



ulm university universität
uulm

Universität Ulm | 89069 Ulm | Germany

**Fakultät für
Ingenieurwissenschaften
und Informatik**
Institut für Medieninformatik

A Wearable Tactile Input and Output Device for Non-Vision Based Interaction with Smartphones

Bachelorarbeit an der Universität Ulm

Vorgelegt von:

Christopher Getschmann
christopher.getschmann@uni-ulm.de

Gutachter:

Prof. Dr. Enrico Rukzio

Betreuer:

Julian Seifert

2014

„A Wearable Tactile Input and Output Device for Non-Vision Based Interaction with Smartphones“
Fassung vom 21. April 2014

Im Text wird aus Gründen der besseren Lesbarkeit auf die Doppelnennung bei Personenbezeichnungen und geschlechtsspezifischen Pronomina verzichtet. Stattdessen findet das generische Femininum Verwendung, hierbei wird sich explizit auf Menschen beiderlei Geschlechts bezogen.

© 2014 Christopher Getschmann

Dieses Werk ist unter der Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 Germany License lizenziert:
<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/de/>

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen und verwandte Arbeiten	3
2.1	Vibrotaktile Displays	3
2.2	Braille-Displays	5
2.3	Braille	6
3	Konzept	9
3.1	Entwurf	10
3.2	Nutzungsszenario	12
4	Umsetzung	15
4.1	Software	16
4.1.1	App	16
4.1.2	Firmware	16
4.2	Hardware	18
4.2.1	Elektronik	18
4.2.2	Tragbare Unterlage	21
5	Evaluierung	25
5.1	Methodik	25
5.2	Probanden	26
5.3	Ergebnisse	26
6	Fazit	29
	Literaturverzeichnis	33

1 Einleitung

Die menschliche Haut besitzt die gleiche Anzahl an Nervenzellen wie die Netzhaut des Auges, findet aber für die Informationsübertragung im Mensch-Maschine-Kontext noch keine breite Verwendung. In Situationen, in denen die anderen Sinne abgelenkt sind, oder für Menschen deren visuelle Wahrnehmung dauerhaft eingeschränkt ist, könnte die Haut als zusätzlicher Informationskanal einen Gewinn bieten. Gleichzeitig sind sehbehinderte und blinde Menschen auf eine Reihe von Hilfsmitteln wie Braille-Zeilen angewiesen, die außerhalb des eigenen Heims kaum verwendbar sind. Die Nutzung von mobilen Computern ist für sie extrem erschwert. Ein effizientes und alltagstaugliches taktiles Display könnte aber die Unabhängigkeit und Sicherheit blinder Menschen im Alltag verbessern.

Diese Arbeit untersucht die Verwendbarkeit von tragbaren taktilen Displays zur Informationsübermittlung mittels Braille, der Tastschrift für Blinde und Sehbehinderte. Diesen Benutzerinnen soll auf diesem Wege ein weiterer Zugang zu ihrem Smartphone geboten werden um die mobile Interaktion zu vereinfachen. Hauptbestandteil hierbei ist die Entwicklung eines Hardware-Prototypen in Form eines Kleidungsstücks, beginnend beim zugrundeliegenden Konzept, über die Implementierung bis hin zu einer Evaluation. Auf den Problemen die sich bei der Umsetzung ergeben liegt besonderes Augenmerk. Ergebnis ist ein mit dem Smartphone verbundenes Kleidungsstück, das Braille-Zeichen mittels Vibrationen auf der Haut des Unterarms darstellen kann und gestenbasierte Interaktion mit dem Smartphone ermöglicht. Um den verfolgten Ansatz zu testen und Meinungen potentieller Anwender einzuholen, wurden sowohl blinde als auch sehende Personen nach einem Test des Prototypen befragt und dabei Effizienz und Erkennungsrate des Prototypen gemessen. Das Ende bildet ein Ausblick auf weitere Arbeit, sowie ein Fazit.

2 Grundlagen und verwandte Arbeiten

Verwandte Forschungsprojekte lassen sich grob in zwei Kategorien einteilen:

- Vibrotaktile Displays: Geräte, meist in Textilien integriert, die für eine Vielzahl von Anwendungszwecken Informationen per Vibrationen auf die Hautoberfläche vermitteln.
- Braille-Displays, die Blinden und Sehbehinderten eine Möglichkeit geben, unkomplizierter auf Blindenschrift zuzugreifen, als es die herkömmliche Braille-Zeile erlaubt.

2.1 Vibrotaktile Displays

Die meisten vibrotaktile Displays zielen entweder auf eine Erweiterung der Informationsaufnahme des Benutzers – ähnlich einem weiteren Sinn – ab, oder gar auf eine Simulation natürlicher Berührungstimuli. Bei der Simulation ist üblicherweise das Ziel den Eindruck einer virtuellen Realität aufzubauen.

Projekte, deren Ziel vornehmlich Virtual Reality Feedbacksysteme sind, versprechen allerdings keine Anwendbarkeit auf das Thema, da hier über den Berührungseiz hinaus keine Informationen strukturiert übermittelt werden. Dies wurde deswegen nicht weiter verfolgt.

Der Lorm glove [2] setzt Lorm, das Tastalphabet taubblinder Menschen, welches auf Berührung bestimmter Punkte der Handinnenseite basiert, auf einen Handschuh um. Per Smartphoneanbindung soll so Taubblinden die Kommunikation über das Internet hinweg ermöglicht werden.

In die Oberseite des Handschuhs sind Vibrationsmotoren eingenäht, die empfangene Lorm-Zeichen in Stimuli umwandeln [vgl. Abb. 2.1(a)]. Die Handinnenfläche ist mit kapazitiven Berührungssensoren bestückt und ermöglicht dem Handschuh Lorm-Zeichen zu erkennen und zu Versenden.

2 Grundlagen und verwandte Arbeiten

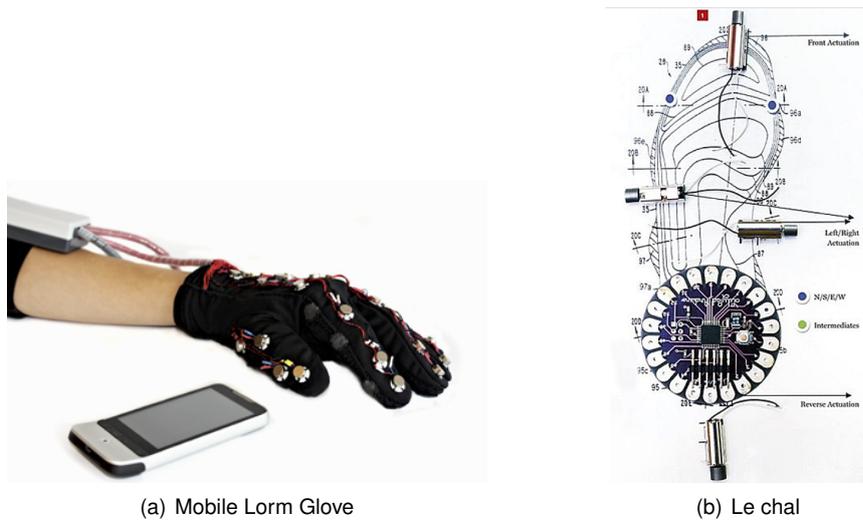


Abbildung 2.1: Projekte

Die gewonnenen Erkenntnisse im Zusammenhang mit der Verwendung von Vibrationsmotoren auf Textilien und damit verbundene Benutzerinteraktion versprechen eine hohe Anwendbarkeit auf den Problembereich taktiler Displays zur Darstellung von Braille.

Le chal [8] ist ein Turnschuh mit eingenähtem Ultraschallabstandsmesser [vgl. Abb. 2.1(b)]. Er vermittelt über Vibrationsmotoren Entfernungsinformationen zu Hindernissen oder gibt die Richtung für eine im Smartphone einprogrammierte Route an. Die Besonderheit hierbei ist, dass die Vibrationsmotoren sich im Schuh befinden und damit sogar der sensorisch unempfindliche Fußbereich stimuliert werden kann.

ActiveBelt [9] ist ein Gürtel, der dem Träger durch Vibration im entsprechenden Gürtelsegment [vgl. Abb. 2.2(a)] die Richtung nach Norden weist. Bemerkenswert hierbei ist, dass die Träger nach mehreren Tagen Tragezeit einen Gewöhnungseffekt beschreiben. Der Vibrationsstimulus sei bei ihnen ganz natürlich in ihren Alltag übergegangen und ergänze die üblichen Sinne.

TactaBox [6] zielt darauf ab ein taktiler Orientierungssystem zu bieten. Die Aktuatoren in TactaBox werden an die Oberarme angelegt [vgl. Abb. 2.2(b)] und übermitteln dem Träger Richtungsbefehle zur Navigation.

