungsstufen zuließ. Zu dieser Zeit galten sowohl Geräte auf Thermosäulenbasis mit 20 Minuten Belichtungszeit pro Bild als auch Geräte auf Bolometerbasis mit ca. 4 Minuten Belichtungszeit pro Bild als der aktuelle Stand der Technik.

Der Einzug der Fernstehtchnik in die Konzipierung der Wärmebildtechnik in den 1970er und 1980er Jahren erlaubte Echtzeitbilder mit einer thermischen Auflösung von 1 Kelvin. Außerdem führten die Fortschritte in der Entwicklung von Quantenempfängern zur Möglichkeit der Nutzung des LIR-Bereichs.

Ab den 1990er Jahren beginnt sich die Infrarotthermografie auch auf dem zivilen Markt durchzusetzen. Dies hängt zum einen mit der beschleunigten Entwicklung der Computertechnologie zusammen, zum anderen mit der damit einhergehenden Möglichkeit, mit Hilfe von Softwarelösungen Thermogramme zu speichern, sie zu analysieren und zu interpretieren. Gerade die Möglichkeit der Analyse und Interpretation der aufgenommenen Daten öffnet für die Bereiche Medizin (Chirurgie, Orthopädie, Dermatologie), Bau (Hausdämmung), Landwirtschaft (Vegetationsanalysen) oder aber auch zur Personensuche ganz neue Möglichkeiten. Moderne Wärmebildgeräte erreichen eine thermische Auflösung von bis zu 0,05 Kelvin. Sie sind

meist mit einem Empfängerarray ausgestattet, einem sogenannten *Focal-Plane-Array* (FPA). Sie benötigen keine zusätzliche Kühlung. [Schuster und Kolobrodov (2004)]

2.2. Gesichtsthermografie

Im folgenden Abschnitt sollen sowohl die physiologischen als auch die medizinischen Grundlagen dargestellt werden, die für den speziellen Untersuchungszweck dieser Arbeit von Bedeutung sind. Es werden Blut- und Wärmeströme im menschlichen Körper erläutert, die zur Definition der sogenannten *Regions of Interest* (ROIs) führen.

2.2.1. Thermoregulation im menschlichen Körper

Die menschliche Körpertemperatur hat eine besondere Bedeutung für die Medizin. Der menschliche Körper reagiert sowohl auf biologische als auch auf psychologische Krankheitsursachen oft mit Temperaturregulierungen. Seien es thermische Veränderungen der äußerlichen Umgebung oder die Bekämpfung eines Virus (bspw. Fieber), diese Faktoren führen meist zur automatischen Thermoregulierung des eigenen Körpers [Skitzki u. a. (2007)].

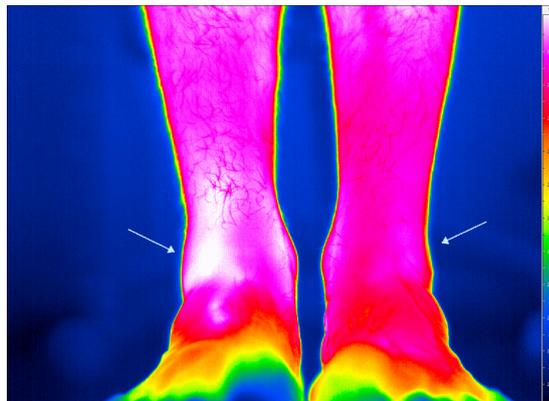


Abbildung 2.6.: Darstellung der Thermoregulierung bei einem Außenbandriss. Deutlich zu erkennen ist der Temperaturunterschied beider Knöchel, wobei der Knöchel vom beeinträchtigten Fuß deutlich erwärmt ist

Der menschliche Körper erlangt durch diese automatische Thermoregulierung als Organismus eine gewissen Unabhängigkeit gegenüber der Außentemperatur. Die Thermoregulierung ist deshalb unerlässlich, da bei Temperaturen unter 35 Grad Celsius viele lebenswichtige Enzymreaktionen nicht mehr funktionell sind und bei Temperaturen über 41,5 Grad Celsius ein Großteil der Enzymproteine zerstört werden [Zalpour und Augustin (2006)].

Für die optimale Stoffwechsellistung benötigen die im Körperkern gelagerten Organe wie Leber, Milz, Nieren, Herz, Rückenmark und Gehirn eine möglichst gleichmäßige Temperatur. Wie bekannt, ist diese optimale Temperatur die Körperkerntemperatur von 37 Grad Celsius. Diese Temperatur unterliegt jedoch natürlichen Schwankungen. Im Tagesverlauf kann sich die Temperatur um bis zu 0,5 Grad Celsius verändern [Charkoudian (2003)]. Dabei erreicht der Körper seinen Minimalwert morgens gegen drei Uhr, der Maximalwert wird gegen 18 Uhr erreicht. Neben diesen Veränderungen kommt es im Körperkern zu natürlichen Fluktuationen von 0,2 bis 0,5 °C, welche allein durch die Vasomotorik, also das Erweitern oder Verengen der Blutgefäße, geregelt werden [Spyra (2010)].

Dabei ist der Begriff der Körpertemperatur mit Vorsicht zu verwenden. Misst man die Temperatur an verschiedenen Stellen des Körpers so wird man selten gleiche Werte messen. Die Körpertemperatur an äußeren Körperteilen, die nicht dem Körperkern angehören, stehen dabei unter verschiedensten Einflüssen. So haben Umgebungstemperatur und Muskelaktivitäten bedeutende Einflüsse auf die Temperatur. Lediglich das Innere des Körpers wird auf einer konstant gleichen Temperatur gehalten [Leonhardt und Walter (2016)].

Die Thermoregulierung im Zusammenhang mit emotionalen Reaktionen hingegen besteht aus weitaus komplexeren Zusammenhängen und dient meist einem anderen Zweck als der im letzten Absatz beschriebenen reinen Reaktion auf eine Krankheitsursache. [Ioannou u. a. (2014)] Die Thermoregulation als Reaktion auf bestimmte Emotionen wird im Kapitel 2.2.1 noch näher behandelt.

Sogenannte Thermorezeptoren messen ununterbrochen die Temperatur im Körperkern, in der Haut und im Rückenmarksbereich. Rezeptoren sind menschliche Zellen, die auch als Sinneszellen bezeichnet werden und in der Lage sind "Signalveränderungen" wahrzunehmen. Die von den Thermorezeptoren gemeldeten Impulse „warm“ und „kalt“ werden über die Nervenbahnen an das thermoregulatorische Zentrum, den Hypothalamus, einen Abschnitt im Zwischenhirn, gemeldet, der dann als Regler arbeitet (siehe Abbildung 2.7 auf Seite 15) [Zalpour und Augustin (2006)].

Damit der Körperkern in verschiedensten Situationen und Umgebungen bei einer konstanten Temperatur gehalten werden kann, muss das thermoregulatorische Zentrum im Hypothalamus Ausweichstrecken zur Wärmebildung oder Wärmeabgabe besitzen. Für einen Standardmenschen (Größe: 180 cm, Gewicht: 80 kg) gilt als Richtwert für die Ruhewärmeproduktion ein Wert von etwa 90–100 Watt. Abgeleitet lässt sich diese Wärmeproduktion mit 80–90 kcal/h angeben. Dies wiederum entspricht einem Blutfluss in thermisch neutralen Umgebungen von ca. 250 ml/min [Spyra (2010)]. Neben der Ruhewärmeproduktion kann zur zusätzlichen Bildung von Wärme eine vom Individuum unbeabsichtigte Zunahme der Muskelaktivität erfolgen.

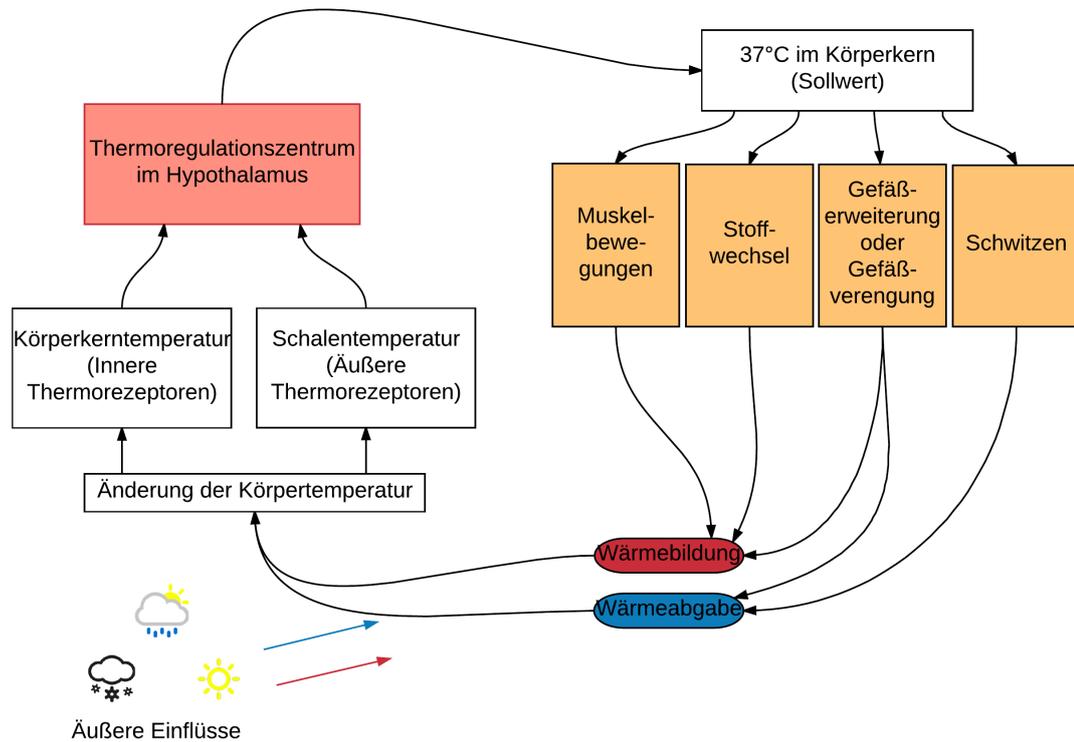


Abbildung 2.7.: Regelkreis der Thermoregulation: Die Thermorezeptoren messen die innere und äußere Körpertemperatur und geben sie an das Gehirn weiter. Nach einem Vergleich mit dem Sollwert regt dieses dann über verschiedene Möglichkeiten die Wärmeregulierung an.

Durch rhythmisches Zusammenziehen der Muskulatur („Kältezittern“) wird so zusätzliche Wärmeenergie gewonnen [Spyra (2010)].

Unter äußeren Wärmeeinflüssen oder bei sportlicher Betätigung löst die steigende Körpertemperatur zur Wärmeregulierung sowohl eine Gefäßerweiterung als auch Schwitzen zur Abführung dieser Wärme aus.

Die Erweiterung der Gefäße dient dazu, dass ein erhöhter Blutfluss in die äußeren Regionen (Haut) des Körpers stattfindet. Dieser plötzliche Anstieg des Blutflusses führt anschließend zu einer erhöhten Temperatur in diesen Regionen. Ein Anstieg des Blutflusses in bestimmten Regionen hat zur Folge, dass der Blutfluss umverteilt werden muss und sich in anderen Regionen des Körpers, beispielsweise dem Splanchnikus¹, verringert. Eine solche Umverteilung lässt sich

¹Nerv, der vom Grenzstrang des Brustbereichs zu den Eingeweiden (Splanchna) zieht

unter anderem durch ein Herzleistungsmessgerät ermitteln. Man spricht hier von Konvektion [Charkoudian (2003)].

Der größte Teil der Wärmeproduktion des ruhenden Körpers stammt allerdings aus metabolischen Prozessen wie der Leberaktivität, der Verdauung im Magen-Darm-Trakt oder auch zur Bereitstellung von Energie für die Muskelaktivität, die auch in Ruhe für etwa ein Viertel der Wärmeproduktion verantwortlich ist. Bei Muskelaktivitäten ist ebenfalls zu beachten, dass ca. zwei Drittel der aufgewendeten Arbeit in die Wärmeproduktion fließt und nur ein Drittel in die eigentliche Bewegungsarbeit [Zalpour und Augustin (2006)].

Des Weiteren ist die sog. Pilomotorik, also das Sichaufrichten der Körperhaare durch bestimmte Muskeln, eine zusätzliche Möglichkeit des Körpers die Temperatur zu regulieren. Durch das Sichaufrichten der Körperhaare entsteht ein isolierendes Luftpolster um den Körper. An denjenigen Körperpartien, die ohne Haare ausgestattet sind, sind diese Muskeln ebenfalls aktiv, sodass sich die Haut an diesen Stellen wölbt und so die im Volksmund unter „Gänsehaut“ bekannten Hügelchen zwischen den Haarfollikeln bildet [Spyra (2010)].

Neben der Gefäßerweiterung (Vasodilatation) bzw. Gefäßverengung (Vasokonstriktion) ist das Ausdünsten von Schweiß eine weitere Möglichkeit die körpereigene Temperatur zu regulieren. Die durch den Schweiß verursachte Senkung der Temperatur auf der Haut kühlt die darunter liegenden blutführenden Gefäße, bevor das Blut wieder in den Körperkern wandert. Die Erhöhung des Blutflusses und Schwitzen werden bei der Thermoregulierung in Proportion zur körperinneren Temperatur hochgefahren, bis ein stabiler Zustand erreicht ist, bei dem sich die Wärmezufuhr mit der Wärmeabführung auf einem konstant gleichen Level befinden und so eine beständige Körpertemperatur erreicht ist [Johnson und Proppe (2010)]. Außerdem ist der Körper in der Lage, überschüssige Wärme zu einem kleinen Teil durch Konduktion, also das Austauschen von Wärme in kinetische Energie, abzuführen.

So ergibt sich ein Wärmeaustausch mit der Umwelt/Umgebung auf verschiedenen Wegen:

- Schwitzen
- Konvektion
- Konduktion
- Strahlung
- Infrarotstrahlung

Im menschlichen Gesicht verlaufen sowohl Muskeln als auch Gefäße, die einen Einfluss auf die Gesichtstemperatur haben. Außerdem sind Schweißdrüsen vorhanden, die vom Hypothalamus zur Temperaturregulierung angesteuert werden können. So lassen sich im Gesicht an

unterschiedlichen Orten verschiedene Temperaturwerte ermitteln. Der folgende Abschnitt geht auf diese Unregelmäßigkeiten ein.

Thermoregulation als Reaktion auf Emotionen

Der menschliche Körper reagiert auf äußere Stressfaktoren oder emotional aufreibende Situationen mit bestimmten physiologischen Strategien, welche vorher durch eine kognitive Beurteilung ausgewählt werden.

Zwei wichtige biologische Mechanismen dabei sind die subkutane Gefäßverengung und „emotional sweating“. Die Gefäßverengung schützt dabei ursprünglich vor der Gefahr von Blutverlust bei Verletzungen, besonders an den exponierten Teilen des Körpers. Nach Eintreten einer Bedrohung setzt dann gegenläufig eine vaskuläre Entspannung ein, die von einem graduellen Temperaturanstieg begleitet wird [Ioannou u. a. (2014)].

Wenn der Körper sensorische Reize erhält, die einen Einfluss auf den Ruhezustand haben könnten, aktiviert das sympathetische Nervensystem eine physiologische Antwort, zu der die Erhöhung des Herzschlags, die Erweiterung der Pupillen und erhöhte Schweißdrüsenaktivität gehören. Diese autonome Reaktion wird durch jede Art emotionaler Reaktion wie beispielsweise Erschrecken, Furcht, Ärger oder Stress hervorgerufen. Die physiologische Antwort entspricht in ihrer Intensität der emotionalen Reaktion [Ioannou u. a. (2014)].

2.2.2. Blutverläufe im Gesicht

Das menschliche Gesicht ist aufgrund seiner hohen Anzahl an Muskeln und wichtigen Sinnesorganen mit einer hohen Anzahl an Gefäßen ausgestattet. Die in Abbildung 2.9 erkennbare *external jugular vein* (dt.: äußere Drosselvene) speichert und transportiert den überwiegenden Teil des Blutes im Kopfbereich. Wie in ihrem Namen schon erkennbar, sitzt diese Vene im äußeren Körperbereich und ist somit von außen sowohl fühl- als auch erkennbar. Durch ihre exponierte Lage ist sie auch auf Thermografiebildern leicht erkennbar.

In der Abbildung 2.8 wird deutlich, wie eine solche Erkennbarkeit mit Hilfe von Infrarotthermografie erreicht werden kann. Die im äußeren Körperbereich sitzenden Venen strahlen durch ihre Funktion als Transporteur von Blut mehr Wärme-Infrarotstrahlung aus.

Die Versorgungsvenen und -arterien des Kopfes verlaufen anschließend über Mund, Wangen und Nasenbereich in Richtung Stirn und Hinterkopf. Daraus ergeben sich für das Gesicht verschiedene Regionen, die sich aufgrund ihrer guten Durchblutung besonders für die thermografische Analyse eignen.

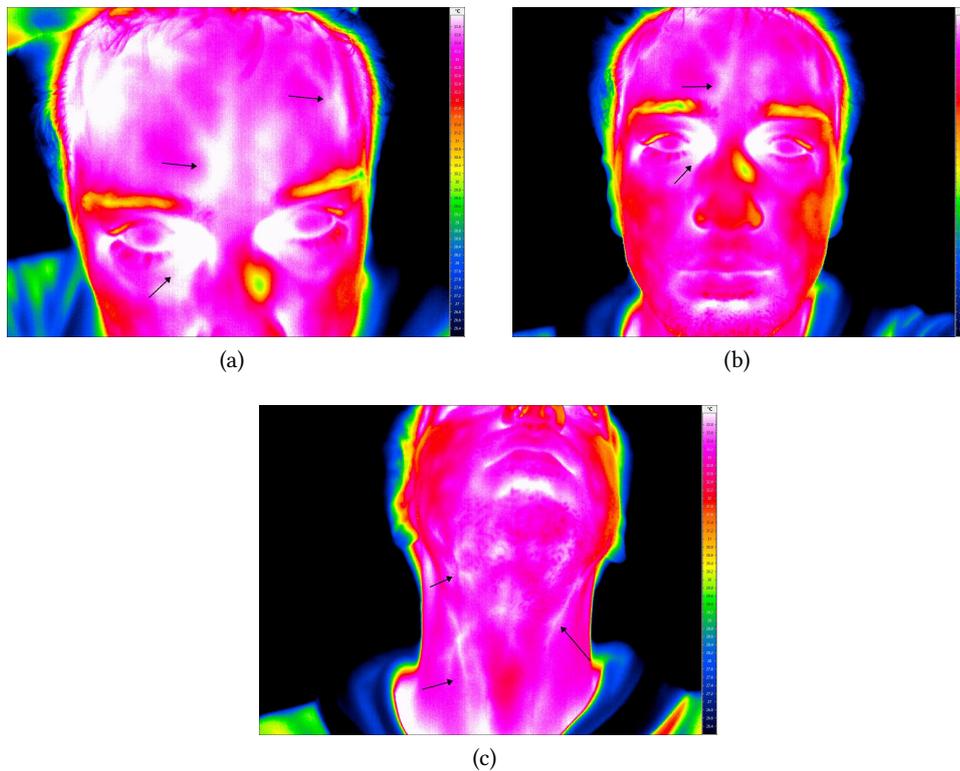


Abbildung 2.8.: Darstellung verschiedener Venen und Adern im Thermografiebild. Zur Verdeutlichung sind die sichtbaren Stellen mit Pfeilen markiert. (a) Stirn; (b) Periorbitale Region; (c) Halsbereich

2.2.3. Regions of Interest

Regions of Interest (ROI) bilden eine Teilmenge an Ausschnitten innerhalb einer Bildaufnahme. ROIs definieren sich durch festgelegte Grenzen einer Kontur oder eines für beispielsweise eine Bildanalyse benötigten Ausschnitts.

Da sich die Auswertung der Thermografieaufnahmen dieser Arbeit auf den Gesichts- und Oberkörperbereich der Probanden bezieht, finden sich die ROIs zumeist im menschlichen Gesicht.

Wie in Kapitel 2.2.1 beschrieben, wird Wärmeregulation durch Schwitzen, Muskelbewegungen und Gefäßerweiterung erreicht. Um für die Auswertung von Thermografieaufnahmen des menschlichen Oberkörpers die passenden ROIs zu finden, muss also zuallererst das menschliche Gesicht mit seinen darunter liegenden Gefäßen, Muskeln und Drüsen betrachtet werden.

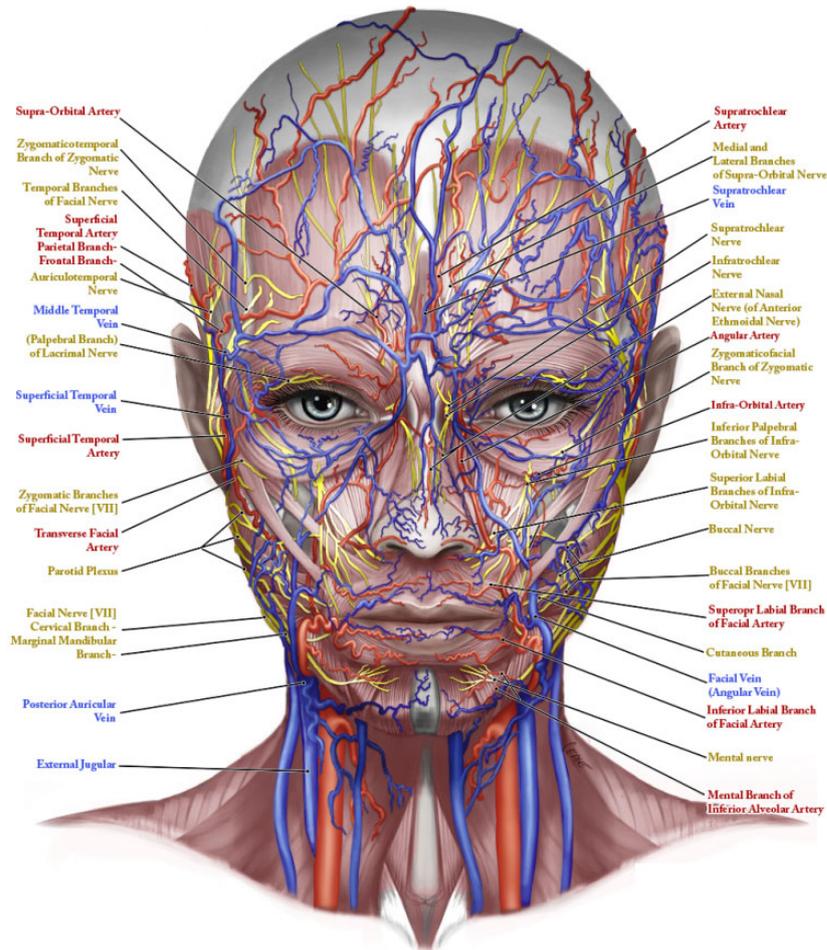


Abbildung 2.9.: Die Gefäßanatomie der menschlichen Haut am Beispiel des weiblichen Gesichts.

Quelle: [Cease (2013)] – bearbeitet

2.3. Nutzbarmachung von Thermografiedaten

Wie in Kapitel 2.1.2 bereits erläutert, wird die Infrarotthermografie seit den sechziger Jahren in einem ziemlich breiten Anwendungsfeld verwendet. Mit der Entwicklung und fortschreitenden Modernisierung dieser Technologie ist auch die Forschung und Verwendung im Bereich der Humanmedizin stetig gewachsen. Dabei konzentriert sich der Großteil der Anwendungen auf

die Nutzung von Infrarotthermografie als Diagnoseinstrument [Fernández-Cuevas u. a. (2015)]. Neben der reinen visuellen Erkennung im Falschfarbenbild² sind in gespeicherten Infrarotbildern auch die radiometrischen Daten in Form von Emissivität und der daraus resultierenden Temperatur pro Pixel hinterlegt. Um diese Temperaturdaten in einer Analyse verwenden zu können, müssen sowohl die Grenzen der Infrarotthermografie, als auch mögliche Einflüsse auf Temperaturänderungen bekannt sein. Um in einer Analyse zeitliche Verläufe interpretieren zu können sollten außerdem gewisse Protokolle verfolgt werden.

2.3.1. Probleme bei Messbarkeit – Grenzen der Infrarotthermografie

Die Infrarotthermografie ist – zumindest auf den ersten Blick – in vielen Bereichen von großem Vorteil. Trotzdem hat auch diese nicht-invasive Technologie ihre Grenzen.

Verdeckung des zu messenden Objekts Einen Beitrag den die Infrarotthermografie nicht leisten kann ist es, die Strahlung von direkt verdeckten Objekten zu messen. Es kann bei bestimmten Materialien jedoch vorkommen, dass eine Störstrahlung von hinter oder unter einem Objekt liegendem Material auftaucht. Glas oder gespiegelte Flächen können von Infrarotstrahlung nicht durchdrungen werden, sondern solcherlei Flächen reflektieren die auf sie auftretende Strahlung.

Abstand zum zu messenden Objekt Ebenfalls zu beachten ist, dass die aufzunehmende Emission eines Objektes mit dem Abstand und der dadurch dazwischen liegenden Atmosphäre³ abnimmt. Dies führt dazu, dass sich die messbare Emission von Wärmestrahlung ändert und so falsche Werte aufgenommen werden. Aus diesem Grund sind stichprobenartige Referenzmessungen zu empfehlen.

2.3.2. Mögliche Einflüsse auf Temperaturänderungen

Um die von einer Thermografiekamera aufgezeichneten Infrarotbilder nützlich einzusetzen, bedarf es einer genauen Analyse hinsichtlich der Verwendbarkeit im Bereich der Medizin und computergestützten Analyse. Dazu sollten in einem ersten Schritt diejenigen Faktoren betrachtet werden, die einen Einfluss auf die Infrarotthermografie im Zusammenhang mit dem menschlichen Körper haben können. Sowohl Umgebungseinflüsse, als auch technische Faktoren sollten hier näher betrachtet werden. Da der menschliche Körper als lebender Organismus zyklische und volatile Temperaturschwankungen besitzt, muss auf die Einflüsse

²vgl. 2.1.1

³vgl. 2.2

des Individuums auf das Messergebnis ebenfalls eingegangen werden. Gleichzeitig sollten die einzelnen Einflussfaktoren hinsichtlich absoluter und relativer Zeit-Temperaturmessungen begutachtet werden. So können beispielsweise die an den verschiedenen Tageszeiten stattgefundenen Messungen schwierig miteinander verglichen werden, wenn man die sogenannte *Circadiane Rhythmik*, also die natürlichen Tagestemperaturschwankungen des Menschen, nicht beachtet.

Da, wie in Abschnitt 2.1 erläutert, die Quelle von Infrarotstrahlung Wärmeenergie ist, müssen die Gesetze der Thermodynamik ebenfalls erwähnt werden.

Einflüsse sollten sowohl hinsichtlich der Bedeutung für die Evaluation und Interpretation der Thermografiebilder untersucht werden [Zaproudina u. a. (2008)]. So kann beispielsweise Sonneneinstrahlung im Laufe einer Messung maßgeblichen Einfluss auf das Temperaturergebnis eines Probanden haben und so die spätere Interpretation verfälschen. Durch die große Anzahl solcher Faktoren erscheint ihre Kontrolle fast unmöglich. Jedoch ist es im Umgang mit dieser Technologie unabdingbar, die Einflüsse zu kennen und zu minimieren, um eine spätere Interpretation verlässlich zu machen.

Im folgenden Abschnitt sind die Einflussfaktoren in drei verschiedene Klassen unterteilt:

- *Umgebungseinflüsse*: Diejenigen Faktoren, die am Ort der Messung maßgeblich sind.
- *Eigenschaften des Individuums*: Persönliche Charakteristiken des Probanden, die den Temperaturwert auf der Haut verändern können.
- *Technische Faktoren*: Verwendete Hard- und Softwarekomponenten.

Umgebungseinflüsse

Raumtemperatur Die Raumtemperatur sollte bestimmten Kriterien gerecht werden: konstante, homogene Temperaturwerte über gesamten Zeitraum der Messungen, empfohlen: 18-25 °C, um Frieren oder Schwitzen des Probanden zu verhindern. Einige Autoren beschreiben 21 °C als die empfohlene Temperatur, da hier die Infrarot-Emission der Haut am höchsten ist [Garagiola und Giani (1990)].

Relative Feuchte Der Feuchtigkeits-Anteil in der Luft (Relative Feuchte) sollte zum Zeitpunkt der Messung zwischen 40% und 70% liegen. Durch einen kontrollierten Feuchtigkeitswert wird verhindert, dass ein Proband stärker schwitzt bzw. friert [IACT (2002)]. Außerdem können Wasserdampf-Partikel bei hoher Luftfeuchtigkeit dazu führen, dass die gemessenen Infrarotwerte durch minimale Emission der Partikel andere Werte ergeben.

