

**BACHELORTHESIS**  
Alwin Lapp

# Tangible Interface für Remote Feedback in Wearable Fitness Systems

---

**FAKULTÄT TECHNIK UND INFORMATIK**  
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau

Faculty of Computer Science and Engineering  
Department of Automotive and  
Aeronautical Engineering

Alwin Lapp

# Tangible Interface für Remote Feedback in Wearable Fitness Systems

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung  
im Studiengang *Bachelor of Science Mechatronik*  
am Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer: Prof. Dr. Thomas Lehmann  
Zweitgutachter: Prof. Dr. Kai von Luck

Eingereicht am: 22. August 2021

**Alwin Lapp**

**Thema der Arbeit**

Tangible Interface für Remote Feedback in Wearable Fitness Systems

**Stichworte**

Tangible, Interface, Remote, Feedback, Wearable, Fitness

**Kurzzusammenfassung**

Diese Bachelorarbeit befasst sich mit der Möglichkeit, taktile Informationen mittels Aktuatorik am Körper haptisch begreifbar zu machen. Die Informationen werden dafür remote durch Sensorik ausgelöst und an ein am Körper getragenes Wearable gesendet. Zur Untersuchung wird ein kommunikatives System modelliert und dieses als Prototyp „Remote Yoga T-Shirt“ realisiert. Die Entwicklung findet unter der Berücksichtigung, sinnvoll realisierbarer Formen des haptischen Inputs und Feedbacks im Rahmen einer Bachelorarbeit statt.

**Alwin Lapp**

**Title of Thesis**

Tangible Interface for Remote Feedback in Wearable Fitness Systems

**Keywords**

Tangible, Interface, Remote, Feedback, Wearable, Fitness

**Abstract**

This bachelor thesis deals with the possibility of making tactile information haptically noticeable by means of actuators on the body. The information is triggered remotely by sensors and sent to a wearable worn on the body. For the investigation a communicative system is modeled and realized as a prototype "Remote Yoga T-Shirt". The development takes place in the context of a bachelor thesis, taking into account reasonable realizable forms of haptic input and feedback.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>vii</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>ix</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Aufgabenstellung . . . . .	1
1.2 Rahmenbedingung . . . . .	2
1.3 Ziel und Abgrenzung . . . . .	3
<b>2 Grundlagen</b>	<b>4</b>
2.1 Tangible Interface . . . . .	4
2.2 Fitness Wearables . . . . .	4
2.3 Remote . . . . .	5
2.3.1 Constrained Application Protocol . . . . .	5
2.3.2 MQTT Netzwerkprotokoll . . . . .	6
2.4 Mechanisches Nutzerfeedback . . . . .	8
2.4.1 Definition von spürbar . . . . .	8
2.4.2 Nutzerstudie zur Spürbarkeit . . . . .	9
2.4.3 Mikropneumatik . . . . .	10
2.4.4 Elektromechanik . . . . .	10
2.4.4.1 Lautsprecher . . . . .	11
2.4.4.2 Magnetsummer . . . . .	11
2.4.4.3 Vibrationsmotor . . . . .	12
2.4.4.4 Piezo . . . . .	13
2.5 Sensoren . . . . .	14
2.5.1 Kapazitiver (Berührungs-)Sensor . . . . .	14
2.5.2 Resistiver (Berührungs-)Sensor . . . . .	15
2.5.3 Wirkprinzip Drucksensor . . . . .	15

2.6	Physische Schnittstellen . . . . .	16
2.6.1	I <sup>2</sup> C-Schnittstelle . . . . .	16
2.6.2	Analog . . . . .	17
2.7	Programmiersprache MicroPython . . . . .	18
2.8	Mögliche Funktionskontrollen . . . . .	19
<b>3</b>	<b>Systemdesign</b>	<b>20</b>
3.1	Identifikation funktionaler Anforderungen und Randbedingungen . . . . .	20
3.2	Modellierung des Systems Remote Yoga T-Shirt . . . . .	22
3.2.1	Kontext Modell . . . . .	22
3.2.2	System Modell . . . . .	23
3.2.3	Subsystem Puppe Modell . . . . .	24
3.2.4	Subsystem Fitness Wearable Modell . . . . .	25
3.3	Designoptionen . . . . .	26
3.3.1	Anwendungsbeispiel/Yogaübung . . . . .	27
3.3.2	Aktuatorpositionen . . . . .	27
3.3.3	Aktuatorarten . . . . .	29
3.3.4	Bewertung der Designoptionen . . . . .	30
3.4	Entwurf des Prototypen . . . . .	31
3.4.1	Entwurf des Subsystem Puppe . . . . .	32
3.4.2	Entwurf des Subsystem Fitness Wearable . . . . .	33
<b>4</b>	<b>Realisierung des Prototypen</b>	<b>34</b>
4.1	Netzwerkaufbau . . . . .	35
4.2	Allgemeines zur Programmierung . . . . .	36
4.3	Subsystem Puppe . . . . .	37
4.3.1	Auswahl der Komponenten . . . . .	38
4.3.2	Konstruktionsplan . . . . .	39
4.3.3	Elektrischer Schaltplan . . . . .	41
4.3.4	Programmierung . . . . .	41
4.4	Subsystem Fitness Wearable . . . . .	42
4.4.1	Auswahl der Komponenten . . . . .	42
4.4.2	Konstruktionsplan . . . . .	44
4.4.3	Elektrischer und Pneumatischer Schaltplan . . . . .	44
4.4.4	Programmierung . . . . .	45

<b>5</b>	<b>Evaluation des Prototypen</b>	<b>46</b>
5.1	Messungen . . . . .	46
5.1.1	Messaufbau . . . . .	46
5.1.2	Sensorflächen . . . . .	47
5.1.3	Pneumatischer Aktuator . . . . .	49
5.2	Selbsterprobung . . . . .	51
5.3	Evaluation der funktionalen Anforderungen und Randbedingungen . . . . .	51
<b>6</b>	<b>Erkenntnisse</b>	<b>53</b>
<b>7</b>	<b>Ausblick</b>	<b>55</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>57</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>62</b>
A.1	Schaltpläne . . . . .	62
A.1.1	Elektrischer Schaltplan Subsystem Puppe . . . . .	62
A.1.2	Elektrischer Schaltplan Subsystem Fitness Wearable . . . . .	63
A.1.3	Pneumatischer Schaltplan Subsystem Fitness Wearable . . . . .	64
	<b>Selbstständigkeitserklärung</b>	<b>65</b>

# Abbildungsverzeichnis

2.1	CoAP beispielhafte Netzwerkarchitektur . . . . .	6
2.2	MQTT Publish/Subscribe Netzwerkarchitekturbeispiel . . . . .	7
2.3	MQTT Protokoll Paketaufbau . . . . .	7
2.4	Beispielhafter Lautsprecheraufbau (Quelle:[16]) . . . . .	11
2.5	Skizze des Aufbaus eines typischen magnetischen Summers (Quelle:[8]) . . . . .	12
2.6	Explosionsansicht eines Vibrationsmotor in Münzform (Quelle:[31]) . . . . .	13
2.7	Prinzipskizze des Aufbaus eines Piezodrucksensors (Quelle:[1]) . . . . .	15
2.8	Beispielhafter I <sup>2</sup> C Bus Aufbau . . . . .	16
2.9	I <sup>2</sup> C Bus serieller und bitweiser Protokoll Aufbau . . . . .	17
2.10	Darlingtonarray IC ULN2003A der Firma Texas Instruments (Quelle:[18]) . . . . .	18
3.1	System Kontext Diagramm . . . . .	23
3.2	Block Definition Diagramm, Gesamtsystem . . . . .	24
3.3	Internal Block Definition Diagramm, Subsystem Puppe . . . . .	25
3.4	Internal Block Definition Diagramm, Subsystem Fitness Wearable . . . . .	26
3.5	Skizze des Bewegungsablaufs der Yoga Übung Virabhadrasana 2 (Krieger 2, rechts ist die Zielpose dargestellt) . . . . .	27
3.6	Vorderansicht eines skizzierten Oberkörpers mit angedeuteten Aktuatorpositionen . . . . .	28
3.7	Rückansicht eines skizzierten Oberkörpers mit angedeuteten Aktuatorpositionen . . . . .	28
3.8	Vorder- und Rückansicht eines skizzierten Oberkörpers mit angedeuteten Aktuatorpositionen . . . . .	29
3.9	Angezeichnete Positionen der Aktuatoren auf dem T-Shirt des Fitness Wearables . . . . .	31
3.10	Prototypenentwurf des Subsystem Puppe . . . . .	32
3.11	Prototypenentwurf des Subsystem Fitness Wearable . . . . .	33

4.1	Ansicht des gesamten Prototypen, links das Subsystem Fitness Wearable und rechts das Subsystem Puppe (Quelle: Jessica Broscheit) . . . . .	34
4.2	Netzwerkaufbau des gesamten Prototypen zur Kommunikation mittels des MQTT Protokoll innerhalb eines WLAN Netzwerks . . . . .	35
4.3	Erste Version des Prototypen Subsystem Puppe . . . . .	37
4.4	Verkabelung der Sensorflächen zum Mikrocontroller des Subsystem Puppe	39
4.5	Prototyp Subsystem Puppe (Quelle: Jessica Broscheit) . . . . .	40
4.6	Subsystem Fitness Wearable auf links gedreht und freigelegt für Sicht auf innenliegenden Aufbau (Quelle: Jessica Broscheit) . . . . .	42
5.1	Messung der berührungsempfindlichen Sensorfläche am unterem Rücken der Puppe . . . . .	47
5.2	Messung aller berührungsempfindlichen Flächen am Subsystem Puppe Prototypen . . . . .	48
5.3	Messung des Drucks im Kissen des pneumatischen Aktuators am Subsystem Fitness Wearable . . . . .	49
5.4	Messung der Schaltzeiten der Pumpe des pneumatischen Aktuators am Subsystem Fitness Wearable . . . . .	50
5.5	Messung der Schaltzeiten der Magnetventile des pneumatischen Aktuators am Subsystem Fitness Wearable . . . . .	50
A.1	Elektrischer Schaltplan des Subsystem Puppe . . . . .	62
A.2	Elektrischer Schaltplan des Subsystem Fitness Wearable . . . . .	63
A.3	Pneumatischer Schaltplan des Subsystem Fitness Wearable . . . . .	64

# Tabellenverzeichnis

3.1 Funktionale Anforderungen an das Gesamtsystem . . . . .	21
4.1 Vergleichstabelle der elektrisch leitenden Garne . . . . .	39
5.1 Evaluierte funktionale Anforderungen an das Gesamtsystem . . . . .	52

# 1 Einleitung

Die Klimakrise aber vor allem die Corona Pandemie zwingen die Menschen ein Miteinander in einen digitalen Raum zu verlegen. Zum einen um die Anzahl an Flugreisen und Mobilität und den damit verbundenen CO<sub>2</sub> Ausstoß zu verringern. Vor allem aber um durch die Vermeidung von persönlichen Kontakten die Ansteckungsgefahr mit dem Coronavirus SARS-CoV-2 zu minimieren. Immer mehr Zusammenkünfte finden über das Internet mittels Anrufen oder Videokonferenzen statt [11][7][6]. Diese Entwicklung zeigt: kontaktlose Interaktionen über weite Entfernungen gestalten die Zukunft.

Diese Bachelorarbeit beschäftigt sich daher damit, wie ein System zur Kommunikation über Distanzen mit haptischer Eingabe und haptischem Feedback am Körper realisiert werden kann. Als Anwendungsbeispiel wurde ein Prototyp „Remote Yoga T-Shirt“ entwickelt. Bei diesem Beispiel eines Fitness Shirts, soll es dem Yogalehrer möglich gemacht werden, durch ein Tangible User Interface an dem vom Teilnehmer getragenen Fitness Wearable Remote haptisches Feedback auszulösen [34]. So soll, trotz der räumlichen Distanz, das Gefühl des gemeinsamen Trainings, des direkten Kontakts gestärkt und aktives Eingreifen und Unterstützen ermöglicht werden. Um diese Funktionalität zu erreichen, werden mehrere Themenbereiche und Technologien kombiniert.

## 1.1 Aufgabenstellung

Auf welche Weise lassen sich taktile Informationen mittels Aktuatorik, Remote ausgelöst durch Sensorik, in Form eines am Körper getragenen Geräts, haptisch begreifen?

Wie können das System und die Kommunikation dafür aussehen? Welche Formen von haptischem Input und Feedback sind im Rahmen einer Bachelorarbeit sinnvoll realisierbar? - Am Anwendungsbeispiel eines Fitness Shirts, genauer dem „Remote Yoga T-Shirt“.

## 1.2 Rahmenbedingung

Der in dieser Bachelorarbeit ausgearbeitete Prototyp wird auf Grundlage des Prototyps aus, der im Rahmen einer Studienarbeit vom Autor entwickelt wurde, weiterentwickelt. „Mikropneumatik in Wearables“ [25]. Weiter wird sich auch teilweise der Erkenntnisse aus dieser bedient.

Weitere Umstände während der Bearbeitung traten durch die Covid-19 Pandemie und den damit einhergehenden Maßnahmen zur Bekämpfung dieser. Einer dieser Umstände war, dass möglichst alle Meetings bezüglich der Bachelorarbeit online stattfanden und auch die direkte Bearbeitung, trotz der eingeräumten Möglichkeit unter Auflagen vor Ort in der Universität zu arbeiten, ausschließlich in den innerhalb des eigenen Privat-Haushalts stattfand. Dazu kamen verlängerte Lieferzeiten und ein kleineres Angebot an Komponenten die für die Arbeit nötig waren.

Das in dieser Arbeit gewählte generische Maskulinum bezieht sich zugleich auf die männliche, die weibliche und andere Geschlechteridentitäten. Zur besseren Lesbarkeit wird auf die Verwendung männlicher und weiblicher Sprachformen verzichtet. Alle Geschlechteridentitäten werden ausdrücklich mitgemeint, soweit die Aussagen dies erfordern.

### 1.3 Ziel und Abgrenzung

Diese Arbeit soll als Machbarkeitsanalyse der haptischen Wahrnehmung taktiler Informationen mittels Aktuatorik dienen. Dabei werden die Kommunikation, Grundfunktionalität und die Systemmodellierung fokussiert und im Prototypen „Remote Yoga T-Shirt“ realisiert, sowie erprobt. Vernachlässigt werden hingegen Möglichkeiten der Serienfertigung und besondere Umwelteinflüsse. Sowohl die Machbarkeitsanalyse, als auch die Entwicklung und Bedienung des Prototypen, finden im privaten Raum bei Raumtemperatur statt. Der Wärmeeinfluss auf die Komponenten kann vernachlässigt werden, da selbst bei Vollast der Komponenten oder einer hohen Körpertemperatur des Nutzers, kein kritischer Temperaturbereich erreicht werden kann. Da sich alle Systemkomponenten während Entwicklung und Erprobung im selben Netzwerk befinden, werden die wenige Millisekunden betragende, Netzwerkübertragungslatenz vernachlässigt. Die exemplarische Yogaübung wurde ausgewählt um schnelle Veränderungen und Abfolgen, die mehrere, zur Erprobung der Machbarkeit zunächst irrelevante Signale erfordern, zu vermeiden.

## 2 Grundlagen

Zu Beginn dieser Arbeit werden der technische Hintergrund und die Funktionsprinzipien, sowie die Begriffe, auch der verwendeten Technologien, genauer betrachtet und eingeordnet. Dadurch soll Klarheit geschaffen werden, aufgrund welcher Basis gewisse Entscheidungen getroffen werden und wo die Grenzen der Problemstellung liegen.

### 2.1 Tangible Interface

Als Tangible (deutsch: greifbar) wird zunächst etwas beschrieben, das haptisch erfahren werden kann [5] [35]. Wird im technischen Kontext von Tangible gesprochen, ist meist von Tangible User Interfaces (TUI) [20] die Rede, die eine haptische oder greifbare Schnittstelle zur Kommunikation zwischen Mensch und Computer darstellen [32]. Weiter können auch Interfaces gemeint sein, die auf Eingaben mit Formveränderungen reagieren [19] oder auch direktes taktilen Feedback zurück geben [14].

Der für diese Arbeit entwickelte Prototyp nutzt Tangible User Interface, um reaktionär nach haptischen Einwirkungen auf eine Puppe Signale an ein T-Shirt zu senden, welche dort am Körper spürbar gemacht werden.

### 2.2 Fitness Wearables

Unter dem Begriff Wearables [22] (deutsch: Tragfähiges) ist im Allgemeinen Computertechnologie, die am Körper getragen wird gemeint. Daher bestehen ganz besondere Sicherheitsanforderungen. Ein Schutz vor Verletzung durch Hitze und mechanische Überlastung muss gegeben sein, sowie der Schutz vor elektrischer Einwirkung. Wearable ist ein Überbegriff für viele verschiedene Typen und Modelle. Darunter fallen Geräte wie Smart Watches, Fitnessarmbänder und Datenbrillen. Sie sind oft kaum als Computertechnologie zu erkennen und geben dem Träger einen nützlichen Mehrwert. Integriert

sind unterschiedliche Sensoren, die, je nach Anwendungsfall und Gerät, beim ermitteln von Daten wie dem Puls, dem Standort und vielem mehr helfen können. Um detaillierte Auswertungen und eine genaue Darstellungen zu erhalten, werden meist weitere Endgeräte wie Computer, Smartphones oder Tablets benötigt [4].

Weiter können Wearables auch über Aktuatoren verfügen um Informationen taktil am Körper des Trägers darzustellen beziehungsweise spürbar zu machen. In der vorliegenden Arbeit wird hauptsächlich die zweite Art von Wearables im Kontext einer sportlichen Betätigung untersucht [27].

### 2.3 Remote

Als „Remote“ können Computer oder Kommunikationseinrichtungen beschrieben werden, die nicht in unmittelbarer Nähe befindlich sind, aber miteinander verbunden und kommunikationsfähig sind [10].

Bezogen auf diese Arbeit ist der Begriff Remote zu verstehen, als räumliche Trennung zweier Teile des zu entwickelnden Gesamtsystems. Beide verfügen jedoch über eine Verbindung zur Kommunikation über ein Netzwerkprotokoll.

Um die beiden Teilsysteme zu verbinden und eine Kommunikation herzustellen, werden zunächst zwei in Frage kommende Netzwerkprotokolle genauer betrachtet und eines der beiden begründet ausgewählt. Die Netzwerkprotokolle sind auf der Anwendungsebene im OSI-Referenzmodell angesiedelt. Abschließend wird auf Möglichkeiten zur Funktionsüberprüfung eingegangen, um zu gewährleisten, dass die Systeme stabil und zuverlässig kommunizieren können.

#### 2.3.1 Constrained Application Protocol

Eins der beiden betrachteten Netzwerkprotokolle ist das Constrained Application Protocol, kurz CoAP. Dabei handelt es sich um ein Web-Transfer-Protokoll für das Internet of Things (IoT), welches speziell für embedded Systems weiterentwickelt wurde. Für die Entwicklung des relativ neuen Netzwerkprotokolls ist die Internet Engineering Task Force (IETF) verantwortlich. Spezifiziert ist das Protokoll im RFC 7252 [33], zum jetzigen Zeitpunkt wurde kein Standard formuliert.

Wie in Abbildung 2.1 zu sehen ist, besteht ein üblicher Aufbau zur Kommunikation über CoAP aus Servern und Clients. Hier ist es auch möglich, dass sich ein Client mit mehreren Servern verbindet und zum Mittelpunkt des Netzwerkes wird. Um Informationen zu erhalten, manipulieren oder senden, stellt der Client eine Anfrage an den Server, welcher diese dann ausführt. Als Basisprotokoll kommt bei CoAP das weniger zuverlässige aber dafür schnellere User Datagram Protocol, kurz UDP, zum Einsatz.

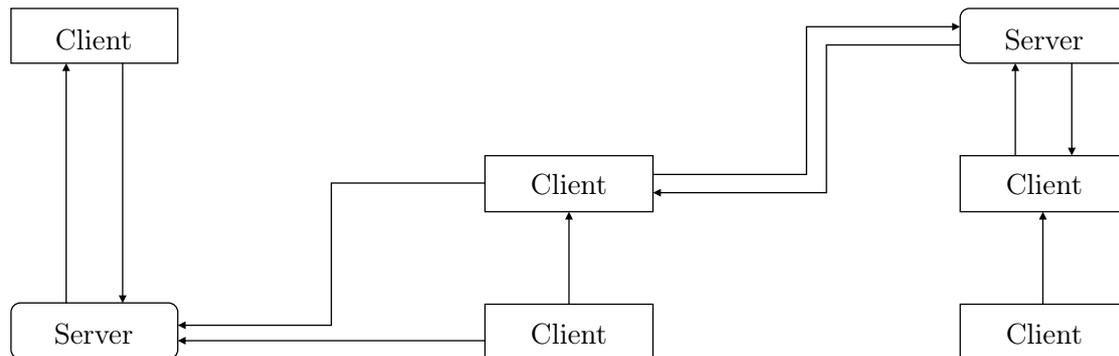


Abbildung 2.1: CoAP beispielhafte Netzwerkarchitektur

Dieses Protokoll eignet sich eher für Systeme mit stabiler Netzwerkverbindung, daher eignet es sich für die hier gewünschte Anwendung eher bedingt.

