



**HOCHSCHULE OSNABRÜCK**

UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

**Fakultät**

**Ingenieurwissenschaften und Informatik**

# Bachelorarbeit

## **Thermorezeption in der virtuellen Realität**

**Aufbau und Evaluation eines Peltier-basierten Prototypen  
zur Temperatursteuerung auf der Haut**

**Autor** Tim Dierks

**Matrikelnummer** 624740

**Erstprüfer** Prof. Dr. Philipp Lensing

**Zweitprüfer** Prof. Dr. Jürgen Wübbelmann

**Ausgabedatum** 28.11.2016

**Abgabedatum** 20.02.2017

---

## Kurzfassung

Um virtuelle Realität möglichst realistisch wirken zu lassen, werden unterschiedlichste Technologien eingesetzt, um die Sinne des Nutzers zu täuschen. Die visuelle und auditive Wahrnehmung sind grundlegende Bestandteile der virtuellen Realität, jedoch wird immer häufiger versucht, auch andere Sinne zu integrieren, um einen höheren Grad an Realismus zu erzeugen. In diesem Projekt wird die virtuelle Realität um die Thermorezeption erweitert und im Zuge dessen versucht, eine Tendenz für die Hypothese: „*Das Erweitern der virtuellen Realität um die taktile Wahrnehmung in Form von Temperatur steigert das Gefühl der Präsenz.*“ zu finden.

Um dieses Ziel zu erreichen, wurde ein Peltier-basierter Prototyp entwickelt, der Wärme sowie Kälte an sechs Körperstellen generiert. Die erzeugten Temperaturen korrespondieren mit den Aktionen des Nutzers und kann sich auf Grund von Positionsveränderung und unterschiedlichen Situationen in der virtuellen Umgebung dynamisch anpassen. Für den Prototypen wurde eine Schnittstelle zu *Unity* implementiert, diese berechnet die Position der Körperstellen in der virtuellen Umgebung. Für die Evaluation der für dieses Projekt am besten geeigneten Körperstellen wurde eine Versuchsreihe mit Testpersonen durchgeführt.

## Abstract

To produce a realistic virtual reality experience, the users perception needs to be deceived. This can be done with a range of different technologies. The basic senses that are covered in virtual reality are the visual and auditory perception, but many projects try to integrate more senses to generate a higher degree of realism. This project adds thermoreception to virtual reality and tries to find a tendency for the hypothesis: “*The implementation of tactile perception in the form of temperature raises the sense of presence in virtual reality.*”

To achieve this goal a peltier-based prototype, that generates heat and cold at six different parts of the body was constructed. The produced temperatures correspond to the users actions and reacts dynamically to a change of position and different situations that occur in the virtual environment. An interface was implemented, that connects the prototype with *Unity*, where the positions of the body parts in the virtual environment are calculated. To evaluate which body parts are best suited for this project, a series of experiments with test subjects was conducted.

---

# Inhaltsverzeichnis

|  |             |
|--|-------------|
| <b>I Abbildungsverzeichnis</b>                               | <b>V</b>    |
| <b>II Tabellenverzeichnis</b>                                | <b>VII</b>  |
| <b>III Listingverzeichnis</b>                                | <b>VIII</b> |
| <b>IV Abkürzungsverzeichnis</b>                              | <b>IX</b>   |
| <b>V Glossar</b>   | <b>X</b>    |
| <b>1 Einleitung</b>  | <b>1</b>    |
| 1.1 Motivation . . . . .                                     | 1           |
| 1.2 Zielsetzung . . . . .                                    | 1           |
| 1.3 Aufbau der Arbeit . . . . .                              | 3           |
| <b>2 Grundlagen</b>  | <b>5</b>    |
| 2.1 Virtual Reality . . . . .                                | 5           |
| 2.1.1 Präsenz, Telepräsenz und Immersion in VR . . . . .     | 5           |
| 2.1.2 Entwicklung von VR . . . . .                           | 6           |
| 2.1.3 HTC Vive . . . . .                                     | 7           |
| 2.2 Evaluationsmethoden . . . . .                            | 8           |
| 2.3 Unity . . . . .  | 9           |
| 2.4 Arduino / Genuino . . . . .                              | 10          |
| 2.5 Thermorezeption . . . . .                                | 11          |
| 2.6 Thermal Grill Illusion . . . . .                         | 13          |
| 2.7 Peltier-Effekt . . . . .                                 | 14          |
| 2.8 Inverse Kinematik . . . . .                              | 15          |
| <b>3 Verwandte Arbeiten</b>                                  | <b>19</b>   |
| 3.1 <i>Virtual Hell: A Trip Through the Flames</i> . . . . . | 19          |
| 3.2 <i>AxonVR</i> . . . . .                                  | 20          |
| 3.3 <i>Senso Glove</i> . . . . .                             | 20          |
| 3.4 <i>FlAim Trainer</i> . . . . .                           | 21          |
| <b>4 Der Peltier-basierte Prototyp</b>                       | <b>22</b>   |
| 4.1 Anforderungsanalyse für den Prototypen . . . . .         | 22          |
| 4.1.1 Pflichtkriterien . . . . .                             | 22          |

---

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 4.1.2    | Wunschkriterien . . . . .   | 23        |
| 4.2      | Aufbau des Prototypen . . . . .   | 23        |
| 4.2.1    | Konzeption . . . . .  | 23        |
| 4.2.2    | Ausarbeitung der Schaltung . . . . .                                      | 27        |
| 4.2.3    | Ausarbeitung der Platine . . . . .  | 28        |
| <b>5</b> | <b>Steuerprogramm des Mikrocontrollers</b>                                | <b>32</b> |
| 5.1      | Anforderungsanalyse für das Steuerprogramm . . . . .                      | 32        |
| 5.1.1    | Pflichtkriterien . . . . .  | 32        |
| 5.1.2    | Wunschkriterien . . . . .   | 32        |
| 5.2      | Konzeption des Steuerprogramms . . . . .                                  | 33        |
| 5.3      | Implementierung des Steuerprogramms . . . . .                             | 38        |
| 5.3.1    | Leseblock . . . . .   | 38        |
| 5.3.2    | Timerblock . . . . .  | 38        |
| <b>6</b> | <b>Validierung der Thermorezeptionszonen</b>                              | <b>40</b> |
| 6.1      | Anforderungsanalyse für die Thermorezeptionszonen . . . . .               | 40        |
| 6.1.1    | Pflichtkriterien . . . . .  | 40        |
| 6.1.2    | Wunschkriterien . . . . .   | 40        |
| 6.2      | Ausarbeitung potenzieller Thermorezeptionszonen . . . . .                 | 41        |
| 6.3      | Ausarbeitung des Versuchsaufbaus . . . . .                                | 43        |
| 6.4      | Versuchsdurchführung . . . . .  | 44        |
| 6.5      | Auswertung der Versuchsergebnisse . . . . .                               | 44        |
| 6.6      | Bestimmung der Thermorezeptionszonen . . . . .                            | 46        |
| <b>7</b> | <b>Unity Programm</b>   | <b>48</b> |
| 7.1      | Verbindungsskript von Unity zum Peltier-basierten<br>Prototypen . . . . . | 49        |
| 7.1.1    | Anforderungsanalyse für das Verbindungsskript . . . . .                   | 49        |
| 7.1.2    | Konzeption des Verbindungsskripts . . . . .                               | 50        |
| 7.1.3    | Implementierung des Verbindungsskripts . . . . .                          | 52        |
| 7.2      | Positionsberechnung der Peltier-Module zur Laufzeit . . . . .             | 54        |
| 7.2.1    | Anforderungsanalyse für die Positionsberechnung . . . . .                 | 54        |
| 7.2.2    | Konzeption der Positionsberechnung . . . . .                              | 55        |
| 7.2.3    | Implementierung des Positionsskriptes . . . . .                           | 56        |
| 7.2.4    | Implementierung des Inverse Kinematik (IK)-Skriptes . . . . .             | 56        |
| 7.2.5    | Implementierung des Berechnungsskriptes . . . . .                         | 57        |

---

---

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>8</b> | <b>Ergebnisse und Ausblick</b>                        | <b>59</b> |
| 8.1      | Ergebnisse . . . . .                                  | 59        |
| 8.2      | Ausblick . . . . .                                    | 60        |
| 8.3      | Fazit . . . . .                                       | 61        |
| <b>A</b> | <b>Referenzen</b>                                     | <b>62</b> |
| <b>B</b> | <b>Dokumente der Thermorezeptionszonen-Evaluation</b> | <b>70</b> |
| B.1      | Bewertungsskalen der Versuchsfragen . . . . .         | 70        |
| B.2      | Zusatzdaten und Diagramme der Auswertung . . . . .    | 71        |
| <b>C</b> | <b>Bilder der Entwicklung des Prototypen</b>          | <b>74</b> |
| <b>D</b> | <b>Inhalte der CD</b>                                 | <b>76</b> |

# I Abbildungsverzeichnis

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Abb. 1.1  | Visualisierung der Anwendung des Projektergebnis. . . . .   | 2  |
| Abb. 2.1  | Aufbau der Komponenten des “Sword of Damocles”. . . . .   | 6  |
| Abb. 2.2  | Room-Scale der <i>HTC Vive</i> . . . . .  | 7  |
| Abb. 2.3  | Unipolare Skala für die Bewertung einer Veranstaltung nach Schulnoten.  | 9  |
| Abb. 2.4  | Bipolare Skala für die Einstufung erlebter Temperatur. . . . .  | 9  |
| Abb. 2.5  | Aussehen und Aufbau des <i>MKR1000</i> mit den PWM-Pins hervorgehoben.  | 11 |
| Abb. 2.6  | Impulsfrequenz von Wärme- sowie Kälterezeptoren bei konstanter und plötzlicher verändernder Hauttemperatur. . . . .                                     | 12 |
| Abb. 2.7  | Visualisierung des Versuchsaufbaus für die TGI. . . . .   | 14 |
| Abb. 2.8  | Prinzip eines Thermopaars, das den Peltier-Effekt ausnutzt. . . . .   | 15 |
| Abb. 2.9  | Demonstration der grundlegenden Funktionsweise von IK. . . . .  | 16 |
| Abb. 2.10 | Demonstration von Constraints. . . . .  | 16 |
| Abb. 2.11 | Demonstration des FABRIK-Algorithmus. . . . .   | 17 |
| Abb. 3.1  | Aufbau des verwendeten Systems. . . . .   | 19 |
| Abb. 3.2  | 3D gerendertes Bild des AxonVR-Anzug. . . . .   | 20 |
| Abb. 3.3  | <i>FLAim Trainer</i> , ein Simulator für Feuerwehrmänner. . . . .   | 21 |
| Abb. 4.1  | Peltier-Module mit Visualisierung der warmen und kalten Seite. . . . .  | 23 |
| Abb. 4.2  | Peltier-basierter Prototyp. . . . .   | 24 |
| Abb. 4.3  | Schachtel für die Platine und Riemen für die Befestigung am Körper. . . . .   | 25 |
| Abb. 4.4  | Übersicht der Befestigung des Prototypen. . . . .   | 26 |
| Abb. 4.5  | Befestigung des Prototypen am Arm. . . . .  | 26 |
| Abb. 4.6  | Schaltplan des Prototypen. . . . .  | 27 |
| Abb. 4.7  | Die fertige geätzte und verlötete Platine. . . . .  | 29 |
| Abb. 4.8  | Layout der Platine des Prototypen, obere Schicht. Der gelbe Bereich sind die Laststromleitungen und der grüne Bereich sind die Steuerleitungen. . . . . | 30 |
| Abb. 4.9  | Layout der Platine des Prototypen, untere Schicht. . . . .  | 31 |
| Abb. 6.1  | Mögliche Thermorezeptionszonen und ihre Positionierung auf dem Körper. . . . .  | 42 |
| Abb. 6.2  | Fragenkatalog für die Versuchsreihe zur Evaluation der Thermorezeptionszonen. . . . .   | 43 |
| Abb. 6.3  | Vergleich der Temperaturwahrnehmung an den Körperstellen aller Probanden. . . . .   | 45 |
| Abb. 6.4  | Graph der Reaktionszeit der Körperstellen auf Wärme und Kälte. . . . .  | 45 |
| Abb. 6.5  | Graph zur Bewertung des gespürten Schmerzes der TGI. . . . .  | 46 |

|          |  |    |
|----------|--|----|
| Abb. 6.6 | Bereichsmarkierung der Thermorezeptionszonen in Front- und Rückansicht. . . . .  | 47 |
| Abb. 7.1 | Komponentendiagramm für die Schnittstellen des Projektes, mit farblicher Bereichsabgrenzung der Projektbausteine. . . . .                        | 48 |
| Abb. 7.2 | Mögliche Überschneidung von zwei Temperaturerzeugern. . . . .  | 50 |
| Abb. 7.3 | Klassendiagramm des Verbindungsskript und dazugehöriger Hilfsklasse. . . . .   | 50 |
| Abb. 7.4 | Sequenzdiagramm des Verbindungsskripts und dazugehöriger Hilfsklasse. . . . .  | 51 |
| Abb. 7.5 | Beispiel der Berechnung der Durchschnittstemperatur eines Peltier-Modul. . . . .   | 53 |
| Abb. 7.6 | <code>ArduinoConnectionController</code> im Inspektor von <i>Unity</i> , mit den Variablen für die Einstellung der maximalen Temperatur. . . . . | 53 |
| Abb. 7.7 | Klassendiagramm des Positionsberechnungsmoduls. . . . .  | 55 |
| Abb. 7.8 | IK mit Grundobjekten von <i>Unity</i> , ohne Anpassung für Peltier-Module. . . . .   | 56 |
| Abb. 7.9 | Darstellung der Peltier-Module an ihren berechneten Positionen. . . . .  | 58 |
| Abb. B.1 | Skalen der Versuchsfragen. . . . .   | 70 |
| Abb. B.2 | Gesamtübersicht der Daten in Zahlen. . . . .   | 71 |
| Abb. B.3 | Graph für die subjektive Gesamtbewertung der Körperstellen. . . . .  | 71 |
| Abb. B.4 | Auflistung aller Antworten der Testpersonen (1/2). . . . .   | 72 |
| Abb. B.5 | Auflistung aller Antworten der Testpersonen (2/2). . . . .   | 73 |
| Abb. C.1 | Platine des Prototypen Version 1. . . . .  | 74 |
| Abb. C.2 | Platine des Prototypen Version 2. . . . .  | 74 |
| Abb. C.3 | Platine des Prototypen Version 3. . . . .  | 75 |
| Abb. C.4 | 3D-druck der Schachtel des Prototypen. . . . .   | 75 |

## II Tabellenverzeichnis

|          |   |    |
|----------|---|----|
| Tab. 2.1 | Aufteilung der Thermorezeptoren an unterschiedlichen Körperregionen.              | 13 |
| Tab. 4.1 | Auflistung der verwendeten Bauteile mit wichtigen Schlüsselinformationen. . . . . | 28 |
| Tab. 5.1 | Auflistung der Protokollbefehle. . . . .  | 34 |
| Tab. 5.2 | Zuordnung der Körperstellen zu Buchstaben und den passenden Pins. . . . .         | 34 |
| Tab. 5.3 | Liste der einstellbaren Konstanten. . . . .                                       | 37 |
| Tab. 6.1 | Körperstellen, die als Thermorezeptionszone dienen können. . . . .                | 41 |
| Tab. D.1 | Inhalte der CD . . . . .  | 76 |

## III Listingverzeichnis

### Listings

|   |   |    |
|---|---|----|
| 1 | main loop . . . . .   | 35 |
| 2 | Struct Definition. . . . .  | 35 |
| 3 | Aufbau des Timers . . . . .   | 38 |
| 4 | Verwendete Enumerationen zur Bestimmung der richtigen Pins. . . . .       | 51 |
| 5 | Berechnung von Rotation und Position der Unterarme. . . . .               | 57 |
| 6 | Berechnung von Rotation und Position der Peltier-Module am Torso. . . . . | 58 |

## IV Abkürzungsverzeichnis

**A** Ampere

**AR** Augmented Reality (Augemtierte Realität)

**DC** Direct Current (Gleichspannung)

**FABRIK** Forward And Backward Reaching Inverse Kinematics

**FOV** Field of View (Sichtfeld/Sichtbereich)

**FPS** Frames per second (Bilder pro Sekunde)

**GND** Ground (Erdung/Masse)

**HMD** Head Mounted Display (am Kopf befestigte Anzeige)

**IDE** Integrated development environment (integrierte Entwicklungsumgebung)

**IK** Inverse Kinematik

**mm** Millimeter

**MOSFET** Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor

**PWM** Pulse Width Modulation (Pulsweitenmodulation)

**SoC** System on Chip (Ein-Chip-System)

**TGI** Thermal Grill Illusion

**V** Volt

**VE** Virtual Environment (Virtuelle Umgebung)

**VR** Virtual Reality (Virtuelle Realität)

**W** Watt

**WLAN** Wireless Local Area Network (drahtloses lokales Netzwerk)

# V Glossar

## Augmented Reality

Augmented Reality ist eine Technologie die computergenerierte Grafik in das Blickfeld eines Benutzers einblendet.

## Collider

Ein Collider in *Unity* definiert die Form eines Objektes in einer VE, um physikalische Kollisionen zu erkennen. Diese sind meistens stark vereinfacht im Vergleich zu den Modellen die sie repräsentieren, um Berechnungsaufwand niedrig zu halten.

## Computer-Mensch-Interface

Ein Computer-Mensch-Interface ist eine Schnittstelle, die es einem Benutzer ermöglicht mit einem Computer zu interagieren. Dabei handelt es sich in den meisten Fällen um eine Maus, Tastatur oder einen Bildschirm.

## Handshake

Ein Handshake ist ein Verfahren um einen Verbindungsauflauf zwischen zwei Systemen zu verifizieren. Dabei wird von einem System eine Anfrage gestellt, die vom anderen beantwortet wird. Dadurch wird sicher gestellt, dass zum einen eine Verbindung besteht und zum anderen das richtige System angesprochen wurde.

## Head-Tracking

Head-Tracking bezeichnet ein Verfahren zur Erfassung der Position und Rotation des Kopfes.

## Immersion

Immersion beschreibt, in welchem Ausmaß ein Computer-Mensch-Interface die menschlichen Sinne täuschen kann.

## Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor

Ein MOSFET ist ein Feldeffekttransistor, der über eine Steuerleitung, auch Gate bezeichnet, einen Laststrom schalten kann. Der Laststrom liegt am Source an und fließt über Drain ab, sobald der MOSFET geöffnet ist.

## Motion-Controller

Ein Motion-Controller ist ein Eingabegerät für die *HTC Vive*. Die Position dieser Controller kann im Room-Scale getrackt und auf eine VE korrekt übertragen werden.

**Peltier-Effekt**

Der Peltier-Effekt beschreibt, dass wenn ein Strom durch unterschiedlich dotierte, hintereinanderliegende Halbleiter fließt, Wärme auf einer der Kontaktseiten und Kälte auf der anderen entsteht.

**Peltier-Element**

Ein elektrothermisches Bauelement, das den Peltier-Effekt nutzt, um hohe und niedrige Temperatur zu erzeugen.

**Peltier-Modul**

Ein Peltier-Modul besteht aus zwei Peltier-Elementen, die an einem Kühlkörper mit Wärmeleitkleber befestigt sind. Dabei wird eines der Peltier-Elemente kalt und das andere warm. Ein Peltier-Modul ist in Abbildung 4.1 dargestellt.

**Prefab**

Ein Prefab in *Unity* ist eine Sicherung eines Objektes, in der alle Einstellungen gespeichert werden.

**Präsenz**

Mit Präsenz wird das Gefühl beschrieben, wie sehr eine Person davon überzeugt ist, dass sie an einem bestimmten Ort ist. Sie steht für eine bewusst wahrgenommene Gegenwärtigkeit [Dud14].

**Room-Scale**

Das Verfahren um die Position von Objekten, die mit bestimmten Sensoren ausgestattet sind, in einem Raum zu tracken.

**Telepräsenz**

Mit Telepräsenz wird, im Gegensatz zur normalen Präsenz, das durch Technologien erzeugte Gefühl an einem anderen Ort zu sein beschrieben. Dies kann von einer Videokonferenz bis hin zu VE reichen [Ste92].

**Thermorezeption**

Als Thermorezeption wird der Temperatursinn von Lebewesen bezeichnet. Durch Rezeptoren unter der Haut werden Nervenimpulse bei der Wahrnehmung von Temperatur an das Gehirn gesendet und dort verarbeitet.

**Thermorezeptionszone**

Eine Stelle am Körper, an der Peltier-Module angebracht werden. Dafür muss die Körperfeste besonders gut für die Wahrnehmung von Temperatur geeignet sein und weitere Kriterien erfüllen. In Kapitel 6 wird dies genauer beschrieben.

**Virtual Reality**

”Eine Virtual Reality ist als eine reale oder simulierte Umgebung definiert, in der ein Benutzer die Telepräsenz wahrnimmt“ [Ste92].

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Der Mensch war schon immer fasziniert von fantastischen Welten und Szenarien. In eine Geschichte einzutauchen und sich vorzustellen an einem anderen Ort und Geschehen zu sein, ist ein wichtiger Bestandteil fast aller Unterhaltungsmedien. Mit Virtual Reality (Virtuelle Realität) (VR) wird auf dieses menschliche Verlangen intensiver eingegangen. Der Grundgedanke von VR ist eine bestmögliche Immersion für eine Virtual Environment (Virtuelle Umgebung) (VE) zu erzeugen. Die neuesten auf dem Markt erhältlichen Head Mounted Displays (am Kopf befestigte Anzeige) versuchen über ein großes Field of View (Sichtfeld/Sichtbereich) (FOV), hohe Auflösung und Interaktivität in Form von Head-Tracking und Motion-Controllern ein möglichst allumfassendes Erlebnis zu schaffen.

An diesem Punkt stellt sich die Frage, in welchen Bereichen ein VR-Erlebnis verbessert werden kann, um dem Benutzer eine noch intensivere Erfahrung zu bringen. Offensichtliche Bereiche wie das visuelle, auditive oder eine natürlichere Interaktionsmöglichkeit mit der VE sind bereits abgedeckt. Jedoch gibt es weitere Sinne die integriert werden können. Darunter fällt die Thermorezeption, die in diesem Projekt mit der VR verbunden wird. Viele Szenarien könnten davon profitieren, wenn der Benutzer die Temperatur der Szene auf der Haut spüren kann. Zum Beispiel wenn der Benutzer von einem schattigen Platz in die Mittagssonne geht und die Wärme der Sonnenstrahlen auf seiner Haut spürt, oder wenn er durch eine Eislandschaft wandert und sich an einem Lagerfeuer wärmen muss. Thermorezeption kann nicht nur dafür genutzt werden um den Realismus in einer Szene zu erhöhen, sondern auch um eine bestimmte Stimmung eines Szenarios zu verstärken. Wenn sich der Benutzer z. B. in einem verlassenen Haus befindet und plötzlich läuft ihm wortwörtlich ein kalter Schauer über den Rücken der ihm Gefahr signalisiert oder er ist in einer zeitkritischen Situation und zur Unterstützung der Dringlichkeit wird ihm immer wärmer, je mehr Zeit vergeht, um den erzeugten Stress zu verstärken.

Über diese Beispiele hinaus gibt es noch viele weitere Anwendungsmöglichkeiten auch für Projekte außerhalb von Unterhaltungsmedien. Der Einsatz in einer Trainingssimulation für Feuerwehrmänner ist eine bereits umgesetzte Möglichkeit [UPL17]. Die Integration von Thermorezeption ist wenig in der Entwicklung von VR vertreten.

## 1.2 Zielsetzung

Dieses Bachelorprojekt entsteht in Zusammenarbeit mit Herrn Nicolas Kahrl an der *Hochschule Osnabrück* und erforscht die Hypothese:

„Das Erweitern der virtuellen Realität um die taktile Wahrnehmung in Form von Temperatur steigert das Gefühl der Präsenz.“

Um eine Tendenz einer Verifizierung der Hypothese herauszuarbeiten, wird ein Prototyp für Thermorezeption in VR entwickelt. Dieser soll aus einem Peltier-basierten Hardware-Prototypen bestehen, der mit der *HTC Vive* verwendet werden kann. Der Prototyp soll an den Körper des Benutzers angebracht werden und sechs Körperstellen temperieren können. Die Steuerung soll auf der Hardware-Seite von einem Mikrocontroller übernommen werden, der eine Schnittstelle zu *Unity* benötigt. In *Unity* wird die Positions- und Temperaturberechnungen in Zusammenhang mit der VE stattfinden. Darüber hinaus wird die entstandene Software als Unity Plugin angeboten, um Entwicklern zu ermöglichen, die Hardware einfach in VR-Anwendungen zu integrieren. Tests sollen den Prototypen evaluieren, um eine Verbesserung der Immersion und damit eine Steigerung der Telepräsenz zu erkennen. Eine beispielhafte Darstellung für die Anwendung des möglichen Ergebnis ist in Abbildung 1.1 zu erkennen.



Abbildung 1.1: Visualisierung der Anwendung des Projektergebnis.

Dieses Projekt lässt sich dabei logisch in zwei Bereiche aufteilen. Zum einen die Hardware-Seite, die aus dem Peltier-basierten Prototypen, dem Steuerprogramm für den Mikrocontroller, der Schnittstelle für die Datenübertragung innerhalb von Unity, der Positions berechnung der Peltier-Elemente und der Evaluation der Körperstellen, an denen die Peltier-Elemente angebracht werden, besteht. Zum anderen die Software-Seite des Projektes, bestehend aus dem Interface für das Unity Plugin, der dynamischen Temperaturberechnung während der Laufzeit und den Tests für die Evaluation des Prototypen sowie der Anfertigung der dafür verwendeten Testszenen. Der erstgenannte Teil wird in dieser Bachelorarbeit abgedeckt und behandelt. Der zweite Teil wird von Herrn Nicolas Kahrl in der Bachelorarbeit mit dem Titel *Thermorezeption in der virtuellen Realität - Entwicklung und Evaluation eines Systems zur Steuerung eines Peltier-basierten Prototypen für die Verbesserung des Präsenzgefühls* dargelegt [Kah17].

## 1.3 Aufbau der Arbeit

Diese Arbeit besteht aus acht Kapiteln. Im zweiten Kapitel werden für dieses Projekt grundlegende Themenbereiche behandelt. Darunter fallen integrale Soft- und Hardware, die verwendet wurde, sowie bestimmte Techniken oder Sachverhalte die zu einem besseren Verständnis beitragen.

Das dritte Kapitel beschäftigt sich mit verwandten Arbeiten, die sich in der Vergangenheit damit beschäftigt haben, Temperatur und VR zu verbinden. Dabei werden die Vorgehensweisen kurz erläutert und eine klare Abgrenzung zu diesen Projekten vorgenommen.

In Kapitel 4 wird die Konzeption des Peltier-basierten Prototypen beschrieben. Es wird erläutert, welche Funktionen er aufweisen muss, was im Rahmen dieses Projektes machbar ist und wie diese Anforderungen realisiert wurden.

In Kapitel 5 werden die Anforderungen und Sicherheitsmaßnahmen des entwickelten Mikrocontroller-Programms analysiert und anschließend dessen Implementierung erläutert.

Kapitel 6 führt alle wichtigen Aspekte für die Auswahl der sechs Körperstellen auf. Diese werden als Thermorezeptionszone für den entwickelten Prototypen benötigt. Weiterhin wird der Aufbau der durchgeführten Versuchsreihe zum bestimmen dieser Thermorezeptionszonen mit Testpersonen erläutert und die Ergebnisse und Schlüsse, die daraus gezogen wurden, behandelt.

Kapitel 7 behandelt die in *Unity* entwickelten Funktionen, die in zwei Aufgabenpakete aufgeteilt wurden. Das erste Aufgabenpaket befasst sich mit der Schnittstelle zum Mikrocontroller

und wie die Verarbeitung der zu versendenden Daten aussieht. Im zweiten wird die Berechnung der Positionen für die Peltier-Elemente analysiert und besprochen welche Ansätze für diese genutzt wurden.

Im letzten Kapitel werden die Ergebnisse diskutiert und ein Ausblick auf eventuelle Erweiterungen sowie Verbesserungen des Prototypen gegeben. Darüber hinaus wird auf die eingangs erhobene Hypothese „*Das Erweitern der virtuellen Realität um die taktile Wahrnehmung in Form von Temperatur steigert das Gefühl der Präsenz.*“ Bezug genommen und abgewogen, ob eine Tendenz zur Bestätigung dieser aufgezeigt werden konnte.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Virtual Reality

VR beschreibt den Versuch eine nicht reale Welt durch Computer und Computer-Mensch-Interfaces zu erschaffen, mit der ein Benutzer auf verschiedene Weise interagieren kann, sodass das Gefühl entsteht sich in dieser zu befinden. VR setzt sich aus unterschiedlichen Systemen zusammen, die auf dem neuesten Stand der Technik basieren, um die hohen Anforderungen für diese Aufgabe zu erfüllen. Solche Systeme bestehen z. B. aus einem HMD zur Darstellung der VE, Sensoren, welche die Bewegungen im Raum wahrnehmen, und Motion-Controllern, die eine natürlichere Interaktion mit der VE ermöglichen [Ste+15]. Häufig wird VR über den Einsatz von spezieller Hardware definiert [Bry96; SC97; Mer17], was zu einer fehlenden Generalisierung bei der Erklärung des Begriffes führen kann. Dadurch kann die Definition schnell veralten, wenn neue Technologien entwickelt werden [Ste92]. Um eine übergreifende Definition zu entwickeln, sollte daher auf die Erzeugung von Präsenz eingegangen werden, die im Zentrum von VR steht. Aus diesem Grund wird im Folgenden genauer auf Präsenz und ihre Bedeutung im Zusammenhang mit VR eingegangen.

#### 2.1.1 Präsenz, Telepräsenz und Immersion in VR

Der Begriff Präsenz im Zusammenhang mit VR meint das Gefühl der Anwesenheit in einer VE. Bei hoher Präsenz verspürt der Benutzer eine Gegenwärtigkeit, die einer tatsächlichen Anwesenheit entspricht [Bai+08]. Es kann zwischen den Begriffen Präsenz und Telepräsenz unterschieden werden. Während Präsenz das generelle Gefühl des Daseins beschreibt, definiert Telepräsenz die durch Technologie verursachte Täuschung der Sinne mit dem Ziel ein Daseinsgefühl zu generieren. Den Begriff der Telepräsenz im Bereich VR prägte Jonathan Steuer bei dem Versuch, eine allgemeine Definition für VR zu finden [SU93]. Zuvor wurde dieser Begriff von Marvin Minsky als ein Hilfsmittel zur Beschreibung ferngesteuerter Systeme eingeführt, die Empfindungen wie Hitze oder Schmerz an den Benutzer übertragen können [Min80]. Mit dem Begriff der Telepräsenz kann eine übergreifende Definition von VR aufgestellt werden:

"Eine Virtuelle Realität ist als eine reale oder simulierte Umgebung definiert, in der ein Benutzer Telepräsenz wahrnimmt." [Ste92]

Zusätzlich müssen Präsenz und Telepräsenz klar von dem Begriff der Immersion abgetrennt werden. Im Gegensatz zur Präsenz bezieht sich diese auf die verwendete Technologie. Sie beschreibt zu welchem Grad Computer-Mensch-Interfaces eine Illusion für die menschlichen Sinne erzeugen können. Dieser Grad kann anhand folgender Parameter quantifiziert werden: *inclusive (einschließend)* beschreibt, wie sehr die wirkliche Realität ausgeschlossen wird,

*extensive (umfangreich)* beschreibt, auf wie viele Sinneseindrücke eingegangen wird, *surrounding (umschließend)* beschreibt, wie groß das FOV ist und *vivid (lebhaft, plastisch)* beschreibt, wie umfangreich und ausführlich die abgedeckten Sinneseindrücke dargestellt werden [SW97; MC01].

### 2.1.2 Entwicklung von VR

In Abhängigkeit der Definition des Wortes *Technologie* im Zusammenhang mit Telepräsenz, können die Anfänge von VR bereits in alten 360° Panoramagemälden des 19. Jahrhunderts gefunden werden. Diese sollten durch das komplette Einnehmen des Blickfeldes das Gefühl erschaffen, in der dargestellten Szene zu sein [BK01]. Die Idee von VR wurde zuerst vom Science Fiction Autor Stanley G. Weinbaum im Jahre 1935 niedergeschrieben und veröffentlicht. Dieser beschreibt in seiner Kurzgeschichte *Pygmalion's Spectacles* von einer Gasmaske ähnelnden Brille mit Mundstück und der Erzeugung einer Illusion, die von der Realität nicht zu unterscheiden sei [Wei15]. Im Jahr 1965 hat Ivan Sutherland das Konzept eines *Ultimate Display* aufgestellt, welches die echte Realität so darstellen könnte, dass diese nicht mehr von der echten zu unterscheiden sei. Dabei beschreibt er ein HMD und eine computergesteuerte Hardware, die dieses ermöglicht. Darüber hinaus erwähnte er die Möglichkeit mit Objekten in dieser virtuellen Welt zu interagieren, ohne einen Unterschied zur realen Welt festzustellen [Sut65].

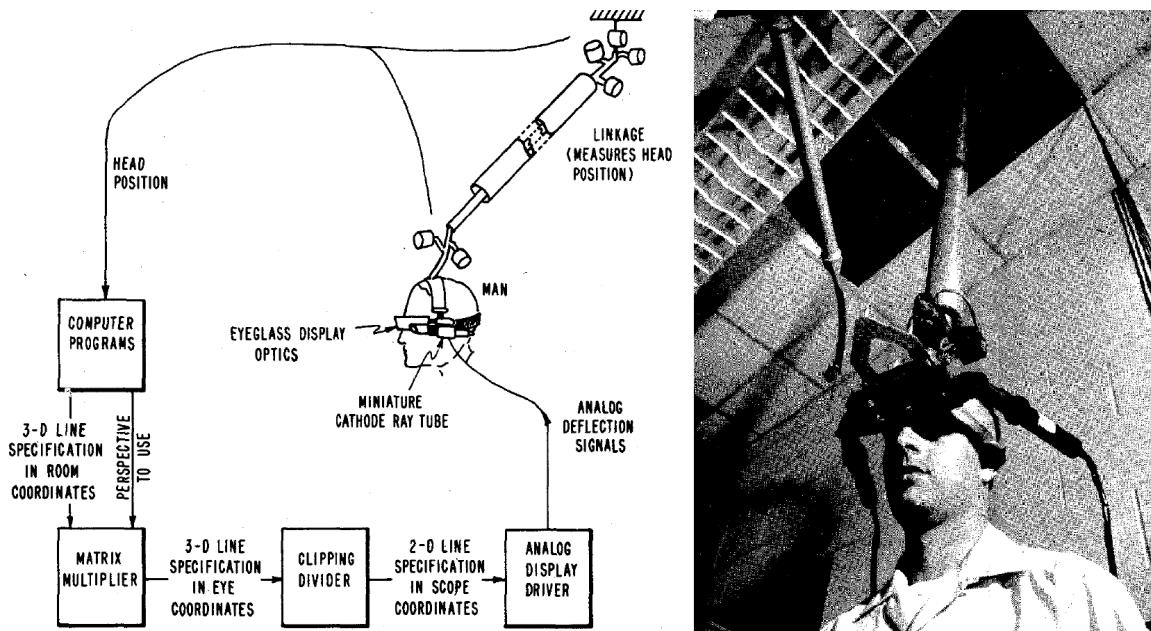


Abbildung 2.1: Aufbau der Komponenten des "Sword of Damocles" [Sut68].