Objekte mit IR-Strahlung Es ist zu empfehlen, den Raum, in dem eine Messung stattfinden soll, auf externe Infrarot-Strahlungsquellen zu untersuchen. Mögliche Quellen wie Fenster, Luftströme innerhalb des Raumes, Lichteinfall, Wasserrohre, reflektierende Wandastriche und Wandisolierungen sind nur einige Beispiele, auf die bei einer zuverlässigen Messung geachtet werden sollte. Viele dieser Quellen können maskiert werden, indem hinter den Probanden nichtreflektierendes Material, beispielsweise ein Vorhang, angebracht wird

Individuelle intrinsische Faktoren

Geschlecht Das Geschlecht ist ein wichtiger zu betrachtender Faktor für die Infrarotthermografie. Die Autoren Hardy und Du Bois haben schon im Jahre 1940 festgestellt, dass das weibliche Geschlecht ein größeres Fettpolster unter der Haut besitzt und somit besser vor Kälte geschützt ist bzw. Wärme besser speichern kann [Hardy und Du Bois (1940)]. Eine solche bessere Isolation unter der Haut produziert weniger Infrarotstrahlung, da weniger Wärmeverlust herrscht. Aus diesem Grund ist der Hauttemperaturwert an den Extremitäten von Männern etwas höher. Ein weiterer Grund für den Unterschied der Hauttemperatur ist die Stoffwechselrate. Wie im Kapitel 2.2.1 bereits erläutert, ergibt eine hohe Stoffwechselrate ebenfalls einen höheren Hauttemperaturwert. Da Männer im Vergleich zu Frauen eine höhere Stoffwechselrate haben können, ist auch die Gesichtstemperatur vergleichsweise höher [Christensen u. a. (2012)].

Alter Das Alter eines Menschen und seine durchschnittliche Temperatur stehen in einem gewissen Verhältnis. Mit dem Älterwerden sinkt die Temperatur des Körpers von 37 Grad Celsius auf 36,40 Grad. Dies geht aus einer Untersuchung von Chamberlain u. a. hervor [Chamberlain u. a. (1995)]. Die Ergebnisse der Studie sind in der Abbildung dargestellt. Der Abfall der Temperatur im Alter kann zum einen mit einer niedrigeren Stoffwechselrate, zum anderen mit einer geringeren Fähigkeit der Abführung von Wärme im Alter zusammenhängen.

Anatomische Eigenschaften Anatomische Eigenheiten eines jeden Körpers, hauptsächlich hinsichtlich Gewicht und Größe und des daraus resultierenden Body-Mass-Index⁴ (BMI). Der BMI kann zumindest einen Anhaltspunkt für unter der Haut liegende Fettschichten geben. Diese gelten als einer der wichtigsten Einflussfaktoren auf die thermischen Muster eines Individuums, da sie eine isolierende Wirkung haben [LeBlanc (1954)].

Circadiane Rhythmik Die circadiane Rhythmik beschreibt die menschlichen körpereigenen Rhythmen im Tagesverlauf, die einen Einfluss auf bestimmte Funktionen des körpereigenen

⁴ $BMI = \frac{\text{Körpermasse}}{\text{Körpergröße}^2}$

Organismus haben. Der Einfluss der circadianen Rhythmik auf die Körpertemperatur ist am stärksten morgens und abends, wobei die menschliche Körpertemperatur morgens einen niedrigeren Wert aufweist als am Abend. Ein Körper im Schlafmodus weist ebenfalls einen niedrigeren Temperaturwert auf [Reinberg (1975)].

Behaarung Gerade im Bezug auf die Hauttemperaturwerte spielt die Haardichte auf der Haut eine zumindest nicht außer Acht zu lassende Rolle. Behaarte Körperbereiche weisen auf Thermografiebildern grundsätzlich einen niedrigeren Temperaturwert auf. Die niedrigere Temperatur ergibt sich durch den Fakt, dass Haare undurchblutete Substanzen sind, die außerdem einen hohen Emissionsgrad haben [B BARNES (1963)]

Medizinische Vorgeschichte Die Haut des menschlichen Körpers dient unter anderem als Schutzhülle vor äußeren Einflüssen und sollte idealerweise über einen längeren Zeitraum nahezu ähnliche thermische Muster aufweisen. Jedoch kann ein Mensch im Laufe seines Lebens Krankheiten entwickeln oder äußere Schäden der Haut bekommen, die einen permanenten Einfluss auf das thermische Muster haben können. Verbrennungen, Infektionen oder gar Nervenschäden sind nur einige von vielen Beispielen. Auch die normalerweise auffindbare thermische Asymmetrie beider Körperhälften kann durch solcherlei Schäden beeinflusst werden.

Emissionsgrad der Haut Im Vergleich zu einem *schwarzen Körper*, der eine idealisierte Strahlungsquelle darstellt, bei dem alle auftreffende elektromagnetische Strahlung absorbiert wird, besitzt die Haut einen Emissionsgrad zwischen 0.97 und 0.99 [Francisco J. Sanchez-Marin (2009)].

Stoffwechselrate Wie bereits erwähnt, ist die Stoffwechselrate hauptverantwortlich für die menschliche Wärmebilanz.

Blutdurchfluss der Haut Einer der wichtigsten Faktoren, die einen Einfluss auf die Infrarotthermografie haben, ist der Blutdurchfluss der Haut. Das autonome Nervensystem kontrolliert die Gefäßverengung und -erweiterung und damit über den Blutfluss die Hauttemperatur.

Emotionen Die Hauttemperatur – besonders im Gesicht – kann sich je nach Gefühlslage des Menschen verändern. Angst, Schuldgefühle oder Stress können direkten Einfluss auf die Hauttemperatur haben [Giacinto u. a. (2014)] Deshalb sollte bei Untersuchungen zumindest ein Augenmerk auf den emotionalen Zustand eines etwaigen Probanden liegen.

Individuelle extrinsische Faktoren

Faktoren, die durch Einnahme von Stoffen entstehen Diese Einflussfaktoren können durch die Einnahme eines Medikaments, von Tabak, Drogen oder Alkohol entstehen. Da die schier unendliche Anzahl an Medikamenten nicht getestet werden kann, finden sich hierzu in der Literatur leider wenig Studien. Alkohol allerdings ist erwiesenermaßen ein Faktor für den Anstieg der Hauttemperatur. Grund hierfür ist die Erweiterung der Gefäße und eine erhöhte Blutflussrate durch den erfolgten Alkoholkonsum [Hughes u. a. (1984)]. Im Gegensatz zu Alkoholkonsum hat das Rauchen von Tabak einen gegensätzlichen Effekt: Die Temperatur der Haut sinkt aufgrund des blutdrucksenkenden Effekts von Nikotin. Etwa 30 Minuten nach dem Rauchen einer Zigarette ist der tiefste Temperaturwert mit Hilfe von Infrarotthermografie messbar [S. und H.].

Faktoren durch Auftragen von Stoffen auf die Haut Ebenfalls extrinsische Faktoren sind Stoffe, die durch Auftragen auf die Haut einen Einfluss auf die Hauttemperatur haben können. Kosmetik gilt als unnatürlicher Faktor, der die Haut isoliert und deren Emissionsgrad verändern kann und sollte daher nicht vor einer Messung aufgetragen werden [Vainer (2001)]. Auch das Auftragen von Wasser auf die Haut, sei es durch eine warme oder kalte Dusche, Saunagänge oder Eispacks, beeinflusst das Emissionsverhalten der Haut [Bernard u. a. (2013)].

2.3.3. Messverfahren und Methodik für Thermografiebilder – Standardbedingungen

Aus dem vorhergehenden Kapitel wird bereits deutlich, dass es verschiedenste sowohl technische, als auch individuelle Einflussfaktoren auf die Qualität und Brauchbarkeit von Thermografiebildern gibt. Auch die Einflüsse aus der Umgebung der Szenerie, in der ein Bild aufgenommen wird, dürfen nicht vernachlässigt werden. Dies macht ein einheitliches Protokoll und eine normierte Methodik für jegliche Aufnahmen von Thermografiebildern unerlässlich.

Die in dieser Arbeit verwendeten Standardbedingungen für alle Versuche sind in Anlehnung an den Standard *Standards an Protocols in Clinical Thermographic Imaging* der *International Academy of Clinical Thermology* entstanden. Sie wurden an die Gegebenheiten an der HAW Hamburg angepasst, wo die für diese Arbeit notwendigen Versuche durchgeführt wurden. Ein weiteres Werk, welches sich der Standardisierung von Thermografieaufnahmen widmet, ist das von Ammer und Ring veröffentlichte Werk *Standard Procedures For Infrared Imaging in Medicine*. Solcherlei Standardbedingungen gelten aber nicht nur im medizinischen Rahmen, sondern können auf jegliche Thermografieanwendungen adaptiert werden.

Äußere Einflussgrößen, die bei der Aufnahme von Thermografiebildern auftreten können, wurden ebenfalls im vorhergehenden Kapitel näher beschrieben. Diese Einflüsse müssen bei einer Definition von Standardbedingungen ebenfalls in Betracht gezogen werden.

Um vergleichbare Daten aus Thermografiebildern zu generieren, müssen zuallererst die spezifischen Messeigenschaften gefunden werden.

Messgenauigkeit Mit der Genauigkeit ist die möglichst geringe Fehlertoleranz einer Thermografiemessung gemeint. Gerade im medizinischen Rahmen werden aufgenommene Daten mit einem bestimmten Standardwert verglichen. Die Abweichung vom *realen* Wert ist der Fehler. Da Messungen nie fehlerfrei sein können, muss versucht werden den Fehler möglichst klein zu halten. Je kleiner der Fehler, desto näher ist der Messwert am realen Wert.

Um den Fehler bei einer Messung möglichst klein zu halten, sind moderne und hochwertige Detektoren notwendig. Heutige Systeme, die keine Kühlung mehr benötigen, sind, wenn einmal kalibriert, temperaturstabil. Beispielsweise sind Geräte, die mit einem Focal Plane Array ausgestattet sind, wartungsfrei. Auch die für diese Arbeit genutzte Infratec VarioCam HD, die im Kapitel 3.1.1 vorgestellt wird, ist mit einem wartungsarmen Focal Plane Array ausgerüstet. Infratec empfiehlt bei diesem Gerät eine Rekalibrierung im zweijährigen Wartungsrythmus durchzuführen. Das System wurde vor Auslieferung „sehr sorgfältig unter Wahrung des Maßanschlusses an das Staatliche Normal kalibriert“ [InfraTec (2015)]. Moderne Geräte benötigen also keine Referenztemperatur, die beispielsweise mit einem Temperaturmessgerät invasiv gemessen werden muss. Das System VarioCam HD von der Firma Infratec führt außerdem im 30-sekündigen Abstand eine sogenannte *Non Uniformity Correction* (NUC) aus. Ein Korrigierungsalgorithmus berechnet den Einfluss der sich gegenseitig beeinflussenden Thermosensorelemente auf dem Focal Plane Array und korrigiert deren Abweichungen [InfraTec (2015)]. Bei einer NUC wird der Bildfluss für einen Moment unterbrochen.

Weitere Messungenauigkeiten können durch das aufzunehmende Objekt verursacht werden. Beispielsweise besitzt ein mit Bart besetztes Gesicht eine abweichende Wärmeverteilung wegen der unterschiedlichen Emissionsgrade von Haaren und Haut. Unterschiedliche Emissionsgrade beeinflussen die Genauigkeit einer Thermografiemessung.

Aber nicht nur das Objekt, sondern auch der Winkel des Wärmebildgerätes zum Objekt kann Messfehler produzieren. Bei einem Winkel von unter 30 Grad vom Objekt zum Wärmebildgerät besteht – je nach Beschaffenheit und (Weit-)Winkel des Objektivs – bei glatten Oberflächen die Möglichkeit, dass die Strahlungsintensität bis zu einem Winkel von 0 Grad exponentiell abnimmt [Speakman und Ward (1998)].

Wenn nach einer Aufnahme von Thermografiedaten eine Bildanalyse erfolgen soll, so sollte hierbei der Fokus auf die Analyse von einzelnen Regions of Interest (ROI) erfolgen. Die Erstellung und Verwendung von ROIs werden im Kapitel 2.2.3 behandelt. Die Falschfarbendarstellung kann Werte visualisieren, sollte aber nicht als Möglichkeit zur exakten Feststellung von Temperaturwerten genutzt werden, da bspw. bei einer Trennung der Farben mit einer Temperaturdistanz von 1 °C zwei nebeneinander liegende Punkte 0,1 °C und 1,9 °C haben können und eine hoch auflösende Temperaturanalyse nicht möglich ist [Ammer und Ring (2012)].

Messpräzision/Robustheit Die Messpräzision oder auch Robustheit einer Messung ist die Übereinstimmung von wiederholten Messungen am selben Objekt unter gleichen Bedingungen. Je kleiner der Messunterschied zwischen einzelnen Messungen, desto präziser ist eine Messung.

Änderungssensitivität Sowohl die Robustheit als auch die Messgenauigkeit haben einen Einfluss auf den Grad der Änderung, die anhand vieler Messdaten über einen bestimmten Zeitraum wahrgenommen werden kann. Eine Temperaturänderung kann nur dann wahrgenommen werden, wenn die innerhalb einer Messung auftretende Abweichung groß genug ist, um aus der Varianz einer Vielzahl von Messungen hervorzustechen.

Für die Definition eines Standards für die Aufnahme von Probanden lassen sich drei wichtige Bestandteile der Aufnahmeszenarie unterscheiden: Zuallererst sind die technischen Voraussetzungen eines Wärmebildgerätes zu definieren. Anschließend werden die vor und während einer Aufnahme für den Probanden zu beachtenden Kriterien vorgestellt. Außerdem müssen die während eines Versuches geltenden und beeinflussenden Umwelteinflüsse generalisiert werden.

Technische (Mindest-)Voraussetzungen für eine Messung Um möglichste genaue Aufnahmen zu generieren, sollten folgende Mindestvoraussetzungen für ein Wärmebildgerät vorhanden sein:

- Das Wärmebildgerät muss in der Lage sein, die Temperaturspanne des menschlichen Körpers aufzunehmen (30–40 °C)
- Emissionsgrad sollte auf 0.98 (Menschliche Haut) eingestellt sein
- Thermische Auflösung von weniger als 80 mK NEDT
- Manueller Fokus
- Echtzeitbildübertragung (entweder über externes Gerät oder Bildschirm am Gerät)

2. Analyse

- Überwachung und Rekalibrierung durch Korrektionsverfahren der auftretenden thermischen Eigenstörung auf dem Sensor
- Software für die Analyse mit Exportmöglichkeiten

Kriterien für den Probanden Das Verhalten des Probanden vor und während einer Messung ist ebenfalls ein wichtiges Kriterium für die Genauigkeit dieser Messung. Folgende Punkte sollten dabei unbedingt beachtet werden:

- Keine Nutzung von Cremes, Ölen oder Makeup am Tag der Messung
- Der Proband sollte möglichst keiner langen Sonneneinstrahlung bis zu 2 Tage vor dem Termin der Messung ausgesetzt sein, da die Haut an diesen Stellen sonst deutlich mehr Wärme ausstrahlt
- Ebenso keine Sauna oder Dampfbad am Tag der Messung
- Kein Duschen bis zu eine Stunde vor der Messung
- Kein Alkohol oder Drogenkonsum bis 24 Stunden vor der Messung
- Kein Sport direkt vor der Messung

Neben den oben genannten Punkten ist eine Ruhephase vor der Messung unabdingbar. Nur so kann sich der Körper des Probanden an die im Raum herrschenden Bedingungen gewöhnen und sich die Thermodynamik des Probanden auf die Umgebung einstellen. Um dies zu garantieren, wird eine Ruhephase von 15–30 Minuten empfohlen [IACT (2002)].

Aufnahmeprotokoll Die Gestaltung der Aufnahmeszenarie ist ein wichtiger Punkt, der einen großen Einfluss auf die Robustheit einer Messung haben kann. Gerade für Aufnahmen, bei denen ein Augenmerk auf den Zeitverlauf der thermischen Änderung gelegt wird, ist es wichtig, bei jeder Aufnahme demselben Schema und Protokoll zu folgen.

2.4. Thermografie im Praxis-Einsatz

Die Infrarotthermografie wurde inzwischen in zahlreichen Anwendungsfeldern als hilfreiche Technologie entdeckt. Um das breite Spektrum der Infrarotthermografie anzudeuten, werden im folgenden Abschnitt kurz einige Anwendungen der Thermografie beschrieben und deren Vorteile und Grenzen erörtert.

Infrarotthermografie im Industrie- und Baubereich Im Baubereich gibt es eine Vielzahl von Möglichkeiten die Infrarotthermografie anzuwenden. Die Erkennung und das Sichtbarmachen von Energieverlusten an der Dämmung von Gebäuden ist die wohl am meisten verbreitete und von Wärmebildgeräte-Herstellern am stärksten beworbene Nutzung im Baubereich.⁵ Das Erkennen von Feuchtigkeit in der Dämmung, Brüchen von Rohrleitungen und das Aufspüren von Konstruktionsfehlern sind nur einige der Vorteile, welche die Thermografie bietet.

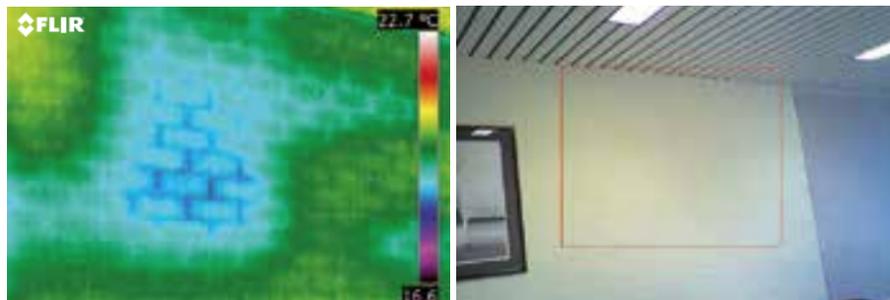


Abbildung 2.10.: Im Wärmebild erkennbar fehlende Dämmung (links), was im visuellen Bild nicht erkennbar ist (rechts) [FLIR (2011)]

Infrarotthermografie in Landwirtschaft und Jagd Auch in der Landwirtschaft gewinnt die Thermografie immer mehr an Bedeutung. Ein Forschungsprojekt an der Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften in Suderburg in Zusammenarbeit mit dem Thünen-Institut⁶ entwickelt und untersucht die Vorteile einer sensorgestützten Beregnungssteuerung für den Kartoffelanbau. Der Grad der Verdunstung, Aufnahme des Beregnungswassers vom Boden und der Nitratgehalt werden hier mit Hilfe einer Drohne, die mit einer Wärmebildkamera ausgestattet ist, untersucht.⁷ Die an der Drohne angebrachte Wärmebildkamera kann dabei die Sensoren im Boden unterstützen und zusätzliche Messwerte liefern. Gleichzeitig bietet sie

⁵vgl. http://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/T820325/T820325_DE.pdf

⁶www.thuenen.de

⁷<https://www2.ostfalia.de/cms/de/campus/ostfalia/news/news0322.html>

2. Analyse

den Wissenschaftlern einen schnellen Überblick über aktuelle Verdunstungsgrade des Wassers im Boden.

Vermehrt werden auch mit Wärmebild ausgestattete Drohnen im jagdlichen Bereich eingesetzt. Durch die schnellen, industriellen Mähmaschinen haben neugeborene Rehkitze, die oft im hohen Gras von ihren Ricken abgelegt werden, keine Chance dem Mähwerk zu entkommen. Um Rehkitze vor der Mahd aufzuspüren, hat sich die Thermografie als einfache und mit hohen Erfolgsquoten robuste Technik für die Jäger erwiesen, Rehkitze zu finden und in Sicherheit zu bringen. Hier findet eine Anwendung meist in den frühen Morgenstunden statt, da die Körpertemperatur der Kitze im Hochsommer der Temperatur des von der Sonne aufgeheizten Bodens sehr ähnelt. Dadurch ist eine Erkennung im Falschfarbenbild aufgrund der ähnlichen Farbdarstellungen erschwert. Morgens ist der Boden durch die Nacht um einige Grad heruntergekühlt und ein deutlicherer Unterschied vorhanden.

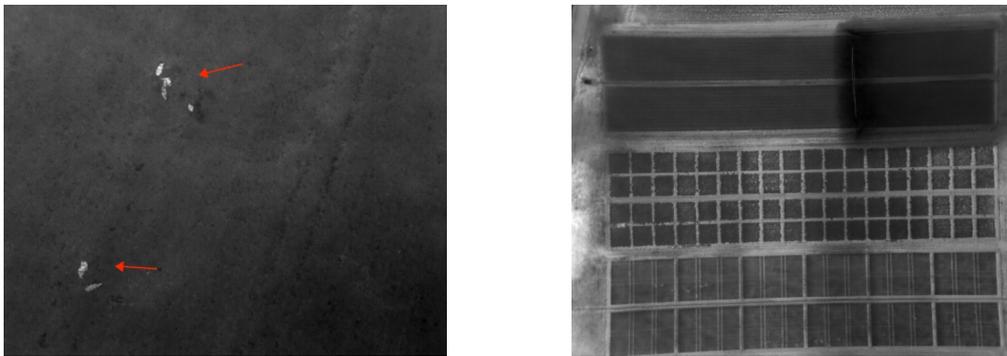


Tabelle 2.3.: Links: Wildschweine im Rapsfeld (mit rotem Pfeil markiert); Rechts: Unterschiedliche Kartoffelbeete, die unterschiedlich bewässert wurden

Infrarotthermografie in der Medizin Wie schon im Kapitel 2.1.2 angeklungen, ist der medizinische Sektor ein Anwendungsfeld für Wärmebildgeräte, die in der Lage sind, den für den menschlichen Körper benötigten Spektralbereich abzubilden. Die Thermografie wird vermehrt zur Erkennung von Brustkrebs eingesetzt. Die hohe Stoffwechselaktivität und geförderte Durchblutung eines Karzinoms führt zu einer höheren Wärmeabbildung. So kann auch hier der Vorteil der Nicht-Invasivität zu einer höheren Akzeptanz und Früherkennungsrate führen. Allerdings äußern einige Ärzte Bedenken, dass ein reines Vertrauen in diese Technologie dazu führen kann, dass die klassische Mammografie vernachlässigt wird und so eine Früherkennung verzögert würde (vgl. <https://www.aerzteblatt.de/nachrichten/46121/Mammakarzinom-FDA-warnt-vor-Thermographie>).

2. Analyse

Auch in der Tiermedizin gewinnt die Thermografie vermehrt an Bedeutung. Da insbesondere Tiere bekannterweise nicht in der Lage sind, über ihr körperliches Befinden zu sprechen, ist ein Indikator für vorhandene Krankheiten eine gute Hilfe für den behandelnden Veterinär. Durch den Vorteil der Nicht-Invasivität einer Messung mit der Thermografiekamera werden die Tiere nicht unnötig Stresssituationen ausgesetzt. Entzündungen oder Muskel- und Nervenverletzungen können so auf schnelle Weise für eine weitere Diagnose schmerz- und stressfrei festgestellt werden.

2.5. Verwandte Arbeiten

Im folgenden Kapitel werden einige Untersuchungen vorgestellt, die sich wie diese Arbeit mit Fragestellungen der Gesichtsthermografie beschäftigen. Zum einen sind Paper gewählt worden, bei denen klinische (medizinische) Untersuchungen mit einem besonderen Ziel stattgefunden haben, zum anderen Paper, die eine Anwendung als Lösungsansatz für die thermische Analyse vorgestellt haben.

2.5.1. FACIAL SKIN SURFACE TEMPERATURE CHANGES DURING A "CONCEALED INFORMATION" TEST

Die Arbeit von [Pollina, Dollins, Senter, Brown, Pavlidis, Levine und Ryan \(2006\)](#) mit dem Titel **FACIAL SKIN SURFACE TEMPERATURE CHANGES DURING A "CONCEALED INFORMATION" TEST** versucht mit der Durchführung von zwei Experimenten zu erforschen, inwiefern sich die Hauttemperatur im Gesicht bei *Concealed Information Tests* (CIT) verändert. Der CIT ist eine Methode, um die mit Hilfe eines Lügendetektors erkennbaren körperlichen Veränderungen eines Täters hervorzurufen. Bei diesem Test werden Tatverdächtige mit tatort-relevanten und tatort-irrelevanten Gegenständen konfrontiert, während eine Messung stattfindet (Herzkreislaufmessung, Schweißbildung, galvanische Hautreaktion). Diejenigen Gegenstände, die am Tatort vorhanden waren oder gesehen worden sind, unterscheiden sich dabei nicht von den irrelevanten Gegenständen. Der Gegenstand ist ein wichtiger Bestandteil des Tathergangs. Der Ermittler sucht sich vor einer Befragung von möglichen Tätern diese Gegenstände aus. Ein üblicher relevanter Gegenstand könnte beispielsweise eine bestimmte Farbe des Fluchtfahrzeugs sein. Der tatort-irrelevante Gegenstand ist dann ein Fahrzeug mit einer anderen Farbe. Wenn nun bei einer Interrogation durch den Ermittler eine Befragung zu beiden Gegenständen stattfindet und die physiologische Reaktion bei den tatort-relevanten Gegenständen stärker ist, so wird davon ausgegangen, dass der Verdächtige die relevanten Informationen zum Tatort kennt. Dieser Test ist in Verbindung mit sog. „Lügendetektoren“ sehr effektiv, jedoch kann bei bestimmten Personen die Befragung alleine durch die Hirnaktivität des Nachdenkens eine Veränderung des autonomen Nervensystems hervorrufen, was den Lügendetektor beeinflussen kann.

Die Autoren versuchen aus diesem Grund, mit der Infrarotthermografie eine nicht-invasive Technologie zu verwenden, mit der Temperaturänderungen der Haut über einen Zeitraum gemessen werden können. Die Hoffnung der Autoren ist es, dass die Infrarotthermografie die Lücke zwischen Gesichtsausdruck, Emotion und Messungen des autonomen Nervensystems

schließen kann und so Befragungstests besser evaluiert und Täter schneller überführt werden können.

Die Aufnahmen haben mit einem Wärmebildgerät mit einer zu der Zeit der Veröffentlichung hohen Auflösung von 256x256 Pixeln und einer Sensitivität von weniger als 0,10 °C stattgefunden. Als Region für die Analyse, also Region of Interest (ROI), der Hauttemperatur im Gesicht wurde, wie in den meisten Experimenten anderer Autoren, die *regio periorbitalis* (Augenregion) gewählt.

An zwei Experimenten haben insgesamt 69 Probanden teilgenommen. Hierzu wurde ein fingierter Raubmord konstruiert. Ein Teil der Probanden war an dem fingierten Tatgeschehen unbeteiligt und sollte die Fragen wahrheitsgemäß beantworten. Der andere Teil sollte einer Puppe mit einem Schraubenzieher in die Brust stechen und ein auf dem Tisch platziertes Portemonnaie entwenden und bei der Befragung einen unschuldigen Schein wahren.

Während der Befragung wurden beide Gruppen einmal zu einem Schraubenzieher als Tatwaffe befragt und mehrere Male zu anderen möglichen Tatwaffen (Messer u. a.). Dabei haben Wärmebildaufnahmen von 5 Sekunden bei einer Bildrate von 30 Hz stattgefunden, die in dem Moment gestartet wurde, wenn ein Gegenstand angesprochen wurde.

Für die Bildanalyse haben die Autoren die einzelnen Frames untereinander verglichen und jeweils 6 Frames mit Maximaltemperatur in der ROI und 6 Frames mit Minimaltemperatur in der ROI ausgewiesen. Dazu wurde der Peak-Valley-Algorithmus verwendet, um Temperaturspitzen und Temperaturtiefpunkte zu erkennen. Die Auswertung der ROIs hat mit Hilfe Software *IMAQ* der Firma *National Instruments* stattgefunden.

Mit Hilfe der Analyse konnten 83% der Probanden der richtigen Gruppe zugeordnet werden (am Tatgeschehen beteiligt oder unbeteiligt). Drei Viertel der tatsächlich „schuldigen“ Probanden wurden korrekt als schuldig erkannt und 90 % der „unschuldigen“ Probanden wurden als unschuldig identifiziert. Die Genauigkeit dieser Methode ist laut den Autoren mit den klassischen Lügendetektoren vergleichbar.

Das Paper zeigt, dass die Gesichtsthermografie eine Technologie ist, die psychologische Reaktionen schnell und ohne physischen Kontakt (nicht invasiv) analysieren kann.