### 2.3.2 MQTT Netzwerkprotokoll

Bei dem Message Queue Telemetry Transport, abgekürzt MQTT, handelt es sich um ein Netzwerkprotokoll zum Senden und Empfangen von Nachrichten innerhalb eines Netzwerkes. Genutzt wird MQTT meist um Daten, in Form von Nachrichten, von diversen Sensorknoten aus einem Netzwerk zu empfangen und diese dann weiter zu nutzen [13]. Die Daten werden, wie in Abbildung 2.2 dargestellt, vom zentralen Broker empfangen und können gegebenenfalls weiter versendet werden. Die Knotenelemente werden hier Clients genannt. Zwischen den Funktionen der Clients wird per Definition differenziert. Sind Clients hauptsächlich zum Senden von Nachrichten vorgesehen, werden diese Publisher genannt. Clients die hauptsächlich Nachrichten empfangen sollen werden Subscriber genannt. Dazu wird ein Thema, hier topic, beim Broker angelegt zu welchem dann die vom Publisher gesendeten Nachrichten zugeordnet werden und von welchem der Subscriber die Nachricht anfordern respektive empfangen kann.

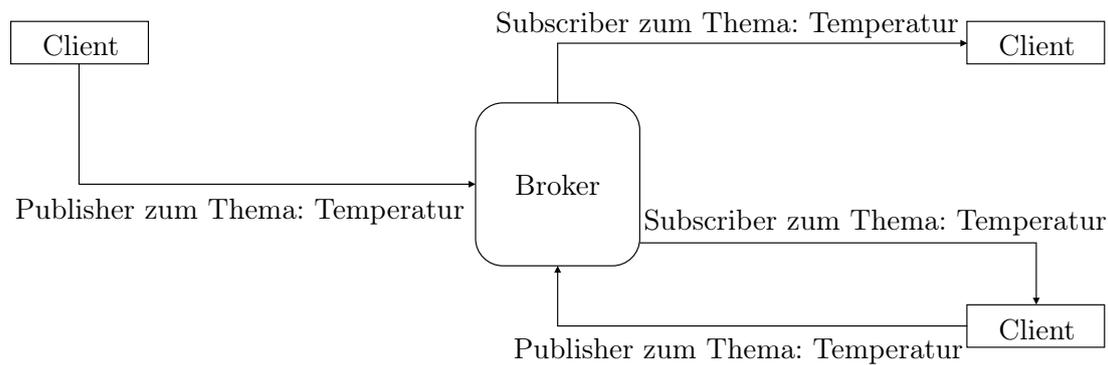


Abbildung 2.2: MQTT Publish/Subscribe Netzwerkarchitekturbeispiel

Der Aufbau eines MQTT-Pakets ist in Abbildung 2.3 ersichtlich. Der Protokoll-Overhead beträgt lediglich 2 Byte im fixen Header. Das erste Byte ist in zwei Nibble geteilt, wovon das erste als Pakettypidentifikator dient und über das zweite können Flags gesetzt werden. Beim zweiten Byte wird die restliche Paketlänge übermittelt, welche optional um drei weitere Bytes zur Längenangabe erweitert werden kann. Abschließend enthält das Paket, optional nach Pakettyp, den Payload in dem sich beispielsweise die Nachricht bei einem Publish-Paket befindet [2].

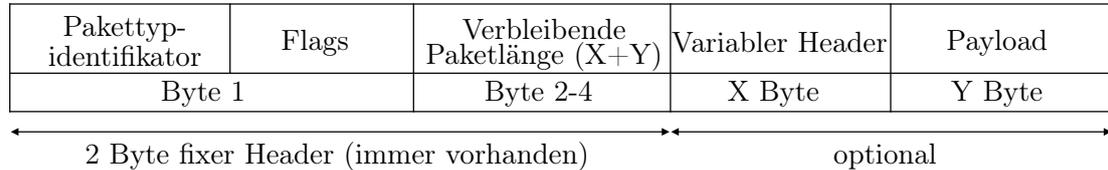


Abbildung 2.3: MQTT Protokoll Paketaufbau

Da das MQTT Netzwerkprotokoll Datenkommunikation nahezu ohne Zeitverzögerung unterstützt und sich auch für Netzwerke mit instabiler Verbindung eignet, ist es für den Anwendungsfall in dieser Bachelorarbeit sinnvoll und kommt zur Anwendung. Weiter ist der Aufbau simpel und der nötige Programmieraufwand niedrig um eine Kommunikation zwischen mehreren Geräten aufzubauen.

## 2.4 Mechanisches Nutzerfeedback

Der Hauptteil dieser Bachelorarbeit befasst sich mit der Übermittlung von mechanischem Nutzerfeedback. Worum es sich dabei genau handelt muss zunächst exakter bestimmt werden. Hier ist dabei gemeint, dass der Träger des Fitness Wearables empfangene Signale direkt am Körper als spürbares Feedback erleben kann.[28]

### 2.4.1 Definition von spürbar

Wenn in dieser Bachelorarbeit die Rede von spürbar ist, ist damit die physische Empfindung durch eine mechanische Krafteinwirkung auf die Haut gemeint. Üblicherweise fällt dies unter den Begriff der Haptik, die in zwei Hauptteile aufgegliedert wird. In die Kinästhesie und den Tastsinn, auch taktil genannt, wobei zweiteres hier genauer betrachtet wird. Der Tastsinn, allgemeiner die Berührung, kann weiter in vier Unterbereiche strukturiert werden. Die elektrische, thermische, chemische und mechanische Stimulation. Der Fokus wird hier auf die mechanische Stimulation gelegt.[9]

Der Tastsinn beinhaltet die Sinnesqualitäten der Wahrnehmung von Druck, Berührung und Vibration, welche über gewisse Mechanosensoren in verschiedenen Tiefen der behaarten und unbehaarten Haut durch taktile Reize vermittelt werden. Das Empfindungsoptimum beschreibt dabei die Wahrnehmungsschwelle der frequenzabhängigen Sensoren und bedeutet, dass diese Sensoren in dem genannten Frequenzbereich am spürbarsten reagieren.

Als Drucksensoren fungieren die Merkel-Zellen und -Tastscheiben, welche durch senkrecht ausgeübten Druck auf die Hautoberfläche, bei einem Empfindungsoptimum von ca. 5 Hz bis 15 Hz, ausgelöst werden. Auch die Ruffini-Körperchen nutzen als Drucksensoren, jedoch werden diese durch die Dehnung der Haut ausgelöst.[3]

Die Rolle der Berührungssensoren übernehmen die Meissner Körperchen, aktiviert werden diese durch allgemeine Verformung der Haut, bei einem Empfindungsoptimum von 20-50 Hz, und Haarfollikelsensoren die durch die Auslenkungsgeschwindigkeit der Haarfollikel aktiviert werden.[3]

Vibrationssensoren in der Haut sind die Vater-Pacini-Körperchen, die durch Vibration der Haut aktiviert werden. Mit einem Empfindungsoptimum von 100-400 Hz.[3]

Tastempfindliche Bereiche der Haut, jene in denen Mechanosensoren vorkommen, werden Tastpunkte genannt. Die Verteilungsdichte der Mechanosensoren auf der Haut ist heterogen und wird in berührungsempfindliche Bereiche mit vielen Tastpunkten und berührungsunempfindliche Bereiche mit wenigen Tastpunkten unterschieden. Auf der Hand befinden sich beispielsweise ca. 20 Tastpunkte pro  $\text{cm}^2$  Haut und auf dem Rücken ca. 1 Tastpunkt pro  $\text{cm}^2$  Haut.[3]

Zur Wahrnehmung von mechanischen Hautreizen muss auch die Raumschwelle betrachtet werden. Diese drückt aus, welches der minimale Abstand zwischen zwei mechanischen Hautreizen ist, der als getrennter Reiz wahrgenommen wird. Ist die Anzahl der Tastpunkte in einem Bereich der Haut hoch, sinkt die Raumschwelle und die Wahrnehmung ist feiner. Unterschieden wird hier noch unter der simultanen und sukzessiven Raumschwelle. Bei der ersteren geht es um den Abstand der nötig ist, um zwei simultan ausgelöste Reize als räumlich getrennte zu erkennen. Beispielwerte sind hier auf der Fingerbeere 2 mm und am Rücken 54 mm. Bei der zweiten um den Abstand der nötig ist, um zwei aufeinanderfolgende Reize als räumlich getrennte zu erkennen. Üblicherweise liegt der Wert bei grob einem Viertel der simultanen Raumschwelle.[3]

### 2.4.2 Nutzerstudie zur Spürbarkeit

Um eine noch exaktere Aussage bezüglich der Spürbarkeit zu geben, kann eine Nutzerstudie durchgeführt werden. In der Studie müssten eine bestimmte Anzahl von Probanden das Fitness Wearable tragen und Auskunft geben wie und ob das abgegebene Feedback durch die Aktuatoren spürbar ist. Daraus könnten dann Schlüsse über die optimale Positionierung am Körper und die Eignung der gewählten Aktuatoren gezogen werden.

### 2.4.3 Mikropneumatik

Pneumatische Systeme verrichten mechanische Arbeit mit Hilfe von Druckluft. Durch verschiedene Zusammenschaltungen von Ventilen und Aktuatoren werden gewünschte Mechanismen mittels Luftdruck ausgelöst, wodurch Dinge gehoben, gehalten und verstellt werden.

Mikropneumatik, also die Miniaturisierung der Pneumatik, wird in diversen Bereichen genutzt. In der Medizintechnik, bei Laborgeräten, zur automatisierten Blutabnahme, Blutdruckmessung oder auch bei Beatmungsgeräten. In der Robotik kommt sie zur Steuerung von Greifern oder anderen beweglichen Komponenten sowie in der Verpackungstechnik und im Kleinteilehandling oder Modellbau zum Einsatz.

Während in der Pneumatik üblicherweise ein Aktuator, in der Form eines Zylinders, unterschiedlich angesteuert wird, wird hier ein Luftkissen auf- sowie abgepumpt.[15][23]

### 2.4.4 Elektromechanik

Als elektromechanisch werden Bauteile bezeichnet, die aus elektrischen und mechanischen Komponenten bestehen. Die Kombination beider Komponenten ermöglicht die Umwandlung elektrischer Energie in mechanische Energie. Übliche Bauteile der Elektrotechnik sind Elektromotoren, Lautsprecher, Relais oder auch Schalter.

Bezogen auf diese Arbeit wird genauer auf, für die Integration in ein Fitness Wearable geeignete Bauteile eingegangen. Dabei handelt es sich um Aktuatoren wie Lautsprecher und Buzzer mit verschiedenen Funktionsprinzipien.

#### 2.4.4.1 Lautsprecher

Zum Erzeugen von Tönen wird in einem Lautsprecher üblicherweise eine Membran, die an einer Spule befestigt ist, mittels eines magnetischen Feldes, das mit einem Permanentmagneten erzeugt wird, zum Schwingen gebracht.

Dieses Prinzip wird zur Realisierung des Fitness Wearable genutzt. Jedoch ist es im konkreten Anwendungsfall nicht das Ziel Töne zu erzeugen, sondern spürbares Feedback auf der Haut des Nutzers oder auch Trägers des Fitness Wearables. Durch den Hub soll mechanische Kraft auf die Haut ausgeübt werden und so Signale spürbar gemacht werden.

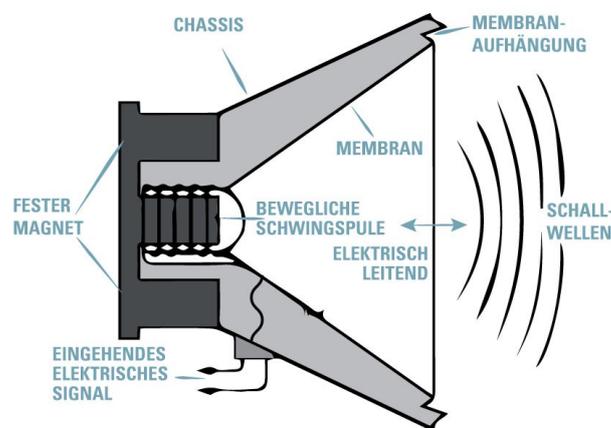


Abbildung 2.4: Beispielhafter Lautsprecheraufbau (Quelle:[16])

#### 2.4.4.2 Magnetsummer

Ein typischer induktiver Magnetsummer besteht grundlegend aus einer Drahtspule und einer flexiblen ferromagnetischen Scheibe. Der Aufbau ist in Abbildung 2.5 skizziert. Durch das Anlegen eines Stroms an die Drahtspule wird ein Magnetfeld erzeugt, welches die flexible Scheibe aus ihrer unbestromten Ruheposition heranzieht. Durch diese Bewegung der ferromagnetischen Scheibe wird der Ton des Magnetsummers erzeugt, vergleichbar mit der Membran eines Lautsprechers die den Ton erzeugt.

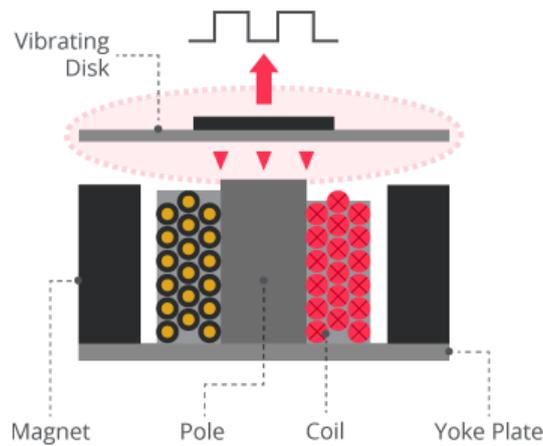


Abbildung 2.5: Skizze des Aufbaus eines typischen magnetischen Summers (Quelle:[8])

#### 2.4.4.3 Vibrationsmotor

Die Bestandteile eines Vibrationsmotors in Münzform sind ein Ringmagnet, ein Gewicht und ein Rotor. Dieser Rotor verfügt auf der Vorderseite über Kommutierungspunkte und auf der Rückseite über Spulen. An der Grundplatte, auf der auch der Ringmagnet befestigt ist, sind stromversorgte Bürsten angebracht wodurch die elektrischen Spulen im Rotor erregt werden. Durch die Erregung der Spulen entsteht ein Magnetfeld und durch die Interaktion mit dem im Stator integrierten Ringmagneten wird eine Verschiebung des Rotors verursacht. Kommt es durch die Kommutierungspunkte zum ständigen umpolen der Polaritätspare, resultiert dies in einer Rotation des Rotors. Anhand des, am Rotor in unwucht angebrachten Gewichts, wird bei der Rotation eine variierende Kraft erzeugt, die als Vibration wahrgenommen wird.

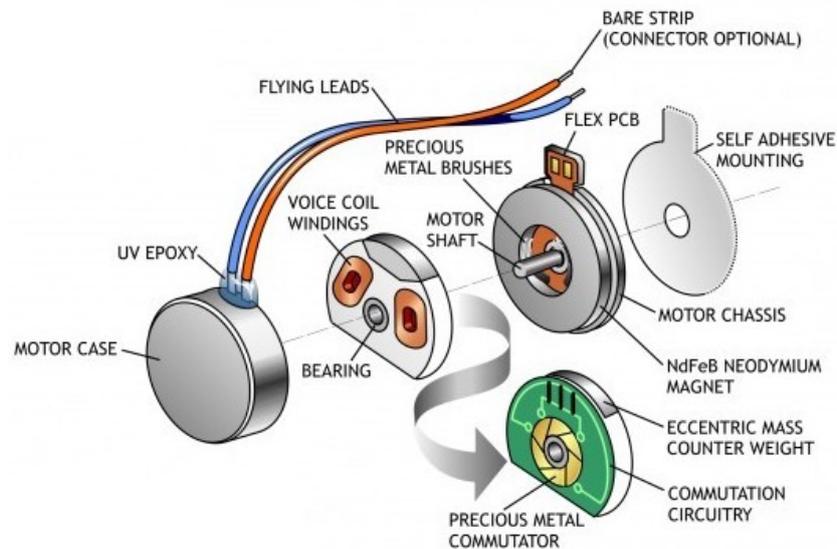


Abbildung 2.6: Explosionsansicht eines Vibrationsmotor in Münzform (Quelle:[31])

#### 2.4.4.4 Piezo

Mit Piezo ist meist ein piezoelektrisches Bauteil gemeint, welches durch den Piezoeffekt in Folge von mechanischer Druckeinwirkung eine elektrische Spannung erzeugt. Dies geschieht durch Ladungsverschiebungen im piezoelektrischen Material. Weiter kann dieser Effekt auch umgekehrt genutzt werden. Mit dem Anlegen einer elektrischen Spannung kann eine mechanische Bewegung ausgeführt werden.

Für die Nutzung von Piezoaktuatoren sind höhere Spannungen nötig, was die Verwendung in möglichst kleinen tragbaren Systemen mit begrenzten Spannungen und Stromstärken kompliziert macht. In Hinsicht auf die technische Umsetzbarkeit und den Sicherheitsaspekt bei am Körper getragenen Systemen, werden diese Art von Aktuatoren hier nicht weiter betrachtet.

## 2.5 Sensoren

Ein wichtiger Teil dieser Arbeit ist das erwähnte Tangible User Interface. Durch Eingabe eines Nutzers erfährt dieser, oder ein dritter, ein am Körper spürbares Feedback. Um diese Eingaben messen zu können, ist ein technischer Aufbau nötig. Nachfolgend werden Möglichkeiten und Funktionsweisen von Sensoren erörtert, die diese Aufgabe erfüllen könnten und gemäß des Umfangs dieser Arbeit sinnvoll einsetzbar sind.

### 2.5.1 Kapazitiver (Berührungs-)Sensor

Die Grundlegende Funktionsweise des kapazitiven Sensors ist mit einem Kondensator vergleichbar. Bei diesem wird eine gewisse Ladung ( $Q$ ) zwischen zwei, voneinander isolierten, elektrischen Leitern bei einer bestimmten anliegenden Spannung ( $U$ ) gespeichert. Die dabei entstandene Kapazität ( $C$ ) lässt sich wie in Formel 2.1 zu sehen berechnen.

Allgemeine Formel für elektrische Kapazität:

$$C = \frac{Q}{U} \tag{2.1}$$

Einfach ausgedrückt, basieren die, in dieser Arbeit sinnvoll einsetzbaren kapazitiven Sensoren auf dem Prinzip, dass wenn sich der Finger des Trainers der berührungsempfindlichen Fläche nähert, sich deren elektrische Kapazität ändert. Die Änderung der elektrischen Kapazität kann dann gemessen und interpretiert werden.

### 2.5.2 Resistiver (Berührungs-)Sensor

Bei resistiven Sensoren wird die Änderung des ohmschen Widerstandes betrachtet. Dabei werden die geometrischen, thermischen und mechanischen Abhängigkeiten in Bezug auf den elektrischen Widerstand genutzt. Dadurch wird die Spannung am Sensor beeinflusst, kann gemessen und ausgewertet werden.

Allgemeine Formel für speziellen elektrischen Widerstand:

$$R(T) = p(T) \cdot \frac{l}{A} \quad (2.2)$$

### 2.5.3 Wirkprinzip Drucksensor

Der eingesetzte Drucksensor funktioniert, nach dem in Abschnitt 2.4.4.4 bereits erläuterten Prinzip. In diesem Fall jedoch umgekehrt, die Spannung, die vom Piezoelement aufgrund der Druckkraft erzeugt wird, wird gemessen. Daraus lässt sich dann der momentan anliegende Druck errechnen.

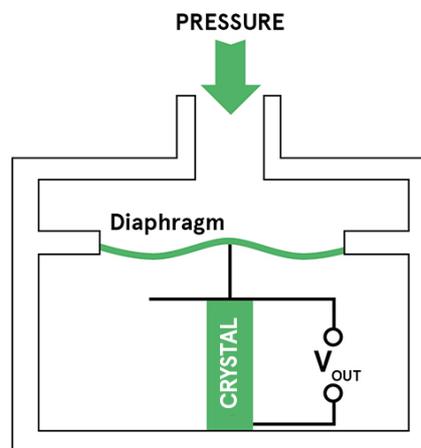


Abbildung 2.7: Prinzipskizze des Aufbaus eines Piezodrucksensors (Quelle:[1])

## 2.6 Physische Schnittstellen

Um die verschiedenen Komponenten mit dem eingesetzten Mikrocontroller zu verbinden, kommen verschiedene „Schnittstellen“ zum Einsatz. Diese werden in den beiden kommenden Abschnitten genauer erläutert.

