



Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und  
Angewandte Materialforschung IFAM

Wiener Straße 12, 28359 Bremen

## Projekt ConText

### Verbundvorhaben

**Textile Oberflächen zur elektrischen Versorgung, informationstechnischen Kommunikation und intuitiven Interaktion mit IoT-Geräten im Smart Home**

Verbundnummer: V5IVG017

### Teilvorhaben

**Kommunikationsinfrastrukturen und konfigurierbare Gesten-basierte Interaktionsmodalitäten für Connecting Textiles**

**Förderkennzeichen: 16SV8248**

Bewilligungszeitraum: 1.7.2019 – 31.12.2022

## Abschlussbericht

Erstellungsdatum: 1. Mai 2023

Projektleiter: Hendrik Leibrandt

### Autoren

Hendrik Leibrandt, Ingo Wirth

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 16SV8248 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

# Inhaltsverzeichnis

---

Inhaltsverzeichnis .....	2
Liste der Abbildungen .....	3
Teil I      Kurzbericht .....	5
I.1      Aufgabenstellung und wissenschaftlicher und technischer Stand zu Projektbeginn .....	5
I.2      Ablauf des Vorhabens .....	5
I.3      Wesentliche Ergebnisse und Zusammenarbeit im Projekt und anderen Forschungseinrichtungen .....	6
Teil II     Eingehende Darstellung der durchgeführten Arbeiten .....	8
II.1     Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse .....	8
II.1.1   AP1 Anforderungsanalyse .....	9
II.1.2   AP2 Interaktionsdesign .....	11
II.1.3   AP3 Textile Elektronik .....	15
II.1.4   AP4 Low-Power-Computing-Plattform .....	20
II.1.5   AP5 Demonstratoren und Evaluation .....	40
Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....	42
II.2     Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....	42
II.3     Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse .....	42
II.3.1   Fortschritte bei anderen Stellen .....	42
II.4     Veröffentlichung der Ergebnisse .....	42

## Liste der Abbildungen

Abbildung 1 Unterscheidung von: Annäherung, kurzem und langem Tippen. Jedes mit eigener Leuchtfarbe .....	12
Abbildung 2 Diffusionsschichten aus milchigem Acryl (links) und spezieller Streuungsfolie (rechts). Die Wirkung wird durch die Kamera nicht ganz akkurat wiedergegeben .....	13
Abbildung 3 Versuche mit unterschiedlichen Druckparametern (links) und verschiedenen Pasten (rechts) .....	16
Abbildung 4 Elektronikplatine, Rahmen, Sensorikschichten, Diffusor, textile Einkapselung ..	17
Abbildung 5 Schichten des textilen Sensors und Schnittzeichnung von Patch (Schichten von links in Grün, Anthrazit und Rot), der Elektrodenrasterfolie (Hellblau) und dem dazwischenliegenden Decktextil.....	17
Abbildung 6 Druckversuch der Rautenstruktur des Touchfeldsensorik auf Folie (doppelseitig) und der Folienstecker .....	18
Abbildung 7 Entwurf für Streifenelektrodenraster ist nicht gefüllt, um Material zu sparen und eine Materialprobe eines Gewebes aus Polyester (horiz.) +Edelstahlfäden (vertik.) .....	19
Abbildung 8 Blockdiagramm zeigt die verschiedenen eingesetzten Datenverbindungen/Protokolle zwischen Komponenten .....	21
Abbildung 9 Vereinfachte Schnittzeichnung durch einen Patch älterer Bauart .....	22
Abbildung 10 Patchfeld mit Kontaktraster - Prototyp auf Sperrholz.....	22
Abbildung 11 3D-Modell eines Patches älterer Bauart und fertiger Patch.....	23
Abbildung 12 Prototypen von Temperatur-, Bewegungs-, Benachrichtigungs-, Touch- und Gestenpatches.....	24
Abbildung 13 Eine kleine Auswahl aus der Hardwareevolution. Es gibt insgesamt 8 Revisionen, mit teils unterschiedlichen Versionen und Ausstattungen – allein in S1 .....	25
Abbildung 14 Programmier- und Testadapter für Patches .....	27
Abbildung 15 Gateway Revision 1 & 2 .....	28
Abbildung 16 Blockdiagramm des S2-Systems.....	29
Abbildung 17 Schichten der Tapete und Seitenansicht; Anordnung der Elektroden am Patch und die sich aus der Positionierung ergebenden Anordnungsmöglichkeiten .....	30
Abbildung 18 Unterschiedliche Kontaktierungskonzepte: Magnetische Schicht, Mikronadeln und Klebstoff.....	31
Abbildung 19 Blockschaltbild der Transceiverstufe und eine Simulation der vereinfachten Schaltung.....	32
Abbildung 20 Querschnitt Fußleiste Entwurf A und B, sowie CAD-Modell der Zahnleisten ..	33
Abbildung 21 3D CAD Entwurf der vorangegangenen Skizzen.....	34
Abbildung 22 Elektrodenraster, Elektronikmodul und Blockdiagramm der darin enthaltenen Komponenten .....	35