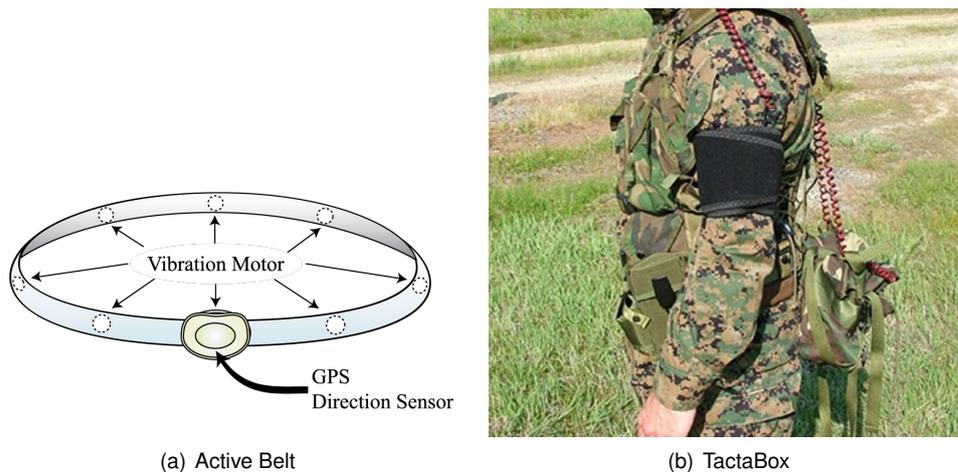


Abbildung 2.2: Projekte

Die gewonnene Erkenntnis aus diesen Projekten ist, dass nicht-Braille-codiertes taktiler Feedback zur Navigation sich auf einfache Weise in das entwickelte Braille-Display einbinden ließe. Beispielsweise durch stärkere/schwächere Vibrationsstimuli bei Schwenk in Richtung eines Wegpunkts.

Jones et al. [3] beschreiben in "Tactile display and vibrotactile pattern recognition on the torso" ihr Projekt, das generisch Vibrationsmuster auf der Hautoberfläche testete. Relevant hierbei ist, dass Jones et al. zu Anfangs auch eine Positionierung auf dem Unterarm testeten, dies aber aufgaben und sich wegen besserer Erkenntbarkeit für den Rücken entschieden haben.

2.2 Braille-Displays

Koo et al. [4] beschäftigten sich mit Braille-Displays auf Basis von sog. soft actuators, elektroaktiven Polymeren, die sich bei angelegter Spannung verformen. Die vorgestellte Beispielanwendung ist ein Fingerkuppenüberzug aus biegsamen Plastik in den eine 4×4 Matrix von Polymer-Punkten eingebracht wurde. Bei Ansteuerung mit niedriger Spannung wölben diese sich nach außen und erzeugen damit einen Berührungszreiz in der Fingerkuppe [vgl. Abb. 2.3]. Die elektroaktiven Polymere versprechen, verglichen mit Vibrationsmotoren,

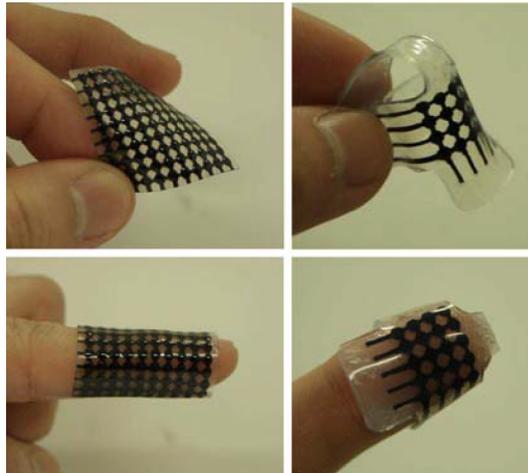


Abbildung 2.3: Soft Actuator

eine robustere und einfachere Integration von stimulierzeugenden Bauteilen in Textilien, sind aber leider aufgrund mangelnder Praxisreife und Verfügbarkeit nicht verwendbar.

Allgemein beschäftigen sich nur sehr wenige Projekte mit der Darstellung von Braille-Zeichen auf nicht-pin-basierten Displays. Ein möglicher Erklärungsansatz dafür liegt in mangelhafter Lesegeschwindigkeit den diese Ansätze versprechen, verglichen mit klassischen Braille-Zeilen.

2.3 Braille

Einleitend, zur Darlegung der Grundlagen, sei hier Braille und seine Unterarten im Folgenden erläutert.

Braille, die Tastschrift für Blinde und Sehbehinderte, tritt in verschiedenen Formen mit unterschiedlichen Alphabeten auf. Jedes Zeichen besteht aus sechs Punkten, angeordnet in einer 2×3 Matrix [vgl. Abb. 2.4]. Insgesamt sind so $2^6 = 64$ verschiedene Zeichen darstellbar.

Bei der Basisschrift genannten Standard-Variante von Braille wird jedem einzelnen Buchstaben des Alphabets, sowie ausgewählten Sonderzeichen, ein Zeichen des Braille Alphabets

zugeordnet. Ziffern werden durch zwei Zeichen ausgedrückt: einem Modifikations-Symbol und einem Buchstaben, der durch das vorangestellte Symbol anders interpretiert wird.

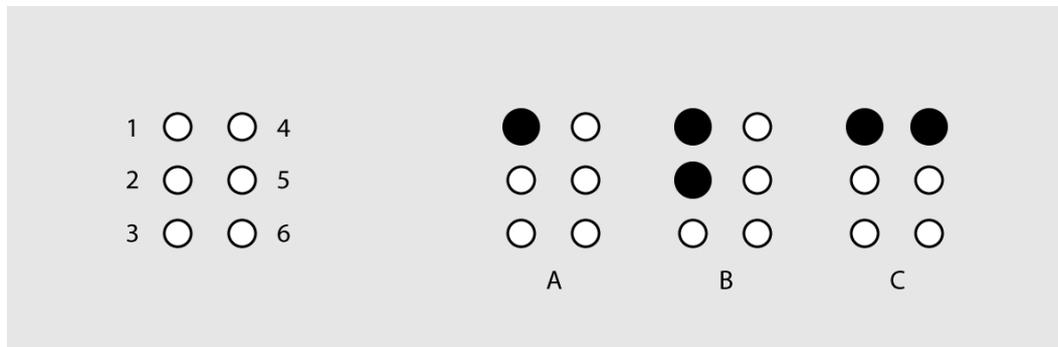


Abbildung 2.4: Nummerierung und Anordnung der Braille Punkte

Um die Lesegeschwindigkeit zu erhöhen existieren Erweiterungen zur Basisschrift, unter anderem die Braille-Vollschrift. Dabei wird der unbelegte Teil der Menge der Braille-Zeichen Lauten und häufig verwendeten Buchstabenkombinationen zugeordnet. Im Deutschen sind dies beispielsweise "sch" oder "ei". Der dadurch erreichte Komprimierungsfaktor liegt bei etwa 5%.

Darüber hinaus existiert die Kurzschrift, die einen umfangreichen Regelkatalog zur weiteren Verkürzung von Lauten und Buchstabengruppen vorsieht. Zeichen werden dabei mehrfach belegt, wobei die Interpretation vom Kontext abhängig ist. Die Anzahl der zu lesenden Zeichen kann hierbei, je nach Inhalt, um weitere 30-40% reduziert werden.

Erwähnenswert ist außerdem Computerbraille. Dies ist streng genommen keine Erweiterung der Braille-Schrift, soll hier aber der Vollständigkeit halber genannt werden. Bei Eurobraille, der europäischen Computerbraille-Implementierung wird eine 2×4 Matrix verwendet und den resultierenden $2^8 = 256$ Zeichen der Latin-1 Zeichensatz zugeordnet.

Aus Gründen der Einfachheit wurde bei der Umsetzung des Prototypen die Funktionalität auf Basisschrift beschränkt. Basisschrift ist bedeutend einfacher zu erlernen und vereinfacht die Entwicklung und Evaluation des Prototypen.