Drei Jahre später hat Sutherland das erste computergesteuerte HMD entwickelt, welches auf Grund seiner Größe als "Sword of Damocles" bezeichnet wurde. Der Aufbau und das Aussehen sind in Abbildung 2.1 dargestellt. Dieses HMD konnte sehr primitive stereoskopische Gra-

fiken darstellen, die aus Drahtgittermodellen bestanden [Sut68]. In den folgenden Jahrzehnten stagnierte die Forschung im Bereich VR. Die ersten kommerziellen Versuche mit VR-Brillen wurden in den achtziger und neunziger Jahren unternommen, die allerdings keine großen Erfolge erzielten [HL93; BL13; ZZ09]. Einer breiteren Öffentlichkeit wurde VR 2012 mit der Oculus Rift über eine Crowdfunding Kampagne bekannt. Nachdem die Kampagne ungefähr 2,5 Millionen US-Dollar erzielte, wurde die Firma Oculus VR Anfang 2014 von Facebook für 2 Milliarden US-Dollar aufgekauft [Ocu; DNN15; Kov14]. Im Jahr 2016 erschienen die ersten offiziellen Veröffentlichungen großer Firmen. Neben der *Oculus Rift* von Facebook gehörten zu diesen die *HTC Vive* von *HTC* und *Steam* und die *PSVR* von *Sony* [HC16; Son16; IGN16].

### 2.1.3 HTC Vive

Die *HTC Vive* ist ein aus einem HMD, Motion-Controllern und Sensorstationen bestehendes VR-System, was in diesem Projekt zum Einsatz gekommen ist. Sie wurde von der im Jahr 1997 gegründeten, taiwanesischen Hardware Firma *HTC Corporation* in Kooperation mit der *Valve Corporation* entwickelt [Hol08; DSV15]. Das HMD und die Motion-Controller werden über die Sensorstationen, auch Lighthouse genannt, getrackt. Diese Technik wird im allgemeinen auch als Room-Scale bezeichnet und in Abbildung 2.2 visualisiert.

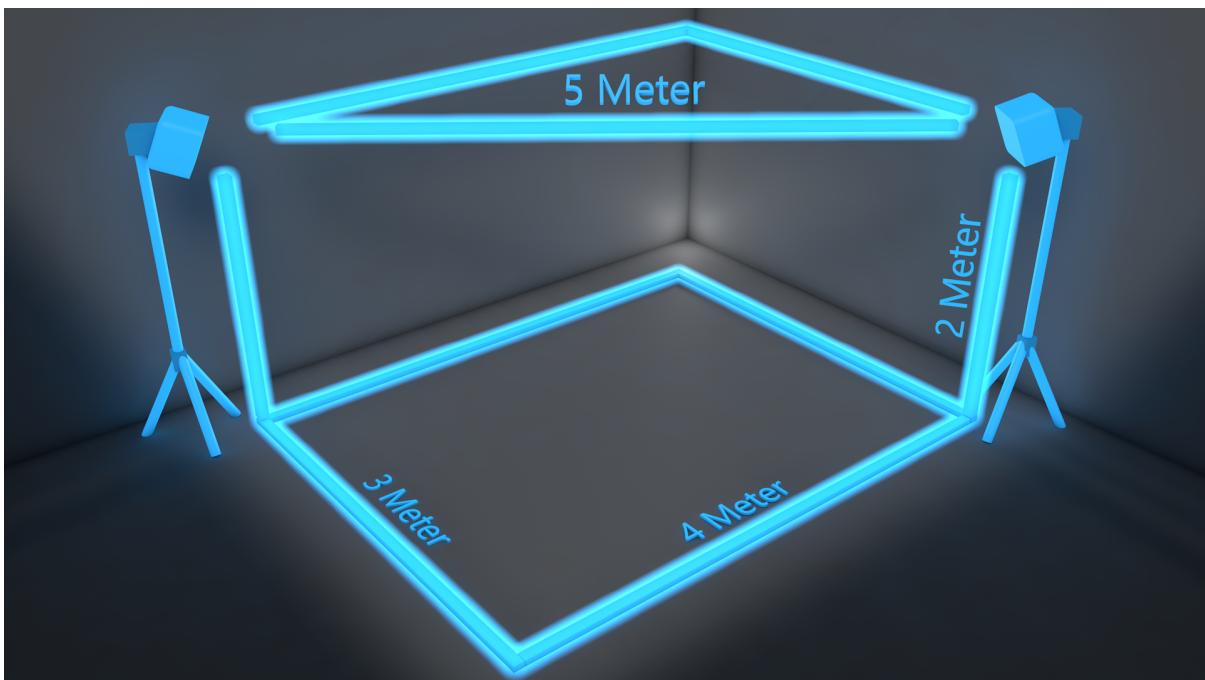


Abbildung 2.2: Room-Scale der *HTC Vive*.

Innerhalb des blauen Kubus kann der Benutzer sich frei bewegen und die Positionen der beiden Controller sowie des HMDs werden auf die VE übertragen. Dies ermöglicht dem Benutzer

die Interaktion in der VR. Das Room-Scale ist auf eine maximale Größe von fünf Metern in der Diagonalen begrenzt [Viva].

Die Sensorstationen senden mit einer Frequenz von 60 Hz Infrarotlaser in den Raum. Dies passiert entlang der X- und der Y-Achse, sodass der Raum horizontal und vertikal abgetastet wird. Am HMD und den Motion-Controllern sind Infrarot-LEDs eingebaut, deren Signal durch das Auftreffen des Lasers verstärkt wird. Diese Verstärkung der Ausgabe wird an eine im HMD liegende Berechnungseinheit geschickt, welche die eigene Position und Rotation berechnen kann, sofern sich genügend der LEDs in Sichtkontakt zu einer Sensorstation befinden [AP16; SG15]. Im HMD sind 32 und in den Controllern jeweils 24 Sensoren eingebaut. Diese hohe Stückzahl soll ein möglichst zuverlässiges tracking gewährleisten. [Vivb]. Das HMD besitzt eine Bildwiederholrate von 90 Frames per second (Bilder pro Sekunde) (FPS), welche eine wichtige Rolle für eine überzeugende Darstellung der VR spielt [PG14]. Des Weiteren haben die Bildschirme des HMDs eine Auflösung von 2160 x 1200 Pixel und bieten ein FOV von 110°.

## 2.2 Evaluationsmethoden

Die hier erörterten Verfahren beziehen sich speziell auf die in Kapitel 6 gemachte Versuchsreihe und die damit zusammenhängenden Techniken. Es existieren sowohl qualitative als auch quantitative wissenschaftliche Studien. Eine qualitative Studie ist die Erhebung nicht standardisierter Daten, die nicht durch Zahlen ausgedrückt werden können. Stattdessen müssen die Ergebnisse interpretiert und über speziellen Faktoren, die von der jeweiligen Studie abhängig sind, eingeordnet werden. Quantitative Studien hingegen können empirische Sachverhalte numerisch darstellen und sind vergleichsweise einfach auszuwerten. Dabei kann z. B. eine Mittelwertbestimmung erstellt werden, die die Sachverhalte logisch darlegen kann [Dör+15].

Bei einer Studie kann selten die Gesamtheit aller Fälle getestet werden, weshalb häufig auf Stichproben der Testfälle zurückgegriffen wird. Im Kontext der qualitativen Studien können diese relativ kleine Stichproben mit einer ein- bis zweistelligen Anzahl an Testpersonen umfassen. Jedoch ist die bewusste Auswahl der Testpersonen wichtig, um ein repräsentatives Ergebnis zu erlangen. Diese Auswahl muss entweder von einem Experten oder einer anderen klar definierten Auswahl aller in Frage kommenden Merkmale bestimmt sein. Bei quantitativen Studien muss eine deutlich größere Menge an Merkmalsträgern getestet werden, um repräsentative Ergebnisse zu gewährleisten. Diese wird nicht durch das Expertenwissen weniger Befragter erreicht, sondern durch die Wahl einer Stichprobengröße, welche die Bedingungen der Grundgesamtheit in einem vom Forschenden festzulegenden Ausmaß widerspiegelt. Daraus ergibt sich, dass die Größe einer Stichprobe immer davon abhängig ist, was genau untersucht werden soll [Dör+15].

Um eine Studie durchzuführen kann auf unterschiedliche Verfahren zurück gegriffen wer-

den, z. B. ein Interview oder Videoaufnahmen, die ausgewertet werden. Eine der am einfachsten auszuwertenden Datenerhebungen ist die Ratingskala, bei der die Testpersonen eine Frage über eine Skala mit numerischen Antwortmöglichkeiten bewertet. Dabei kann zwischen uni- und bipolaren Ratingskalen unterschieden werden. Eine unipolare Ratingskala ist in Abbildung 2.3 dargestellt und bildet ein Merkmal ab, das keinen Gegenpol aufweist. Das bedeutet, dass sie die Intensität des Merkmals von wenig bis viel abbildet.



Abbildung 2.3: Unipolare Skala für die Bewertung einer Veranstaltung nach Schulnoten.

Bei einer bipolaren Ratingskala, wie sie in Abbildung 2.4 dargestellt ist, wird an beiden Enden der Skala ein Merkmal abgebildet. Diese Enden stehen sich dabei gegenüber und es kann eine Tendenz in die eine oder andere Richtung gewählt werden [Dör+15].

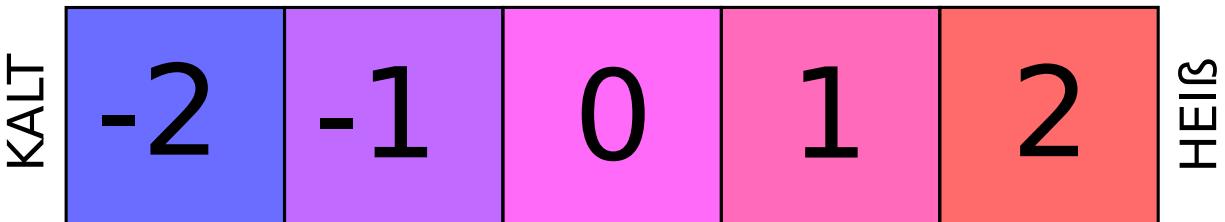


Abbildung 2.4: Bipolare Skala für die Einstufung erlebter Temperatur.

## 2.3 Unity

*Unity* ist eine Entwicklungsumgebung die von der Firma *Unity Technologies* entwickelt wurde. Sie ist primär für 2D- sowie 3D-Videospiele gedacht, wird aber wegen der einfachen Benutzung und Vielfältigkeit in vielen anderen Bereichen eingesetzt, um Echtzeitanwendungen zu entwickeln [YJH11; Xu+14]. Ein wichtiger Grund für die Beliebtheit von *Unity* ist die Möglichkeit des Multiplattform-Publishing, welche es ermöglicht eine einmal programmierte Anwendung für unterschiedliche Plattformen zu exportieren [Sei15]. Dies vereinfacht eine Distribution der entwickelten Software und generiert so eine große Menge an Endnutzern. Über die Jahre hat sich die Auswahl der angebotenen Plattformen, die *Unity* unterstützt, immer weiter vergrößert. Anfang 2017 sind 27 unterstützte Plattformen gelistet. Darunter fallen Betriebssysteme wie *Windows*, *Mac*, *Linux*, oder Mobile Geräte wie *iOS* oder *Android*. Darüber hinaus werden auch

eine große Zahl an Konsolen unterstützt. VR ist einer der neuesten Bereiche in dem *Unity* sich aufgestellt hat [Uni16a].

*Unity* selbst besteht aus einem Editor, der in unterschiedliche Bereiche aufgeteilt ist. Dazu gehört unter anderem das Szenen-Fenster, in dem mit der Maus Objekte wie in einem 3D-Modellierungsprogramm bewegt und angeordnet werden können. Der Inspektor zeigt Informationen über angewählte Objekte an, die dort angepasst werden können. Letztlich ist noch das Game-Fenster wichtig, dort wird nach dem Starten der Echtzeitanwendung die spätere Spielansicht angezeigt und der Entwickler kann mit dieser interagieren, um sie zu testen. Um die Logik für die Anwendungen zu schreiben, bietet *Unity* die Programmiersprachen *C#* und *UnityScript* an. Mit diesen können Skripte, die Objekten zugewiesen sind, geschrieben werden [Nor13]. Ein weiterer Grund für *Unity*s Beliebtheit ist die Vielzahl an Werkzeugen um Ressourcen zu generieren und zu verwalten. Darunter fallen unter anderem eine Physik-Engine [Wan+10], ein Werkzeug zur Erstellung von Partikeleffekten [Xu+14] oder das seit der Version 4.0 integrierte Mecanim Animations System, welches dem Benutzer ermöglicht Animationen zu erstellen [Dea15; KX16].

Zusätzlich existiert für *Unity* ein *Asset Store*. Dies ist eine Internetseite, auf der Entwickler *Asset Packages* hochladen können und umsonst oder kostenpflichtig anbieten. Ein *Asset Package* ist eine Zusammenstellung von Objekten und/oder Skripten, die einer Bibliothek aus Programmiersprachen ähnelt, es kann auch als Plugin bezeichnet werden [Uni16b].

## 2.4 Arduino / Genuino

*Arduino* ist eine Open-Source Plattform, die aus einer einfach zu verwendenden Hard- und Software besteht. Sie bietet eine Vielfalt an Mikrocontroller Boards an, mit verschiedenen Funktionsbereichen, um unterschiedliche Projekte zu realisieren. Die Boards haben Ein- sowie Ausgabepins, über die unterschiedliche Elemente gesteuert und abgefragt werden können. Sie sind mit der *Arduino Integrated development environment* (integrierte Entwicklungsumgebung) (IDE) über USB programmierbar. Die dafür verwendete Programmiersprache ist eine simplifizierte Form von C/C++ [Min13; Bad14; Ard17b]. Auf Grund der Zugänglichkeit ist die Plattform weit verbreitet und wird auch im Bildungsbereich häufig eingesetzt [Dob+15; DZ16]. Ein wichtiger Grund für die große Verbreitung von *Arduino* ist die Zugänglichkeit. Die Plattform ist so konstruiert worden, dass auch unerfahrene Menschen einen guten Einstieg finden können [Gib10]. Dazu zählt das Verbergen der direkten Mikrocontroller Funktionen hinter einer zugänglicheren Komponente in der IDE. Anstatt durch zusätzliche Hardware kann die IDE einfach über eine direkte Verbindung per USB gesteuert werden und minimiert damit die Komplexität [Bad14]. Da die Hardware von *Arduino* ausschließlich in den USA vertrieben wird,

wurde von einigen Gründungsmitgliedern der *Arduino* Plattform die Schwestermarke *Genuino* aufgebaut. *Genuino* vertreibt die gleichen Mikrocontroller Boards im Rest der Welt, wie sie von *Arduino* in den USA angeboten werden [Ard16a].

Von den insgesamt 13 Produkten, die *Genuino* anbietet, kommt in diesem Projekt der *Genuino MKR1000* zum Einsatz. Die Gründe zur Wahl dieses Modells werden in Kapitel 4 genauer erörtert. Der *MKR1000* ist ein Teil der Produktreihe *internet of things*, welche für die Verbindung zum Internet ausgelegt sind. Für diese Verbindung ist der *MKR1000* Wireless Local Area Network (drahtloses lokales Netzwerk) (WLAN) fähig. Aufgrund dieser Funktionalität basiert der *MKR1000* auf dem *Atmel ATSAMW25* System on Chip (Ein-Chip-System) (SoC), welcher für die Verbindung zum Internet über WLAN entwickelt wurde [Kur16]. SoC ist die Integration von verschiedenen Bauteilen auf einen einzelnen Chip [FL11]. Zusätzlich hat der *MKR1000* insgesamt zwölf Pulse Width Modulation (Pulsweitenmodulation) (PWM) fähige Pins. Durch das Erzeugen von Rechteckschwingungen können diese Pins digitale Signale in analoge Signale umwandeln [Wüs09; Ard16b]. In Abbildung 2.5 sind das Board mit den hervorgehobenen PWM-Pins dargestellt.

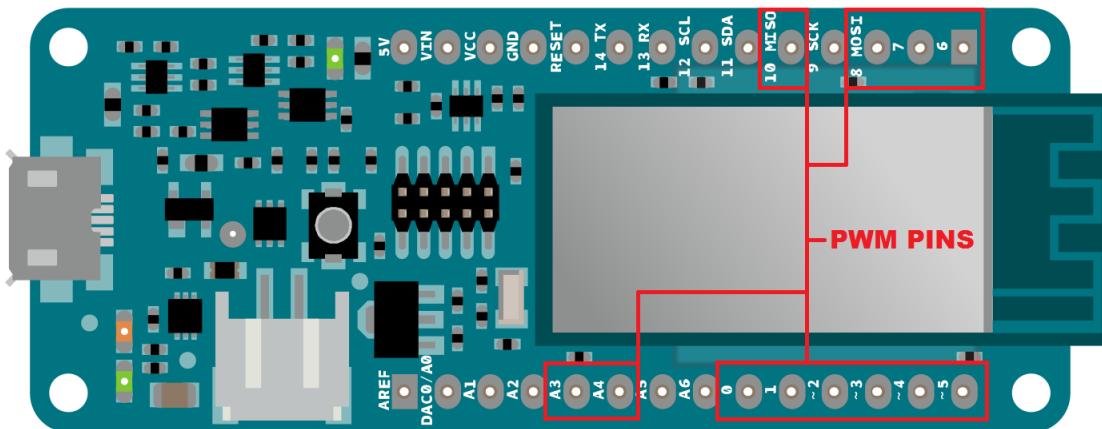


Abbildung 2.5: Aussehen und Aufbau des *MKR1000* mit hervorgehobenen PWM-Pins [Ard17a].

## 2.5 Thermorezeption

Als Thermorezeption wird der Temperatursinn des Menschen bezeichnet, dieser funktioniert über Thermorezeptoren in der Haut. Dabei wird zwischen Kälte- und Wärmerezeptoren unterschieden, die von thermischen Stimuli aktiviert werden und Impulse an das Gehirn schicken [Zha03]. Diese offenen Nervenenden werden erst dann aktiviert, wenn der Körper Temperaturen ausgesetzt ist, denen er entgegensteuern muss, um seine Temperatur zu halten [PKS14]. Der Bereich in dem keine Regulierung im Körper stattfindet, wird Neutralzone genannt und liegt zwischen 31 und 36 °C [SK01]. Die Rezeptoren können nur im nicht schmerzhaften Bereich arbeiten, welcher für Hitze bei ungefähr 46 °C anfängt. Für Kälte ist dieser Bereich nicht

genau definiert und stark von Mensch und Situation abhängig, er kann bereits bei weniger als 22 °C anfangen, aber auch erst bei niedrigen Werten wie 5 °C [Fia98].

Thermorezeptoren bestimmen nicht nur das Temperaturempfinden selbst, sondern beeinflussen auch das Komfortgefühl. Bei einer Temperaturveränderung geben sie eine hohe Frequenz an Impulsen ab, welche sich nach kurzer Zeit wieder zu einer stabilen Frequenz senkt. Abbildung 2.6 veranschaulicht dieses Verhalten im Vergleich zu konstanter Temperatur. Diese Eigenschaft führt dazu, dass eine aktive Temperaturveränderung der Haut z. B. durch kalten Wind oder warmes Wasser sich deutlich intensiver anfühlt, als die Temperatur tatsächlich ist. Daher sind plötzliche Temperaturveränderungen häufig unangenehm [Zha03].

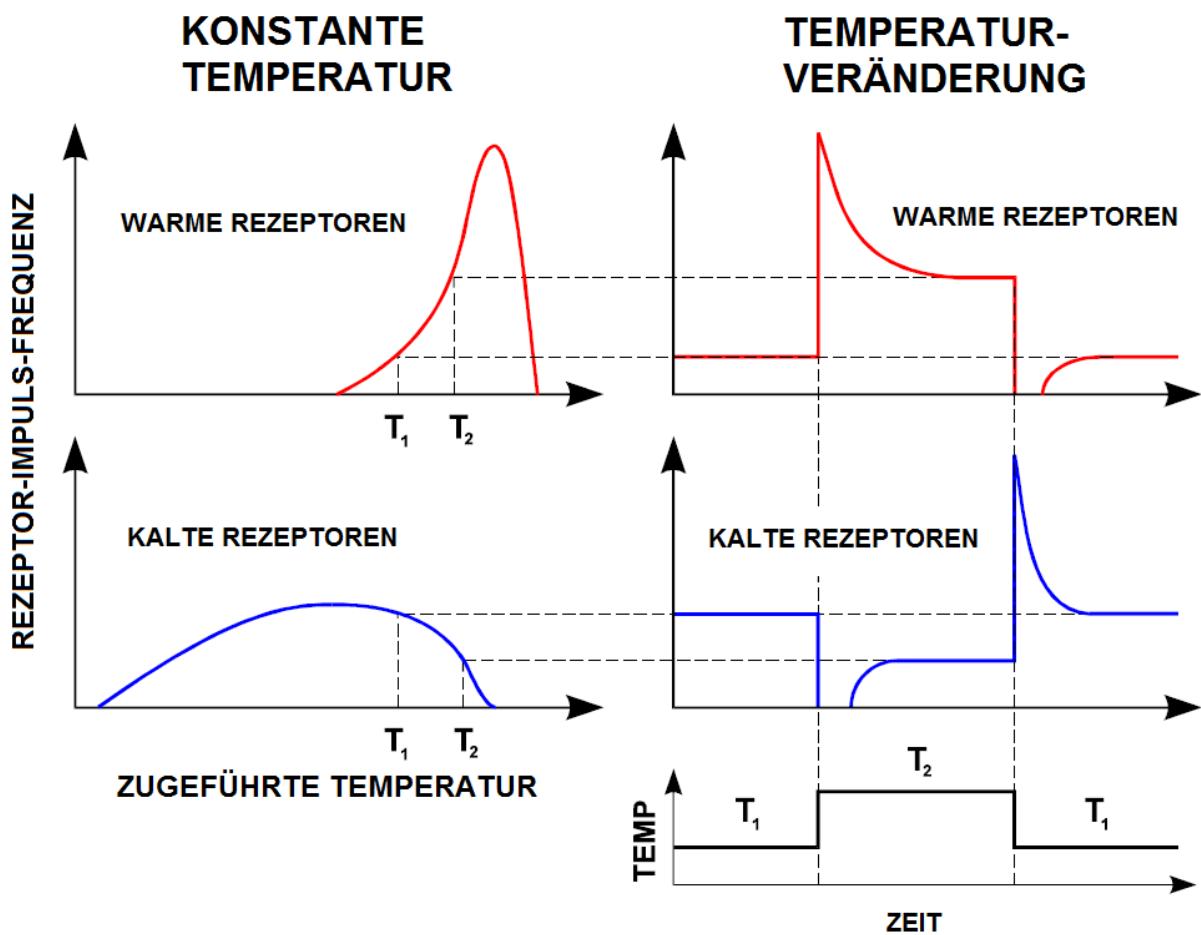


Abbildung 2.6: Impulsfrequenz von Wärme- sowie Kälterezzeptoren bei konstanter und sich verändernder Hauttemperatur [Fia98].

Der Durchmesser der Rezeptoren liegt zwischen ein und vier Mikrometern und kann die Temperatur in einem Bereich von einem Quadratmillimeter wahrnehmen. Thermorezeptoren liegen in der Lederhaut und sind bei Kälterezzeptoren 0,2 Millimeter (mm) und bei Wärmerzeptoren 0,4 mm tief unter der Hautoberfläche zu finden [Fia98]. Eine Besonderheit des Temperatursinnes ist die diskrete Rezeptorverteilung [PKS14], die für Wärme- und Kälterez-

zeptoren unterschiedlich ist. Insgesamt liegt die geschätzte Anzahl der Thermorezeptoren, bei einem erwachsenen Menschen, bei vier Millionen. Jedoch sind es zehn mal so viele Kälte- wie Wärmerezeptoren [SKK16]. Diese lässt sich auch anhand der Aufteilung an unterschiedlichen Körperregionen, die in Tabelle 2.1 aufgelistet ist, erkennen.

| Körperregion       | Kälterezzeptoren pro $cm^2$ | Wärmerezzeptoren pro $cm^2$ |
|--------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Stirn              | 5,5–8                       | 2                           |
| Nase               | 8–13                        | 1                           |
| Mund               | 16–19                       | –                           |
| übriges Gesicht    | 8,5–9                       | 1,7                         |
| Brust              | 9–10,2                      | 0,3                         |
| Bauch              | 8-12,5                      | –                           |
| Rücken             | 7,8                         | –                           |
| Oberarm            | 5-6,5                       | 0,3                         |
| Unterarm           | 6–7,5                       | 0,3–0,4                     |
| Handrücken         | 7,4                         | 0,5                         |
| Handfläche         | 1–5                         | 0,4                         |
| Fingerrücken       | 7–9                         | 1,7                         |
| Finger, Innenseite | 2–4                         | 1,6                         |
| Oberschenkel       | 4,5–5,2                     | 0,4                         |
| Wade               | 4,3–5,7                     | –                           |
| Fußrücken          | 5,6                         | –                           |
| Fußsole            | 3,4                         | –                           |

Tabelle 2.1: Aufteilung der Thermorezeptoren an unterschiedlichen Körperregionen [AZ06; Hen52; SKK16; Dre13].

Die in Tabelle 2.1 aufgeführten Werte wurden durch aufwendige Tests von Sinnesforschern ausgearbeitet, in denen die Haut an unterschiedlichen Punkten mit warmen und kalten Stimuli punktiert wurde. Dabei wurde festgestellt, dass an einigen Stellen nur Wärme und anderen nur Kälte empfunden wird [NFL99; Zha03].

## 2.6 Thermal Grill Illusion

Die Thermal Grill Illusion wurde zuerst in einem Versuch von Torsten Thunberg, einem schwedischen Arzt, im Jahre 1896 entdeckt und demonstriert [SSA14]. Dieser ordnete alternierend

beheizte und gekühlte Röhren parallel nebeneinander an, wie in Abbildung 2.7 zur Verdeutlichung des Aufbaus dargestellt ist [Xu+15]. Auf diese Röhren kann ein Körperteil, wie z. B. die Hand aufgelegt werden.

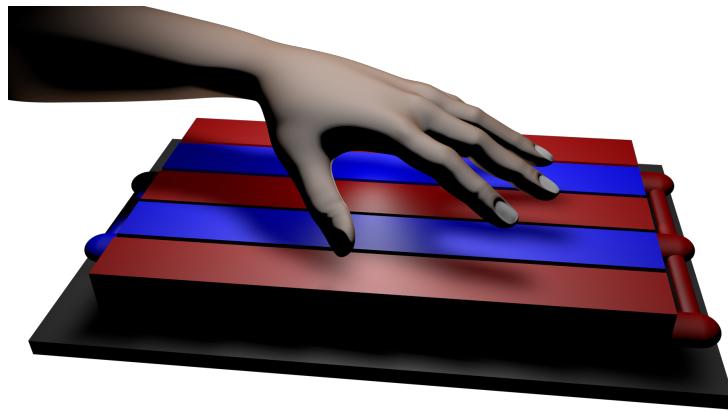


Abbildung 2.7: Visualisierung des Versuchsaufbaus für die TGI.

Der erzielte Effekt ist ein paradoxer Hitzeschmerz, der jedoch keine körperlichen Schäden verursacht. Die einzelnen Temperaturen sind getrennt weder sehr heiß, circa 40 °C für die warmen Röhren, noch sehr kalt, circa 20 °C für die kalten Röhren. Erst die Kombination erzeugt die Illusion von Schmerz auf der Haut. Dieses Phänomen entsteht durch eine Überreizung der Thermorezeptoren. Dieser Effekt ist mit dem Hitzeschmerz, der verspürt wird, wenn lauwarmes Wasser über taube kalte Füße oder Hände läuft, vergleichbar [FJT12].

Warum genau der TGI auftritt, wurde noch nicht eindeutig erklärt und wird unter anderem in der Neurowissenschaft diskutiert. Es wird vermutet, dass dabei durch eine Überlastung sowohl die Kälte- als auch die Schmerzrezeptoren angesprochen werden [Cra02].

## 2.7 Peltier-Effekt

Der Peltier-Effekt wurde 1833 entdeckt und ist mit dem Seebeck-Effekt verwandt, welcher elf Jahre zuvor entdeckt wurde. Der Peltier-Effekt beschreibt das Erzeugen einer Temperaturdifferenz, indem Strom durch zwei unterschiedlich dotierte Halbleiter fließt. Diese Halbleiter sind hintereinander in Reihe geschaltet und mit einer metallenen Brücke verbunden. Wie in Abbildung 2.8 zu erkennen entsteht bei der Brücke, die die Verbindung von negativ-dotierten zu positiv-dotierten Halbleitern ist, Kälte. Auf der anderen Seite, ist der Übergang umgedreht und daher entsteht Wärme [Ian15; RL11].

Der Grund für die thermischen Veränderungen ist, dass beim Übergang der Elektronen von der einen Halbleiterseite auf die andere sich das Energiepotenzial ändert. Es entsteht auf einer Seite ein höheres energetisches Niveau, wodurch Wärme aufgenommen wird. Gleichzeitig

geht das Niveau auf der anderen Seite von einem hohen zu einem niedrigen über, was zu einer Abgabe von Wärme führt [Fic16; Oes01].

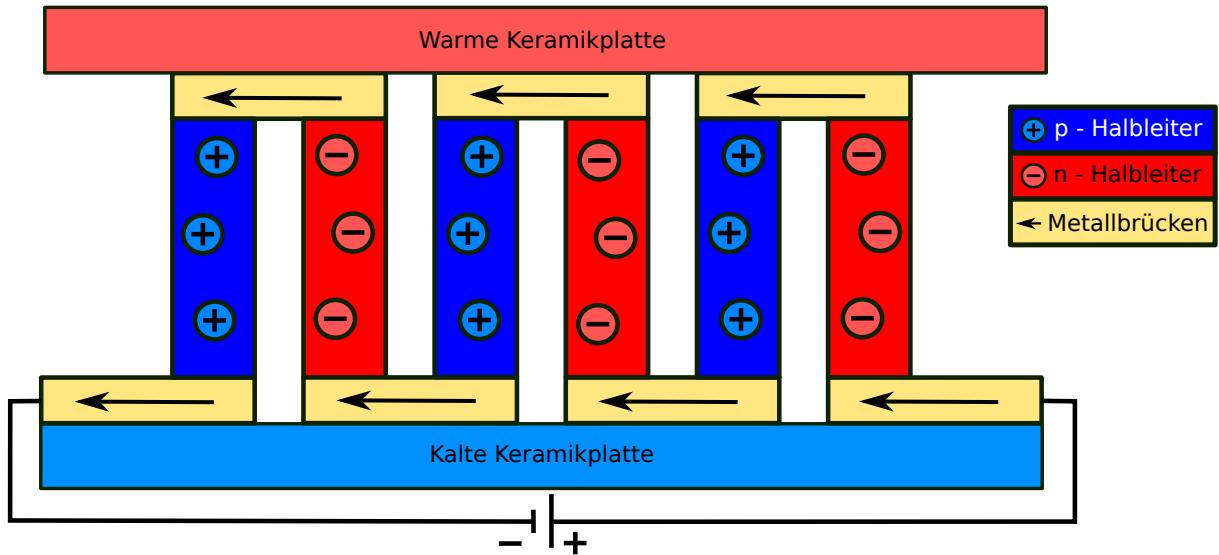


Abbildung 2.8: Prinzip eines Thermopaars, das den Peltier-Effekt ausnutzt.

### Peltier-Element

Ein Peltier-Element ist ein thermoelektrisches Bauteil, das sich den zuvor beschriebenen Peltier-Effekt zu nutze macht. Diese wurden in diesem Projekt zur Erzeugung der unterschiedlichen Temperaturen verwendet. Bei einem solchen Element sind die Thermopaare, welche aus jeweils einem p- und n-dotierten Halbleiter bestehen, in Serie geschaltet. An einem Thermopaar fällt jeweils die Spannung  $V_{tp}$  ab,  $V_{tp}$  wird für die Berechnung der Betriebsspannung verwendet. Bei dieser Berechnung muss  $V_{tp}$  mit der Anzahl der verwendeten Thermopaare in dem jeweiligen Element multipliziert werden. Die Thermopaare werden von zwei Keramikplatten an den Brücken abgedeckt. Dabei wird Keramik verwendet, da diese zum einen keine elektrische Leitfähigkeit und zum anderen eine sehr gute Wärmeleitfähigkeit besitzt [Ian15]. Dabei liegt die Temperaturdifferenz, die zwischen den beiden Seiten erzeugt werden kann, bei maximal 70 °C. Dieser Wert ist jedoch von den eingesetzten Materialien abhängig und kann daher durch die Bauweise des Peltier-Elementes schwanken [Fic16; ETA71].

## 2.8 Inverse Kinematik

Inverse Kinematik (IK) ist ein Verfahren zur Berechnung von Gelenkpositionen. IK kann die Positionen von Zwischengelenken anhand der Position des Endeffektors, dem letzten Glied einer Gelenkkette, oder eines Targets berechnen. Ein Target hat die gleiche Funktion wie ein Endeffektor, ist aber nicht Teil der Gelenkkette, wodurch es frei bewegt werden kann und sich

die komplette Kette danach ausrichtet. Durch die automatische Berechnung der Zwischengelenke muss, anstatt jedes Gelenk einzeln anzufassen, nur das letzte Element einer Kette oder das Target manipuliert werden. Diese grundlegende Funktionsweise wird in Abbildung 2.7 visualisiert.

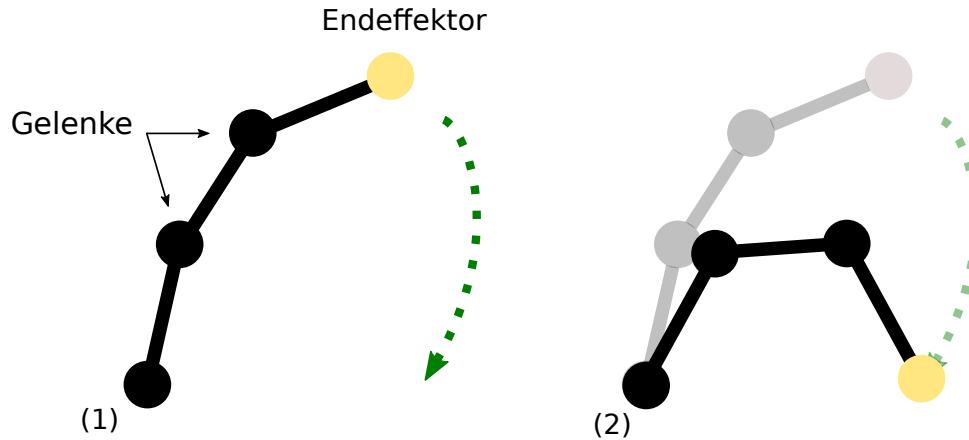


Abbildung 2.9: Demonstration der grundlegenden Funktionsweise von IK.

Dieses Verfahren wird in unterschiedlichen Gebieten verwendet und erleichtert z. B. aufwendiges Animieren eines humanoiden Charakters. In der Robotik ist IK ebenfalls ein wichtiges Hilfsmittel, da Roboterarme häufig sehr präzise Bewegungen vollziehen müssen, aber meist in ihrer Bewegungsfreiheit eingeschränkt sind. Dafür können bei den meisten IK-Algorithmen sogenannte Constraints (dt. Grenzen) für einzelne Gelenke eingebracht werden.