2.5.2. THERMAL IMAGING AS A WAY TO CLASSIFY COGNITIVE WORKLOAD

Der Versuch THERMAL IMAGING AS A WAY TO CLASSIFY COGNITIVE WORKLOAD von **Stemberger, Allison und Schnell (2010)** hat das Ziel, mit Hilfe eines neuronalen Netzes die kognitive Belastung anhand von Thermografieaufnahmen des Gesichtes zu erkennen.

Dazu haben 12 Personen an einem Test teilgenommen, der Stress durch kognitive Belastungen hervorruft. Der Test beinhaltet drei unterschiedlich hohe Belastungslevel. Der „einfachste“

Test besteht darin, den Mausbutton zu betätigen, wenn die Zahl 5 auf einem Bildschirm erscheint. Das mittlere kognitive Belastungslevel erfordert das Drücken des Mausbuttons, wenn drei gerade Zahlen hintereinander auf dem Bildschirm angezeigt werden. Im höchsten Level verlangen die Autoren, dass der Mausbutton gedrückt wird, wenn eine Zahl auf dem Display angezeigt wird, die zwei Zahlen davor bereits angezeigt worden ist. Dies fordert zusätzlich das Erinnerungsvermögen. Den Probanden wurden in jedem Level 600 Zufallszahlen von 1 bis 8 präsentiert, jede Zahl taucht in gleicher Häufigkeit, also genau 75-mal auf.

Während der Tests wurden Aufnahmen mit einer Bildrate von 15 Hz gemacht. Als Regions of Interest (ROI) für die Analyse wurden Stirn, Nase, Augen (periorbitaler Bereich), linke und rechte Wange und das Kinn gewählt. Zusätzlich wurde ein Tracking-Headset am Probanden angebracht, welches die Kopfbewegung aufzeichnet, um später die ROI besser separieren zu können, was wiederum den nicht-invasiven Vorteil der Thermografiekamera zunichte macht.

Zur Bestätigung der Funktionsfähigkeit der Stress-Tests wurde die Reaktionszeit der Probanden bei den einzelnen Tests gemessen. Dabei wurde die kürzeste bei dem einfachsten Testlevel erreicht und die höchste Reaktionszeit bei dem Test mit der höchsten kognitiven Belastung, woraus die Autoren schließen, dass das kognitive Stresslevel mit den höheren Belastungsleveln steigt.

Um ähnliche Muster auch in Thermografiebildern zu erkennen, wurde die durchschnittliche Hauttemperatur der ROIs in SPSS⁸ ausgewertet. Dazu wurde die *Multilayer Perceptron Procedure*, ein neuronales Netz, genutzt.

Das Netz konnte eine Bestimmung in niedriges, mittleres und hohes Stresslevel mit einer Genauigkeit von 76,9 %, 79,2 % und 86,8 % erreichen.

Die Autoren kommen in der Diskussion ihrer Ergebnisse jedoch zu dem Schluss, dass das Netz zwar in der Lage sei, die jeweiligen Aufnahmen den richtigen Belastungsleveln zuzuordnen, jedoch sei über alle Probanden kein ableitbares Muster erkennbar, woraus sich schließen lasse, dass jedes Individuum eine eigene thermische Signatur besitzt.

2.5.3. CLASSIFYING AFFECTIVE STATES USING THERMAL INFRARED IMAGING OF THE HUMAN FACE

Das von **Nhan und Chau (2010)** veröffentlichte Paper CLASSIFYING AFFECTIVE STATES USING THERMAL INFRARED IMAGING OF THE HUMAN FACE evaluiert mit Hilfe eines merkmalsbasierten Ansatzes Infrarotbilder, die im Rahmen eines Experiments aufgenommen wurden und klassifiziert diese. Das Experiment wurde mit 12 Probanden durchgeführt. Eingesetzt wurde eine Thermografiekamera, die eine thermische Auflösung von unter 65 Millikelvin bei 30 °C besitzt.

⁸ *Superior Performing Software System*: Statistiksoftware der Firma IBM

Aufgenommen haben die Autoren das Experiment mit einer Bildrate von 30 Hertz. Interessant an dieser Arbeit ist, dass die Autoren am Probanden einen kleinen Aufkleber angebracht haben, der durch wasserkühlende Effekte auf 10 °C heruntergekühlt ist. Mit Hilfe dieses Aufklebers auf der Stirn des Probanden konnten die Regions of Interest bei Kopfbewegung weiterhin festgestellt werden. Im rohen Datenbild konnte so der Punkt mit der kältesten Temperatur gewählt werden und von dort aus die Regions of Interest gefunden werden. Genutzt wurden die wärmsten 50 % der Pixel einer jeden ROI.

Den Teilnehmern wurden Bilder aus dem *International Affective Pictures System* (IAPS) gezeigt, einer Datenbank, die standardisierte Bilder zur Emotions- und Aufmerksamkeitshervorbringung beinhaltet. In 3 Phasen des Experiments, T1 (Entspannungsphase, schwarzes Bild mit weißem Punkt), T2 (Stimulationsphase, Bilder aus dem IAPS), T3 (erneut Entspannungsphase), wurden die Gesichter der Probanden aufgenommen.

Die Extrahierung der Merkmale aus den aufgenommenen Daten wurden sowohl einer Zeit- als auch einer Zeit-Frequenz-Analyse unterzogen, wobei vier Klassifizierungen identifiziert wurden: high arousal, low arousal, high valence, low valence. Zur Veranschaulichung der Emotionen nutzen die Autoren das *Valence-and-Arousal-Model*, um die emotionalen Reaktionen der Probanden auf die ihnen gezeigten Bilder zu assoziieren. Die Valence reicht von „unangenehm“ bis „angenehm“. Die Arousal-Achse von „ruhig“ bis „erregt“. Als grounded-truth (Baseline) verwendeten die Autoren die vom Probanden selbst empfundenen Arousal- bzw. Valence-Level, die als niedrig oder hoch bewertet werden konnten. Diese selbst empfundenen Level wurden dann mit den extrahierten Daten aus den Bildern ermittelt.

Die Ergebnisse der Arousal- und Valence-Erkennung der Experimente hatten – zumindest verglichen mit der jeweilig empfundenen Arousal und Valence der Probanden – im Durchschnitt über 80 % Genauigkeit. Die Genauigkeit gegenüber der Baseline war dabei an der nasalen und periorbitalen Region zu erkennen. Somit kommen die Autoren zu dem Schluss, dass Infrarotthermografie durchaus in der Lage ist, Merkmale zu generieren, mit denen Valence und Arousal einer Person bestimmbar sind.

2.5.4. THERMAL FACEPRINT: A NEW THERMAL FACE SIGNATURE EXTRACTION FOR INFRARED FACE RECOGNITION

In der Arbeit *THERMAL FACEPRINT: A NEW THERMAL FACE SIGNATURE EXTRACTION FOR INFRARED FACE RECOGNITION* von [Akhroufi und Bendada \(2008\)](#) wird eine Methodik vorgestellt, mit der ein thermografischer Gesichtsabdruck für die Wiedererkennung von Gesichtern generiert werden kann. Da die Gesichtserkennung als individueller „Fingerabdruck“ in Sicherheitsapplikationen immer mehr an Bedeutung gewinnt, leistet dieses Paper einen wichtigen Beitrag zum

Feld der *Computer Vision*. Der Vorteil gegenüber der herkömmlichen Gesichtserkennung ist die Beleuchtungsunabhängigkeit der Thermografiebilder.

Die Autoren bedienen sich der Eigenschaft, dass die Adern und Blutgefäße bei jedem Menschen unterschiedlich ausgeprägt und sichtbar sind. Dabei wird in fünf Schritten vorgegangen:

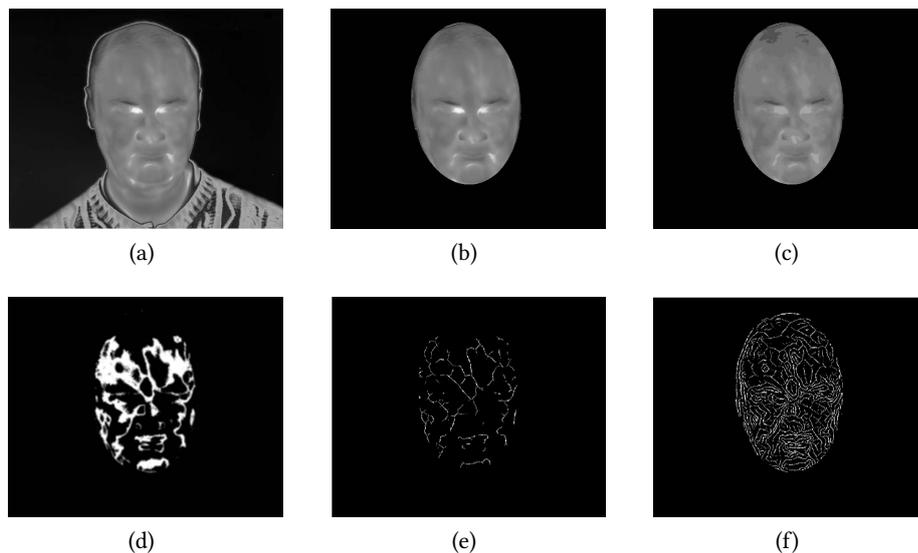


Abbildung 2.11.: Schritte für die Erstellung eines Gesichtsabdruckes

Diese einzelnen Schritte sind in Abbildung 2.11 dargestellt. In (a) ist der mit einer Thermografiekamera, die im Spektrum von 3 bis 5 μm arbeitet, aufgenommene Oberkörper sichtbar. Dieser wird in den Schritten (b) und (c) auf die Gesichtsregion zugeschnitten und durch einen hohen Kontrast im gray-scale-Bild auf den Vordergrund beschränkt (Hintergrund bleibt schwarz), um dann im Schritt (d) mit Hilfe von Isothermen das Netz von Adern und Gefäßen sichtbar zu machen. Da sich bestimmte Gruppen dieser Adern und Venen in einem ähnlichen Temperaturspektrum befinden, lassen sich diese durch das Anpassen der Isotherme leicht darstellen. Je nach der Anzahl der unterschiedlichen thermischen Dimensionen in einem Gesicht können hieraus mehrere Isotherm-Bilder entstehen. Im fünften Schritt (e) wird mit Hilfe eines Algorithmus die Mediale Achse aus (d) berechnet. Hierbei werden die im Mittel gefundenen Bildpunkte zusammengefasst. Mit Hilfe von Bildfusion werden dann im letzten Schritt (f) die einzelnen Isotherm-Bilder zusammengeführt und es entsteht ein Gesichtsabdruck.

Der Vergleich einiger vorgenommener Versuche mit Probanden hat laut den Autoren ergeben, dass diese Methodik für verschiedene Individuen eindeutig unterscheidbare Gesichtsabdrücke hervorgebracht hat.

2.5.5. STRESSCAM: NON-CONTACT MEASUREMENT OF USERS' EMOTIONAL STATES THROUGH THERMAL IMAGING

Ebenfalls aus dem Gebiet der Thermografie-Anwendungen stammt die von [Puri, Olson, Pavlidis, Levine und Starren \(2005\)](#) entwickelte Anwendung STRESSCAM: NON-CONTACT MEASUREMENT OF USERS' EMOTIONAL STATES THROUGH THERMAL IMAGING. Mit der StressCam haben sich die Autoren das Ziel gesetzt, Computernutzer hinsichtlich ihres Stresslevels bei der Nutzung von Computersystemen zu untersuchen. Dazu wurden 12 Probanden einem *Stroop Color Word Conflict Test* unterzogen. Bei diesem Stroop-Test müssen die Teilnehmer in einer bestimmten Zeit Farben von Worten erkennen, die wiederum aus Farbnamen anderer Farben bestehen. Die Aufnahmen haben mit einer Auflösung von 320 x 256 Pixeln bei einer Bildrate von 31 Bildern pro Sekunden stattgefunden. Als Ground-Truth wurde ein Gerät zur Messung des Energieverbrauchs bzw. der metabolischen Rate am Körper angebracht. Jeder Test hat eine Baseline-Phase zur Beruhigung (10 Minuten) und eine Stroop-Test-Phase (10 Minuten) beinhaltet. Als Region of Interest wurde die Stirn-Region gewählt, da die periorbitale Region aufgrund Rapid-Eye-Bewegungen während einer Computernutzung nicht als aussagekräftig gelten kann. Aus der ROI der Stirn wurden 10 % der wärmsten Pixel gewählt. Jedoch muss erwähnt werden, dass die Autoren die ROI bei jeder Person manuell extrahiert haben (an der Stelle, an der die Gefäße der Stirn sichtbar waren).

Die Ergebnisse des Experiments ergaben, dass verglichen mit der Ground-Truth eine durchaus signifikante Korrelation besteht. Bei 11 der 12 Probanden weichen die Thermografiedaten nur in geringem Maße von der Ground-Truth ab. Damit kommen die Autoren zu dem Schluss, dass die Infrarotthermografie eine solide Technologie ist, um Individuen während emotional aufreibender Situationen zu untersuchen. Die aufgenommenen Daten seien durchaus quantifizierbar. Auch ließe sich eine solche Anwendung in viele Umfelder erweitern. Trotz dieser Erfahrungen müssten aber noch deutlich mehr Versuche mit einer größeren Anzahl an Probanden stattfinden, um sich ein verlässlicheres Bild verschaffen zu können.

2.6. Bestimmung von Anwendungsfällen, Anforderungen und Herausforderungen

Im folgenden Abschnitt wird die vorangegangene Literaturrecherche und Grundlagenaneignung genutzt um aus dieser das Ziel für die zu erfolgenden Versuche zu definieren.

2. Analyse

In der Tabelle 2.3 auf der folgenden Seite ist dargestellt, welche Anwendungsfälle für genug stichhaltig gefunden wurden, um diese weiter zu untersuchen. Die in den Thermografiedaten zu untersuchenden Effekte sind ebenfalls angegeben.

Eine erste Eignungseinschätzung, die aufgrund der vorgenommenen Literaturanalyse stattgefunden hat, ist mit Hilfe einer Ampel angegeben. *Rot* für keine Brauchbarkeit im Rahmen einer analytisch aussagekräftigen Anwendung. *Gelb* und *grün* stehen für bedingt brauchbar bzw. brauchbar.

Für die weiter zu untersuchenden Thesen werden im folgenden Versuche entwickelt. Sie werden in dieser Arbeit als „Anwendungsfälle“ bezeichnet

Die weiter zu untersuchenden Thesen werden folglich und in dieser Arbeit als „Anwendungsfälle“ bezeichnet.

Anwendungsfall	Zu untersuchender Effekt	Anforderungen	Herausforderungen	Eignungseinschätzung
Änderung der Temperatur aufgrund von Befeuchtung und damit einhergehender Verdunstung	Zusammenhang der Hautfeuchtigkeit mit Gesichtstemperatur	Auftragen unterschiedlicher Wassertemperaturen (warm und kalt)	Effekt der Verdunstung beachten	○○○
Fettschicht führt zur Senkung der Haut- bzw. Oberflächentemperatur	Zusammenhang des Auftragens von Lippenpflege mit Hauttemperatur	Auftragen an unterschiedlichen Stellen im Gesicht	Einmaliger oder längerfristiger Änderungseffekt sichtbar?	○○○
Durchblutungsfördernde Salbe führt zu Temperaturerhöhung der Haut	Zusammenhang des Auftragens von Pferdesalbe und Hauttemperatur	Auftragen im mit Muskeln durchzogenen Bereich um Effekt auf Muskeln zu untersuchen	ROI nicht im Gesicht, was könnte ein Ergebnis für Gesichtsthermografie bedeuten?	○○○
Physiologische Anstrengung	Anstieg des Stoffwechsels, Schweißbildung, höherer Puls ergeben höhere Herzaktivität, also mehr Blutfluss	Mit Einbeziehung der Pulsdaten, außerdem Abklingen d. Temp. beobachten	Betrachtung mittels kleiner Messschritte inkl. Relation zu Puls	○○○

Physiologische Anstrengung	Thermoregulation durch Schwitzen	Schweißbildung muss vorhanden sein, Mehrere Aufnahmen im Zeitverlauf	Wie soll die Schweißbildung aktiviert werden? Grad der Schweißbildung	○○○
Physiologische Entspannung	Zusammenhang zwischen physiologischer Entspannung und Gesichtstemperatur	Wie kann phys. Entspannung hervorgerufen werden?	Untersuchung der Thermoregulierung. Wieso ist Temp.Änderung im Gesicht sichtbar?	○○○
Symmetrie der Gesichtshälften	Abweichung an ausgewählten Punkten beider Gesichtshälften < 0,2 °C	Aufnahmen von Vorne ohne Drehung oder Neigung	Exakte ROIs bzw. Punkte, Darstellen der Abweichung	○ ○○
Analyse der Regio Orbitalis	Eignung in technischer Hinsicht	Entwicklung einer prototypähnlichen Anwendung	Echtzeit, Live-Anwendung, „einfaches“ Tracking	○ ○○
Emotionserkennung	Einfluss auf Gesichtstemperatur für Emotionseffekt	Aufnahmen von Probanden mit Ground-Truth im HCI Umfeld (EmoBike)	Standardisierte Versuche, exakte ROIs, normiertes Processing	○○○

○○○ = nicht geeignet; ○○○ = bedingt geeignet; ○○○ = geeignet

Tabelle 2.3.: Ergebnisse der Anforderungsanalyse mit herauskristallisierten Anwendungsfällen

3. Versuchsaufbau - Szenario

In diesem Kapitel werden die in Tabelle 2.3 auf Seite 39 aufgezeigten Anwendungsfälle näher erläutert und die dazu entwickelten Versuchsanordnungen und die Durchführung dargestellt.

Am Anfang stehen jedoch zunächst zwei Unterkapitel zur bei allen Versuchen verwendeten Hard- und Software sowie zur *Knowledge discovery* in großen Datenmengen überhaupt wie bei thermographischen Daten im Besonderen.

Es folgt die Darstellung der Versuche, der Fragestellungen, die ihnen zugrunde liegen, und mit welchem Versuchsaufbau und mit welcher Durchführung jeweils versucht wurde, sie zu beantworten.⁹

Den Anfang machen hierbei Versuche, die sich auf nach den analytischen Überlegungen und der Literaturrecherche vermutete Zusammenhänge von externen Faktoren auf die (Gesichts-) Hauttemperatur beziehen. Es folgen Versuche zum Zusammenhang von physiologischer Anstrengung bzw. Entspannung auf die Gesichtshauttemperatur (Anwendungsfälle 4,5 und 6). Unter Anwendungsfall 7 wird die Hypothese von der thermografischen Symmetrie der Gesichtshälften überprüft. Die Anwendungsfälle 8 und 9 nehmen hinsichtlich des Versuchsaufbaus und der Versuchsdurchführung einen größeren Raum ein, da hier umfangreichere hard- und softwareseitige Anpassungen von Schnittstellen vorgenommen werden mussten.

3.1. Verwendete Hard- und Software

Im folgenden Abschnitt wird die für das Ziel dieser Arbeit verwendete Hardware näher beschrieben. Dabei steht die Thermografiekamera im Mittelpunkt dieses Kapitels. Ebenfalls nicht unerheblich ist die genutzte Software zur Auswertung und Analyse der Daten. Die Thermografiekamera dient hierbei der Akquirierung von ausreichend thermografischen Daten.

⁹Die Auswertung und Darstellung der Ergebnisse folgt in Kapitel 4.

3.1.1. Infratec VarioCam HD 875

In diesem Abschnitt wird auf die durch die HAW Hamburg beschaffte Thermografiekamera aus dem Hause INFRA TEC¹⁰ eingegangen. Es handelt sich um das Modell VarioCam HD 875, das zur Gruppe der qualitativ sehr hochwertigen Geräte gezählt werden kann. Bedingt wird dies durch eine maximale Auflösung von 1024 x 768 IR-Pixeln und einer Aufnahmegeschwindigkeit von 30 Hz im Vollbild-Modus. Als Detektor nutzt die Kamera einen ungekühlten Mikrobolometer-Focal Plane Array Detektor. Die Messgenauigkeit dieser Kamera beträgt ungefähr 1 K im Temperaturbereich zwischen 0 und 100 °C und ist daher u. a. ideal für die Messung von Körpertemperaturen und Gegenständen der Alltags-Umwelt geeignet. Eine vollständige Auflistung der technischen Spezifikationen ist in [InfraTec \(2015\)](#) zu finden. Als Schnittstelle verfügt die Kamera über einen GigE Vision Interface-Standard-Anschluss, der auf dem Gigabit-Ethernet-Standard arbeitet und mit einer Geschwindigkeit von etwa 1 Gbit/s arbeitet. Diese Schnittstelle ermöglicht es, auf die Daten der Kamera sowohl via proprietärer Software als auch über ein SDK zuzugreifen. Trotz des Ethernet-Standards ist eine manuelle Konfiguration der Netzwerkkarte im Computer nötig. Eine Anleitung hierfür findet sich in [InfraTec \(2014\)](#).



Abbildung 3.1.: Thermografiekamera der InfraTec VarioCam HD 800 Serie Quelle: InfraTec

Aufnahmen können entweder direkt auf dem Gerät gestartet und auf einer SD-Karte abgelegt werden oder über die mitgelieferte Software IRBIS auf einem Computer über das GigE Vision Interface gestartet werden. Die so aufgenommenen Daten können dann ebenfalls auf dem Computer hinterlegt bzw. in IRBIS direkt angezeigt werden.

¹⁰<http://www.infratec.de>

Technische Daten	
Spektralbereich	7,5–14 μm
Temperaturauflösung bei 30°C	< 0,05 Kelvin
Messgenauigkeit	$\pm 1,5$ K
Bildformat	1024 x 768 Pixel
Bildfrequenz bei 1024 x 768 px	30 Hz
Bildfrequenz bei 640 x 480 px	60 Hz
Abmessungen	210 x 125 x 155 mm

Tabelle 3.1.: Technische Daten der Infracam VarioCam HD 875 [InfraTec (2015)]

3.1.2. IRBIS 3.1 Plus

Die mitgelieferte Software IRBIS in der Version 3.1 Plus ist eine Infrarotthermografie-Software, die zur Analyse von Thermografie-Messdaten von InfraTec bereitgestellt wird. Innerhalb von IRBIS lassen sich Aufnahmen mit einer angeschlossenen Kamera tätigen, die anschließend mit einer Reihe von Werkzeugen interpretiert werden können.

Die Bilder, die von der VarioCam HD 875 aufgenommen werden, sind IRB-Files (**.irb*), die in IRBIS bspw. auch in das JPEG-Format umgewandelt werden können. IRB-Files ist ein proprietäres Dateiformat von InfraTec, welches nur in Analysesoftware von InfraTec gelesen werden kann. Nach erfolgtem Export in ein anderes, nicht-proprietäres Format sind die radiometrischen Daten leichter zugreifbar.

Mit der IRBIS-Werkzeugpalette „Messen“ lassen sich Messgebiete (Regions of Interest) in einem Bild definieren und deren thermografische Daten anzeigen. Hierzu gehören die maximale Temperatur, minimale Temperatur und der Medianwert der Temperatur in diesem Gebiet.

In IRBIS gibt es allerdings keine Möglichkeit für eine Reihe von aufgenommenen Bildern jeweils einzelne Regions of Interest für eine Bildserie festzulegen. Daher muss eine teilweise manuelle Definition der ROI auf den einzelnen Bildern einer Bildserie vorgenommen werden.

3.2. Datenverarbeitungsprozesse

Im folgenden Kapitel wird der Prozess der Datenverarbeitung und Datenanalyse beschrieben. Der Weg von der Aufnahme der thermografischen Daten über die Transformation bis hin zur Auswertung wird erläutert. Ebenfalls wird hierzu das genutzte Modell der *Knowledge Discovery in Databases*, kurz KDD, vorgestellt. Die Transformation von thermografischen Rohdaten in das Wissen über deren Bedeutung soll ebenfalls nähergebracht werden.

3.2.1. KDD - Knowledge Discovery in Databases

Knowledge Discovery in Databases (KDD) ist ein mehrstufiger Datenverarbeitungsprozess, der das Ziel hat, große vorhandene Datenbestände, die meist unübersichtlich in einer datenbank-ähnlichen Form vorliegen, in einer kompakteren und leicht verständlichen Form abzubilden. Außerdem sollen die Daten mit dem KDD-Prozess nutzbarer gemacht werden. Der KDD-Prozess besteht dabei aus mehreren aufeinanderfolgenden Stufen, die bei Bedarf (auch im Einzelnen) mehrmals durchlaufen werden können.

Wie der Name *Knowledge Discovery in Databases* schon impliziert, geht es bei diesem Prozess hauptsächlich um die Transformation von Daten in menschliches Wissen. In seiner ursprünglichen Form beruht die Transformation von Daten in menschliches Wissen auf der Interpretation und manuellen Analyse der Daten. In Bezug auf thermografische Daten wäre beispielsweise das Betrachten eines Falschfarbenbildes und seine Interpretation durch einen Arzt die Transformation von Daten in eine Erkenntnis: Die vermutete Krankheit wird bestätigt, muss weiter untersucht werden oder ist nicht zutreffend. Eine solche manuelle Analyse ist immer von der Sichtweise des Betrachters abhängig und somit sehr subjektiv. Außerdem ist sie langsam und mit vergleichsweise hohen Kosten verbunden. Fallen nun große Datenmengen an, in unserem Beispiel viele tausend Thermografiebilder von Patienten, so kann ein Arzt diese Menge an Bildern kaum bewältigen und eine manuelle Datenanalyse wird schlichtweg unpraktikabel. Es muss also eine Abhilfe geschaffen und die Analyse muss – wenn auch manchmal nur teilweise – automatisiert werden [M. Fayyad u. a. (1996)].

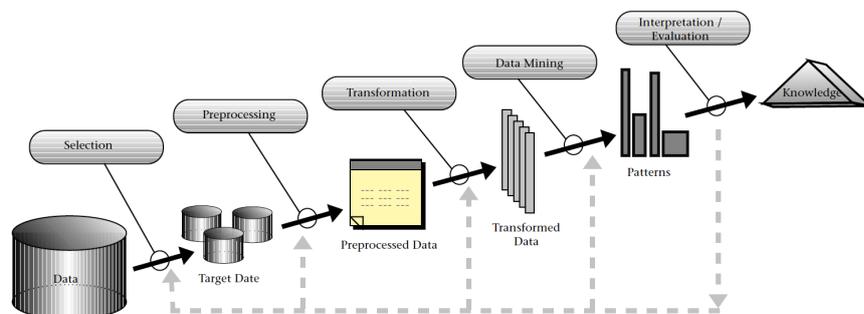


Abbildung 3.2.: Der KDD-Prozess mit seinen einzelnen Schritten (M. Fayyad u. a. (1996))

Der KDD-Prozess ist in Abbildung 3.2 aufgezeigt. Die einzelnen Schritte sollen im folgenden kurz erläutert werden. Diese Schritte sind sowohl aus den Arbeiten von M. Fayyad u. a. (1996) und Ester und Sander (2000) abgeleitet.

KDD: Schritt 1 Der erste Schritt in diesem Prozess besteht daraus, sich ein *Vorwissen* zu dem jeweiligen Fachbereich, aus dem die Daten stammen, anzueignen. Um den Datensatz und dessen Domäne verarbeiten und in Wissen umwandeln zu können, sind Vorkenntnisse in dem jeweiligen Fachbereich unabdingbar. Außerdem sollten vor Beginn die Ziele des KDD-Prozesses festgelegt werden. Die Ziele beantworten die Frage: „Welches Wissen soll aus den Daten generiert werden?“

KDD: Schritt 2 Im darauffolgenden zweiten Schritt werden die *Zieldaten* bestimmt, auf welchen eine Wissenstransformation stattfinden soll. Die Datenauswahl kann auch auf einer Teilmenge oder nur einzelnen Variablen eines Datensatzes stattfinden.

KDD: Schritt 3 Die dritte Stufe besteht aus der *Datenbereinigung* und dem *Preprocessing*. Wenn vorhanden, wird in diesem Schritt eine Rauschreduzierung bzw. Rauschentfernung angestrebt. Dazu müssen notwendige Informationen darüber bekannt sein, wie sich ein Rauschen auf dem jeweiligen Datensatz bemerkbar macht. Datenrausch beinhaltet Störgrößen im Datensatz, die im Frequenzbild unübliche Daten beinhalten.

Außerdem sollten in diesem Schritt Strategien für die Behandlung fehlerhafter oder fehlender Datenfelder erarbeitet werden.

KDD: Schritt 4 Im Schritt 4: *Datenreduktion* und *Datenprojektion* werden sinnvolle und nutzbare Merkmale definiert, mit denen sich der Datensatz gemäß den Zielen aus Schritt 1 repräsentieren lässt. Mit Transformationsmethoden kann der Datensatz auf eine effektivere Zahl an Variablen reduziert werden. Dieser Schritt soll verhindern, dass invariante Teile des Datensatzes genutzt werden, obwohl diese keinen Mehrwert für die eigentliche Erkenntnis haben werden.