### 2.6.1 I<sup>2</sup>C-Schnittstelle

Der I<sup>2</sup>C-Bus ist ein synchroner, serieller Zweidraht-Bus in Master/Slave-Architektur, ursprünglich entwickelt und spezifiziert von Philips im Jahr 1982. Physikalisch besteht dieser Bus aus zwei Signalleitungen und zusätzlich einer Energieversorgungsleitung, sowie einer Masseleitung. Eine der beiden genannten Signalleitungen ist die Serial Clock Line, kurz SCL, über diese wird vom Master die Taktzeit zur Synchronisation ausgegeben. Die zweite Signalleitung wird Serial Data Line, kurz SDA, genannt. Über diese können Daten empfangen und auch gesendet werden, wie in Abbildung 2.8 zu sehen, je nach Anwendungsfall. Jedes I<sup>2</sup>C-fähige Gerät verfügt über eine vom Hersteller festgelegte Adresse und kann sowohl als Empfänger, wie auch als Sender fungieren. [17]

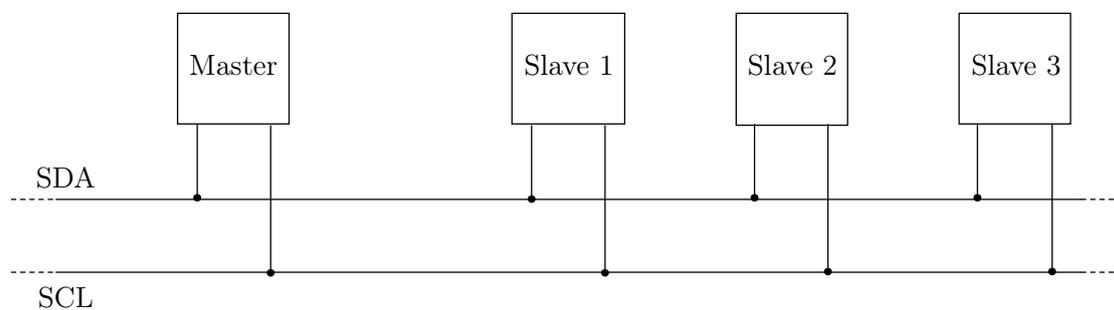


Abbildung 2.8: Beispielhafter I<sup>2</sup>C Bus Aufbau

Das Protokoll des I<sup>2</sup>C Bus ist in Abbildung 2.9 dargestellt. Aufgrund des seriellen Aufbaus des I<sup>2</sup>C Buses, werden die Daten bitweise in einer vorher festgelegten Reihenfolge gesendet. Beginnend mit der Startbedingung, welche vom Master gesendet wird, werden die am Bus angeschlossenen Slaves zum Lesen der gesendeten Daten aktiviert. Dem folgt die Adresse des angesprochenen Slaves, welche aus 7 Bit besteht, und ein weiteres Bit, welches bestimmt ob Daten vom Master zum Slave gesendet oder umgekehrt empfangen

werden sollen. Adresse und Schreiben- oder Lesebit zusammen bilden das Kontrollbyte. Hat der Slave alle Bits korrekt empfangen, quittiert er dies mit dem Bestätigungsbit. Daraufhin folgen die gesendeten oder empfangenen Daten, eingeteilt in Datenpakete beziehungsweise Datenbytes von 8 Bit. Mittels setzen des, auf das Datenbyte folgende, Bestätigungsbit, können auch mehrere Datenpakete gesendet oder empfangen werden. Das Ende der Datenübertragung wird mit dem Stopbit signalisiert.

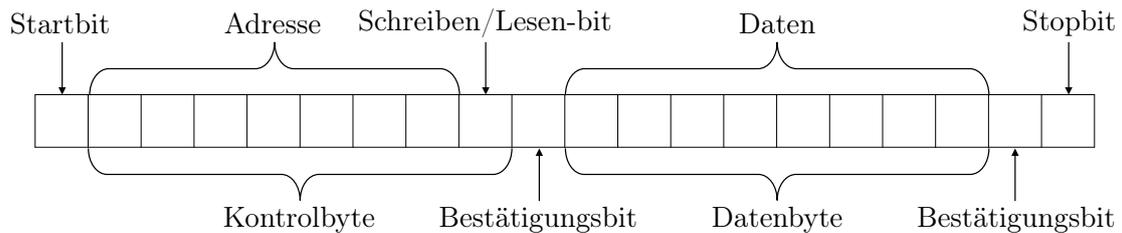


Abbildung 2.9: I<sup>2</sup>C Bus serieller und bitweiser Protokoll Aufbau

### 2.6.2 Analog

Die zur Auswahl stehenden Aktuatoren verfügen lediglich über zwei Leitungen zur Verbindung. Dabei handelt es sich um die Stromversorgung, eine positive Leitung und eine Leitung zur Masse.

Zum zeitgleichen Anschluss mehrerer Aktuatoren und der Trennung des Last- vom Steuerstromkreis, um den Mikrocontroller vor zu hohen Spannungen und Strömen zu schützen, kommt ein Darlingtonarray IC ULN2003A<sup>1</sup> der Firma Texas Instruments zum Einsatz. In Abbildung 2.10 ist der vereinfachte interne Aufbau des IC's zu sehen. Durch die integrierten Freilaufdioden, wird der am Signaleingang angeschlossene GPIO-Pin des Mikrocontrollers vor Überspannung geschützt. Wird der entsprechende Signaleingang des IC's geschaltet hat dies zur Folge, dass der Ausgang passend zum Eingang geschaltet wird.

---

<sup>1</sup>Texas Instruments, ULN2003A Online Data Sheet, <https://www.ti.com/document-viewer/ULN2003A/datasheet>. [18.07.2021]

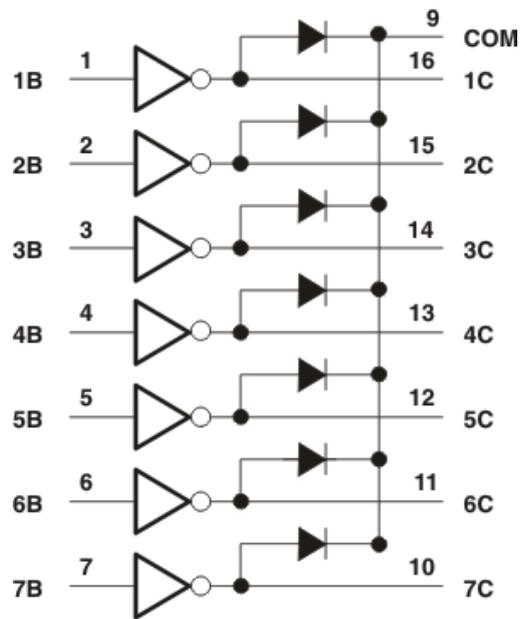


Abbildung 2.10: Darlingtonarray IC ULN2003A der Firma Texas Instruments (Quelle:[18])

## 2.7 Programmiersprache MicroPython

Zur Programmierung des Mikrocontrollers wird die Programmiersprache MicroPython, Python für Mikrocontroller, verwendet.

Bei MicroPython handelt es sich um eine Derivate von CPython, vereinfacht und abgespeckt für den Einsatz in Mikrocontrollern mit geringem und limitiertem Arbeits- und Flash-Speicher. MicroPython läuft direkt auf der Hardware und benötigt kein Betriebssystem, welches Dienste und Operationen bereitstellt. Dabei hat es die direkte und vollständige Kontrolle über die Hardware und ist somit selbst das Betriebssystem [12]. Ursprünglich wurde MicroPython von dem australischen Programmierer und Physiker Damien George, beginnend in 2013 im Rahmen einer Kickstarter-Kampagne, entwickelt [24].

## 2.8 Mögliche Funktionskontrollen

Zur Kontrolle und als Rückmeldung für den Trainer, ob die gewünschte Positionskorrektur ausgeführt wurde, kann im simpelsten Fall eine Bildübertragung von der Trainierenden Person zum Trainer stattfinden. Auf dieser muss die aktuelle Haltung des Trainierenden gut erkennbar sein. Zusätzlich können Statusleuchten oder Töne am Subsystem Puppe eingesetzt werden. Dadurch kann dann eine direkte visuelle oder tonale Rückmeldung an den Trainer erfolgen.

Eine weitere Möglichkeit, zu kontrollieren dass die Kommunikation voll funktionsfähig ist, könnte eine Rückmeldungsschleife sein. Der erfolgreiche Nachrichtenempfang wird mit einer Antwortnachricht an das sendende System bestätigt. Geschieht dies nicht in der vorher festgelegten Wartezeit, werden Maßnahmen zur Neuverbindung eingeleitet.

Weiter kann softwaretechnisch abgefragt werden, ob die vom Mikrocontroller des Subsystem Puppe gesendeten Nachrichten vom Mikrocontroller des Subsystem Fitness Wearable richtig interpretiert und an die Aktuatorik weitergegeben wurden.

Lage- und Beschleunigungssensoren im Fitness Wearable könnten die Haltungsposition des Tragenden bestimmen. Der Aufwand entspricht jedoch nicht mehr dem Rahmen dieser Bachelorarbeit.

Durch die Messung von Strom oder Spannung der Aktuatoren im Fitness Wearable ließe sich interpretieren ob ein Aktuator ausgelöst hat. Dafür müsste jedoch zunächst erörtert werden, ob die Komplexität den Umfang der Arbeit übersteigt und eine technisch sinnvolle Umsetzbarkeit gegeben ist.

## 3 Systemdesign

Um die Fragestellung systematisch genauer zu ergründen, werden Systemmodelle erstellt. Zunächst grob, um das Problem einzugrenzen und folgend immer feiner bis auf eine Granularität mit der es möglich ist Modelle für einen Prototypen zu entwickeln. Darauf werden Designoptionen aufgezeigt, bewertet und anschließend mit einem Entwurf für den Prototypen abgeschlossen. Auf dieser Grundlage wird der Prototyp realisiert, um möglichst alle funktionalen Anforderungen zu erfüllen und die anfängliche Fragestellung zu untersuchen. Weiter wird bereits hier der erste Absatz aus Abschnitt 2.8 in der Form berücksichtigt, dass bereits Fremdsysteme für Anrufe oder Videokonferenzen mit in die Modelle eingearbeitet werden, da diese vorab in der Einleitung angeführt wurden. Für die Systemmodelle werden Diagramme nach der SysML Spezifikation genutzt [29].

### 3.1 Identifikation funktionaler Anforderungen und Randbedingungen

Jedes System hat Anforderungen an seine Eigenschaften und Funktionen und weist Grenzen auf. In diesem Teil wird genau auf die funktionalen Anforderungen und Randbedingungen eingegangen. Alle aufgestellten Anforderungen und Randbedingungen sind in der folgenden Tabelle 3.1 zu sehen. Es werden gewisse Anforderungen an das zu entwerfende System festgelegt. Diese sind in die Prioritäten Pflicht, Soll und Wunsch unterteilt. Dagegen wird das System dann passend konstruiert.

Nummer	Parent	Ziel	Bereich	Titel	Requirement	Priorität
REQ-01		Subsystem Fitness Wearable	Komponenten	Tragbarkeit	Der Aufbau des Subsystem Fitness Wearable soll komfortabel am Körper tragbar sein, bezogen auf Gewicht, Größe und Lärm.	Pflicht
REQ-02		Subsystem Fitness Wearable	Komponenten	Sicherheit	Der Träger des Fitness Wearables muss geschützt sein vor Hitze- und Elektrizitätseinwirkung durch die im Fitness Wearable verbauten Komponenten.	Pflicht
REQ-03		Mikrocontroller beider Subsysteme	Programmierung/ Komponenten	Kommunikation	Die Mikrocontroller der beiden Subsysteme sollen über ein Netzwerk mittels des MQTT Standards kommunizieren können.	Pflicht
REQ-04		Mikrocontroller Subsystem Puppe	Sensorik	Berührungserfassung	Der Mikrocontroller des Subsystem Puppe soll über die daran angeschlossenen Sensorflächen Berührungen erfassen können.	Pflicht
REQ-05		Subsystem Fitness Wearable	Aktuatorik	Aktuator Feedback am Teilnehmer	Die Aktuatoren des Subsystem Fitness Wearable sollen haptisches Feedback an den Körper des Teilnehmers übertragen können.	Pflicht
REQ-06		Mikrocontroller Subsystem Puppe	Programmierung	Signalverarbeitung	Es soll ausgewertet werden können, ob die empfangenen Signale der Sensorik, ausgelöst durch mechanische Berührung des Trainers, sich um valide und beabsichtigte Eingaben handelt.	Pflicht
REQ-07		Mikrocontroller beider Subsysteme	Programmierung	Schnittstelle	Die zu programmierende Schnittstelle soll in der Lage sein, passend zu den Eingabesignalen an den Berührungssensoren, die gewünschten Aktuatoren auszulösen.	Pflicht
REQ-08		Trainer	Software/Hardware	Feedbackkontrolle	Es soll eine Möglichkeit für den Trainer geben, zu erkennen ob das haptische Feedback durch die Aktuatoren an getragenen Subsystem Fitness Wearable an der gewollten Körperstelle beim Teilnehmer auch spürbar ausgelöst wurde.	Wunsch
REQ-09	REQ-04	Subsystem Puppe	Sensorik	Sensoren/Sensorflächen	Das Subsystem Puppe muss Sensorflächen beinhalten die durch mechanische Berührungen durch den Trainer elektrische Signale sendet. Diese Flächen sollen auf einem Bereich des Körpers verteilt sein und dort in sinnvolle Bereiche unterteilt werden.	Pflicht
REQ-10	REQ-05	Subsystem Fitness Wearable	Aktuatorik	Aktuatoren	Das Subsystem Fitness Wearable soll jeweils einen Aktuator beinhalten die spürbar über Druck, Vibrations-Feedback erzeugen Hub haptisches Feedback an den Körper des Trägers übertragen können.	Pflicht
REQ-11		Subsystem Fitness Wearable	Komponenten	Energieversorgung	Das Subsystem Puppe soll über eine Batterie mit elektrischer Energie versorgt werden.	Pflicht
REQ-12		Subsystem Puppe	Komponenten	Energieversorgung	Das Subsystem Puppe soll über ein Netzteil oder eine Batterie mit elektrischer Energie versorgt werden.	Pflicht
REQ-13	REQ-10	Fitness Wearable	Aktuatorik	Ton-Feedback	Das haptische Ton-Feedback soll auf einer Fläche von 15 cm <sup>2</sup> auf der Haut spürbar sein.	Soll
REQ-14	REQ-10	Fitness Wearable	Aktuatorik	Druck-Feedback	Der einzelne Pneumatik Aktuator soll auf einer Fläche von 15 cm <sup>2</sup> Druck auf der Haut spürbar ausüben.	Soll
REQ-15	REQ-10	Fitness Wearable	Aktuatorik	Vibrations-Feedback	Der Vibrations Aktuator soll haptisches Feedback einer Fläche von 15 cm <sup>2</sup> auf der Haut spürbar sein.	Soll
REQ-16	REQ-09	Sensorflächen	Sensorik / Programmierung	Berührungsempfindlichkeit	Die Sensoren sollen das Auflegen des Fingers auf eine Sensorfläche von mindestens 25 mm <sup>2</sup> registrieren.	Pflicht
REQ-17	REQ-12	Subsystem Puppe	Komponenten	Energieversorgung	Anstelle eines Netzteils soll eine Batterie zur elektrischen Energieversorgung in die Puppe integriert werden, Wunsch um die Handhabbarkeit komfortabler zu machen	Wunsch
REQ-18	REQ-16	Mikrocontroller beider Subsysteme	Programmierung	Aktuatoraktivierung	Der gewünschte Aktuator soll nur während der Berührungsdauer der zugehörigen Sensorfläche auslösen.	Pflicht
REQ-19	REQ-01	Subsystem Fitness Wearable	Komponenten	Gewicht	Der Aufbau des Subsystem Fitness Wearable soll weniger als 500 g wiegen	Soll
REQ-20	REQ-01	Subsystem Fitness Wearable	Komponenten	Abmaße	Der Aufbau der Hauptelektronik im Subsystem Fitness Wearable soll kleiner als 10x20x5 cm (HxBxT) sein	Soll
REQ-21	REQ-01	Subsystem Fitness Wearable	Komponenten	Geräuschemissionen	Die Geräuschemissionen des Subsystem Fitness Wearable sollen unter 60 dB betragen	Soll

Tabelle 3.1: Funktionale Anforderungen an das Gesamtsystem

## 3.2 Modellierung des Systems Remote Yoga T-Shirt

Zunächst wird das System „Remote Yoga T-Shirt“, folgend Gesamtsystem genannt, und dessen Umfeld, der Kontext, in Abbildung 3.1 dargestellt um es eingrenzen und einordnen zu können. Detaillierter wird das Gesamtsystem dann in einem Systemmodell in Form eines Block Definition Diagramms, wie in Abbildung 3.2 zu sehen, beschrieben.

In den jeweils folgenden Abbildungen 3.3 und 3.4 sind die logischen Ports und Flüsse zwischen den internen Komponenten der beiden Subsysteme, Puppe und Fitness Wearable, in einem Internen Blockdiagramm aufgezeigt.

### 3.2.1 Kontext Modell

Im folgenden System Kontext Diagramm, wird auf den physikalischen Kontext eingegangen, in welchem sich das zu entwickelnde Sensor-Aktuator System befindet. Das System selbst besteht zunächst aus zwei Subsystemen, hier Puppe und Fitness Wearable genannt. Das Subsystem Puppe soll ein kompaktes Gerät zur Eingabe für den Trainer sein, mit eingearbeiteten berührungsempfindlichen Sensorflächen. Mithilfe dieser sollen genauere und simplere Positionskorrekturen bei der trainierenden Person ermöglicht werden. Die trainierende Person trägt dabei das Fitness Wearable, hier in Form eines T-Shirts, in dem alle benötigten Komponenten eingearbeitet sind.

Das Subsystem Fitness Wearable muss über eine Batterie zur Energieversorgung verfügen, um die Tragbarkeit und Mobilität zu gewährleisten. Bei dem Subsystem Puppe kann ein Netzteil zur Energieversorgung zum Einsatz kommen, da dieses auch stationär genutzt werden kann. Gegebenenfalls müssen elektrische Hilfsschaltungen zum korrekten Anschluss und dem Trennen von Signal- und Lastkreis der Aktuatoren und Sensoren errichtet werden.

Außerhalb der Systemgrenze kommen weitere Fremdsysteme zum Einsatz. Einmal ist ein Netzwerk nötig, um die Kommunikation zwischen dem Subsystem Puppe und dem Subsystem Fitness Wearable herzustellen. Weiter verfügen jeweils Trainer und Teilnehmer über ein Gerät zur Bild und Ton Übertragung. Durch diese ist es dem Trainer möglich mit dem Teilnehmer über Ton zu kommunizieren und visuell zu kontrollieren, ob die

Positionskorrektur, angezeigt durch das ausgelöste mechanische Feedback der Aktuatoren, erfolgt ist. Der Teilnehmer kann damit an dem Training per Bild und Ton teilnehmen.

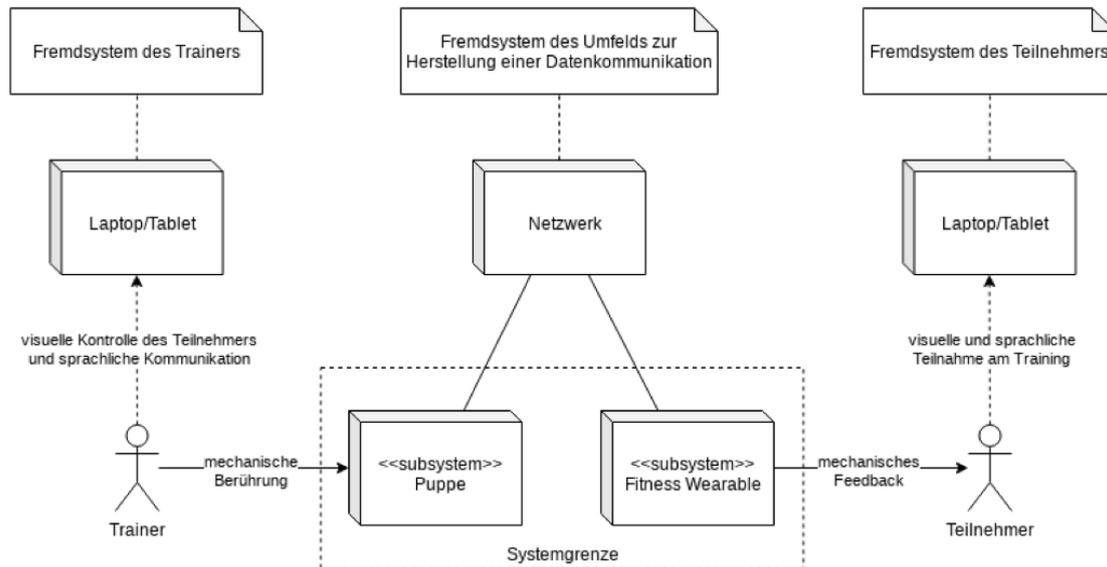


Abbildung 3.1: System Kontext Diagramm

### 3.2.2 System Modell

In Abbildung 3.2 ist der Überblick der benötigten Blöcke des zu entwickelnden Systems zu sehen. Das Gesamtsystem teilt sich wesentlich in zwei separate Subsysteme, dem Subsystem Puppe und dem Subsystem Fitness Wearable, auf die verschiedenen Signale und Flüsse wird gesondert eingegangen.