Abbildung 23 Prinzip: 4-Wege-Gleichrichter und Äquivalentschaltung für einen Zweig (von 4 bis max. 10V .....	35
Abbildung 24 Schaltplan des Modems – Erzeugung des Trägers und digitale Auswertung geschieht im Controller .....	36
Abbildung 25 Demodulation und -codierung eines empfangenen Signals, gemessen an echter Hardware .....	36
Abbildung 26 Prototyp des S2 Gateways auf Steckbrett .....	37
Abbildung 27 Stromüberwachung und Begrenzung .....	38
Abbildung 28 S2 Touchdemo mit vielen gleichzeitig kommunizierenden Patches .....	39

# Teil I

## Kurzbericht

---

### I.1 Aufgabenstellung und wissenschaftlicher und technischer Stand zu Projektbeginn

Das verbindende Grundprinzip von IoT-Umgebungen besteht darin, Sensoren, Aktoren und Interaktionsgeräte genau dort einsetzen zu können, wo sie gebraucht werden, und ihre Funktionen nach individuellen Bedürfnissen zu kombinieren. In privaten Haushalten gibt es in der Regel keine flächendeckenden Niederspannungs- und Kommunikations-Anschlüsse. Deswegen sind IoT-Geräte zur Stromversorgung auf ökologisch problematische Batterien oder unästhetische Stromkabel und verlustbehafteten Transformatoren angewiesen. Zur Kommunikation untereinander benutzen sie oft Funktechnologien, die stör anfällig und potenziell beobachtbar.

Ziel des Projekts war die Entwicklung sogenannter *Connecting Textiles*, um Wände im Wohnbereich zur kabelbasierten Stromversorgung und Interaktion für IoT-Komponenten genutzt werden. Weiterhin sollten Möglichkeiten interaktiver textiler Materialien genutzt werden, um neue, intuitive Interaktionsmöglichkeiten auf textilen Oberflächen zu ermöglichen und eine responsive Umgebung als Grundlage für intelligente Assistenzen zu schaffen.

### I.2 Ablauf des Vorhabens

Zur Erreichung der Projektziele wurden sieben Arbeitspakete definiert. In AP1 wurden die Anforderungen aus den Perspektiven Elektrik, Informationstechnik, Fertigung, Installation, Anwendung (insbesondere ELSI), und Interaktion erarbeitet. AP2 entwickelte das Interaktionsdesign für die *Connecting Textiles* ausgehend von einer Präzisierung der Use Case Szenarien. AP3 erarbeitete die mechanische Integration und Fertigung der sensorischen, elektrischen und kommunikationstechnischen Komponenten in textile Materialien inklusive Gewährleistung der elektrischen Versorgung, Absicherung und Redundanz. AP4 entwickelte das Energie- und physikalische Kommunikationskonzepts sowie die Software-Plattform, die die Kommunikationsinfrastruktur bereitstellt, sowie die Erkennung haptischer Interaktionsmuster auf textiler Touch-Sensorik. Die Arbeiten in AP2, AP3 und AP4 waren als partizipativer und iterativer Prozess geplant, mit frühzeitiger Einbeziehung von Anwendern in den Entwurfsprozess und Evaluation über die gesamte Projektlaufzeit. Zu drei jährlichen Synchronisations-