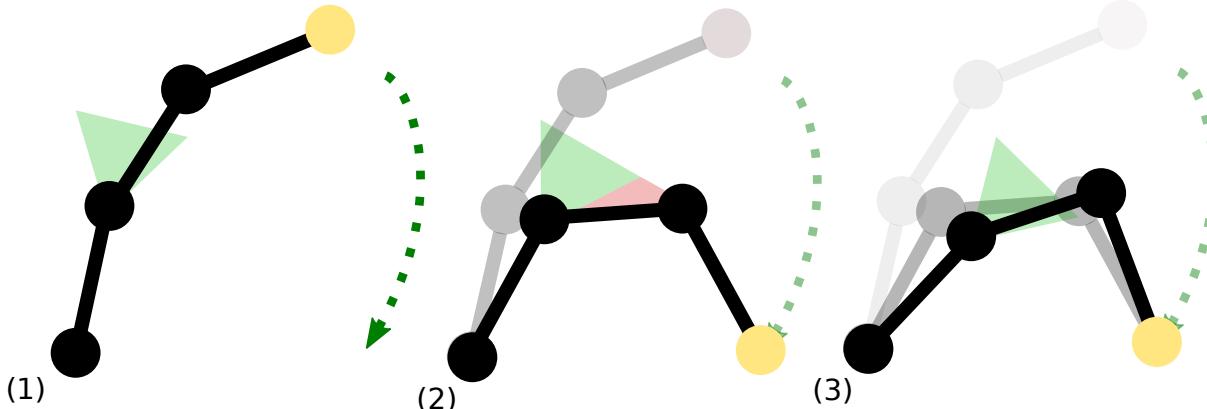


Abbildung 2.10: Demonstration von Constraints. In (1) ist ein Constraint (der grüne Bereich) für das zweite Gelenk definiert. In (2) wurde dieser Constraint überschritten (roter Bereich). In (3) wurde die IK mit Beachtung des Constraints ausgeführt.

Dabei werden beispielsweise Winkel festgelegt, die das Gelenk nicht überschreiten darf. Die Constraints sind je nach algorithmischen Ansatz unterschiedlich kompliziert zu definieren. In Abbildung 2.10 wird ein Constraint beispielhaft veranschaulicht. Constraints können unter

anderem die Einschränkungen von echten Gelenken simulieren. Dies wird verwendet, um z. B. natürlich wirkende Animationen zu erzeugen [AL10]. Eine große Problematik bei der Berechnung der Gelenkpositionen ist die Uneindeutigkeit der Lösung. Deshalb können manche Bewegungen des Endeffektors unnatürliche oder unerwartete Positionen der Zwischengelenke auslösen [MM07]. Da IK häufig während der Laufzeit eines Programms die Gelenkberechnung durchführen soll, ist der Aufwand der eingesetzten Algorithmen ein wichtiger Punkt. Einige der Algorithmen arbeiten mit Jacobi-Matrizen, die rechenintensiv sind und mit Singularitätsproblemen zu kämpfen haben. Diese können bei falscher Positionierung unter anderem ein Zittern der Gelenkkette auslösen [Bus04].

Ein relativ neues Verfahren, das auf Jacobi-Matrizen verzichtet und einen heuristischen und iterativen Ansatz bietet, ist das Forward And Backward Reaching Inverse Kinematics (FABRIK) Verfahren. Dieses Verfahren kommt in diesem Projekt zum Einsatz und wird im Folgenden kurz genauer erläutert.

FABRIK besteht aus zwei Abläufen, dem Forward Teil, dessen Ablauf in Abbildung 2.11 demonstriert wird, und einen Backward Teil, der den Ersten rückwärts wiederholt.

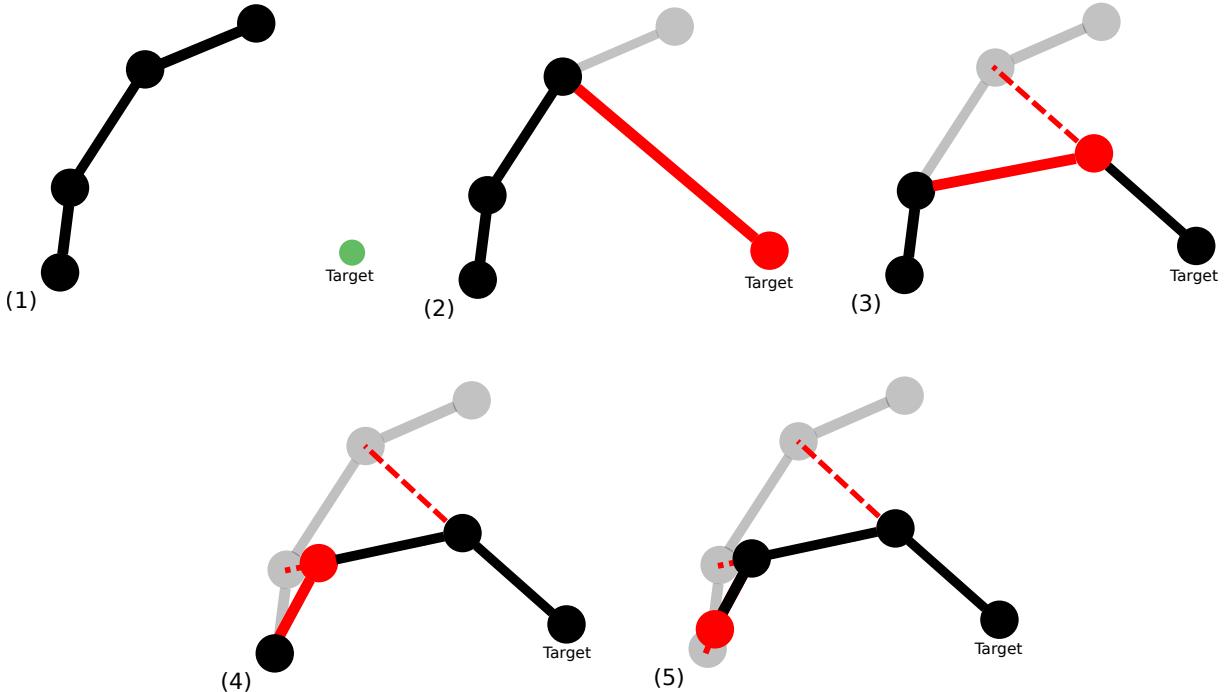


Abbildung 2.11: Demonstration des FABRIK Algorithmus'. (1) Target wurde gesetzt, (2) Endeffektor wird auf das Target gesetzt, (3) nächstes Gelenk in der Kette wird auf der neuen Verbindungsgeraden verschoben, bis die Originallänge hergestellt ist, (4) und (5) Wiederholung mit den restlichen Gelenken.

Nachdem Forward und Backward einmal durchgearbeitet wurden, wird der Abstand des Endeffektors zum Target mit einem Schwellwert verglichen und wenn dieser Abstand kleiner

ist, wird der Algorithmus beendet. Sollte der Abstand größer als der Schwellwert sein, wird der vorherige Vorgang wiederholt. In dem in Abbildung 2.11 dargestellten Beispiel ist zu erkennen, dass sich das Verfahren schon nach wenigen Iterationen sehr nah am finalen Ergebnis befindet. Dieser Grund und die einfachen Rechnungen, die bei diesem Verfahren verwendet werden, machen FABRIK zu einem sehr schnellen IK-Verfahren [AL09].

## 3 Verwandte Arbeiten

Die Verbindung von taktiler Feedback in Form von Temperatur und VR wurde bis heute vergleichsweise wenig erforscht. Jedoch sind Ansätze vorhanden, die das Thema aufgreifen und versuchen beide, für eine verbesserte VR Erfahrung, in Einklang zu bringen. Im Folgenden werden Projekte, die einen ähnlichen Forschungsschwerpunkt besitzen, aufgezeigt und eine klare Abgrenzung zu diesen Projekten gezogen.

### 3.1 *Virtual Hell: A Trip Through the Flames*

José Dionisio hat bereits im Jahr 1997 ein VR-Setup mit thermalen Feedback aufgebaut und getestet. Dieses funktioniert mit Ventilatoren für Kälte und Wind, Infrarotlampen, die Wärme auf dem gesamten Körper erzeugen sollen, und einem Peltier-Element, das eine Stelle am Arm lokal erwärmen/kühlen soll. Die Aktoren werden mit einem Mikrocontroller gesteuert, der die Daten aus dem VR-System empfängt [Dio97]. Der gesamte Aufbau ist in Abbildung 3.1 dargestellt.

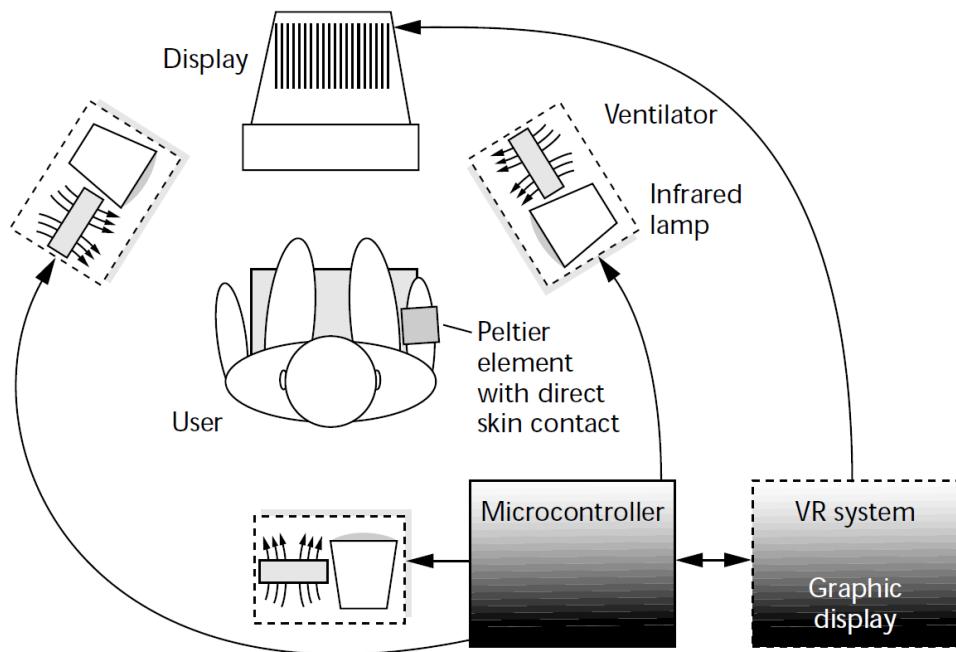


Abbildung 3.1: Aufbau des verwendeten Systems [Dio97].

Die Verwendung des Peltier-Elementes kommt diesem Projekt relativ nahe, jedoch waren 1997 die VR-Systeme noch nicht ausgereift genug, weswegen auf Positionstracking des Benutzers verzichtet werden musste. Außerdem wurde für das Temperieren des ganzen Körpers zusätzliche Hardware verwendet, die den Aufbau verkompliziert und unflexibel macht.

### 3.2 AxonVR

Ein in Seattle ansässiges Startup-Unternehmen ist dabei eine Art Exoskelett zu entwickeln. Der dabei entstehende Anzug soll sowohl Berührung von Objekten in Form von Textur, Kontur, Vibration und Temperatur simulieren können, als auch eine freie Bewegung in der VR ermöglichen. Die dafür zuständige Technologie wird von dem Startup selbst entwickelt und wird von Sponsoren finanziell unterstützt [Glo16; Axo16]. Eine vorläufige Abbildung des Anzugs ist in Abbildung 3.2 visualisiert.



Abbildung 3.2: 3D gerendertes Bild des AxonVR-Anzug [Axo16].

Die Erzeugung der Temperatur in diesem Anzug funktioniert über kleine Wasserreservoirs, die wie kleine Temperaturbatterien fungieren und erhitzt oder gekühlt werden können. Das temperierte Wasser selbst wird über kleine Schläuche, die im Stoff eingearbeitet sind, an die Körperstellen des Benutzers befördert [Rub16]. Der Anzug selbst ist nicht für Privatpersonen, sondern für Vergnügungsparks oder größere VR-Anlagen gedacht. Durch den komplexen Aufbau und die Integration von unterschiedlichen Technologien verfolgt der Anzug eine gänzlich andere Richtung als dieses Projekt. Auch die Temperaturerzeugung basiert auf einem anderen Verfahren, als das hier verwendete Peltier-basierte Verfahren.

### 3.3 Senso Glove

Der *Senso Glove* ist ein VR und Augmented Reality (Augemtierte Realität) (AR) Controller der Firma *Senso Devices* und verfügt über ein Hand- und Fingertracking, welches über interne Sensoren funktioniert. Zusätzlich gibt der Handschuh ein haptisches Feedback bestehend aus Vibrationsmotoren sowie Hitze- und Kälteelemente [Dev16]. Die genaue Beschaffenheit der Elemente, ist nicht bekannt. Jedoch ist diese Hardware ausschließlich für die Hände gedacht und soll hauptsächlich die Aufgabe eines Controllers übernehmen.

### 3.4 FlAim Trainer

Der *FlAim Trainer* ist ein Trainingssimulator für Feuerwehrmänner, der 2015 das erste Mal vorgestellt wurde. Der Simulator beinhaltet sowohl AR also auch VR Anwendungsmöglichkeiten und ist in der Lage das haptische Feedback eines Feuerwehrschaubes zu simulieren. Zusätzlich kann über eine Jacke die Hitze eines Feuers simuliert werden. Der Simulator ist am *Institute for Intelligent Systems Research and Innovation* an der Deakin University in Australien entwickelt worden. In der folgenden Abbildung 3.3 ist die Verwendung des Simulators dargestellt [inv15].



Abbildung 3.3: *FlAim Trainer*, ein Simulator für Feuerwehrmänner.

Der *FlAim Trainer* erzeugt ausschließlich Hitze und ist im Gegensatz zu diesem Projekt auf einen spezifischen Anwendungsbereich ausgelegt. Zusätzlich wird die Temperatur nicht positionabhängig berechnet, sondern über den Fortschritt des Feuers in der Simulation gesteuert.

## 4 Der Peltier-basierte Prototyp

### 4.1 Anforderungsanalyse für den Prototypen

Der in diesem Projekt entstandene Peltier-basierte Prototyp muss bestimmte Anforderungen erfüllen, um eine möglichst hohe Telepräsenz zu erzeugen. Dafür ist es wichtig, dass die erzeugte Temperatur sich so realistisch wie möglich anfühlt. Wenn die Temperatur sich auf der Haut unnatürlich anfühlt oder im Widerspruch zur Umgebung steht, kann dies einen unnatürlichen Effekt haben und die Immersion verschlechtern, wodurch die Telepräsenz verringert wird. Um Realismus zu erzeugen, ist es notwendig, dass das Temperaturverhalten sich mit den Bewegungen des Benutzers verändert und sich an diese anpasst. Streckt der Benutzer seine Hand in Richtung eines Temperaturerzeugers aus, z. B. ein Feuer, soll diese wärmer werden als der restliche Körper.

Zusätzlich soll der Prototyp die Thermal Grill Illusion (TGI) auslösen können, welche den Einsatzbereich des Prototypen erweitert. Mit dieser Illusion kann beispielsweise Verbrennungen oder Schmerz simuliert werden, die beim berühren von Feuer oder bei Treffern durch Schusswaffen entstehen können. Letztlich soll der Prototyp sowohl eine Schnittstelle für *Unity* bereitstellen, als auch die Funktionen der *HTC Vive* ausnutzen.

Diese Anforderungen für den Prototyp wurden analysiert und folgende Pflicht- sowie Wunschkriterien definiert.

#### 4.1.1 Pflichtkriterien

##### Funktionale Anforderungen:

Der Prototyp muss die Möglichkeit bieten...

1. ... unterschiedliche Temperaturen zu erzeugen.
2. ... verschiedene Körperstellen unterschiedlich stark anzusteuern.
3. ... die Temperaturdaten, die von *Unity* gesendet werden, zu empfangen und zu interpretieren.
4. ... die TGI zu erzeugen, um Schmerz zu simulieren.

##### Nicht-funktionale Anforderungen:

1. Die erzeugte Temperatur muss flächendeckend im Körper zu spüren sein.

2. Die erzeugte Temperatur muss mit einer geringen Latenz erzeugt werden.
3. Der Prototyp muss mindestens zehn Minuten am Stück verwendbar sein.
4. Der Benutzer muss sich mit angelegtem Prototyp frei bewegen können.

#### 4.1.2 Wunschkriterien

1. Der Prototyp soll die Möglichkeit bieten, ihn ohne großen Aufwand kabellos zu betreiben.

### 4.2 Aufbau des Prototypen

#### 4.2.1 Konzeption

Der Peltier-basierte Prototyp ist unter der Berücksichtigung dieser Kriterien konzipiert und entwickelt worden. Für die Erzeugung von Wärme und Kälte wurden Peltier-Elemente verwendet. Diese besitzen eine Abmessung von 15 x 30 Millimetern und werden mit einer Nennspannung von 4,2 Volt (V) betrieben. Da auf einer Körperstelle sowohl Wärme, Kälte als auch die TGI erzeugt werden soll, sind immer zwei Peltier-Elemente nebeneinander angeordnet. Für die Abführung der entstehenden überschüssigen Wärme wurden diese Elemente mit einem Kühlkörper versehen. Dieser Aufbau ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Der Einfachheit halber wird eines dieser Peltier-Element-Paare mit Kühlkörper *Peltier-Modul* genannt.

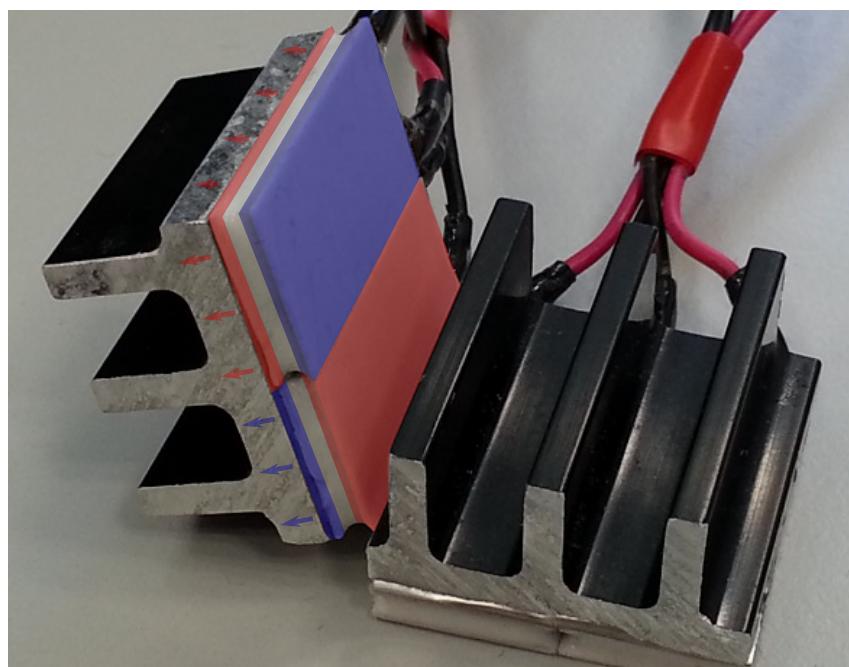


Abbildung 4.1: Peltier-Module mit Visualisierung der warmen und kalten Seite.

Durch die Kühlkörper wird die Einsatzdauer der Peltier-Module stark verlängert, da die abgeführte Wärme beim Abschalten der Peltier-Elemente nicht zurück fließen kann und somit unerwünschte Temperaturschwankungen verringert werden. Dieser Aufbau der Peltier-Module bringt folgende Vorteile mit sich: Durch den Kühlkörper sind die Peltier-Module robust und die räumliche Nähe der Peltier-Elemente lässt es so wirken, als ob die Wärme und Kälte an der gleichen Stelle am Körper anliegen. Zusätzlich ist die Möglichkeit vorhanden, die TGI hervorzurufen. Der Vorteil bei der Verwendung von Peltier-Elementen ist die Geschwindigkeit, in der sie die gewünschte Temperatur erzeugen können. Für den angestrebten Temperaturbereich im nicht schmerhaftem Bereich von 12-42 °C sind die Elemente für die menschliche Wahrnehmung ausreichend schnell.

Um eine angemessene Verteilung der Temperatur gewährleisten zu können, wurde der Prototyp für insgesamt sechs Körperstellen mit jeweils zwei Peltier-Modulen entwickelt. Die zwei Peltier-Module sind jeweils in Reihe geschaltet und werden aus diesem Grund immer mit der gleichen Intensität für Wärme oder Kälte angesteuert. Da sie dicht beieinander angebracht werden, ist ein separates Ansteuern unnötig. Der Prototyp ist in Abbildung 4.2 dargestellt und es ist zu erkennen, dass alle Peltier-Module von einer grauen Schachtel abgehen. In dieser Schachtel befindet sich die Schaltung, auf die im nächsten Abschnitt genauer eingegangen wird.



Abbildung 4.2: Peltier-basierter Prototyp.

Die sechs Körperstellen können separat angesteuert werden, was durch das Parallelschalten der insgesamt zwölf Peltier-Elemente ermöglicht wird. Jede Leitung der Parallelschaltung hat einen Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor (MOSFET), der von einem Mikrocontroller geöffnet und geschlossen werden kann. Einer der Gründe für die Wahl des *MKR1000* sind die zwölf PWM-Pins die er besitzt. Mit diesen Pins können die Peltier-Elemente über die MOS-

FETs geschaltet werden. Durch das Schalten wird der Versorgungsstrom reguliert, der nur durch die Peltier-Elemente fließt, wenn der MOSFET geöffnet ist. Durch die Verwendung von PWM fähigen Pins wird gewährleistet, dass die MOSFETs auch Teilströme durchlassen können. Dadurch können die Peltier-Elemente unterschiedlich stark angesteuert werden. Der *MKR1000* kann über USB an einen seriellen Port eines Computers angeschlossen werden. Das Ansprechen des seriellen Ports wurde innerhalb von *Unity* implementiert und wird in Kapitel 7 erläutert. Ein weiterer Grund für die Wahl des *MKR1000* ist die WLAN Fähigkeit des Mikrocontrollers, die es ermöglichen könnte, dass der Prototyp kabellos ansteuerbar ist. Neben dem USB-Kabel ist das Stromkabel für die Hauptstromversorgung die einzige Leitung, die vom Prototypen abgeht. Diese müsste jedoch mit einer leistungsfähigen Batterie, etwa einer Autobatterie ausgetauscht werden, um die nötige Leistung zu liefern, die für die Peltier-Elemente benötigt wird.

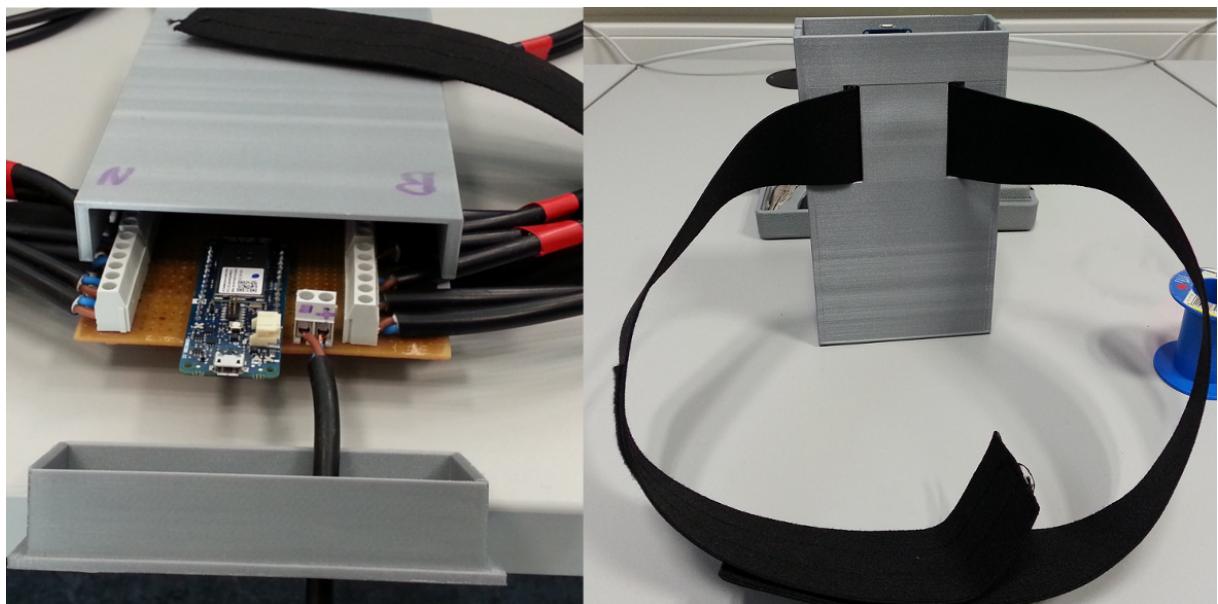


Abbildung 4.3: Schachtel für die Platine und Riemen für die Befestigung am Körper.

Für die Tragbarkeit des Prototypen wurde eine Schachtel modelliert und mit einem 3D-Drucker ausgedruckt, das Ergebnis wird in Abbildung 4.3 genauer gezeigt. Die Schachtel ist mit einem Schlitz für einen elastischen Riemen ausgestattet, welcher einmal um den Unterleib des Benutzers gelegt werden kann und mit Klettverschluss befestigt wird. Dadurch kann die Schaltung auf dem Rücken, wie in Abbildung 4.4 dargestellt, angebracht werden. Durch diese Befestigungsmethode stört die Schachtel nicht bei Bewegungen. Für die Peltier-Module, die an verschiedenen Körperstellen angebracht werden, gehen unterschiedlich lange Kabel von der Schaltung ab.

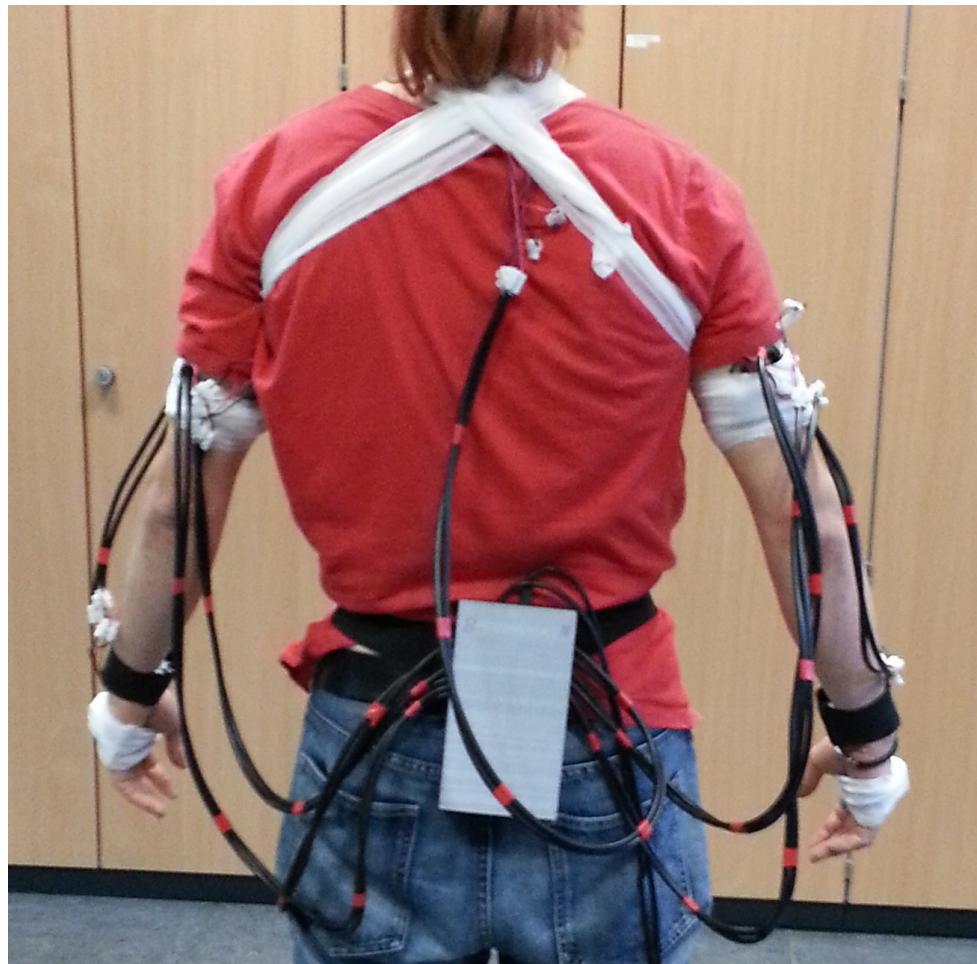


Abbildung 4.4: Übersicht der Befestigung des Prototypen.

Es wurde für anfängliche Tests weitere elastische Riemen angefertigt, die unter anderem in Abbildung 4.5 zu sehen sind. Diese ermöglichen es die Module z. B. an Ober- oder Unterarm zu befestigt.

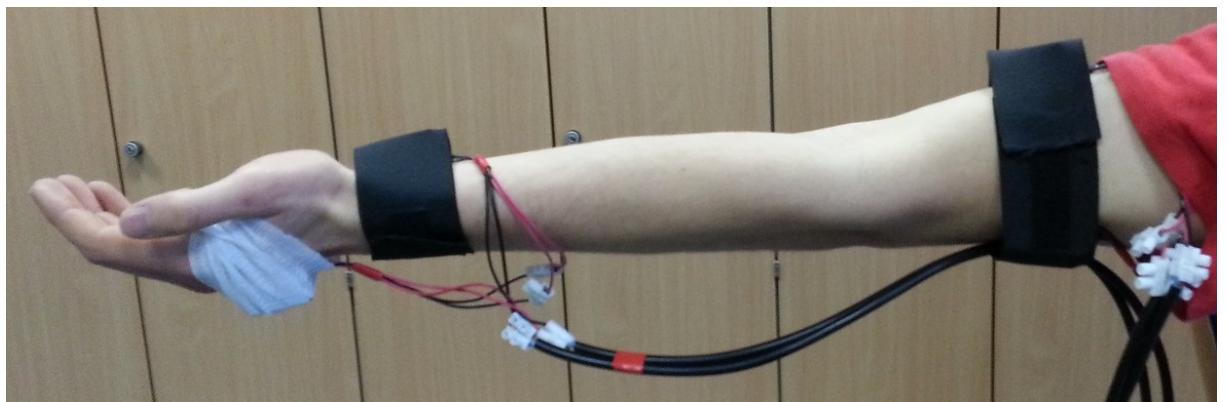


Abbildung 4.5: Befestigung des Prototypen am Arm.

### 4.2.2 Ausarbeitung der Schaltung

Aufbauend auf der in Kapitel 4.2.1 erläuterten Konzeption, wurde die in Abbildung 4.6 gezeigte Schaltung entwickelt. In dieser Abbildung ist der *MKR1000* dargestellt, der über die zwölf PWM-Pins jeweils einen MOSFET am Gate betreibt. Über das Gate kann die Hauptleitung geöffnet und geschlossen werden. An dieser Leitung ist jeweils ein Widerstand angebracht der zu Ground (Erdung/Masse) (GND) führt. Dieser hat die Aufgabe das Gate bei fehlendem Signal vom PWM-Pin auf einen definierten Wert zu regulieren, welcher als GND bezeichnet wird. In der Parallelschaltung sind vor jedem der MOSFETs die zwei Peltier-Elemente in Reihe geschaltet. Das bedeutet, dass hier ein Low-Side-Schalter verwendet wurde. Dies vereinfacht den Aufbau der Schaltung, da der Bezug zu GND der gleiche ist, wie bei der Steuerschaltung. Im Gegensatz dazu wäre die Beschaltung als High-Side-Schalter komplizierter, weil der Bezug auf der Stromquelle VCC liegen würde und mit einer Ersatzschaltung die unterschiedlichen Potenziale die dadurch entstehen abgefangen werden müssten. Wie damit implizit erwähnt, liegen die Peltier-Elemente an der Source des MOSFET und der Drain liegt an GND.

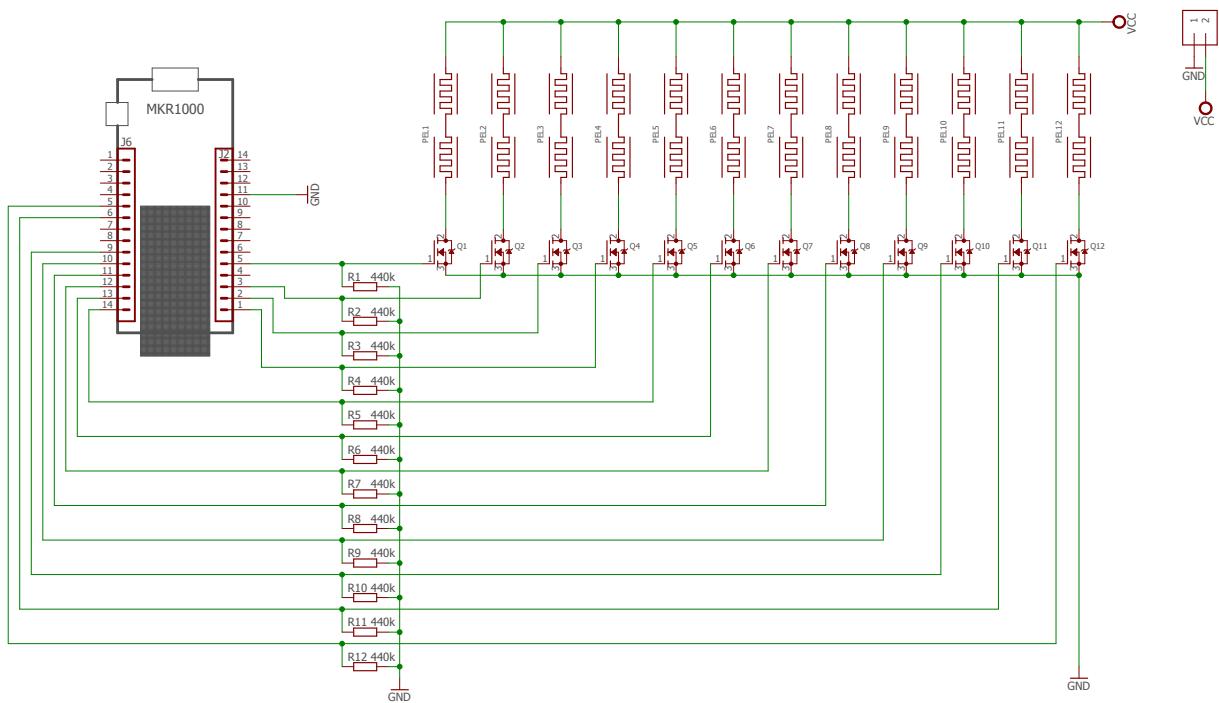


Abbildung 4.6: Schaltplan des Prototypen.

In Tabelle 4.1 sind die verwendeten Bauteile mit ihren Bezeichnungen und ihren wichtigsten Daten aufgelistet. Für die Auswahl der Bauteile wurde ein angemessenes Peltier-Element ausgewählt und an diesem die restlichen Bauteile dimensioniert. Eine wichtige Voraussetzung war, dass die MOSFETs von den Pins des *MKR1000* voll geöffnet werden können und zusätzlich die benötigte Leistung für zwei in Reihe geschaltete Peltier-Elemente an der Drain zu Source

Leitung aushalten.

| Bauteil          | Bezeichnung             | Wichtige Daten   |
|------------------|-------------------------|--|
| MOSFETs          | RFP12N10L               | $I_D = 12$ Ampere (A)<br>$V_{DS} = 100$ V<br>$V_{GS(TH)} = 1 - 2$ V  |
| Widerstände      | Kohleschicht-Widerstand | $R = 440$ kΩ   |
| Peltier-Elemente | 3504                    | $I_{max} = 4$ A<br>$U_{max} = 4,2$ V<br>$\Delta T_{max} = 67$ °C<br>$Q_{cmax} = 20,4$ Watt (W)<br>$R = 0,75$ Ω |
| Netzteil         | HCS 3300 USB            | Output = 1 - 16 VDC<br>Strom = 0 - 30 A  |

Tabelle 4.1: Auflistung der verwendeten Bauteile mit wichtigen Schlüsselinformationen.