KDD: Schritt 5 und 6 Im Schritt 5 wird eine *Modellauswahl* oder auch *Methodenauswahl* für das folgende *Data-Mining* getroffen, in dem das in Schritt 1 erörterte Ziel der Wissenserkenntnis abgebildet werden kann. Die möglichen Data-Mining-Methoden werden im Anschluss näher erläutert.

Eine explorative Analyse kann ebenfalls in diesem Schritt geschehen, um hieraus gewonnene Erkenntnisse für das folgende Data-Mining einzubeziehen.

KDD: Schritt 7 Die eigentliche *Datenanalyse*, das *Data-Mining*, geschieht in diesem Prozessschritt. Die Suche nach sich wiederholenden Mustern in einer bestimmten repräsentativen

Form mit der dazugehörenden Data-Mining-Methode sind hauptsächlich Bestandteil dieses Schritts.

KDD: Schritt 8 und 9 Die letzten beiden Schritte beinhalten die *Interpretation* und *Darstellung* des gefundenen Wissens bzw. der aus der vorangegangenen Analyse gewonnenen Erkenntnisse. Innerhalb dieses Schrittes kann auch entschieden werden, ob der iterative KDD-Prozess erneut durchlaufen werden soll.

Die Visualisierung der verwendeten Methodik wie auch die Visualisierung der Erkenntnisgewinnung sollte in diesem Schritt vorgenommen werden.

Weiterverarbeitung der gewonnen Erkenntnisdaten, das direkte Anwenden der gewonnenen Erkenntnis oder einfach ihre Dokumentation sind ebenfalls Teil des letzten Abschnittes des KDD-Prozesses.

Der Begriff *Data-Mining* wird in der Literatur immer wieder als Hauptbestandteil des KDD-Prozess genannt, da hier die eigentliche Datenanalyse stattfindet.

3.2.2. Knowledge Discovery in Thermal Data

Um die in Thermografiebildern liegenden Informationen erkennbar und interpretierbar zu machen, wurde der KDD-Prozess für den Umgang mit Thermografiebildern bzw. thermografischen Daten angepasst. Im folgenden Abschnitt werden die getätigten Anpassungen an die einzelnen Schritte des KDD-Prozesses und die Ziele bzw. die Art der Gewinnung von Wissen aus thermografischen Daten vorgestellt. Diese Prozedur wird – in Anlehnung an KDD – in dieser Arbeit als *Knowledge Discovery in Thermal Data* bezeichnet.

In Abbildung 3.3 ist dargestellt, wie ein für Thermografiebilder angepasster KDD-Prozess aussieht.

Schritt 1: Vorwissen Die Aneignung von Vorwissen zur Gesichtsanalyse mit einem Thermographiesystem hat entsprechend der Darstellung im Kapitel 2 *Analyse* stattgefunden. Die Thermologie des menschlichen Körpers, Stör- und Einflussfaktoren bei der Aufnahme von Thermografiedaten und die physikalischen Bedingungen und Eigenschaften der Thermografie wurden untersucht.

Schritt 2: Datenakquirierung Die im Falle des EmoBikes mit der implementierten Komponente über *Active MQ* gestarteten Thermografieaufnahmen werden anschließend unter Berücksichtigung des Protokolls als einzelne Bilder mit einem Zeitstempel und einer Zuordnung zum jeweiligen Probanden auf einem Netzlaufwerk gesichert. So lassen sich diese Bilder

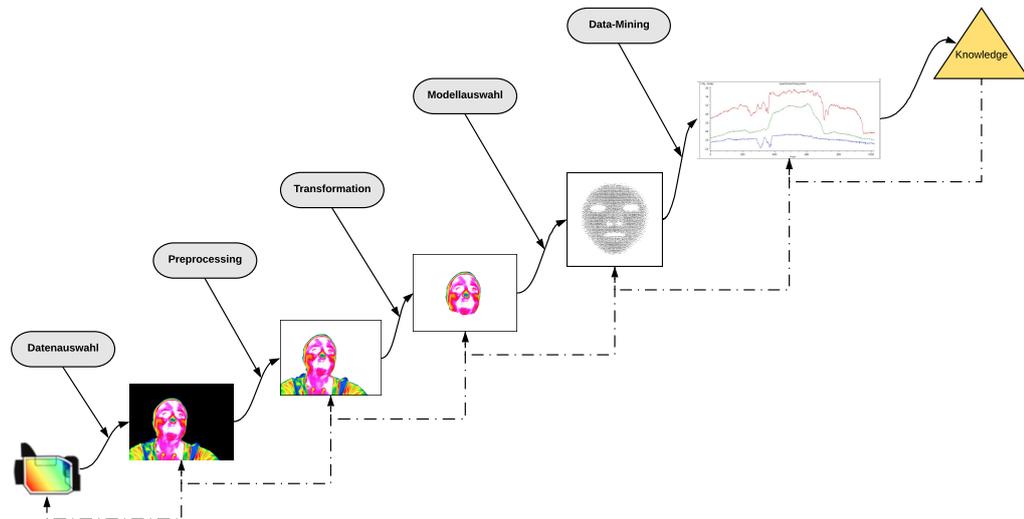


Abbildung 3.3.: Knowledge Discovery in Thermal Data – ein für Thermografie-Daten angepasster KDD-Prozess

später in einer Analyse den einzelnen Szenen und Triggern zuordnen. Im Falle der Vorversuche hat die Datenakquirierung mit Hilfe der Software *IRBIS 3.1 Plus* stattgefunden.

Schritt 2: Datenauswahl Die Zieldaten, auf denen eine Wissenstransformation stattfinden soll, sind im Rahmen der thermografischen Analyse bzw. thermografischen Gesichtsanalyse in erster Linie die im vorangegangenen Schritt aufgenommenen Bilder. Um Störgrößen zu vermeiden, wurden Regions of Interest (ROI) (vgl. Kap. 2.2.3) vordefiniert, die dann im Einzelnen untersucht werden.

Schritt 3: Preprocessing Um in den analytischen Verfahren Verfälschungen durch Messfehler möglichst gering zu halten, ist es wichtig, mit bereinigten Daten arbeiten zu können. Da in diesem Falle die Infratec VarioCam HD 875 eine eigenständige Kalibrierung und eine regel-

mäßige Non-Uniformity Correction (NUC)¹¹ durchführt, sind inkonsistente oder fehlerhafte Datensätze durch die Thermografiekamera nicht zu erwarten.

Jedoch mussten, wie in 2.3.3 aufgeführt, Störstrahlung und Verdeckung vermieden und solche Bilder mit einem Verfahren ausgefiltert werden. Dies wurde mit einem Verfahren zur Ausreißerererkennung im späteren Skript für die Datenauswertung implementiert.

Schritt 4: Transformation Im Transformationsschritt sollten aus den jeweiligen Datensätzen die notwendigen und für die These nützlichen Variablen gefiltert werden. Da in den vorangegangenen Schritten ROIs extrahiert worden sind, ist es im Transformationsschritt notwendig, aus den ROIs der Bilder Datenreihen zu generieren. Diese sind dann einzelne Temperaturwerte für eine ROI. Temperaturminimum, Temperaturmaximum oder der Temperaturdurchschnitt sind nur einige der möglichen Variablen.

Schritt 5: Data-Mining und Interpretation Der fünfte Schritt im Datenverarbeitungsprozess für Thermografiedaten fasst mehrere Schritte zusammen. Aus den einzelnen bereinigten Datenreihen werden Plots erzeugt, in denen der Temperaturverlauf ersichtlich wird.

In den Anwendungsfällen dieser Arbeit sind der Großteil der zu analysierenden Daten Zeitreihen, in denen ein Temperaturanstieg oder -gefälle erkannt werden soll.

Ebenfalls als Information im Datensatz vorhanden sein sollten mögliche Auslöser für eine Temperaturänderung. So kann mit den jeweiligen Methoden ein Temperaturanstieg oder -gefälle erkannt werden.

3.3. Anwendungsfälle - Fragestellungen und Versuche

3.3.1. Anwendungsfall 1: Zusammenhang zwischen der Hautfeuchtigkeit und der Hauttemperatur

In diesem Versuch soll der Zusammenhang von auf die Haut aufgebrachtter Feuchtigkeit mit der durch die Thermografiekamera gemessenen Hauttemperatur untersucht werden. Überprüft wird die Vermutung, dass auf die Haut aufgebrachte Feuchtigkeit durch die Verdunstung eine über eine Zeit messbare Temperaturänderung hervorruft.

Versuchsaufbau

In diesem Versuch sitzt der Proband in einem Abstand von ca. einem Meter vor der Kamera. Der Emissionsgrad der Kamera ist auf 0,98, dem Emissionsgrad der menschlichen Haut eingestellt.

¹¹vgl. Kap. 2.3.3

Mit Hilfe einer herkömmlichen Sprühflasche wird Leitungswasser auf die Haut aufgetragen. Dabei hat das Wasser bei zwei Messungen jeweils eine Temperatur von 22 °C und 45 °C. Die Raumtemperatur hat konstante 25 °C betragen.

Versuchsdurchführung

Für diesen Versuch wurde vor dem Auftragen nach einer kurzen Ruhephase von 3 Minuten eine Aufnahme gemacht. Anschließend wurde mit einer Sprühflasche 22 °C kaltes Leitungswasser mit einer Sprühflasche auf die Haut aufgetragen und direkt im Anschluss ein weiteres Thermografiebild ausgelöst. Nach weiteren drei Minuten ein weiteres Bild.

Die gleiche Prozedur wurde mit Wasser mit einer Temperatur von 45 °C beim Einfüllen in die Sprühflasche durchgeführt und Thermografieaufnahmen gemacht.

Nach dem Auftragen des kalten Wassers hat der Proband angegeben, dass sich das Temperaturgefühl des kalten Wasser nach 3 Minuten gefühlt angeglichen hat, die Feuchtigkeit jedoch noch spürbar vorhanden sei.

Nach dem Auftragen des warmen Wassers hingegen trat laut Angaben des Probanden eine spürbare Verdunstungskühle ein.

3.3.2. Anwendungsfall 2: Zusammenhang zwischen dem Auftragen von Lippenpflege und der Hauttemperatur

In diesem Versuch soll die Hypothese untersucht werden, dass eine Fettschicht zur Senkung der Hauttemperatur oder Hautoberflächentemperatur führt. Wie in Kapitel 2 angedeutet, hat Fett eine isolierende Wirkung und kann so zur späteren oder verringerten Abgabe von Wärmestrahlung. Dies sollte zur Folge haben, dass eine geringere Temperatur gemessen wird.

Versuchsaufbau

In diesem Versuch sitzt der Proband in einem Abstand von ca. einem Meter vor der Kamera. Der Emissionsgrad der Kamera ist auf 0,98, dem Emissionsgrad der menschlichen Haut eingestellt. Die Raumtemperatur hat konstante 25 °C betragen. Um eine Fettschicht zu simulieren hat der Proband einen fetthaltigen Lippenpflegestift der Marke *budniCare Classic* auf Stirn und Lippen aufgetragen.

Versuchsdurchführung

Der Versuch wurde in folgenden Schritten durchgeführt:

- Thermografiebild vom Gesicht des Probanden ohne aufgetragen Lippenpflege
- Auftragen von Lippenpflege auf Stirn und Lippen
- Thermografiebild direkt nach dem Auftragen
- Thermografiebild nach weiteren drei Minuten

3.3.3. Anwendungsfall 3: Zusammenhang zwischen dem Auftragen von Pferdesalbe und der Veränderung der Hauttemperatur

Pferdesalbe ist eine von Sportlern zur Behandlung von stark beanspruchten Gelenken und Muskeln häufig eingesetzte Salbe. Aufgrund der Zusammensetzung aus verschiedenen pflanzlichen Wirkstoffen soll der Effekt zunächst kühlend, dann wärmend sein, sodass Muskeln und Gelenke schmerzfreier bewegt werden können. Diese Temperatursenkung bzw. -erhöhung soll untersucht werden.

Versuchsaufbau

In diesem Versuch sitzt der Proband in einem Abstand von ca. einem Meter vor der Kamera. Der Emissionsgrad der Kamera ist auf 0,98, den Emissionsgrad der menschlichen Haut, eingestellt. Die Raumtemperatur beträgt konstante 25 °C. Um den kühlenden Effekt zu untersuchen, hat der Proband Pferdesalbe des Herstellers *Enzborn* auf den Unterarm-Handgelenk-Bereich aufgetragen.

Versuchsdurchführung

Folgende Schritte und Aufnahmen wurden getätigt:

- Thermografiebild von Unterarm-Handgelenkbereich des Probanden
- Auftragen von Pferdesalbe auf Unterarm-Handgelenkbereich des rechten und linken Arms
- Thermografiebild direkt nach dem Auftragen
- Thermografiebild nach weiteren fünf Minuten

Der Proband hat nach dem Auftragen einen durchaus kühlenden Effekt gespürt, der nach einiger Zeit langsam abnehmend war.

3.3.4. Anwendungsfall 4: Zusammenhang zwischen physiologischer Anstrengung und Gesichtstemperatur

Die physiologische Anstrengung also sportliche Aktivität führt zum Anstieg der Körpertemperatur. Wann und inwiefern dieser Anstieg anhand der Gesichtstemperatur erkennbar ist soll untersucht werden. Sowohl der durch sportliche Aktivität angeregte Stoffwechsel, als auch Schweißbildung und eine damit einhergehende Verdunstung können die Gesichtstemperatur beeinflussen. Ein höherer Puls führt zu einer höheren Herzaktivität und somit zu vermehrtem Blutfluss, was ebenfalls als Indikator für eine Temperaturänderung gilt (vgl. Abschnitt 2.2.1).

Versuchsaufbau

Für die sportliche Aktivität in diesem Versuch wurden das im Ergometer vom EmoBike genutzt. Mit Hilfe einer Pulsuhr am Handgelenk des Probanden wurde der Ruhepuls und der Puls nach verschiedenen Zeitabständen festgestellt. Das Ergometer lässt sich auf unterschiedliche Widerstandsstufen stellen. Für die Thermografieaufnahmen sitzt der Proband einen Meter vor der Kamera. Der Emissionsgrad der Kamera ist auf 0,98, den Emissionsgrad der menschlichen Haut, eingestellt. Die Raumtemperatur betrug konstante 24,2 °C.

Versuchsdurchführung

Vor dem Start der Aktivität wurde eine Thermografieaufnahme des Probanden erstellt und der Ruhepuls gemessen. Der Proband wurde anschließend gebeten das Ergometer zu benutzen, bis ein Puls von 140 min^{-1} erreicht wurde. Direkt nach der Aktivität wurde eine Thermografieaufnahme aufgezeichnet. Nach weiteren drei Minuten und nach Erreichen des Ruhepuls wurden erneut Aufnahmen gemacht.

3.3.5. Anwendungsfall 5: Thermoregulation durch Schwitzen

In diesem Versuch soll die Auswirkungen von generierter Wärme und dadurch erreichtes Schwitzen im Gesicht auf die Temperatur und Thermoregulation des Probanden untersucht werden. Dabei wird erwartet, dass die Temperatur durch die Schweißbildung beeinflusst wird.

Versuchsaufbau

Der Proband befindet sich sitzend in einem Abstand von einem Meter vor der Kamera. Der Emissionsgrad der Kamera ist auf 0,98, dem Emissionsgrad der menschlichen Haut eingestellt. Die Raumtemperatur hat konstante 24 °C betragen. Die Luftfeuchtigkeit hatte zum Zeitpunkt

der Messung einen Wert 47%. Mit einem 1000 Watt starken Halogenstrahler wurde das Gesicht des Probanden aus ca. 65 Zentimetern Entfernung frontal angestrahlt.

Versuchsdurchführung

Der Versuch wurde wie folgt durchgeführt:

- Thermografieaufnahme vor Anschalten der Lampe
- Bestrahlung durch Halogenstrahler zur Wärmeproduktion
- Aufnahmen in 10-sekündigem Intervall

3.3.6. Anwendungsfall 6: Zusammenhang zwischen physiologischer Entspannung und Gesichtstemperatur

Im Gegensatz zum **Anwendungsfall 4: Zusammenhang zwischen physiologischer Anstrengung und Gesichtstemperatur** soll hier durch physiologische Entspannung eine Änderung der Körpertemperatur erreicht werden. Um dies zu erreichen wurde ein mit kaltem Wasser getränktes Tuch um den Hals des Probanden gelegt, mit dem Ziel die Körpertemperatur und damit die Gesichtstemperatur zu senken.

Versuchsaufbau

Der Proband befindet sich sitzend in einem Abstand von einem Meter vor der Kamera. Der Emissionsgrad der Kamera ist auf 0,98, den Emissionsgrad der menschlichen Haut, eingestellt. Die Raumtemperatur hat konstante 25,3 °C betragen. Ein mit kaltem Wasser (21 °C) getränktes Handtuch wird um den Halsbereich gelegt.

Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführung gestaltete sich wie folgt:

- Thermografieaufnahme vor Auftragen des Handtuches
- Auftragen des Handtuchs
- Thermografieaufnahmen im Zeitverlauf, bis der Proband das Handtuch nicht mehr als „kalt“ empfindet

3.3.7. Anwendungsfall 7: Symmetrie der Gesichtshälften

Dieser Anwendungsfall widmet sich der Symmetrie der Gesichtstemperatur der rechten und linken Gesichtshälften. Mit Symmetrie ist dabei die thermische Gleichheit von zwei ROIs oder Punkten, gespiegelt auf der vertikalen Achse des Gesichts, gemeint. Die ROIs oder Punkte sind sowohl in Form als auch in Größe gleich und besitzen auf den Gesichtshälften die nahezu bzw. bestmöglich selben Positionen.

Die menschlichen Arme, Beine, Füße, Augen, Ohren sind zwar in Größe und Form unterschiedlich lassen sich aber mit Hilfe der ROIs oder einzelner Punkte symmetrisch vergleichbar erfassen.

Die erhofften Ergebnisse dieses Anwendungsfalls sollen als Grundlage für die weiteren Versuche benutzt werden. Wenn sich die Annahme bestätigt, dass die Regionen der Gesichtshälften eine annähernd gleiche Temperatur haben, muss bei einer Temperatúrauswertung nur eine Gesichtshälfte betrachtet werden. Außerdem kann es bei Aufnahmen, in denen der Kopf des Probanden sich viel bewegt, dazu kommen, dass bspw. die *Regio Orbitalis* durch die Nase bei einer seitlichen Drehung teilweise verdeckt wird. Dann kann an Stelle der verdeckten Seite die gegenüberliegende Seite zur Messung verwendet werden.

Versuchsaufbau

Für diesen Versuch wurden Aufnahmen aus den Versuchen mit dem EmoBike herangezogen. Diese Aufnahmen konnten für die Untersuchung genutzt werden, da sie frontal mit mittig vor dem Probanden angebrachter Thermografiekamera erstellt wurden (vgl. Abbildung 3.9). Der Aufbau für diese thermografischen Messungen und ihre Durchführung werden in **Anwendungsfall 9: Emotionserkennung mittels thermographischer Analyse** dargestellt.

Versuchsdurchführung

Für die Auswertung wurden Aufnahmen von 10 Probanden aus den Aufnahmen des EmoBike ausgewählt, bei denen das Gesicht ohne horizontale oder vertikale Kopfdrehung erkennbar ist. Die Bilder stammen aus dem Einstieg in die erste Spielszene, in der noch keine psychische Beeinflussung stattgefunden hat und die Probanden unter keinem besonderen Stress oder Emotionen stehen, die die Gesichtssymmetrie intrinsisch beeinflussen könnten. Außerdem konnte durch die Auswahl von Bildern aus dem EmoBike-Versuch sichergestellt werden, dass die Probanden gesund sind und weder unter Drogen-, Alkohol- oder Medikamenteneinfluss stehen und somit anderweitige Einflüsse auf die Gesichtssymmetrie weitgehend ausgeschlossen werden können.

3.3.8. Anwendungsfall 8: Echtzeit-Analyse der Regio Orbitalis

Hierbei geht es um die Echtzeit-Analyse der sog. *Regio Orbitalis*. Dieser Anwendungsfall hat die Anforderung, dass eine prototypenähnliche Anwendung erstellt werden soll, die für unterschiedlichste realitätsnahe Anwendungen erweitert und genutzt werden könnte. Das bedeutet, dass ein Nutzer der Anwendung einen Mehrwert, beispielsweise der Hinweis auf eine erhöhte Temperatur in bestimmten Gesichtsregionen, erwarten kann.

Die hierfür entworfene und entwickelte Anwendung wurde als „Showcase“ titulierte. Der Grund für die Benennung ist zum einen, dass mit dem Showcase gezeigt werden soll, inwieweit die Technologie der Thermografiekamera für eine Echtzeit-Anwendung genutzt werden kann. Außerdem sollte lediglich eine von vielen Möglichkeiten, in denen eine Thermografiekamera eingesetzt werden kann, aufgezeigt werden. Dabei ist dieser Anwendungsfall zumindest in Teilen für viele andere Anwendungsfälle adaptierbar.

Bereits getätigte Versuche im Vorfeld haben gezeigt, dass das Thermografiebild des eigenen Gesichts das Interesse von Nutzern wecken kann. Gerade der durch die Thermografie sichtbar gemachte thermische Verlauf eines Gesichts ist für diejenigen Nutzer, die ihr eigenes Gesicht zum ersten Mal als Falschfarbendarstellung ansehen, sehr aufmerksamkeitswirksam. So ergibt sich als eine Anforderung an diese Anwendung zum einen der Echtzeit-Effekt, bei dem die Daten bzw. Bilder der Thermografiekamera direkt auf einen Bildschirm übertragen werden. Dabei ist die Kamera neben oder über dem Bildschirm angebracht, so dass die Nutzer das Gefühl haben, sie schauen in einen Monitor, der das davor stehende Objekt als Thermografiebild abbildet.

Außerdem soll in diesem Ansatz die in der Literatur sehr häufig als für die Thermografieanalyse gut auszuwertende *Regio Orbitalis* genauer der periorbitalen Region, dargestellt und deren Wärmestrahlung angezeigt werden können. Dies gibt dem Nutzer als zusätzliche Information zum Thermografiebild Echtzeit-Temperaturwerte dieser Region.

Durch die Versuche im **Anwendungsfall 9: Emotionserkennung mittels thermographischer Analyse** hat sich gezeigt, dass die periorbitale Region bei einem Großteil der Probanden die Region mit dem höchsten Temperaturwert ist. Wie im Kapitel 2 herausgefunden, ist diese Region aufgrund der dünnen Haut und der vielen Adern und Venen im Verhältnis zur Hautfläche sehr geeignet.

Versuchsaufbau

In dieser Anwendung befindet sich der Proband stehend vor einem Bildschirm. Dieser sollte in Höhe des Gesichts angebracht sein oder wenn dies nicht möglich, dem Nutzer zumindest

in Richtung des Gesichts geneigt sein. Die Thermografiekamera befindet sich dabei entweder neben oder über dem Bildschirm. Da für diesen Versuch keine starren zeitabhängigen Aufnahmen gemacht werden, ist ein Standort nahe des Bildschirms ausreichend und eine starre Anbringung ist nicht zwingend notwendig.

Da dieser Versuch nicht zur Auswertung oder Aufnahme von Daten genutzt wurde, sondern eher als Nachweis für die Brauchbarkeit der Infrarotthermografie im *Human-Computer-Interaction* (HCI)-Umfeld, wurden die Standardbedingungen für Versuche mit Thermografiekameras nicht beachtet, sondern das Setting soll die „freie“ Interaktion zwischen Mensch und Maschine abbilden.

In der letztendlichen Implementation des *ShowCase* sind Parallelen zu einem *Smart Mirror* erkennbar. Bei einem *Smart Mirror* steht ein Nutzer vor einem Spionspiegel, in dessen zweiter Ebene hilfreiche Informationen für den Nutzer angezeigt werden. Die *ShowCase*-Anwendung besitzt an Stelle eines Spiegels den Bildschirm, der das Thermografiebild des Anwenders anzeigt und durch eine zweite angebrachte visuelle Kamera, die händisch – durch manuelles horizontales und vertikales Verstellen des Stativs – mit der Thermografiekamera registriert wird, also die Bildausgaben so bearbeitet werden, dass sie genau übereinander liegen. Durch diese Erweiterung kann auf dem visuellen Bild ein Tracking des Auges stattfinden. Dadurch kann das Auge im darüberliegenden visuellen Bild gefunden und die Temperaturdaten in einer Grafik angezeigt werden. Das automatisierte Registrieren der visuellen Kamera mit der Thermografiekamera war nicht Ziel des *ShowCase*, wurde aber in der parallelen Arbeit mit dem Titel THERMOGRAFISCHE GESICHTSANALYSE MIT EINEM MULTIMODALEN KAMERASYSTEM von Kletz (2017) bearbeitet.

Der *ShowCase* dient der Echtzeit-Auswertung von Temperaturinformationen. Hierbei ist das Ziel, pixelgenau Temperaturwerte dynamisch abzufragen. Wie bereits erwähnt wird die Software mit dem Bild einer Videokamera angereichert, durch das es möglich ist Temperaturwerte auf einem Videobild abzufragen und darzustellen.

Der *ShowCase* ist so designt, dass er autark von anderen Softwarekomponenten betrieben werden kann.

Dabei wird die Thermografiekamera frontal auf das zu analysierende Objekt ausgerichtet (beispielsweise auf eine Person). Dieses Projekt benötigt eine zusätzliche Videokamera zum Aufzeichnen bzw. Übertragen des Bildes (nachfolgend zur besseren Abgrenzung als „Visuelles Bild“, kurz Vis-Bild genannt). Für diese Kamera (bzw. deren Bildsensor) ist eine bauliche Nähe zur Thermoagrafiekamera (bzw. deren Bildsensor) nötig. Grund hierfür ist, dass der Stereoskopieeffekt möglichst gering gehalten werden soll. Diesem Problem wird mit einem Klemmstativ entgegengewirkt, welches an dem Stativ der Thermografiekamera befestigt ist.

3. Versuchsaufbau - Szenario

Die Videokamera wird direkt über dem Objektiv der Thermografiekamera befestigt, d. h. X- und Z-Achse sind an der Front der Objektive identisch. Die Kameras sind lediglich in der Y-Achse verschoben.

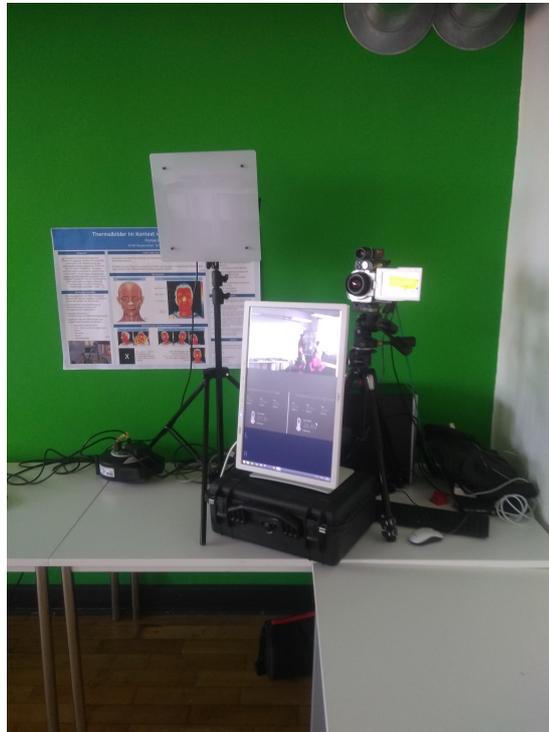


Abbildung 3.4.: Aufbau des Showcase

Für dieses Projekt wird eine MANTA G-235C Kamera, mit einem 1" 16mm/F1.4 Objektiv der Firma KOWA, als Videokamera verwendet, die wie die Thermografiekamera über den GigE Vision Interface-Standard angesprochen wird. Das ausgewählte Modell wird mittels *Power over Ethernet* (PoE) mit Strom versorgt, weshalb in dem konkreten Projektaufbau ein separater PoE-Splitter verwendet wird (vgl. [Abbildung 3.6](#)).

Auch diese Anwendung nutzt für die Kommunikation mit der Thermografiekamera das SDK, das in [Abschnitt 3.3.9](#) erläutert wird. Für diesen Anwendungsfall wurde für das SDK ein komplett eigenständiger CLR-Wrapper implementiert, auf dessen Eigenschaften und den Aufbau im Folgenden eingegangen wird. Dieser Wrapper (*ThermographyWrapper*) stellt dem eigentlichen Programm u. a. die thermografischen Bild- und Temperaturdaten sowie weitere Methoden bereit.