punkten wurde der Stand der Arbeiten aus AP2-AP4 in Demonstrator-Versionen in AP5 zusammengeführt. Anschließend wurden in AP5 die Evaluationen mit Stakeholdern anhand der Demonstratoren durchgeführt und die Ergebnisse zurückgespiegelt in die Arbeitspakete AP2-AP4 zur Entwicklung der nächsten Demonstratoren-Versionen. AP6 widmete sich der Vorbereitung der Verwertung der Connecting Textiles und umfasst die Information und systematischen Heranführung von relevanten Industrievertretern aus der Produktion bzw. dem Smart Home Bereich und das Aufzeigen von möglichen Geschäftsmodellen und Marktpotenzialen. Die Maßnahmen zur Eindämmung der Covid-19 Pandemie hatten Auswirkungen auf die geplanten Arbeiten: die Nutzerpartizipation musste neu geplant werden, und wurde teilweise digital durchgeführt als auch zeitlich verschoben. Einige technische Entwicklungen verzögerten sich auf Grund von durch Zugangsbeschränkungen zu den Laboren und Lieferengpässen. Gemeinsame Integrationsarbeiten in den Demonstratoren waren schwierig, weshalb ein modulares Demonstratoren-Konzept entwickelt wurde, um dezentrales Arbeiten und integrieren zu ermöglichen. Insgesamt konnten alle geplanten Arbeiten durchgeführt werden, allerdings mit Verzögerungen, weswegen das Projekt um sechs Monate verlängert wurde.

### **I.3 Wesentliche Ergebnisse und Zusammenarbeit im Projekt und anderen Forschungseinrichtungen**

Projektergebnisse sind zwei funktionale Fertigungsprinzipien für Connecting Textiles und Kontaktierungsprinzipien für IoT-Aktoren und Sensoren mittels des evaluierten universellen Konzepts der Patches: einerseits polarisierte Magnete zur Stromversorgung und Kommunikation, die fest integriert sind in das Textil, auf die entsprechend polarisierte Patches aufgebracht werden. Andererseits gedruckte Leiterbahnen auf der Rückseite von Vlies-Textilen bzw. in gewebte Textilie eingearbeitete leitende Garne, die durch Nadelkontakte auf der Rückseite der Patches durch Stecken in das Textil kontaktiert werden. Erstere Lösung funktioniert sehr robust, ist aber aufwendig in der Herstellung, während die zweite Lösung eine industrielle Fertigung sehr gut darstellbar ist. Weiteres Ergebnis sind funktionale Fußleisten zur Verbindung von Tapetenbahnen untereinander und Versorgung der Tapetenbahnen mit Strom und Datenkommunikation. Darauf aufbauend eine leichtgewichtige Kommunikationsinfrastruktur zur Verwaltung der Patches auf Textilien, die auch die bidirektionale Kommunikation mit Open Source Smart Home Plattformen realisiert. Zudem eine auf leichtgewichtiger Elektronik realisierbare Erkennung von selbst-definierbaren haptischen Gesten auf textilen Touch-Flächen. ConText war Teil eines Verbundprojekts zusammen mit den Partnern: DFKI (Cyber-Physical-Systems Bremen und InTex Berlin), BOSCH (Abteilung Mensch-Technik-Interaktion, Robert Bosch GmbH, Renningen), DITF (Deutsche Institute für Textil- und Faserforschung Denkendorf, ILI (Innovative Living Institute GmbH und Co. KG, Essen – im Unterauftrag der DITF),

Norafin Industries (Germany) GmbH, Mildenaу, PPMT (ERTEX Jacquard der Peppermint Holding GmbH, Berlin). Im Rahmen des Projekts wurde mit dem Design Research Lab (DRLab) der Universität der Künste Berlin kooperiert.

# Teil II

## Eingehende Darstellung der durchgeführten Arbeiten

---

### II.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Die Zuwendungen umfassen größtenteils Personalausgaben, welche zur Bearbeitung der unten beschriebenen Arbeitspakete verwendet wurden, sowie Reisemittel für Projekt- und Verbundtreffen, Arbeits- und Integrationstreffen für die Demonstratoren. Hinzu kommen Ausgaben für Verbrauchsmaterialien in den verwendeten Druckprozessen, sowie Bauteile, Dienstleistungen und Zubehör für die hergestellten Elektronikkomponenten.

Weiterhin wurde das Projekt im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit auf Workshops und Foren präsentiert. Außerdem werden die wichtigen Positionen des zahlenmäßigen Nachweises aufgeführt und die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten erläutert. Weiter wird auf den voraussichtlichen Nutzen der im Projekt erzielten Ergebnisse und bekannt gewordene Fortschritte bei anderen Stellen eingegangen.

Im Folgenden werden zu jedem Arbeitspaket die Beiträge und Ergebnisse des IFAM beschrieben.