### 4.2.3 Ausarbeitung der Platine

Die Platine wurde in einem iterativen Prozess ausgearbeitet. Nach einigen Funktionstests der Schaltung auf Steckplatten und anschließender Verlötung auf einer Europlatine wurde ein finales Platinenlayout entwickelt. Dieses wurde in Zusammenarbeit mit dem Elektrotechnik- und Theoretischen Informatik-Bereich der *Hochschule Osnabrück* auf eine Platine geätzt. Die fertige Platine ist in Abbildung 4.7 dargestellt.

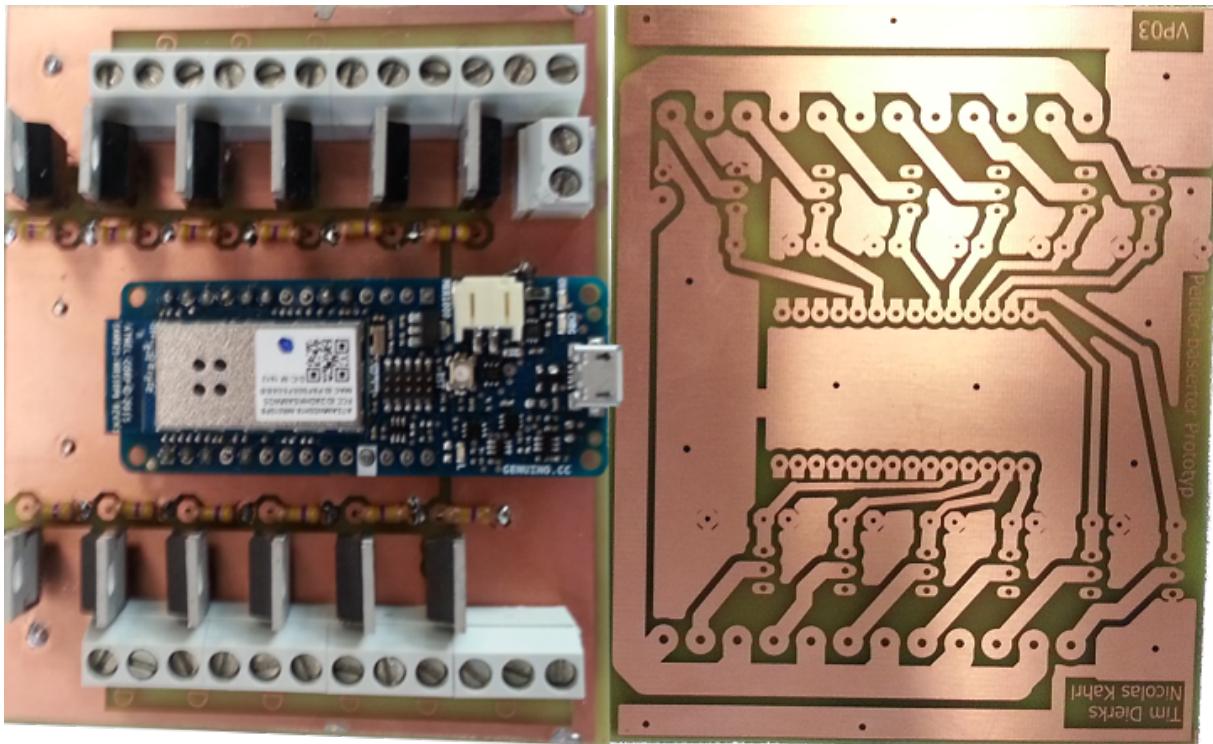


Abbildung 4.7: Die fertige geätzte und verlötete Platine.

Für die Entwicklung des Layouts wurde die freie Version der Software *EAGLE* verwendet. Diese freie Version besitzt kleinere Einschränkungen wie Platinengröße und Schichtenanzahl. Dies hat für dieses Projekt jedoch keine Relevanz, da die Größe der Schaltung innerhalb der Begrenzung liegt. Zusätzlich ist es bei dem eingesetzten Ätzverfahren der *Hochschule Osnabrück* nicht möglich mehr als zwei Schichten auf eine Platine aufzutragen, was mit der *EAGLE* Einschränkung einher geht.

Bei der Freiverlotung der ersten Platine wurde keine räumliche Trennung von großen und kleinen Strömen vorgenommen, dies führte zu starken Schwingungen innerhalb der Schaltung, die durch parasitäre Kapazitäten bzw. Induktivitäten ausgelöst wurden. Aus diesem Grund wurde bei der Entwicklung des Layouts besonders auf die Leiterbahnführung geachtet. Folgende Punkte wurden dabei berücksichtigt [Len04]:

1. Die Fläche der Laststromleitung ist kleinstmöglich zu halten.
2. Die Signal-/Steuerleitungen sind räumlich von der Laststromleitung zu trennen.
3. Die Masse der Signal-/Steuerleitung und die Masse der Laststromleitung sind voneinander zu trennen.
4. Die Laststromleitung sollte so breit wie möglich sein.

Diese Hauptkriterien haben das Layout der Schaltung, das in Abbildung 4.8 gezeigt wird, bestimmt. Im Layout ist die Laststromleitung gelb eingefärbt, um die Fläche der Leitung besser kenntlich zu machen. Die grünen Pads, die links und rechts vertikal angeordnet sind, dienen als Anschlüsse der Peltier-Module, die physisch nicht dichter zusammengerückt werden können.

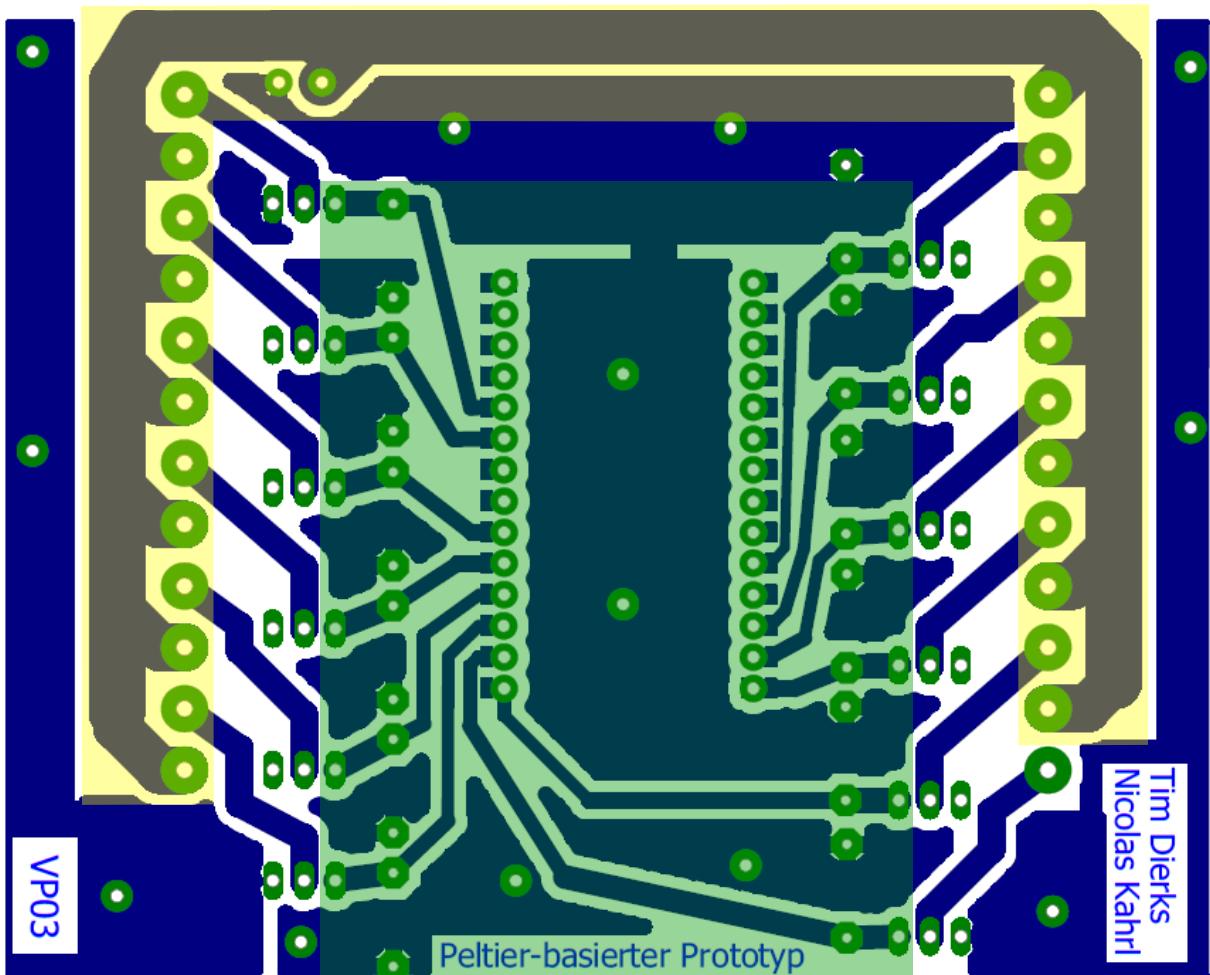


Abbildung 4.8: Layout der Platine des Prototypen, obere Schicht. Der gelbe Bereich sind die Laststromleitungen und der grüne Bereich sind die Steuerleitungen.

Der grüne Bereich markiert den Steuerstromkreis. Dort ist der *MKR1000* in der Mitte angeordnet und besitzt Leitungen von den Pins über die Widerstände zum Gate Pad der MOSFETs. Eine klare Abtrennung dieser beiden Stromkreise ist an den farbigen Flächen zu erkennen. Diese Stromkreise treffen sich nur am schaltenden MOSFET, der sie voneinander trennt.

In Abbildung 4.9 wird die zweite Schicht der Platine dargestellt. Diese besteht hauptsächlich aus einer Masse-Ebene, die eine Abtrennung für beide Stromkreise hat. Diese Abtrennung lässt den Strom nur an einem relativ schmalen Übergang hindurch, sodass abfließende Ströme sich nicht gegenseitig beeinflussen können und dadurch in unerwünschte Schwingungen versetzen.

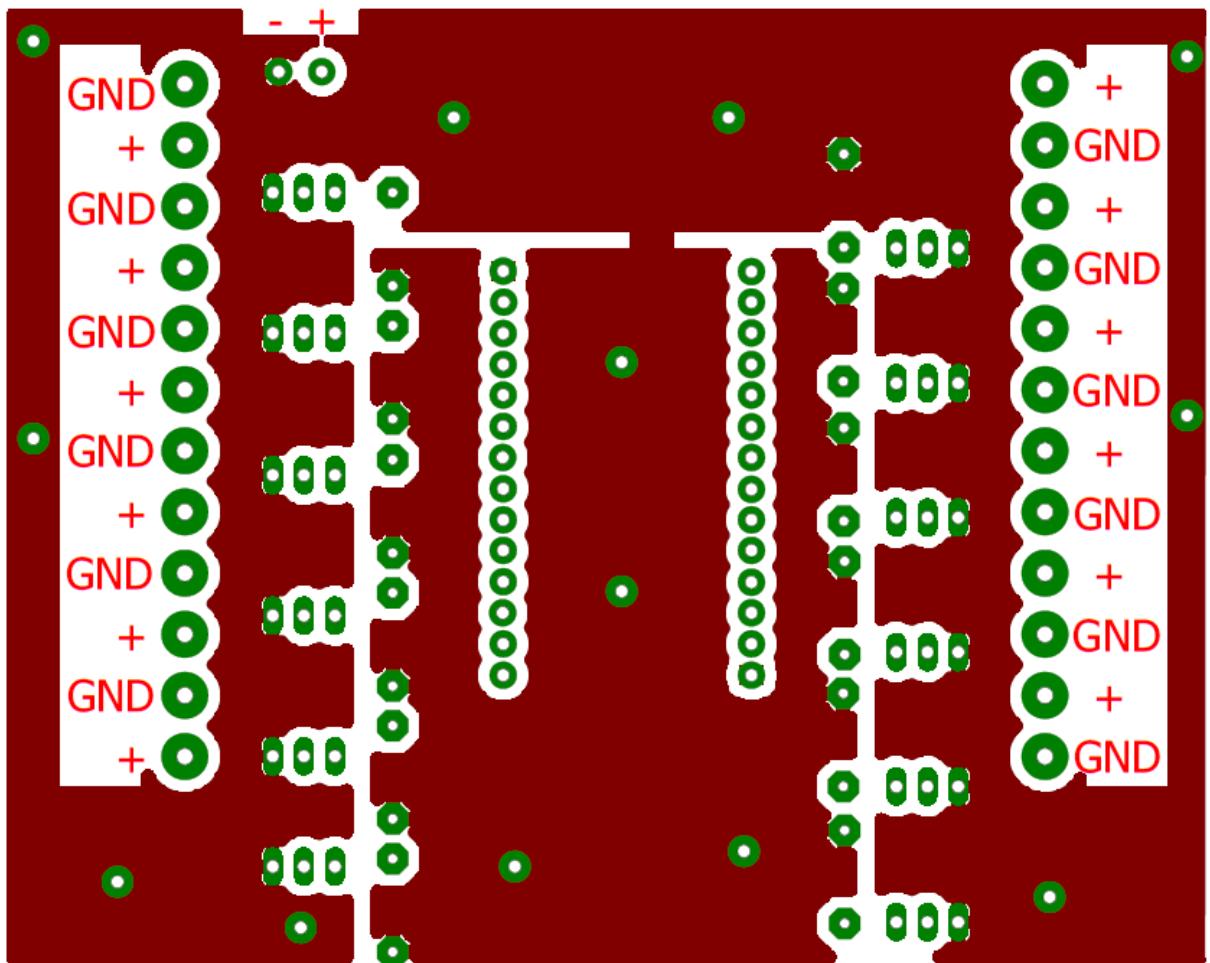


Abbildung 4.9: Layout der Platine des Prototypen, untere Schicht.

# 5 Steuerprogramm des Mikrocontrollers

## 5.1 Anforderungsanalyse für das Steuerprogramm

Das Steuerprogramm hat die Aufgabe, die in *Unity* berechneten und an den seriellen Port gesendeten Daten zu interpretieren und damit die Pins des *MKR1000* zu steuern. Über diese Daten muss es möglich sein, alle Funktionen abzurufen, die der Peltier-basierte Prototyp haben soll. Darunter fällt die Möglichkeit, unterschiedliche Temperaturen zu erzeugen und verschiedene Körperstellen unterschiedlich stark anzusprechen. Ein wichtiger Punkt ist eine wiederholte Überprüfung auf eine bestehende Verbindung zu *Unity*, um bei Ausfällen den Prototypen auszuschalten. Weitere Anforderungen sind die Regulierung der Temperatur der Peltier-Elemente, um eine verlängerte Verwendungslaufzeit zu erhalten. Außerdem sollte es möglich sein, Wärme und Kälte individuell einzustellen, da sich Temperaturwahrnehmung von Mensch zu Mensch unterscheidet. Ebenfalls sollten unterschiedliche Geschwindigkeiten bei der Ansteuerung der Peltier-Elemente einstellbar sein, sodass durch Tests überprüft werden kann, welche Geschwindigkeit am realistischsten wirkt.

Die Aufgaben des Steuerprogramms wurden analysiert und daraus folgende Pflicht- und Wunschkriterien definiert.

### 5.1.1 Pflichtkriterien

Das Steuerprogramm muss die Möglichkeit bieten,...

1. ...eine beliebige Anzahl an Peltier-Modulen aktivieren zu können.
2. ...Peltier-Module unterschiedlich stark ansteuern zu können.
3. ...beim Verbindungsabbruch zu *Unity* alle Peltier-Module automatisch zu deaktivieren.
4. ...einen allgemeinen Offset für Wärme und Kälte einzustellen zu können.
5. ...einen Offset für Kälte und Wärme für jede Körperstelle einzustellen zu können.
6. ...eine Zeit festlegen zu können, die die Dauer für das Erreichen der angegebenen Intensität bestimmt.
7. ...ohne Verzögerung alle Peltier-Module ausstellen zu können.

### 5.1.2 Wunschkriterien

1. Das Steuerprogramm soll die kalten Peltier-Elemente automatisch runter regulieren, um eine Überhitzung der Kühelemente zu verhindern.

## 5.2 Konzeption des Steuerprogramms

Das Steuerprogramm wurde für den *MKR1000* entwickelt und deshalb wurde die Programmiersprache C/C++ verwendet. Für die Kommunikation zwischen *Unity* und dem *MKR1000* wurde ein Protokoll erstellt. Der Mikrocontroller liest über Polling jeweils ein Zeichen pro Durchlauf des main loop vom angeschlossenen, seriellen Port ein. Daher ist das Protokoll für die zur Ansteuerung benötigten Daten so aufgebaut worden, dass immer ein führender Buchstabe gesendet wird. Anhand des Buchstabens entscheidet das Steuerprogramm, für welche Funktion die folgenden Daten gedacht sind. Ein Komma signalisiert das Ende eines Datenblocks. Der Aufbau und die Funktionen der einzelnen Befehle dieses Protokolls werden in Tabelle 5.1 erläutert.

| Führender Buchstabe       | Aufbau Datenblock  | Funktion  |
|---------------------------|--|---|
| $<\text{PORT\_LETTER}>^+$ | $<\text{PERCENTAGE\_VALUE}>$ ,   | Schaltet alle angegebenen Peltier-Elemente auf den angegebenen Wert PERCENTAGE_VALUE.<br>$\text{<PORT\_LETTER>} = \text{Buchstabe für bestimmtes Peltier-Modul (Zuweisung in Tabelle 5.2).}$<br>$^+ = \text{möglich mehr als ein Buchstaben anzugeben}$ |
| m                         | $<\text{PERCENTAGE\_VALUE}>$ ,   | Schaltet alle warmen Peltier-Elemente auf den angegebenen Wert PERCENTAGE_VALUE.  |
| n                         | $<\text{PERCENTAGE\_VALUE}>$ ,   | Schaltet alle kalten Peltier-Elemente auf den angegebenen Wert PERCENTAGE_VALUE.  |
| o                         | $<\text{PERCENTAGE\_VALUE}>$ ,   | Schaltet alle Peltier-Elemente auf den angegebenen Wert PERCENTAGE_VALUE.   |
| p                         | $<\text{HEAT\_1}><\text{HEAT\_2}>$<br>$<\text{COLD\_1}><\text{COLD\_2}>$ | Verändert den Maximalwert der kalten und warmen Peltier-Module.<br>$\text{HEAT\_1} = \text{Zehner Ziffer für Offset Wert}$<br>$\text{HEAT\_2} = \text{Einer Ziffer für Offset Wert}$<br>Kalt ist äquivalent.  |

|   |   |   |
|---|---|---|
| s | - | Wechselt zwischen sofortigen anschalten und langsam Erhöhen für kalte Peltier-Module. |
| t | - | Abfrage ob Mikrocontroller angeschlossen ist. Sendet 1 zurück.                        |
| v | - | Alle Pins die selektiert sind werden deelektiert.                                     |
| x | - | Schaltet sofort alle Peltier-Module aus.  |
| y | - | Gibt alle Werte der Pins auf den seriellen Port aus.                                  |

Tabelle 5.1: Auflistung der Protokollbefehle.

Der wichtigste Befehl ist <PORT\_ LETTER><sup>+</sup>, da über diesen jedes der Peltier-Module beliebig angesteuert werden kann. Dabei sind alle gesendeten Werte Prozentwerte zwischen 0 % und 100 %. Die führenden Buchstaben wurden den zwölf Pins zugewiesen, die an den unterschiedlichen Peltier-Elementen angeschlossen sind. In Tabelle 5.2 ist diese Zuordnung dargestellt. Zusätzlich sind die Körperstellen aufgelistet. Diese wurden zuerst arbiträr hinzugefügt und nach den Evaluationstests in Kapitel 6 angepasst.

|                 | Pin | Kalt | Pin | Warm |
|-----------------|-----|------|-----|------|
| Unterarm rechts | 0   | a    | 1   | b    |
| Oberarm rechts  | 2   | c    | 3   | d    |
| Nacken          | 4   | e    | 5   | f    |
| Unterarm links  | 6   | g    | 7   | h    |
| Oberarm links   | 8   | i    | 10  | j    |
| Bauch           | 18  | k    | 19  | l    |

Tabelle 5.2: Zuordnung der Körperstellen zu Buchstaben und den passenden Pins.

Die Befehle m, n und o sind für effizienteres Testen gedacht und führen lediglich den Befehl <PORT\_ LETTER><sup>+</sup> für jedes warme (m), kalte (n) oder alle (o) Peltier-Elemente aus. p dient

dazu, dass der Benutzer über *Unity* die Möglichkeit hat, individuell die maximalen Temperaturen einzustellen. Dabei kann der Maximalwert um 25% nach oben oder unten verschoben werden. Diese Begrenzung dient dazu Verbrennungen durch zu heiß eingestellte Peltier-Elemente zu verhindern. Die restlichen Befehle besitzen keinen Datenblock und sind für verschiedene kleinere Funktionen gedacht. Der Befehl `t` ist hervorzuheben, da er für einen initialen Handshake benötigt wird. Mit diesem kann *Unity* verifizieren, dass der richtige serielle Port gefunden wurde, wenn eine 1 zurückgesendet wird.

Das Steuerprogramm selbst besteht aus einer einzelnen Hauptklasse, die in der Arduino IDE *Sketch* genannt wird. Diese besitzt, wie eingangs erwähnt, einen zentralen `main loop`, der während der Laufzeit kontinuierlich durchlaufen wird. Dieser `loop` ist in die folgenden zwei Bereiche aufgeteilt: den *Leseblock*, der ausgeführt wird, sobald etwas am seriellen Port gelesen wird, und den *Timerblock*, welcher zeitabhängige Funktionen ausführt. Diese Bereiche werden im Listing 1 gezeigt.

```
void loop() {
    //Leseblock
    if (Zeichen auf serieller Port) {
        /* Verarbeite Befehl von Unity */
    }
    //Timerblock
    /* Checke alle Zeitbasierten Funktionen */
}
```

Listing 1: main loop

Da die 12 Pins der Peltier-Elemente relativ viele Informationen benötigen, wurde ein `Struct` verwendet. Dieser kann nicht über eine Hilfsklasse erzeugt werden, da auf dem Mikrocontroller nur ein *Sketch*, das genau eine Klasse repräsentiert, geladen werden kann. Im Folgenden Listing 2 ist die Definition des `Struct` dargestellt.

```
typedef struct port port;
struct port {
    const int nr;           //Pin nummer
    const char type;        //der Typ des Peltier-Elementes, das angeschlossen
                           //ist. (kalt/warm)
    const int maxOffset;    //der Offset fuer das maximale Powerlevel
    int powerLevel;         //das momentane Powerlevel
    int prevPowerLevel;    //das vorherige Powerlevel
    bool isActive;          //ob der Pin aktiviert ist oder nicht
    long activeTime;        //Zaehler fuer OVERHEAT_TIME_LIMIT
    int cooldownTime;       //Status des Abkuehlprozesses
```

```

    smoothIncrease *smoothing; //Struct fuer die Daten, wenn das
    Powerlevel zeitbasiert Ansteigt
    int overallRuntime; //Zaehlt die Zeit, die das Element an war
    bool inCooldownPhase; //wenn overallRuntime ueber einen Schwellwert
    geht, zeigt es ob es in der Abkuehlphase ist
};

}

```

Listing 2: Struct Definition.

Die drei konstanten Variablen `nr`, `type` und `maxOffset` können während der Laufzeit nicht verändert werden und müssen daher vor der Initialisierung der Ports angepasst werden. Der Hauptgrund für die Variabilität dieser Variablen ist ein möglicher Austausch der verwendeten Körperstellen, da diese sich im Laufe des Projektes noch verändern können. Zudem muss die Möglichkeit der Anpassung der Ports gewährleistet sein, da die Platine während des Projekts teilweise verändert wurde. Zudem können bei einem Folgeprojekt auf diese Weise einfach Veränderungen der Hardware vorgenommen werden. Die restlichen Variablen des Structs aus Listing 2 werden zur Laufzeit benötigt und geben zum einen das momentane Power Level in Prozent an und zum anderen die Zeit, die der Pin bereits aktiv ist und den Abkühlstatus des Pins. Wichtig ist die Variable `*smoothing`, die ein weiteres Struct namens `smoothIncrease` speichern kann. Diese Variable wird benötigt, wenn der Pin von seinem vorherigen Wert auf einen neuen Wert wechselt und gleichzeitig das langsame Erhöhen mit dem Befehl `s` aktiviert wurde. Der Struct `smoothIncrease` steuert dieses langsame Erhöhen und wird danach wieder gelöscht.

Der Header besteht aus Konstanten, die vom Benutzer einstellbar sind und globale Werte angeben, die für alle Pins gelten. In der folgenden Tabelle 5.3 sind diese mit ihren Funktionen aufgelistet.

| Variable            | Vorgesehener Wert | Funktion   |
|---------------------|-------------------|--|
| SAFETY_TIME_OUT     | 5000 ms           | Zeit in Millisekunden, nachdem alle Pins auf null gesetzt werden, wenn kein Signal von <i>Unity</i> kommt.                       |
| OVERHEAT_TIME_LIMIT | 3000 ms           | Zeit in Millisekunden, die ein warmer Pin über dem OVERHEAT_THRESHOLD sein darf. Danach wird der Pin auf den Wert runtergesetzt. |

|                          |         |  |
|--------------------------|---------|--|
| OVERHEAT_THRESHOLD       | 50      | Grenzwert auf den warme Pins zurück gesetzt werden, wenn OVERHEAT_TIME_LIMIT erreicht wird, damit sie keine Verbrennungen auslösen können. |
| COOLDOWN_TIME_LIMIT      | 6000 ms | Zeit in Millisekunden, die mindestens vergehen muss, bis Pins wieder höher als OVERHEAT_THRESHOLD gesetzt werden dürfen.                   |
| SMOOTH_INCREASE_TIME     | 5000 ms | Zeit in Millisekunden, die es dauert, vom vorherigen Wert auf einen neuen zu wechseln. Dies ist nur für kalte Pins implementiert.          |
| MAX_HEAT                 | 64      | Maximaler Wert bei 100 % Auslastung für heiße Pins.  |
| MAX_COLD                 | 100     | Maximaler Wert bei 100 % Auslastung für kalte Pins.  |
| INTERVAL_TIMER           | 1000 ms | Intervall in Millisekunden in dem geprüft wird, ob ein Pin zu lange aktiv ist und überhitzt.   |
| OVERALL_HEAT_THRESHOLD   | 1000    | Sobald dieser Wert überschritten wird, gilt ein Pin als zu heiß und wird runter reguliert.   |
| OVERALL_HEAT_POWER_LIMIT | 45      | Der Wert in %, auf den der Pin gesetzt wird, sobald er OVERALL_HEAT_THRESHOLD übersteigt.  |

Tabelle 5.3: Liste der einstellbaren Konstanten.

## 5.3 Implementierung des Steuerprogramms

### 5.3.1 Leseblock

Der vorher erwähnte *Leseblock* des `main loop` überprüft, welches Zeichen eingelesen wurde und führt danach die zugehörige Funktion des Befehls aus. Diese bestehen hauptsächlich aus einfachen Veränderungen einer Variable. Der Hauptbefehl ist in seiner Funktionsweise komplexer und kann aus einer Kombination der Buchstaben der Pins von a bis l bestehen. Jedes Zeichen des Hauptbefehls wird eingelesen und überprüft. Falls es sich bei einem Zeichen um die Nummer eines Pin handelt, wird bei diesem die Variable `isActive`, die in Listing 2 aufgeführt ist, gesetzt. Wenn die Ziffern, die den neuen Prozentwert des Pins definieren, eingelesen sind, wird der neue Wert für alle aktiven Pins gesetzt. Um überhöhte Werte zu verhindern, wird dieser Wert davor zwischen 0 und 99 eingegrenzt und danach auf den Bereich von 0 bis `MAX_HEAT/MAX_COLD` übertragen. Dies ist notwendig, da die PWM-Pins einen Bereich zwischen 0 und 255 besitzen, der nicht komplett ausgenutzt werden kann. Steht der Wert auf 255, sind die MOSFETs vollständig geöffnet und die Peltier-Elemente werden zu heiß bzw. kalt. Um dies zu verhindern wurde eine Grenze für kalt und warm verwendet. Dabei wird zwischen kalt und warm nochmals unterschieden, da diese unterschiedlich viel angesteuert werden müssen.

### 5.3.2 Timerblock

Alle vom *Timerblock* abdeckten Funktionen, haben einen eigenen Timer. Diese verwenden als Grundlage die Mikrocontroller-Funktion `millis()`, welche die Zeit, die der Mikrocontroller schon angeschaltet ist, in Millisekunden zurück gibt. Der in Listing 3 beschriebene Aufbau, wird in jedem Durchgang des `main loop` abgefragt.

```
if ( letzterAufruf + INTERVAL_ZEIT < millis() ) {  
    letzterAufruf = millis()  
    /* Fuehre Funktion aus */  
}
```

Listing 3: Aufbau des Timers

`INTERVAL_ZEIT` ist eine Konstante, die im Header festgelegt wird und die Länge eines Intervalls beschreibt. Die Variable `letzterAufruf` gibt an, wann zuletzt die Funktion aufgerufen wurde. Dadurch kann die Länge des Intervalls an der dafür definierten Konstante im Header angepasst werden. Dafür besitzen alle Funktionen des *Timerblocks*, die in Tabelle 5.3 mit ihrer Zeitangabe Aufgelistet sind, eine Konstante.

Der Timer für die Funktion, die die kalten Peltier-Elemente langsam kälter werden lässt, wurde abgewandelt, indem die in Listing 3 dargestellte `if`-Anweisung um eine Konstante er-

weitert wurde. Diese, im Header einstellbare Konstante, definiert die Dauer der Änderung vom vorherigen Wert auf den neuen. Die Konstante im Timer wird durch 100 dividiert, da das Ansteigen auf den Maximalwert in konkreten Prozentschritten durchgeführt wird. Dadurch wird der Anweisungsblock hundertmal in der festgelegten Zeit durchlaufen und dabei das Power Level jeweils um ein Hundertstel erhöht. Zusätzlich kann diese Funktion vom Benutzer über einen Befehl ausgestellt werden, indem die Konstante des Timers vor der Division mit dem Boolean, der angibt ob die Funktion aktiviert ist oder nicht, multipliziert wird. Dadurch wird die Konstante bei `false` automatisch null und der Endwert kann ohne Verzögerung gesetzt werden.

Die Funktion für den Überhitzungsschutz wird in einem kleinen Intervall ausgeführt und verändert die Variable `overallRuntime`, aus dem Struct des Pins, abhängig vom Power Level des jeweiligen Pins. Mit dem Richtwert von 50% für das Power Level wird dieser Wert um die Abweichung vom Richtwert verringert oder erhöht. Beispielsweise wird bei einem Power Level von 45% `overallRuntime` um fünf verkleinert und bei einem Power Level von 66% um 16 erhöht. Übersteigt nun der Wert von `overallRuntime` die Konstante `OVERALL_HEAT_THRESHOLD`, gilt das Peltier-Element als überhitzt und wird runter reguliert.

# 6 Validierung der Thermorezeptionszonen

## 6.1 Anforderungsanalyse für die Thermorezeptionszonen

Die Thermorezeptionszonen sind die Körperstellen an denen Peltier-Module angebracht werden. Diese Körperstellen müssen spezifische Bedingungen erfüllen, damit sie als Thermorezeptionszone in Frage kommen. Bei der Auswahl der geeigneten Körperstellen ist zu berücksichtigen, dass der Peltier-basierte Prototyp für sechs Körperstellen entwickelt wurde. Verschiedene Körperstellen können Temperatur unterschiedlich intensiv wahrnehmen. Daher ist bei der Auswahl einer Körperstelle am wichtigsten, in welchem Maße sie diese wahrnehmen kann. Für eine gleichmäßige Verteilung der Temperatur müssen die sechs Stellen gleichmäßig auf dem Körper verteilt sein. Bei dieser Verteilung ist jedoch zu beachten, dass keine, für dieses Projekt zeitlich realisierbare, Möglichkeit besteht die Position der Peltier-Module an den Beinen zu berechnen und daher dort keine angebracht werden können. Zusätzlich ist der Tragekomfort zu berücksichtigen, da sich ein unangenehmes oder umständliches Anbringen bzw. Tragen der Peltier-Module negativ auf die Immersion auswirkt.

Die Anforderungen der Thermorezeptionszonen wurden analysiert und daraus folgende Pflicht-, und Wunschkriterien definiert.

### 6.1.1 Pflichtkriterien

Die Thermorezeptionszonen müssen ...

1. ...schnell auf Temperaturveränderungen reagieren.
2. ...die, durch Peltier-Module erzeugte, Temperatur spüren können.
3. ... nicht zu eng aneinander liegen, um die Temperatur gleichmäßig auf dem Oberkörper verteilen zu können.
4. ...auf Körperstellen angebracht sein, deren Position über das Tracking der *HTC Vive* berechnet werden können.
5. ...an Körperstellen angebracht sein, die komfortabel beim Tragen der Peltier-Module sind.

### 6.1.2 Wunschkriterien

Die Thermorezeptionszonen sollen an Körperstellen sein, ...

1. ...an denen die Peltier-Module ohne großen Aufwand angebracht werden können.
2. ...die nicht mit der Hardware der *HTC Vive* interferieren.

## 6.2 Ausarbeitung potenzieller Thermorezeptionszonen

Um potenzielle Thermorezeptionszonen zu identifizieren musste zuerst nachgeforscht werden, welche Stellen am Körper eine hohe Verteilung an Thermorezeptoren für Wärme und Kälte besitzen. Eine vollständige Liste der Körperstellen und ihrer Anzahl an Thermorezeptoren ist in Kapitel 2.5 in der Tabelle 2.1 aufgeführt. Aus dieser Tabelle können bestimmte Stellen, die für dieses Projekt nicht in Frage kommen, direkt ausgeschlossen werden. Körperstellen wie die Fußsole, Fingerrücken, Mund oder Nase sind entweder zu klein für die Peltier-Module oder an Positionen des Körpers, an denen die Peltier-Module nicht angebracht werden können. Des Weiteren sind Stellen an den Beinen nicht relevant, da ihre Position innerhalb der VE nicht ohne komplizierte und zeitaufwändige IK berechnet werden kann. In Tabelle 6.1 sind die verbleibenden Körperstellen, die potenzielle Thermorezeptionszonen sind, und deren Thermorezeptoren aufgelistet. Die Anzahl der Rezeptoren ist wichtig, da die Peltier-Elemente relativ klein sind und darauf geachtet werden muss, dass die an der Haut anliegende Temperatur gespürt werden kann. Dies ist bei den vorliegenden Körperstellen jedoch kein Problem, da die Anzahl der Rezeptoren ausreicht, um die Temperatur zu spüren, die durch die Peltier-Module erzeugt wird. Auch auf Bauch und Rücken, für die keine Angaben für Wärmerezeptoren in der Literatur zu finden waren, reicht die Größe der Peltier-Module aus. Dies konnte durch Selbsttests und spätere Verifizierung durch eine Versuchsreihe, auf die im folgenden Kapitel 6.3 eingegangen wird, erarbeitet werden.

| Körperstelle | Kälterezzeptoren pro $cm^2$ | Wärmerezzeptoren pro $cm^2$ |
|--------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Stirn        | 5,5–8                       | 2                           |
| Brust        | 9–10,2                      | 0,3                         |
| Bauch        | 8–12,5                      | -                           |
| Rücken       | 7,8                         | -                           |
| Oberarm      | 5–6,5                       | 0,3                         |
| Unterarm     | 6–7,5                       | 0,3–0,4                     |
| Handrücken   | 7,4                         | 0,5                         |

Tabelle 6.1: Körperstellen, die als Thermorezeptionszone dienen können.