Beim Subsystem Puppe sollen für definierte Körperbereiche Sensorfelder an der Puppe angebracht werden, mit sinnvoll platzierten Sensoren zur Positionskorrektur. Beispielsweise an der Vorder- und Rückseite, sowie an der rechten und linken Seite der Hüfte.

Passend zu den platzierten Sensoren im Subsystem Puppe müssen beim Subsystem Fitness Wearable entsprechende Aktuatorenfelder mit Aktuatoren an den jeweiligen Positionen angebracht werden. Zusätzlich sollen hier mehrere Variationen von Aktuatoren getestet werden.

Zur Kommunikation zwischen den beiden Subsystemen wird zunächst ein Netzwerk mit einem MQTT Broker benötigt, dieser fungiert als Schnittstelle zur Übermittlung von Nachrichten. Gesendet werden die Nachrichten vom Subsystem Puppe, welches als so-

genannter MQTT Publisher fungiert. Die Nachricht beinhaltet genauere Informationen zum ausgelösten Sensor. Das Subsystem Fitness Wearable wiederum, beinhaltet MQTT Subscriber und empfängt die Nachrichten vom Puppe Subsystem. Mithilfe der in der Nachricht enthaltenen Daten können dann die verschiedenen Aktuatoren passend angesteuert werden.

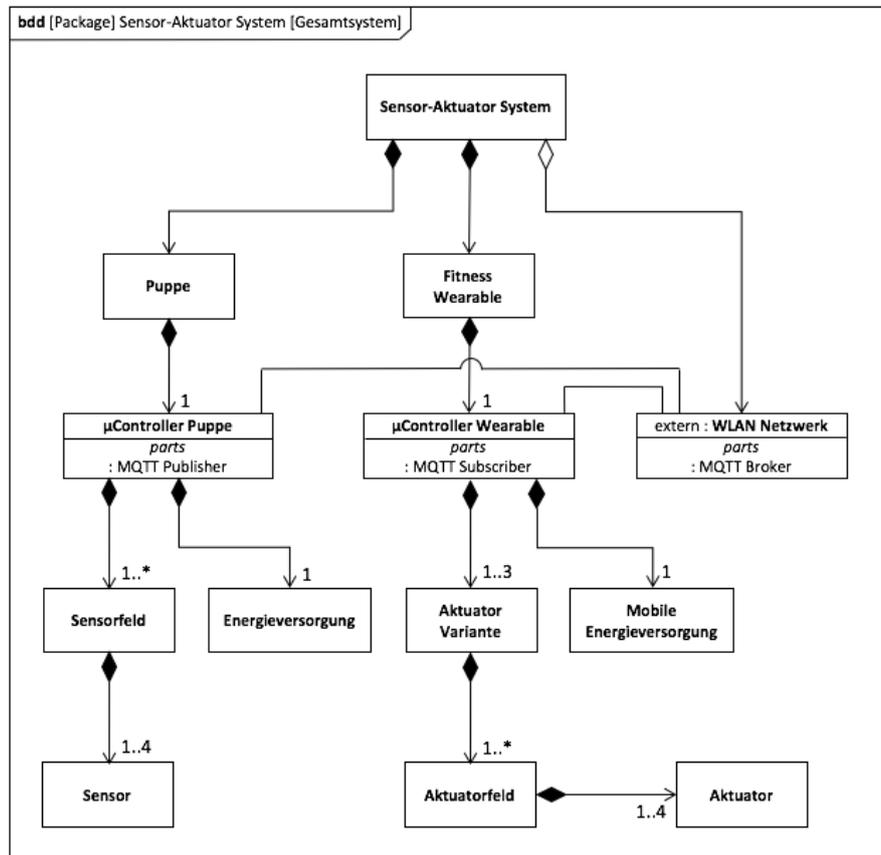


Abbildung 3.2: Block Definition Diagramm, Gesamtsystem

### 3.2.3 Subsystem Puppe Modell

Das Subsystem Puppe beinhaltet einen Mikrocontroller, zur Steuerung und zum Anschluss der Sensorik, sowie zum Herstellen einer Kommunikation/Konnektivität zum Subsystem Fitness Wearable. Weiter verfügt das Subsystem Puppe über eine Energieversorgung durch eine Batterie, um die Handhabbarkeit zu erleichtern und über berührungsempfindliche Flächen die als Sensoren fungieren. Diese Sensoren sind geclustert für

definierte Bereiche am menschlichen Körper und für den Anwendungsfall an einer Art Puppe angebracht.

Hauptsächlich nimmt der Mikrocontroller des Subsystem Puppe über die Sensorik haptische Berührungen als Signale auf und wandelt diese in Nachrichten zur Übermittlung an den Mikrocontroller des Subsystem Fitness Wearable um.

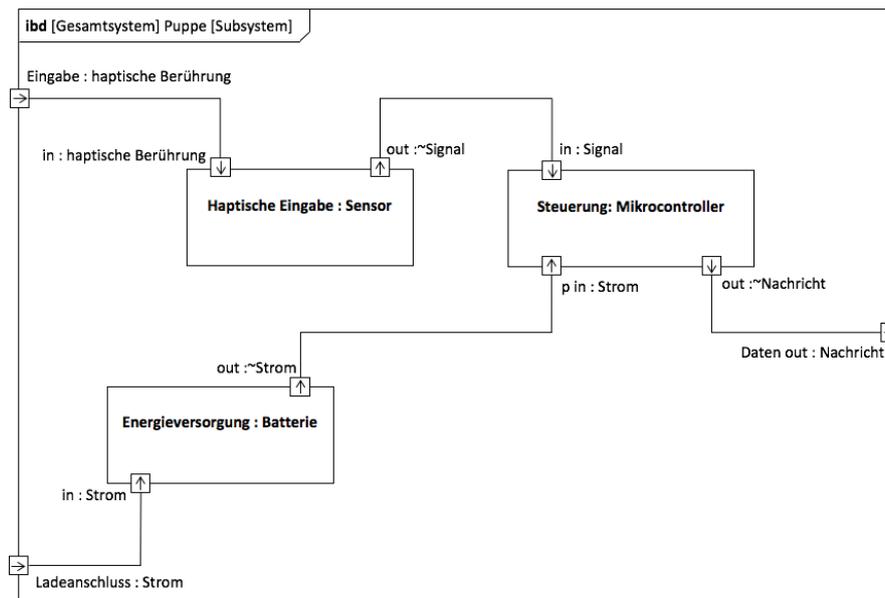


Abbildung 3.3: Internal Block Definition Diagram, Subsystem Puppe

#### 3.2.4 Subsystem Fitness Wearable Modell

Das zweite Subsystem, Fitness Wearable verfügt ebenfalls über einen Mikrocontroller. Dieser steuert, die in Feldern angeordneten einzelnen Aktuatoren an und wertet ankommende Nachrichten des Subsystem Puppe aus. Die Daten der empfangenen Nachrichten werden vom Mikrocontroller zu Steuersignalen für die betroffenen Aktuatoren umgewandelt. Die Aktuatoren wiederum, geben dann Feedback zur Positionskorrektur, in Form von mechanischer Kraft die auf den Körper des Trägers des Fitness Wearable wirkt.

Um diesen Teil des Gesamtsystems tragbar zu machen wird eine Batterie verwendet. Weiter werden verschiedene Varianten von Aktuatoren angeschlossen und auf ihre Eignung untersucht. Es kommt ein pneumatischer Aktuator, ein Vibrationsaktuator und ein Lautsprecher zum Einsatz, welcher durch die Bewegung der Membran, beim Erzeugen

von Tönen, Kraft übertragen soll.

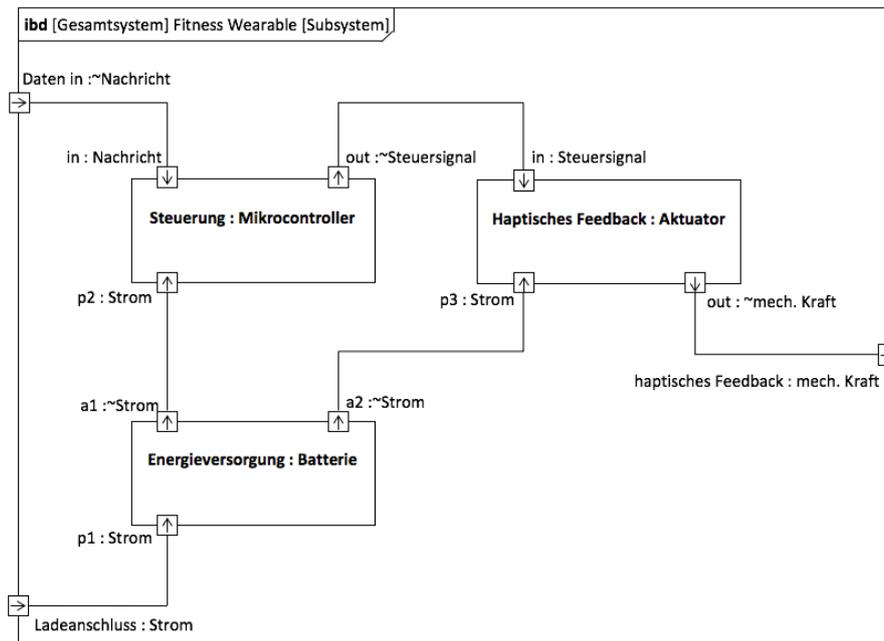


Abbildung 3.4: Internal Block Definition Diagramm, Subsystem Fitness Wearable

### 3.3 Designoptionen

Aus der anfänglichen Überlegung ergeben sich mehrere Möglichkeiten zur Positionierung der Sensorflächen am Subsystem Puppe und der Aktuatoren am Subsystem Fitness Wearable. Diese werden hier in eine Übersicht gestellt und anschließend bewertet. Die Bewertung findet in Bezug auf die gewählte Übung des Anwendungsbeispiels, medizinischer Körpereigenschaften und der technischen Umsetzbarkeit statt.

Weiter müssen die verschiedenen Arten von Feedback durch Einsatz von unterschiedlichen Aktuatorprinzipien wie Pneumatik und diverse Elektromechanik betrachtet werden. Folgend wird festgelegt, welche von den in Frage kommenden Aktuatoren später im Prototypen zur genaueren Untersuchung zum Einsatz kommen.

#### 3.3.1 Anwendungsbeispiel/Yogaübung

Als Grundlage zur Entscheidungsfindung für die Aktuatorpositionen, sowie Aktuatorarten, wird der Prototyp am Anwendungsfall einer Yogaübung erprobt. Genauer geht es um die Übung Virabhadrasana 2, auch der Krieger 2 genannt, zu sehen in Abbildung 3.5. Die Ausgangsposition ist der aufrechte Stand. Folgend wird eines der beiden Beine nach hinten in etwa beinlangem Abstand positioniert und um ungefähr 40 Grad vom Körper weg gedreht. Die Arme werden parallel zum Boden und in einer Linie zu den Beinen ausgestreckt. Dabei soll der Oberkörper unter Spannung gehalten werden und nicht ins Hohlkreuz fallen, mit der Hüfte leicht nach vorn und den Schultern nach hinten geneigt. [30]

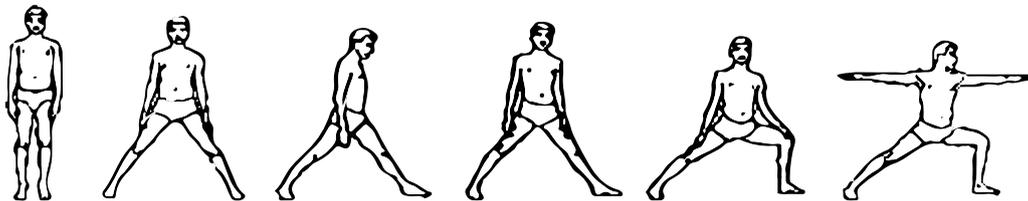


Abbildung 3.5: Skizze des Bewegungsablaufs der Yoga Übung Virabhadrasana 2 (Krieger 2, rechts ist die Zielpose dargestellt)

#### 3.3.2 Aktuatorpositionen

Da der Umfang der Realisierung des Prototypen überschaubar bleiben soll, wird exemplarisch ein Bereich des Körpers mittels des Fitness Wearable mit Aktuatoren versehen. Um trotzdem möglichst viele Variationen bei der Positionskorrektur durch das spürbare Feedback der Aktuatoren zu bewirken, sollen Stellen am Körper gewählt werden, die viel Einfluss auf die Körperhaltung des Trägers haben und zugleich gezielt kleinere Körperbereiche beeinflussbar machen.

Wie in 2.4.1 beschrieben, liegt die Raumschwelle, die minimale Entfernung zwischen zwei mechanischen Hautreizen für die getrennte Wahrnehmung, am Rücken bei 54 mm. Daher ist darauf zu achten, die Aktuatoren nicht zu nah aneinander zu platzieren. Durch die Auswahl der Ausführung des Fitness Wearable als ein T-Shirt, sind die Aktuatorpositionen auf den Oberkörper begrenzt. Dort ergeben sich verschiedene Bereiche die folgend

betrachtet werden.

Für die Positionierung der möglichen Aktuatorfelder stehen die Bereiche, vorderer Oberkörper, hinterer Oberkörper und Positionen entlang der Hüfte zur Auswahl. An der Vorderseite des Oberkörpers würden die Aktuatoren an der rechten und linken Brust, sowie mittig kurz über der Hüfte und in der mitte des Oberkörpers platziert (Abbildung 3.6). An der Rückseite des Oberkörpers würden die Aktuatoren hinten an der rechten und linken Schulter, sowie über dem Steißbein und unter den Schulterblättern an der Wirbelsäule platziert (Abbildung 3.7). Bei der Positionierung an der Hüfte würden die Aktuatoren jeweils auf Hüfthöhe, mittig vorn und hinten, sowie rechts und links platziert (Abbildung 3.8). Die genauen Positionen können leicht variieren, abhängig von den Körpermaßen des Trägers des T-Shirt Fitness Wearables und sind in den jeweiligen Abbildungen als rote Punkte angedeutet.

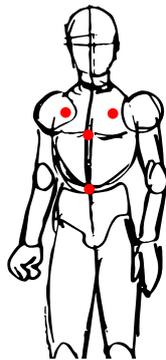


Abbildung 3.6: Vorderansicht eines skizzierten Oberkörpers mit angedeuteten Aktuatorpositionen

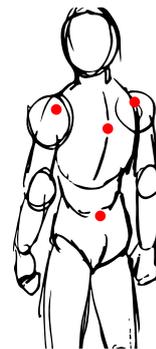


Abbildung 3.7: Rückansicht eines skizzierten Oberkörpers mit angedeuteten Aktuatorpositionen

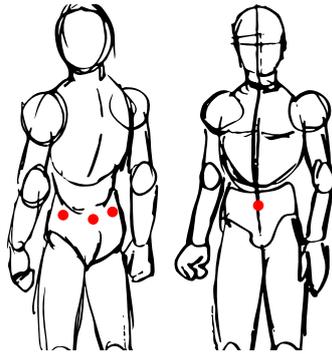


Abbildung 3.8: Vorder- und Rückansicht eines skizzierten Oberkörpers mit angedeuteten Aktuatorpositionen

Die Positionierung der Sensorflächen am Subsystem Puppe des Prototypen folgen den gewählten Positionen des Subsystem Fitness Wearbale des Protoypen. Um möglichst intuitiv bedienbar zu sein.

#### 3.3.3 Aktuatorarten

Zur Auswahl von Aktuatorarten stehen verschiedene elektromechanische Aktuatoren, sowie ein pneumatischer Aktuator zur Untersuchung. Bei den elektromechanischen Aktuatoren handelt es sich um einen Magnetsumner, einen Vibrationsmotor und einen Lautsprecher. Der pneumatische Aktuator stammt aus einer vorausgehenden Studienarbeit und besteht aus einem Luftkissen, welches mithilfe einer Miniaturpumpe und zwei Miniaturmagnetventilen betrieben wird. Weiter wurde bereits in Abschnitt 2.4.4.4 begründet, dass aufgrund der hohen Spannung und der damit verbundenen Möglichkeit von Verletzungen auf Piezoaktuatoren hier nicht weiter eingegangen wird.

#### 3.3.4 Bewertung der Designoptionen

In Abbildung 3.9 sind die final ausgewählten Aktuatorpositionen angezeichnet. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Positionierung am rückwärtigem Bereich der beiden Schultern und dem oberen sowie unterem Rücken, sich am sinnvollsten herausgestellt haben. Durch diese Positionierung wird dem Trainer einerseits ermöglicht den gesamten Oberkörper über Signale durch die Aktuatoren zu beeinflussen, als auch gewisse isolierte Abschnitte genau anzusprechen, wie die einzelnen Schultern oder den unteren Rücken. Mithilfe von zusätzlichen verbalen Beschreibungen der gewünschten Handlungsänderung des Trainierenden können dann feinere Änderungen erreicht werden.

Desweiteren wird durch die ausschließliche Positionierung der Aktuatoren der Verkabelungsaufwand gering gehalten. Hinzukommend ist der Tragekomfort des Fitness Wearables höher, da die Steuerelektronik weniger störend auf der Höhe des Steißbeins platziert werden kann und alle Kabel für den Trainierenden nicht weiter spürbar am Rücken verlegt werden können.

Um zu Untersuchen welche Aktuatorarten am sinnvollsten zum Einsatz gebracht werden könnten, ist es nötig diese mittels des Prototypen am Anwendungsbeispiel in einem Selbstversuch zu erproben. Aus diesem Grund werden die in Kapitel 3.3.3 Aktuatoren genannten jeweils an eine der hier ausgewählten Positionen verbaut. Wobei der pneumatische Aktuator, dem Aufbau geschuldet, am unteren Rücken platziert wird um den Gesamtaufbau so simpel wie möglich zu halten.



Abbildung 3.9: Angezeichnete Positionen der Aktuatoren auf dem T-Shirt des Fitness Wearables

## 3.4 Entwurf des Prototypen

In diesem Abschnitt wird genauer auf den konkreten Aufbau des Prototypen mit angedeuteten realen Komponenten, der beiden aufgeteilten Subsysteme Puppe und Fitness Wearable, eingegangen. Dies geschieht in Form von Prototypenentwürfen, welche alle benötigten technischen Komponenten und Verbindungsleitungen theoretisch darstellen. Zur Erstellung der Prototypenentwürfe wird auf die in diesem Kapitel erarbeiteten theoretischen Grundlagen aus der Modellierung des Systems „Remote Yoga T-Shirt“, den funktionalen Anforderungen und Randbedingungen aus Abschnitt 3.1, sowie der Bewertung der Designoptionen aus Abschnitt 3.3.4 zurückgegriffen.

### 3.4.1 Entwurf des Subsystem Puppe

In diesem Prototypenentwurf (Abbildung 3.10) sind alle zum Aufbau benötigten Bauteile des Subsystem Puppe schematisch dargestellt. Eine Stoffpuppe bildet die Basis und beinhaltet möglichst alle Komponenten, um das Subsystem mobil zu halten. Der genutzte Mikrocontroller dient zur Steuerung der Eingangssignale und Kommunikation zwischen beiden Subsystemen. Zur Energieversorgung wird eine Powerbank verwendet, da diese keine zusätzliche Steuerelektronik bedarf und leicht wechselbar ist. Zum einarbeiten der Sensorflächen in die Puppenoberfläche wird ein leitfähiges Garn verwendet, welches mit dem Mikrocontroller verbunden wird.