## **II.1.1 AP1 Anforderungsanalyse**

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurden von den Projektpartnern unterschiedliche Werkzeuge eingesetzt, wie z. B. Workshops, Expertenbefragungen und Marktanalysen, um die Anforderungen an ein ConText-System zu entwickeln. Die gesammelten Anforderungen wurden in einer zentralen Anforderungsdatenbank verwaltet.

### **II.1.1.1 TAP 1.1 Anforderungskatalog**

Das IFAM hat sie wie alle anderen Partner ebenfalls, an der Erstellung der Nutzungsszenarien und einer Customer Journey beteiligt. Diese stellte Grundlage für eine Reihe von Nutzerinterviews dar, welche unter Leitung des DFKI durchgeführt wurden. IFAM und CPS haben einige hiervon in Norddeutschland durchgeführt. Ebenfalls wurde sich an Workshops z.B. zum Thema ELSI-Aspekte unter Nutzung u.A. des MEESTAR-Modells beteiligt. All diese Ergebnisse sind in den Berichten des verantwortlichen Partners Bosch festgehalten.

Desweiteren gab es natürlich auch technische Anforderungen. Die Festlegung der Systemspannung stellte uns vor einen Zielkonflikt; einerseits haben höhere Spannungen den Vorteil, dass sich bei gleichem Strom mehr Leistung übertragen lässt. Die erlaubt einerseits die Versorgung von Verbrauchern mit höherem Energiebedarf, was Anwendungen wie z.B. Displays oder Lichtquellen entgegenkommt. Zum Zweiten ergibt sich mehr Spielraum bei den Leitungs- und Übergangswiderständen, die von uns im Textil tendenziell als höher eingeschätzt wurden, verglichen mit konventioneller Technik mit Kabeln und Steckern. Eine höhere Spannung birgt auch der anderen Seite aber auch Probleme. Da wäre zum einen der zusätzliche schaltungstechnische Aufwand, weil es zwangsläufig mehr Spannungen im System gibt

Aber auch unerwünschte Effekte wie Kriechströme, die zu Problemen wie elektrochemischer Korrosion führen können (insb. in Räumen mit erhöhter Feuchtigkeit) sind potenzielle Kontrapunkte. Nicht zuletzt gibt es Grenzen, ab denen von offen geführten Spannungen eine unmittelbare Gefahr ausgeht. Die Grenze, ab der Spannungen noch als harmlos gelten können und keiner gesonderten Sicherheitsmaßnahmen erfordern, wird als Kleinspannung bezeichnet. Die gesetzlichen Vorgaben leiten sich aus unterschiedlichen Normen ab, deren Gültigkeit von zahlreichen Faktoren abhängen und die sich teilweise widersprechen. Insgesamt können Spannungen  $\leq 12V$  unter normalen Bedingungen als ungefährlich angesehen werden und wurden daher von uns als unproblematische Obergrenze gewählt, wobei 24V als mögliche Option noch offengehalten wurden.

### **II.1.1.2 TAP 1.2 Chancen & Risikoanalyse**

Chancen und Risiken wurden in gemeinsamen Workshops der Partner mittel Methoden wie der SWOT-Analyse ermittelt und eingeordnet. Daraus sind Maßnahmen entstanden mit diesen umzugehen, welche in einem Riskmanagement zusammengeführt wurden. Die Ergebnisse dieser gemeinsamen Bemühungen sind in dem Bericht des AP verantwortlichen Partners nachzulesen.

## **II.1.2 AP2 Interaktionsdesign**

Ziel des Arbeitspakets Interaktionsdesign war die Definition und detaillierte Ausarbeitung und illustrierte Darstellung des Anwendungsszenarios zur Verdeutlichung der Interaktionen. Rechercheergebnisse und Inhalte des Anwendungsszenarios wurden in Workshops mit potenziellen Systemnutzern überprüft und erweitert.

Basierend auf den Workshopergebnissen wurden Anforderungen und Wünsche an formalästhetische und Usability-Aspekte der Interaktionsflächen und -elemente abgeleitet, sowie ELSI-Aspekte nach dem MEESTAR-Modell diskutiert und analysiert. Dabei spielten Themen wie z.B. Datenschutz, Steuerbarkeit, Achtung der Privatsphäre, Selbstbestimmung u.ä. eine zentrale Rolle als Ausgangspunkt für die Entwicklungen.