Da der Rücken relativ groß ist, kann er als zwei Thermorezeptionszonen angesehen werden. Aus diesem Grund wurde der Rücken in Nacken und Rücken unterteilt. Im Gegensatz zum Unterarm und Handrücken, die zu einer Körperstelle zusammengefasst wurden. Da Handrücken und Unterarm relativ dicht beieinander liegen, haben sie den Vorteil, dass beide Stellen gleichzeitig temperiert werden können, ohne dass es unrealistisch wirkt. Die Arme sind für die Kör-

perstellen doppelt zu zählen, da sowohl für den linken als auch für den rechten Arm jeweils ein Peltier-Modul benötigt wird.

Die daraus entstehenden potenziellen Thermorezeptionszonen sind in Abbildung 6.1 visualisiert. In dieser ist die genaue Positionierung der einzelnen Peltier-Module, von denen für jede Körperstelle jeweils zwei vorgesehen sind, hervorgehoben. Aus Gründen der Übersicht sind diese in der Grafik durch eine schwarze Linie verbunden. Bei der Positionierung musste darauf geachtet werden, dass die Peltier-Module starr und etwas kantig sind. Daher sollten sie auf möglichst flachen Stellen befestigt werden, um eine möglichst große Auflagefläche auf der Haut zu gewährleisten und diese nicht zu verletzen.

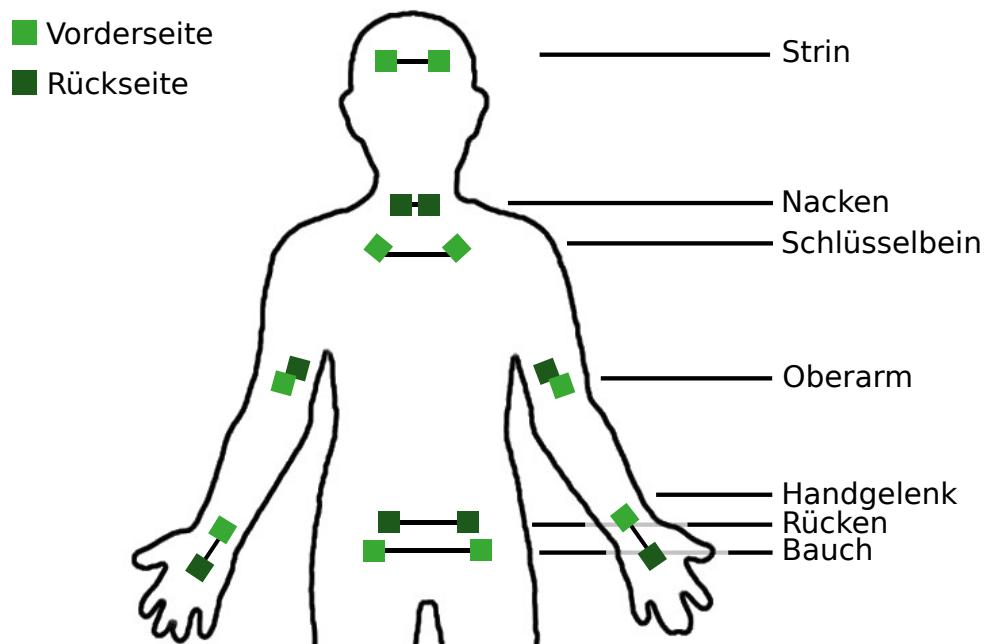


Abbildung 6.1: Mögliche Thermorezeptionszonen und ihre Positionierung auf dem Körper.

Die Möglichkeit für Konflikte zwischen der *HTC Vive* Hardware und den Peltier-Modulen, bestehen beim Handrücken/Unterarm und an der Stirn. Beim Handrücken könnte die Befestigung der Module das Halten der Motion-Controller beeinträchtigen. Diese Befestigungen können jedoch, wenn nötig, angepasst werden. Ein größeres Problem besteht bei der Stelle an der Stirn bzw. der Schläfe des Benutzers, da das HMD einen großen Teil des Gesichts bedeckt und somit die Kopfgröße der jeweiligen Person bestimmt, ob beides gleichzeitig befestigt werden kann.

Welche der gewählten Körperstellen verwendet werden können, wurde durch eine Versuchsreihe mit Testpersonen im folgenden evaluiert.

## 6.3 Ausarbeitung des Versuchsaufbaus

Um zu überprüfen, welche der in Abbildung 6.1 dargestellten Körperstellen als Thermorezeptionszonen am geeignetsten sind, wurde eine Versuchsreihe mit zehn Personen durchgeführt. Dabei wurden die möglichen Komplikationen durch die *HTC Vive* Hardware vernachlässigt. In den Versuchen wurden Reaktionszeiten und Intensitäten in der Wahrnehmung getestet. Zuerst werden die Körperstellen nacheinander untersucht und die Testperson bekommt Fragen vom Testleiter gestellt. Die Zuordnung der Antworten auf die Fragestellungen wurden mithilfe eines Skalen-Schemas erhoben, um neben der Reliabilität und der Objektivität auch die Vergleichbarkeit unter den Testpersonen zu erhöhen. Eine Auswertung kann somit über Durchschnittswerte schnell und unkompliziert vorgenommen werden. Der dazu entwickelte Fragenkatalog ist in Abbildung 6.2 dargestellt.

| Fragenkatalog:          |  |                       |         |       |        |        |       |               |
|-------------------------|--|-----------------------|---------|-------|--------|--------|-------|---------------|
| Nr.                     | Fragestellung:   | Antworten Testperson: |         |       |        |        |       |               |
| Einzelne Körperstellen: |  | Handgelenk            | Oberarm | Stirn | Nacken | Rücken | Bauch | Schlüsselbein |
| 0.                      | Wie liegt das Element an der Körperstelle?<br>(Angenehm/unangenehm)              |                       |         |       |        |        |       |               |
| Wärme:                  |  |                       |         |       |        |        |       |               |
| 1.                      | Ab wann spürst du die Wärme?   |                       |         |       |        |        |       |               |
| 2.                      | Auf einer Skala von 1 bis 5, wie deutlich spürst du die Wärme?                   |                       |         |       |        |        |       |               |
| 3.                      | Auf einer Skala von 1 bis 5, wie würdest du die Wärme einstuften?                |                       |         |       |        |        |       |               |
| 4.                      | Auf einer Skala von 1 bis 5, wie weit breitet sich die Wärme aus?                |                       |         |       |        |        |       |               |
| Kälte:                  |  |                       |         |       |        |        |       |               |
| 5.                      | Ab wann spürst du die Kälte?   |                       |         |       |        |        |       |               |
| 6.                      | Auf einer Skala von 1 bis 5, wie deutlich spürst du die Kälte?                   |                       |         |       |        |        |       |               |
| 7.                      | Auf einer Skala von 1 bis 5, wie würdest du die Kälte einstuften?                |                       |         |       |        |        |       |               |
| 8.                      | Auf einer Skala von 1 bis 5, wie weit breitet sich die Kälte aus?                |                       |         |       |        |        |       |               |
| TGI:                    |  |                       |         |       |        |        |       |               |
| 9.                      | Was spürst du gerade?  |                       |         |       |        |        |       |               |
| 10.                     | Auf einer Skala von 1 bis 5, wie stark ist der Schmerz?                          |                       |         |       |        |        |       |               |
| Insgesamt:              |  |                       |         |       |        |        |       |               |
| 11.                     | Auf einer Skala von 1 bis 5, wie würdest du die Körperstelle insgesamt bewerten? |                       |         |       |        |        |       |               |

Abbildung 6.2: Fragenkatalog für die Versuchsreihe zur Evaluation der Thermorezeptionszonen.

Die Befragung wurde in folgende Blöcke unterteilt: Nach Anbringen des Peltier-Moduls an einer Körperstelle wird gefragt, wie dieses auf der Haut anliegt und wie der Tragekomfort ist. Danach kommen die beiden Hauptblöcke des Fragenkatalogs zur Wärme- und Kälteempfindung. Dabei wird zuerst die Reaktionsgeschwindigkeit untersucht, indem die Zeit mit einer Stoppuhr bis zum spüren der Temperatur gestoppt wird. Die folgenden Fragen behandeln, wie deutlich die Temperatur spürbar ist, wie hoch die Temperatur eingestuft wird und wie sich die Temperatur ausbreitet. Die Testperson musste diese Fragen jeweils mit Hilfe einer bipolaren Skala von eins bis fünf beantworten. Die verwendeten Skalen sind im Anhang B.1 zu finden. Der dritte Block umfasst eine Befragung über die TGI, um zu testen, in welchem Maß die Körperstelle für diesen geeignet ist. In diesem Block werden die Empfindungen der Testperson

erfragt. Diese Beschreibungen wurden vom Testleiter protokolliert. Die Frage über die Ausprägung des Schmerzes wird ebenfalls auf einer Skala von eins bis fünf bewertet und musste nur dann gestellt werden, falls wirklich Schmerz verspürt wurde. In der letzten Frage wird die Testperson nach einer subjektiven Bewertung der einzelnen Körperstellen gefragt. Diese Frage wird am Ende des Versuchs gestellt, nachdem alle Körperstellen durchgearbeitet wurden, und die Körperstellen nochmal der Reihe nach durchgegangen.

## 6.4 Versuchsdurchführung

Die Versuche wurden mit jeweils einer Testperson durchgeführt. Darüber hinaus nahm nur der Testleiter am Versuch teil. Der Testleiter hat, neben dem Anbringen der Peltier-Module und dem Einstellen der Temperaturen, die Antworten der Testperson protokolliert. Diese wurden bis auf Alter und Geschlecht der Testperson anonymisiert. Die Versuchsreihe selbst wurde in der *Virtual Reality Area* an der *Hochschule Osnabrück* durchgeführt. Dabei kam der Peltier-basierte Prototyp zum Einsatz, der über die Arduino IDE gesteuert wurde. Zur Befestigung der Peltier-Module an den Körperstellen wurden die vorher entwickelten elastischen Riemen verwendet.

Damit die Ergebnisse nicht durch Restwärme an den Peltier-Modulen verfälscht werden, wurden nach jeder Körperstelle die verwendeten Peltier-Module ausgetauscht, sodass sie zwischen den Versuchsteilen abkühlen konnten. Als weitere Maßnahme gegen Ergebnisverfälschung wurden bei der einen Hälfte der Testpersonen zuerst die Wärme und dann die Kälte und bei der anderen Hälfte zuerst die Kälte und dann die Wärme getestet. Zusätzlich wurde jeweils zwischen den einzelnen Blöcken eine kleine Pause gemacht, damit sich die Körperstellen wieder akklimatisieren konnten.

## 6.5 Auswertung der Versuchsergebnisse

Die Versuchsreihe wurde mit insgesamt zehn Personen durchgeführt, von denen zwei weiblich und acht männlich waren und deren Durchschnittsalter bei 25 Jahren lag. Mit den Ergebnissen der Testpersonen wurde ein Durchschnittswert für jede Frage und jede Körperstelle berechnet. Die Durchschnittswerte der drei Fragen für Wärme sowie Kälte, die über die Skalen beantwortet wurden, sind zum direkten Vergleich der Körperstellen im Graphen 6.3 dargestellt. In diesem Graphen ist zu erkennen, dass allgemein die Bewertung bei der Kälte etwas höher ausfällt als bei der Wärme. Nur bei der Ausbreitung der Temperatur ist kalt häufiger schlechter bewertet worden. Jedoch sind insgesamt für jede Körperstelle die Bewertung der Temperaturen ungefähr im gleichen Bereich. Beim vergleichen der einzelnen Körperstellen, ist zu erkennen, dass besonders das Schlüsselbein vergleichsweise niedrige Bewertungen bekommen hat. Ebenso ist

auch die Stirn im unteren Bereich anzusiedeln.

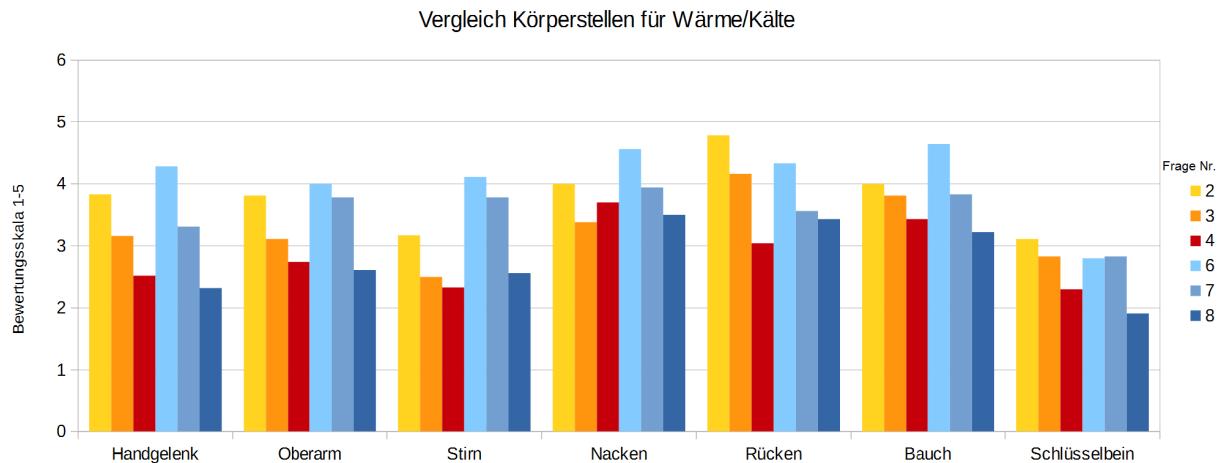


Abbildung 6.3: Vergleich der Temperaturwahrnehmung an den Körperstellen aller Probanden.

Bei den Reaktionszeiten sind relativ große Unterschiede zwischen warm und kalt zu erkennen. Diese sind in Graph 6.4 dargestellt und es wird deutlich, dass die Reaktionszeit bei Kälte geringer ist. Durchschnittlich brauchten die Testpersonen eine Sekunde um Kälte zu spüren. Im Gegensatz dazu wurde die schnellste Reaktionszeit bei Wärme mit 2,5 Sekunden am Rücken gemessen. Diese Ergebnisse lassen sich auf die Anzahl der Thermorezeptoren zurück führen, da es deutlich mehr Kälte- als Wärmerezeptoren gibt.

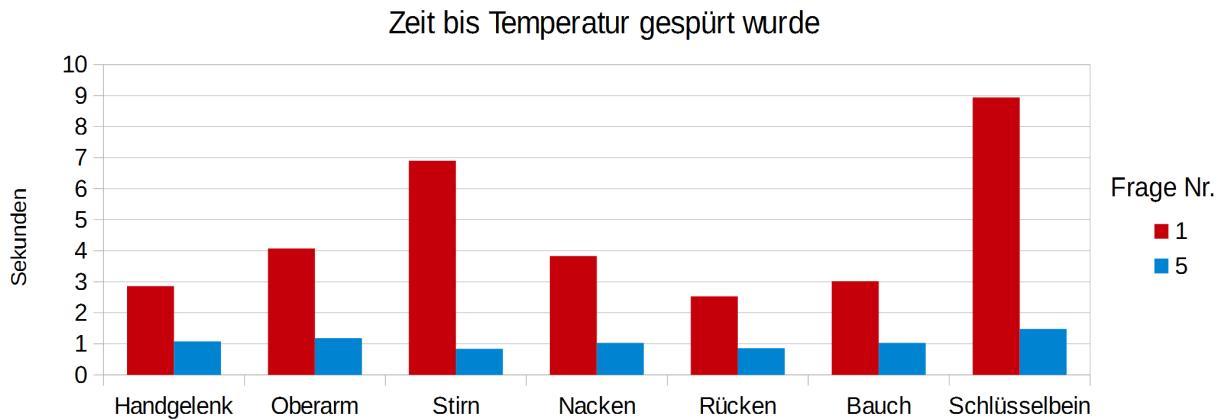


Abbildung 6.4: Graph der Reaktionszeit der Körperstellen auf Wärme und Kälte.

Bei der Kälte sind zwischen den Körperstellen keine größeren Schwankungen zu erkennen. Nur bei der Wärme stechen das Schlüsselbein und die Stirn heraus, die beide eine fast doppelt so lange Reaktionszeit als die anderen Körperstellen haben. Eine Testperson hat sogar keine Wärme am Schlüsselbein gespürt, weshalb dort der Versuch für den Fragenblock abgebrochen werden musste. Die TGI wurde von den Testpersonen nur vereinzelt und vergleichsweise geringfügig gespürt. Bei den meisten Testpersonen wurde kein Hitzeschmerz wahrgenommen

und wenn doch, wurde eine Reaktion erst nach über 20 Sekunden festgestellt. Den Graph, der die Schmerzeinschätzung der TGI darstellt, ist in Abbildung 6.5 zu erkennen.

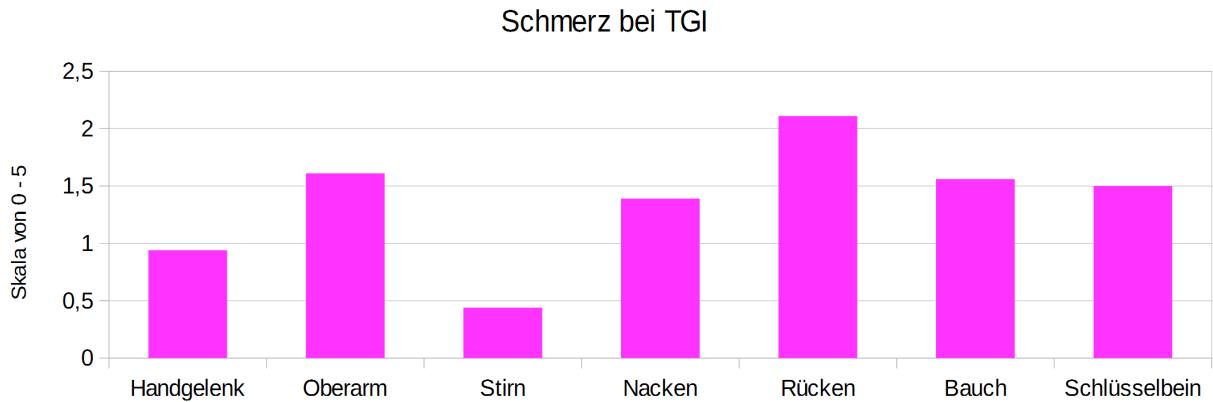


Abbildung 6.5: Graph zur Bewertung des gespürten Schmerzes der TGI.

Die subjektiven Einschätzungen der Testpersonen über die Körperstellen bestätigen die restlichen Ergebnisse. Bei diesen sind am schlechtesten das Schlüsselbein und die Stirn und am besten der Rücken und der Bauch bewertet worden. Diese Daten sind ebenfalls im Anhang B.3 zu finden.

Bezüglich der Ergebnisse ist eindeutig zu erkennen, welche Körperstellen am wenigsten als Thermorezeptionszone geeignet sind. Am schlechtesten schneidet das Schlüsselbein ab, welches fast in jeder Kategorie die niedrigste Bewertung bekommen hat. Kaum besser hat die Stirn abgeschnitten, die nur ein wenig höher bewertet wurde als das Schlüsselbein. Am besten haben sowohl der Rücken als auch der Bauch abgeschnitten, die fast überall ungefähr die gleichen Ergebnisse erzielten. Alle genauen Durchschnittswerte als Dezimalzahlen sind im Anhang B.2, sowie die Einzelwerte jeder Testperson sind im Anhang B.4 und B.5 zu finden.

## 6.6 Bestimmung der Thermorezeptionszonen

Auf Basis der Versuchsergebnisse und der eingangs definierten Anforderungen an die Thermorezeptionszonen, werden im Folgenden die sechs Körperstellen bestimmt. Auf Grund der Ergebnisse der Versuchsreihe wurde das Schlüsselbein als Thermorezeptionszone verworfen. Neben den niedrigen Versuchsergebnissen, sind auch die Befestigungsmöglichkeiten an dieser Körperstelle nicht optimal. Außerdem wird die Stirn aus zweierlei Gründen nicht als Thermorezeptionszone ausgewählt. Zum einen sind auch hier die Versuchsergebnisse schlecht ausgefallen und zum anderen erschwert das HMD der *HTC Vive* das Anbringen der Peltier-Module. Nach diesen Überlegungen verbleiben noch sieben Körperstellen. Der Rücken wurde trotz guter Versuchsergebnisse nicht ausgewählt, da eine gleichmäßige Verteilung über den Körper wichtig ist. Daher muss der Nacken, der relativ weit von anderen potenziellen Thermorezeptionszonen

entfernt ist, eine dieser Zonen sein. Da die Arme jeweils zwei Peltier-Module beanspruchen, können nicht gleichzeitig Rücken und Bauch als Thermorezeptionszone ausgewählt werden, da dann ein Peltier-Modul, was sonst an den Armen wäre, übrig bleiben würde. Außerdem kann es beim Befestigen am Rücken Komplikationen mit der Schachtel des Prototypen geben, daher wurde stattdessen der Bauch ausgewählt. Somit sind die sechs Thermorezeptionszonen die beiden Handgelenke, beide Oberarme, der Nacken und der Bauch. Dies wird in Abbildung 6.6 gezeigt.



Abbildung 6.6: Bereichsmarkierung der Thermorezeptionszonen in Front- und Rückansicht.

# 7 Unity Programm

In diesem Kapitel wird auf die Skripte eingegangen, die für dieses Projekt in *Unity*, unter Verwendung von C#, entstanden sind. Diese bestehen aus zwei Modulen, die für unterschiedliche Teile des Projektes wichtig sind. Zum einen beschreibt Kapitel 7.1 die Schnittstelle, die dem Peltier-basierten Prototypen alle Daten über das in Kapitel 5.1 definierte Protokoll schickt. Zum anderen wird in Kapitel 7.2 die Berechnung der Peltier-Modul-Positionen während der Laufzeit erläutert.

In Abbildung 7.1 sind die Softwarekomponenten des Bachelorprojektes dargestellt. Dieses beinhaltet auch die Komponenten, die in der Bachelorarbeit von Herrn Nicolas Kahrl behandelt werden. Diese Module umfassen das Entwicklerinterface, die Temperaturberechnung und sind durch den blauen Bereich gekennzeichnet. Die beiden in dieser Bachelorarbeit in *Unity* entwickelten Module, kommunizieren mit der Temperaturberechnung, welche die Positionsdaten in Temperaturdaten umrechnet. Diese Daten werden über die Schnittstelle zum Peltier-basierten Prototypen geschickt. Zusätzlich kommuniziert das Modul zur Positionsberechnung mit SteamVR, worauf in Kapitel 7.2 eingegangen wird. Dieses ist in dem orangefarbenen Bereich als *Extern* gekennzeichnet, da es nicht im Bachelorprojekt entstanden ist.

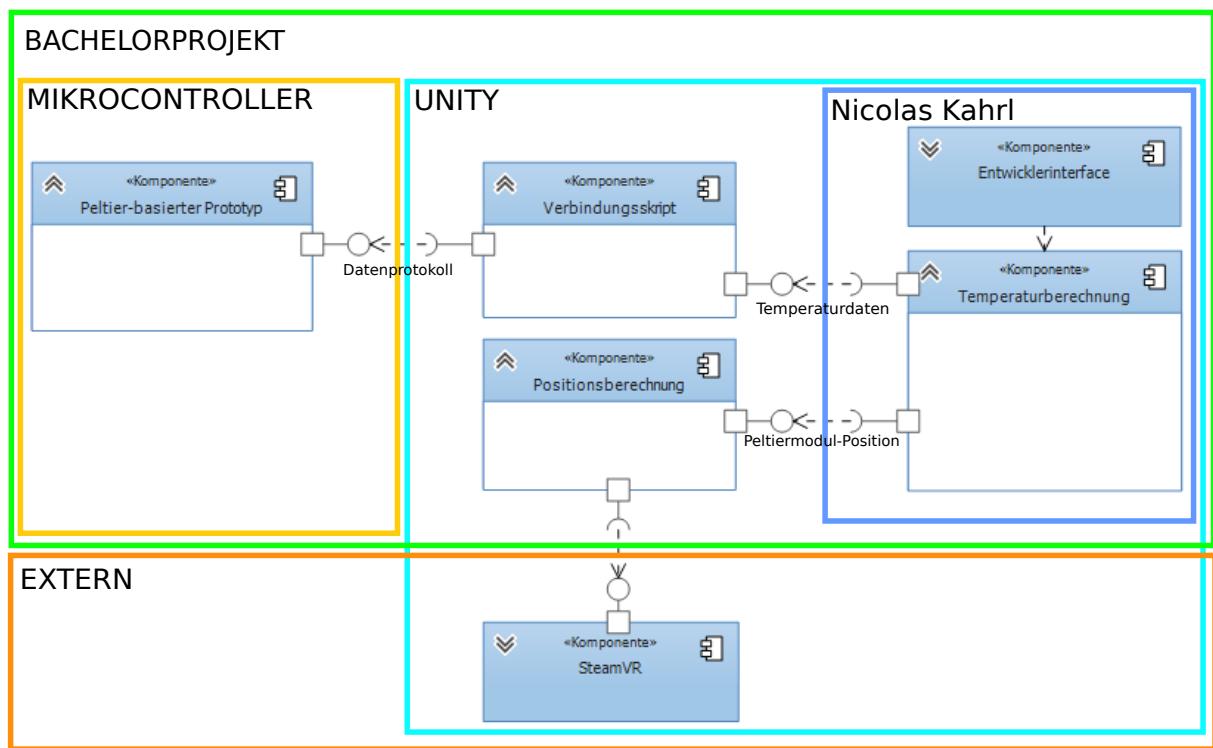


Abbildung 7.1: Komponentendiagramm für die Schnittstellen des Projektes, mit farblicher Bereichsabgrenzung der Projektbausteine.

## 7.1 Verbindungsskript von Unity zum Peltier-basierten Prototypen

### 7.1.1 Anforderungsanalyse für das Verbindungsskript

Um die Daten an den Peltier-basierten Prototypen schicken zu können muss das Verbindungs-skript in der Lage sein, eine Verbindung über den seriellen Port aufzubauen. Zusätzlich müssen andere *Unity*-Skripte Daten an die Schnittstelle leiten und diese Daten sollten dann in das richtige Format gebracht werden können. Eine weitere Funktion muss gewährleisten, dass eine Verbindungsverifizierung in einem kurzen Intervall von ein bis zwei Sekunden wiederholt stattfindet. Sollte die Verbindung zum Peltier-basierten Prototypen verloren gehen, muss der Benutzer darüber benachrichtigt und ein erneuter Verbindungsversuch gestartet werden. Der Benutzer soll über *Unity* die maximale Temperatur für warm und kalt regulieren können und diese müssen daher im Verbindungsskript einstellbar sein.

Diese Funktionen des Verbindungsskripts wurden analysiert und daraus folgende Pflicht- und Wunschkriterien definiert.

#### Pflichtkriterien

Das Verbindungsskript muss die Möglichkeit bieten, ...

1. ...nur eine Instanz zu erstellen.
2. ...eine Verbindung zum Peltier-basierten Prototypen über einen seriellen Port aufzubauen.
3. ...empfangene Daten in das richtige Format zu bringen.
4. ...eine Verbindungsverifizierung in einem kurzen Intervall zu vollziehen.
5. ...die maximale Temperatur für warm und kalt einzustellen.

#### Wunschkriterien

Das Verbindungsskript sollte die Möglichkeit bieten, ...

1. ...bei einem Verbindungsabbruch diese automatisch wiederherzustellen.
2. ...mit einem Tastendruck alle Peltier-Module auszustellen.

### 7.1.2 Konzeption des Verbindungsskripts

Das Verbindungsskript verwendet den seriellen Port für eine Verbindung zum *MKR1000*. Der Port kann jedoch zeitgleich nur von einer Anwendung geöffnet sein und blockt währenddessen alle anderen Anfragen. Aus diesem Grund kann nur ein Skript gleichzeitig eine Verbindung aufbauen, weshalb hier ein Singleton implementiert wurde. Zusätzlich muss das Verbindungsskript überprüfen, ob die ankommenden Daten, die an den Peltier-basierten Prototypen geschickt werden, untereinander konsistent sind. Inkonsistenzen können vorkommen, wenn Daten von unterschiedlichen Temperaturerzeugern gleichzeitig erhalten werden, da der Benutzer z. B. in einem kalten und warmen Erzeuger gleichzeitig steht. Dies wird in Abbildung 7.2 demonstriert.

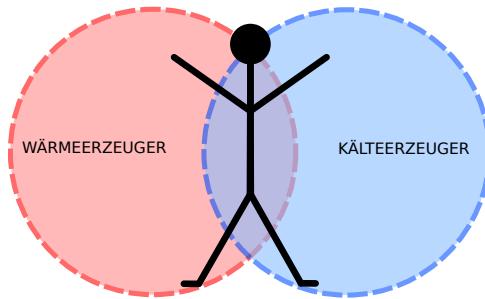


Abbildung 7.2: Mögliche Überschneidung von zwei Temperaturerzeugern.

In dem Fall von Abbildung 7.2 würden die Peltier-Module auf dem Bauch und Rücken sowohl Kälte als auch Wärme erzeugt. Um dies zu verhindern und sicherzustellen, dass alle Daten zusammenhängend ausgewertet werden können, darf nur eine Instanz des Verbindungsskripts vorhanden sein. Durch die Tatsache, dass Daten von beliebig vielen Temperaturerzeugern kommen können, muss ein Datenüberfluss abgefangen werden. Die Peltier-Elemente sind vergleichsweise träge, weshalb nicht in jedem Frame der Anwendung ein neuer Wert gesendet werden sollte. Dafür wurde die Hilfsklasse `ArduinoRequestProtocol`, die im Klassendiagramm in Abbildung 7.3 gezeigt wird, als Buffer implementiert.

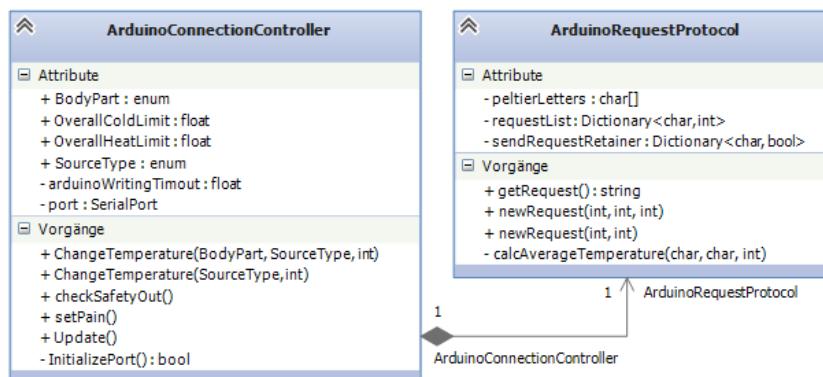


Abbildung 7.3: Klassendiagramm des Verbindungsskript und dazugehöriger Hilfsklasse.

Diese Hilfsklasse ist einerseits dafür zuständig, die Daten solange zu speichern bis sie vom Verbindungsskript an den Peltier-basierten Prototypen gesendet werden. Andererseits berechnet das Skript die Temperaturen und sorgt dafür, dass keine Unstimmigkeiten, wie in Abbildung 7.2, auftreten können. Ein beispielhafter Ablauf wird im Sequenzdiagramm in Abbildung 7.4 gezeigt. In dieser ist zu erkennen, dass der ArduinoConnectionController sich in Intervallen einen neuen Datensatz vom ArduinoRequestProtocol geben lässt. Wenn keine neuen Daten vorhanden sind, bekommt das Verbindungsskript einen *empty string* zurück. Werden von der Temperaturberechnung jedoch zuvor Daten gesendet, werden diese direkt an die Hilfsklasse weiter gegeben und verarbeitet. Bei der nächsten Datenabfrage werden die formatierten Daten zurück geholt und vom ArduinoConnectionController an den Peltier-basierten Prototypen gesendet.

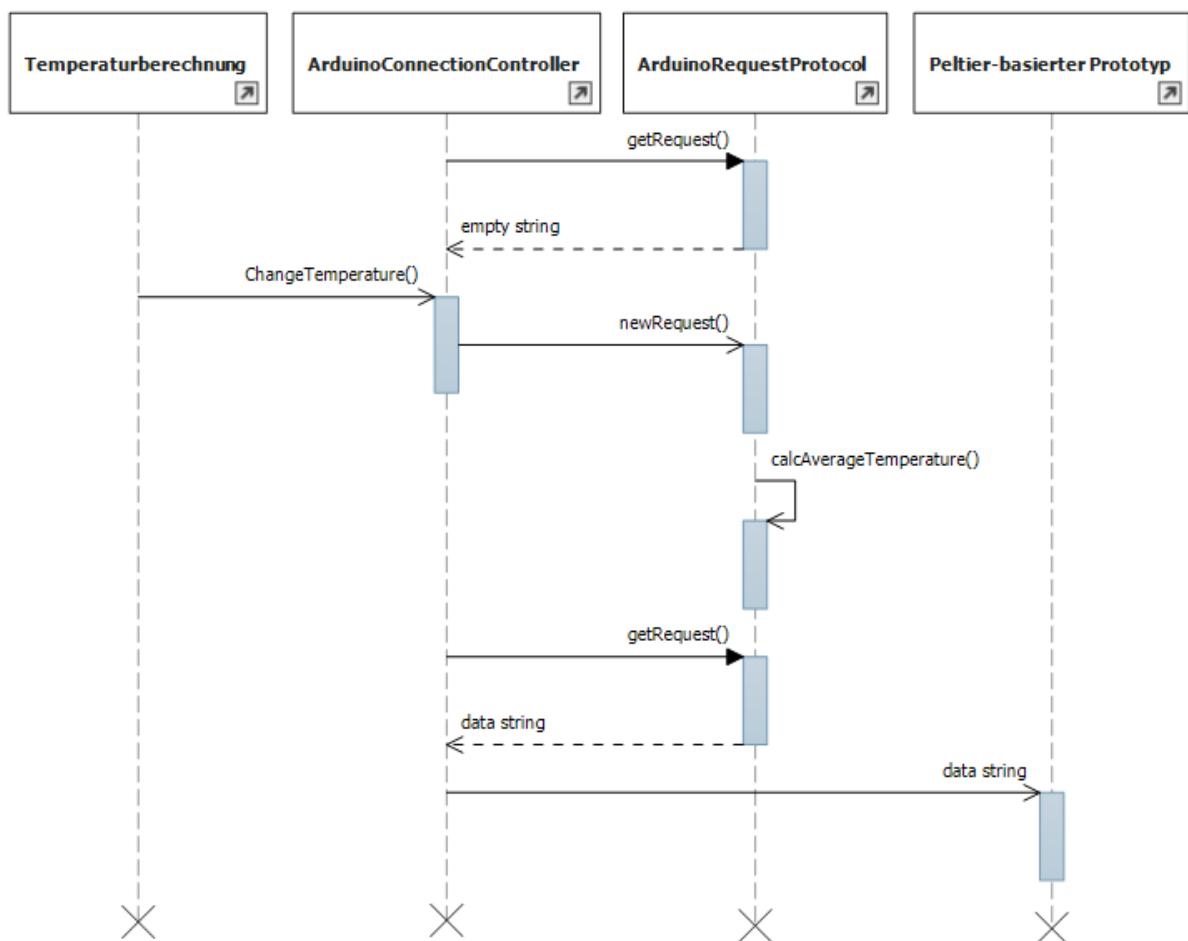


Abbildung 7.4: Sequenzdiagramm des Verbindungsskripts und dazugehöriger Hilfsklasse.