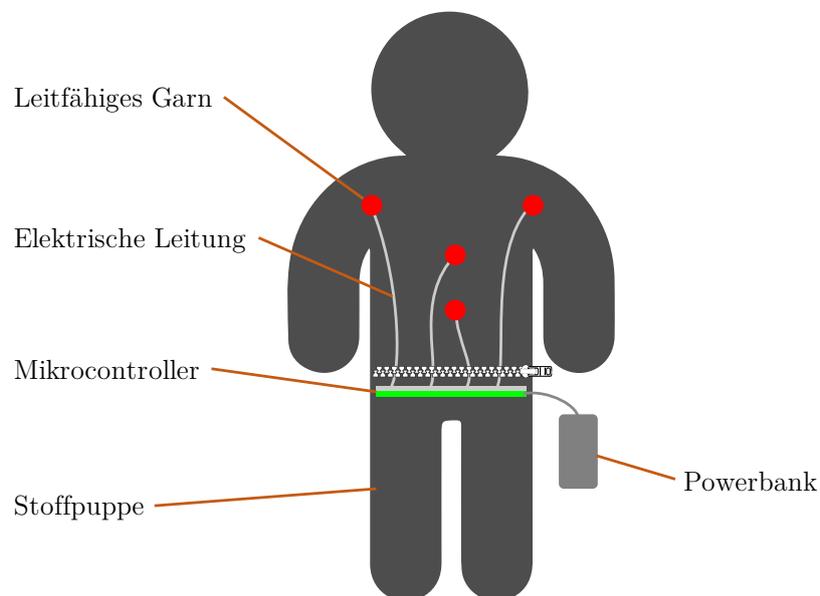


Abbildung 3.10: Prototypenentwurf des Subsystem Puppe

### 3.4.2 Entwurf des Subsystem Fitness Wearable

In diesem Prototypenentwurf (Abbildung 3.11) sind alle zum Aufbau benötigten Bauteile des Subsystem Fitness Wearable schematisch dargestellt. Die Basis für das Fitness Wearable bildet ein T-Shirt in welches alle Komponenten integriert werden. Der Mikrocontroller dient als Steuerung der Aktuatoren und zur Kommunikation zwischen beiden Subsystemen. Als Energieversorgung wird auch hier eine Powerbank verwendet, aufgrund der Modularität und Ersparnis der Steuerelektronik. Der Magnetsummer, der Vibrationsmotor, der Lautsprecher und die elektrischen Bauteile des pneumatischen Aktuators sind an eine Prototypplatine angeschlossen und mit dem Mikrocontroller verbunden. Das Luftkissen des pneumatischen Aktuators ist über eine pneumatische Leitung mit den einzelnen pneumatischen Bauteilen verbunden.

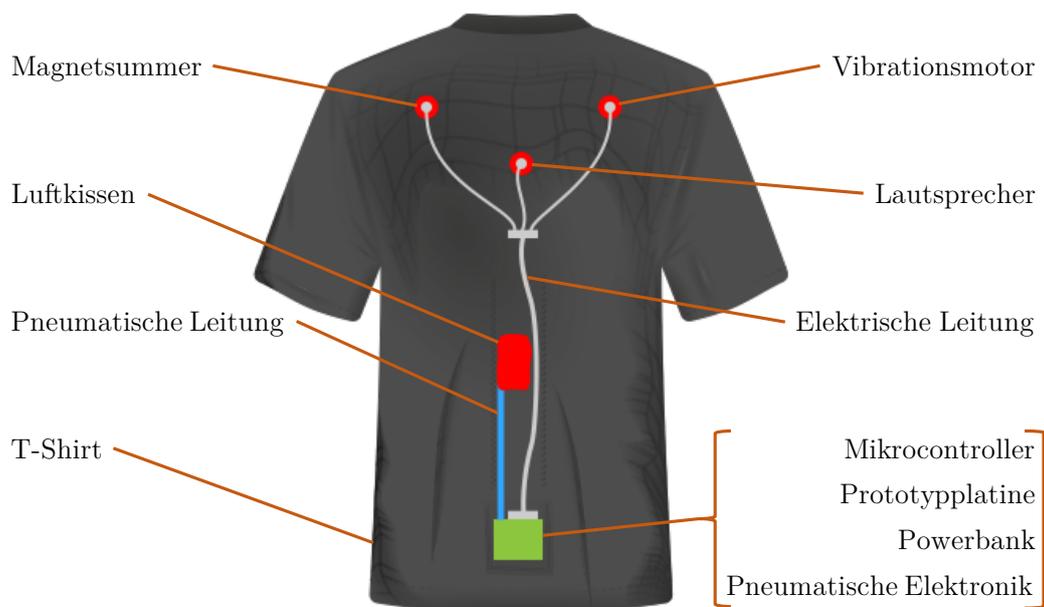


Abbildung 3.11: Prototypenentwurf des Subsystem Fitness Wearable

## 4 Realisierung des Prototypen

Vor Beginn der Fertigung wird der tatsächliche Netzwerkaufbau beschrieben und dargestellt. Anschließend werden die Gemeinsamkeiten des Softwaredesigns und die Konstruktion beider Subsysteme, beschrieben. Aus den vorherigen Überlegungen werden die, vermeintlich geeignetsten Komponenten ausgewählt und entsprechend konkrete Konstruktionspläne und Konstruktionsskizzen angefertigt. Es werden vorzugsweise bereits vorrätige Komponenten genutzt. So sollen u.a. pandemiebedingt lange Lieferzeiten umgangen werden. Anschließend müssen elektrische, sowie pneumatische Schaltpläne erstellt werden. Die Realisierung des Prototypen wird mit dem Schreiben der Software für die beiden eingesetzten Mikrocontroller abgeschlossen.



Abbildung 4.1: Ansicht des gesamten Prototypen, links das Subsystem Fitness Wearable und rechts das Subsystem Puppe (Quelle: Jessica Broscheit)

## 4.1 Netzwerkaufbau

Zur Herstellung der Kommunikation zwischen den Subsystemen, wird das MQTT Netzwerkprotokoll eingesetzt. Das tatsächlich aufgebaute Netzwerk entspricht dem in Abbildung 4.2 dargestellten Aufbau. Als MQTT Broker wird das Programm Eclipse Mosquitto[26] auf einem Laptop genutzt, gestartet<sup>1</sup> wird dieser über das Terminal. Mithilfe der Funktionen aus der `umqtt.simple`<sup>2</sup> Bibliothek verbinden sich beide Subsysteme mit dem Broker. Die Puppe als Publisher an das Thema „sensorInput/touch“, da sie lediglich Nachrichten sendet. Das Fitness Wearable empfängt hauptsächlich Nachrichten und fungiert dem gemäß als Subscriber vom Thema „sensorInput/touch“. Beide Subsysteme und der eingesetzte Laptop sind mit dem gleichen WLAN Netzwerk verbunden.

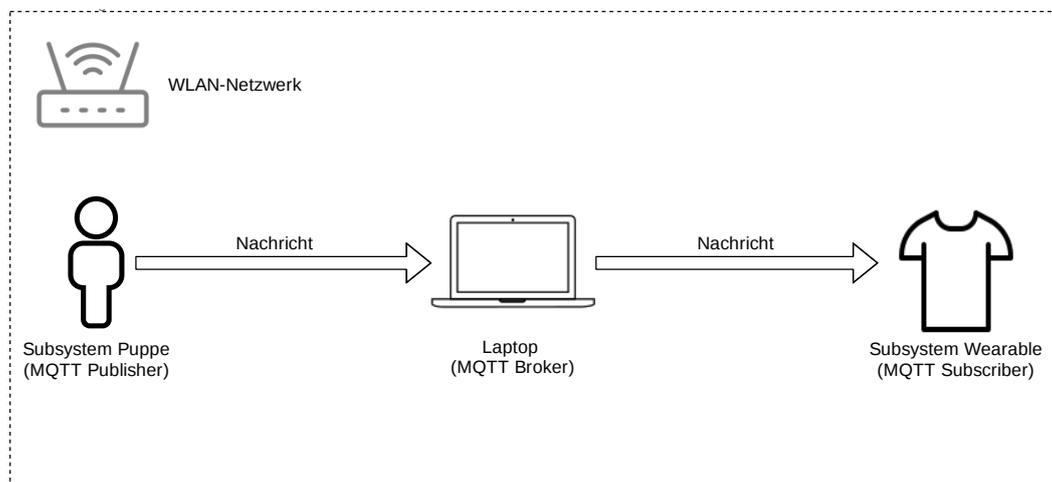


Abbildung 4.2: Netzwerkaufbau des gesamten Prototypen zur Kommunikation mittels des MQTT Protokoll innerhalb eines WLAN Netzwerks

---

<sup>1</sup>Roger Light, Mosquitto man page, <https://mosquitto.org/man/mosquitto-8.html>. [20.05.2021]

<sup>2</sup>The MicroPython project, GitHub repository für die `umqtt.simple` Bibliothek, <https://github.com/micropython/micropython-lib/tree/master/micropython/umqtt.simple>. [20.05.2021]

## 4.2 Allgemeines zur Programmierung

Die Mikrocontroller der beiden Subsysteme werden in der Programmiersprache MicroPython programmiert. MicroPython ist für den Einsatz auf Mikrocontrollern optimiert, simpel im Aufbau und bietet mehrere nützliche Funktionen<sup>3</sup>. Als integrierte Entwicklungsumgebung zur Programmierung wurde PyCharm<sup>4</sup> in der Community-Version genutzt, mit dem Plugin MicroPython<sup>5</sup>.

Um die Ausführung von Programmen zeitlich zu verzögern wird üblicherweise die Funktion „sleep“ genutzt. Die Sensorflächen des Subsystem Puppe und die Kommunikation zwischen den beiden Subsystemen müssen jedoch jederzeit, möglichst ohne große Zeitverzögerung erreichbar sein und reagieren um eine flüssige Kommunikation zwischen Träger und Trainer zu gewährleisten. Um den Ablauf des Programms bei zeitabhängigen Abfragen also nicht zu pausieren und somit die Arbeit anderer Programmteile aufrechtzuerhalten, wird überwiegend die Funktion „ticks“ eingesetzt. Bei dieser wird das Programm nicht pausiert, sondern die verstrichene Zeit gezählt und kann somit Abfragen während des Ablaufs des Programms steuern.

Ein weiterer Aspekt der Programmierung ist die automatisierte Verbindungsherstellung und Wiederherstellung zwischen beiden Subsystemen, sowie der Mikrocontroller zum WLAN. Nach jedem Hauptschleifendurchlauf wird die Verbindung des Mikrocontrollers zum WLAN und die Erreichbarkeit des MQTT Brokers geprüft. Bei einem Fehlschlag einer dieser Prüfungen, leitet das Programm selbständig einen Neustart des Mikrocontrollers und somit den erneuten Verbindungsaufbau zum WLAN und zum MQTT Broker ein. Weiter verfügen sowohl das Subsystem Puppe als auch das Subsystem Fitness Wearable über spezifische Programmabschnitte die gesondert beschrieben werden. Der gesamte Programmcode für das Subsystem Puppe und der des Subsystem Fitness Wearable ist in dem digitalen Anhang zu finden.

---

<sup>3</sup>MicroPython documentation, Quick reference for the ESP32 <https://docs.micropython.org/en/latest/esp32/quickref.html#>. [26.03.2021]

<sup>4</sup>JetBrains s.r.o., PyCharm Python-IDE <https://www.jetbrains.com/de-de/pycharm/>. [16.07.2021]

<sup>5</sup>JetBrains s.r.o., PyCharm MicroPython Plugin <https://plugins.jetbrains.com/plugin/9777-micropython>. [16.07.2021]

### 4.3 Subsystem Puppe

Wie in Abschnitt 3.2.3 bereits beschrieben, handelt es sich bei dem Subsystem Puppe um ein haptisches Eingabeinterface welches Berührungen durch den Trainer aufzeichnet und als Nachricht an das Subsystem Fitness Wearable schickt. Das Subsystem Puppe bildet den menschlichen Körper als Stoffpuppe ab. In diese ist ein Mikrocontroller integriert, eine Statusleuchte und mehrere berührungsempfindliche Flächen aus elektrisch leitenden Garn.

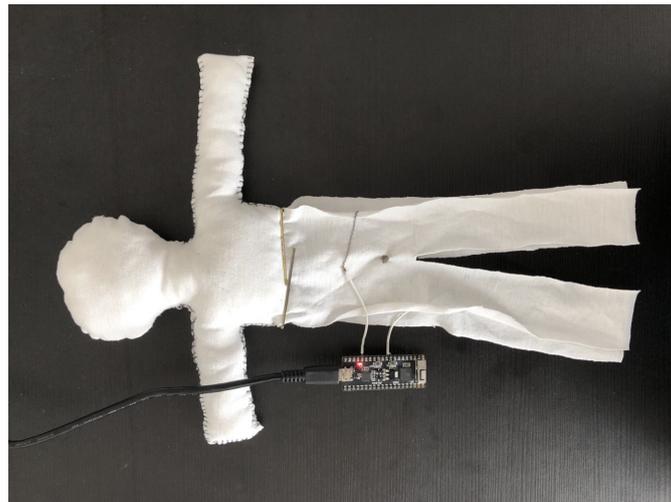


Abbildung 4.3: Erste Version des Prototypen Subsystem Puppe

In Abbildung 4.3 ist die erste Version des Prototypen des Subsystem Puppe zu sehen. Die erste Version des Prototypen stellte sich als nicht praktikabel heraus, wie in Kapitel 3.3 begründet und führte zum Bau einer neuen, der jetzt verwendeten Version. Zur Integration der Elektronik wurde die Grundfunktionalität der Puppe erprobt, die notwendigen Maße und konstruktiven Eigenschaften getestet. Dabei fiel vor allem auf, dass ein Zugang zur integrierten Elektronik und eine Statusleuchte, wie im ersten Absatz aus Abschnitt 2.8 erwähnt, die Handhabung der Puppe erleichtern würde. Als notwendig stellte sich auch ein größerer Bauraum für die Elektronik und die Verkabelung dieser heraus. Außerdem ermöglicht der zusätzliche Bauraum eine unkomplizierte Isolierung der Sensorflächen zueinander.

### 4.3.1 Auswahl der Komponenten

Bei der Auswahl der Komponenten muss besonders auf die Einhaltung der vorher festgelegten funktionalen Anforderungen aus 3.1 geachtet werden.

Zum Bau der Puppe wird robuster schwarzer Baumwollstoff, passend dazu schwarzes Baumwollgarn und als Füllmaterial handelsübliche Stopfwatte verwendet. Für den Zugang zur Elektronik wird ein Reißverschluss aus Metall eingesetzt.

Als Mikrocontroller kommt das ESP32-PICO-Kit V4 Breakout Board<sup>6</sup> der Firma Espressif zum Einsatz, da dieses kompakt gebaut ist, über alle nötigen Anschlusspins sowie ein WLAN Modul verfügt und mittels Mikropython programmierbar ist.

Für das Erstellen der Sensorflächen kommt ein elektrisch leitendes Garn zum Einsatz. Zum Vergleich stehen mehrere elektrisch leitfähige Garne, die zu Sensorflächen verarbeitet werden können. Zur Auswahl steht ein Vorrätiges Garn mit unbekanntem Hersteller, ein Garn von der Firma Adafruit<sup>7</sup> und ein Garn der Firma MADEIRA<sup>8</sup>. Wie in der Tabelle 4.1 zu erkennen, verfügen die verschiedenen Garne über unterschiedliche Widerstandswerte und Materialien. Anhand der Widerstandswerte wurde das Garn für die berührungsempfindlichen Sensorflächen des Anwendungsfalls ausgewählt. Für Verbindungsleitungen eignen sich Garne mit niedrigem Eigenwiderstand, da die zu versorgenden Lasten verlustfreier mit Strom versorgt werden können. Durch höhere Widerstände ergibt sich ein größeres Messfeld, wodurch die Sensitivität der Sensorflächen besser kalibriert werden kann. Im Vorrat befand sich ein elektrisch leitendes Garn, das durch seinen Widerstandswert, ein ausreichend großes Messfeld ermöglicht und simple in der Verarbeitung ist. Um die Ressourcen zu schonen und verlängerte Lieferzeiten zu umgehen wurde dieses Garn verwendet.

---

<sup>6</sup>Espressif Development Board, ESP32-PICO-KIT V4 / V4.1 Getting Started Guide, <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/hw-reference/esp32/get-started-pico-kit.html>. [19.07.2021]

<sup>7</sup>adafruit, Stainless Thin Conductive Thread 2ply, Technical Details, <https://www.adafruit.com/product/640#technical-details>. [20.07.2021]

<sup>8</sup>MADEIRA HC Garne, Flyer, [https://www.madeira.com/fileadmin/user\\_upload/Downloads/Flyer/HC\\_Flyer\\_Lepporello\\_A5\\_2019\\_DE\\_WEB.pdf](https://www.madeira.com/fileadmin/user_upload/Downloads/Flyer/HC_Flyer_Lepporello_A5_2019_DE_WEB.pdf). [20.07.2021]

Hersteller	Bezeichnung	Material	Widerstand [ $\Omega/m$ ]
Unbekannt	-	Rostfreier Stahl	96
Adafruit	2 ply	Rostfreier Stahl	52
MADEIRA	HC12	Polyamid mit Silberbeschichtung	<100

Tabelle 4.1: Vergleichstabelle der elektrisch leitenden Garne

Als Verbindung der Sensorflächen zum Mikrocontroller werden isolierte Kupferdrähte und Dupont Steckverbindungen genutzt. Auch die Statusleuchte, in Form einer RGB-Led, nutzt diese Verbindung zum Mikrocontroller. Die Energieversorgung übernimmt eine handelsübliche Powerbank, angeschlossen mittels Micro USB Kabel. Datenblätter zum Mikrocontroller und den Garnen sind im digitalen Anhang zu finden.

### 4.3.2 Konstruktionsplan

Für den Aufbau des, in Abbildung 4.5 zu sehenden Prototypen, Subsystem Puppe ist die, in die Puppe integrierte Elektronik und deren komfortable Handhabung und Bedienung von Bedeutung.

Die Puppe selbst, besteht aus zwei Lagen schwarzen Baumwollstoff, der an den Rändern vernäht und mit Stopfwatte gefüllt wurde. Um Änderungen an der Elektronik zu erleichtern und diese einfach zu erreichen, wird zusätzlich ein Reißverschluss auf Hüfthöhe der Puppe angebracht.



Abbildung 4.4: Verkabelung der Sensorflächen zum Mikrocontroller des Subsystem Puppe

Die berührungsempfindlichen Flächen, bestehend aus elektrisch leitenden Garn und sind direkt in den Deckstoff eingenäht. Jede dieser Flächen ist, wie in Abbildung 4.4, separat mit isolierten Kupferdrähten an die Mikrocontroller GPIO-Pins (für engl. General Purpose Input/Output) über gekrimpte Dupontstecker angeschlossen. Wie bereits in Abschnitt 3.3.2 erwähnt, befinden sich die Sensorflächen an den selben Positionen, wie die der Aktuatoren am Subsystem Fitness Wearable. Somit sind diese am Rücken platziert, an der rechten und linken Schulter und an der Wirbelsäule, am unteren Rücken und auf der Höhe der Schulterblätter.

Zur Rückmeldung für den Trainer ist eine RGB-Led als Statusleuchte integriert. Diese zeigt mit der Farbe grün an, ob eine Verbindung zum WLAN und zum MQTT Broker besteht. Zusätzlich wird durch ein Aufleuchten in der Farbe lila signalisiert, ob eine Berührung einer Sensorfläche erkannt wurde. Bei einem Fehler leuchtet die Statusleuchte rot.



Abbildung 4.5: Prototyp Subsystem Puppe (Quelle: Jessica Broscheit)

### 4.3.3 Elektrischer Schaltplan

Die elektrische Schaltung des Subsystem Puppe sieht wie in Anhang A.1.1 gezeigt, aus. Die einzelnen Sensorflächen, im Schaltplan als Kapazitäten dargestellt, sind direkt mit den GPIO-Pins des Mikrocontrollers verbunden. Die Powerbank ist als 5 V Spannungsquelle und gemeinsame Masse des ganzen elektrischen Aufbaus dargestellt und ist entsprechend mit dem Masse und Spannung Pin verbunden.

### 4.3.4 Programmierung

Um zu gewährleisten, dass die Eingaben über die berührungsempfindlichen Sensorflächen zuverlässig erkannt werden, wird beim initialen Start des Programms eine Kalibrierung durchlaufen. Dafür werden 10 Kapazitätswerte im unberührten Zustand gespeichert und daraus der Mittelwert berechnet. Die Sensitivität kann durch die Festlegung eines oberen und unteren Schwellwertes, ab dem die Berührung als Eingabesignal erkannt werden soll, eingestellt werden. Dadurch können teilweise unerwünschte Eingabesignale rausgefiltert werden.

Der vereinfachte Programmablauf sieht wie folgt aus. Nach erfolgreichem Verbindungsaufbau zum WLAN und zum MQTT Broker, befindet sich das Programm in einer sich wiederholenden Hauptschleife, welche mit Verbindungsabbruch einen Neustart des Mikrocontrollers veranlasst. Innerhalb der Hauptschleife wird der Kapazitätswert der Sensorflächen nacheinander eingelesen und durch mehrere Abfragen und Methoden gefiltert. Erfolgt eine validierte Berührung einer Sensorfläche, wird eine Nachricht an den Mikrocontroller des Subsystem Fitness Wearable gesendet. Wird registriert, dass die Sensorfläche nicht mehr berührt wird, wird ebenfalls eine Nachricht an den Mikrocontroller des Subsystem Fitness Wearable gesendet. Die Nachrichten enthalten jeweils die Position der Sensorfläche und deren Berührungszustand.