Weiteres Ziel des Arbeitspakets war die Entwicklung eines zuverlässigen nicht-permanenten Verbindungssystems zwischen konventionellen Komponenten und elektrotextilen Elementen. Dafür wurden robuste und möglichst weitgehend produktionskonforme Ansätze für textilbasierte sowie textilintegrierte Sensoren und Aktoren in textilen Strukturen konzipiert und exploriert. Zur Integration von Sensorik und Aktorik waren neuartige Lösungen im Bereich der Verbindungstechniken erforderlich. Diese basieren einerseits auf robusten und vielversprechenden Lösungen aus der Literaturrecherche und andererseits auf den technischen Produktionsmöglichkeiten der Konsortialpartner\*innen.

Weiterhin wurde ein Anforderungskatalogs für Formfaktoren der konventionellen Elektronik für die textilkompatible permanente Integration (z.B. Löten, Crimpen, Nieten, Klemmen, Kleben etc.) und für die Auswahl der konventionellen elektronischen Bauteile erstellt. Dabei wurden Lösungen mit ähnlichen Problemstellungen und hoher Kompatibilität mit dem textilen Trägermaterial und deren Anwendung konzipiert und angepasst. Ziel war die Konstruktion der elektronischen Verbindungselemente (passende Anschluss- und Gehäuseformen bzw. Integrationstechniken) und deren Evaluation im Rahmen von Usability-Tests mit Funktionsmodellen, sowie deren Bewertung für die Produktentwicklung.

### **II.1.2.1 TAP 2.1 Anwendungsszenario**

Es wurden gemeinsam im Konsortium eine Reihe von Nutzungsszenarien entwickelt, aus denen formale Anforderungen abgeleitet wurden. Das IFAM hat hier wie alle anderen Partner auch mitgewirkt, die Leitung der Aktivitäten und Sammlung der Ergebnisse war jedoch Aufgabe des DFKI. Für Details möchten wir daher auf jenen Bericht verweisen.

### II.1.2.2 TAP 2.2 Elektronische Verbindungsmodule / Connecting Textile Patches

Die Patches enthalten in jeder der 4 Ecken je eine RGB-LED, die sich individuell ansteuern lassen. Dies ist die primäre Möglichkeit dem Nutzer visuelles Feedback zu geben, als auch Zustände darzustellen. In Mensch-Maschinen-Schnittstellen ist die unmittelbare Quittierung einer Interaktion immens wichtig, da es ansonsten schnell zu Missverständnissen über die Akzeptanz der Eingabe kommen kann. Um diese Frustration zu verhindern ist es notwendig, dass die Latenz zwischen Aktion (bspw. dem Antippen eines Knopfes) und der Systemreaktion (Licht geht an) deutlich unter einer Sekunde liegt. Bei kontinuierlichen Gesten noch deutlich weniger, idealerweise unter 100ms. Die durch die vielen Zwischenschichten an Hard- und Software eingebrachten, mitunter stark schwankenden Verzögerungen, insb. bei Ansteuerung von Smarten Lampen, gaben dies nicht her. Um den Einfluss dieser Roundtrip-Latenz auf die Userexperience zu begrenzen, geben die Patches bei Aktivierung ein unmittelbares visuelles Feedback in Form eines Aufglimmens und können dann bei Übernahme des neuen Systemzustands vom Gateway so angesteuert werden, dass sie dieses ebenfalls signalisieren. Hierbei kommen uns die Möglichkeit unterschiedliche Leuchtmuster und Farben zu programmieren entgegen, sodass eine einfache Unterscheidung möglich ist. Um die Eingabe von Gesten möglich zu machen, findet eine Vorverarbeitung auf den Patches statt und es werden aggregierte Daten weitergeleitet (z.B. Druck&Dauer der letzten Berührung und ob diese noch anhält).

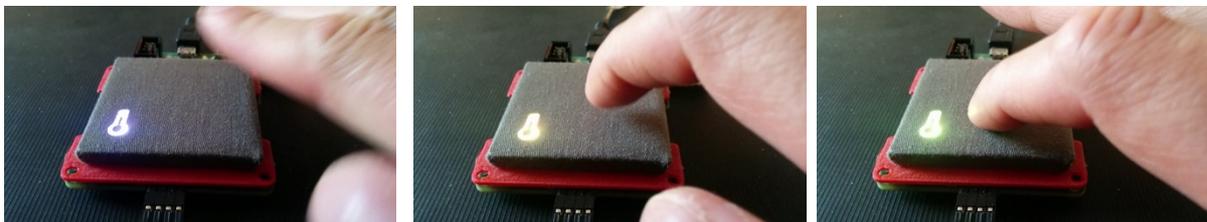


Abbildung 1 Unterscheidung von: Annäherung, kurzem und langem Tippen. Jedes mit eigener Leuchtfarbe.