Für eine einfache Handhabung wurden für die Daten zwei Enumerationen definiert, welche in Listing 4 aufgeführt werden. Über diese können die berechneten Daten direkt an das Verbindungsskript übertragen werden.

```
public enum BodyPart { ForearmRight, UpperArmRight, Neck,
    ForearmLeft, UpperArmLeft, Belly }
public enum SourceType { Cold, Heat, Pain }
```

Listing 4: Verwendete Enumerationen zur Bestimmung der richtigen Pins.

Durch die Verwendung dieser Enumerationen können das betroffene Körperteil und die Art der Temperatur zusammen mit dem berechneten Wert angegeben werden. Die Zuordnung zum korrespondierenden Buchstaben findet danach in der Hilfsklasse statt. Diese beinhaltet ein Character-Array, in dem die Buchstaben der bestimmten Pins aufgelistet sind. Aus diesen wird der neue Datensatz aufgebaut und bei der nächsten Anfrage zurück gegeben.

### 7.1.3 Implementierung des Verbindungsskripts

#### Initialisierung des seriellen Ports

Der serielle Port kann über die in *Unity* verfügbare Klasse `SerialPort` angesprochen werden. Diese Klasse ist in der Lage, die Namen aller aktiven seriellen Ports über eine Funktion zurückzugeben. Diese Namen sind arbiträre Benennungen, die nichts über die angeschlossenen Geräte aussagen. Aus diesem Grund werden alle seriellen Ports nacheinander durch iteriert und der Befehl `t` an alle Geräte gesendet. Wie in Kapitel 5 definiert, antwortet der Peltier-basierte Prototyp mit einer `1`. Damit kann herausgefunden werden, an welchem Port der Peltier-basierte Prototyp angeschlossen ist.

Zusätzlich wird der Befehl `t` für die Verbindungsverifizierung verwendet. Alle zwei Sekunden wird dieser Befehl zum Prototypen gesendet und die Antwort eingelesen. Sollte dieser nicht antworten, wird eine Nachricht in der *Unity*-Konsole ausgegeben und der serielle Port wieder geschlossen. Danach wird im gleichen Intervall versucht die Verbindung wieder aufzubauen. Dies funktioniert auf die gleiche Weise.

#### Verwaltung der Temperaturdaten

Die Temperaturdaten können über die Methode `ChangeTemperature(BodyPart p, SourceType s, int a)` gesendet werden. In dieser werden die Enumerationen in Integer Werte umgewandelt und an die Hilfsklasse geschickt. Diese berechnet den Mittelwert der Temperatur für ein Peltier-Modul. Dies ist jedoch nur nötig, solange einer der zugehörigen Pins nicht auf null ist. Diese Berechnung wird in Abbildung 7.5 beispielhaft demonstriert. Dort ist visualisiert, wie zuerst neue Daten eines Kälteerzeugers und danach Daten eines Wärmeerzeugers empfangen werden. Diese Daten könnten, wie der falsche Pfad veranschaulicht, ein Fehlverhalten verursachen. Beim richtigen Pfad hingegen werden die neuen Wärmedaten von den Kältedaten abgezogen. Falls die Differenz negativ ist, wird diese auf die Wärmedaten addiert

und die Kältedaten werden auf null gesetzt. Wenn die Differenz positiv ist, wird sie für kalt gesetzt und warm bleibt auf null.

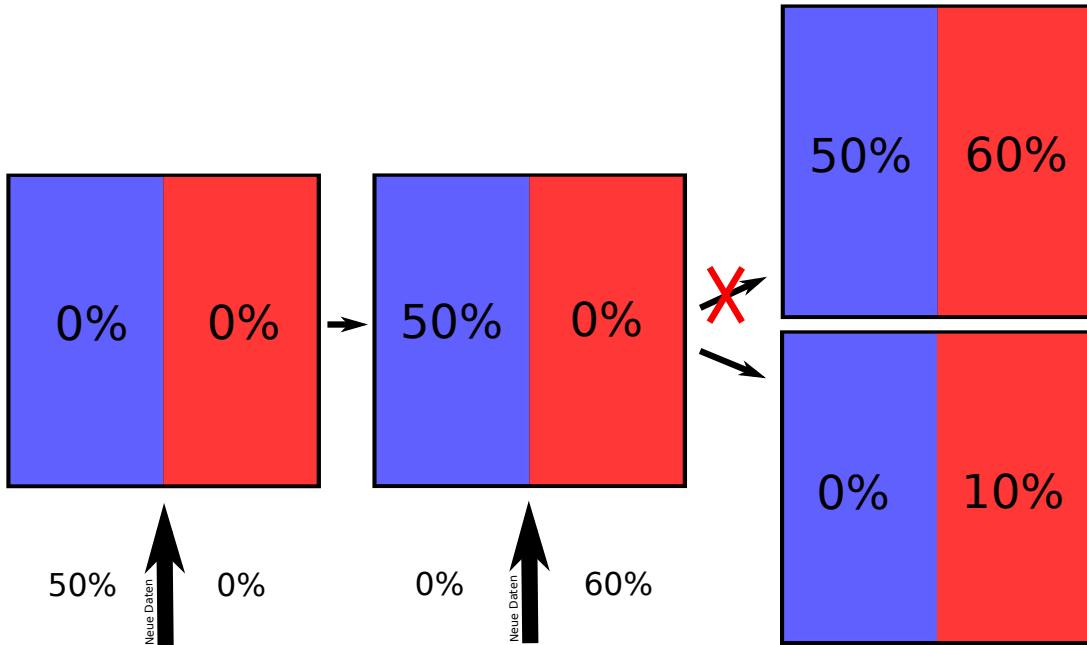


Abbildung 7.5: Beispiel der Berechnung der Durchschnittstemperatur eines Peltier-Modul.

Zusätzlich wird überprüft, ob der neue Wert schon an den Peltier-basierten Prototypen gesendet wurde. Ist dies nicht der Fall, wird der neu berechnete Mittelwert mit dem vorherigen Wert verglichen und nur gesetzt, wenn er größer ist. Dies ist nötig, da die Möglichkeit besteht, dass Werte mehrerer Temperaturerzeuger gleicher Ausrichtung, aber unterschiedlicher Werte ankommen. Steht der Benutzer z. B. in einem lauwarmen Raum, in dem ein Kamin brennt, soll immer die höhere Temperatur beim Peltier-basierten Prototypen ankommen. Wenn der Benutzer nah beim Kamin steht, soll immer die Hitze des Kamins ankommen und nicht die lauwarme Temperatur des Raumes.

### Maximaltemperatur einstellen

Um die maximale Temperatur einstellen zu können, wurden die zwei Variablen `OverallHeatLimit` und `OverallColdLimit` definiert. Diese können über den Inspektor in *Unity*, wie in Abbildung 7.6 gezeigt, über einen Schieberegler verändert werden.



Abbildung 7.6: `ArduinoConnectionController` im Inspektor von *Unity*, mit den Variablen für die Einstellung der maximalen Temperatur.

Durch eine Begrenzung zwischen null und eins wird sichergestellt, dass die Werte nicht zu stark verändert werden können. Für die Übertragung zum Peltier-basierten Prototypen müssen diese Werte durch eine einfache Umrechnung, am Start der Anwendung, in den Bereich von 0 bis 20 übertragen werden.

### **Notaus per Tastendruck**

Um eine schnelle Möglichkeit zu bieten den Peltier-basierten Prototypen komplett auf null zu setzen, wurde eine Funktion für ein Notaus eingebaut. Dies ist nötig, um bei einer Fehlfunktion des Prototypen schnell handeln zu können. In diesem Projekt wurde die Leertaste als Auslöser für ein Notaus verwendet, da diese am prominentesten auf der Tastatur ist. Letztendlich kann aber frei eingestellt werden, welche Taste verwendet werden soll. Für eine unbeaufsichtigte Nutzung des Prototypen sollte dies eine Taste des Motion-Controllers sein, damit die Person selbst sofort den Prototypen ausschalten kann.

## **7.2 Positions berechnung der Peltier-Module zur Laufzeit**

Die Körperstellen, an denen die Peltier-Module angebracht werden, wurden in Kapitel 6 evaluiert und festgelegt. Um die Temperatursimulation so realistisch wie möglich zu machen, soll nicht nur die Position der Person für die Ansteuerung der Peltier-Module verwendet werden, sondern die Position jedes einzelnen Peltier-Moduls. Durch das Wissen, an welcher Stelle des Körpers diese angebracht werden, kann über das HMD und die Motion-Controller ihre Position berechnet werden.

### **7.2.1 Anforderungsanalyse für die Positions berechnung**

Die Positions berechnung ist die Schnittstelle zwischen der *HTC Vive*, die über das *Unity*-Plugin *SteamVR* angesprochen werden kann, und dem Rest des Projektes. Das Modul zur Temperatur berechnung von Herrn Nicolas Kahrl funktioniert über Collider und erwartet, dass sich die Peltier-Module in der VE an der richtigen Position befinden, sodass sie die Collider triggern können. Dafür müssen Repräsentationen der Peltier-Module in *Unity* existieren.

#### **Pflichtkriterien**

Das Modul zur Positions berechnung muss...

1. ...die Positionsdaten der *HTC Vive* auslesen können.
2. ...die Position für jedes Peltier-Modul eindeutig bestimmen können.
3. ...die Position der Peltier-Module an den Oberarmen über IK berechnen.

4. ...Prefabs für die Peltier-Module anbieten, die in der VE an die berechnete Position platziert werden.
5. ...ein Prefab anbieten, das den Peltier-basierten Prototypen darstellt und in dem die Peltier-Module modular ausgetauscht werden können.

### 7.2.2 Konzeption der Positionsberechnung

Für die Positionsberechnung sind drei unterschiedliche Aufgaben grundlegend, diese werden in einzelne Klassen aufgeteilt. Diese Klassen sind in dem Klassendiagramm in Abbildung 7.7 genauer dargestellt. Die erste Klasse ist der VR\_PositionsGetter, der die Standardkommunikation mit *SteamVR* reguliert und die Positionsinformationen der Hardware im benötigten Format bereitstellt. Die zweite Klasse namens SteamVR\_IK\_Preparation ist für die IK zuständig und berechnet die Positionen der Oberarm-Peltier-Module. PeltierElementPosition ist die Klasse, die für die Positionsberechnung der restlichen Peltier-Module und ihrer Positionierung in der VE zuständig ist.

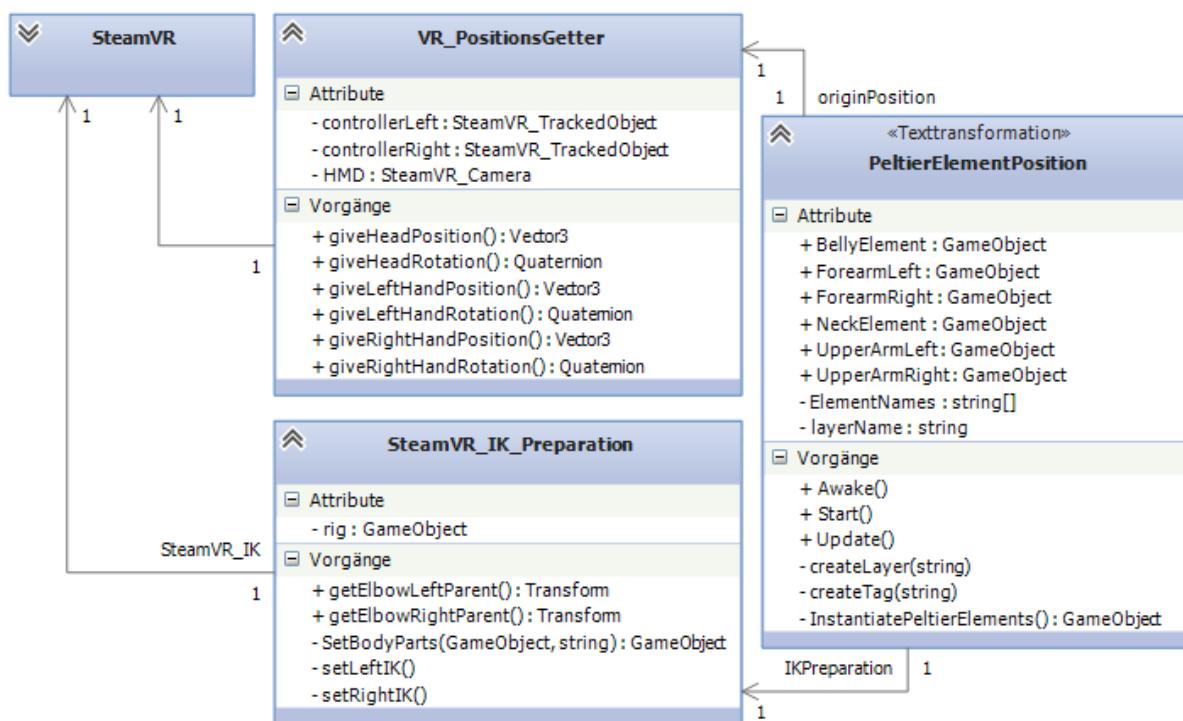


Abbildung 7.7: Klassendiagramm des Positions berechnungsmoduls.

Um diese Klassen einfach in eine Szene einbauen zu können, muss ein Controller-Prefab entstehen, dass die drei Skripte enthält. Dabei besitzt die PeltierElementPosition-Klasse, wie in Abbildung 7.7 zu erkennen ist, Variablen für die Prefabs der Peltier-Module.

Diese sollen in dem Controller-Prefab bereits richtig zugeordnet sein, können aber beliebig angepasst werden, wenn es besondere Situationen in der Szene verlangen.

### 7.2.3 Implementierung des Positionsskriptes

Die VR\_PositionsGetter-Klasse holt sich beim Start der Anwendung das CameraRig der *HTC Vive* aus der Hierarchie der Szene mit der Funktion `GameObject.Find(" [CameraRig] ")`. Damit kann das CameraRig gefunden werden, da der Name “[CameraRig]” von SteamVR festgelegt ist und nicht verändert werden sollte. Außerdem werden die Motion-Controller aus dem CameraRig geholt und aus diesem das SteamVR\_TrackedObject als jeweiliger Controller gespeichert. Die Klasse SteamVR\_TrackedObject greift auf die Positionen sowie Rotationen der Controller zu. Das Gleiche gilt für das HMD, dessen Position und Rotation in der Klasse SteamVR\_Camera gespeichert ist. Für die Bereitstellung dieser Daten wurden Methoden definiert, die für jedes der drei Objekte die Position als dreidimensionalen Vektor oder die Rotation als Quaternion zurückgeben.

### 7.2.4 Implementierung des IK-Skriptes

Für die IK wurde zuerst das FABRIK-Verfahren implementiert. Bei der Verbindung mit VR entstanden jedoch Probleme, weswegen von der Verwendung dieses Verfahrens abgesehen wurde. Stattdessen wurde eine Verbindungsklasse zu der SteamVR-Klasse SteamVR\_IK implementiert. Diese ist ein einfaches zwei-Knochen-IK-Verfahren für einen Arm und verwendet speziell positionierte Objekte für die Berechnung der Ellenbogen- und Handposition. In Abbildung 7.8 ist der originale Aufbau der SteamVR-IK mit einfachen geometrischen Objekten dargestellt.

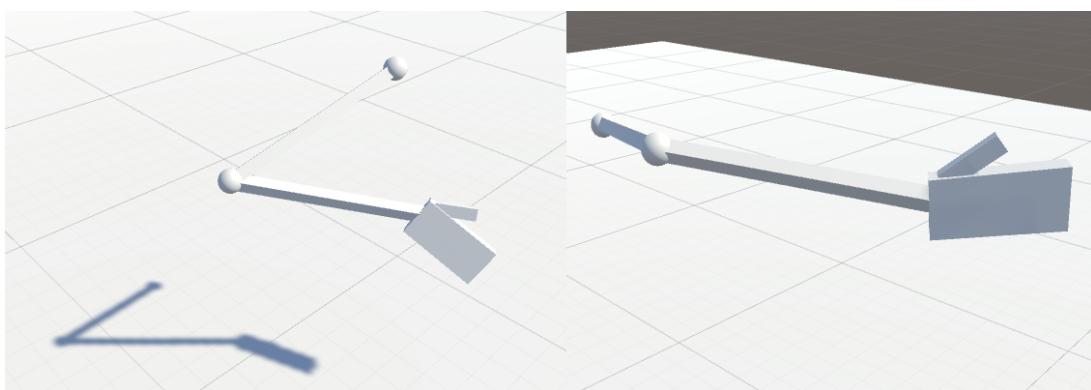


Abbildung 7.8: IK mit Grundobjekten von Unity, ohne Anpassung für Peltier-Module.

Um dieses Verfahren bei diesem Projekt verwenden zu können, müssen die Objekte beim Start für beide Arme dynamisch erzeugt und in der Hierarchie des CameraRig positioniert werden. Da die SteamVR\_IK nur für einen Arm die IK aufbaut, werden die Objekte jeweils für

rechts und links erstellt. Diese Objekte werden der SteamVR\_IK-Klasse übergeben, welche auf diese die IK-Berechnungen anwendet.

Da die Peltier-Module in der Nähe des Ellenbogens am Oberarm befestigt sind, wird die Ellenbogenposition für die Peltier-Module verwendet. Dafür hat die SteamVR\_IK\_Preparation-Klasse zwei Methoden, die die Transformationsdaten des linken und rechten Ellenbogens zurück geben. Diese werden in der PeltierElementPosition-Klasse zum Setzen des Prefabs der Peltier-Module am Oberarm verwendet.

### 7.2.5 Implementierung des Berechnungsskriptes

Die PeltierElementPosition-Klasse hat, wie zuvor erwähnt, die Prefabs der Peltier-Module als Variablen. Diese werden beim Start der Anwendung instantiiert und erhalten sowohl einen `layer` als auch einen `tag`. Der `layer` wird zu Beginn einmal erstellt und erhält den Namen *thermoLayer*. Jedem Peltier-Modul wird dieser zugewiesen, damit die Temperaturberechnung von Herrn Nicolas Kahrl mit diesen zusammenarbeiten kann. Der `tag` wird für jedes der sechs Peltier-Module separat erstellt und erhält den Namen des jeweiligen Moduls. Diese Namen sind *Belly*, *Neck*, *UpperArmLeft*, *UpperArmRight*, *ForearmLeft* und *ForearmRight*. Über diese `tags` können die Peltier-Module einfach identifiziert werden. Letztlich wird beim Start noch der `Parent` (Elternobjekt) der beiden Peltier-Module für die Oberarme gesetzt. Dieser kann mit Hilfe der vorher erwähnten Methode der SteamVR\_IK\_Preparation-Klasse festgelegt werden.

Während der Laufzeit werden die Positionen und Rotationen der Peltier-Module berechnet. Die Peltier-Module der Oberarme bewegen sich mit dem gesetzten `Parent`, deshalb müssen dafür keine weiteren Berechnungen stattfinden. Die Berechnungen für die Unterarme links und rechts sind in Listing 5 aufgeführt. Für die Rotationsberechnung muss die Rotation der Controller verwendet und um 90° gedreht werden. Für die Positions berechnung muss von der Position der Controller die Controllerrotation mit einem kleinen Offset subtrahiert werden. Dadurch bewegt und dreht sich das Peltier-Modul mit der Hand mit, aber liegt durch den Offset am Handgelenk.

```
Unterarm.rotation = GebeControllerRotation() * Quaternion.Euler(90, 0, 0);
Unterarm.position = GebeControllerPosition() -
    ( GiveControllerRotation() * Vector3(offset) );
```

Listing 5: Berechnung von Rotation und Position der Unterarme.

Die Berechnungen der Peltier-Module, die am Torso des Benutzers liegen, sind relativ ähnlich zur Berechnung der Handgelenke und wird in Listing 6 aufgeführt. Für die Rotation der Module muss die Blickrichtung des HMDs beachtet werden, weswegen lediglich die Rotation

der y-Achse mit einzurechnen. Die anderen beiden Achsen werden dabei nicht rotiert. Für die Position muss von der Position des HMDs die vorher berechnete Rotation mit einem Offset und einer Rotation von  $90^\circ$  subtrahiert werden. Diese Rotation dreht das Peltier-Modul so, dass es am Torso anliegt.

```
    TorsoElement.rotation = Quaternion.Euler(0, GebeHMDRotation().y, 0);
    TorsoElement.position = GebeHMDPosition() - ( Quaternion.Euler(0,0,90) *
        ( TorsoElement.rotation * Vector3(Offset) ) );
```

Listing 6: Berechnung von Rotation und Position der Peltier-Module am Torso.

Die Berechnung für die Peltier-Module am Torso kann sehr einfach gehalten werden, da entschieden wurde, dass diese Module immer senkrecht zum Boden ausgerichtet sein sollten. Diese Entscheidung wurde getroffen, weil eine Bewegung des Kopfes häufig vorkommt, ohne dass sich der ganze Körper mitdreht. Daher hätte eine aufwändigere Berechnung keinen Mehrwert erzielt. Eine Demonstration der berechneten Peltier-Modulposition ist in der Abbildung 7.9 visualisiert.

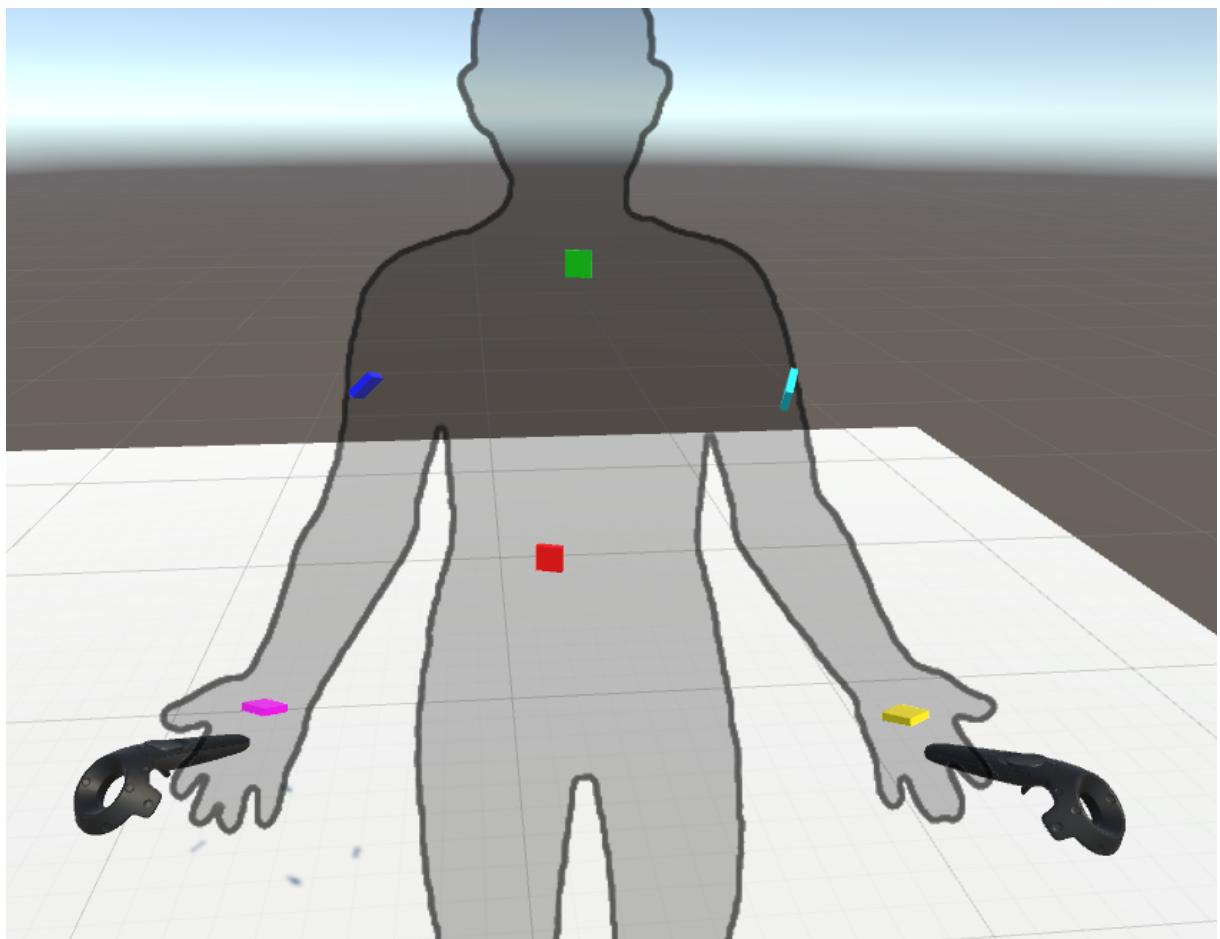


Abbildung 7.9: Darstellung der Peltier-Module an ihrer berechneten Positionen.

# 8 Ergebnisse und Ausblick

## 8.1 Ergebnisse

Um eine Tendenz zur Verifizierung der Hypothese „*Das Erweitern der virtuellen Realität um die taktile Wahrnehmung in Form von Temperatur steigert das Gefühl der Präsenz.*“ zu finden, ist ein Peltier-basierter Prototyp entstanden. Mit diesem wurde über eine *Unity*-Anwendung Evaluationstests zur Präsenzgewinnung durchgeführt. Der Prototyp kann über einen Gurt am Rücken des Benutzers angebracht werden und besitzt Peltier-Module für sechs Thermorezeptionszonen am Körper. Diese Zonen können individuell angesteuert und gewärmt oder gekühlt werden. Der Prototyp wird in Zusammenhang mit der *HTC Vive* verwendet und über *Unity* in einer Echtzeit-VR-Anwendung gesteuert.

Für die Steuerung des Prototypen über *Unity* ist zum einen ein Mikrocontroller-Programm entstanden, das Daten über einen seriellen Port interpretieren und damit die Peltier-Module regulieren kann. Dieses Programm verfügt unter anderem über Sicherheitsvorkehrungen, die bei einem Abbruch der Verbindung zu *Unity*, alle Peltier-Module ausschalten. Zum anderen wurde ein Skript in *Unity* entwickelt, das Temperaturdaten von anderen Skripten empfängt, diese formatiert und an den Prototypen sendet. Zusätzlich werden die ankommenden Daten auf Konsistenz geprüft, sodass keine unnatürlichen Temperatureffekte entstehen können.

Für die Evaluation der Thermorezeptionszonen wurde eine Versuchsreihe mit Testpersonen durchgeführt, in der unterschiedliche Körperstellen auf ihre Kompatibilität mit dem entwickelten Prototypen getestet wurden. Die sechs Körperstellen, die aus den Ergebnissen hervorgingen sind die Handgelenke, die Oberarme, der Nacken und der Bauch. Für diese wurde ebenfalls in *Unity* ein Skript entwickelt, das die Positionen der Peltier-Module in der VE berechnet. Dies geschieht auf Basis der Positionen der HMD und Motion-Controller der *HTC Vive*, die zur Laufzeit abgefragt werden und die Module mit IK positioniert.

Die Hauptanwendung in *Unity* wurde von Herrn Nicolas Kahrl entwickelt. Dazu zählt die Temperaturberechnung, die unter Beachtung von Abständen und Hindernissen zu Temperaturerzeugern in einer VE die Temperatur berechnet, die der Benutzer auch in der Realität spüren würde. Zusätzlich entstand ein Interface für Entwickler, das es ermöglicht die Ergebnisse dieses Projektes einfach in andere Anwendungen zu integrieren. Dieses beinhaltet das Setzen von Temperaturerzeugern in die VE und Einstellmöglichkeiten für Größe, Form, etc. Letztendlich wurde eine Testreihe zur Evaluation der Präsenzgewinnung, die durch den Einsatz dieses Projekts in der VR entstehen soll, durchgeführt. Diese abschließende Testreihe konnte eine Tendenz

zur Bestätigung der Hypothese aufzeigen, wodurch die Verbesserung der Präsenz durch den entwickelten Peltier-basierten Prototypen zu erkennen ist. Präzisere Ergebnisse der Testreihe sind in der Bachelorarbeit von Herrn Nicolas Kahrl zu finden.

## 8.2 Ausblick

Durch den begrenzten Zeitrahmen eines Bachelorprojekts konnten nicht alle Möglichkeiten dieses Projekts ausgeschöpft werden. Im folgenden werden mögliche Erweiterungen und Verbesserungen des Peltier-basierten Prototypen aufgeführt.

Die Befestigungen der Peltier-Module am Körper können verbessert werden. Dadurch dass die Thermorezeptionszonen erst bestimmt werden mussten, blieb in diesem Projekt nicht genügend Zeit, individuell angepasste Befestigungen für die Körperstellen zu entwickeln. Die Entwicklung einer variablen für viele Körpertypen funktionierenden Befestigungsart kann in einem Folgeprojekt vorgenommen werden.

Auf Grund geringer Fachkenntnisse in der Elektrotechnik, wurde die Schaltung so einfach wie möglich gehalten und würde von einer Überarbeitung profitieren. Dabei kann eine Möglichkeit integriert werden, die Ansteuerrichtung der Peltier-Elemente zu ändern, um die an der Haut liegenden Temperaturen umzudrehen. Dies würde besseres temperieren ermöglichen, da beide Peltier-Elemente des Peltier-Moduls die gleiche Temperatur haben könnten. Zusätzlich könnte eine Hardware-gesteuerte Sicherheitsvorkehrung bei Überhitzung integriert werden, die über Temperatursensoren funktioniert.

Dadurch, dass in den Peltier-Modulen nur eine passive Kühlung eingebaut ist, überhitzen die Peltier-Elemente nach einiger Zeit. Durch eine aktive Abführung der Hitze könnte die Verwendungszeit deutlich verlängert werden. Damit die Peltier-Module nicht zu groß werden und bei der Verwendung der VR nicht stören, müsste ein relativ kompakter Weg zur Abführung der Hitze gefunden werden.

Eine weitere Verbesserungsmöglichkeit der Peltier-Module wäre die Verwendung von kleineren Peltier-Elementen, die bei gleicher Größe des Peltier-Moduls mehr alternierende Wärme und Kälte beinhalten. Dies würde das Auslösen der TGI vereinfachen.

Außerdem kann der Tragekomfort der Peltier-Module verbessert werden, da die Peltier-Elemente kantig sind und beim Tragen schnell als unangenehm empfunden werden. Im einfachsten Fall könnte dieses Problem durch entgraten der Kanten gelöst werden. Eine andere

Lösung wäre die Entwicklung einer komfortablen und wärmeleitenden Hülle.

Ein weiterer Aspekt, ist die Möglichkeit den Peltier-basierten Prototypen kabellos zu gestalten. In diesem Projekt hatte dies keine hohe Priorität, da die *HTC Vive* momentan ebenfalls nicht kabellos funktioniert. Im Laufe des Jahres 2017 sollen jedoch Möglichkeiten auf den Markt kommen, die *HTC Vive* von Kabeln zu befreien. Dadurch wird es interessanter, auch den Prototypen mobil zu machen. Für diesen Zweck wurde bereits darauf geachtet, einen Mikrocontroller zu verwenden, der WLAN fähig ist, sodass das Datenkabel durch eine WLAN-Verbindung ersetzt werden kann. Für die Stromversorgung könnte eine Autobatterie in Frage kommen, die der Benutzer wie den Prototypen auf dem Rücken befestigen kann.

### 8.3 Fazit

Eine Tendenz zur Verifizierung der Hypothese „*Das Erweitern der virtuellen Realität um die taktile Wahrnehmung in Form von Temperatur steigert das Gefühl der Präsenz.*“ konnte in Zusammenarbeit mit Herrn Nicolas Kahrl in diesem Projekt gefunden werden. Um dies zu bewerkstelligen, wurde ein Peltier-basierter Prototyp und ein *Unity*-Plugin entwickelt. Diese wurden durch Versuche mit Testpersonen darauf getestet, ob sie eine Präsenzsteigerung in VR hervorrufen können. Da vielfältige Problemstellungen gelöst werden mussten, erlaubte die Arbeit an diesem Projekt viele Einblicke in unterschiedliche Themenbereiche wie der Elektrotechnik, der menschlichen Physiologie oder der Hardware-Usability. Herausforderungen wie das Erarbeiten der Funktionsweise der verwendeten Bauteile, das Finden der Thermorezeptionszonen oder die Entwicklung eines angemessenen Aufbaus des Prototypen konnten erfolgreich gelöst werden und haben zu einem erfolgreichen Abschluss des Projektes geführt. Der Peltier-basierte Prototyp ist einsatzbereit und bietet weiterhin Spielraum für Weiterentwicklungen. Für weiterführende Forschung zu dieser Thematik ist der Prototyp bestens geeignet.

## A Referenzen

### Literatur

- [AL09] A. Aristidou und J. Lasenby. *Inverse kinematics: a review of existing techniques and introduction of a new fast iterative solver*. University of Cambridge, Department of Engineering, 2009.
- [AL10] A. Aristidou und J. Lasenby. „Motion capture with constrained inverse kinematics for real-time hand tracking“. In: *2010 4th International Symposium on Communications, Control and Signal Processing (ISCCSP)*. März 2010, S. 1–5. DOI: 10.1109/ISCCSP.2010.5463419.
- [AP16] M. Allyn und P. Perspective. *SteamVR HTC Vive In-depth - Lighthouse Tracking System Dissected and Explored*. 2016. URL: <https://www.pcper.com/reviews/General-Tech/SteamVR-HTC-Vive-depth-Lighthouse-Tracking-System-Dissected-and-Explored/SteamV> (besucht am 19.02.2017).
- [Ard16a] Arduino Genuino. *Genuino*. 2016. URL: <https://www.arduino.cc/en/Main/GenuinoBrand> (besucht am 19.02.2017).
- [Ard16b] Arduino Genuino. *Genuino*. 2016. URL: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoMKR1000> (besucht am 19.02.2017).
- [Ard17a] Arduino Genuino. *MKR1000 Pinlayout*. 2017. URL: [https://www.arduino.cc/en/uploads/Main/MKR1000\\_pinout.png](https://www.arduino.cc/en/uploads/Main/MKR1000_pinout.png) (besucht am 19.02.2017).
- [Ard17b] Arduino Genuino. *What is Arduino?* 2017. URL: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction> (besucht am 19.02.2017).
- [Axo16] AxonVr. *AxonVR*. 2016. URL: <http://axonvr.com/> (besucht am 19.02.2017).
- [AZ06] E. A. Arens und H. Zhang. „The skin’s role in human thermoregulation and comfort“. In: *Thermal and Moisture Transport in Fibrous Materials*. Hrsg. von N. Pan und P. Gibson. Woodhead Publishing Ltd, 2006, S. 560–602.
- [Bad14] Y. A. Badamasi. „The working principle of an Arduino“. In: *2014 11th International Conference on Electronics, Computer and Computation (ICECCO)*. Sep. 2014, S. 1–4. DOI: 10.1109/ICECCO.2014.6997578.
- [Bai+08] J. N. Bailenson u. a. „The use of immersive virtual reality in the learning sciences: Digital transformations of teachers, students, and social context“. In: *The Journal of the Learning Sciences* 17.1 (2008), S. 102–141.