3. Versuchsaufbau - Szenario

Zum Ansprechen des Videokamera-SDKs wird ein Wrapper (`VimbaHelper`) verwendet. Dieser Wrapper ermöglicht es, die Videobilder sowie weitere Methoden (zum Ansprechen der Vis-Kamera) dem Hauptprogramm zur Verfügung zu stellen. Ebenso werden noch zwei weitere Klassen (`CameraInfo`, `RingBitmap`) benötigt, die jedoch nur interne Bedeutung haben. Eine vollständige Übersicht der genutzten Klassen und Methoden findet sich in [Abbildung 3.5](#), die Verteilungsansicht in [Abbildung 3.6](#).

Um effizient mit der Hardware der Thermografiekamera zu kommunizieren, wurde ein *Common Language Runtime* (CLR)-Wrapper geschrieben, der wiederum anderen Anwendungen als DLL zur Verfügung gestellt wird. Die Funktionsweise dieses Wrappers wird im nachfolgenden Abschnitt erläutert.

Diese Komponente bildet das Back-End des Thermografie-Anteils der Software.

ThermografieWrapper.dll

Der Wrapper greift mittels C++ auf das SDK des Herstellers INFRA TEC zu. Die vom Hersteller bereitgestellte DLL wird dazu in der Initialisierungsphase dynamisch in den Speicherbereich geladen. Hierdurch ist es möglich, die Kamera softwareseitig anzusprechen. Das SDK bietet eine Vielzahl von Methoden an, die genutzt werden können. Eine vollständige Übersicht der Methoden findet sich in [InfraTec \(2014\)](#). Von diesen ist eine Teilmenge in dem Programm implementiert.

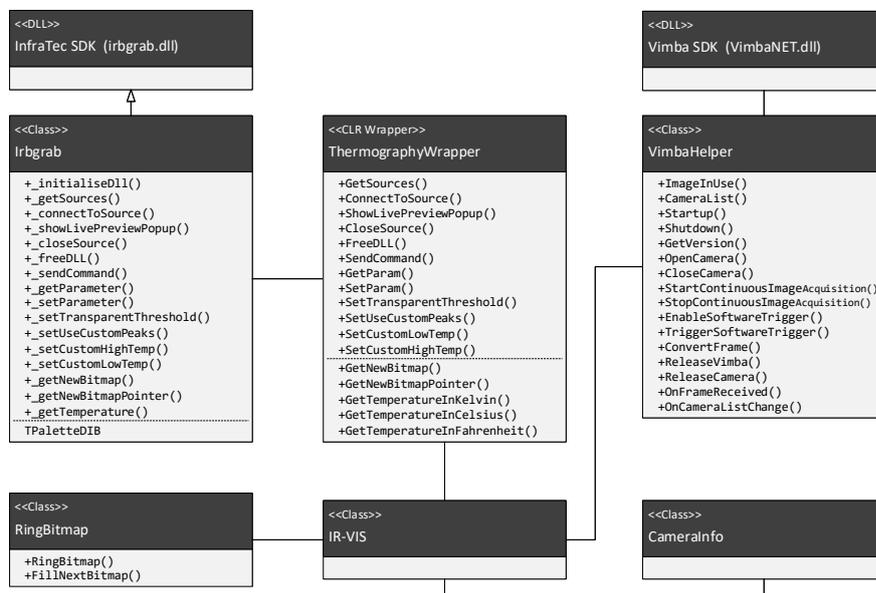


Abbildung 3.5.: Klassendiagramm

3. Versuchsaufbau - Szenario

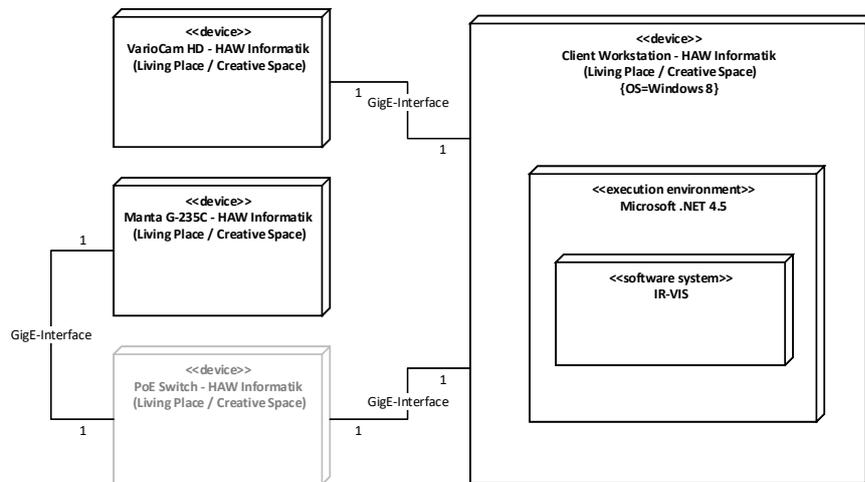


Abbildung 3.6.: Verteilungsansicht

Kern der DLL ist es, die Live-Temperaturrohdaten der Kamera abzurufen und diese weiter zu verarbeiten, mit dem Ziel, diese anderen Programmen zur Verfügung zu stellen. Die Kamera liefert die Temperaturrohdaten als ein eindimensionales Array pro Frame, bei dem jedes Element einen Pixel repräsentiert. Bei der Standardauflösung der Kamera beinhaltet dieses Array 786.432 Elemente (1024 x 768 Pixel). Um diese effizient zu verarbeiten, eignet sich die hardwarenahe Programmiersprache C++, die es erlaubt, mit Pointern auf die Speicherbereiche zuzugreifen.

Um die Temperaturrohdaten für das menschliche Auge aufzubereiten, wird aus dem eindimensionalen Array durch den Einsatz von mehreren verschachtelten *For-Schleifen* ein zweidimensionales Bild erzeugt. Um die Temperaturwerte sichtbar zu machen, müssen den einzelnen Temperaturen Farben zugewiesen werden. Dieses Verfahren wird im Abschnitt Farbverteilung/Farbschemen beschrieben.

Ein weiteres Leistungsmerkmal dieses Programms ist es, zu einer gegebenen Pixel-Position (X;Y basierend) den gemessenen Temperaturwert abzufragen. Hierzu wird mit arithmetischen Operationen der Speicherbereich ermittelt und der entsprechende Temperaturwert in Grad Celsius, Fahrenheit und/oder Kelvin zurückgegeben.

Neben diesen Funktionen werden auch grundlegende Funktionen der Kamera bereitgestellt, wie Setzen der Fokussierung und das Ausführen des Autofokus.

Um die Effizienzvorteile von C++ im .NET-Ökosystem nutzen zu können, wurde ein CLR-Wrapper implementiert, der Anfragen aus Anwendungen, beispielsweise in C# an die entsprechenden Methoden in der C++ Klasse weiterleitet. So werden im konkreten Anwendungsfall

innerhalb der C++ Klasse die Temperaturinformationen von der Kamera gelesen und aus diesen Bilder generiert, welche über den Wrapper anderen Anwendungen bereitgestellt werden.

Versuchsdurchführung

Eine Durchführung in der Form eines typischen Versuchs hat in diesem Anwendungsfall nicht stattgefunden. Stattdessen wurde der ShowCase einer Veranstaltung der HAW Hamburg, nämlich bei der Eröffnung des *Creative Space for Technical Innovations* (CSTI) vorgestellt. Außerdem wurde der ShowCase auf einer von der *Innovations Kontakt Stelle* (IKS) durchgeführten Veranstaltungsreihe, der *Disruptive Lounge*, präsentiert.

Neben Studierenden und Lehrenden wurde der ShowCase auch von Entscheidern aus unterschiedlichsten Bereichen betrachtet und sowohl Möglichkeiten der Technologie als auch Vor- und Nachteile gemeinsam diskutiert. Durch die Unterhaltungen konnte ein repräsentativer Eindruck gewonnen werden, welche Aspekte der Gesichtsthermografie weiter untersucht werden könnten. Diese Eindrücke sind in der Bewertung der Ergebnisse dieses Versuchs im Kapitel 4 aufgeführt.

3.3.9. Anwendungsfall 9: Emotionserkennung mittels thermographischer Analyse

Voraussetzung für diesen Anwendungsfall ist die Möglichkeit, verschiedene Emotionen im Rahmen von Versuchsreihen sicher und präzise hervorzurufen. Hierfür wurde das *EmotionBike*¹² (EmoBike) genutzt. Eine detaillierte Dokumentation von Sinn und Zweck des EmoBike sowie der technischen Implementation und Realisierung findet sich in Müller (2017). Daher wird in dieser Ausarbeitung nicht näher auf diese Aspekte eingegangen.

EmoBike

Mit dem EmoBike werden neue Möglichkeiten und Technologien im Bereich der Human-Computer-Interaction (HCI) und der Companion-Technologie erforscht. Das EmoBike ist ein mit unterschiedlichen Sensoren ausgestattetes Fahrradergometer, welches der Erforschung und Untersuchung von emotionalen und physischen Zuständen von Menschen dient. Das modifizierte Ergometer lässt Nutzer in einer vor dem Fahrrad auf einem Bildschirm dargestellten virtuellen Umgebung fahren. Dabei werden die Lenk- und Tretbewegungen in die virtuelle Welt übertragen. Mit Hilfe unterschiedlicher virtueller Szenarien, in denen sich die Person auf

¹²www.emotionbike.org

dem Ergometer bewegen kann, ist es möglich, bestimmte Reaktionen bei der Person hervorzurufen. Diese emotionale oder physische Reaktion wird dann von der Sensorik aufgenommen, verarbeitet und analysiert. Die Sensorik beinhaltet sowohl Kameras als auch Biosensoren und weitere Sensorik zur Aufnahme des physischen Zustands einer Person. Die Kommunikation der einzelnen Komponenten untereinander erfolgt über den Message Broker *Active MQ*.

Die virtuelle Umgebung besteht aus einem sog. *Exergame*, einer Verbindung der englischen Wörter „exercise - Bewegen“ und „game - Spiel“. Wie die Dissertation *AFFECTIVE COMPUTING IN CONTROLLED EXERGAME ENVIRONMENTS* von Müller (2017), die einen wesentlichen Beitrag zum EmoBike-Projekt an der HAW Hamburg geleistet hat, zeigt, besitzen Spiele eine technisch moderne und komplexe Möglichkeit, mit Hilfe von Ereignissen innerhalb der virtuellen Welt Emotionen zu provozieren. So ist es möglich, Stress und spezifische Emotionen mit einer Kombination aus mentaler und physischer Stimulation durch Elemente des Spiels hervorzurufen [Müller (2017)].

Die Spielszenen bzw. einzelnen Level sind so zugeschnitten, dass sie die Teilnehmer zu ausgewählten Emotionen leiten. Dabei verfolgt das Exergame eine lineare Struktur zwischen den einzelnen Levels, indem die Anwender durch einen virtuellen Tunnel in die nächste Szene fahren. Dieser Tunnel stellt eine Ruhephase zwischen den einzelnen Levels dar.

Das eigentlich Spiel ist ein Fahrrad-Renn-Spiel, welches aus verschiedenen Szenen besteht. Auf eine **Trainingsszene** folgt die **Teddy Scene**, die **Parcours Scene**, die **Challenge Scene** die **Mountain Scene** und die **Forest Scene** [Müller (2017)]. In den einzelnen Spielszene befinden sich jeweils Events, die eine bestimmte Reaktion sowohl physischer als auch emotionaler Natur hervorrufen.

Aus der Analyse von Müller (2017) hat sich ergeben, dass das *Falling Event* aus der *Challenge Scene*, das *Spider Attack Event* aus der *Mountain Scene* und das *Jump Scare Event* aus der *Forest Scene* die höchste physische und auch emotionale Reaktion hervorgerufen haben. Aus diesem Grund konzentriert sich die Analyse in diesem Anwendungsfall auf die Reaktion der Spieler auf diese drei Szenen.

In der Spielszene *Challenge Scene* befindet sich der Teilnehmer auf einem schmalen Bergpfad. Rechter und Linker Hand sind Klippen. Der Spieler muss auf dem Pfad entlang zu einer Rampe fahren, um mit deren Hilfe eine große Schlucht zu überspringen. Eine erfolgreiche Landung ist für den Spieler eine große Herausforderung und ein Fallen von den Klippen führt dazu, dass das *Falling Event* aufgerufen wird und die Szene neugestartet wird. Dies soll Frustration hervorrufen [Müller (2017)]. Eine Selbsteinschätzungen von Probanden ergab, dass während des *Falling Event* sowohl Frustration, Stress, aber auch Ehrgeiz hervorgerufen wurden.

In der *Mountain Scene* muss der Teilnehmer einen Berg erklimmen. Der physische Widerstand des Ergometers wird dabei in Abhängigkeit von der Steigung schwerer. Hierdurch soll physiologischer Stress hervorgerufen werden [Müller (2017)]. Außerdem soll mit dem *Spider Attack Event*, bei dem Spinnen plötzlich im hohen Gras auftauchen, Überraschung beim Spieler ausgelöst werden. Im Fall des Spider Attack Event ergab eine Selbsteinschätzung von Probanden, dass sie überrascht wurden, hauptsächlich aber die Anstrengung des Bergauffahrens empfunden haben.

Die *Forest Scene* versetzt den Teilnehmer in einen dunklen Wald, der durchfahren werden muss. Die einzige Lichtquelle besteht aus der Fahrradlampe und Münzen, die dem Spieler den Weg leiten sollen. Kurz bevor der Spieler die Ziellinie überfährt, wird das *Jump Scare Event* ausgelöst. Dabei wird die Steuerung deaktiviert und vor dem Fahrrad erscheinen Monster. Das Erscheinen ist mit einem Geschrei untermalt. Hervorgerufen werden soll damit Überraschung oder Angst. Als schockierend, erschreckend und beängstigend wurde das Jump Scare Event in der Selbsteinschätzung beschrieben.

Nach der in Zusammenhang mit dieser Arbeit stattgefundenen Recherche und Forschungsarbeit haben sich für die Richtung der Temperaturvariationen in bestimmten Regionen einzelner Emotionen folgende Erwartungen herauskristallisiert:

	Forest Scene Erschrecken/Angst	Mountain Scene Überraschung	Challenge Scene Stress
Nase	↓		↓
Periorbital	↑		
Stirn	↓		↑↓
Wange	↓		

Tabelle 3.2.: Die im Versuch hervorzurufenden Emotionen und deren Temperaturrichtung in den einzelnen ROIs

Versuchsaufbau: Thermografiekamera im EmoBike

Um die thermischen Veränderungen der Nutzer auf dem EmoBike untersuchen zu können, wurde die Laborumgebung um eine Thermografiekamera erweitert. Die Thermografiekamera am EmoBike zeichnet synchronisiert mit den anderen Komponenten des EmoBikes Temperaturinformationen der Probanden auf, sobald sie an Versuchen teilnehmen. In der aktuellen Ausprägung beschränkt sich die Software auf das Kommunizieren mit dem EmoBike-Controller

(über dedizierte Kanäle) sowie auf das Aufzeichnen der sog. IRB-Files den Temperaturdaten pro Frame. Eine Auswertung der Temperaturinformationen erfolgt ausschließlich im Preprocessing.

Neben der eigentlichen Software zum Aufzeichnen der Informationen musste ein Wrapper implementiert werden, um mit dem EmoBike-Ökosystem zu kommunizieren. Dieser wird am Ende dieses Absatzes erläutert.

An den physikalischen Aufbau wurden besondere Ansprüche hinsichtlich der Position der Kamera gestellt. Zum einen durfte die VarioCam nicht das Sichtfeld des Probanden einschränken, zum anderen musste sich die Kamera neben den anderen Messinstrumenten und Anbauteilen des Ergometers (Kinect, Eyetracker, Fahrradlenker, ...) in den Aufbau eingliedern. Dabei durfte ihre Position weder verändert noch eingeschränkt werden. Als weitere Anforderung wurde identifiziert, dass die Kamera aus zwei Gründen nicht „fest“ ein-/angebaut werden kann. Aufgrund variierender Körpergröße der Probanden muss sich die Kamera in der Y-Achse bewegen/neigen lassen. Des Weiteren muss es möglich sein, die Kamera nach den Versuchsreihen wieder zu entfernen, um sie sicher zu verwahren.

Nach der Analyse der Anforderungen wurden zwei potenzielle Aufstellorte identifiziert. Als erste Option wurde das Anbringen oberhalb des Fernseherers anvisiert. Hierdurch werden die anderen Anbauteile nicht behindert und durch die verhältnismäßig große Entfernung zum Probanden kann ein großer Bereich abgedeckt werden. Da der Proband (besonders dann, wenn er den Fahrradlenker festhält) aber automatisch den Kopf nach unten neigt, entfällt diese Position der Kamera, da hierdurch keine frontale Aufnahme des Gesichts ermöglicht wird. Als zweite und dann auch realisierte Option wird die Kamera auf einem separaten Stativ unterhalb des Probanden (etwa auf Höhe des Lenkers) montiert (siehe Abbildung 3.9). Hierdurch wird u. a. der vorher genannten Neigung des Kopfes perfekt entsprochen. Problematisch ist hier der begrenzte Platzbereich. In den ersten Iterationen wurde die Kamera etwas aus der X-Achse des Blickfelds verschoben. Grund hierfür waren die baulichen Gegebenheiten der anderen Anbauteile. In späteren Iterationen wurde dieser Versatz durch eine neue Halterung für die vorhandenen Anbauteile beseitigt. Dadurch wird ebenfalls eine „Verschattung“ von Gesichtsbereichen durch die Nase beseitigt.

Die Kommunikation mit der Kamera erfolgt über ein SDK, das bereits in [Kletz und Kleimann \(2016\)](#) beschrieben wurde. Visualisiert wird die Architektur in Abbildung 3.7. Bei dem SDK handelt es sich um eine „nicht verwaltete WIN32 API“, weshalb sie dynamisch geladen werden muss, um sie im .NET-Ökosystem verwenden zu können. Das dynamische Laden der benötigten Funktion wird mittels des Interface `Irbgrabinterface` vorgenommen und der Hauptklasse zur Verfügung gestellt. Damit sich die Software immer in einem fest definierten Zustand befindet, wird ein Enumerator `internalConnectionStates` genutzt, dessen

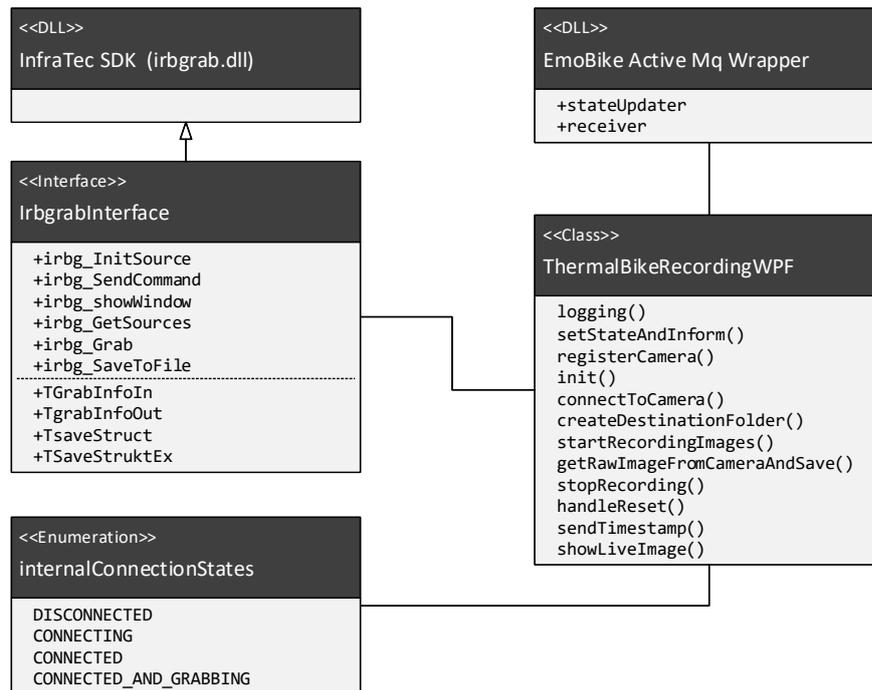


Abbildung 3.7.: Klassendiagramm der EmoBike-Komponente

Status sich mit den entsprechenden Zustandsübergängen verändert. Die Kommunikation mit dem restlichen EmoBike-Ökosystem erfolgt über den Message Broker *Active MQ*¹³. Hierfür ist in das Projekt der EmoBike Active MQ Wrapper eingebunden.

Die Kommunikation im EMOBIKE-Projekt ist mittels dem Message Broker ACTIVE MQ via JSON-Nachrichten realisiert. Die bisherigen Komponenten sind in verschiedenen Programmiersprachen implementiert, wobei das .NET-Ökosystem ein Novum darstellt. Um auch zukünftige Komponenten, die im .NET Framework realisiert werden, einfach in das EmoBike-Projekt zu integrieren, wurde ein Wrapper als *Dynamic Link Library* (DLL) implementiert. Dieser Wrapper, der die Integration zum EmoBike bildet, wird nachfolgend kurz erläutert.

EmobikeActiveMq.dll Die DLL erfüllt zwei Funktionen. Mit ihr ist es möglich, dass sowohl Sender als auch Empfänger für ACTIVE MQ Topics fungieren. Die ACTIVE MQ *Servernamen*, *Ports* und *Topics* können hier individuell gewählt werden. Darüber hinaus werden die zu sendenden/empfangenden Nachrichten serialisiert bzw. de-serialisiert, um als JSON-Nachrichten übertragen zu werden. Durch die lose Kopplung können mehrere Instanzen erstellt werden (hier: Status Updater, Heartbeat sowie Empfänger), die asynchron die Nachrichten verarbeiten.

¹³<http://activemq.apache.org/>

3. Versuchsaufbau - Szenario

Die Empfängerinstanz kategorisiert dabei automatisch nach den folgenden Schlüsselwörtern, für die Event-Handler angeboten werden:

- initializeMeasure
- startMeasure
- stopMeasure
- doReset
- getTime
- unknownMessage
- plainMessage

Für den zu übermittelnden Status wird ein Enumerator mit den EMOBIKE-Standardbefehlen angeboten, der nachfolgende Werte zur Verfügung stellt:

- ONLINE = 0
- READY = 1
- MEASURE_PREPARED = 2
- WORKING = 3
- WRITING = 4
- FINISHED = 5
- RESET = 6
- ERROR = 7
- TIME = 8

Zum besseren Verständnis der Kommunikation und des Funktionsablaufs der Software stellt Anlage 2 - (Laufzeitansicht Thermal Bike Recording) die Laufzeitansicht des Kommunikationsprozesses visuell dar. In ihr enthalten sind sämtliche Komponenten, die bei der Kommunikation

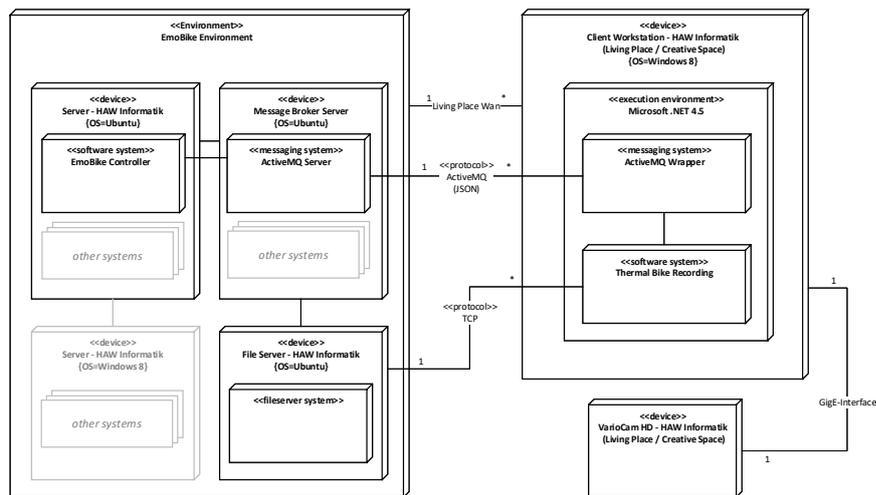


Abbildung 3.8.: Verteilungsansicht der EmoBike-Komponente

beteiligt sind. Dargestellt wird sowohl die Initialisierungs- und Aufzeichnungsphase als auch das Verhalten, sobald Fehler/Resets von anderen Komponenten gemeldet werden.

Versuchsdurchführung

An einer durchgeführten Versuchsreihe im EmoBike-Projekt haben 25 Probanden teilgenommen. 10 männliche und 15 weibliche Teilnehmer mit einer Altersspanne von 18 bis 51 Jahren und einem Durchschnittsalter von 29 Jahren. Die Probanden haben bestätigt, nicht unter dem Einfluss von Drogen oder Medikamenten zu stehen. Vier Probanden waren in der Vergangenheit Patienten einer Rehabilitationsklinik. Fünfzehn Probanden gaben an regelmäßig Sport zu treiben, zwei mehr als fünf Stunden pro Woche, vier hingegen gaben an keinen Sport bzw. weniger als eine Stunde Sport pro Woche zu betreiben. Detailliertere Informationen, besonders deren Selbsteinschätzungen können in Müller (2017) nachgelesen werden.

Nach dem Erscheinen des Probanden wurde die Umgebung, in der sich das EmoBike befindet, erläutert und das Forschungsziel erläutert. Somit wurde sichergestellt, dass der Proband sich an die Umgebung gewöhnen kann, in der die Versuche stattgefunden haben. So konnte sich der Proband, wie in 2.3.3 angemerkt, in Ruhe physisch und mental auf den Versuch vorbereiten und die Thermodynamik des Körpers sich an die Bedingungen im Versuchsraum gewöhnen. Im Anschluss sollte der Proband einen Fragebogen mit persönlichen Informationen, Fitnesslevel und Spielerfahrung ausfüllen. Dieser Teil des Versuchs diente für die Probanden als Ruhephase, da das Ausfüllen des Fragebogens im selben Raum stattgefunden hat, in dem sich auch das EmoBike befindet.

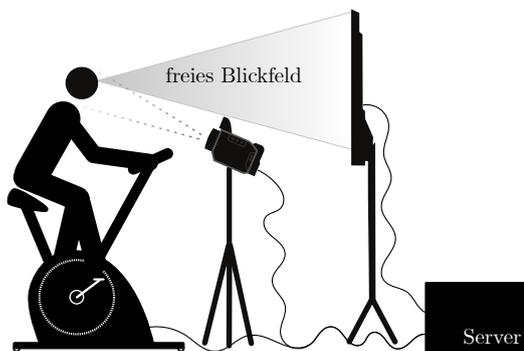


Abbildung 3.9.: Schematische Darstellung des Projektaufbaus (exklusive anderer Anbauteile)



Abbildung 3.10.: Setup der Komponente im EmoBike

3. Versuchsaufbau - Szenario

Die Thermografiekamera VarioCam wurde für einen Emissionsgrad von 0.98 eingestellt, was dem Emissionsgrad menschlicher Haut entspricht. Des Weiteren übertrifft die Thermografiekamera deutlich die im Kapitel 2.3.3 definierten Standardbedingungen und wird somit als technisch ausreichend betrachtet. In der Tabelle 3.3 werden diese Standardbedingungen im Hinblick auf diesen Versuch betrachtet und ihre Erfüllung durch die Infratec VarioCam HD 875 aufgeschlüsselt.

Damit eine eventuell einfallende Störstrahlung durch Sonneneinstrahlung oder andere technische Geräte im Hintergrund weitestgehend ausgeschlossen werden konnte, wurde hinter dem EmoBike ein Vorhang zugezogen, der eine gleichverteilte Wärmestrahlung im Hintergrund sichergestellt hat.

Technische Voraussetzung	Versuch	Erfüllt
Aufnahme der Temperaturspanne des Menschen	30–40 °C	✓
Einstellung Emissionsgrad menschlicher Haut	0,98	✓
Thermische Auflösung < 80 mK NEDT	<50 mK bei 30 °C	✓
Manueller Fokus	AF auf Entfernung zum Probanden eingestellt	✓
Rekalibrierung	Non Uniformity Correction	✓
Exportmöglichkeiten	IRBIS 3.1 Plus & SDK	✓

Tabelle 3.3.: Untersuchung der technischen Voraussetzungen

Die Probanden wurden mit einer Bildrate von 16 Bildern pro Sekunde aufgenommen. So lässt sich im Zeitverlauf recht genau der Zeitpunkt des Events im EmoBike als auch der Zeitpunkt der Temperaturschwankungen als Reaktion auf die Events feststellen. Die Bildrate wurde bewusst niedrig gewählt, da bei einer höheren Bildrate von über 22 Bildern pro Sekunde in Vorversuchen kein einwandfreier Datenfluss entstanden ist, sondern einzelne Bilder gefehlt haben. Außerdem ist die Kommunikation zur Infratec-Kamera in Tests mit solch hohen Bildraten teilweise zufällig

3. Versuchsaufbau - Szenario

unterbrochen worden, sodass die Entscheidung für eine niedrigere Bildrate, aber damit höhere Robustheit der Aufnahmen getroffen wurde. Die Auflösung der Aufnahmen ist 1024 x 768 Pixel.