3 Konzept

Smartphones bieten reichhaltige audiovisuelle Kommunikationskanäle, aber nur einen sehr dürftigen haptischen Rückkanal. Das Gerät kann lediglich in der Hosentasche vibrieren und übermittelt dabei ein einziges Bit an Information: entweder es vibriert oder nicht. Durch Verwendung von vibrotaktilen Mustern ("Tactons") lässt sich der Informationsgehalt steigern, allerdings erreichten dabei beispielsweise Brown et al. nur 72% Erkennungsrate bei vorgegebenen Mustern und einem eingebauten Vibrationsmotor [1]. Damit eine ausreichend große Menge an Informationen übermittelt werden kann, um als Smartphone-Schnittstelle geeignet zu sein, müssten Muster und mehrere Stimulationsquellen parallel genutzt werden. Sahami et al. [7] beispielsweise verwenden sechs Motoren am Smartphone zeitgleich, erreichen damit für beliebige Muster allerdings noch schlechtere Erkennungsraten. Um dies zu umgehen sollten die Stimulationsquellen, im Gegensatz zur fehlertoleranteren Übermittlung mit einer einzigen Quelle, verlässlich direkt am Körper positioniert werden. Eine Integration in Kleidungsstücke ist ein möglicher Lösungsansatz. Darüber hinaus ließe sich das taktile Display auf diese Weise besser in den Alltag einbinden – und hätte möglicherweise eine allgemein höhere Akzeptanzrate unter potentiellen Anwendern.

Um aber ausreichend Informationen zu übermitteln müssen die Informationen kodiert werden. Stimulationsmustern müssen von der Trägerin Buchstaben, Wörter oder Begriffe zugeordnet werden können. Die Benutzerin wird aber schwer davon zu überzeugen sein zur Nutzung des Geräts einen eigenen Code zu verinnerlichen. Der große Gewinn dieser Technik liegt darum bei Sehbehinderten und Blinden:

Der visuelle Kommunikationskanal bei Smartphonennutzung ist für sie nur schwer nutzbar oder bleibt ihnen gänzlich verwehrt und in vielen Situationen ist Sprachausgabe nicht praktikabel. Auch das Erlernen eines neuen Codes um Informationen zu übertragen wird überflüssig, denn mit Braille existiert bereits ein solcher. Braille ist gut durchdacht in Bezug auf Unterscheidbarkeit der einzelnen Zeichen, weist einen hohen Verbreitungsgrad auf und lässt sich mit lediglich sechs Stimulationsquellen nutzen.

3 Konzept

Das Display sollte auch einen Rückkanal besitzen, damit – zumindest rudimentär – die Trägerin Einfluss auf die Informationsdarstellung nehmen kann. Denkbar wären hier Interaktionen wie ein Beeinflussen der Darstellung (abbrechen, wiederholen oder verlangsamen). Ein direktes Steuern des Smartphones in Verbindung mit Navigation auf dem Touchscreen, wie es Androids TalkBack¹ oder iOS VoiceOver² anbieten, ist allerdings mit dem Braille-Display nicht sinnvoll. Diese Assistenzsysteme basieren auf Sprachausgabe als Ausgabekanal. Viele Blinde nutzen Sprachausgabe mit möglichst hoher Sprechgeschwindigkeit, um den Informationsdurchsatz zu maximieren und die Latenz in der Interaktion gering zu halten. Damit das Braille-Display das Smartphone sinnvoll steuern kann, müsste der Rückkanal für die Interaktion auch über das Braille-Display laufen, beispielsweise müsste zur Auswahl einer App der App-Name beim Durchsuchen auf dem Braille-Display ausgegeben werden. Aber diese Interaktionsmöglichkeiten erfordern eine Übertragungsbandbreite, die das Braille-Display nicht bieten kann [siehe Kapitel Diskussion].

3.1 Entwurf

Ein tragbares taktiles Braille-Display, tragbar im Sinne von als Kleidungsstück tragbar, muss Anforderungen aus verschiedenen Bereichen erfüllen:

Es darf nicht fest verkabelt sein, jede Leitung würde die Bewegungsfreiheit des Trägers einschränken und Alltagskompatibilität verringern. Dementsprechend muss das Display kabellos verbunden werden und akkubetrieben sein. Da das Display direkt an ein Smartphone angebunden wird, ist die Auswahl an Kommunikationsmöglichkeiten eingeschränkt. Lediglich Bluetooth wird von einer breiten Masse an Geräten unterstützt, alternativ bietet sich Near-Field-Communication (NFC) an. Bluetooth ist allerdings simpel zu implementieren, besitzt im Gegensatz zu NFC eine ausreichende Reichweite und kommt mit einem Software-Stack, der den Transport-Layer abdeckt, sodass dort keine eigene Arbeit investiert werden muss.

¹<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.google.android.marvin.talkback>

²<https://www.apple.com/de/accessibility/ios/voiceover>

Die Elektronik muss vollständig in die Kleidung integriert sein und sollte mit vertretbarem Aufwand anlegbar sein, dabei jedoch ausreichend robust um einen alltagskompatiblen Betrieb zu gewährleisten. Während der Arbeit mit dem ersten Prototypen stellte sich die Anforderung ebenfalls als wichtig heraus, das Gerät mit nur einer Hand selbst anlegen zu können.

Das Gerät sollte zudem grundlegende Prinzipien der Flexibilität von Benutzerinterfaces erfüllen. Dazu sollten die Grundeinstellungen des Geräts konfigurierbar sein, insbesondere Vibrationsdauer und -stärke. Idealerweise sollte dies über die App im Betrieb möglich sein und nicht am Gerät selbst vorgenommen werden müssen. Außerdem sollten nebenläufige Ein- und Ausgabeoperationen möglich sein, also darf die Darstellung von Braille-Zeichen das Gerät nicht blockieren.

Die Interaktion mit dem Gerät sollte wenig Aufmerksamkeit erfordern, um in Verbindung mit dem Smartphone als dezenter Hintergrundkanal dienen. Gesten als Eingabemöglichkeit erfüllen diese Anforderung optimal. Die Trägerin bewegt Unterarm und Handgelenk in einem vorgegebenen Muster und das Gerät erkennt die Gesten.

Als Stelle bietet sich der Unterarm an. Dies würde die Verwendung von Hand und Fingerspitzen des Benutzers nicht behindern, wäre aber gleichzeitig eine exponierte Stelle des Körpers, an die einfach ein Kleidungsstück angelegt werden kann. Darüber hinaus ist der Materialverbrauch geringer als bei anderen Lösungen, wie beispielsweise einer Weste, die den Oberkörper zumindest teilweise bedecken müsste.

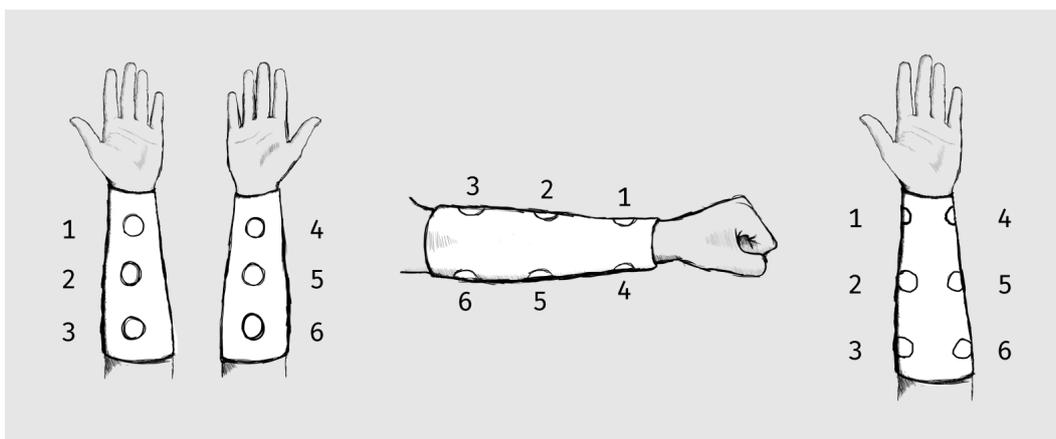


Abbildung 3.1: Unterschiedliche Verteilungsansätze für Vibrationsmotoren

3 Konzept

Die einzelnen Vibrationsmotoren sollten auf dem Unterarm mit größtmöglichen Abstand voneinander platziert werden, um die Erkennung zu vereinfachen. Erste Tests zeigten, dass getrennte, aber nah beieinanderliegende Vibrationsstimuli als Einheit wahrgenommen werden. Die Möglichkeit der Verteilung auf beide Unterarme [vgl. Abb. 3.1, erste Darstellung] wurde verworfen um Materialkosten zu sparen und Synchronisationsprobleme zu vermeiden. Bei der Positionierung der Motoren sowohl auf der Unterseite [vgl. Abb. 3.1, zweite Darstellung], als auch auf der Oberseite stand zu Befürchten, dass sich durch die Zerteilung der 2×3 Matrix Probleme mit der Braille-Repräsentation ergeben. Die Informationsdarstellung im Kleidungsstück würde sich soweit vom klassischen Braille-Modell entfernen, dass ein bewusster mentaler Aufwand beim Erkennen der Zeichen nötig sein könnte.