- [BK01] R. Benosman und S. B. Kang. „A Brief Historical Perspective on Panorama“. In: *Panoramic Vision: Sensors, Theory, and Applications*. Hrsg. von R. Benosman und S. B. Kang. New York, NY: Springer New York, 2001, S. 5–20. ISBN: 978-1-4757-3482-9.
- [BL13] F. Biocca und M. Levy. *Communication in the Age of Virtual Reality*. Routledge Communication Series. Taylor & Francis, 2013, S. 130. ISBN: 9781135693572.
- [Bry96] S. Bryson. „Virtual Reality in Scientific Visualization“. In: *Commun. ACM* 39.5 (Mai 1996), S. 62–71. ISSN: 0001-0782.
- [Bus04] S. R. Buss. „Introduction to inverse kinematics with jacobian transpose, pseudoinverse and damped least squares methods“. In: *IEEE Journal of Robotics and Automation* 17.1-19 (2004), S. 16.
- [Cra02] A. D. Craig. „How do you feel? Interoception: the sense of the physiological condition of the body“. In: *Nat Rev Neurosci* 3.8 (2002), S. 655–666.
- [Dea15] J. Dean. *Unity Character Animation with Mecanim*. Packt Publishing, 2015. ISBN: 9781849696371. URL: <https://books.google.de/books?id=G91OCwAAQBAJ>.
- [Dev16] S. Devices. *All the information on Senso*. 2016. URL: <https://senso.me/press> (besucht am 19.02.2017).
- [Dio97] J. Dionisio. „Virtual hell: A trip through the flames“. In: *IEEE Computer Graphics and Applications* 17.3 (1997), S. 11–14.
- [DNN15] S. Davis, K. Nesbitt und E. Nalivaiko. „Comparing the onset of cybersickness using the Oculus Rift and two virtual roller coasters“. In: *Proceedings of the 11th Australasian Conference on Interactive Entertainment (IE 2015)*. Bd. 27. 2015, S. 30.
- [Dob+15] D. Dobrilovic u. a. „Platform for teaching communication systems based on open-source hardware“. In: *2015 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*. März 2015, S. 737–741. DOI: 10.1109/EDUCON.2015.7096051.
- [Dör+15] N. Döring u. a. *Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften*. Springer-Lehrbuch. Springer Berlin Heidelberg, 2015, 32–34 and 292–318 and 244–264. ISBN: 9783642410895. URL: <https://books.google.de/books?id=EvfNCgAAQBAJ>.
- [Dre13] D. K. Drewing. *Hautsinne*. Vorlesungsskript. 2013.

- [DSV15] D. D’Orazio, V. Savov und T. Verge. *Valve’s VR headset is called the Vive and it’s made by HTC*. 2015. URL: <http://www.theverge.com/2015/3/1/8127445/htc-vive-valve-vr-headset> (besucht am 19.02.2017).
- [Dud14] W. R. Dudenredaktion. *Duden - Die deutsche Rechtschreibung. Bd. 1.* 24. völlig neu bearb. u. erw. Mannheim: Dudenverlag, Bibliographisches Institut und F.A. Brockhaus, 2014. ISBN: 978-3-411-04650-8.
- [DZ16] D. Dobrilovic und S. Zeljko. „Design of open-source platform for introducing Internet of Things in university curricula“. In: *2016 IEEE 11th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI)*. Mai 2016, S. 273–276. DOI: [10.1109/SACI.2016.7507384](https://doi.org/10.1109/SACI.2016.7507384).
- [ETA71] E. gH ETAL. „Thermoelectric elements utilizing distributed peltier effect“. Patent US 3564860 A (US). Feb. 1971. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/5f3ccdf765e78cf84ef/US3564860.pdf>.
- [Fia98] D. Fiala. „Dynamic simulation of human heat transfer and thermal comfort“. Diss. HOCHSCHULE FÜR TECHNIK, 1998.
- [Fic16] H. Fichthorn. *Grundlagen Peltier*. 2016. URL: [www.situs-tec.de/app/download/5794666408/Grundlagen-Peltier.pdf](http://www.situs-tec.de/app/download/5794666408/Grundlagen-Peltier.pdf) (besucht am 19.02.2017).
- [FJT12] O. Franzen, R. Johansson und L. Terenius. *Somesthesia and the Neurobiology of the Somatosensory Cortex*. Advances in Life Sciences. Birkhäuser Basel, 2012, S. 30. ISBN: 9783034890168. URL: <https://books.google.de/books?id=q230BwAAQBAJ>.
- [FL11] M. J. Flynn und W. Luk. *Computer System Design: System-on-Chip*. John Wiley & Sons, 2011.
- [Gib10] A. M. Gibb. „New media art, design, and the Arduino microcontroller: A malleable tool“. Magisterarb. Pratt Institute, 2010.
- [Glo16] M. Glombicki. *AxonVR Raises 5.8 Million Dollar Seed Investment for Advanced VR Haptics*. 2016. URL: <http://www.roadtovr.com/axonvr-raises-5-8-million-seed-investment-advanced-vr-haptics/> (besucht am 19.02.2017).
- [HC16] HTC und S. Corp. *HTC AND VALVE BRING VIRTUAL REALITY TO LIFE WITH UNVEILING OF VIVE CONSUMER EDITION*. 2016. URL: <https://www.vive.com/us/newsroom/2016/2016-02-21/> (besucht am 19.02.2017).
- [Hen52] H. Hensel. „Physiologie der Thermoreception“. In: *Ergebnisse der Physiologie biologischen Chemie und experimentellen Pharmakologie* 47.1 (1952), S. 166–368.

- [HL93] R. Holloway und A. Lastra. „Virtual environments: A survey of the technology“. In: Eurographics. 1993, S. 14.
- [Hol08] L. Holson. „With smartphones, Cher Wang made her own fortune“. In: *The New York Times* (2008).
- [Ian15] E. Iannone. *Labs on Chip: Principles, Design and Technology*. Taylor & Francis Group, 2015, S. 508–509.
- [IGN16] IGN. *CES 2016: OCULUS RIFT RELEASE DATE REVEALED*. 2016. URL: <http://www.ign.com/articles/2016/01/06/ces-2016-oculus-rift-release-date-revealed> (besucht am 19.02.2017).
- [inv15] invenio. *CISR haptically-enabled FlAim Trainer on show*. 2015. URL: <http://invenio.deakin.edu.au/cisr-haptically-enabled-flaim-trainer-on-show/> (besucht am 19.02.2017).
- [Kah17] N. Kahrl. „Thermorezeption in der virtuellen Realität - Entwicklung und Evaluation eines Systems zur Steuerung eines Peltier-basierten Prototypen für die Verbesserung des Präsenzgefühls“. Nicolas.Kahrl@gmx.net. B.S. Thesis. Albrechtstraße 30, 49076 Osnabrück: Hochschule Osnabrück, Feb. 2017.
- [Kov14] S. Kovach. „Facebook Buys Oculus VR for 2 Billion“. In: *Business Insider* (2014).
- [Kur16] A. Kurniawan. *Arduino and Genuino MKR1000 Development Workshop*: PE Press, 2016. URL: <https://books.google.de/books?id=UjvxCwAAQBAJ>.
- [KX16] Y. KUANG und W. Xin. „Study on Unity 3d Character Animation in Mecanim Animation System“. In: *DEStech Transactions on Computer Science and Engineering cmsam* (2016).
- [Len04] E. Lenoir. *Leiterbahnführung bei Spannungswandlern*. 2004. URL: <https://www.yumpu.com/de/document/view/24303616/leiterbahnfuehrung-bei-spannungswandlern> (besucht am 19.02.2017).
- [MC01] K. Mania und A. Chalmers. „The effects of levels of immersion on memory and presence in virtual environments: A reality centered approach“. In: *CyberPsychology and Behavior* 4.2 (2001), S. 247–264.
- [Mer17] Merriam-Webster. *Virtual Reality*. 2017. URL: <https://www.merriam-webster.com/dictionary/virtual+reality> (besucht am 19.02.2017).
- [Min13] P. Minns. *C Programming For the PC the MAC and the Arduino Microcontroller System*. AuthorHouse, 2013. ISBN: 9781491880500. URL: <https://books.google.de/books?id=oigWAgAAQBAJ>.
- [Min80] M. Minsky. „Telepresence“. In: *Omni* 2.6 (1980), S. 45–51.

- [MM07] R. Muller-Cajar und R. Mukundan. „Triangulation-a new algorithm for inverse kinematics“. In: (2007).
- [NFL99] U. Norrsell, S. Finger und C. Lajonchere. „Cutaneous sensory spots and the “law of specific nerve energies”: history and development of ideas“. In: *Brain Research Bulletin* 48.5 (1999), S. 457–465.
- [Nor13] T. Norton. *Learning C# by Developing Games with Unity 3D*. \*\*. Packt Publishing, 2013. ISBN: 9781849696593. URL: <https://books.google.de/books?id=7Zf9AAAAQBAJ>.
- [Ocu] Oculus. *Oculus Rift: Step Into the Game*. URL: <https://www.kickstarter.com/projects/1523379957/oculus-rift-step-into-the-game> (besucht am 19.02.2017).
- [Oes01] J. Oestreich. „Untersuchungen an neuen thermoelektrischen Materialien“. Diss. Konstanz: Universität Konstanz, 2001, S. 7–8.
- [PG14] S. Prescott und P. Gamer. *Oculus founder Palmer Luckey thinks 30 frames per second is 'a failure'*. 2014. URL: <http://www.pcgamer.com/oculus-founder-palmer-luckey-thinks-30-frames-per-second-is-a-failure/> (besucht am 19.02.2017).
- [PKS14] H.-C. Pape, A. Kurtz und S. Silbernagl. *Thermosensibilität*. Physiologie. Georg Thieme Verlag, 2014, S. 708–710. ISBN: 9783137960072.
- [RL11] C. Reitmaier und H. Lengfellner. *Transversaler Seebeck- und Peltier-Effekt in verkippten Metall-Halbleiter-Multilagenstrukturen*. Dissertationsreihe der Fakultät für Physik der Universität Regensburg: Bd. 26. Regensburg Universitätsbibliothek Regensburg 2011, 2011, S. 24. URL: <http://widgets.ebscohost.com/prod/customerspecific/s1105463 vpn.php?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cat03594a&AN=HSO.%09%0971888855&lang=de&site=eds-live>.
- [Rub16] J. Rubin. *What is haptics, really? Part 3: thermal feedback*. 2016. URL: <http://axonvr.com/blog/what-is-haptics-really-part-3-thermal-feedback> (besucht am 19.02.2017).
- [SC97] R. Seidel und P. Chatelier. *Virtual Reality, Training's Future?: Perspectives on Virtual Reality and Related Emerging Technologies*. Defense Research Series. Springer US, 1997, S. 1. ISBN: 9780306454868. URL: <https://books.google.de/books?id=fVSBi6CPudUC>.

- [Sei15] C. Seifert. *Spiele entwickeln mit Unity 5: 2D- und 3D-Games mit Unity und C# für Desktop, Web & Mobile*. Carl Hanser Verlag GmbH & Company KG, 2015. ISBN: 9783446445802. URL: <https://books.google.de/books?id=ZZo-CgAAQBAJ>.
- [SG15] B. Sean und GIZMODO. *This Is How Valve's Amazing Lighthouse Tracking Technology Works*. 2015. URL: <http://gizmodo.com>this-is-how-valve-s-amazing-lighthouse-tracking-technol-1705356768> (besucht am 19.02.2017).
- [SK01] C. Schierz und H. Krueger. *Physiologie II: Sinnesorgane*. Techn. Ber. Institut für Hygiene und Arbeitsphysiologie (Zürich), 2001, S. 11–28.
- [SKK16] S. Schaal, K. Kunsch und S. Kunsch. „1 Der Körper des Menschen“. In: *Der Mensch in Zahlen: Eine Datensammlung in Tabellen mit über 20000 Einzelwerten*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016, S. 166–167. ISBN: 978-3-642-55399-8.
- [Son16] Sony. *PLAYSTATION®VR LAUNCHES OCTOBER 2016 AVAILABLE GLOBALLY AT 44,980 YEN, 399 USD, 399 Euro AND 349 Pound*. 2016. URL: <https://www.playstation.com/en-us/corporate/press-releases/2016/playstation-vr-launches-october-2016-available-globally-at-44980-yen-399-usd-399-and-349/> (besucht am 19.02.2017).
- [SSA14] R. Scheuren, S. Sütterlin und F. Anton. „Rumination and interoceptive accuracy predict the occurrence of the thermal grill illusion of pain“. In: *BMC Psychology* 2.1 (2014), S. 22. ISSN: 2050-7283.
- [Ste+15] M. Stengel u. a. „An Affordable Solution for Binocular Eye Tracking and Calibration in Head-mounted Displays“. In: *Proceedings of the 23rd ACM International Conference on Multimedia*. MM 15. Brisbane, Australia: ACM, 2015, S. 15–24. ISBN: 978-1-4503-3459-4. DOI: [10.1145/2733373.2806265](https://doi.org/10.1145/2733373.2806265).
- [Ste92] J. Steuer. „Defining Virtual Reality: Dimensions Determining Telepresence“. In: *Journal of Communication* 42.4 (1992), S. 73–93. ISSN: 1460-2466.
- [SU93] M. Slater und M. Usoh. „Representations systems, perceptual position, and presence in immersive virtual environments“. In: *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 2.3 (1993), S. 221–233.
- [Sut65] I. E. Sutherland. „The ultimate display“. In: *Multimedia: From Wagner to virtual reality* (1965).

- [Sut68] I. E. Sutherland. „A Head-mounted Three Dimensional Display“. In: *Proceedings of the December 9-11, 1968, Fall Joint Computer Conference, Part I*. AFIPS '68 (Fall, part I). San Francisco, California: ACM, 1968, S. 757–764.
- [SW97] M. Slater und S. Wilbur. „A framework for immersive virtual environments (FIVE): Speculations on the role of presence in virtual environments“. In: *Presence: Teleoperators and virtual environments* 6.6 (1997), S. 603–616.
- [Uni16a] Unity Technologies. *Ein Build, Bereitstellung überall Branchenführender Multiplatform-Support*. 2016. URL: <https://unity3d.com/unity/multiplatform> (besucht am 19.02.2017).
- [Uni16b] Unity Technologies. *Unity Asset Store*. 2016. URL: <https://www.assetstore.unity3d.com/en/> (besucht am 19.02.2017).
- [UPL17] UPLOAD. ‘Flaim Trainer’ Uses Vive’s Tracker For A Realistic Firefighting Experience. 2017. URL: <http://uploadvr.com/flaim-trainer-uses-vives-tracker-realistic-firefighting-experience/> (besucht am 19.02.2017).
- [Viva] Vive. *Tips for setting up the base stations*. URL: [https://www.vive.com/us/support/category\\_howto/839374.html](https://www.vive.com/us/support/category_howto/839374.html) (besucht am 19.02.2017).
- [Vivb] Vive. *Vive Hardware*. URL: <https://www.vive.com/de/product/> (besucht am 19.02.2017).
- [Wan+10] S. Wang u. a. „A new method of virtual reality based on Unity3D“. In: *2010 18th International Conference on Geoinformatics*. Juni 2010, S. 1–5. DOI: 10.1109/GEOINFORMATICS.2010.5567608.
- [Wei15] S. Weinbaum. *Pygmalion’s Spectacles*. Bookclassic, 2015. ISBN: 9789635231188.
- [Wüs09] K. Wüst. *Mikroprozessorteknik: Grundlagen, Architekturen, Schaltungstechnik und Betrieb von Mikroprozessoren und Mikrocontrollern*. Vieweg + Teubner, 2009, S. 246. ISBN: 9783834804617. URL: <https://books.google.de/books?id=cTg6c9goVe8C>.
- [Xu+14] Y. Xu u. a. „Using PhysX Simulation Fire Model of Backdraft in Unity 3D Game Engine“. In: *change* 9.6 (2014).
- [Xu+15] H. Xu u. a. „The Thermal Grill Illusion: A Study Using a Consciousness System“. In: *Procedia Computer Science* 71.1 (2015), S. 38.
- [YJH11] K. Yang, J. Jie und S. Haihui. „Study on the virtual natural landscape walkthrough by using Unity 3D“. In: *2011 IEEE International Symposium on VR Innovation*. März 2011, S. 235–238. DOI: 10.1109/ISVRI.2011.5759642.

- [Zha03] H. Zhang. „Human thermal sensation and comfort in transient and non-uniform thermal environments“. In: *Center for the Built Environment* (2003), S. 5–8.
- [ZZ09] M. Zachara und J. P. Zagal. „Challenges for Success in Stereo Gaming: A Virtual Boy Case Study“. In: *Proceedings of the International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology*. ACE '09. Athens, Greece: ACM, 2009, S. 99–106. ISBN: 978-1-60558-864-3. DOI: [10.1145/1690388.1690406](https://doi.org/10.1145/1690388.1690406).

# B Dokumente der Thermorezeptionszonen-Evaluation

## B.1 Bewertungsskalen der Versuchsfragen

|           |                               |                                    |                                    |                                   |                                 |
|-----------|-------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| Frage 2.  | 1<br>Spüre gar nichts         | 2<br>Spüre Wärme<br>Kaum           | 3<br>Spüre Wärme<br>Ein wenig      | 4<br>Spüre Wärme<br>Gut           | 5<br>Spüre Wärme<br>Sehr gut    |
|           |                               |                                    |                                    |                                   |                                 |
| Frage 3.  | 1<br>Zu Kalt                  | 2<br>Leicht Warm                   | 3<br>Angenehm<br>Warm              | 4<br>Deutlich Warm                | 5<br>Zu Warm                    |
|           |                               |                                    |                                    |                                   |                                 |
| Frage 4.  | 1<br>Nur direkt an<br>Element | 2<br>Ein wenig mehr<br>Als Element | 3<br>nur Umgebung<br>Der Stelle    | 4<br>Ein wenig mehr<br>Als Stelle | 5<br>Geht über Stelle<br>Hinaus |
|           |                               |                                    |                                    |                                   |                                 |
| Frage 6.  | 1<br>Spüre gar nichts         | 2<br>Spüre Kälte<br>Kaum           | 3<br>Spüre Kälte<br>Ein wenig      | 4<br>Spüre Kälte                  | 5<br>Spüre Kälte<br>Sehr gut    |
|           |                               |                                    |                                    |                                   |                                 |
| Frage 7.  | 1<br>Nicht Kalt genug         | 2<br>Leicht Kalt                   | 3<br>Angemessen<br>Kalt            | 4<br>Deutlich Kalt                | 5<br>Zu Kalt                    |
|           |                               |                                    |                                    |                                   |                                 |
| Frage 8.  | 1<br>Nur direkt an<br>Element | 2<br>Ein wenig mehr<br>Als Element | 3<br>nur Umgebung<br>Der Stelle    | 4<br>Ein wenig mehr<br>Als Stelle | 5<br>Geht über Stelle<br>Hinaus |
|           |                               |                                    |                                    |                                   |                                 |
| Frage 10. | 1<br>Kein Schmerz             | 2<br>Leichter<br>Schmerz           | 3<br>Angemessen<br>Starker Schmerz | 4<br>Starker<br>Schmerz           | 5<br>Zu starker<br>Schmerz      |
|           |                               |                                    |                                    |                                   |                                 |
| Frage 11. | 1<br>Schlecht                 | 2<br>Nicht gut                     | 3<br>Gut                           | 4<br>Sehr gut                     | 5<br>Perfekt                    |

Abbildung B.1: Skalen der Versuchsfragen.

## B.2 Zusatzdaten und Diagramme der Auswertung

| Frage Nr. |                                      | Handgelenk | Oberarm | Stirn | Nacken | Rücken | Bauch | Schlüsselbein |
|-----------|--------------------------------------|------------|---------|-------|--------|--------|-------|---------------|
|           | Wärme                                |            |         |       |        |        |       |               |
| 1         | Reaktionsgeschwindigkeit in Sekunden | 2,86       | 4,07    | 6,9   | 3,83   | 2,53   | 3,02  | 8,94          |
| 2         | Spürbarkeit                          | 3,83       | 3,81    | 3,17  | 4      | 4,78   | 4     | 3,11          |
| 3         | Intensität                           | 3,16       | 3,11    | 2,5   | 3,38   | 4,16   | 3,81  | 2,83          |
| 4         | Ausbreitung                          | 2,52       | 2,74    | 2,33  | 3,7    | 3,04   | 3,43  | 2,3           |
|           | Kälte                                |            |         |       |        |        |       |               |
| 5         | Reaktionsgeschwindigkeit in Sekunden | 1,08       | 1,18    | 0,84  | 1,03   | 0,86   | 1,03  | 1,48          |
| 6         | Spürbarkeit                          | 4,28       | 4       | 4,11  | 4,56   | 4,33   | 4,64  | 2,8           |
| 7         | Intensität                           | 3,31       | 3,78    | 3,78  | 3,94   | 3,56   | 3,83  | 2,83          |
| 8         | Ausbreitung                          | 2,32       | 2,61    | 2,56  | 3,5    | 3,43   | 3,22  | 1,91          |
|           | TGI                                  |            |         |       |        |        |       |               |
| 10        | Höhe Schmerz                         | 0,94       | 1,61    | 0,44  | 1,39   | 2,11   | 1,56  | 1,5           |
| 11        | Subjektive Bewertung                 | 2,89       | 2,72    | 2,49  | 3,04   | 3,89   | 3,83  | 2,64          |
|           | Gesamt Warm:                         | 3,17       | 3,22    | 2,67  | 3,69   | 3,99   | 3,75  | 2,75          |
|           | Gesamt Kalt:                         | 3,3        | 3,46    | 3,48  | 4      | 3,77   | 3,9   | 2,51          |

Abbildung B.2: Gesamtübersicht der Daten in Zahlen.

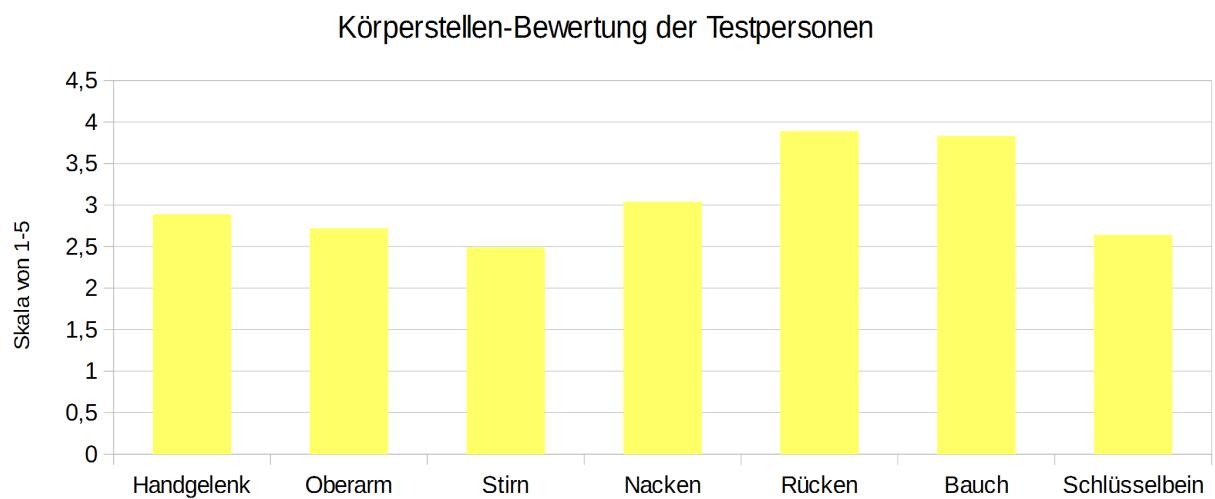


Abbildung B.3: Graph für die subjektive Gesamtbewertung der Körperstellen.