Dank der Einbindung in das *ActiveMQ*-System des EmoBikes ist jedes Bild mit einem für den Probanden einzigartigen Zeitstempel ausgestattet, sodass jedes Bild im Preprocessing den einzelnen Szenen und Events eindeutig zugeordnet werden kann.

4. Versuchsergebnisse

4.1. Antworten auf Fragestellungen und Hypothesen

In diesem Abschnitt werden die im vorangegangenen Kapitel dargelegten Anwendungsfälle ausgewertet und analysiert. Grundlage dazu bilden die in den Versuchen angefallenen Thermografiebilder bzw. Thermografiezeiten.

4.1.1. Anwendungsfall 1: Zusammenhang zwischen der Hautfeuchtigkeit und der Hauttemperatur

Das Wasser wurde auf der linken Wange des Probanden aufgetragen. Um die aufgetragene Stelle wurde eine ROI definiert und die durchschnittlichen Temperaturdaten wurden im Zeitverlauf betrachtet.

Die Ergebnisse dieses Versuchs entsprechen nahezu den vorherigen Erwartungen: Nach dem Auftragen des kalten Wassers sinkt die Temperatur, nach dem Auftragen des warmen Wassers steigt die Temperatur.

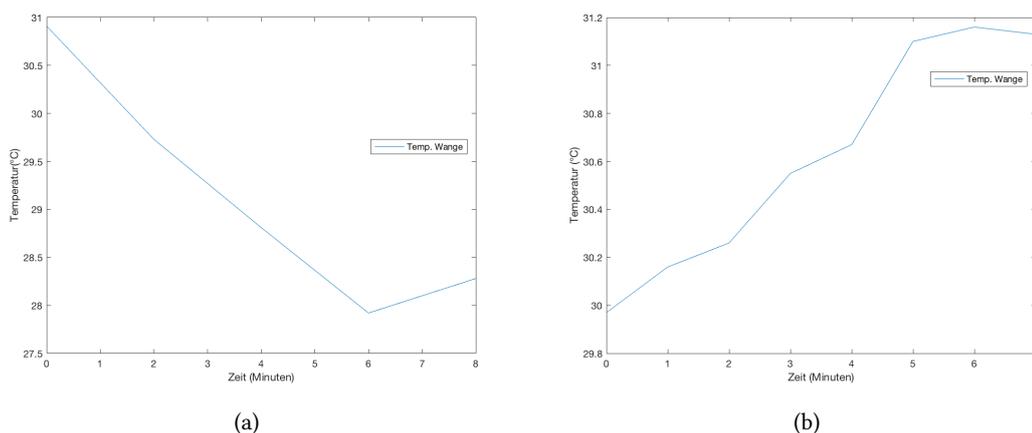


Abbildung 4.1.: Temperatur-Zeit-Graph nach Auftragen des (a) kalten Wassers und (b) warmen Wassers

4. Versuchsergebnisse

In den beiden Plots aus Abbildung 4.1 ist erkennbar, dass die Temperatur an der Wange nach dem Auftragen des 22 °C kalten Wassers stetig fällt, sich aber nach knapp 6 Minuten auf einem Niveau von ca. 28 °C stabilisiert. Insgesamt fällt die Hauttemperatur an der Wange nach 7 Minuten von anfänglichen 30,91 °C auf 28,28 °C.

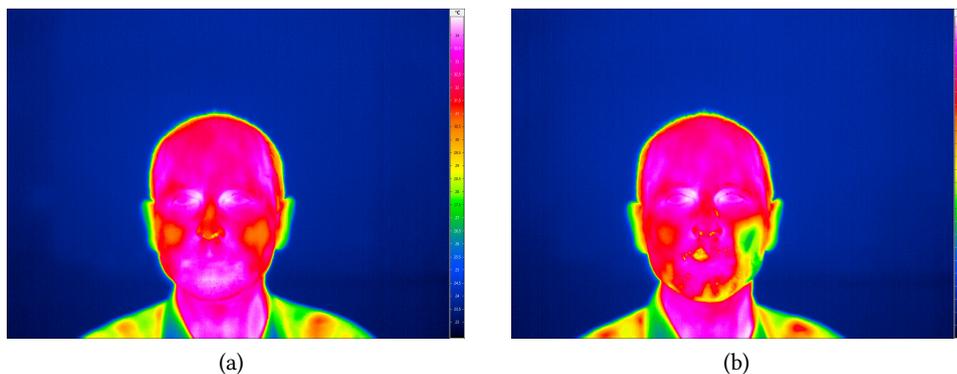


Abbildung 4.2.: Unterschied der Temperatur auf der Wange (a) zu Beginn des Versuchs und (b) am Ende des Versuchs mit kaltem Wasser

Nach dem Auftrag des warmen Wassers hingegen (45 °C) steigt die Temperatur um insgesamt 1,16 °C wie erwartet an. Auch hier tritt nach etwa 6 Minuten eine Stagnation ein, die mit der eingetretenen Verdunstung des Wassers einhergeht. Nach dieser Zeit hat auch der Proband in einer eigenen Einschätzung keine Feuchtigkeit mehr gespürt.

4.1.2. Anwendungsfall 2: Zusammenhang zwischen dem Auftragen von Lippenpflege und der Hauttemperatur

Um eine Temperaturänderung durch eine Fettschicht beobachten zu können, wurde die Lippenpflege auf Lippen und Stirn aufgetragen. Anschließend wurden thermografische Aufnahmen getätigt.

Aus den beiden ROIs Stirn und Lippen wurden die Daten extrahiert und ausgewertet. Die durchschnittliche Temperatur innerhalb der Region wurde im Zeitverlauf betrachtet. Die Messwerte wurden einer Polynominterpolation (4. Grades) unterzogen, um eine Annäherung an den tatsächlichen Verlauf darzustellen. Siehe Abb. 4.3.

Der Vergleich des durchschnittlichen Mittelwerts beider ROIs vor dem Auftragen der Lippenpflege mit dem durchschnittlichen Mittelwert beider ROIs nach 5 Minuten ergibt ein Δ der Temperatur von 0,125 °C. Wie erwartet ist die Temperatur – wenn auch nur sehr leicht –

4. Versuchsergebnisse

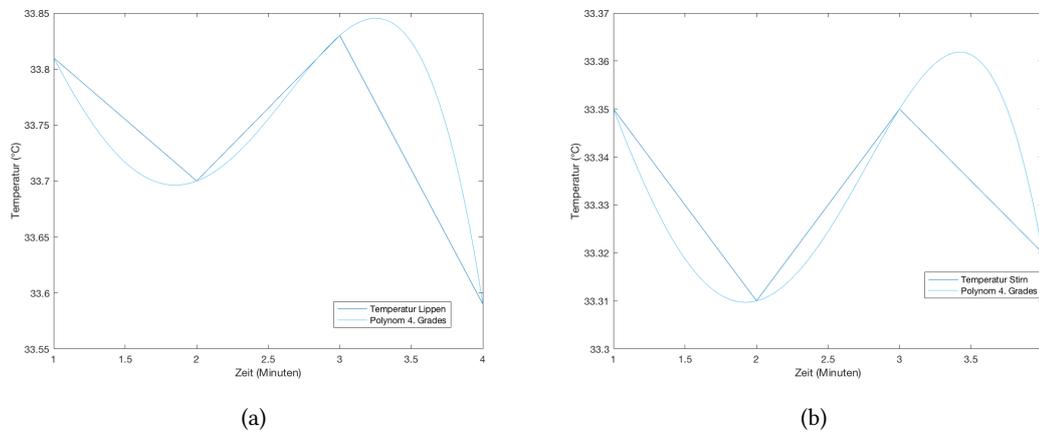


Abbildung 4.3.: Temperaturverlauf (a) der Lippen und (b) der Stirn

gesunken. Da bei diesem Versuch nur eine sehr dünne Schicht Fett aufgetragen wurde, ist die sich daraus ergebende Temperatursenkung gering.

4.1.3. Anwendungsfall 3: Zusammenhang zwischen dem Auftragen von Pferdesalbe und der Veränderung der Hauttemperatur

Der Einfluss der aufgetragenen Pferdesalbe auf die Hauttemperatur des linken Unterarms wurde aus den Daten entnommen und graphisch dargestellt. Hierzu wurde der Graph mit den Datensätzen des minütlichen Zeitverlaufs erstellt. Dieser Graph ist in Abbildung 4.4 abgebildet und zeigt auf einen ersten Blick die Wirkung der Pferdesalbe: Die Temperatur der Haut fällt nach kurzer Zeit um $2,2^{\circ}\text{C}$. Dieser Temperaturfall geht mit der Temperatur der Salbe einher und hat hier im ersten Moment einen ähnlichen Effekt wie das Auftragen von kaltem Wasser auf die Haut (vgl. hierzu 4.1.1). Anschließend fällt die Temperatur verstetigter und ein längerfristiger Kühleffekt tritt ein.

Pferdesalbe hat also zumindest einen ersten Kühleffekt, der messbar längerfristiger ist als der von kaltem Wasser. Inwiefern darunter liegende Muskeln gekühlt werden oder durch den Kühleffekt angeregte Wärmebildung zeigen, lässt sich mit dieser Methode nicht ermitteln, da der Oberflächen-Kühleffekt der Salbe eine zu starke Emission hervorruft und daher für die Wärmekamera im Vordergrund steht.

4. Versuchsergebnisse

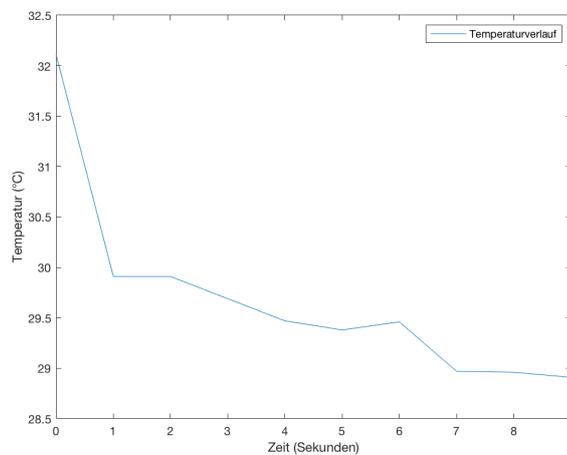


Abbildung 4.4.: Durchschnittliche Temperatur des linken Unterarms nach Auftragen der Pferdesalbe

4.1.4. Anwendungsfall 4: Physiologische Anstrengung

Die These, dass sportliche Aktivität zu einem Anstieg der Hauttemperatur führt, soll mit diesem Versuch untersucht werden. Gewählt wurde die durchschnittliche Gesichtstemperatur über den Zeitverlauf der einzelnen Aufnahmen. Die Durchschnittstemperatur steigt bei Erreichen des vorgegebenen Puls von 140 um 0,81 °C auf ein Maximum von 31,63 °C. In [Abbildung 4.5](#) sind Puls und durchschnittliche Gesichtstemperatur nebeneinander dargestellt. Auf diese Weise lässt sich eine Korrelation zwischen Puls und Gesichtstemperatur feststellen. Der gemessene Puls hat sich allerdings schneller verändert als die Gesichtstemperatur, was mit der Verzögerung der Thermoregulation und der somit später messbaren Temperaturänderung einhergeht. Bedingt durch die ansteigende Herzaktivität steigen sowohl Puls als auch Blutfluss und damit die Gesichtstemperatur an. Nach Beenden der Aktivität ist der Puls nach ca. 3 Minuten wieder auf einen Ruhepuls von 70 bpm gesunken. Die angestiegene Gesichtstemperatur ist in diesem Zeitraum jedoch noch nicht wieder auf das Anfangsniveau herabgesunken. Dieser Fakt stützt die These, dass der Effekt der Hauttemperaturänderung ein deutlich langsamer messbares Ergebnis liefert als beispielsweise Pulswerte oder Indikatoren wie der Hautwiderstandswert.

4.1.5. Anwendungsfall 5: Thermoregulation durch Schwitzen

Um eine eintretende Thermoregulation durch Schweiß auf der Haut zu untersuchen, wurde der Proband mit einem Halogenstrahler im Gesicht angestrahlt, um Wärme zu produzieren

4. Versuchsergebnisse

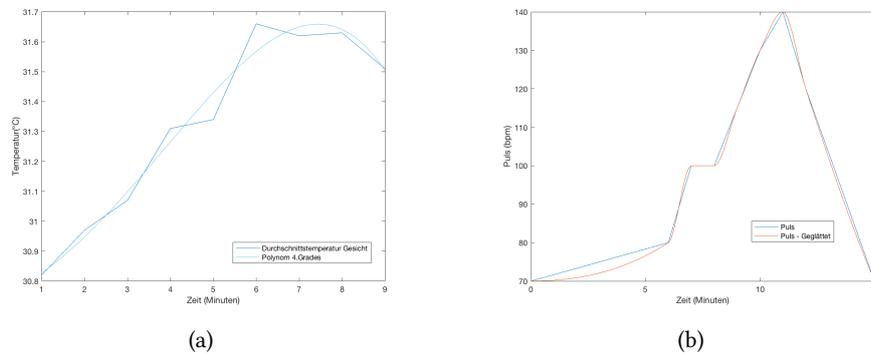


Abbildung 4.5.: (a) Temperatur-Zeit-Kurve der Temperatur während und nach sportlicher Aktivität; (b) Puls-Zeit-Kurve während und nach sportlicher Aktivität

und die Schweißbildung zu aktivieren. Die Datenpunkte wurden in 10-sekündigem Intervall aufgenommen. Die Region of Interest ist hier das gesamte Gesicht, also wurde eine ovale Form definiert, die ihre äußeren Grenzen an Stirn, Wange und Kinn hat und somit das komplette Gesicht abdeckt. Von dieser ROI wurde die durchschnittliche Temperatur aller Messpunkte betrachtet.

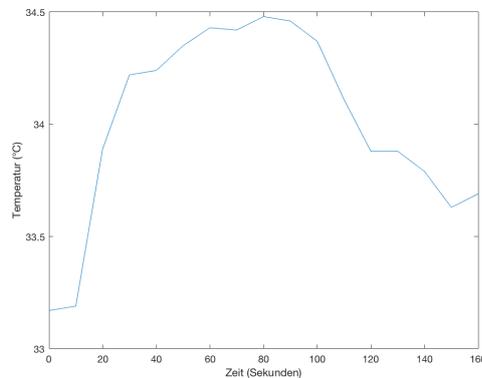


Abbildung 4.6.: Zeitreihe mit deutlich sichtbarem Anstieg der Temperatur, bis eine Schweißbildung eintritt und die Temperatur fällt

Innerhalb von einer Minute steigt die durchschnittliche Temperatur im Gesicht um 1,29 Grad Celsius an. Nach dieser Zeit ist auch nach Meinung des Probanden eine, wenn auch nur sehr leichte, Schweißbildung spürbar. Ab diesem Zeitpunkt sinkt, wie in Abb. 4.6 zu sehen, die Temperatur um $0,7^{\circ}\text{C}$, vermutlich durch das Eintreten der Schweißbildung.

4.1.6. Anwendungsfall 6: Zusammenhang zwischen physiologischer Entspannung und Gesichtstemperatur

Dieser Versuch soll zeigen, wie der Effekt der physiologischen Entspannung auf die Gesichtstemperatur wirkt. Erwartet wird, dass aufgrund eines mit kaltem Wasser getränkten Handtuchs die Temperatur im Gesicht sinkt, da die sich am Hals befindlichen Adern und Venen, die für den Bluttransport in den Kopfbereich zuständig sind, gekühlt werden.

Als Region für diesen Versuch wurde ein ovaler Gesichtsausschnitt gewählt, der als äußere Grenzen den oberen Stirn-, äußeren Wangen- und unteren Kinnbereich hat. Aus diesem ROI wurde die durchschnittliche Temperatur über alle Werte extrahiert.

Es hat sich gezeigt, dass die Temperatur von anfänglichen 32,24 Grad Celsius vor dem Auftragen des Tuches nach 5 Minuten auf 32,67 Grad Celsius angestiegen ist. Nach weiteren 5 Minuten hat der Proband das Handtuch als körperwarm empfunden. Eine weitere Messung nach dieser Zeit ergab einen durchschnittlichen Temperaturwert von 32,82 Grad Celsius.

Die Temperatur im Gesicht ist also entgegen der Erwartung nicht gesunken, sondern vielmehr um über einen halben Grad angestiegen. Vermutet wird, dass der Kühlungseffekt nur in einem sehr kurzen Zeitraum von etwa einer Minute nach dem Auftrag eingetreten sein könnte, da der Proband in der anschließenden Befragung angegeben hat, dass das Handtuch sich nach kürzester Zeit (etwa 2 Minuten) schon „warm“ angefühlt hat. Ein ebenso möglicher Grund für einen Anstieg statt einem erwarteten Sinken der Temperatur ist eine Gegenreaktion des Körpers auf das kalte Tuch. Denn durch das kalte Tuch wird die Thermoregulierung des Körpers angesprochen und versucht auf den Kälteimpuls des Handtuches zu reagieren und „steuert“ gegen. Dieses Gegensteuern wirkt sich anschließend auch auf die Gesichtstemperatur aus.

4.1.7. Anwendungsfall 7: Symmetrie der Gesichtshälften

Um eine Temperatursymmetrie der Gesichtshälften zu untersuchen, wurden 5 Aufnahmen von Probanden aus den Versuchen des EmoBike ausgewählt und auf den Gesichtshälften gespiegelte ROIs untersucht. Sowohl der Augenbereich als auch die Wangen wurden für die Untersuchung der Symmetrie als ROI definiert. Für die Regionen wurden sowohl Maximum, Durchschnittswert als auch die mittlere Abweichung und die Standardabweichung beider gegenüberliegender Regions oder Punkte ausgewertet. Hierzu wurde definiert, dass Temperaturabweichungen kleiner 0,2 Grad Celsius als temperatursymmetrisch gelten.

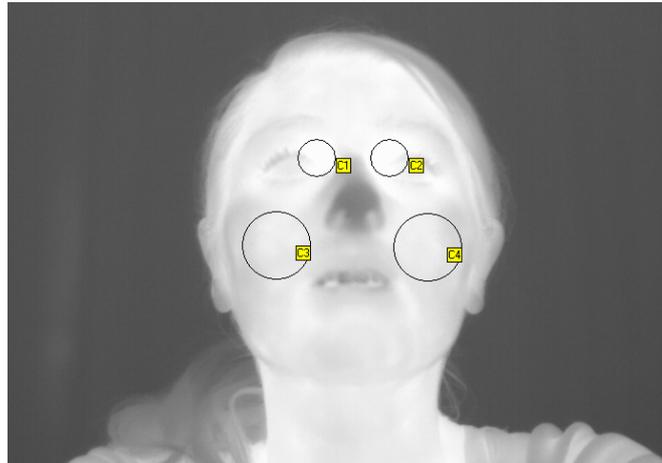


Abbildung 4.7.: Definitionen der ROIs für Wange und Augen

Region	Temperatur		
	(Mittlerer Wert \pm Std.A., °C)	Min (°C)	Max (°C)
Auge	35,0450 \pm 0,4280	33,3540	35,8190
Wange	34,0440 \pm 0,4320	32,8720	34,9060

Tabelle 4.1.: Gesichtstemperatur für 2 ROIs über alle Probanden

In der Tabelle 4.1 ist die durchschnittliche, minimale und maximale Temperatur der beidseitigen Regionen über alle Probanden angegeben. Die durchschnittliche Temperatur im Augenbereich liegt im Schnitt ca. 1 °C höher als im Wangenbereich. Dieser Unterschied wird auf den bereits erläuterten „Engpass“ des Bereichs zwischen Nase und Augen zurückgeführt, durch den viele Adern laufen, und darauf, dass die Haut an dieser Stelle besonders dünn ist.

Die in der Tabelle angegebene Standardabweichung ist die durchschnittliche Standardabweichung über alle Probanden für die ROI auf beiden Seiten. Hierzu wurden für die einzelnen Pixel-Temperaturwerte innerhalb der ROI die Standardabweichung berechnet und anschließend der Durchschnitt aller Probanden ermittelt.

Region	Links (°C)	Rechts (°C)	Durchschnittliches ΔT
Auge	35,0600 $\pm 0,6362$	35,0580 $\pm 0,6344$	0,0380 $\pm 0,0576$
Wange	34,0020 $\pm 0,6504$	34,0860 $\pm 0,7157$	0,1200 $\pm 0,2461$

Tabelle 4.2.: Unterschiede der Gesichtstemperatur zwischen zwei Seiten in den Regionen Auge und Wange

Die Tabelle 4.2 zeigt den durchschnittlichen Unterschied ΔT und die durchschnittliche Temperatur der linken und rechten Region. Der Wert ΔT liegt in beiden Fällen unter $0,2^\circ\text{C}$.

So kann also anhand dieser Untersuchung also davon ausgegangen werden, dass eine Temperatursymmetrie für gespiegelte Regionen im menschlichen Gesicht vorliegt, was sowohl für die weiteren Versuche, als auch das allgemeine Verständnis der Analyse von gewissem Wert ist.

4.1.8. Anwendungsfall 8: ShowCase – Analyse der Regio Orbitalis

Der entwickelte ShowCase dient nicht als Versuch, mit dem sich Daten generieren und auswerten lassen, sondern will Vorteile und Nachteile der Technologie einem breiteren Publikum darzustellen. Der ShowCase wurde auf zwei Veranstaltungen vorgestellt, an denen sowohl technisch versierte als auch interessierte Besucher ohne Informatik- oder technischen Hintergrund teilgenommen haben. So werden in der Auswertung dieses Teils keine Daten analysiert, sondern vielmehr die Diskussionen mit Teilnehmern und ihre Reaktionen wiedergegeben und reflektiert.

Der erste Eindruck der meisten Besucher war merklich davon geprägt, dass sie plötzlich eine Darstellung ihres eigenen Gesichts wahrgenommen haben, die sie so noch nicht erfahren haben. Der Effekt, dass hier etwas gewöhnlich nicht Sichtbares sichtbar wird, war für viele Teilnehmer interessant und auch der erste Grund, wieso der ShowCase aufgesucht wurde.

Etwas sonst nur durch beispielsweise leichte Rötungen im Gesicht Sichtbares, nämlich die Hauttemperatur im Gesicht, wird unerwarteterweise in leicht verständlicher Falschfarbendarstellung sichtbar und hat so für viele Teilnehmer neue Perspektiven eröffnet, da wenige von einem kameraähnlichen Gerät mehr Informationen erwartet haben als die visuelle Reflektion eines aufgenommenen Bildes. Auch der Fakt, dass keine Lichtquelle benötigt wird, um die Wärmestrahlung aufzunehmen, eröffnete in der Diskussion den Teilnehmern neue Sichtweisen. Ein weiterer Aspekt, der vielen Besuchern nicht bewusst war, ist, dass eben dieses

Sichtbarmachen von Temperaturen aus einer Datenschicht besteht, bei der jeder Pixel einen Temperaturwert repräsentiert, der auch ausgelesen werden kann.

Um die Aussage zu verstärken, dass sich hinter dem für den Teilnehmer sichtbaren Falschfarbenbild wertvolle Daten befinden, zu verstärken, wird im ShowCase das Auge extrahiert und die Temperatur am Punkt zwischen Nase und Auge angezeigt.

Nach diesen Erkenntnissen haben viele Teilnehmer über die Möglichkeiten, die sich mit der Erweiterung des visuellen Bildes um eine Temperaturdaten-Schicht ergeben, offen nachgedacht. Dabei hat sich gezeigt, dass in vielen Bereichen Anwendungsfelder denkbar sind, die aber auf eine Brauchbarkeit hin näher untersucht werden müssten. Eine von vielen Teilnehmern im Gespräch erörterte Möglichkeit war die Anwendung im Sicherheitsbereich. So wäre eine erweiterte Möglichkeit der Überwachung aufgrund der Möglichkeit einer Aufnahme bei völliger Dunkelheit möglich. Auch Wiedererkennen von Personen anhand ihres thermischen Gesichtsabdruckes regten einige Personen als mögliche Applikation an.

Eine Teilnehmerin, die offensichtlich im medizinischen Bereich tätig war, führte allerdings auch Argumente gegen die Verwendung von Thermografiekameras im Medizin- und Self-Assessment-Umfeld an. Auch bei Thermografiebildern sei die Frage des Datenschutzes zu stellen: Inwiefern kann man Personen auf Thermografiebildern aufgrund ihrer einzigartigen thermischen Merkmale im Gesicht wiedererkennen und inwiefern müssten diese Daten geschützt werden bzw. ein Schutz geregelt werden. Ebenso äußerte die Teilnehmerin ihre Bedenken hinsichtlich einer weiten Verbreitung von Thermografiekameras etwa in Smartphones. Denn dadurch hätte jeder die Möglichkeit, sich einer laienhaften medizinischen Selbstuntersuchung zu unterziehen, und die Gefahr, aufgrund fehlenden Wissens falsche Selbstdiagnosen zu stellen und somit eine gewisse Panik mit der Folge unsinniger Arztbesuche zu generieren, sei groß.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Reaktionen auf den ShowCase durchaus unterschiedlich, aber überwiegend positiv waren. Die Thermografie gibt es zwar schon seit vielen Jahren, diese aber auf Anwendungen des täglichen Lebens zu adaptieren, wirkte für viele wie eine völlig neue Technologie. Eine gewisse Skepsis, von einem Gerät nicht-invasiv erfasst, analysiert und interpretiert zu werden, ist in den Gesprächen durchgeklungen.

Aufgrund der Erfahrungen und Feedbacks des ShowCase lässt sich ableiten, dass Anwendungen im Bereich der Mensch-Maschine-Interaktion durchaus zukunftssträchtigen Wert haben und untersucht und weiterentwickelt werden sollten.

Uhrzeit	R2_Mittelwert	R2_Minimum	R2_Maximum	Sekunden	Trigger
14.08.2018 10:17:58	30,52	24,46	36,02	28,000	zombiesTriggered

Tabelle 4.3.: Beispieldatensatz einer extrahierten ROI

4.1.9. Anwendungsfall 9: Emotionserkennung

Nach dem Abschluss der Datenakquirierung war es notwendig, aus den Sequenzen der Thermografieaufnahmen von den jeweiligen Spielszenen die benötigten Regions of Interest zu extrahieren. Da die Probanden auf dem Ergometer eine physische Aktivität ausüben, sind Kopf und Oberkörper in einer ständigen Bewegung. Dies macht eine einwandfreie und exakte Definition einer ROI, die über den gesamten Zeitraum am selben Ort bleibt und so auch immer denselben Pixelbereich abdeckt, nahezu unmöglich. Um dies zu umgehen müsste ein Face- oder ROI-Tracking implementiert werden, sodass bei Bildsequenzen auf automatisierte Weise exakte Thermografiedaten generiert werden können. Eine zweite Möglichkeit ist das Herausrechnen der horizontalen und vertikalen Kopfbewegung und ein anschließendes Zentrieren des Gesichtes im Bild, sodass ebenfalls immer an der selben Stelle eine Messung vorgenommen werden kann. Dieser technischen Implementation des Trackings auf Thermografiebildern hat sich **Kletz (2017)** in seiner Masterarbeit THERMOGRAFISCHE GESICHTSANALYSE MIT EINEM MULTIMODALEN KAMERASYSTEM gewidmet. Um sowohl die Änderungssensitivität als auch die Robustheit in einem hinreichenden Maß zu gewährleisten, wurde die Extraktion der Regions of Interest für diese Arbeit jedoch manuell mit Hilfe der Software *IRBIS 3.1 Plus*¹⁴ vorgenommen.

Tabelle 4.3 enthält einen vollständigen generierten Datensatz eines Frames für eine Region of Interest. Mittelwert, Minimum- und Maximumwerte sind in Grad Celsius angegeben. Die Sekunden geben die vergangene Zeit seit dem Start der Szene im EmoBike an. Dieser Zeit wurde mit Hilfe von *Matlab*, einer Software der Firma Mathworks¹⁵ zur Darstellung und Lösung mathematischer Probleme, das Event in der Spielszene (im Datensatz als *Trigger* bezeichnet) zugeordnet. Hierzu wurden die Nachrichten aus dem EmoBike, welche in einer CSV hinterlegt sind und die einzelnen Spielszenen mit den dazugehörigen Events der Probanden enthalten, den Frames der Thermografieaufnahmen zugeordnet. Da die Aufnahmen mit einer Bildrate von 16 Bildern pro Sekunden stattgefunden haben, ist alle 0,0625 Sekunden ein Bild entstanden. Dementsprechend ist für jede 0,0625 Sekunden ein solcher Datensatz vorhanden. Die anschließende Auswertung hat in Matlab stattgefunden.