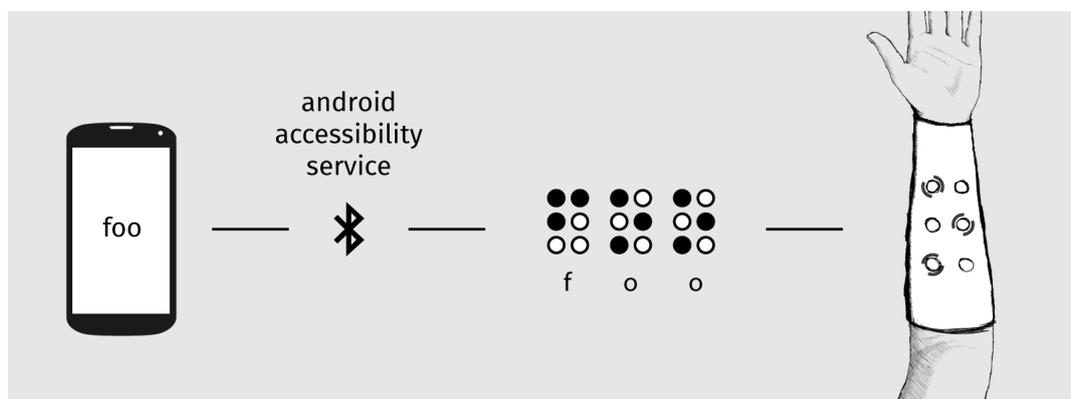


Abbildung 3.2: Konzept

3.2 Nutzungsszenario

Zur Illustration sei hier als Beispiel ein möglicher Ablauf der Interaktion mit dem Gerät beschrieben:

Kim möchte sich außerhalb ihres Hauses mit Alex treffen. Kim schaltet das Braille-Display ein und legt das Kleidungsstück einhändig an. Das Braille-Display steuert jeden Motor einmal einzeln an und signalisiert ihr damit dass es eingeschaltet ist. Sie nimmt ihr Smartphone zur Hand und bestätigt in der Smartphone-App, die daraufhin eine Verbindung mit dem Display herstellt. Das Braille-Display bestätigt durch die Anzeige von "ON".

Kim verlässt daraufhin das Haus. Nach einiger Zeit empfängt ihr Smartphone eine SMS und

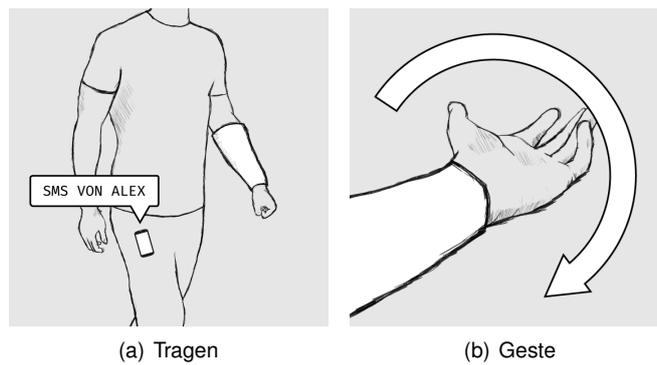


Abbildung 3.3: Beispiele

die vom android OS erzeugte Notification "SMS von Alex werde rechtzeitig da sein" wird an das Display weitergeleitet. Das Display übersetzt in Braille und zeigt die Zeichen auf dem Display an. Kim ist jedoch in diesem Falle nur am Typ der Information und dem Namen der Senderin interessiert und bricht nach "SMS von Alex" die weitere Anzeige durch dreifache Drehung des Handgelenks ab. Das Display bestätigt die Geste durch das Unterbrechungsmuster, dem einsekündigen gleichzeitigen Aktivieren aller Motoren. Am Treffpunkt angelangt möchte sie Alex das Gerät zeigen. Sie beendet die App, das Display zeigt 'OFF' an und sie schaltet es aus. Kim zieht an den Druckknöpfen und das Kleidungsstück löst sich vom Arm.

4 Umsetzung

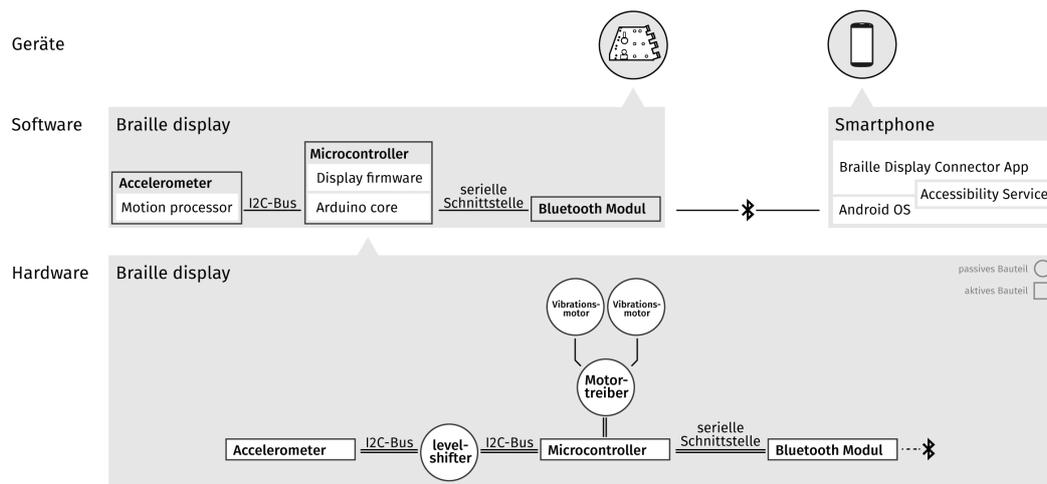


Abbildung 4.1: Architekturdiagramm

Die Smartphone-App wertet System-Events aus und überträgt formatierte Zeichenketten per Bluetooth an das verknüpfte Braille-Display. Im Braille-Display, vernäht in ein Kleidungsstück, liest ein Microcontroller über die serielle Schnittstelle die empfangenen Daten vom Bluetooth-Modul aus. Dieser wandelt ASCII-Strings in eine für das Gerät verwendbare Datenstruktur um und steuert nacheinander mittels Motortreibern die Vibrationsmotoren im Stoff. Der Gesamtaufbau ist im Architekturdiagramm dargestellt [vgl. Abb. 4.1].

Das Umsetzen des Entwurfs in einen tatsächlich verwendbaren Prototypen verteilt sich auf drei Bereiche:

- Eine App für das Smartphone muss implementiert werden, die Zugriff besitzt auf Ereignisse im Betriebssystem und per Bluetooth Steuer- und Konfigurationsbefehle an das Braille-Display senden kann.

4 Umsetzung

- Software und Hardware des Braille-Displays. Inklusive Komponentenauswahl, elektrischer Verschaltung, Verkabelung und Firmware.
- Das Nähen des Kleidungsstücks, das als textile Unterlage die Elektronik aufnehmen kann und die Vibrationsmotoren zuverlässig auf der Haut positioniert.

Im Rahmen der Arbeit wurden nacheinander zwei Prototypen entwickelt um das Design iterativ zu testen und auf Schwierigkeiten reagieren zu können.

4.1 Software

Der Software-Teil des Projektes besteht zur einen Hälfte aus der Smartphone-App, die Interaktionsevents verarbeitet, die Konfigurierung des Braille-Displays übernimmt und als Host die Bluetooth-Verbindung kontrolliert. Die andere Hälfte der Software ist die Firmware des Microcontrollers. Aufgabenbereich ist die Verarbeitung der Braille-Zeichen, Ansteuerung der Motoren und Gestenerkennung.

4.1.1 App

Die Android Smartphone-App [vgl. Abb. 4.2] registriert sich als android accessibility service im System und erhält über diese Schnittstelle Zugriff auf Systemereignisse. Notifications von eingehenden SMS werden im Hintergrund ausgelesen und, sofern das Braille Display erreichbar ist, an dieses weitergeleitet.

4.1.2 Firmware

Die Umsetzung der Anzeige der Braille-Zeichen ließ sich nicht so realisieren, wie es der ursprüngliche Entwurf vorsah. Bei ersten Tests zeigte sich, dass das parallele Vibrieren aller Motoren eines Braille-Zeichens die Erkennung deutlich erschwert. Insbesondere bei Zeichen mit vier oder fünf Punkten interferieren die Motoren miteinander. Zusätzlich verstärkt wird dieses Problem wenn die Motoren unzuverlässig auf der Haut aufliegen.