## 4.4 Subsystem Fitness Wearable

Das Subsystem Fitness Wearable tritt in dieser Arbeit in Form eines handelsüblichen T-Shirts mit eingebauter Elektronik auf. Wie in Abbildung 4.6 zu sehen, umfasst die Elektronik einen Mikrocontroller, montiert auf einer Lochrasterplatine mit weiterer Steuerelektronik, eine Powerbank und verschiedene Aktuatoren. Das Subsystem Fitness Wearable wird direkt am Körper getragen, kommuniziert mit dem Subsystem Puppe und reagiert auf die empfangenen Nachrichten mit dem Auslösen von Aktuatoren.

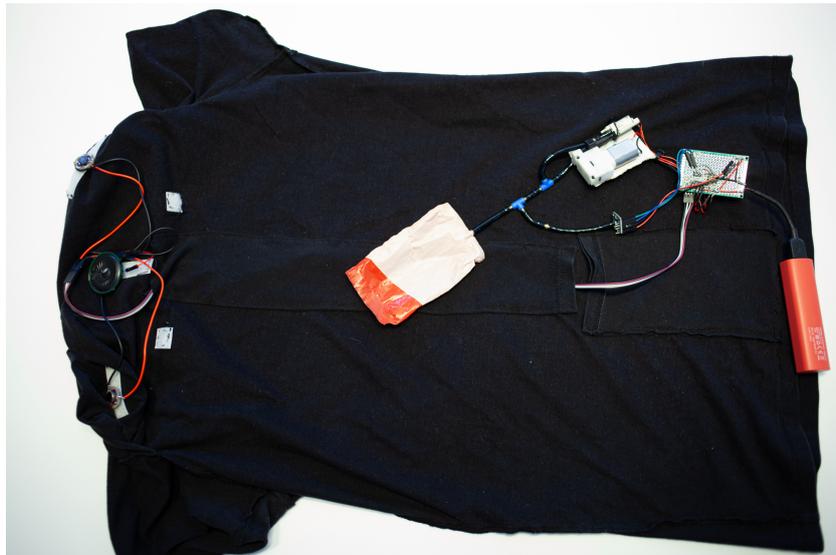


Abbildung 4.6: Subsystem Fitness Wearable auf links gedreht und freigelegt für Sicht auf innenliegenden Aufbau (Quelle: Jessica Broscheit)

### 4.4.1 Auswahl der Komponenten

Unter Berücksichtigung der vorher erörterten funktionalen Anforderungen und der in Abschnitt 3.2 erstellten Systemmodelle, wird in diesem Abschnitt die Wahl getroffen, welche konkreten Komponenten für den Anwendungsfall zum Einsatz kommen sollen.

Die Grundlage des Subsystem Fitness Wearable bildet ein schwarzes Sport T-Shirt aus Baumwolle, in welches alle benötigten Komponenten integriert werden. Zum Vernähen und Zusammenfügen wird schwarzes Baumwollgarn und weiterer schwarzer Baumwollstoff verwendet.

Auch in diesem Subsystem kommt das ESP32-PICO-Kit V4 Breakoutboard<sup>9</sup> der Firma Espressif, aufgrund der in Abschnitt 4.3.1 genannten Gründe, zum Einsatz.

Als Aktuatoren werden die bereitgestellten Lillypad Magnetbuzzer<sup>10</sup> und Vibrationsmotoren<sup>11</sup>, ein Miniaturlautsprecher mit Unbekanntem Hersteller und der pneumatische Aktuatoraufbau genutzt. Zum pneumatischen Aktuatoraufbau gehört eine elektrische Miniaturluftpumpe<sup>12</sup>, zwei Miniaturmagnetventile<sup>13</sup>, T-Stücke und Schlauchverbinder aus Messing, sowie ein 10 cm hohes und 6 cm breites Luftkissen aus Kunststoffolie und Polymerethan Schläuche.

Als Drucksensor kommt ein vorkalibrierter piezoresistiver Silikon Drucksensor MPRLS<sup>14</sup> auf einem Breakout Board der Firma Adafruit Industries, welcher den absolut gemessenen Druck digital ausgibt, zum Einsatz. Der Messbereich reicht von 0,06 mbar bis 2,5 bar. Mit einem Stromverbrauch von lediglich 0,0005 mA im ruhenden und 1,7 mA im aktivem Zustand. Durch die Vorkalibrierung des Drucksensors ist kein Testen und Kalibrieren mehr nötig. Das ausgewählte Darlingtonarray ULN2003A, bereits in Abschnitt 2.6.2 beschrieben, ermöglicht das Betreiben von mehreren Aktuatoren zur gleichen Zeit. Durch den separaten Anschluss an die Powerbank wird der Signalstrom vom Laststrom trennt und somit der Mikrocontroller vor zu hohen Spannungen und Strömen geschützt. Um alle genutzten elektrischen Komponenten zuverlässig zu Verbinden wird eine Prototypplatine genutzt.

Zur einfachen Verbindung der Aktuatoren mit der Portotypplatine werden teilweise Dupont Steckverbindungen genutzt. Entlang der Wirbelsäule ist eine mehradrige elektrische Verbindungsleitung für die oberen drei Aktuatoren verlegt. An diese können an einer Seite die elektromechanischen Aktuatoren angesteckt werden und an der anderen die Prototypenplatine. Im digitalen Anhang sind die Datenblätter zu den Aktuatoren und dem Mikrocontroller zu finden.

---

<sup>9</sup>Espressif Development Board, ESP32-PICO-KIT V4 / V4.1 Getting Started Guide, <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/hw-reference/esp32/get-started-pico-kit.html>. [19.07.2021]

<sup>10</sup>Sparkfun LilyPad Buzzer, Magnet Buzzer Datasheet, <http://cdn.sparkfun.com/datasheets/Components/General/CCV-084B16-CUI-datasheet-29139.pdf>. [21.06.2021]

<sup>11</sup>Sparkfun LilyPad Vibeboard, Precision Microdrives Shaftless Vibration Motor Datasheet, [https://www.sparkfun.com/datasheets/Robotics/310-101\\_datasheet.pdf](https://www.sparkfun.com/datasheets/Robotics/310-101_datasheet.pdf). [21.06.2021]

<sup>12</sup>daypower LP15-06, Mini-Luftpumpen Serie LP15-XX Datenblatt, <https://www.pollin.de/p/luftpumpe-daypower-lp15-12-12-v-330065>. [21.08.2020]

<sup>13</sup>SMC 3-Wege-Magnetventil, S-070 C-SDG-32 Datenblatt, [https://static.smc.eu/pdf/S070\\_DE.pdf](https://static.smc.eu/pdf/S070_DE.pdf). [21.08.2020]

<sup>14</sup>adafruit, MPRLS Ported Pressure Sensor Breakout, <https://www.adafruit.com/product/3965#technical-details>. [21.04.2021]

### 4.4.2 Konstruktionsplan

Zur Herstellung des Subsystem Fitness Wearable werden zunächst Details der Konstruktion erläutert. Der Mikrocontroller, mitsamt der Powerbank und den pneumatischen Aktuatoren, ist über dem unteren Saum am Rückenteil des T-Shirts, in einer eingenähten Tasche angebracht. Die Aktuatoren sind gemäß der bereits getroffenen Bewertung in Kapitel 3.3.4 am Rücken positioniert. Die drei Aktuatoren am oberen Rückenbereich werden mit Hilfe von, am T-Shirt festgenähten Klettbahnen und am Aktuator festgeklebten Gegenstücken angebracht, verdeckt durch eine zusätzlich eingenähte Stoffschicht. Die elektrischen Leitungen für die genannten Aktuatoren verlaufen entlang der Wirbelsäule, ebenfalls zwischen T-Shirt und einer zusätzlichen Stoffschicht, zur Prototypenplatine. Der Magnetsummer befindet sich an der linken Schulter des Trägers, der Vibrationsmotor befindet sich an der rechten Schulter des Trägers, der Lautsprecher befindet sich auf der Wirbelsäule unterhalb der Schulterblätter. Das Luftkissen des pneumatische Aktuator befindet sich auf der Wirbelsäule am unteren Rücken. Um Messungen am Luftkissen des pneumatischen Aktuators zu ermöglichen, wurde ein Drucksensor an die Pneumatikleitung, mittels T-Stück, vor dem Luftkissen angeschlossen. Der dort gemessene Druck ist dem im Luftkissen gleichzusetzen.

Die zusätzlich eingenähten Stoffschichten und die Positionierung der Elektronik wurden gewählt um den bestmöglichen Tragekomfort zu gewährleisten, den Träger des Fitness Wearables vor elektrischer oder Wärmeeinwirkung am Körper zu schützen und den technischen Aufbau von außen nicht sichtbar zu machen.

### 4.4.3 Elektrischer und Pneumatischer Schaltplan

Auf der verbauten Prototypplatine sind der Mikrocontroller und das Darlingttonarray mittels löten montiert und die nötigen Pins ebenfalls durch löten verbunden. Sowohl die Elektronik zum Anschluss und zur Steuerung der Aktuatoren, als auch für den Drucksensor, wird für den Prototypenaufbau mit der Prototypenplatine verbunden. Die Elektronik für den pneumatischen Aktuator ist direkt an die Pins des Darlingttonarray gelötet. Die Anschlüsse des Drucksensors sind direkt an die Pins des Mikrocontroller gelötet und die elektromechanischen Aktuatoren sind mithilfe von Dupontsteckverbindungen angeschlossen. Die Ausgänge des Darlingttonarrays werden passend zu den Eingängen an die Aktuatoren angeschlossen. Der Mikrocontroller, das Darlingttonarray und der Drucksensor sind über einen USB-A Stecker an die Powerbank verdrahtet, um die benötigte

Energie zum Betreiben aller Lasten bereit zu stellen. Durch diese Art der Verschaltung wird der Last- vom Signalstromkreis getrennt und es können Aktuatoren mit höheren Lastströmen genutzt werden, ohne den Mikrocontroller zu beschädigen. Der detaillierte elektrische Schaltplan befindet sich im Anhang A.1.2.

Der pneumatische Aufbau, zu sehen im Anhang A.1.3, basiert auf den Erkenntnissen und dem Prototypenaufbau aus der Studienarbeit „Mikropneumatik in Wearables“ [25]. Dabei werden eine elektrische Miniaturluftpumpe, sowie zwei Miniaturmagnetventile genutzt, um ein aus Kunststoff bestehendes Luftkissen auf- sowie abzupumpen. Alle pneumatischen Komponenten werden mithilfe von PVC Schläuchen, Messing T-Stücken und Adapterstücken verbunden.

### 4.4.4 Programmierung

Anders als bei dem Subsystem Puppe wird beim Subsystem Fitness Wearable hauptsächlich die Ausgabe von Signalen programmiert. Bekommt das Subsystem Fitness Wearable vom Subsystem Puppe die Nachricht, dass eine bestimmte Fläche aktiviert wurde, wird der zugehörige Aktuator am Subsystem Fitness Wearable aktiviert.

Der vereinfachte Programmablauf beginnt mit der Verbindungsherstellung zum WLAN Netzwerk und MQTT Broker. Nach erfolgreicher Verbindung befindet sich das Programm in einer sich ständig wiederholenden Hauptschleife. Solange die Verbindung zum WLAN Netzwerk und dem MQTT Broker bestehen bleibt, wird die Schleife ausgeführt. In dieser wird bei Erhalt von Nachrichten des Subsystem Puppe entsprechend reagiert, mit Aktivieren oder Deaktivieren der zur Nachricht passenden Aktuatoren.

Zur Druckmessung im Luftkissen des pneumatischen Akutator im folgenden Abschnitt 5.1.3 wird der verbaute Drucksensor des Subsystem Fitness Wearable mithilfe einer angepassten Version der mprls<sup>15</sup> Bibliothek zum Auslesen über I<sup>2</sup>C vorbereitet.

---

<sup>15</sup>David Therincourt, GitHub repository - MicroPython library to support Honeywell MPRLS digital pressure sensors, <https://github.com/david-therincourt/micropython-lib/blob/master/adafruit/mprls>. [09.06.2021]

# 5 Evaluation des Prototypen

In diesem Kapitel wird durch ein Selbstexperiment und mehreren Messungen, die Funktionalität der Subsysteme des Prototypen betrachtet. Dabei wird besonders auf die Eingabe von Signalen am Subsystem Puppe über die Sensorflächen und die Spürbarkeit der Aktuatoren am Subsystem Fitness Wearable eingegangen.

## 5.1 Messungen

Zur Untersuchung der Sensorik und Aktuatorik, wurden mehrere Messungen durchgeführt. Zunächst wurde das Verhalten bei Berührung durch den menschlichen Finger der einzelnen berührungsempfindlichen Sensorfläche am unteren Rücken des Subsystems Puppe aufgezeichnet. Anschließend wurden alle berührungsempfindlichen Sensorflächen gemessen. Weiter folgt eine Messung des pneumatischen Aktuators, genauer der anliegende Druck beim Auf- und Abpumpvorgang im Luftkissen dessen. Abschließend wird mithilfe eines Selbstexperiment auf die Spürbarkeit der elektromechanischen Aktuatoren, sowie des pneumatischen Aktuator erprobt.

Alle zugrundelegenden Messdaten befinden sich im digitalen Anhang.

### 5.1.1 Messaufbau

Zum aufzeichnen aller Messwerte, wurden Unterprogramme geschrieben. Diese sind dahingehend optimiert, dass mit einer möglichst geringen Latenz und somit hoher Auflösung, Messwerte aufgenommen werden können.

Im Fall der Druckmessung im Luftkissen des pneumatischen Aktuators, ist ein zeitlicher Ablauf programmiert. Dieser sorgt für einen beispielhaften auf - und abpump Vorgang um den maximal und den minimal erreichbaren Druck im Luftkissen darzustellen.

### 5.1.2 Sensorflächen

Die Sensitivität der berührungsempfindlichen Fläche, am unteren Rücken der Puppe, wurde exemplarisch einmalig gemessen und wird in Abbildung 5.1 dargestellt. Dies dient zur Überprüfung der Funktionalität, Einordnung der Sensorwerte und Unterstützung zur Programmierung. Das Verhalten der elektrischen Kapazität  $C$  wird dafür in Abhängigkeit zur Zeit gesetzt. Die Berührung mittels menschlichen Finger wird durch die Veränderung der Kapazität innerhalb von 4-6 ms erkannt und ist Abhängig von der, durch die Schleifendurchlaufzeit vorgegebenen, Abtastzeit. Bei einer Grundkapazität im unberührten Zustand von 551-564 pF, fällt diese im berührtem Zustand auf 115-206 pF und bei kurzzeitgen maximalen Druck auf die Sensorfläche auf den Minimalwert von 12 pF, ab. Die gestrichelte Linie stellt den festgelegten unteren Schwellwert von 200 pF zur Validierung des Inputsignals dar.

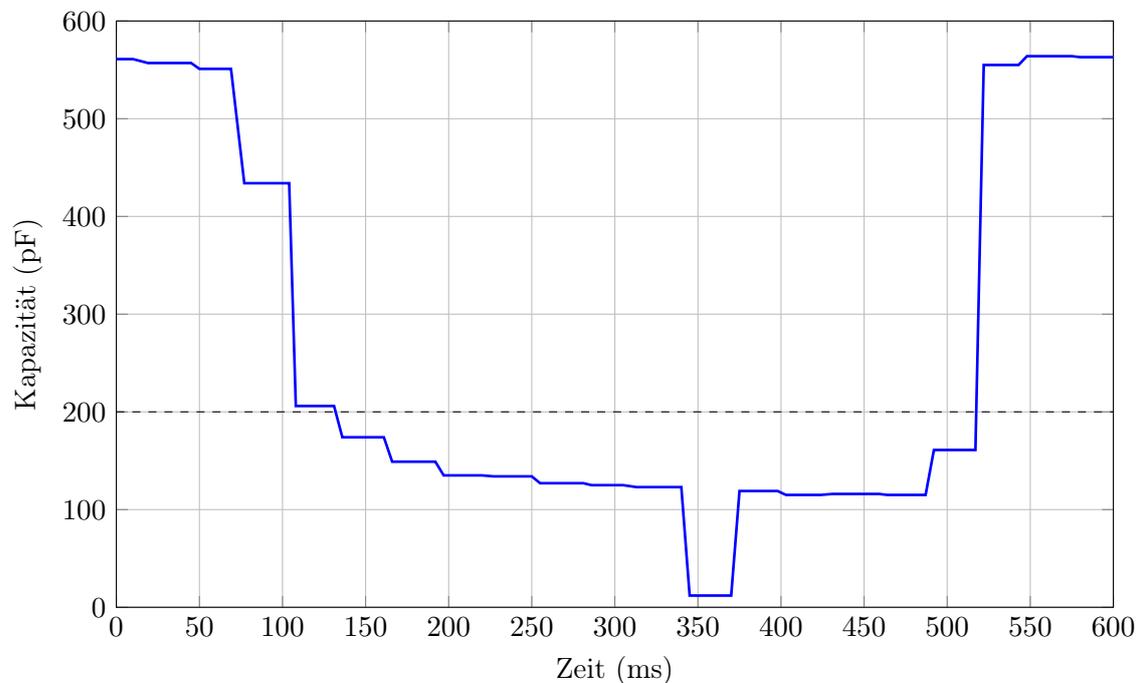


Abbildung 5.1: Messung der berührungsempfindlichen Sensorfläche am unterem Rücken der Puppe

Zur Messung der vier berührungsempfindlichen Flächen, an der rechten und linken Schulter, am oberen und unteren Rücken, wurden diese in möglichst gleichen Zeitabständen und mit gleichwertigen Druck einmal mit dem Finger betätigt und währenddessen mit

einer Auflösung von 12-21 ms abgetastet, abhängig von der Programmdurchlaufzeit. Die aufgenommenen Werte sind dann als Graphen mit der elektrischen Kapazität in pF als Y-Achse und über die Zeit in ms als X-Achse dargestellt. Dies dient der Validierung der Funktion der einzelnen Sensorflächen und um Werte für die Programmierung zu erhalten. Weiter hilft die visuelle Darstellung bei der Nachvollziehbarkeit des Vorgangs der Berührung der Sensorflächen.

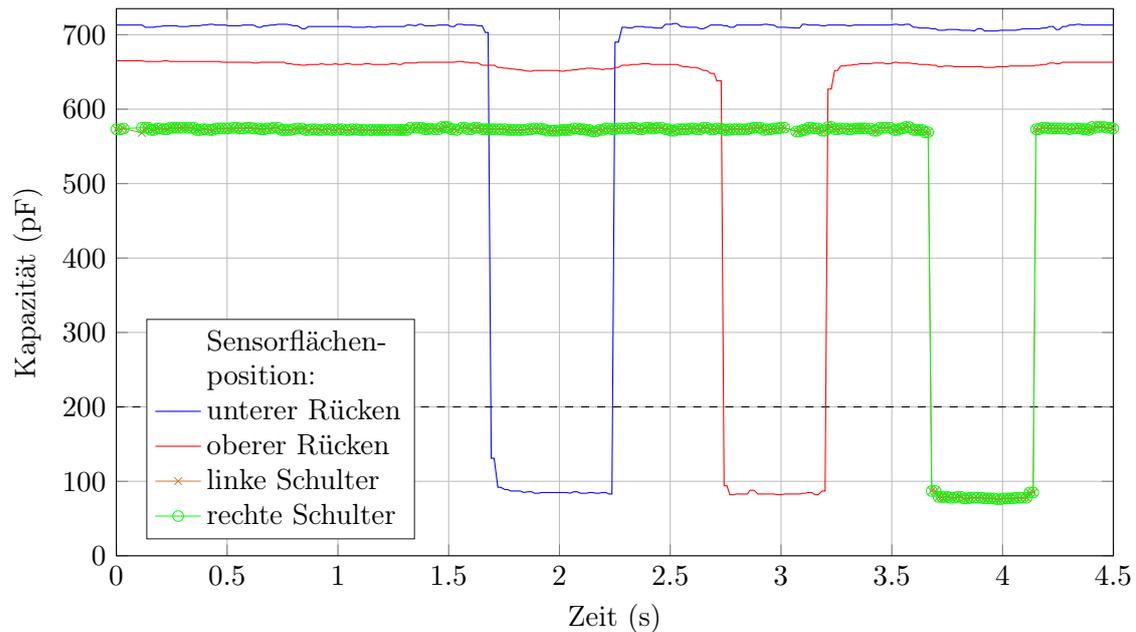


Abbildung 5.2: Messung aller berührungsempfindlichen Flächen am Subsystem Puppe Prototypen

Zu sehen ist, dass alle Flächen über verschiedene Grundkapazität im unberührten Zustand verfügen. Dies liegt an den unterschiedlichen Längen der elektrisch leitenden Fäden die zur Sensorfläche vernäht wurden und an den unterschiedlich Längen der Verbindungsleitungen. Die elektrische Kapazität im unberührtem Zustand der Sensorfläche beträgt am unteren Rücken 703-715 pF, am oberen Rücken 649-665 pF und sowohl an der linken als auch an der rechten Schulter 76-94 pF. Weiter ist zu erkennen, dass im berührtem Zustand die Kapazitäten der Sensorflächen auf einen ähnlichen Wert von 76-94 pF fallen. Besonders auffallend sind die nahezu identischen Messwerte der beiden Flächen an den Schultern. Der Grund dafür könnte eine elektrisch leitende Verbindung zwischen den beiden Flächen, hervorgerufen durch feine Fäden des verwendeten elektrischen Garns im

Prototypen sein. Die gestrichelte Linie stellt den festgelegten unteren Schwellwert von 200 pF zur Validierung des Inputsignals dar.