Es wurden umfangreiche Versuche zu geeigneten Konstellationen von Ansprechverhalten der Sensorfläche (Ansprechschwelle, Hysterese, Totzeit, Timingfolge) und des Lechtfeedbacks (Farbe und Farbsymbolik, Helligkeit, Überblendverhalten- und Geschwindigkeit) durchgeführt. Die Berührungsempfindliche Oberfläche des Button-Patches unterliegt in seinen Eingabemöglichkeiten den Beschränkungen eines One-Button-Interface, ist aber mit seinen Softwaremöglichkeiten in der Lage vieles aus diesem herauszuholen. So ist es möglich zwischen Annäherung, Berührung, Druck in zahlreichen Stufen und Gesten, die diese in definierten zeitlichen Intervallen aneinanderreihen (z.B. Doppeltippen, Tippen+Halten, Variieren der Druckstärke, Vorbeiwischen ohne Berührung) und unterschiedlich zu interpretieren. Diesen Gesten lassen sich Leuchtmuster zuordnen, was eine eingängige und zuverlässige Interaktion ermöglicht. Hierzu wurden unterschiedliche Versuche und Demos umgesetzt, aber nur eine sehr reduzierte Teilmenge (Langes/Kurzes Drücken) in die Demonstratoren S1+S2 übernommen,

weil Gesteneingabe über das dedizierte Touchfeld erfolgt. Die Farbsprache bedient sich gedämpfter Farben, um besser mit der Gestaltung der Patches zu harmonieren und blendet sanft, aber nicht zu langsam, zwischen den Zuständen über – wobei ein langsames Nachglimmen dem Nutzer mehr Zeit gibt, die Rückmeldung zur letzten Aktion zu erfassen.



*Abbildung 2 Diffusionsschichten aus milchigem Acryl (links) und spezieller Streuungsfolie (rechts). Die Wirkung wird durch die Kamera nicht ganz akkurat wiedergegeben*

Die niedrige Bautiefe der Patches bedingt einen sehr geringen Abstand zwischen LEDs zur Deckschicht, sodass ein Diffusor notwendig wird, um das Licht zu streuen, damit die Ausleuchtung gleichmäßiger wirkt und die gelaserten Symbole vollständig anstrahlt. Zudem wird dadurch der Regenbogeneffekt verringert, der sich an feinen Strukturen zeigt und seinen Ursprung in dem leichten Versatz der separaten Leuchtpunkten (Chips für Rot/Grün/Blau) hat. Unterschiedliche Materialien wurden erprobt – darunter Seidenpapier, gefrostetes Acrylglas und spezielle mehrschichtige Streufolien, wie sie in den Backlights von LC-Displays eingesetzt werden. Letztere erzielten die stärkste Streuung, aber auch störende Prismeneffekte, sodass letztendlich mit durchgängig gefärbtem milchigem Acrylglas gearbeitet wurde.

### **II.1.2.3 TAP 2.3 Elektronische Verbindungsmodule - temporäre Module**

Die im Antrag beschriebene hybride Herangehensweise mit modularen und statischen Funktionsflächen, wurde zugunsten des flexibleren Ansatzes über Patches nicht umgesetzt. Die angedachten statischen Funktionalitäten wurden in Module ausgelagert. Eine Unterscheidung findet daher im Folgenden nicht weiter statt.

## **II.1.3 AP3 Textile Elektronik**

### **II.1.3.1 TAP 3.1 Basis Connecting Textiles: Herstellung von Geweben und Vliesstoffen als Trägermaterial für sensorische Strukturen**