| Nr.   | Fragestellung:  |     |         |       |     |        |        | Nr.        | Fragestellung:   |     |     |     |      |     |     |     |   |   |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |     |     |      |     |     |     |     |  |   |     |     |     |      |     |     |    |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |     |   |  |   |   |     |   |   |     |   |     |   |     |   |     |     |     |     |     |  |   |     |     |     |     |     |     |     |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |     |     |   |   |   |   |    |   |     |   |   |   |   |   |  |    |     |   |   |   |   |     |   |    |   |   |   |   |     |   |   |  |    |   |   |   |   |   |     |     |     |  |
|---|---|-----|---------|-------|-----|--------|--------|------------|--|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|---|---|---|---|---|---|--|---|---|---|---|---|---|---|---|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|--|---|-----|-----|-----|------|-----|-----|----|---|---|---|-----|---|---|---|---|--|---|-----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|-----|---|---|---|---|--|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|-----|---|---|---|-----|---|--|---|---|-----|---|---|-----|---|-----|---|-----|---|-----|-----|-----|-----|-----|--|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---|---|---|---|---|---|-----|---|--|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|-----|---|---|---|---|--|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|-----|---|--|---|---|-----|-----|---|---|---|---|----|---|-----|---|---|---|---|---|--|----|-----|---|---|---|---|-----|---|----|---|---|---|---|-----|---|---|--|----|---|---|---|---|---|-----|-----|-----|--|
| Wärme:  |   |     |         |       |     |        |        | Kälte:     |  |     |     |     |      |     |     |     |   |   |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |     |     |      |     |     |     |     |  |   |     |     |     |      |     |     |    |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |     |   |  |   |   |     |   |   |     |   |     |   |     |   |     |     |     |     |     |  |   |     |     |     |     |     |     |     |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |     |     |   |   |   |   |    |   |     |   |   |   |   |   |  |    |     |   |   |   |   |     |   |    |   |   |   |   |     |   |   |  |    |   |   |   |   |   |     |     |     |  |
| 1.  | Ab wann spürst du die Wärme?                                      |     |         |       |     |        |        | 5.         | Ab wann spürst du die Kälte?   |     |     |     |      |     |     |     |   |   |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |     |     |      |     |     |     |     |  |   |     |     |     |      |     |     |    |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |     |   |  |   |   |     |   |   |     |   |     |   |     |   |     |     |     |     |     |  |   |     |     |     |     |     |     |     |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |     |     |   |   |   |   |    |   |     |   |   |   |   |   |  |    |     |   |   |   |   |     |   |    |   |   |   |   |     |   |   |  |    |   |   |   |   |   |     |     |     |  |
| 2.  | Auf einer Skala von 1 bis 5, wie deutlich spürst du die Wärme?    |     |         |       |     |        |        | 6.         | Auf einer Skala von 1 bis 5, wie deutlich spürst du die Kälte?                   |     |     |     |      |     |     |     |   |   |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |     |     |      |     |     |     |     |  |   |     |     |     |      |     |     |    |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |     |   |  |   |   |     |   |   |     |   |     |   |     |   |     |     |     |     |     |  |   |     |     |     |     |     |     |     |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |     |     |   |   |   |   |    |   |     |   |   |   |   |   |  |    |     |   |   |   |   |     |   |    |   |   |   |   |     |   |   |  |    |   |   |   |   |   |     |     |     |  |
| 3.  | Auf einer Skala von 1 bis 5, wie würdest du die Wärme einstufen?  |     |         |       |     |        |        | 7.         | Auf einer Skala von 1 bis 5, wie würdest du die Kälte einstufen?                 |     |     |     |      |     |     |     |   |   |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |     |     |      |     |     |     |     |  |   |     |     |     |      |     |     |    |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |     |   |  |   |   |     |   |   |     |   |     |   |     |   |     |     |     |     |     |  |   |     |     |     |     |     |     |     |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |     |     |   |   |   |   |    |   |     |   |   |   |   |   |  |    |     |   |   |   |   |     |   |    |   |   |   |   |     |   |   |  |    |   |   |   |   |   |     |     |     |  |
| 4.  | Auf einer Skala von 1 bis 5, wie weit breitet sich Die Wärme aus? |     |         |       |     |        |        | 8.         | Auf einer Skala von 1 bis 5, wie weit breitet sich Die Kälte aus?                |     |     |     |      |     |     |     |   |   |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |     |     |      |     |     |     |     |  |   |     |     |     |      |     |     |    |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |     |   |  |   |   |     |   |   |     |   |     |   |     |   |     |     |     |     |     |  |   |     |     |     |     |     |     |     |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |     |     |   |   |   |   |    |   |     |   |   |   |   |   |  |    |     |   |   |   |   |     |   |    |   |   |   |   |     |   |   |  |    |   |   |   |   |   |     |     |     |  |
| TG1:  |   |     |         |       |     |        |        | Insgesamt: |  |     |     |     |      |     |     |     |   |   |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |     |     |      |     |     |     |     |  |   |     |     |     |      |     |     |    |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |     |   |  |   |   |     |   |   |     |   |     |   |     |   |     |     |     |     |     |  |   |     |     |     |     |     |     |     |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |     |     |   |   |   |   |    |   |     |   |   |   |   |   |  |    |     |   |   |   |   |     |   |    |   |   |   |   |     |   |   |  |    |   |   |   |   |   |     |     |     |  |
| 10.   | Auf einer Skala von 1 bis 5, wie stark ist Der Schmerz?           |     |         |       |     |        |        | 11.        | Auf einer Skala von 1 bis 5, wie würdest du die Körperstelle insgesamt bewerten? |     |     |     |      |     |     |     |   |   |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |     |     |      |     |     |     |     |  |   |     |     |     |      |     |     |    |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |     |   |  |   |   |     |   |   |     |   |     |   |     |   |     |     |     |     |     |  |   |     |     |     |     |     |     |     |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |     |     |   |   |   |   |    |   |     |   |   |   |   |   |  |    |     |   |   |   |   |     |   |    |   |   |   |   |     |   |   |  |    |   |   |   |   |   |     |     |     |  |
| Körperstellen:  | Handgelenk  |     | Oberarm | Stirn |     | Nacken | Rücken | Bauch      | Brust  |     |     |     |      |     |     |     |   |   |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |     |     |      |     |     |     |     |  |   |     |     |     |      |     |     |    |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |     |   |  |   |   |     |   |   |     |   |     |   |     |   |     |     |     |     |     |  |   |     |     |     |     |     |     |     |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |     |     |   |   |   |   |    |   |     |   |   |   |   |   |  |    |     |   |   |   |   |     |   |    |   |   |   |   |     |   |   |  |    |   |   |   |   |   |     |     |     |  |
| Buchstabe:  | A   |     | B       | C     |     | D      | E      | F          | G  |     |     |     |      |     |     |     |   |   |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |     |     |      |     |     |     |     |  |   |     |     |     |      |     |     |    |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |     |   |  |   |   |     |   |   |     |   |     |   |     |   |     |     |     |     |     |  |   |     |     |     |     |     |     |     |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |     |     |   |   |   |   |    |   |     |   |   |   |   |   |  |    |     |   |   |   |   |     |   |    |   |   |   |   |     |   |   |  |    |   |   |   |   |   |     |     |     |  |
| TP1   |   |     |         |       |     |        |        |            |  |     |     |     |      |     | TP2 |     |   |   |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |     |     |      |     |     |     |     |  |   |     |     |     |      |     |     |    |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |     |   |  |   |   |     |   |   |     |   |     |   |     |   |     |     |     |     |     |  |   |     |     |     |     |     |     |     |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |     |     |   |   |   |   |    |   |     |   |   |   |   |   |  |    |     |   |   |   |   |     |   |    |   |   |   |   |     |   |   |  |    |   |   |   |   |   |     |     |     |  |
| <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th></th><th>A</th><th>B</th><th>C</th><th>D</th><th>E</th><th>F</th><th>G</th><th></th><th>A</th><th>B</th><th>C</th><th>D</th><th>E</th><th>F</th><th>G</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>2</td><td>4,5</td><td>2,04</td><td>3</td><td>2,4</td><td>2,8</td><td>4,4</td><td></td><td>1</td><td>4</td><td>5,3</td><td>9,3</td><td>10,4</td><td>3,2</td><td>4,8</td><td>30</td></tr> <tr><td>2</td><td>4</td><td>3</td><td>3,5</td><td>3</td><td>4</td><td>3</td><td>3</td><td></td><td>2</td><td>2,5</td><td>4</td><td>2</td><td>4</td><td>5</td><td>3</td><td>2</td></tr> <tr><td>3</td><td>3</td><td>2</td><td>2,5</td><td>2</td><td>4</td><td>3</td><td>2</td><td></td><td>3</td><td>2</td><td>3</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>3</td><td>2</td></tr> <tr><td>4</td><td>3</td><td>1</td><td>1</td><td>3</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td></td><td>4</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>3</td><td>2</td><td>4</td><td>3</td></tr> <tr><td>5</td><td>2</td><td>2</td><td>1,2</td><td>1,5</td><td>0,5</td><td>1,5</td><td>1,6</td><td></td><td>5</td><td>1,7</td><td>1,6</td><td>1,5</td><td>1,3</td><td>1,4</td><td>1,4</td><td>1</td></tr> <tr><td>6</td><td>2</td><td>4</td><td>2</td><td>5</td><td>5</td><td>4,5</td><td>3</td><td></td><td>6</td><td>4</td><td>3</td><td>3</td><td>4</td><td>3</td><td>4</td><td>3</td></tr> <tr><td>7</td><td>4</td><td>3</td><td>2,5</td><td>4</td><td>4</td><td>4</td><td>3</td><td></td><td>7</td><td>2</td><td>3</td><td>3</td><td>3</td><td>3</td><td>3</td><td>3</td></tr> <tr><td>8</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>2</td><td>3</td><td></td><td>8</td><td>2</td><td>2</td><td>3</td><td>3</td><td>3</td><td>3</td><td>2</td></tr> <tr><td>10</td><td>3</td><td>2</td><td>0</td><td>2</td><td>3</td><td>0</td><td>2</td><td></td><td>10</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>11</td><td>3</td><td>2</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>3</td><td>2</td><td></td><td>11</td><td>3</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>4</td><td>4</td><td>3</td></tr> </tbody> </table>                 |   |     |         |       |     |        |        |            |  |     |     |     |      |     |     | A   | B | C | D | E | F | G |  | A | B | C | D | E | F | G | 1 | 2   | 4,5 | 2,04 | 3   | 2,4 | 2,8 | 4,4 |  | 1 | 4   | 5,3 | 9,3 | 10,4 | 3,2 | 4,8 | 30 | 2 | 4 | 3 | 3,5 | 3 | 4 | 3 | 3 |  | 2 | 2,5 | 4 | 2 | 4 | 5 | 3 | 2 | 3 | 3 | 2 | 2,5 | 2 | 4 | 3 | 2 |  | 3 | 2 | 3 | 2 | 3 | 4 | 3 | 2 | 4 | 3 | 1   | 1 | 3 | 2 | 2   | 2 |  | 4 | 2 | 2   | 2 | 3 | 2   | 4 | 3   | 5 | 2   | 2 | 1,2 | 1,5 | 0,5 | 1,5 | 1,6 |  | 5 | 1,7 | 1,6 | 1,5 | 1,3 | 1,4 | 1,4 | 1   | 6 | 2 | 4 | 2 | 5 | 5 | 4,5 | 3 |  | 6 | 4 | 3 | 3 | 4 | 3 | 4 | 3 | 7 | 4 | 3 | 2,5 | 4 | 4 | 4 | 3 |  | 7 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 8 | 2 | 2 | 1 | 2 | 3 | 2   | 3 |  | 8 | 2 | 2   | 3   | 3 | 3 | 3 | 2 | 10 | 3 | 2   | 0 | 2 | 3 | 0 | 2 |  | 10 | 0   | 0 | 0 | 1 | 2 | 1   | 1 | 11 | 3 | 2 | 1 | 2 | 3   | 3 | 2 |  | 11 | 3 | 2 | 2 | 2 | 4 | 4   | 3   | TP2 |  |
|   | A   | B   | C       | D     | E   | F      | G      |            | A  | B   | C   | D   | E    | F   | G   |     |   |   |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |     |     |      |     |     |     |     |  |   |     |     |     |      |     |     |    |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |     |   |  |   |   |     |   |   |     |   |     |   |     |   |     |     |     |     |     |  |   |     |     |     |     |     |     |     |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |     |     |   |   |   |   |    |   |     |   |   |   |   |   |  |    |     |   |   |   |   |     |   |    |   |   |   |   |     |   |   |  |    |   |   |   |   |   |     |     |     |  |
| 1   | 2   | 4,5 | 2,04    | 3     | 2,4 | 2,8    | 4,4    |            | 1  | 4   | 5,3 | 9,3 | 10,4 | 3,2 | 4,8 | 30  |   |   |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |     |     |      |     |     |     |     |  |   |     |     |     |      |     |     |    |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |     |   |  |   |   |     |   |   |     |   |     |   |     |   |     |     |     |     |     |  |   |     |     |     |     |     |     |     |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |     |     |   |   |   |   |    |   |     |   |   |   |   |   |  |    |     |   |   |   |   |     |   |    |   |   |   |   |     |   |   |  |    |   |   |   |   |   |     |     |     |  |
| 2   | 4   | 3   | 3,5     | 3     | 4   | 3      | 3      |            | 2  | 2,5 | 4   | 2   | 4    | 5   | 3   | 2   |   |   |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |     |     |      |     |     |     |     |  |   |     |     |     |      |     |     |    |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |     |   |  |   |   |     |   |   |     |   |     |   |     |   |     |     |     |     |     |  |   |     |     |     |     |     |     |     |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |     |     |   |   |   |   |    |   |     |   |   |   |   |   |  |    |     |   |   |   |   |     |   |    |   |   |   |   |     |   |   |  |    |   |   |   |   |   |     |     |     |  |
| 3   | 3   | 2   | 2,5     | 2     | 4   | 3      | 2      |            | 3  | 2   | 3   | 2   | 3    | 4   | 3   | 2   |   |   |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |     |     |      |     |     |     |     |  |   |     |     |     |      |     |     |    |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |     |   |  |   |   |     |   |   |     |   |     |   |     |   |     |     |     |     |     |  |   |     |     |     |     |     |     |     |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |     |     |   |   |   |   |    |   |     |   |   |   |   |   |  |    |     |   |   |   |   |     |   |    |   |   |   |   |     |   |   |  |    |   |   |   |   |   |     |     |     |  |
| 4   | 3   | 1   | 1       | 3     | 2   | 2      | 2      |            | 4  | 2   | 2   | 2   | 3    | 2   | 4   | 3   |   |   |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |     |     |      |     |     |     |     |  |   |     |     |     |      |     |     |    |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |     |   |  |   |   |     |   |   |     |   |     |   |     |   |     |     |     |     |     |  |   |     |     |     |     |     |     |     |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |     |     |   |   |   |   |    |   |     |   |   |   |   |   |  |    |     |   |   |   |   |     |   |    |   |   |   |   |     |   |   |  |    |   |   |   |   |   |     |     |     |  |
| 5   | 2   | 2   | 1,2     | 1,5   | 0,5 | 1,5    | 1,6    |            | 5  | 1,7 | 1,6 | 1,5 | 1,3  | 1,4 | 1,4 | 1   |   |   |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |     |     |      |     |     |     |     |  |   |     |     |     |      |     |     |    |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |     |   |  |   |   |     |   |   |     |   |     |   |     |   |     |     |     |     |     |  |   |     |     |     |     |     |     |     |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |     |     |   |   |   |   |    |   |     |   |   |   |   |   |  |    |     |   |   |   |   |     |   |    |   |   |   |   |     |   |   |  |    |   |   |   |   |   |     |     |     |  |
| 6   | 2   | 4   | 2       | 5     | 5   | 4,5    | 3      |            | 6  | 4   | 3   | 3   | 4    | 3   | 4   | 3   |   |   |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |     |     |      |     |     |     |     |  |   |     |     |     |      |     |     |    |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |     |   |  |   |   |     |   |   |     |   |     |   |     |   |     |     |     |     |     |  |   |     |     |     |     |     |     |     |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |     |     |   |   |   |   |    |   |     |   |   |   |   |   |  |    |     |   |   |   |   |     |   |    |   |   |   |   |     |   |   |  |    |   |   |   |   |   |     |     |     |  |
| 7   | 4   | 3   | 2,5     | 4     | 4   | 4      | 3      |            | 7  | 2   | 3   | 3   | 3    | 3   | 3   | 3   |   |   |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |     |     |      |     |     |     |     |  |   |     |     |     |      |     |     |    |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |     |   |  |   |   |     |   |   |     |   |     |   |     |   |     |     |     |     |     |  |   |     |     |     |     |     |     |     |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |     |     |   |   |   |   |    |   |     |   |   |   |   |   |  |    |     |   |   |   |   |     |   |    |   |   |   |   |     |   |   |  |    |   |   |   |   |   |     |     |     |  |
| 8   | 2   | 2   | 1       | 2     | 3   | 2      | 3      |            | 8  | 2   | 2   | 3   | 3    | 3   | 3   | 2   |   |   |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |     |     |      |     |     |     |     |  |   |     |     |     |      |     |     |    |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |     |   |  |   |   |     |   |   |     |   |     |   |     |   |     |     |     |     |     |  |   |     |     |     |     |     |     |     |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |     |     |   |   |   |   |    |   |     |   |   |   |   |   |  |    |     |   |   |   |   |     |   |    |   |   |   |   |     |   |   |  |    |   |   |   |   |   |     |     |     |  |
| 10  | 3   | 2   | 0       | 2     | 3   | 0      | 2      |            | 10   | 0   | 0   | 0   | 1    | 2   | 1   | 1   |   |   |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |     |     |      |     |     |     |     |  |   |     |     |     |      |     |     |    |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |     |   |  |   |   |     |   |   |     |   |     |   |     |   |     |     |     |     |     |  |   |     |     |     |     |     |     |     |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |     |     |   |   |   |   |    |   |     |   |   |   |   |   |  |    |     |   |   |   |   |     |   |    |   |   |   |   |     |   |   |  |    |   |   |   |   |   |     |     |     |  |
| 11  | 3   | 2   | 1       | 2     | 3   | 3      | 2      |            | 11   | 3   | 2   | 2   | 2    | 4   | 4   | 3   |   |   |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |     |     |      |     |     |     |     |  |   |     |     |     |      |     |     |    |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |     |   |  |   |   |     |   |   |     |   |     |   |     |   |     |     |     |     |     |  |   |     |     |     |     |     |     |     |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |     |     |   |   |   |   |    |   |     |   |   |   |   |   |  |    |     |   |   |   |   |     |   |    |   |   |   |   |     |   |   |  |    |   |   |   |   |   |     |     |     |  |
| TP3   |   |     |         |       |     |        |        |            |  |     |     |     |      |     | TP4 |     |   |   |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |     |     |      |     |     |     |     |  |   |     |     |     |      |     |     |    |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |     |   |  |   |   |     |   |   |     |   |     |   |     |   |     |     |     |     |     |  |   |     |     |     |     |     |     |     |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |     |     |   |   |   |   |    |   |     |   |   |   |   |   |  |    |     |   |   |   |   |     |   |    |   |   |   |   |     |   |   |  |    |   |   |   |   |   |     |     |     |  |
| <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th></th><th>A</th><th>B</th><th>C</th><th>D</th><th>E</th><th>F</th><th>G</th><th></th><th>A</th><th>B</th><th>C</th><th>D</th><th>E</th><th>F</th><th>G</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>2,5</td><td>2,5</td><td>9,8</td><td>3,9</td><td>4,5</td><td>2,9</td><td>30</td><td></td><td>1</td><td>3,8</td><td>4,3</td><td>4,3</td><td>4,9</td><td>2,5</td><td>2,1</td><td>3</td></tr> <tr><td>2</td><td>4</td><td>5</td><td>2</td><td>4</td><td>5</td><td>4</td><td>0</td><td></td><td>2</td><td>4</td><td>3</td><td>3</td><td>3</td><td>5</td><td>5</td><td>2</td></tr> <tr><td>3</td><td>4</td><td>4</td><td>2</td><td>4</td><td>4</td><td>4</td><td>0</td><td></td><td>3</td><td>3</td><td>3</td><td>2</td><td>3</td><td>5</td><td>4</td><td>3</td></tr> <tr><td>4</td><td>4</td><td>4,5</td><td>2</td><td>4</td><td>4</td><td>3,4</td><td>0</td><td></td><td>4</td><td>2</td><td>3,5</td><td>3</td><td>5</td><td>3,5</td><td>4</td><td>2,5</td></tr> <tr><td>5</td><td>0,5</td><td>2</td><td>0,2</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td></td><td>5</td><td>1,3</td><td>1,1</td><td>1,1</td><td>1,3</td><td>0,7</td><td>1,1</td><td>1,2</td></tr> <tr><td>6</td><td>5</td><td>3</td><td>5</td><td>5</td><td>4</td><td>5</td><td>2</td><td></td><td>6</td><td>5</td><td>5</td><td>4</td><td>4</td><td>4</td><td>5</td><td>2</td></tr> <tr><td>7</td><td>3</td><td>4</td><td>4</td><td>4</td><td>3</td><td>4</td><td>3</td><td></td><td>7</td><td>4</td><td>5</td><td>4</td><td>4</td><td>4</td><td>4</td><td>2</td></tr> <tr><td>8</td><td>3</td><td>4</td><td>4</td><td>4</td><td>3</td><td>3,5</td><td>2</td><td></td><td>8</td><td>3</td><td>3,5</td><td>2,5</td><td>4</td><td>4</td><td>4</td><td>2</td></tr> <tr><td>10</td><td>0</td><td>4,5</td><td>0</td><td>0</td><td>4</td><td>0</td><td>0</td><td></td><td>10</td><td>1,5</td><td>2</td><td>3</td><td>3</td><td>3</td><td>3,5</td><td>1</td></tr> <tr><td>11</td><td>3</td><td>4</td><td>2</td><td>3</td><td>4,5</td><td>4</td><td>1</td><td></td><td>11</td><td>1</td><td>2</td><td>4</td><td>4</td><td>3</td><td>4,5</td><td>2,5</td></tr> </tbody> </table> |   |     |         |       |     |        |        |            |  |     |     |     |      |     |     | A   | B | C | D | E | F | G |  | A | B | C | D | E | F | G | 1 | 2,5 | 2,5 | 9,8  | 3,9 | 4,5 | 2,9 | 30  |  | 1 | 3,8 | 4,3 | 4,3 | 4,9  | 2,5 | 2,1 | 3  | 2 | 4 | 5 | 2   | 4 | 5 | 4 | 0 |  | 2 | 4   | 3 | 3 | 3 | 5 | 5 | 2 | 3 | 4 | 4 | 2   | 4 | 4 | 4 | 0 |  | 3 | 3 | 3 | 2 | 3 | 5 | 4 | 3 | 4 | 4 | 4,5 | 2 | 4 | 4 | 3,4 | 0 |  | 4 | 2 | 3,5 | 3 | 5 | 3,5 | 4 | 2,5 | 5 | 0,5 | 2 | 0,2 | 1   | 1   | 1   | 1   |  | 5 | 1,3 | 1,1 | 1,1 | 1,3 | 0,7 | 1,1 | 1,2 | 6 | 5 | 3 | 5 | 5 | 4 | 5   | 2 |  | 6 | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 | 5 | 2 | 7 | 3 | 4 | 4   | 4 | 3 | 4 | 3 |  | 7 | 4 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 2 | 8 | 3 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3,5 | 2 |  | 8 | 3 | 3,5 | 2,5 | 4 | 4 | 4 | 2 | 10 | 0 | 4,5 | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 |  | 10 | 1,5 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3,5 | 1 | 11 | 3 | 4 | 2 | 3 | 4,5 | 4 | 1 |  | 11 | 1 | 2 | 4 | 4 | 3 | 4,5 | 2,5 | TP4 |  |
|   | A   | B   | C       | D     | E   | F      | G      |            | A  | B   | C   | D   | E    | F   | G   |     |   |   |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |     |     |      |     |     |     |     |  |   |     |     |     |      |     |     |    |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |     |   |  |   |   |     |   |   |     |   |     |   |     |   |     |     |     |     |     |  |   |     |     |     |     |     |     |     |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |     |     |   |   |   |   |    |   |     |   |   |   |   |   |  |    |     |   |   |   |   |     |   |    |   |   |   |   |     |   |   |  |    |   |   |   |   |   |     |     |     |  |
| 1   | 2,5   | 2,5 | 9,8     | 3,9   | 4,5 | 2,9    | 30     |            | 1  | 3,8 | 4,3 | 4,3 | 4,9  | 2,5 | 2,1 | 3   |   |   |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |     |     |      |     |     |     |     |  |   |     |     |     |      |     |     |    |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |     |   |  |   |   |     |   |   |     |   |     |   |     |   |     |     |     |     |     |  |   |     |     |     |     |     |     |     |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |     |     |   |   |   |   |    |   |     |   |   |   |   |   |  |    |     |   |   |   |   |     |   |    |   |   |   |   |     |   |   |  |    |   |   |   |   |   |     |     |     |  |
| 2   | 4   | 5   | 2       | 4     | 5   | 4      | 0      |            | 2  | 4   | 3   | 3   | 3    | 5   | 5   | 2   |   |   |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |     |     |      |     |     |     |     |  |   |     |     |     |      |     |     |    |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |     |   |  |   |   |     |   |   |     |   |     |   |     |   |     |     |     |     |     |  |   |     |     |     |     |     |     |     |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |     |     |   |   |   |   |    |   |     |   |   |   |   |   |  |    |     |   |   |   |   |     |   |    |   |   |   |   |     |   |   |  |    |   |   |   |   |   |     |     |     |  |
| 3   | 4   | 4   | 2       | 4     | 4   | 4      | 0      |            | 3  | 3   | 3   | 2   | 3    | 5   | 4   | 3   |   |   |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |     |     |      |     |     |     |     |  |   |     |     |     |      |     |     |    |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |     |   |  |   |   |     |   |   |     |   |     |   |     |   |     |     |     |     |     |  |   |     |     |     |     |     |     |     |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |     |     |   |   |   |   |    |   |     |   |   |   |   |   |  |    |     |   |   |   |   |     |   |    |   |   |   |   |     |   |   |  |    |   |   |   |   |   |     |     |     |  |
| 4   | 4   | 4,5 | 2       | 4     | 4   | 3,4    | 0      |            | 4  | 2   | 3,5 | 3   | 5    | 3,5 | 4   | 2,5 |   |   |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |     |     |      |     |     |     |     |  |   |     |     |     |      |     |     |    |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |     |   |  |   |   |     |   |   |     |   |     |   |     |   |     |     |     |     |     |  |   |     |     |     |     |     |     |     |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |     |     |   |   |   |   |    |   |     |   |   |   |   |   |  |    |     |   |   |   |   |     |   |    |   |   |   |   |     |   |   |  |    |   |   |   |   |   |     |     |     |  |
| 5   | 0,5   | 2   | 0,2     | 1     | 1   | 1      | 1      |            | 5  | 1,3 | 1,1 | 1,1 | 1,3  | 0,7 | 1,1 | 1,2 |   |   |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |     |     |      |     |     |     |     |  |   |     |     |     |      |     |     |    |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |     |   |  |   |   |     |   |   |     |   |     |   |     |   |     |     |     |     |     |  |   |     |     |     |     |     |     |     |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |     |     |   |   |   |   |    |   |     |   |   |   |   |   |  |    |     |   |   |   |   |     |   |    |   |   |   |   |     |   |   |  |    |   |   |   |   |   |     |     |     |  |
| 6   | 5   | 3   | 5       | 5     | 4   | 5      | 2      |            | 6  | 5   | 5   | 4   | 4    | 4   | 5   | 2   |   |   |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |     |     |      |     |     |     |     |  |   |     |     |     |      |     |     |    |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |     |   |  |   |   |     |   |   |     |   |     |   |     |   |     |     |     |     |     |  |   |     |     |     |     |     |     |     |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |     |     |   |   |   |   |    |   |     |   |   |   |   |   |  |    |     |   |   |   |   |     |   |    |   |   |   |   |     |   |   |  |    |   |   |   |   |   |     |     |     |  |
| 7   | 3   | 4   | 4       | 4     | 3   | 4      | 3      |            | 7  | 4   | 5   | 4   | 4    | 4   | 4   | 2   |   |   |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |     |     |      |     |     |     |     |  |   |     |     |     |      |     |     |    |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |     |   |  |   |   |     |   |   |     |   |     |   |     |   |     |     |     |     |     |  |   |     |     |     |     |     |     |     |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |     |     |   |   |   |   |    |   |     |   |   |   |   |   |  |    |     |   |   |   |   |     |   |    |   |   |   |   |     |   |   |  |    |   |   |   |   |   |     |     |     |  |
| 8   | 3   | 4   | 4       | 4     | 3   | 3,5    | 2      |            | 8  | 3   | 3,5 | 2,5 | 4    | 4   | 4   | 2   |   |   |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |     |     |      |     |     |     |     |  |   |     |     |     |      |     |     |    |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |     |   |  |   |   |     |   |   |     |   |     |   |     |   |     |     |     |     |     |  |   |     |     |     |     |     |     |     |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |     |     |   |   |   |   |    |   |     |   |   |   |   |   |  |    |     |   |   |   |   |     |   |    |   |   |   |   |     |   |   |  |    |   |   |   |   |   |     |     |     |  |
| 10  | 0   | 4,5 | 0       | 0     | 4   | 0      | 0      |            | 10   | 1,5 | 2   | 3   | 3    | 3   | 3,5 | 1   |   |   |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |     |     |      |     |     |     |     |  |   |     |     |     |      |     |     |    |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |     |   |  |   |   |     |   |   |     |   |     |   |     |   |     |     |     |     |     |  |   |     |     |     |     |     |     |     |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |     |     |   |   |   |   |    |   |     |   |   |   |   |   |  |    |     |   |   |   |   |     |   |    |   |   |   |   |     |   |   |  |    |   |   |   |   |   |     |     |     |  |
| 11  | 3   | 4   | 2       | 3     | 4,5 | 4      | 1      |            | 11   | 1   | 2   | 4   | 4    | 3   | 4,5 | 2,5 |   |   |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |     |     |      |     |     |     |     |  |   |     |     |     |      |     |     |    |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |     |   |  |   |   |     |   |   |     |   |     |   |     |   |     |     |     |     |     |  |   |     |     |     |     |     |     |     |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |  |   |   |     |     |   |   |   |   |    |   |     |   |   |   |   |   |  |    |     |   |   |   |   |     |   |    |   |   |   |   |     |   |   |  |    |   |   |   |   |   |     |     |     |  |

Abbildung B.4: Auflistung aller Antworten der Testpersonen (1/2).

| TP5 |     |     |     |     |     |     | TP6  |    |     |     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|     | A   | B   | C   | D   | E   | F   | G    | A  | B   | C   | D   | E   | F   | G   |     |
| 1   | 3,1 | 5,4 | 20  | 3,5 | 2,8 | 6   | 4,6  | 1  | 2,2 | 3,6 | 2,1 | 1,9 | 1,9 | 2,3 | 2,2 |
| 2   | 4   | 2,3 | 2   | 5   | 4   | 3   | 3    | 2  | 2   | 4   | 5   | 3   | 5   | 3   | 4   |
| 3   | 3,4 | 2   | 1   | 3,4 | 3,4 | 2,3 | 3    | 3  | 2   | 4   | 4   | 4   | 4   | 5   | 4   |
| 4   | 3   | 1,2 | 1   | 3,4 | 3,4 | 2   | 1,2  | 4  | 1,2 | 4   | 4   | 3,4 | 4,5 | 5   | 4   |
| 5   | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 4    | 5  | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1   | 1,2 | 1   |     |
| 6   | 4,5 | 3   | 5   | 5   | 4   | 4,3 | 3    | 6  | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 1,2 |
| 7   | 3,4 | 3   | 4   | 4,5 | 3   | 3   | 3    | 7  | 3,4 | 4   | 4   | 3   | 3   | 3   | 2   |
| 8   | 3,4 | 2   | 3   | 3   | 3,4 | 2   | 1,2  | 8  | 2   | 2   | 2   | 4   | 4   | 4   | 2   |
| 10  | 1   | 0   | 0   | 2   | 1   | 1,5 | 0    | 10 | 0   | 1   | 0   | 2   | 1   | 3   |     |
| 11  | 4   | 2   | 1   | 3,4 | 5   | 3   | 2,3  | 11 | 3   | 2   | 3,4 | 3   | 2   | 4   | 4   |
| TP7 |     |     |     |     |     |     | TP8  |    |     |     |     |     |     |     |     |
|     | A   | B   | C   | D   | E   | F   | G    | A  | B   | C   | D   | E   | F   | G   |     |
| 1   | 4,4 | 3,5 | 4,2 | 2,9 | 2,6 | 3,6 | 3,5  | 1  | 1,9 | 4,3 | 7   | 1,7 | 1,4 | 1,5 | 1,4 |
| 2   | 4   | 4   | 4   | 5   | 5   | 5   | 4    | 2  | 5   | 4   | 2   | 4   | 5   | 5   |     |
| 3   | 3   | 3   | 3   | 3   | 3   | 4   | 3    | 3  | 4   | 4   | 2   | 4,5 | 5   | 5   |     |
| 4   | 3   | 3   | 4   | 4   | 5   | 5   | 3    | 4  | 1,5 | 2   | 1   | 3,5 | 1   | 1,5 | 1   |
| 5   | 1,2 | 1,1 | 0,9 | 1,2 | 0,8 | 0,9 | 1,6  | 5  | 1,1 | 0,9 | 0,8 | 1   | 1   | 0,8 | 0,9 |
| 6   | 4   | 5   | 4   | 4   | 5   | 5   | 2    | 6  | 5   | 4   | 5   | 5   | 5   | 5   | 4   |
| 7   | 3   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4,5 | 3    | 7  | 3   | 4   | 4   | 4   | 4,5 | 3   |     |
| 8   | 2   | 2,5 | 4   | 4   | 5   | 5   | 1    | 8  | 1,5 | 2   | 1   | 3,5 | 2   | 1,5 | 1   |
| 10  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 10 | 3   | 5   | 0   | 4,5 | 4   | 5   | 4,5 |
| 11  | 3   | 4   | 2   | 3   | 4   | 4   | 2    | 11 | 2   | 2,5 | 4   | 4   | 5   | 4   | 3   |
| TP9 |     |     |     |     |     |     | TP10 |    |     |     |     |     |     |     |     |
|     | A   | B   | C   | D   | E   | F   | G    | A  | B   | C   | D   | E   | F   | G   |     |
| 1   | 1,8 | 3,2 | 3,4 | 2,3 | 1,5 | 1,2 | 1,4  | 1  | 3   | 4,5 | 1   | 2   | 2   | 1,3 | 1,5 |
| 2   | 5   | 5   | 5   | 5   | 5   | 5   | 5    | 2  | 4   | 4   | 1   | 3   | 4   | 2   |     |
| 3   | 4   | 3   | 4   | 3,5 | 5   | 4   | 3,5  | 3  | 3   | 2   | 2,5 | 2   | 4   | 4   | 2   |
| 4   | 3   | 3,5 | 3   | 4   | 2   | 4   | 4    | 4  | 2   | 2   | 1   | 3   | 3   | 2   |     |
| 5   | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 1   | 0,8 | 0,9 | 1    | 5  | 1   | 2   | 2,5 | 2   | 1   | 0,5 | 1   |
| 6   | 5   | 5   | 5   | 5   | 5   | 5   | 5    | 6  | 2   | 4   | 2   | 5   | 5   | 4,5 | 2   |
| 7   | 4   | 4   | 4,5 | 4   | 4   | 4,5 | 3,5  | 7  | 4   | 3   | 2,5 | 4   | 4   | 4   | 3   |
| 8   | 2   | 3,5 | 2,5 | 4   | 3,5 | 4   | 3    | 8  | 2   | 2   | 1   | 4   | 3   | 2   | 3   |
| 10  | 0   | 1   | 0   | 0   | 0   | 2   | 2    | 10 | 1   | 0   | 0   | 0   | 1   | 1   | 0   |
| 11  | 4   | 4   | 3   | 3   | 4,5 | 4   | 4    | 11 | 3   | 4   | 1   | 3   | 4   | 3   | 1   |

Abbildung B.5: Auflistung aller Antworten der Testpersonen (2/2).

## C Bilder der Entwicklung des Prototypen

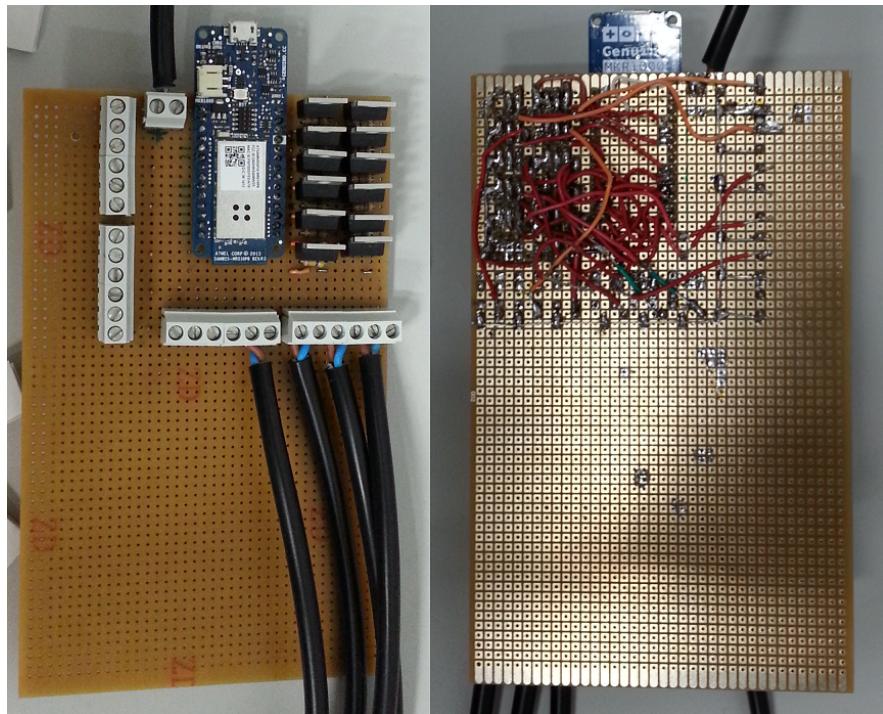


Abbildung C.1: Platine des Prototypen Version 1.

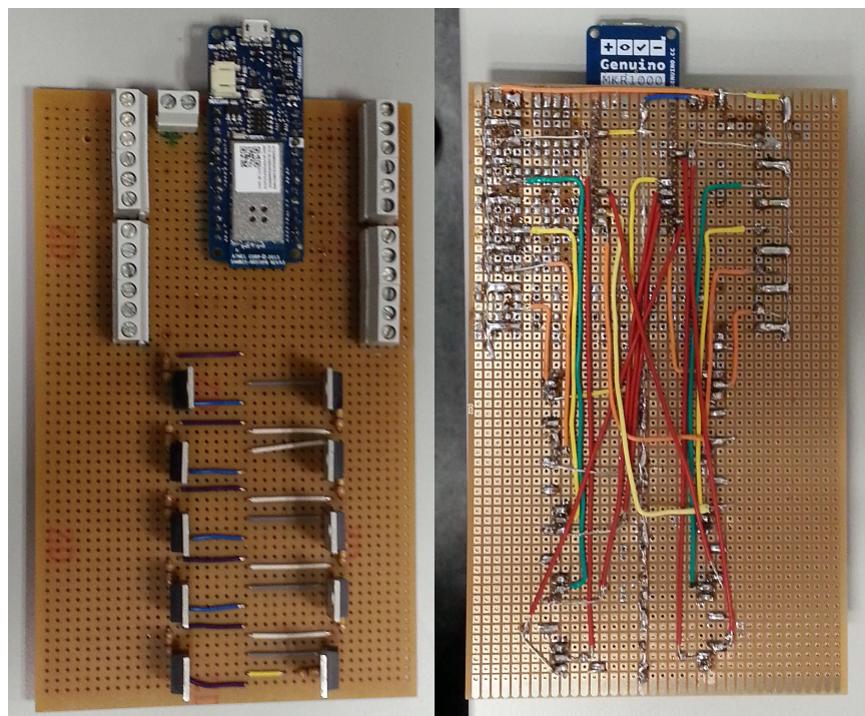


Abbildung C.2: Platine des Prototypen Version 2.

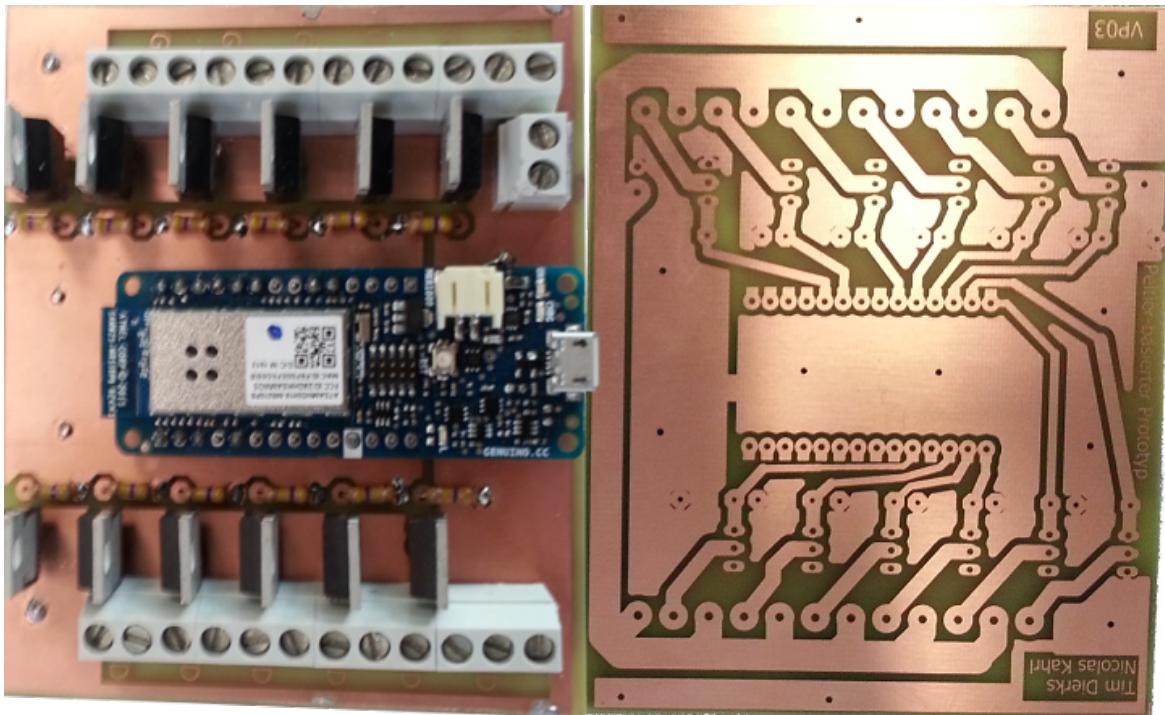


Abbildung C.3: Platine des Prototypen Version 3.

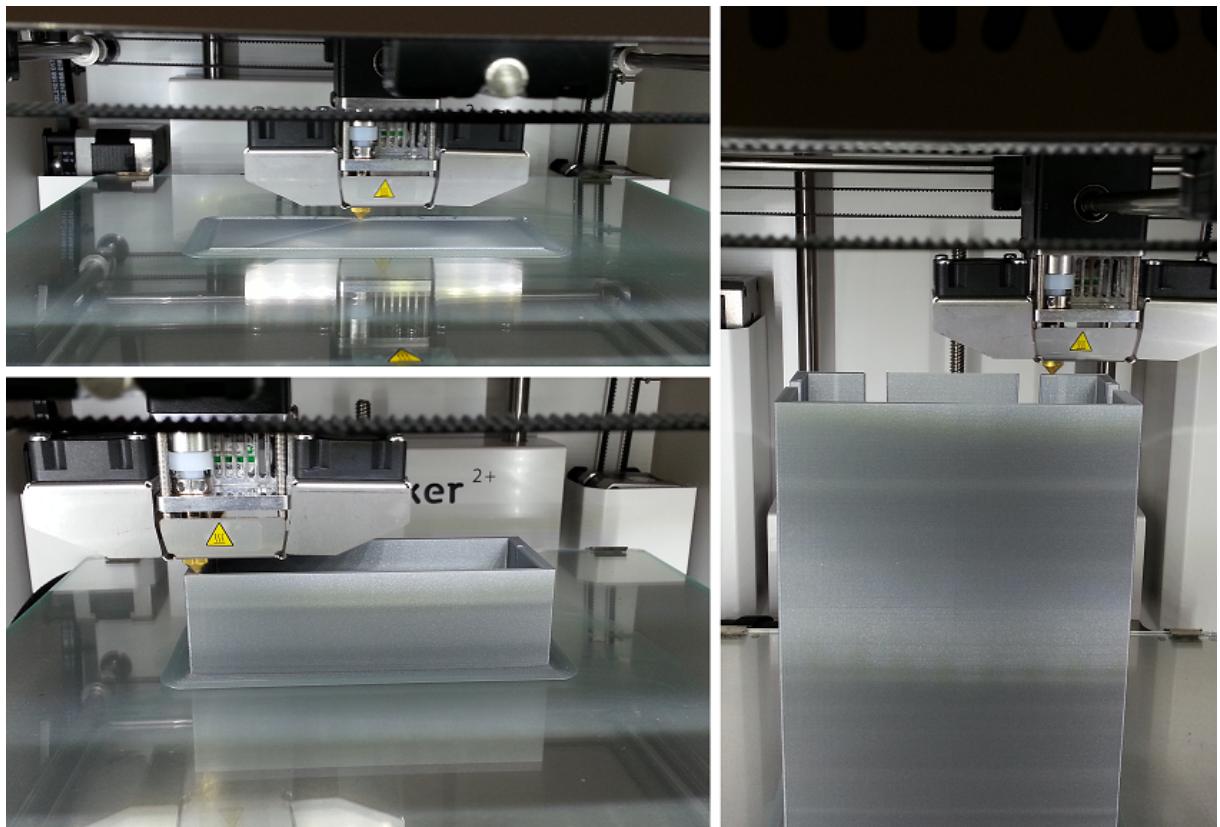


Abbildung C.4: 3D-druck der Schachtel des Prototypen.

## D Inhalte der CD

In der beigefügten CD sind folgende Ordner und Dateien enthalten.

| Ordnerverzeichnis   | Beschreibung  |
|---------------------|---|
| \Bachelorarbeit     | Die Bachelorarbeit im PDF-Format                              |
| \Unity_Anwendung    | Unity-Projekt/Plugin das in der Bachelorarbeit entstanden ist |
| \MKR1000            | Programm des Mikrocontroller                                  |
| \Versuchsergebnisse | Tabellen der Versuchsreihe (Ergebnisse & Auswertungen)        |
| \SchachtelModel     | Dateien für das 3D-Model der Schachtel                        |

Tabelle D.1: Inhalte der CD

## **Eidesstattliche Erklärung**

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche einzeln kenntlich gemacht. Es wurden keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt. Die Arbeit wurde bisher keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

---

Ort, Datum

---

Unterschrift

## **Urheberrechtliche Einwilligungserklärung**

Hiermit erkläre ich, dass ich damit einverstanden bin, dass meine Arbeit zum Zwecke des Plagiatsschutzes bei der Fa. Ephorus BV bis zu 5 Jahren in einer Datenbank für die Hochschule Osnabrück archiviert werden kann. Diese Einwilligung kann jederzeit widerrufen werden.

---

Ort, Datum

---

Unterschrift