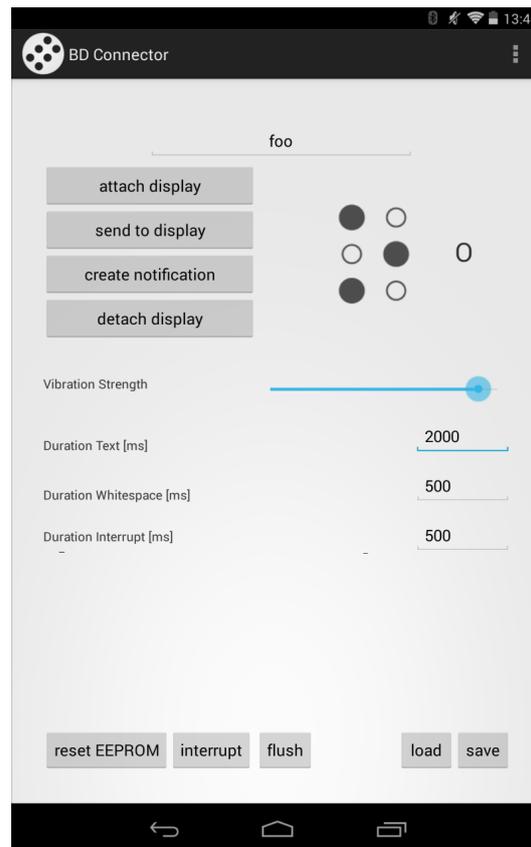


Abbildung 4.2: Braille Display Connector App

Als Lösungsansatz wurde das sequentielle Anzeigen der Punkte von Braille-Zeichen verfolgt. Die Zeichen werden zerlegt und nacheinander angezeigt, sodass zur gleichen Zeit immer nur ein Vibrationsmotor aktiviert ist.

Unterschieden werden alphanumerische Zeichen, Leerzeichen (zwischen Buchstaben, nicht Wörtern) und ein gesondertes Vibrationsmuster um besondere Ereignisse, beispielsweise den Abbruch oder die Unterbrechung der laufenden Anzeige, zu signalisieren.

Ein simples Kommunikationsprotokoll ermöglicht das Ändern der Konfigurationswerte (wie die Anzeigedauer der einzelnen Zeichen), das Senden von Steuerbefehlen und das Hinzufügen neuer Strings zur Warteschlange der anzuzeigenden Inhalte.

4 Umsetzung

Die Gestenerkennung wird umgesetzt über das verbaute Accelerometer. Es wird nach Systemstart mit einer eigenen Firmware initialisiert, die einen Großteil der Berechnungen übernimmt. Der Microcontroller wird so von der Verarbeitung der Rohdaten entlastet. Der Speicher des Accelerometers wird von der Firmware abgefragt und daraus zuvor eingespeicherte Gesten interpretiert.

4.2 Hardware

Die für das Braille Display benötigte Hardware ist aufgeteilt in elektronische Komponenten und die tragbare Unterlage als Basis für die Integration der Elektronik.

4.2.1 Elektronik

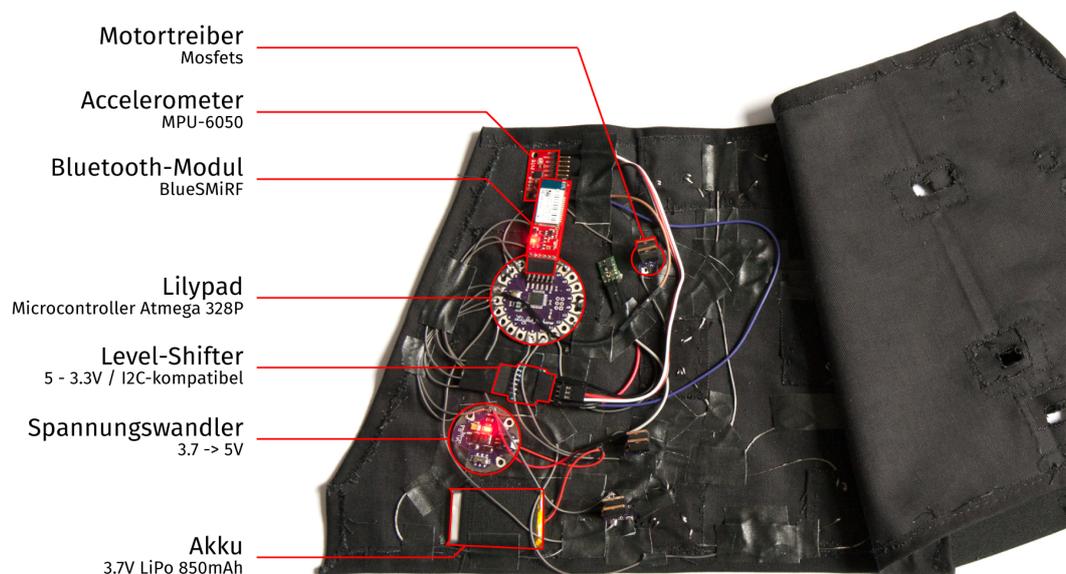
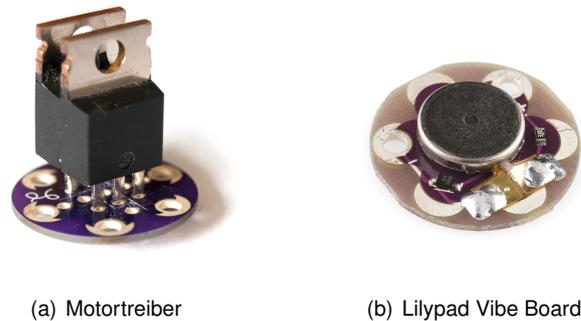


Abbildung 4.3: Prototyp v2

Hauptbestandteil des Braille Displays ist ein Atmel ATmega 328p Microcontroller auf einer Lilypad-Platine. Die Vibrationsmotoren sind Unwucht-Motoren (Precision Microdrives 310-101), aufgelötet auf eine Platine mit Nähkontakten, Lilypad Vibe Board genannt [vgl.

Abb. 4.4(b)]. Per I2C-Bus ist an den Microcontroller ein MEMS MPU-6050 Beschleunigungsmesser angebunden, um die Gestenerkennung zu ermöglichen. Das BlueSMiRF Bluetooth-Modul wird direkt auf die Lilypad-Platine aufgesteckt [vgl. Abb. 4.3] und kommuniziert über die serielle Schnittstelle. Zur Stromversorgung wird ein 3,7V Lithium-Polymer-Akku verwendet. Die 3,7V werden per Spannungswandler für Microcontroller und Motoren auf 5V und mit einem Pegelwandler für den Beschleunigungssensor auf 3,3V gewandelt.



(a) Motortreiber

(b) Lilypad Vibe Board

Abbildung 4.4: Komponenten

Um die Motoren mit voller Leistung zu betreiben werden zusätzlich Motortreiber verwendet. Ein ATmega 328 kann an einem Pin maximal 40mA Ausgangsspannung liefern, der verwendete Motor hat allerdings maximale Leistung erst bei knapp 150mA. Da die Motorlaufzeit bei Vibrationsmotoren vernachlässigt werden kann, wird ein komplexer Motortreiber mit H-Bridge nicht benötigt; ein simpler Transistor als Verstärker reicht aus. Ein High-Power NPN-Transistor erwies sich als ungeeignet, da die Anzahl und Größe der benötigten Bauteile für den Schaltkreis sich nicht integrieren ließe. Gelöst wurde das Problem durch Verwendung von N-Channel-Mosfets, die jedoch im TO-220 Gehäuse nur in einer unpraktikablen Größe zu erwerben sind. Aus Mangel an nicht-SMD Alternativen wurden die Mosfets in dieser Größe verwendet, stechen allerdings aus dem Stoff heraus.

Die Wahl für einen Großteil der Komponenten fiel auf das Hardware-Ökosystem der Arduino Lilypads. Um die Elektronik in das Kleidungsstück zu integrieren bietet sich ein Board mit Nähkontakten an, dass direkt mit leitfähigem Faden auf den Stoff aufgenäht werden kann. Aus der Familie der Arduino-kompatiblen ATmega-Boards existieren da Lilypad¹, Flora² und CheapDuino³. Um die Vibrationsmotoren direkt in ihrer Stärke zu variieren, benötigt der

¹<http://arduino.cc/de/Main/ArduinoBoardLilyPad>

²<http://www.adafruit.com/flora>

³[http://www.dfrobot.com/wiki/index.php/CheapDuino_\(SKU:DFR0236\)](http://www.dfrobot.com/wiki/index.php/CheapDuino_(SKU:DFR0236))

4 Umsetzung

Microcontroller Pulsweitenmodulations-fähige Pins. Lediglich das Standard-LilyPad stellt davon mindestens sechs – eins für jeden Vibrationsmotor – zur Verfügung.