### 5.1.3 Pneumatischer Aktuator

Um genauere Aussagen zum pneumatischen Aktuator und dessen Spürbarkeit am Körper treffen zu können, wird in diesem Abschnitt der anliegende Druck im Luftkissen mit Hilfe des Drucksensors aus Abschnitt 4.4.1 gemessen. Zu sehen in Abbildung 5.3. Dafür wurde, mittels der elektrischen Luftpumpe und den Magnetventilen für Zuluft und Abluft, das Luftkissen vom Mikrocontroller zeitgesteuert, ersichtlich in Abbildung 5.4 und 5.5, aufgepumpt und direkt im Anschluss wieder abgepumpt. Durch den Abzug des Atmosphärendrucks von 1,013 bar ergibt sich aus der Druckdifferenz ein positiv maximal erreichbarer Druck im Luftkissen von 0,132 bar. Ausgehend vom minimal erreichbaren Druck, nach Abzug des Atmosphärendrucks, ergibt sich aus der Differenz ein negativer Druck im Luftkissen von -0,291 bar.

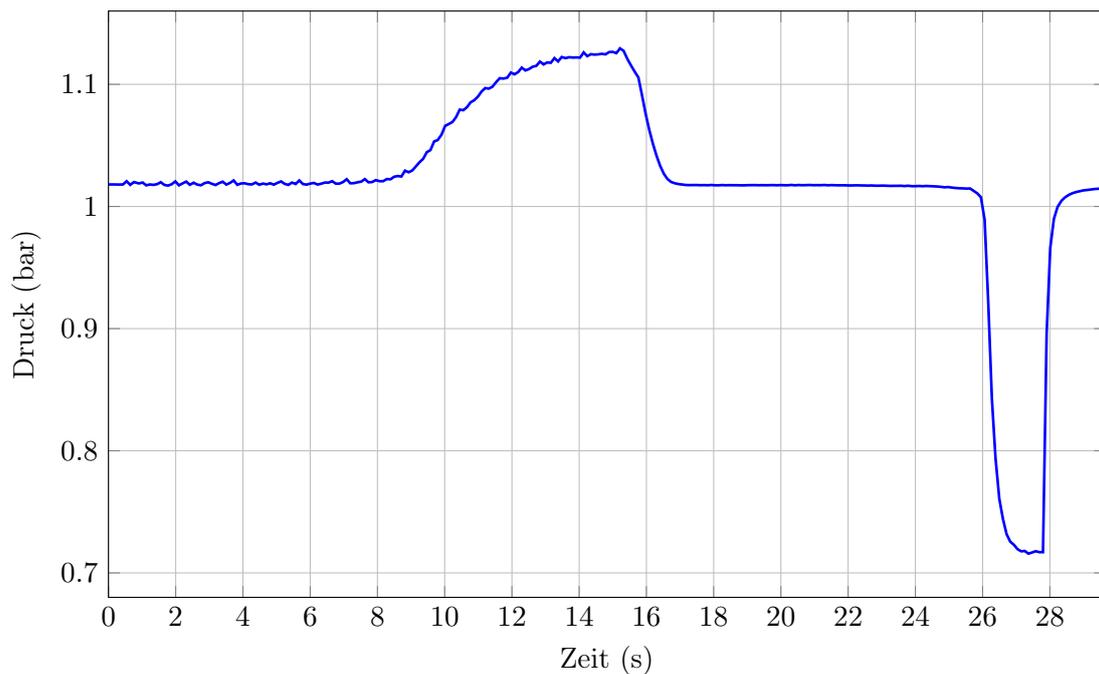


Abbildung 5.3: Messung des Drucks im Kissen des pneumatischen Aktuators am Subsystem Fitness Wearable

In der folgenden Abbildung 5.4 ist zu sehen zu welcher Zeit die elektrische Luftpumpe aktiviert ist und in Abbildung 5.5 wird ersichtlich zu welcher Zeit das Magnetventil für die Zuluft ins Luftkissen sowie das Magnetventil für die Abluft aus dem Luftkissen aktiviert sind. Diese sind zeitlich passend zur Abbildung 5.3 skaliert und wurden parallel aufgezeichnet zur Messung aus Abbildung 5.3, sodass die Dauer der Auf- und Abpumpvorgänge im Zusammenhang der Schaltzustände der Aktuatoren erkennbar werden.

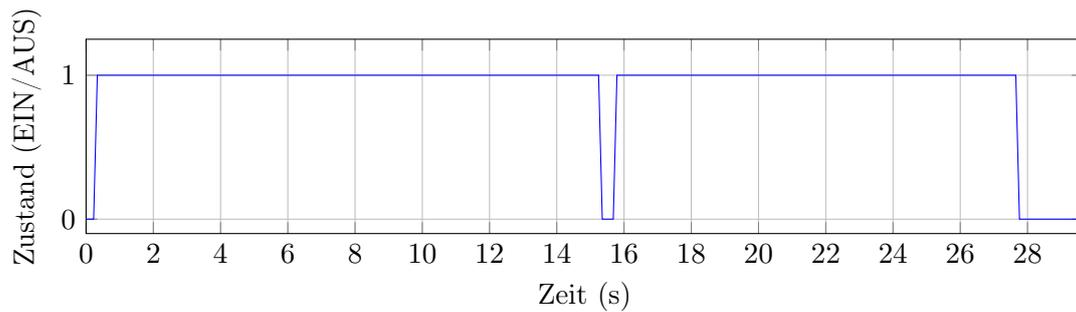


Abbildung 5.4: Messung der Schaltzeiten der Pumpe des pneumatischen Aktuators am Subsystem Fitness Wearable

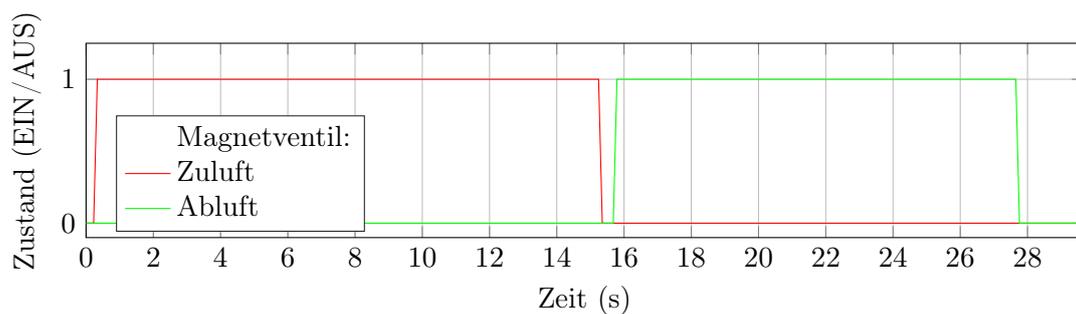


Abbildung 5.5: Messung der Schaltzeiten der Magnetventile des pneumatischen Aktuators am Subsystem Fitness Wearable

Daraus lässt sich ableiten, dass bis ein Druck im Luftkissen aufgebaut wird durchschnittlich 8 Sekunden vergehen und der maximale Druck im Kissen nach zirka 14 Sekunden erreicht wird. Weiter dauert dann das Abpumpen des Luftkissens ungefähr 2 Sekunden und der maximale negative Druck im Kissen wird nach 11 Sekunden erreicht, was in dieser Untersuchung jedoch uninteressant ist.

## 5.2 Selbsterprobung

Da das Subsystem Fitness Wearable über keine Sensorik zur Ermittlung von mechanischen Kräften und Vibrationen am Körper verfügt, können nicht alle Aktuatoren messtechnisch untersucht werden. Um eine begründete Aussage über die Spürbarkeit der Aktuatoren am Körper treffen zu können, wurde die, in Abschnitt 3.3.1 ausgewählte, Yoga Übung Krieger 2 von einem Träger des Subsystem Fitness Wearable ausgeführt. Positionskorrekturen wurden unter Verwendung aller vorhandenen Sensorflächen am Subsystem Puppe veranlasst. Der Träger des Subsystem Fitness Wearable erfüllte die Intensität und Signal Positionierung der auslösenden Aktuatoren.

Die Aktuatoren haben ohne merkliche Verzögerung, nach Berührung der Sensorflächen, ausgelöst. Es stellte sich heraus, dass der Vibrationsmotor der elektromechanischen Aktuatoren für den Träger am deutlichsten wahrnehmbar ist. Kaum spürbar löst hingegen der Lautsprecher aus und für den Träger nicht wahrnehmbar, löst der Magnetbuzzer aus. Beide können nicht genug mechanische Kraft auf die Haut ausüben. Für die Spürbarkeit des pneumatischen Aktuators ist es wichtig, dass das T-Shirt straff am Körper anliegt. Auch die schwindende Intensität der Wahrnehmung bei länger anhaltenden, einmaligen Impulsen nimmt Einfluss auf die grundsätzliche Empfindung des pneumatischen Aktuators.

## 5.3 Evaluation der funktionalen Anforderungen und Randbedingungen

Zum Abschluss dieses Kapitels werden nach dem Messen und Erproben des realisierten Prototypen in diesem Abschnitt alle vorher aufgestellten funktionalen Anforderungen und Randbedingungen aus Abschnitt 3.1 in Tabelle 5.1 evaluiert.

Nummer	Titel	Requirement	Lösung	Ergebnis
REQ-01	Tragbarkeit	Der Aufbau des Subsystem Fitness Wearable soll komfortabel am Körper tragbar sein, bezogen auf Gewicht, Größe und Lärm.	Minimalistischer Elektronikaufbau, extra Stoffschichten, leise Komponenten	Das Fitness Wearable ist komfortabel zu tragen.
REQ-02	Sicherheit	Der Träger des Fitness Wearables muss geschützt sein vor Hitze- und Elektrizitätseinwirkung durch die im Fitness Wearable verbauten Komponenten.	Stoffschicht zwischen Körper des Trägers und gesamter Elektronik	Der Träger ist vor Hitze- und Elektrizitätseinwirkung geschützt.
REQ-03	Kommunikation	Die Mikrocontroller der beiden Subsysteme sollen über ein Netzwerk mittels des MQTT Standards kommunizieren können.	Funkverbindung: WLAN Netzwerk Programmierung; umopt-simple Bibliothek	Beide Subsysteme verfügen über WLAN und können kommunizieren.
REQ-04	Berührungserfassung	Der Mikrocontroller des Subsystem Puppe soll über die daran angeschlossenen Sensorflächen Berührungen erfassen können.	Messen des eingesetzten leitfähigen Garns	Berührungen können vom Mikrocontroller erfasst werden.
REQ-05	Aktuator Feedback am Teilnehmer	Die Aktuatoren des Subsystem Fitness Wearable sollen haptisches Feedback an den Körper des Teilnehmers übertragen können.	Anbringen von Aktuatoren die mech. Kräfte übertragen im Fitness Wearable	Mech. Kräfte können an den Körper des Teilnehmers übertragen werden.
REQ-06	Signalverarbeitung	Es soll ausgewertet werden können, ob die empfangenen Signale der Sensorik, ausgelöst durch mechanische Berührung des Trainers, sich um valide und beabsichtigte Eingaben handelt.	Programmierung; Schwellenwerte und Entprellen der Sensorflächen	Die Eingaben durch den Trainer werden gefiltert
REQ-07	Schnittstelle	Die zu programmierende Schnittstelle soll in der Lage sein, passend zu den Eingabesignalen an den Berührungssensoren, die gewünschten Aktuatoren auszulösen.	Jede Sensorfläche ist über definierte Nachrichten einem Aktuator zugeteilt	Es löst immer der passende Aktuator zum Sensorfeld aus
REQ-08	Feedbackkontrolle	Es soll eine Möglichkeit für den Trainer geben, zu erkennen ob das haptische Feedback durch die Aktuatoren am getragenen Subsystem Fitness Wearable an der gewollten Körperstelle beim Teilnehmer auch spürbar ausgelöst wurde.	Statusleuchte	Der Trainer kann anhand der Statusleuchte sehen ob ein Sensorfeld erfolgreich ausgelöst wurde
REQ-09	Sensoren/Sensorflächen	Das Subsystem Puppe muss Sensorflächen beinhalten die durch mechanische Berührungen durch den Trainer elektrische Signale sendet. Diese Flächen sollen auf einem Bereich des Körpers verteilt sein und dort in sinnvolle Bereiche unterteilt werden.	Elektrisch leitendes Garn und Designoptionen: Aktuatorpositionen mit anschließender Bewertung	Es sind Sensorflächen am Rücken der Puppe angebracht (Schulter rechts/links, unterer/oberer Rücken)
REQ-10	Aktuatoren	Das Subsystem Fitness Wearable soll jeweils einen Aktuator beinhalten die spürbar über Druck, Vibrationen Feedback oder den im Lautsprecher erzeugten Hrb haptisches Feedback an den Körper des Trägers übertragen können.	Vibrationsmotor; Magnetspinner, Lautsprecher; pneu. Aktuator (Luftkissen)	Alle Arten von Aktuatoren können am Körper des Trägers spürbar Feedback übertragen
REQ-11	Energieversorgung	Das Subsystem Fitness Wearable soll über eine Batterie mit elektrischer Energie versorgt werden.	im Fitness Wearable eingesetzt	Elek. Energie über Powerbank
REQ-12	Energieversorgung	Das Subsystem Puppe soll über ein Netzteil mit elektrischer Energie versorgt werden.	Powerbank	Elek. Energie über Powerbank
REQ-13	Ton-Feedback	Das haptische Ton-Feedback soll auf einer Fläche von 15 cm <sup>2</sup> auf der Haut spürbar sein.	Miniaturlautsprecher aktivieren	Kann spürbar (s. Selbstversuch)
REQ-14	Druck-Feedback	Der zusätzliche Pneumatik Aktuator soll auf einer Fläche von 15 cm <sup>2</sup> Druck auf der Haut spürbar ausüben.	Luftkissen 10x6cm (HxB) aufpumpen	Spürbar auf der Haut (s. Selbstversuch)
REQ-15	Vibrations-Feedback	Der Vibrations Aktuator soll haptisches Feedback einer Fläche von 15 cm <sup>2</sup> auf der Haut spürbar sein.	Vibrationen aktivieren	Spürbar auf der Haut (s. Selbstversuch)
REQ-16	Berührungsempfindlichkeit	Die Sensoren sollen das Auflegen des Fingers auf eine Sensorfläche von mindestens 25 mm <sup>2</sup> registrieren.	Garn auf Deckstoff als Kreuz eingearbeitet	Auflegen auf Sensorfläche wird erkannt
REQ-17	Energieversorgung	Anstelle eines Netzteils soll eine Batterie zur elektrischen Energieversorgung in die Puppe integriert werden, um die Handhabbarkeit komfortabler zu machen	Powerbank	Bauraum nicht ausreichend für die Integrierung der Powerbank
REQ-18	Aktuatoraktivierung	Der gewünschte Aktuator soll nur während der Berührungsdauer der zugehörigen Sensorfläche auslösen.	Flankenerkennung, Nachricht für Sensorfeld berührt/unberührt	Aktuatoren werden bei Berührung der Sensorfläche aktiviert und bei loslassen deaktiviert
REQ-19	Gewicht	Der Aufbau des Subsystem Fitness Wearable soll weniger als 500 g wiegen	Leichte Komponenten verwendet	Aufbau wiegt ca. 225 g
REQ-20	Abmaße	Der Aufbau der Hauptelektronik im Subsystem Fitness Wearable soll kleiner als 10x20x3 cm (HxBxT) sein	Kleine Komponenten verwendet	Nötiger Bauraum sind 9x8 cm (HxB)
REQ-21	Geräuschemissionen	Die Geräuschemissionen des Subsystem Fitness Wearable sollen unter 60 dB betragen	Leise Komponenten verwendet	Lautes Bauteil: Luftpumpe mit 55dB

Tabelle 5.1: Evaluierte funktionale Anforderungen an das Gesamtsystem

## 6 Erkenntnisse

Diese Bachelorarbeit beschreibt die Entwicklung eines Systems, zur Erweiterung der Kommunikationsmöglichkeiten über das physische Empfinden am Körper, zwischen räumlich getrennten Personen. Dieses System, kann Berührungen auf einer Puppe als Signale erfassen und diese in Form einer Nachricht, über eine Netzwerkverbindung an den Träger eines Wearables weitergeben. Dort wird die Nachricht durch Aktuatoren gezielt in haptische Signale an verschiedene Körperbereiche übersetzt.

Grundsätzlich ist festzustellen, dass die der Zielsetzung entsprechend gestellten funktionalen Anforderungen und Randbedingungen größtenteils erfüllt werden konnten. Es ist möglich mit den heutigen Technologien, wie anhand des Prototypen demonstriert werden konnte, ein Wearable im Fitnessbereich herzustellen, dass gezielte Signale, ausgelöst durch Berührung einer Puppe, an den Körper des Trägers überträgt.

Eine Schwierigkeit stellte zunächst das Verbinden und herstellen, der aus elektrisch leitenden Garn bestehenden, berührungsempfindlichen Sensorflächen dar. Problematisch hat sich zunächst das Einnähen der Sensorflächen in den Deckstoff des Subsystems Puppe dargestellt. Die isolierten Sensorflächen wurden einzeln, mit dem zur Steuerung benötigten Mikrocontroller verkabelt. Da die Sensorflächen aus dünnen Fäden bestehen, die als Garn zusammenlaufen, sind immer wieder unerwünschte und zum größten Teil unsichtbare Verbindungen zwischen den empfindlichen Sensorflächen entstanden. Weiter hat sich das Einstellen der Verbindung zum WLAN und zum MQTT Broker als schwierig herausgestellt, wenn automatisierte Abläufe in den Mikrocontroller einprogrammiert sind, die keine Möglichkeit zum Abbrechen von Neustarts oder Wiederverbindungen zulassen.

Im Test der Aktuatoren, war der elektrische Vibrationsmotor am intensivsten spürbar, das pneumatische Luftkissen ließ sich ebenfalls gut wahrnehmen. Wobei der Einsatz von mehreren pneumatischen Aktuatoren mit größerem Weiterentwicklungsaufwand verbunden ist und wie in Abschnitt 5.2 ergründet, die Nachteile der Latenz und dem Empfindungsschwinden auch dagegen sprechen. Das Empfindungsschwinden kann darauf zurückgeführt werden, dass die meisten Mechanosensoren in der Haut auf frequentierte Signale

reagieren. Für den Einsatz weitere pneumatischer Aktuatoren wäre es nötig, neben den zusätzlichen Magnetventilen für jedes Luftkissen und der Anpassung der Steuerelektronik, auch pneumatische Leitungen zu jedem dieser Luftkissen im Wearable zu integrieren. Im Gegensatz dazu, ist die Skalierung von vibrations Aktuatoren einfach. Dazu sind lediglich elektrische Leitungen nötig, sowie eine Anpassung der Steuerelektronik am Mikrocontroller. Der Lautsprecher und Magnetbuzzer sind kaum spürbar und eignen sich somit am geringsten zum Übertragen von haptischen Signalen im Vergleich zu den anderen erprobten Aktuatoren. Die Benutzbarkeit des Prototypen ist gut aufgrund der kaum wahrnehmbaren Latenz zwischen der Berührung der Sensorfläche und dem Auslösen der Aktuatoren.

Eine weitere Erkenntnis ist, dass das in diesem Rahmen entwickelte Fitness T-Shirt lediglich für Übungen oder Betätigungen im Sitzen oder Stehen geeignet ist, da der integrierte Aufbau, beispielsweise beim drauflegen, für den Träger unangenehm wird. Um dies zu verhindern wäre eine veränderte Positionierung der Aktuatoren oder eine Verkleinerung aller Komponenten notwendig.

## 7 Ausblick

Grundsätzlich ist die Verwendung des entwickelten Systems „Remote Yoga T-Shirt“ immer dann sinnvoll, sobald räumlich getrennte Interaktionen stattfinden, die physischer Kontakt jedoch bereichern würde.

Denkbar wären auch andersartige Anwendungsbereiche, neben dem hier beleuchteten Fitnessbereich. Eingesetzt werden könnte das Wearable auch in Arbeitskleidung, zum Schutz und der Sicherheit bei Bewegungsabläufen, Gefahren bergende Umgebungen oder Situationen. Im medizinischen Bereich bei Therapiemaßnahmen oder zur Unterstützung, beispielsweise für Menschen mit Einschränkungen.