Aus den Versuchen des EmoBike wurden die Daten von 11 Probanden entnommen. Es wurden gezielt 11 Probanden ausgesucht, die bei den EmoBike-Versuchen möglichst wenig

¹⁴vgl. Kap. 3.1.2 *IRBIS 3.1 Plus*

¹⁵<https://de.mathworks.com/>

4. Versuchsergebnisse

Kopfdrehungen und Kopfbewegungen gemacht haben, um die Verdeckung besonders der Regio Orbitalis auszuschließen. Es wurden 4 weibliche und 7 männliche Versuchsteilnehmer untersucht.

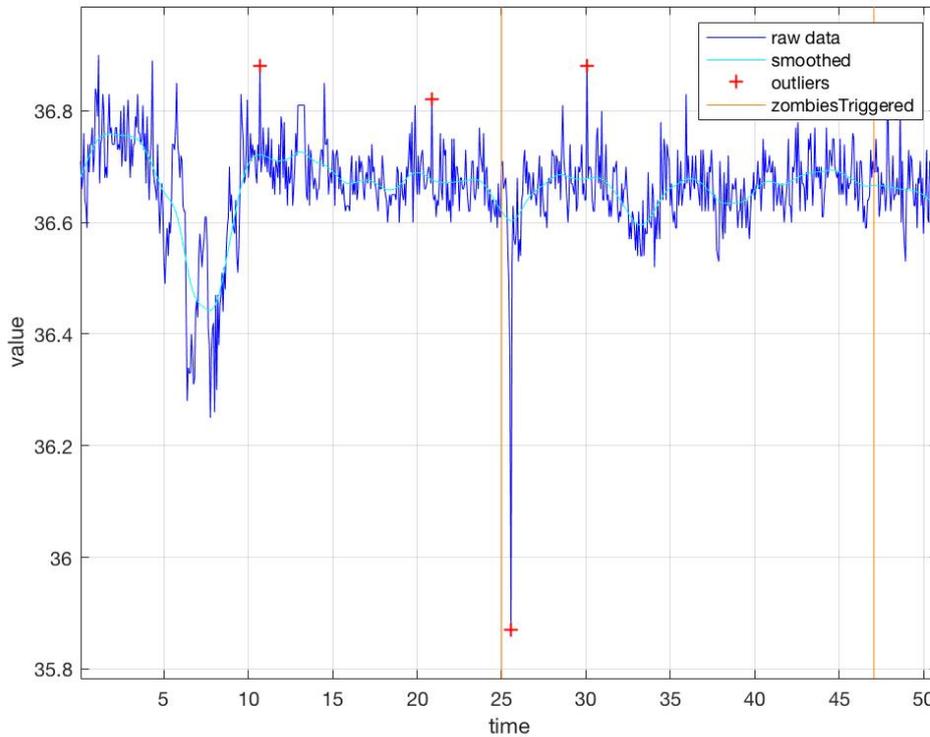


Abbildung 4.8.: Typische Zeitreihe für das Event zombiesTriggered in der Forest Scene für die periorbitale Region

Um auf möglichst einfache und schnelle Weise die Temperaturänderung nach einem Event erfassen zu können, wurde mit Matlab ein Plot erstellt (vgl. das Beispiel in Abb. 4.8). In diesem ist der Temperaturverlauf auf der y-Achse angegeben, der Zeitverlauf auf der x-Achse (raw data). Außerdem wurde das zehnte Polynom der Temperaturkurve berechnet, sodass eine geglättete Kurve entsteht, welche die Temperaturtendenzen einfach erkennen lässt (smoothed). Die Ausreißer, welche auf eine fehlerhafte Messung schließen lassen, sind mit einem + gekennzeichnet (outliers). Diese sind im Plot absichtlich mit dargestellt, sind aber für die Berechnung der Tendenzen exkludiert worden. Die orange vertikale Linie stellt ein Event dar, in diesem Fall das zombiesTriggered aus der Forest Scene. Untersucht wurden die Ausschläge direkt nach einem

Event. Wie bereits in der Analyse angeklungen, ist ein Zeitrahmen von etwa 30 Sekunden für die Betrachtung einer Änderung der Hauttemperatur sinnvoll. Die Änderungen der Temperatur nach einem Event wurden dann mittels Matlab in 4 Stufen ermittelt: starke Steigung, mittlere Steigung, starkes Absenken und mittleres Absenken der Temperatur. Diese Steigungen bzw. Senkungen der Funktion nach der Zeit wurden in 5-sekündigen Abständen, also nach 5, 10, 15, 20, 25 und 30 Sekunden neu berechnet. Im Falle der *Forest Scene* wurde der Verlauf der Funktion bereits nach 2 Sekunden berechnet, da bei dem Auftauchen des *zombiesTriggered-Events* sehr schnelle Temperaturänderungen messbar sind. Das Matlab-Skript befindet sich in Anlage 1 dieser Arbeit.

Die Steigungen bzw. Senkungen wurden zur besseren Übersicht in einer Tabelle festgehalten. So konnten die einzelnen Zeitfenster im einzelnen, aber auch der Verlauf in 5-sekündigen Schritten nach einem Event leichter erfasst und dargestellt werden.

Forest Scene: Erschrecken/Angst In den Bildsequenzen der Thermografieaufnahmen deutlich zu erkennen ist der Zeitpunkt, an dem das *zombiesTriggered-Event* ausgelöst wird und sich die Probanden vor dem auftauchenden Zombie erschrecken. Jeder Proband zuckt in diesem Moment mit dem Oberkörper zusammen und einige öffnen erschrocken ihren Mund. Die stärkste Änderung der Zeit-Temperatur-Funktion findet direkt nach dem ersten Auftauchen des Zombies statt. Hier ist bei 8 von 11 Probanden die Temperatur in der periorbitalen Region zwischen Auge und Nase in den ersten 5 Sekunden nach dem Event um bis zu 0,29 Grad Celsius gesunken. Diese Region ist besonders interessant, da aufgrund der dünnen Haut zwischen Auge und Nase eine Änderung des Blutflusses und damit einhergehend eine Änderung der Temperatur besonders schnell messbar ist. Die ersten 5 Sekunden waren in dieser Szene besonders interessant, da der Effekt des Erschreckens hier eine enorm schnelle Wirkung auf die Temperatur zu haben scheint. Ein Grund hierfür ist, dass bei Angst, wobei starke Angst nur eine länger dauernde Form des Erschreckens ist, aufgrund des Fluchtinstinktes ein Großteil des Blutes in die Beine transportiert wird. Dies hat dann den Effekt, dass im Gesicht ein niedrigerer Temperaturwert gemessen wird, da aus dieser Region Blut abtransportiert wird. Im Bereich von 5 bis 10 Sekunden nach dem Event fällt die Temperatur weiterhin bei 8 von 11 Probanden. Nach weiteren 5 Sekunden bestätigt sich diese Tendenz weiter bei 9 von 11 Probanden, wobei bei 3 von diesen 9 Probanden bereits das zweite *zombiesTriggered-Event* ausgelöst wurde. Wie im Vorfeld erwartet, ist der Ausschlag der Funktion nach dem ersten Event am stärksten und bei den folgenden Events nur noch in abgeschwächter und verzögerter Form zu beobachten, da ein Gewöhnungseffekt eintritt, der die emotionale Reaktion abschwächen lässt.

Challenge Scene: Frustration, Stress Die *Challenge Scene* stellt insofern eine Besonderheit dar, da hier die Probanden je nach Können und Glück einen oder bis zu 13 Anläufe gebraucht haben, um das Fahrrad sicher zu landen, womit das Level erfolgreich beendet ist. Das *playerDied-Event* dieser Szene ist der Moment, in dem der Spieler den Sprung über die Klippe nicht geschafft hat und herunterfällt und im virtuellen Spiel stirbt. Es ist der Moment, der gerade bei wiederholtem Versagen beim Sprung das Stresslevel des Probanden anhebt. Aus diesem Grund werden die Steigungen oder Senkungen der Funktion nach diesem Event betrachtet. Auch hier wurde aus denselben Gründen wie in der *Forest Scene* die periorbitale Region betrachtet.

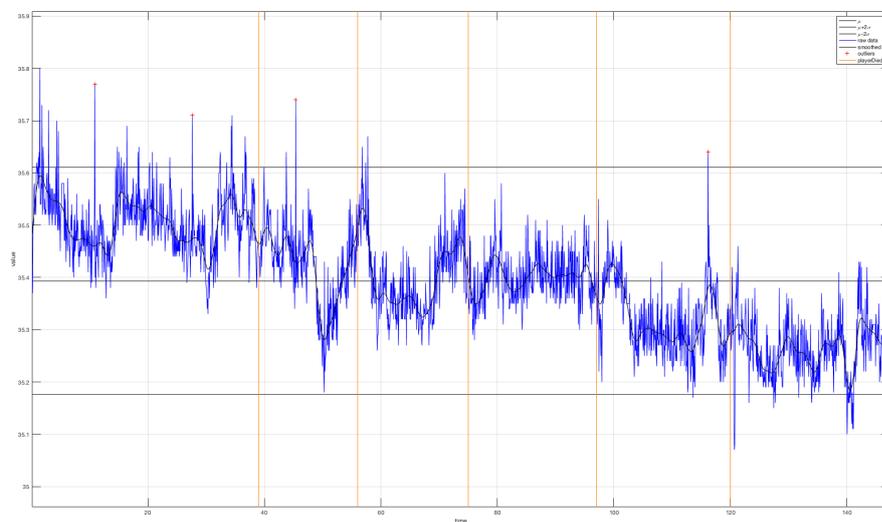


Abbildung 4.9.: Typische Zeitreihe für das Event *playerDied* in der Challenge Scene für die periorbitale Region

Da einer der 11 Probanden die Szene im ersten Versuch geschafft hat und somit kein *playerDied* ausgelöst hat, werden in diesem Fall nur die 10 Probanden betrachtet, bei denen das *playerDied* mindestens einmal aufgetreten ist. Die wenigstens Anläufe hat ein Proband mit zweimaligem Neustart der Szene geschafft, der Proband mit den meisten Versuchen musste die Szene insgesamt 13-mal neu beginnen, bis er die Schlucht überquert hat. Bei 9 von 10 Probanden ist die Temperatur in den ersten 5 Sekunden nach dem ersten Event angestiegen. Bei ebenfalls 9 von 10 Probanden ist dieser Anstieg auch nach 10 Sekunden nicht abgebrochen. Da das Spiel nach einem *playerDied* direkt neu gestartet wird, wird das Event im Schnitt alle 22

4. Versuchsergebnisse

Sekunden aufgerufen. So ist es schwierig, eine Temperaturschwankung nach über 20 Sekunden nach dem ersten Event genau diesem ersten Event zuzuordnen. Da die vielen Events hintereinander folgen, wurden Temperaturschwankungen nach über 20 Sekunden nur als komplette Tendenz der Funktion bis zum Ende der Szene betrachtet. Es wird davon ausgegangen, dass das Stresslevel mit der Anzahl der Abstürze steigt. Nach etwa 20 Sekunden steigt die Temperatur bei 6 von 11 Probanden leicht, bei 5 von 11 Probanden hingegen sinkt sie leicht. Nach dieser Zeit ist also keine wertvolle Aussage bezüglich des Events mehr zu treffen.

Mountain Scene: Überraschtheit Die *Mountain Scene*, in der der Teilnehmer einen Berg hoch auf eine Plateau-Ebene fährt und sich ihm versteckte Spinnen nähern, bis eine Kollision unvermeidbar ist, soll die Nutzer zum einen physischer Anstrengung aussetzen, zum anderen überraschen. Das Event *spiderAttak*, nach dem die Spinnen angreifen, wird zufällig generiert, während die Spieler auf der Plateau-Ebene fahren. Dadurch kam es dazu, dass das Event bei 9 von 11 Probanden das erste Mal frühestens 20 Sekunden vor dem Ende der gesamten Szene gestartet wurde. Aus diesem Grund wurde die Funktion nur 15 Sekunden lang nach dem ersten Aufrufen des Events betrachtet, da in 9 von 11 Fällen das Spiel innerhalb von 15 Sekunden nach dem Event beendet ist.

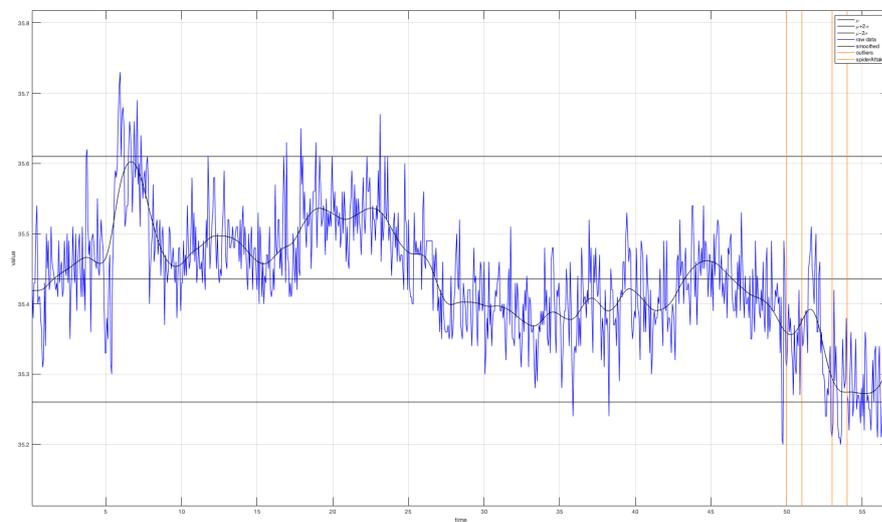


Abbildung 4.10.: Typische Zeitreihe für das Event *spiderAttak* in der *Mountain Scene* für die periorbitale Region

Die Temperaturänderung der Haut an der ROI – hier erneut die periorbitale Region – hat unter den Probanden in der 15-sekündigen Betrachtung keine einheitliche Tendenz hervorgebracht. Vielmehr hat sich gezeigt, dass das Event nach 5 Sekunden sowohl eine Temperatursteigerung (5 Probanden) als auch eine Temperatursenkung (6 Probanden) bewirkt hat. Nach 10 Sekunden hat eine Temperatursenkung bei 5 Probanden, eine Temperatursteigerung bei 6 Probanden stattgefunden.

Dieses ausgewogene Ergebnis kann bedeuten, dass die Emotionsauslöser im Spiel, die den Effekt der Überraschung hervorrufen sollen, nicht stark genug für eine Temperaturanalyse sind. Dies könnte auch erklären, warum es in der medizinischen Literatur keine Grundlage für das Verändern der Gesichtstemperatur durch Überraschtsein gibt. Es ist aber genauso möglich, dass die Temperaturschwankungen sich erst nach einer längeren Zeit von etwa über 30 Sekunden einstellen, die aufgrund des Spieldesigns der Szene nicht mehr aufgenommen werden konnten.

4.2. Kritische Betrachtung

Sowohl die getätigten Vorversuche als auch der ShowCase und der Versuch, Reaktionen auf emotionale Veränderungen zu erfassen, haben einige Herausforderungen mit sich gebracht. Überlegungen, in welchem Rahmen und unter welchen Bedingungen eine Messung stattfindet, waren genau so wichtig wie die Überlegungen, wann und in welchem Zeitrahmen Aufnahmen getätigt werden sollten. Die aus den Vorversuchen unter Laborbedingungen hervorgegangenen Ergebnisse konnten zu Anwendungsfällen wie dem ShowCase abgeleitet werden.

Aus den Vorversuchen ist deutlich geworden, dass die Analyse von Thermografiedaten viel mehr ist als nur die reine Betrachtung von Zeitreihen mit Datenpunkten. Eine direkte Zuordnung, ob ein Zusammenhang zwischen einem Auslöser und der Änderung der Temperatur im Gesicht besteht, fällt schwer, da es eine hohe Anzahl von Einflussfaktoren gibt.

Die Einbeziehung der Temperaturempfindlichkeit des menschlichen Körpers ist ein komplizierter Vorgang. Die Frage, in welchem Dezimalstellenbereich Temperaturschwankungen als wirkliche Temperaturänderungen definiert werden können, kann nicht genau beantwortet werden. Hier ist eine höhere thermische Auflösung der Thermografiekamera nicht immer von Vorteil, da Änderungen bis ins kleinste Detail sichtbar gemacht werden können, diese minimalsten Änderungen aber nicht unbedingt sinnvoll argumentativ begründbar sind.

Des Weiteren lassen sich die Thermografiedaten nicht ohne tiefgründigere Kenntnisse der Physiologie des Menschen verarbeiten. Zumindest dann nicht, wenn aus diesen aufbereiteten Daten bestimmte Schlüsse gezogen werden müssen. Wie bereits erwähnt, ist der Einflussvektor

so multidimensional, dass eine nicht-manuelle Betrachtung und Diskussion der Ergebnisse schwierig wird. So können nur Teile dieses Prozesses automatisiert werden und beispielsweise einem Mediziner Hilfestellung geben.

Wie das Paper THERMAL FACEPRINT: A NEW THERMAL FACE SIGNATURE EXTRACTION FOR INFRARED FACE RECOGNITION von Akhloufi und Bendada (2008) gezeigt hat, besitzt jede Person einen einmaligen thermischen Gesichtsabdruck. Ebenso verhalten sich die thermischen Änderungen im Gesicht der Probanden im Falle des EmotionBikes nach einem Event doch sehr unterschiedlich. Aus diesem Grund konnte kein robustes und exaktes Ergebnis bei den EmoBike-Versuchen erzielt werden. Zwar konnten bei einigen Probanden ähnliche Temperaturtendenzen erkannt werden, ein eindeutiges und sich wiederholendes Muster konnte mit der hier angewandte Methodik jedoch nicht gefunden werden. Trotzdem lässt sich aus den Versuchen ableiten, dass bei bestimmten Emotionsauslösern gewisse Tendenzen vorhanden sind, die sich aber nicht zwingend wiederholen. Wenn auf diesem Gebiet weitere Forschung stattfinden soll, wäre es ratsam, weitere Versuche mit generalisierten Tests wie dem Stroop-Test zum Hervorrufen von Stress durchzuführen. Das EmoBike hat zwar bewiesen, dass Emotionen durch das Exergame hervorgerufen werden können, jedoch verkompliziert die physische Anstrengung und die dauerhafte Bewegung des Probanden die Analyse der Thermografiedaten.

Einige Schwierigkeiten haben sich auch in der Extrahierung der Regions of Interest aufgetan. Aufgrund der starken Bewegungen der Probanden lag hierin die größte Schwierigkeit. Da der Anspruch an die Analyse war, möglichst exakt zu sein, mussten auch die Regions in den einzelnen Frames möglichst wiederholgenau an der selben Region im Gesicht sein. Aus diesem Grund wurden die Regionen manuell für jeden Frame einzeln extrahiert, um so Temperaturschwankungen durch falsch platzierte ROIs in den Frames zu vermeiden. Da diese manuelle Aufarbeitung sehr viel Zeit in Anspruch genommen hat, konnte nur ein Teil des Datensatzes bzw. ein Teil der Szenen in der Emotionsanalyse betrachtet werden.

4.3. Zusammenfassung

Im Folgenden werden die Ergebnisse aus der Versuchsauswertung noch einmal tabellarisch dargestellt und auf die Erwartungen aus Tabelle 2.3 bezogen.

Die Vorversuche zur Untersuchung von Zusammenhängen zwischen dem Auftragen von bestimmten Cremes oder Flüssigkeiten auf die Haut haben die erwarteten Ergebnisse erzielt. Bei Auftrag von kaltem Wasser sinkt die Temperatur, bei Auftrag von warmem Wasser steigt sie. Dieser Effekt ist allerdings sehr kurzfristig. Das Auftragen von fetthaltiger Lippencreme senkt die messbare Temperatur aufgrund der Isolierungseigenschaft der Creme. Ebenso wurde

der kühlende Effekt einer Sportsalbe bewiesen, der in Regionen mit strapazierten Muskeln oder Gelenken aufgetragen wird. Langanhaltende Kühlung tritt hier zwar ein, jedoch lässt sich mit der Infrarotthermografie nicht messen, inwieweit die darunterliegenden Muskeln diesen Effekt spüren.

Der Versuch zur physiologischen Anstrengung beweist, dass die Gesichtstemperatur schnell und stetig ansteigt und hier mit dem Anstieg des Puls korreliert. Nach der Sporteinheit hat sich allerdings gezeigt, dass die Temperatur im Vergleich zum Puls nur verzögert sinkt.

Entgegen den Erwartungen sind die Ergebnisse des Versuchs zur physiologischen Entspannung. Das mit einem kühlenden Effekt in Verbindung gebrachte feuchte Handtuch um den Nacken-Halsbereich des Probanden, hat die Gesichtstemperatur ansteigen lassen. Vermutet wird hier ein eventuell nur sehr kurzer, aber in den Thermografiedaten nicht sichtbarer Effekt. Möglicherweise zeigt sich hier aber auch eine Auswirkung der körpereigenen Thermoregulation, insofern als der Körper auf eine deutliche Abkühlung mit Wärmeausgleich reagiert.

Die Diskussionen, die im Rahmen des *ShowCase* stattgefunden haben, waren durchweg positiv zu bewerten. Sowohl die Aufgeschlossenheit als auch das Interesse an der Technologie und der Adaptierung im Umfeld des *affective computing* ist in der Form nicht erwartet worden. Durch dieses Echo lässt sich sagen, dass Anwendungen auf diesem Gebiet durchaus weiter erprobt und entwickelt werden sollten.

Zu guter Letzt ist der Versuch, Emotionen in Thermografiebildern zu erkennen oder wie in diesem Fall zu bestätigen, nur teilweise überzeugend gelungen. Bei „starken“ Events wie dem *zombiesTriggered*, bei dem sogar im visuellen Bild ein deutliches Erschrecken zu sehen ist, konnten eindeutige Temperaturtendenzen nachgewiesen werden. Die *Mountain Scene* mit dem *spiderAttak* zum Hervorrufen eines Überraschungseffekts konnte aufgrund des schnellen Ende des Levels nach dem Event nicht exakt und mit ausreichender Zeitbetrachtung untersucht werden, sodass hier hingegen eine Aussage schwierig wird.

In der *Challenge Scene* soll das mehrmalige Event *playerDied* das Frustrationslevel steigern. Es sind auch in den ersten Sekunden nach dem Event eindeutige Ergebnisse vorhanden, wobei bei mehreren schnell hintereinander folgenden Events keine exakte Zuordnung der vorliegenden Temperaturschwankungen zu einem bestimmten Event möglich ist.

Dies ergibt in der Gesamtheit zwar Ergebnisse, die in dieser Form verwendet werden können, aber durchaus noch weiteres Untersuchungspotenzial bieten.

Anwendungsfall	Zu untersuchender Effekt	Ergebnis	Bedeutung
Änderung der Temperatur aufgrund von Befeuchtung und damit einhergehender Verdunstung	Zusammenhang der Hautfeuchtigkeit mit Gesichtstemperatur	kaltes Wasser: Temp.: ↓, warmes Wasser: Temp.: ↑	Kühl- & Wärmeeffekt der aber nur kurzweilig ist (ca. 5 min)
Fettschicht führt zur Senkung der Haut- bzw. Oberflächentemperatur	Zusammenhang des Auftragens von Lippenpflege mit Hauttemperatur	Temperatursenkung ↓	Fett wirkt isolierend, weniger Wärmestrahlung nach außen
Durchblutungsfördernde Salbe führt zu Temperaturerhöhung der Haut	Zusammenhang des Auftragens von Pferdesalbe und Hauttemperatur	Kühlender Effekt ↓	Kühleffekt nur auf Oberfläche zu beobachten, nicht zwingend Muskeln
Physiologische Anstrengung	Anstieg des Stoffwechsels, Schweißbildung, höherer Puls ergeben höhere Herzaktivität, also mehr Blutfluss	↑	Anstieg: ähnlich schnell wie Pulsanstieg, langsamere Reaktion bei Abklingen nach Anstrengung

Physiologische Anstrengung	Thermoregulation durch Schwitzen	↑ Anstieg bis Schweißbildung, danach abfallend ↓	Schweiß hat kühlenden Effekt der mit IRT messbar ist
Physiologische Entspannung	Zusammenhang zwischen physiologischer Entspannung und Gesichtstemperatur	↑, Anstieg entgegen der Erwartungen	Zu kurze Messabstände verwendet
Symmetrie der Gesichtshälften	Abweichung an ausgewählten Punkten beider Gesichtshälften kleiner als 0,2 °C	Abweichungen an ROIs Wange und Augen nicht größer als 0,12 °C	Symmetrie liegt vor, weitere Verwendung dieser Feststellung in Emotionserkennung
Analyse der Regio Orbitalis	Eignung in technischer Hinsicht	Anwendung der IRT im <i>Affective Computing</i> mit positiver Resonanz	Weiterdenken in kommerzieller Hinsicht möglich
Emotionserkennung	Einfluss auf Gesichtstemperatur für Emotionseffekt	Einige Events führen zu sichtbarer Temp. Änderung	Prinzipiell möglich, aber Zuordnung verlangt stärkere Auslöser und Emotionen

Tabelle 4.4.: Ergebnisse aus den Anwendungsfällen

5. Schluss

In diesem letzten Teil der Arbeit werden die vorangegangenen Kapitel noch einmal vergewärtigt und zusammengefasst betrachtet. Dabei wird sowohl auf die Analyse sowie die im Rahmen der Arbeit durchgeführten und ausgewerteten Versuche eingegangen. Den Abschluss bildet ein Ausblick auf Möglichkeiten zu weiterer Forschung und Entwicklung, für die diese Arbeit eine Grundlage bilden könnte.

5.1. Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war es, mit Hilfe von Versuchen die Einflüsse auf, Verfahren mit und Analysemöglichkeiten von Thermografiedaten herauszufiltern und zu untersuchen. Dazu wurden mit Hilfe von unterschiedlichen Experimenten mit Probanden Anwendungsfälle generiert, die anschließend einer Analyse unterzogen wurden. Erarbeitet wurden diese Experimente aufgrund einer vorangegangenen Literaturrecherche. Diese hat ergeben, dass die Thermoregulation des menschlichen Körpers ein ständiger Regelkreis ist, der von einem Zentrum im Hypothalamus gesteuert und über verschiedenste Mechanismen reguliert werden kann. Diese Mechanismen wie etwa Schwitzen oder die Gefäßverengung und -erweiterung führen zu Wärmebildung und Wärmeabgabe, die wiederum in Form von Wärmeemission von einer Thermografiekamera erfasst werden kann. Um diese Wärmeregulierungen nachzuweisen und die Infrarotthermografie besser zu verstehen, haben verschiedene Vorversuche stattgefunden.

Die Wirkungsweise des Thermoregulationszentrums konnte etwa besonders aussagekräftig und anschaulich in dem Versuch gezeigt werden, bei dem ein Halogenstrahler Wärme im Gesicht produziert, was die Schweißbildung fördert, um dieser entstandenen Hitze entgegenzuwirken. Dieser Ablauf konnte mit der Thermografiekamera deutlich dokumentiert werden.

Wichtig war etwa auch der Beweis, dass im Gesicht thermische Symmetrie herrscht. Das ist eine Grundlage für den Anwendungsfall der Erkennung von emotionalen Veränderungen im Gesicht eines Nutzers bei den EmoBike-Versuchen aufgrund der veränderlichen Körperhaltung.

Im Zuge der Untersuchung der im EmoBike hervorgerufenen Emotionen hat sich gezeigt, dass eine Veränderung der Gesichtstemperatur nicht für jede Emotion und nicht für jeden

Auslöser einer Emotion sichtbar ist. Ein eindeutiges Ergebnis ist, dass ein Erschrecken zu einer kurzfristigen Senkung der Temperatur in der periorbitalen Region führt.

Bei diesem Anwendungsfall war es eine besondere Herausforderung, die in einem Bild hinterlegten Daten mittels ROI zu extrahieren, mit den Events im Spiel zu korrelieren und die Datenpunkte anschließend in Matlab weiterzuverarbeiten.

Für die Anwendung des gezeigten ShowCase, der Nutzern die Möglichkeiten von Thermografiekameras im Bereich des *affective computings* aufzeigen soll, wurden die vorhergehenden Versuche genutzt.

Der ShowCase hat das Interesse der Teilnehmer geweckt und vermittelt, dass dem menschlichen Gesicht weitaus mehr Informationen zu entnehmen sind, als es im visuellen Bild sichtbar ist. Dass hinter einem Falschfarbenbild, welches durch die Thermografiekamera produziert wird, auch Datenpunkte stehen, wurde vielen erst mit dieser Demonstration klar. Dieses Wissen öffnete bei vielen neue Perspektiven, nachdem klar wurde, dass man solcherlei Daten auch verarbeiten, analysieren und interpretieren kann.