Zum Verbinden der einzelnen Komponenten fiel die Entscheidung, wie für LilyPad-Hardware vorgesehen, zunächst auf leitfähigen Faden. Jede LilyPad-Platine verwendet statt der üblichen 0.1 Zoll Kontakte, dickere Bohrungen um die Platine direkt mit leitfähigem Faden auf dem Stoff zu vernähen. Im Laufe der Arbeit stellte sich die Wahl von LilyPad-Hardware jedoch zunehmend als Fehlentscheidung heraus.

Der im Prototyp verwendete leitfähige Faden erwies sich nach den ersten Versuchen als ungeeignet. Die elektrische Leitfähigkeit des Fadens ist nicht ausreichend um mehrere Vibrationsmotoren mit voller Leistung zu betreiben. Außerdem lässt sich der Faden aufgrund seiner schlechten mechanischen Eigenschaften nur schwer verarbeiten, er reißt unter Zug, und besitzt eine sehr raue Oberfläche.



Abbildung 4.5: zerfaserter starker Faden im Vergleich

Für die zweite Version wurde gezwirneter, leitender Faden mit geringerem Widerstand verwendet [vgl. Abb. 4.5]. Dieser Faden reibt sich jedoch auf und zerfasert zu dünnen, beinahe unsichtbaren "Härchen", die sich im Stoff festsetzen, Kurzschlüsse erzeugen und dabei verglühen. Um dies zu umgehen wurde ein Teil der Leitungen im Nachhinein durch isoliertes Kupferkabel ersetzt, das direkt auf die LilyPad-Nähkontakte gelötet wurde.

4.2.2 Tragbare Unterlage

Die tragbare Unterlage der Elektronik erfüllt sowohl den Zweck die Elektronik zu halten und zu schützen, als auch die feste Auflage der Vibrationsmotoren auf der Hautoberfläche sicherzustellen. Der verwendete Stoff ist ein Baumwoll-Polyester-Gemisch, mit möglichst

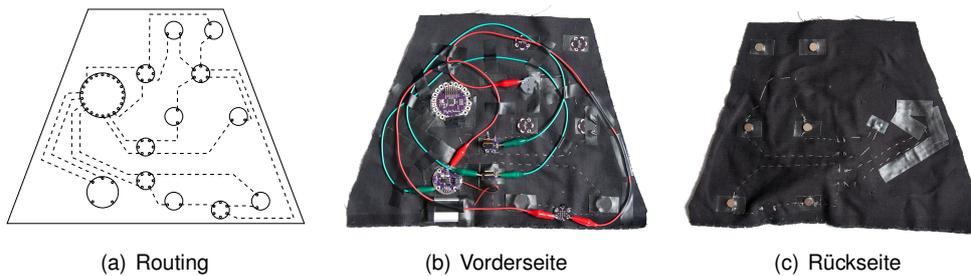


Abbildung 4.6: Prototyp v1

hoher Stoffdicke bei geringer Dehnbarkeit. Stoffe mit zu hohem Elastananteil oder reine Baumwolle würden keine stabile Unterlage für Elektronik und Leitungen bieten.

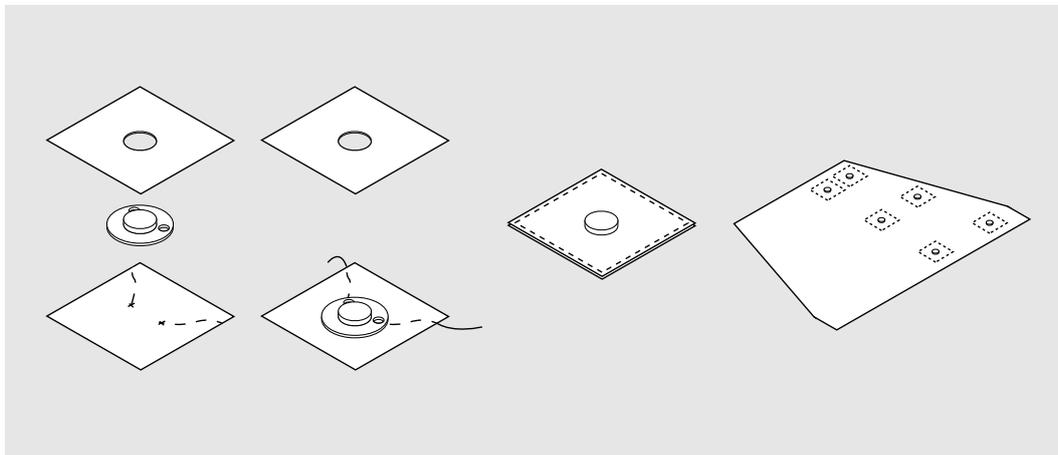


Abbildung 4.7: Patches zum Aufnähen der Motoren

Eine Besonderheit ist die Positionierung der Vibrationsmotoren. Die Motoren sind umgekehrt – mit dem Motorgehäuse zur Hautoberfläche zeigend – vernäht, um auf kleiner Oberfläche mit hohem Anpressdruck Kraft zu übertragen. Die Unwuchtmotoren vibrieren parallel zur Stoffoberfläche, nicht rechtwinklig, und geben so ihre Kraft nicht optimal an die Haut weiter. Mit der umgekehrten Vernähung lässt sich das zum Teil ausgleichen.

Die zweite und finale Version besteht aus zwei Lagen Stoff und bildet so ein sauber abgeschlossenes Gerät. Die Leitungen verlaufen lediglich zwischen den Stoffschichten, die Unterseite ist frei. Die Motoren sind nicht direkt mit der Stoffunterlage vernäht, sondern wurden auf Aufnäher aufgenäht, die wiederum umgedreht auf die Stoffunterlage genäht

4 Umsetzung

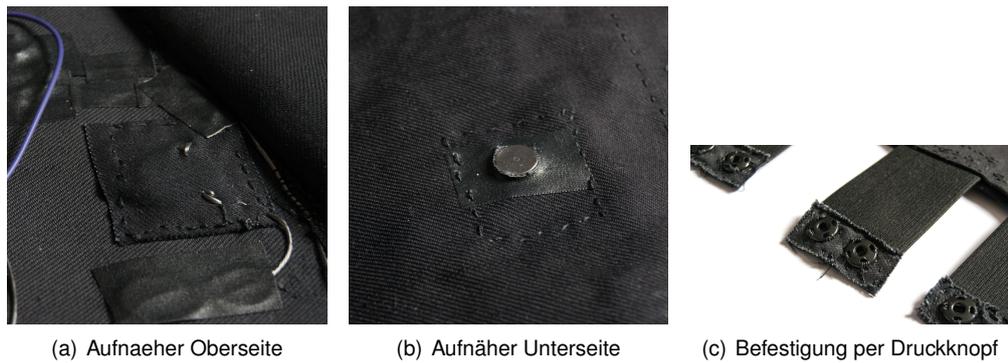


Abbildung 4.8: Aufnäher mit Vibrationsmotor

wurden, so durchbricht der leitende Faden an keiner Stelle den Stoff zwischen Elektronik und Haut. Dadurch können außerdem die Motoren einfacher vernäht werden und der Anpressdruck wird weiter erhöht [vgl. Abb. 4.7].



Abbildung 4.9: Prototyp v2

Der Verschluss wurde realisiert mit dehnbaren Streifen, die per Druckknopf befestigt werden können [vgl. Abb. 4.8(c)].

Der ursprüngliche Ansatz, die beiden Ränder mit Klettverschluss zu verbinden, wurde verworfen. Beim ersten Prototyp stellte sich heraus, dass Klettverschluss zu viel Stoffoberfläche in Anspruch nimmt, so dass die Motoren auf dem verbleibenden Rest zu nah beieinander positioniert werden müssten. Darüber hinaus lockert sich der Stoff nach wenigen Bewegungen und die Motoren verlieren den Hautkontakt. Gelöst wurde dieses Problem durch Stretchband, im Textilhandel erhältlich zum Einnähen in Ärmelsaum oder Hosenbund. Da das Material nicht dehnfähig genug ist, um direkt auf beiden Seiten fest vernäht zu werden

4.2 Hardware

(die Hand würde nicht hindurchpassen), wurde nur eine Seite angenäht und die Andere zur Befestigung mit Druckknöpfen versehen [vgl. Abb. 4.10(b)].



(a)



(b)



(c)



(d)

Abbildung 4.10: Braille-Display am Körper

5 Evaluierung

Um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten und die Akzeptanz bei potentiellen Benutzerinnen zu testen, wurde eine Benutzerstudie durchgeführt. Aufgrund der Schwierigkeit eine große Anzahl an Personen mit Braille-Kenntnissen zu befragen, musste der Kreis auf drei Personen beschränkt werden.

5.1 Methodik

Jede Sitzung unterteilt sich in drei Abschnitte. Zu Anfang wird das Gerät angelegt und die Benutzung erläutert. Jeder Vibrationsmotor wird mehrmals angesteuert um dem Probandinnen die Möglichkeit zu geben sich an den taktilen Stimulus zu gewöhnen und den einzelnen Vibrationsreizen Punkte auf dem Unterarm zuzuordnen.