Als softwareseitige Weiterentwicklung wäre eine, dem Gesamtsystem zugehörige App denkbar. Enthalten könnten sein, Hilfestellungen zur Verbindung beider Subsysteme, eine Übersicht und Kontrolle der Sensorflächen und Aktuatoren oder ein Protokoll der Haltungskorrekturen zur nachträglichen Übersicht des Trägers. Die korrigierten Haltungen könnten so in der Zukunft schneller vermieden werden, die korrekten Ausführungen der Übungen besser verinnerlicht werden. Das in dieser Bachelorarbeit entwickelte System könnte auch mit bereit: bestehenden Gesundheits - und Fitnessapps gekoppelt werden. Haltungsdaten könnten dann je nach Aktivität über den Tag gesammelt werden und gesundheitsschädliche Körperhaltungen oder Fehlstellungen frühzeitig erkannt werden.

Weiter könnte das System, auch kombiniert mit einer Art künstlicher Intelligenz, selbstlernend oder begleitend Daten über zusätzliche Sensorik im Wearable des Träger sammeln und so unterstützend bei Sportübungen Feedback durch Aktuatoren geben ohne das bei Sportübungen ein Trainer benötigt wird. Oder auch im Alltag mithilfe der gesammelten Daten über beispielsweise der Haltung, Tipps geben und so einen Mehrwert liefern. [21]

Am Beispiel des Prototypen ist eine Erweiterung der Anzahl der Sensorflächen und Aktuatoren möglich. So können weitere Bereiche am Körper angesprochen werden, oder auch feinere Auflösungen durch Unterteilungen in spezifischere Körperabschnitte erreicht werden.

Hardwareseitig wäre eine Optimierung der Elektronik möglich. Durch eine, speziell für diese Anwendung entworfene Platine, mit ausschließlich benötigten Komponenten und vorgesehenen Ports zur modularen Verkabelung der gewünschten Aktuatoren am Wearable und auch Sensorflächen der Puppe. Weiter ist auch eine Integration von austauschbaren Batterien oder wiederaufladbaren Akkumulatoren, für beide Subsysteme, zur komfortableren Handhabung denkbar. Daraus könnte ein drastisch verringerter Platzverbrauch und eine einfachere Verkabelung der Aktuatoren resultieren.

Um differenziertere Aussagen über die Nutz - und Spürbarkeit treffen zu können, wäre ein möglicher nächster Schritt die Durchführung einer breiter angelegten Nutzerstudie. Neben der Prüfung weiterer, sinnvoller Positionen von Aktuatoren oder Formen von Wearables, wäre auch die Prüfung alternativer Aktuatorarten und deren, für den Träger angenehmen Integration in das Wearable möglich.

# Literaturverzeichnis

- [1] AVNET ABACUS: *Piezoelectric Pressure Sensor Function EN Image*. 2016. – URL [https://www.avnet.com/wps/wcm/connect/onesite/cb089d1c-116e-4d81-a703-bbf413db57c3/Piezoelectric-Pressure-Sensor-Function-EN-Image.jpg?MOD=AJPERES&CACHEID=ROOTWORKSPACE.Z18\\_NA5A1I41L0ICD0ABNDMDDG0000-cb089d1c-116e-4d81-a703-bbf413db57c3-mCrZzSl](https://www.avnet.com/wps/wcm/connect/onesite/cb089d1c-116e-4d81-a703-bbf413db57c3/Piezoelectric-Pressure-Sensor-Function-EN-Image.jpg?MOD=AJPERES&CACHEID=ROOTWORKSPACE.Z18_NA5A1I41L0ICD0ABNDMDDG0000-cb089d1c-116e-4d81-a703-bbf413db57c3-mCrZzSl). – Zugriffsdatum: 2021-06-01
- [2] BANKS, Andrew ; BRIGGS, Ed ; BORGENDALE, Ken ; GUPTA, Rahul: *MQTT Version 5.0 , OASIS Standard*. Mrz 2019. – URL <https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v5.0/os/mqtt-v5.0-os.html>. – Zugriffsdatum: 2021-05-17
- [3] BEERES, F.: *Taktilen-System*. 2017. – URL [https://www.amboss.com/de/wissen/Taktilen\\_System](https://www.amboss.com/de/wissen/Taktilen_System). – Zugriffsdatum: 2020-09-24
- [4] BENDEL, Prof. Dr. O.: *Gabler Wirtschaftslexikon - Definition Wearables*. 2017. – URL <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/wearables-54088/version-368816>. – Zugriffsdatum: 2020-09-28
- [5] BEVEN, Tristan ; HOANG, Thuong ; CARTER, Marcus ; PLODERER, Bernd: *Hand-Log: A Deformable Tangible Device for Continuous Input through Finger Flexion*. In: *Proceedings of the 28th Australian Conference on Computer-Human Interaction*. New York, NY, USA : Association for Computing Machinery, 2016 (OzCHI '16), S. 595–604. – URL <https://doi.org/10.1145/3010915.3010933>. – ISBN 9781450346184
- [6] BITKOM: *Wie viele berufliche Video-Anrufe tätigen Sie durchschnittlich pro Tag? [Graph]*. Zit. nach Statista. Mrz 2021. – URL <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1226042/umfrage/umfrage-zur-anzahl-der-beruflichen-video-anrufe-pro-tag/>. – Zugriffsdatum: 2021-04-12

- [7] BITKOM: *Wie viele Stunden pro Woche nutzen Sie private Videotelefonate bzw. -konferenzen? [Graph]*. Zit. nach Statista. Mrz 2021. – URL <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1225451/umfrage/umfrage-zur-nutzung-von-videotelefonie-vor-und-waehrend-der-corona-pandemie-in-deutschland/>. – Zugriffsdatum: 2021-04-12
- [8] CUI DEVICES: *Product Spotlight, Piezo and Magnetic Buzzer*. 2016. – URL <https://www.cuidevices.com/product-spotlight-templates/piezo-and-magnetic-buzzers/img/10.png>. – Zugriffsdatum: 2021-07-02
- [9] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: *DIN EN ISO 9241-910:2011-11, Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 910: Rahmen für die taktile und haptische Interaktion (ISO\_9241-910:2011); Deutsche Fassung EN\_ISO\_9241-910:2011*. Beuth Verlag GmbH, Nov 2011. – URL <https://doi.org/10.31030/1742310>
- [10] DUDENREDAKTION: *Definition von Remote auf Duden online*. 2018. – URL <https://www.duden.de/node/158338/revision/158374>. – Zugriffsdatum: 2020-11-09
- [11] EUROSTAT: *Anteil der Personen in Deutschland, die das Internet zum Telefonieren oder Videoanrufe nutzen, in den Jahren 2008 bis 2020 [Data set]*. Zit. nach de.statista.com. Feb 2021. – URL <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/457978/umfrage/nutzung-von-internettelefonie-oder-videotelefonie-in-deutschland/>. – Zugriffsdatum: 2021-04-12
- [12] GEORGE, Damien P. ; SOKOLOVSKY, Paul: *MicroPython documentation*. Apr 2021. – URL <https://docs.micropython.org/en/latest/index.html>
- [13] GUTTENBERGER, Manuel ; WALDHÖR, Klemens: xHealth: Eine MQTT und REST basierte Architektur zum Zugriff auf Sensordaten smarterer Objekte. In: *Informatik 2016* (2016)
- [14] HAFEZ, Moustapha: Tactile interfaces: technologies, applications and challenges. In: *The Visual Computer* 23 (2007), Nr. 4, S. 267–272. – URL <https://doi.org/10.1007/s00371-007-0102-2>. ISBN 1432-2315

- [15] HENEY, Paul: *What is miniature pneumatics?* 2012. – URL <https://www.pneumatictips.com/what-is-miniature-pneumatics/>. – Zugriffsdatum: 2020-09-20
- [16] HIFI-KLUBBEN: *Der Lautsprecher, so funktioniert er.* – URL <https://www.hifiklubben.de/inspiration/stereohifi/der-lautsprecher-so-funktioniert-er>. – Zugriffsdatum: 2021-07-02
- [17] HÜNING, Felix: *Sensoren und Sensorschnittstellen.* De Gruyter, Januar 2016. – URL <https://doi.org/10.1515/9783110438550>
- [18] INSTRUMENTS, Texas: *ULN2003A, Simplified Blockdiagram.* – URL [https://www.ti.com/ods/images/SLRS027P/ld\\_lrs027.gif](https://www.ti.com/ods/images/SLRS027P/ld_lrs027.gif). – Zugriffsdatum: 2021-04-28
- [19] ISHII, Hiroshi ; LAKATOS, Dávid ; BONANNI, Leonardo ; LABRUNE, Jean-Baptiste: Radical Atoms: Beyond Tangible Bits, toward Transformable Materials. In: *Interactions* 19 (2012), Januar, Nr. 1, S. 38?51. – URL <https://doi.org/10.1145/2065327.2065337>. – ISSN 1072-5520
- [20] ISHII, Hiroshi ; ULLMER, Brygg: Tangible Bits: Towards Seamless Interfaces between People, Bits and Atoms. In: *Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems.* New York, NY, USA : Association for Computing Machinery, 1997 (CHI '97), S. 234?241. – URL <https://doi.org/10.1145/258549.258715>. – ISBN 0897918029
- [21] JAN SCHWARZER, Kai von L.: *MoGaSens (Mobiles Ganzkörper-Sensorsystems).* Februar. – URL <https://csti.haw-hamburg.de/project/mogasens/>. – Zugriffsdatum: 2021-05-28
- [22] JARUSRIBOONCHAI, Pradthana ; HÄKKILÄ, Jonna: Customisable Wearables: Exploring the Design Space of Wearable Technology. In: *Proceedings of the 18th International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia.* New York, NY, USA : Association for Computing Machinery, 2019 (MUM '19), S. 1–9. – URL <https://doi.org/10.1145/3365610.3365635>. – ISBN 9781450376242
- [23] KG, Festo SE & C.: *Festo-Wiki, Pneumatikzylinder.* 2013. – URL <https://www.festo.com/wiki/de/Pneumatikzylinder>. – Zugriffsdatum: 2020-09-30
- [24] KICKSTARTER: *Micro Python: Python for microcontrollers.* Februar 2016. – URL <https://www.kickstarter.com/projects/214379695/micro->

- [python-python-for-microcontrollers?lang=de](#). – Zugriffsdatum: 2021-04-11
- [25] LAPP, Alwin: *Micro Pneumatic for Wearables*. Oktober 2020. – URL <https://csti.haw-hamburg.de/project/micropneumatic-for-wearables/>. – Zugriffsdatum: 2021-04-12
- [26] LIGHT, Roger A.: Mosquitto: server and client implementation of the MQTT protocol. In: *The Journal of Open Source Software* 2 (2017), may, Nr. 13, S. 265. – URL <https://doi.org/10.21105/joss.00265>
- [27] LOPES, Pedro ; YOU, Sijing ; ION, Alexandra ; BAUDISCH, Patrick: *Adding Force Feedback to Mixed Reality Experiences and Games Using Electrical Muscle Stimulation*. S. 1–13. In: *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA : Association for Computing Machinery, 2018. – URL <https://doi.org/10.1145/3173574.3174020>. – ISBN 9781450356206
- [28] NABIL, Sara ; JONES, Lee ; GIROUARD, Audrey: Soft Speakers: Digital Embroidering of DIY Customizable Fabric Actuators. In: *Proceedings of the Fifteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, ACM, Februar 2021. – URL <https://doi.org/10.1145/3430524.3440630>
- [29] OMG: *OMG Systems Modeling Language (OMG SysML), Version 1.6*. Nov 2019. – URL <https://www.omg.org/spec/SysML/1.6/PDF>. – Zugriffsdatum: 2021-07-02
- [30] PRATAP, Robin: *Virabhadrasana 2 (Der Krieger 2)*. Nov 2019. – URL <https://www.asanayoga.de/virabhadrasana-2-krieger-2/>. – Zugriffsdatum: 2021-04-23
- [31] PRECISION MICRODRIVES: *Pico Haptic Shaftless Vibration Motor, Exploded View*. Mai 2016. – URL <https://www.precisionmicrodrives.com/wp-content/uploads/2018/05/coin-shaftless-vibration-motor-exploded-view.original.jpg>. – Zugriffsdatum: 2021-07-02
- [32] SHAER, Orit ; HORNECKER, Eva: Tangible User Interfaces: Past, Present, and Future Directions. In: *Foundations and Trends® in Human-Computer Interaction* 3 (2010), Nr. 1–2, S. 4–137. – URL <http://dx.doi.org/10.1561/1100000026>. – ISSN 1551-3955

- [33] SHELBY, Zach ; HARTKE, Klaus ; BORMANN, Carsten: *The Constrained Application Protocol (CoAP)*. RFC 7252. Juni 2014. – URL <https://rfc-editor.org/rfc/rfc7252.txt>
- [34] TEH, James Keng S. ; CHEOK, Adrian D. ; CHOI, Yongsoon ; FERNANDO, Charith L. ; PEIRIS, Roshan L. ; FERNANDO, Owen Noel N.: Huggy Pajama: A Parent and Child Hugging Communication System. In: *Proceedings of the 8th International Conference on Interaction Design and Children*. New York, NY, USA : Association for Computing Machinery, 2009 (IDC '09), S. 290–291. – URL <https://doi.org/10.1145/1551788.1551861>. – ISBN 9781605583952
- [35] WESUGI, S. ; MIWA, Y.: "Lazy Susan"communication system for remote, spatial and physical collaborative works. In: *First IEEE International Workshop on Horizontal Interactive Human-Computer Systems (TABLETOP '06)*, URL <https://doi.org/10.1109/TABLETOP.2006.1>, Jan 2006, S. 8 pp.–

# A Anhang

## A.1 Schaltpläne

Alle Schaltpläne sind in voller Größe als PDF zusätzlich im digitalen Anhang der Bachelorarbeit zu finden.

### A.1.1 Elektrischer Schaltplan Subsystem Puppe

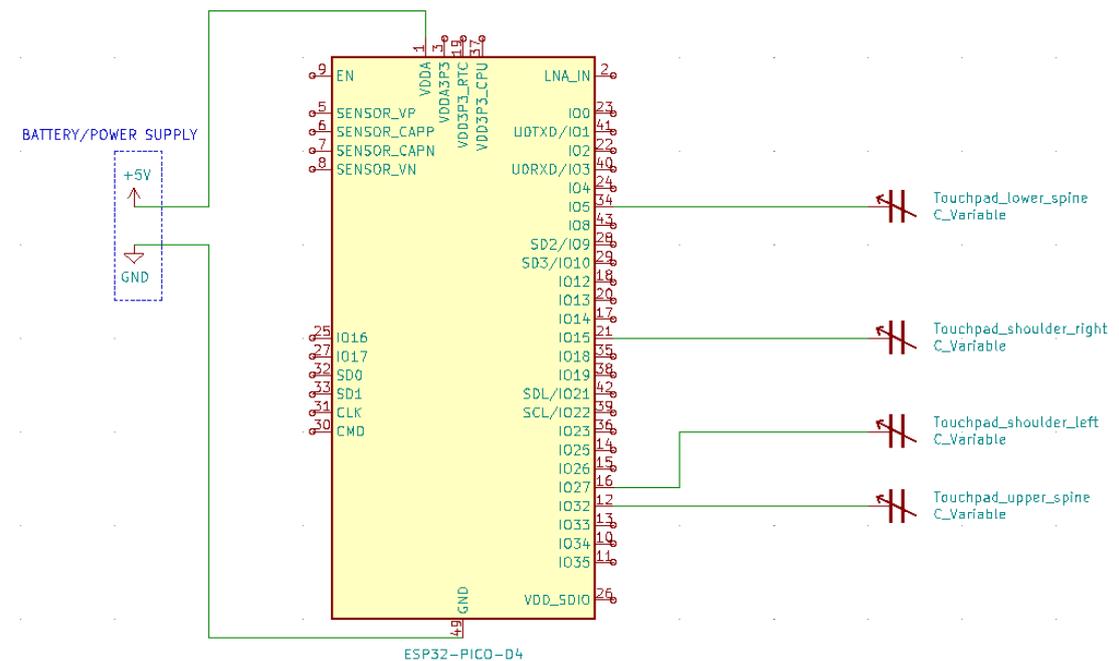


Abbildung A.1: Elektrischer Schaltplan des Subsystem Puppe

### A.1.2 Elektrischer Schaltplan Subsystem Fitness Wearable

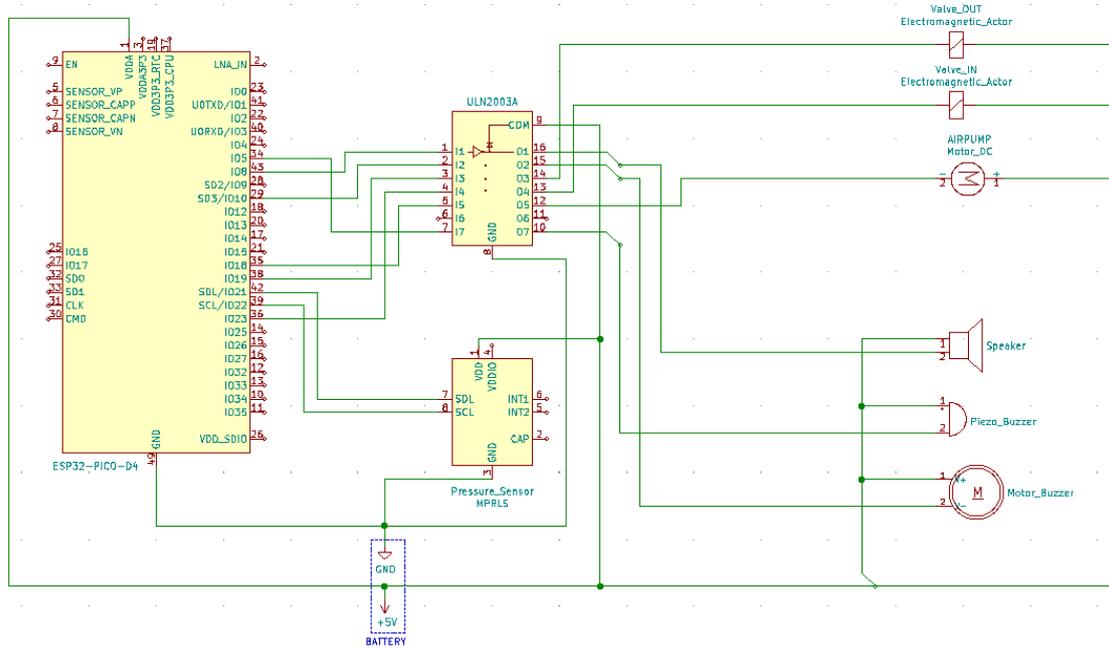


Abbildung A.2: Elektrischer Schaltplan des Subsystem Fitness Wearable

### A.1.3 Pneumatischer Schaltplan Subsystem Fitness Wearable

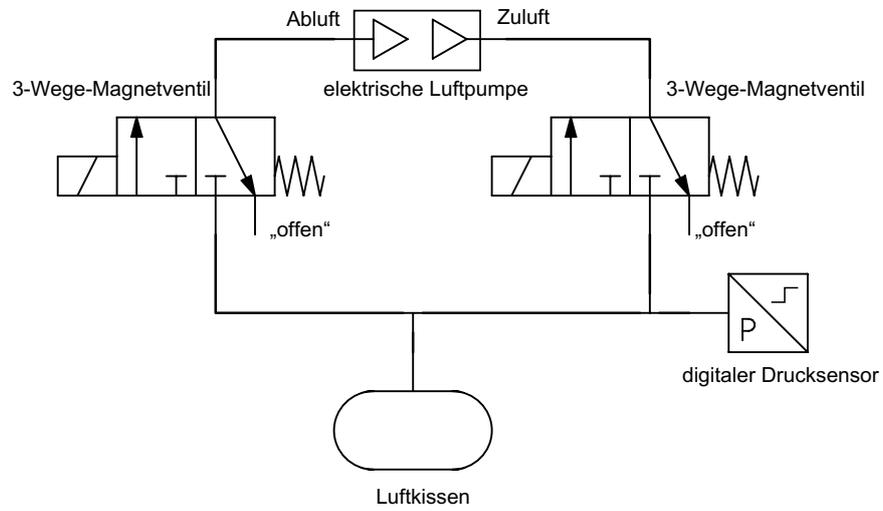


Abbildung A.3: Pneumatischer Schaltplan des Subsystem Fitness Wearable

## Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „— bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] — ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

*Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI*

## Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

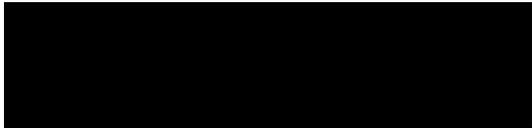
Name: \_\_\_\_\_

Vorname: \_\_\_\_\_

dass ich die vorliegende Bachelorarbeit – bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

### **Tangible Interface für Remote Feedback in Wearable Fitness Systems**

ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

\_\_\_\_\_  \_\_\_\_\_  
Ort Datum Unterschrift im Original