5.2. Ausblick

Die bearbeitete Thematik bietet noch Potenzial für weitere Forschung, auch in den Projekten und Laboren der HAW Hamburg. Die generierten Daten und entwickelten Anwendungen stehen weiterhin zur Verfügung und können in Zukunft genutzt werden.

Um die Nutzung dieser Daten zu vertiefen, ist die Auswertung der Daten mit Hilfe eines *Machine-Learning-Algorithmus* ein interessanter Ansatz, der weiter untersucht werden könnte. Hierzu könnten *künstliche neuronale Netze* genutzt werden, um in den großen hochauflösenden Datensätzen sich wiederholende Muster zu erkennen. Dies kann auch für eine weitergehende Emotionserkennung von Vorteil sein, wenn ein System in Echtzeit auf bestimmte emotionale oder physische Zustände reagieren soll. Ebenfalls aus dem Bereich des *machine-learning* stammt das Extrahieren von aus einem Datensatz abgeleiteten Variablen (Merkmale), die sogenannte *feature extraction*. Mit solch einem merkmalsbasierten Ansatz könnten die Temperaturdaten auf das wesentliche Relevante reduziert und so eine Interpretation erleichtert werden. Beispielsweise könnten die in einem ROI angefallenen Datensätze direkt mit anderen Bildern verglichen werden, um mit Hilfe von *Machine-Learning-Algorithmen* den Unterschied automatisiert detektieren zu können.

Ein Aspekt, der das Forschungsthema ebenfalls erweitern kann, ist die Betrachtung der aufgezeichneten Daten mit Daten anderer Sensorik. Hautwiderstandswert, Innenohrtemperatur oder die Daten von am Körper angebrachten Biosensoren könnten in Korrelation zu den

Hauttemperaturwerten der Thermografiekamera untersucht werden. Ebenso könnten die Informationen in den Thermografiebildern um die Daten der anderen Sensorik erweitert werden, um so ein noch genaueres Bild des emotionalen oder physischen Zustands zeichnen zu können.

Da die Gesichtsthermografie ohne Betrachtung des technischen Ansatzes von rein menschlicher Thermoregulation und somit körperlichen Veränderungen geprägt ist, ist die *medizinische Informatik* oder auch *biomedizinische Informatik*, die den Ärzten mit automatisierten Analysen und Bereitstellung von Daten dienen soll, ein vielschichtiges Gebiet, auf welchem diese Technologie weiter vertieft und in der Praxis genutzt werden könnte. Das Generieren und Ausarbeiten von Thermografiedaten aus Thermografiebildern und das Erstellen von aussagekräftigen Resultaten für Mediziner ist ein Feld, in dem auch ein großes wirtschaftliches Potenzial steckt.

Neben diesen genannten Erweiterungen gibt es auch Anwendungsmöglichkeiten im Sicherheitsbereich. Die von der Firma Apple zum Entsperren von Smartphones entwickelte Technologie Face ID¹⁶, bei dem das Gesicht mit der Frontkamera des Smartphones erfasst und als persönliches Merkmal genutzt wird, um das Smartphone zu entsperren, ist eine von vielen Anwendern genutzte und von Tech-Medien gelobte Technologie. Sie hat nur einen Haken: Bei nicht ausreichender oder ohne Beleuchtung des Gesichts funktioniert Face ID nicht bzw. nicht zuverlässig. Hier könnte Thermosensorik zum Einsatz kommen, wie sie beispielsweise bereits in Smartphones der Firma Caterpillar¹⁷ zum Einsatz kommt, allerdings nicht für diesen Zweck. So wäre eine Thermal Face ID möglich, bei dem ein Nutzer sein Smartphone nur mit seinem thermischen Gesichtsabdruck entriegelt. Dieser Ansatz könnte auch das *affective computing* mit dem Smartphone als täglichem Begleiter um eine weitere Dimension, nämlich das Anreichern der physiologischen Daten mittels der ins Smartphone eingebetteten Thermografiekamera, erweitern.

¹⁶<https://support.apple.com/de-de/HT208108>

¹⁷https://www.catphones.com/en_gb/cat-s61-smartphone.html

A. Anlage 1

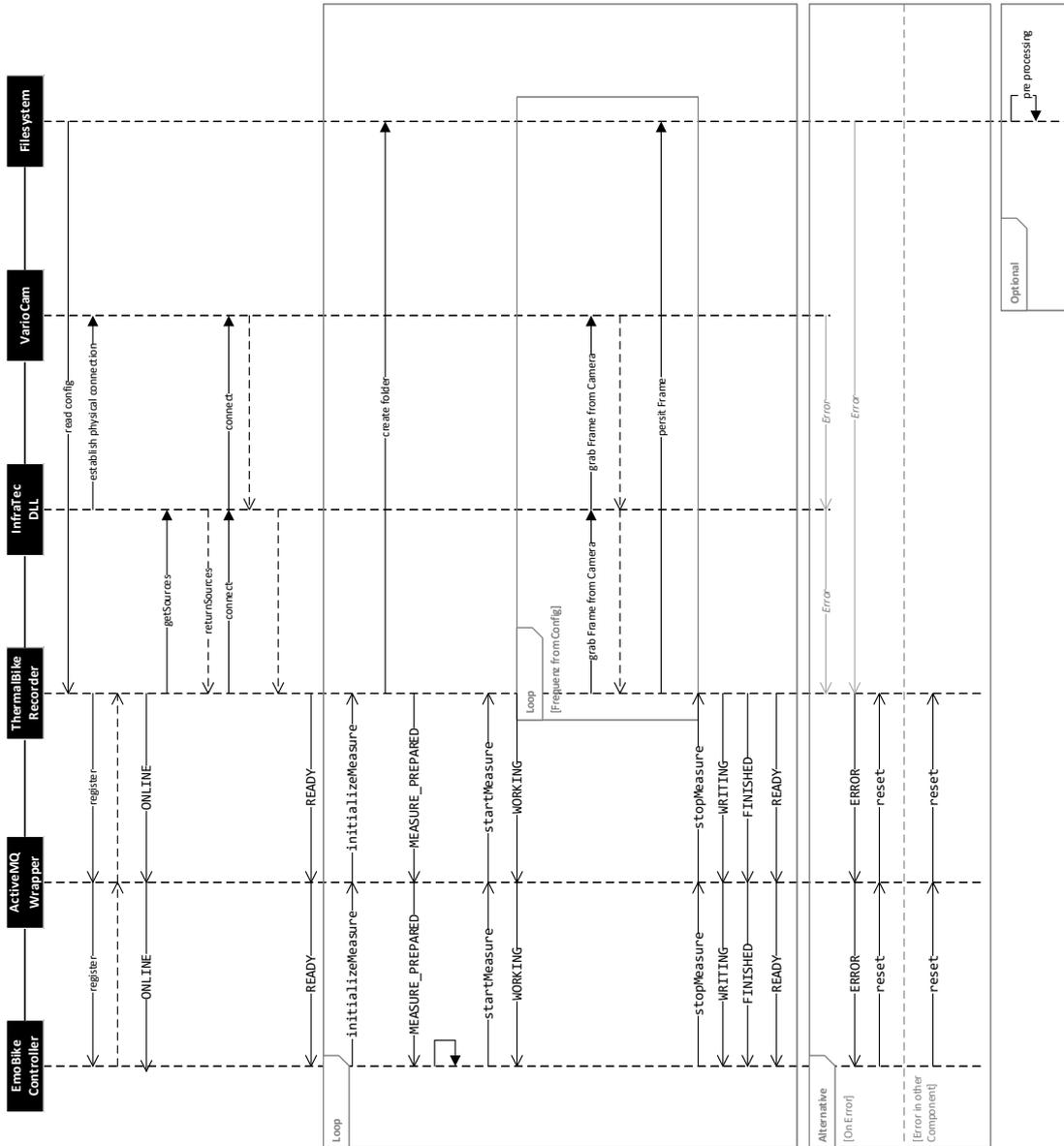
```
1 clear; close all; clc; rng(0);
2 %% Code
3 [num,txt,row] = xlsread('');
4
5 % - manual options
6 chooseEvent = 'spiderAttak';           % if empty, all events are shown
7 windowSize = 15;                       % for outlier detection
8 lambda = 0.5;                           % smoothing parameter, (straight
    line) 0 < lambda < 1 (no smoothing)
9
10 % - possible events
11 events.name = {'matchStarted';
12               'speedBoostTriggerEntered';
13               'visualBoostEntered';
14               'playerDied';
15               'sceneUnloaded';
16               'sceneLoaded';
17               'playerLanded';
18               'zombiesTriggered';
19               'coinCollected';
20               'zombieHit';
21               'matchFinished';
22               'floorChanged';
23               'spiderAttak';
24               'spiderCollision'};
25
26 % - extract the important stuff
27 header = txt(1,1:end-2);
28 if any(isnan(num(1,:)))
29     idx = 2;
30 else
31     idx = 1;
```

A. Anlage 1

```
32 end
33 time = num(idx:end,7);           % in seconds
34 r1max = num(idx:end,4);
35 tmp1 = raw(:,11); tmp2 = raw(:,13);
36 idx = cellfun(@isnan,tmp2,'uniformoutput',false);
37 idx = cellfun(@any,idx);
38 idx = find(idx==0);
39 tmp1 = tmp1(idx); tmp2 = tmp2(idx);
40 tmp2 = datevec(tmp2);
41 tmp2 = tmp2(:,4)*60+tmp2(:,5); % mins*60+secs
42 events.name = tmp1;
43 events.time = tmp2;
44
45 % - detect outliers & trigger events
46 idx = isoutlier(r1max,'movmean',windowsize);
47 outliers.index = idx;
48 outliers.time = time(idx);
49 outliers.value = r1max(idx);
50 if isempty(chooseEvent)
51     idx = 1:length(events.time);
52     events.legend = 'all_events';
53 else
54     idx = cellfun(@(s)strcmp(chooseEvent,s),events.name);
55     events.legend = chooseEvent;
56 end
57 events.index = idx;
58
59 % - smoothing w\o outliers
60 pp = csaps(time(~outliers.index),r1max(~outliers.index),lambda);
61     % cubic smoothing spline
62
63 % mean and standard deviation
64 m = mean(r1max);
65 s = std(r1max);
66
67 % - visualize
68 figure(1);
69 plot(time,ones(size(time))*[m m+2*s m-2*s],'k'); hold on; grid on;
70 plot(time,r1max,'b');
71 plot(time,ppval(pp,time),'black');
```

```
71 plot(outliers.time,outliers.value,'r+');
72 tmp = events.time(events.index);
73 for i = 1:length(tmp)
74     plot([tmp(i) tmp(i)],[-255 255],'color',[1 0.5 0]);
75 end
76 xlabel('time'); ylabel('value');
77 legend('\mu', '\mu+2\sigma', '\mu-2\sigma', 'raw_data', 'smoothed', '
    outliers',events.legend);
78 axis([-inf inf min(r1max)-std(r1max) max(r1max)+std(r1max)]);
```

B. Anlage 2



Literaturverzeichnis

- [DIN5030-2] DIN 5030-2:1982-09, Spektrale Strahlungsmessung; Strahler für spektrale Strahlungsmessungen; Auswahlkriterien.
- [Akhloufi und Bendada 2008] AKHLOUFI, M. ; BENDADA, A.: Thermal Faceprint: A New Thermal Face Signature Extraction for Infrared Face Recognition. In: *2008 Canadian Conference on Computer and Robot Vision*, May 2008, S. 269–272
- [Ammer und Ring 2012] AMMER, Kurt ; RING, E.F.J.: Standard Procedures For Infrared Imaging in Medicine. (2012), 10, S. 32.1–32.14. ISBN 978-1-4398-7249-9
- [Appel u. a. 2014] APPEL, V. C. R. ; BELINI, V. L. ; JONG, D. H. ; MAGALHÃES, D. V. ; CAURIN, G. A. P.: Classifying emotions in rehabilitation robotics based on facial skin temperature. In: *5th IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*, Aug 2014, S. 276–280. – ISSN 2155-1774
- [B BARNES 1963] B BARNES, R: Thermography of the human body. 140 (1963), 06, S. 870–7
- [Basu u. a. 2015] BASU, A. ; ROUSTRAY, A. ; SHIT, S. ; DEB, A. K.: Human emotion recognition from facial thermal image based on fused statistical feature and multi-class SVM. In: *2015 Annual IEEE India Conference (INDICON)*, Dec 2015, S. 1–5
- [Bernard u. a. 2013] BERNARD, V. ; STAFFA, E. ; MORNSTEIN, V. ; BOUREK, A.: Infrared camera assessment of skin surface temperature – Effect of emissivity. In: *Physica Medica* 29 (2013), Nr. 6, S. 583 – 591. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S112017971200186X>. – ISSN 1120-1797
- [Boccanfuso u. a. 2016] BOCCANFUSO, L. ; WANG, Q. ; LEITE, I. ; LI, B. ; TORRES, C. ; CHEN, L. ; SALOMONS, N. ; FOSTER, C. ; BARNEY, E. ; AHN, Y. A. ; SCASELLATI, B. ; SHIC, F.: A thermal emotion classifier for improved human-robot interaction. In: *2016 25th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*, Aug 2016, S. 718–723

- [Butler u. a. 1995] BUTLER, Neal R. ; BLACKWELL, Richard J. ; MURPHY, Robert ; SILVA, Raymond J. ; MARSHALL, Charles A.: Low-cost uncooled microbolometer imaging system for dual use. In: *Proc.SPIE* 2552 (1995), S. 2552 – 2552 – 9. – URL <https://doi.org/10.1117/12.218256>
- [Cardone und Merla 2014] CARDONE, D. ; MERLA, A.: The thermal dimension of psychophysiological and emotional responses revealed by thermal infrared imaging. In: *2014 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, Oct 2014, S. 1942–1946. – ISSN 1522-4880
- [Cease 2013] CEASE, Kevin: Illustration of the female face: vessels and nerves. URL <https://kevincease.myportfolio.com/anatomy-of-the-female-face>, 2013. – Forschungsbericht. Abbildung
- [Chamberlain u. a. 1995] CHAMBERLAIN, James M. ; TERNDROP, Thomas E. ; ALEXANDER, David T. ; SILVERSTONE, Felix A. ; WOLF-KLEIN, Gisele ; O'DONNELL, Regina ; GRANDNER, John: Determination of Normal Ear Temperature with an Infrared Emission Detection Thermometer. In: *Annals of Emergency Medicine* 25 (1995), Nr. 1, S. 15 – 20. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196064495703497>. – ISSN 0196-0644
- [Charkoudian 2003] CHARKOUDIAN, Nisha: Skin Blood Flow in Adult Human Thermoregulation: How It Works, When It Does Not, and Why. In: *Mayo Clinic Proceedings* 78 (2003), Nr. 5, S. 603 – 612. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025619611619307>. – ISSN 0025-6196
- [Christensen u. a. 2012] CHRISTENSEN, J ; VAETH, M ; WENZEL, A: Thermographic imaging of facial skin – gender differences and temperature changes over time in healthy subjects. In: *Dentomaxillofacial Radiology* 41 (2012), Nr. 8, S. 662–667. – URL <https://doi.org/10.1259/dmfr/55922484>. – PMID: 22554986
- [Ester und Sander 2000] ESTER, M. ; SANDER, J.: *Knowledge Discovery in Databases: Techniken und Anwendungen*. Springer Berlin Heidelberg, 2000. – URL <https://books.google.de/books?id=QNat6WM73Q8C>. – ISBN 9783540673286
- [Fernández-Cuevas u. a. 2015] FERNÁNDEZ-CUEVAS, Ismael ; MARINS, Joao Carlos B. ; LASTRAS, Javier A. ; CARMONA, Pedro María G. ; CANO, Sergio P. ; GARCÍA-CONCEPCIÓN, Miguel Ángel ; SILLERO-QUINTANA, Manuel: Classification of factors influencing the use of infrared thermography in humans: A review. In: *Infrared Physics and Technology* 71 (2015), S. 28

- 55. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350449515000523>. – ISSN 1350-4495
- [FLIR 2011] FLIR: *Thermografie-Handbuch für Bau-Anwendungen und erneuerbare Energien*. Berner Str. 81, 60437 Frankfurt am Main: FLIR (Veranst.), 2011. – URL http://www.datatec.de/shop/artikelpdf/th-build_d.pdf
- [Francisco J. Sanchez-Marin 2009] FRANCISCO J. SANCHEZ-MARIN, Carlos Villaseñor-Mora: Novel approach to assess the emissivity of the human skin. In: *Journal of Biomedical Optics* 14 (2009), S. 14 – 14 – 6. – URL <https://doi.org/10.1117/1.3086612>
- [Garagiola und Giani 1990] GARAGIOLA, Ubaldo ; GIANI, Ezio: Use of Telethermography in the Management of Sports Injuries. In: *Sports Medicine* 10 (1990), Oct, Nr. 4, S. 267–272. – URL <https://doi.org/10.2165/00007256-199010040-00005>. – ISSN 1179-2035
- [Giacinto u. a. 2014] GIACINTO, A. D. ; BRUNETTI, M. ; SEPEDE, G. ; FERRETTI, A. ; MERLA, A.: Thermal signature of fear conditioning in mild post traumatic stress disorder. In: *Neuroscience* 266 (2014), S. 216 – 223. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306452214001055>. – ISSN 0306-4522
- [Hardy und Du Bois 1940] HARDY, James D. ; DU BOIS, Eugene F.: Differences between Men and Women in Their Response to Heat and Cold. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 26 (1940), Nr. 6, S. 389–398. – URL <http://www.pnas.org/content/26/6/389>. – ISSN 0027-8424
- [Hughes u. a. 1984] HUGHES, John H. ; HENRY, Robert E. ; DALY, Michael J.: Influence of ethanol and ambient temperature on skin blood flow. In: *Annals of Emergency Medicine* 13 (1984), Nr. 8, S. 597 – 600. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196064484802826>. – ISSN 0196-0644
- [IACT 2002] IACT: Standards and Protocols in Clinical Thermographic Imaging. In: *International Academy of Clinical Thermology IACT* (2002), S. 1–10. – URL <http://www.breastthermography.com/articles/IACT%20Standards%20and%20Guidelines.pdf>
- [InfraTec 2004] INFRA TEC: *Einführung in Theorie und Praxis der Infrarot-Thermografie*. Gostritzer Straße 61 - 63, 01217 Dresden, Germany: InfraTec (Veranst.), 2004

- [InfraTec 2014] INFRA TEC: *Zugriff auf Echtzeit-Digitaldaten mit InfraTec-SDK*. Gostritzer Straße 61–63, 01217 Dresden, Germany: InfraTec (Veranst.), 2014
- [InfraTec 2015] INFRA TEC: *Benutzerhandbuch VarioCam HD*. Gostritzer Straße 61–63, 01217 Dresden, Germany: InfraTec (Veranst.), 2015
- [Ioannou u. a. 2014] IOANNOU, Stephanos ; GALLESE, Vittorio ; MERLA, Arcangelo: Thermal infrared imaging in psychophysiology: Potentialities and limits. In: *Psychophysiology* 51 (2014), Nr. 10, S. 951–963. – URL <http://dx.doi.org/10.1111/psyp.12243>. – ISSN 1469-8986
- [Johnson und Proppe 2010] JOHNSON, John M. ; PROPPE, Duane W.: *Cardiovascular Adjustments to Heat Stress*. In: *Comprehensive Physiology*, John Wiley & Sons, Inc., 2010. – URL <http://dx.doi.org/10.1002/cphy.cp040111>. – ISBN 9780470650714
- [Kletz 2017] KLETZ, Florian: *Thermografische Gesichtsanalyse mit einem multimodalen Kamerasystem*. Berliner Tor 5, 20099 Hamburg, HAW Hamburg, Diplomarbeit, 2017
- [Kletz und Kleimann 2016] KLETZ, Florian ; KLEIMANN, Jorin: Evaluierung von Lichtfeld- und Thermografiekameras im Human-computer interaction Kontext / Fakultät Technik und Informatik, Department Informatik, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg. Berliner Tor 7, 20099 Hamburg, 2016. – Forschungsbericht. – URL <http://users.informatik.haw-hamburg.de/~ubicomp/projekte/master2016-proj/kletz-kleimann.pdf>
- [Kletz und Kleimann 2017] KLETZ, Florian ; KLEIMANN, Jorin: Verwendung einer Thermografiekamera im Human-computer interaction Kontext / Fakultät Technik und Informatik, Department Informatik, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg. Berliner Tor 7, 20099 Hamburg, 2017. – Forschungsbericht. – URL <http://users.informatik.haw-hamburg.de/~ubicomp/projekte/master2017-proj/kletz-kleimann.pdf>
- [LeBlanc 1954] LEBLANC, Jacques: SUBCUTANEOUS FAT AND SKIN TEMPERATURE. In: *Canadian Journal of Biochemistry and Physiology* 32 (1954), Nr. 4, S. 354–358. – URL <https://doi.org/10.1139/o54-038>. – PMID: 13160839
- [Leonhardt und Walter 2016] LEONHARDT, S. ; WALTER, M.: *Medizintechnische Systeme: Physiologische Grundlagen, Gerätetechnik und automatisierte Therapieführung*. Springer Berlin Heidelberg, 2016. – URL <https://books.google.de/books?id=T9J6DAAAQBAJ>. – ISBN 9783642412394

- [M. Fayyad u. a. 1996] M. FAYYAD, Usama ; PIATETSKY-SHAPIRO, Gregory ; SMYTH, Padhraic: From Data Mining to Knowledge Discovery in Databases. 17 (1996), 03, S. 37–54
- [Mostafa u. a. 2013] MOSTAFA, E. ; FARAG, A. ; SHALABY, A. ; ALI, A. ; GAULT, T. ; MAHMOUD, A.: Long term facial parts tracking in thermal imaging for uncooperative emotion recognition. In: *2013 IEEE Sixth International Conference on Biometrics: Theory, Applications and Systems (BTAS)*, Sept 2013, S. 1–6
- [Mudau u. a. 2011] MUDAU, A. E. ; WILLERS, C. J. ; GRIFFITH, D. ; ROUX, F. P. J. le: Non-uniformity correction and bad pixel replacement on LWIR and MWIR images. In: *2011 Saudi International Electronics, Communications and Photonics Conference (SIECPC)*, April 2011, S. 1–5
- [Müller 2017] MÜLLER, Larissa: *Affective Computing in Controlled Exergame Environments*, University of the West of Scotland, Dissertation, 2017. – URL <http://users.informatik.haw-hamburg.de/~ubicomp/arbeiten/phd/mueller.pdf>
- [Nhan und Chau 2010] NHAN, B. R. ; CHAU, T.: Classifying Affective States Using Thermal Infrared Imaging of the Human Face. In: *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 57 (2010), April, Nr. 4, S. 979–987. – ISSN 0018-9294
- [Pandolf u. a. 1988] PANDOLF, K.B. ; SAWKA, M.N. ; GONZALEZ, R.R.: *Human Performance Physiology and Environmental Medicine at Terrestrial Extremes*. Brown & Benchmark Press, 1988. – URL <https://books.google.de/books?id=pDQQAQAAMAAJ>. – ISBN 9780936157184
- [Pappenheimer u. a. 1996] PAPPENHEIMER, J.R. ; FREGLY, M.J. ; BLATTIES, C.M. ; SOCIETY, American P.: *Handbook of Physiology: Environmental physiology*. Oxford University Press, 1996. – URL <https://books.google.de/books?id=5qUXAQAAlAAJ>. – ISBN 9780195074925
- [Pavlidis u. a. 2001] PAVLIDIS, I. ; LEVINE, J. ; BAUKOL, P.: Thermal image analysis for anxiety detection. In: *Proceedings 2001 International Conference on Image Processing (Cat. No.01CH37205)* Bd. 2, Oct 2001, S. 315–318 vol.2
- [Pollina u. a. 2006] POLLINA, Dean A. ; DOLLINS, Andrew B. ; SENTER, Stuart M. ; BROWN, Troy E. ; PAVLIDIS, Ioannis ; LEVINE, James A. ; RYAN, Andrew H.: Facial Skin Surface Temperature Changes During a “Concealed Information” Test. In: *Annals of Biomedical*

- Engineering* 34 (2006), Jul, Nr. 7, S. 1182–1189. – URL <https://doi.org/10.1007/s10439-006-9143-3>. – ISSN 1573-9686
- [Puri u. a. 2005] PURI, Colin ; OLSON, Leslie ; PAVLIDIS, Ioannis ; LEVINE, James ; STARREN, Justin: StressCam: Non-contact measurement of users' emotional states through thermal imaging. 2 (2005), 01, S. 1725–1728
- [Reinberg 1975] REINBERG, A: Circadian changes in the temperature of human beings. In: *Bibliotheca radiologica* (1975), Nr. 6, S. 128–139. – URL <http://europepmc.org/abstract/MED/1101884>. – ISSN 0067-8155
- [S. und H.] S., Bornmyr ; H., Svensson: Thermography and laser-Doppler flowmetry for monitoring changes in finger skin blood flow upon cigarette smoking. In: *Clinical Physiology* 11, Nr. 2, S. 135–141. – URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1475-097X.1991.tb00106.x>
- [Schuster und Kolobrodov 2004] SCHUSTER, N. ; KOLOBRODOV, V.G.: *Infrarotthermographie*. Wiley-VCH Verlag GmbH, 2004. – URL <https://books.google.de/books?id=dRUUmGOWLskC>. – ISBN 9783527405091
- [Skitzki u. a. 2007] SKITZKI, Joseph J. ; CHEN, Qing ; WANG, W. C. ; EVANS, Sharon S.: Primary immune surveillance: some like it hot. In: *Journal of Molecular Medicine* 85 (2007), Dec, Nr. 12, S. 1361–1367. – URL <https://doi.org/10.1007/s00109-007-0245-7>. – ISSN 1432-1440
- [Speakman und Ward 1998] SPEAKMAN, JR ; WARD, S: Infrared thermography: principles and applications. In: *ZOOLOGY-JENA*- 101 (1998), S. 224–232
- [Spyra 2010] SPYRA, Peer S.: *Einsatz der kontaktfreien Infrarotthermographie zum Nachweis von Veränderungen der Hauttemperatur bei Interventioneller Schmerztherapie am sympathischen Nervensystem*. Von-Melle-Park 3, 20146 Hamburg, Universität Hamburg, Dissertation, 2010. – URL <http://ediss.sub.uni-hamburg.de/volltexte/2010/4916>
- [Stemberger u. a. 2010] STEMBERGER, J. ; ALLISON, R. S. ; SCHNELL, T.: Thermal Imaging as a Way to Classify Cognitive Workload. In: *2010 Canadian Conference on Computer and Robot Vision*, May 2010, S. 231–238

- [Szeliski 2010] SZELISKI, R.: *Computer Vision: Algorithms and Applications*. Springer London, 2010 (Texts in Computer Science). – URL <https://books.google.de/books?id=bXzAlkODwa8C>. – ISBN 9781848829350
- [Takahashi u. a. 2015] TAKAHASHI, T. ; WU, B. ; KAGEYAMA, Y. ; NISHIDA, M. ; ISHII, M.: A study of learning data size for automatic face area detection in sequential thermal images. In: *2015 IEEE 4th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)*, Oct 2015, S. 412–413
- [Uematsu u. a. 1988] UEMATSU, Sumio ; EDWIN, David H. ; JANKEL, William R. ; KOZIKOWSKI, Joseph ; TRATTNER, Michael: Quantification of thermal asymmetry. In: *Journal of Neurosurgery* 69 (1988), Nr. 4, S. 552–555. – URL <https://doi.org/10.3171/jns.1988.69.4.0552>. – PMID: 3418388
- [Vainer 2001] VAINER, Boris G.: Treated-skin temperature regularities revealed by IR thermography, URL <https://doi.org/10.1117/12.421027>, 2001, S. 4360 – 4360 – 12
- [Zalpour und Augustin 2006] ZALPOUR, C. ; AUGUSTIN, M.: *Für die Physiotherapie: Anatomie Physiologie: Lehrbuch für Physiotherapeuten, Masseur, medizinische Bademeister und Sportwissenschaftler*. Elsevier, Urban & Fischer, 2006 (Für die Physiotherapie). – URL <https://books.google.de/books?id=wxSDgmRrovMC>. – ISBN 9783437453014
- [Zaproudina u. a. 2008] ZAPROUDINA, Nina ; VARMAVUO, Ville ; AIRAKSINEN, Olavi ; NÄRHI, Matti: Reproducibility of infrared thermography measurements in healthy individuals. In: *Physiological Measurement* 29 (2008), Nr. 4, S. 515. – URL <http://stacks.iop.org/0967-3334/29/i=4/a=007>

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe.

Hamburg, 31. August 2018

Jorin Kleimann