Im zweiten Abschnitt werden Buchstaben, Wörter und Sätze auf dem taktilen Display dargestellt, dabei die Erkennungszeit und Genauigkeit gemessen und die Gesten getestet. Begonnen wird mit einzelnen Buchstaben, darauf folgen einzelne Wörter und letztlich Sätze. Die Buchstaben wurden explizit nach dem Kriterium gewählt möglichst alle Muster-Kombinationen abzudecken um eventuelle Schwächen in der Darstellung von spezifischen Mustern zu erkennen. Dauer der Vibration und der Pausen werden dabei variiert um ein für die Testperson angenehmes Optimum zu finden.

Im letzten Abschnitt werden die Probandinnen interviewt. Der erste Teil des Interviews deckt den persönlichen Hintergrund der Probandinnen ab. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf dem Einsatz von Hilfsmitteln im Alltag, welche wie häufig in Verwendung sind, und wo Lücken und Defizite in der Ausstattung liegen. Im zweiten Teil werden die Probandinnen gebeten ihren

5 Evaluierung

Eindruck bei der Verwendung des Prototypen zu schildern, ihre gefühlte Erkennungsrate einzuschätzen und ihr Vertrauen in die Übermittlungsmethode anzugeben.

Die Fragen im letzten Drittel des Interviews geben den Probanden die Möglichkeit über ihre eigenen Ideen und Ansätze zur Erweiterung eines taktilen Braille-Displays Auskunft zu geben.

5.2 Probanden

Die Auswahl der Probandinnen stellt trotz ihres geringen Umfangs in Bezug auf ihre sensorischen Einschränkungen eine repräsentative Auswahl der möglichen Benutzergruppen dar. Probandin 1 ist erblindet ab Geburt, Proband 2 erblindete im frühen Erwachsenenalter und Probandin 3 besitzt volle Sehkraft. Die Erfahrung in der Benutzung von Hilfsmitteln reicht von simplen audiobasierten Personal Assistants bis hin zu jahrzehntelanger Computernutzung per Braille-Zeile und Sprachausgabe. Keine der Probandinnen ist im Besitz eines Smartphones, alle drei äußerten jedoch das Interesse in nächster Zukunft ein Smartphone – genauer, ein iPhone – zu testen und gegebenenfalls zu verwenden. Alle drei Probandinnen beherrschen sowohl Basisschrift als auch Kurzschrift. Proband Nummer 2 beherrscht darüber hinaus auch Computerbraille und verwendet es an der Braille-Zeile.

5.3 Ergebnisse

Das Gefühl des Vibrationsstimulus auf dem Unterarm war für alle Probandinnen eine neue Erfahrung, die, aufgrund der Neuartigkeit dieser Interaktionsform, teils mit Sorge und Vorbehalten im Vorfeld einherging. Ein jedes taktilen Display, das den Anspruch erhebt Endbenutzerkompatibel zu sein, müsste derartige Befürchtungen zerstreuen.

Die erste Frage, ob Vibration auf dem Unterarm als unangenehm empfunden wird, beantworteten alle Probandinnen negativ.

Gegen Ende der Testphase erkannten alle drei Probandinnen die dargestellten Wörter fehlerfrei. Die Probandinnen mussten allerdings ihre volle Aufmerksamkeit aufwenden um die Zeichen verlässlich erkennen zu können.

Die sequentielle Anzeige der einzelnen Braille-Punkte sorgte am Anfang der Tests jeweils für Konfusion und verkomplizierte die Eingewöhnungsphase. Gegen Ende der Tests hatte aber keine Probandin mehr Probleme. Eine Konfigurierbarkeit der Reihenfolge wurde vorgeschlagen. Zwei Probandinnen bevorzugten die numerische Abfolge (1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6), eine Probandin die physikalisch näherliegende Reihenfolge (1 - 4 - 2 - 5 - 3 - 6) [vgl. Abb. 2.4].

Die Möglichkeit, die Anzeigedauer zu konfigurieren nahmen alle drei Probandinnen an und verlängerten die Vibrationsdauer von 1000ms auf 2000ms. Die Pause zwischen einzelnen Buchstaben wurde mit 1000ms Dauer und die zwischen Worten mit 2000ms als angenehm empfunden.

Die Tests haben gezeigt, dass ein Rückkanal für die angenehme Verwendung von entscheidender Bedeutung ist. Die Möglichkeit per Geste die Anzeige abubrechen, oder das zuletzt angezeigte Wort zu wiederholen, wurden sehr positiv angenommen. Der bestehende Satz an Gesten (Pause, Wiederholung, Abbruch) wurde von den Probandinnen als ausreichend empfunden.

Verwendungsszenarien, die die Probandinnen sich vorstellen konnten, beinhalteten vor allem Kommunikations-Metadaten ("SMS Absendername", "ANR Anrufername") oder Positionsdaten (Straßenname, Hausnummer).

Die erste Probandin sähe in der Verwendung von Kurzschrift, also dem erweiterten Braille-Alphabet, einen großen Vorteil, insbesondere um bei Texten mit mehr als zehn Zeichen die Anzeigedauer deutlich zu reduzieren. Probandinnen zwei und drei empfahlen dagegen eine Begrenzung auf Basisschrift. Argumentiert wurde mit einer höheren Fehlertoleranz und der nachlassenden Verbreitung von Kurzschriftkenntnissen bei blinden Kindern und Jugendlichen.

Das Gerät funktioniert auf der technischen Ebene. Allerdings ist im Vorfeld auf psychologischer Ebene große Überzeugungsarbeit zu leisten, vor allem aufgrund des neuartigen und unbekanntens Charakters der Stimuluserzeugung. Nach den Tests und der 30 minütigen

5 Evaluierung

Gewöhnungsphase, die damit einherging, nahmen die Probandinnen das Konzept positiv auf und waren überzeugt davon dass ein taktiles Braille-Display eine Bereicherung des Alltags darstellen würde.

6 Fazit

Im Laufe dieser Arbeit wurde das Konzept und der Entwurf für ein taktilen Braille-Display beschrieben und in einem Prototypen umgesetzt. Das Ergebnis ist ein ans Smartphone gekoppeltes Kleidungsstück, dass über Vibration Braille-Zeichen auf dem Unterarm darstellt. Letztlich wurde eine Evaluation sowohl mit Blinden als auch mit nicht erblindeten Personen durchgeführt.

Die entwickelte Hardware erfüllt die im Kapitel Konzept formulierten Anforderungen. Das Braille-Display lässt sich kabellos verwenden, ist vollständig in das Kleidungsstück integriert und konfigurierbar. Einer Anforderung jedoch konnte das Display nicht gerecht werden: es ist nicht als Hintergrundkanal verwendbar. Die Probandinnen mussten ausnahmslos ein hohes Maß an Aufmerksamkeit aufwenden um die Braille-Zeichen zu erkennen und zu Worten zusammenzufügen. Dies steht auch in direktem Zusammenhang zur Zeit, die benötigt wird um ein einzelnes Braille-Zeichen darzustellen.

Durch die sequentielle Anzeige steigt die Erkennungsrate stark an, aber die Zeitspanne, die ein einzelnes Zeichen zur Darstellung benötigt, vervielfacht sich, abhängig von Zeichen und eingestellter Anzeigedauer.

Die große Schwäche des getesteten Ansatzes ist darum der geringe Informationsdurchsatz. Mit den von den Probandinnen gewählten Einstellungen werden im Mittel 6,25 Buchstaben pro Minute übertragen.¹ Zum Vergleich: gedruckter Text wird von durchschnittlichen Erwachsenen mit etwa 200 bis 250 Wörtern pro Minute gelesen, Braille-Schrift mit ca. 120 Wörtern/Minute [5]. Die von den Probandinnen gewählte Anzeigedauer ist allerdings sehr großzügig bemessen und muss unter dem Gesichtspunkt betrachtet werden, dass

¹zugrundeliegende Annahme: 2000ms Anzeigedauer pro Braille Punkt, 1000ms Pause (Optimum der Probanden im untrainierten Zustand). Bei durchschnittlich 3,2 Punkten pro Braille-Buchstabe (nicht gewichtet nach Zeichenhäufigkeit in der natürlichen Sprache) entspricht dies 9,6s Anzeigedauer pro Buchstabe.

6 Fazit

die Probandinnen das Gerät zum ersten Mal verwendeten. Es ist anzunehmen, dass eine geübte Benutzerin des Braille-Displays die Anzeigedauer zumindest halbieren würde.

Die Evaluation weist verschiedene Schwächen auf. Die Befragung wurde mit dem sehr beschränkten Personenkreis von drei Probandinnen durchgeführt. Die Testumgebung war die Wohnung der Probandinnen und nicht das mobile Umfeld das beim Entwurf zugrundelag, und das Gerät wurde alleinstehend getestet, nicht im Vergleich zu einem anderen Ansatz oder Prototypen. Dies lässt natürlich keine allgemein gültigen Aussagen zu. Trotz dessen ließ sich die grundlegende Funktionalität des Braille-Displays feststellen und die Sinnhaftigkeit von Entwurfsentscheidungen wie dem Verzicht auf Kurzschrift bei der Braille-Implementation bestätigen.

Eine Schwierigkeit in der Verwendung des Gerätes liegt darin, dass, unabhängig von Physiologie des Unterarms, Armhaltung und sonstiger Faktoren, Stoff und Vibrationsmotoren direkt auf der Hautoberfläche aufliegen müssen. Sobald das Gerät nicht mehr fest anliegt, sinkt die Erkennungsrate und Verlässlichkeit der Informationsübertragung rapide. Bei der Evaluierung haben insbesondere die unterschiedlichen Unterarmmaße der Probanden Probleme bereitet. Große Durchmesser konnte das Stretch-Band ausgleichen, bei schmalen Armen musste Schaumstoff untergelegt werden. Sobald jedoch ein Teil des Stoffes fest aufliegt, ein anderer Teil aber nicht, werden die Vibrationspunkte an falschen Stellen zugeordnet.

Bei der Umsetzung des Hardware-Prototypen stieß die verfügbare Technik für textile Schaltkreise und Elektronik an ihre Grenzen. Die Verwendung von leitendem Faden zum Herstellen des Prototyps war eine grobe Fehlentscheidung. Ein Hauptteil der Schwierigkeiten beim Bau der beiden Prototypen leitet sich direkt daraus ab. Kurzschlüsse, verglühender Faden, überkomplexe Leitungsführung und sehr zeitaufwändiges Befestigen des Fadens an den Bauteilen hätten sich vermeiden lassen können. Es stellte sich heraus, dass plastikisoliertes Kupferkabel flexibel genug ist für Stoff auf dem Unterarm. Die Untersuchung ob die Verwendung von gedruckten Leiterbahnen auf flexiblem Kunststoff weitere Vorteile bringen würde, wäre hier in Zukunft lohnenswert.

Wenngleich auch der Prototyp verlässlich funktioniert, ist noch Arbeit vonnöten zur Optimierung der taktilen Reizerkennung. Ein nächster Schritt dazu wäre, die Hautauflage und die mechanische Flexibilität des Braille-Display zu verbessern. Der Entwurf für einen dritten Prototypen wurde allerdings aus einem Mangel an Zeit nicht umgesetzt.

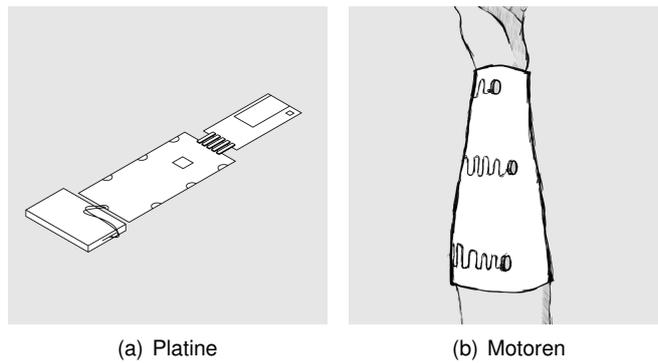


Abbildung 6.1: Prototyp v3

Änderungen umfassen unter anderem eine Zusammenführung der Elektronik von sieben einzelnen Platinen auf zwei Hauptplatinen [vgl. Abb. 6.1(a)]. Außerdem werden die Vibrationsmotoren ohne Platine in Stofftaschen eingenäht und direkt über Kabel an die Motortreiber auf der Hauptplatine angebunden [vgl. Abb. 6.1(b)]. Durch den Verzicht auf leitenden Faden kann ein dehnbarer Stoff für die textile Unterlage verwendet werden, und das Braille-Display lässt sich als flexibler Schlauch über den Unterarm ziehen, der faltenfrei anliegt. Desweiteren wäre eine Kombination von Funktionalitäten denkbar. Statt die verbauten Aktoren nur zur Informationsübertragung mittels Braille zu nutzen, könnten sie auch zur Übermittlung uncodierter taktiler Reize verwendet werden. Denkbar wäre hier beispielsweise das “Erfühlen” der korrekten Richtung bei Navigation, so wie es bereits andere Projekte umsetzen.

Unabhängig von den genannten Schwächen wurde das Gerät bei der Evaluation durchgehend positiv aufgenommen. Die Probandinnen sprachen einvernehmlich von einer Lücke in der Hilfsmittel-Abdeckung die das Gerät füllen würde.

Literaturverzeichnis

- [1] BROWN, Lorna M. ; KAARESOJA, Topi: Feel Who's Talking: Using Tactons for Mobile Phone Alerts. In: *CHI '06 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA : ACM, 2006 (CHI EA '06). – ISBN 1–59593–298–4, 604–609
- [2] GOLLNER, Ulrike ; BIELING, Tom ; JOOST, Gesche: Mobile Lorm Glove: Introducing a Communication Device for Deaf-blind People. In: *Proceedings of the Sixth International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction*. New York, NY, USA : ACM, 2012 (TEI '12). – ISBN 978–1–4503–1174–8, 127–130
- [3] JONES, Lynette A. ; LOCKYER, Brett ; PIATESKI, Erin: Tactile display and vibrotactile pattern recognition on the torso. In: *Advanced Robotics* 20 (2006), Nr. 12, 1359–1374. <http://dx.doi.org/10.1163/156855306778960563>. – DOI 10.1163/156855306778960563. – ISSN 0169–1864
- [4] KOO, Ig M. ; JUNG, Kwangmok ; KOO, Ja-Choon ; NAM, Jae-Do ; LEE, Young K. ; CHOI, Hyouk-Ryeol: Development of Soft-Actuator-Based Wearable Tactile Display. In: *IEEE Transactions on Robotics* 24 (2008), Juni, Nr. 3, S. 549–558. <http://dx.doi.org/10.1109/TRO.2008.921561>. – DOI 10.1109/TRO.2008.921561. – ISSN 1552–3098
- [5] LEGGE, Gordon E. ; MADISON, Cindee M. ; MANSFIELD, J. S.: *Measuring Braille reading speed with the MNREAD test*. Version: Juli 2009. <http://informahealthcare.com/doi/abs/10.1076/vimr.1.3.131.4438>
- [6] LINDEMAN, R.W. ; SIBERT, J.L. ; LATHAN, C.E. ; VICE, J.M.: The design and deployment of a wearable vibrotactile feedback system. In: *Eighth International Symposium on Wearable Computers, 2004. ISWC 2004* Bd. 1, 2004, S. 56–59

Literaturverzeichnis

- [7] SAHAMI, Alireza ; HOLLEIS, Paul ; SCHMIDT, Albrecht ; HÄKKILÄ, Jonna: Rich Tactile Output on Mobile Devices. Version: Januar 2008. http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-89617-3_14. In: AARTS, Emile (Hrsg.) ; CROWLEY, James L. (Hrsg.) ; RUYTER, Boris d. (Hrsg.) ; GERHÄUSER, Heinz (Hrsg.) ; PFLAUM, Alexander (Hrsg.) ; SCHMIDT, Janina (Hrsg.) ; WICHERT, Reiner (Hrsg.): *Ambient Intelligence*. Springer Berlin Heidelberg, Januar 2008 (Lecture Notes in Computer Science 5355). – ISBN 978-3-540-89616-6, 978-3-540-89617-3, 210–221
- [8] SHARMA, Anirudh: *Le Chal: A haptic feedback based shoe for the blind*. <http://anirudh.me/2011/06/le-chal-a-haptic-feedback-based-shoe-for-the-blind/>. Version: 2011
- [9] TSUKADA, Koji ; YASUMURA, Michiaki: ActiveBelt: Belt-Type Wearable Tactile Display for Directional Navigation. Version: Januar 2004. http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-30119-6_23. In: DAVIES, Nigel (Hrsg.) ; MYNATT, Elizabeth D. (Hrsg.) ; SIIO, Itiro (Hrsg.): *UbiComp 2004: Ubiquitous Computing*. Springer Berlin Heidelberg, Januar 2004 (Lecture Notes in Computer Science 3205). – ISBN 978-3-540-22955-1, 978-3-540-30119-6, 384–399

Name: Christopher Getschmann

Matrikelnummer: 721844

Erklärung

Ich erkläre, dass ich die Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Ulm, den

Christopher Getschmann