*Keine Anteile des IFAM*

### **II.1.3.2 TAP 3.2 Entwicklung textiler Halbzeuge für sensorische Strukturen auf / in Connecting Textiles**

Das IFAM verfügt über umfangreiche Kompetenzen und technische Möglichkeiten der drucktechnischen Herstellung elektronischer Strukturen, auch auf flexiblen Substraten. Das ursprüngliche Vorhaben sah vor, diese umfangreich in diesem Projekt zu nutzen, u.A. zur Herstellung und Integration verschiedenster sensorischer Strukturen. Es hat sich jedoch recht schnell herauskristallisiert, dass einfache textilintegrierte Leiterstrukturen in Kombination mit konventioneller Elektronik vorerst das sinnvollere Konzept darstellen. Einerseits ist es so, dass Standardelektronik oftmals bessere Performanceeigenschaften aufweist (was in einem stark nutzerorientierten Projekt ein wichtiger Faktor ist), aber auch die Schnittstellen vereinfacht. Dies liegt auch darin begründet, dass es einige Komponenten gibt, die bisher nicht drucktechnisch zu fertigen sind; allem voran Halbleiter und Integrierte Schaltungen. Die Kombination von gedruckter Elektronik mit konventionellen Mikroelektronikbauteilen ist zwar durchaus möglich und wurde/wird von uns in vielen Projekten eingesetzt, versprach für Context aber noch wenig Vorteile, weil absehbar war, dass Patches nach wie vor auf Standardelektronik würden setzen müssen. Mit der Entscheidung für S2 gegen eine umfangreiche Integration von Funktionen in die Tapete selbst, zugunsten eines vollmodularen Ansatzes, entfiel auch die Notwendigkeit für komplexe Druckverfahren und Materialien. Die Argumente die der intrinsisch funktionalisierten Tapete (Berührungsempfindlich, Interaktiv und sensoriert) entgegenstehen sind zahlreich: zum einen ist der Ansatz deutlich weniger flexibel (nur vorgegebene Funktionen an festen Stellen), Herstellungstechnisch viel aufwendiger (Preis- und Nachhaltigkeitsbedenken), komplexer in der Installation (Ausrichtung von Zonen bei Anbringung, geg. eingeschränkte Zuschneidbarkeit, und anspruchsvoller elektrischer Anschluss) und nicht zuletzt auch mit deutlich höheren technischen Hürden behaftet. Deswegen wurde die Tapete auf die notwendigen elektrischen Komponenten reduziert und sämtliche Elektronik in Module ausgelagert, die über die Tapete zusammengeschaltet werden.

Aus diesen Gründen sind viele Arbeiten in das AP4 gewandert und werden auch dort beschrieben, um inhaltlich zusammengehörige Themen nicht der überholten Struktur Willen auseinanderzureißen. Nichts desto zuvor genannter Umstände, gab es nach wie vor einige Anwendungen für Drucktechniken im Projekt, auf die im Folgenden eingegangen wird.

Es wurden Druckversuche auf unterschiedlichen Substraten durchgeführt, darunter Folienmaterialien, sowie von den Partner Peppermint und Norafin gelieferten Materialmustern. Der

Druck auf textilen Materialien birgt einige Herausforderungen, die sich aus der unebenen Oberfläche, der Flexibilität und Dehnbarkeit, sowie der Saugfähigkeit ergeben.

Die Leiterbahnen wurden mittels Dispensverfahren auf die Substrate gedruckt. Verdrückt wurde die Silberpaste ESL 1901-SB. Diese Druckpaste ist ein silbergefülltes, flexibles Harzmaterial, das sich speziell für den Einsatz als Leiter auf Niedertemperatursubstraten eignet. Insbesondere eignet sich diese Polymerpaste aufgrund der Viskosität und Flexibilität für den Einsatz auf Stoffen. Testdrucke mit einer Leiterbahnlänge von 10 cm und einer -breite von 1 mm wurden mit verschiedenen Druckgeschwindigkeiten auf Textiltapete gedruckt. Anschließend erfolgte eine thermische Nachbehandlung bei  $T = 100\text{ °C}$  für  $t = 25\text{ min}$ . Widerstandsmessungen der gedruckten Strukturen ergaben Werte zwischen  $R = 5,0\ \Omega$  bei einer Druckgeschwindigkeit von  $v = 6\text{ mm/s}$  und  $R = 3,4\ \Omega$  bei einer Druckgeschwindigkeit von  $v = 3\text{ mm/s}$ . Da eine geringere Druckgeschwindigkeit einen höheren Materialauftrag pro Fläche zur Folge hat, ist erwartungsgemäß der elektrische Widerstand geringer, da der Leitungsquerschnitt entsprechend größer ist. Die gedruckten Leiterbahnen besitzen durch den Restpolymeranteil in der Paste eine hohe Flexibilität. Der elektrische Widerstand der Leitbahnen bleibt über längere Zeit relativ konstant.

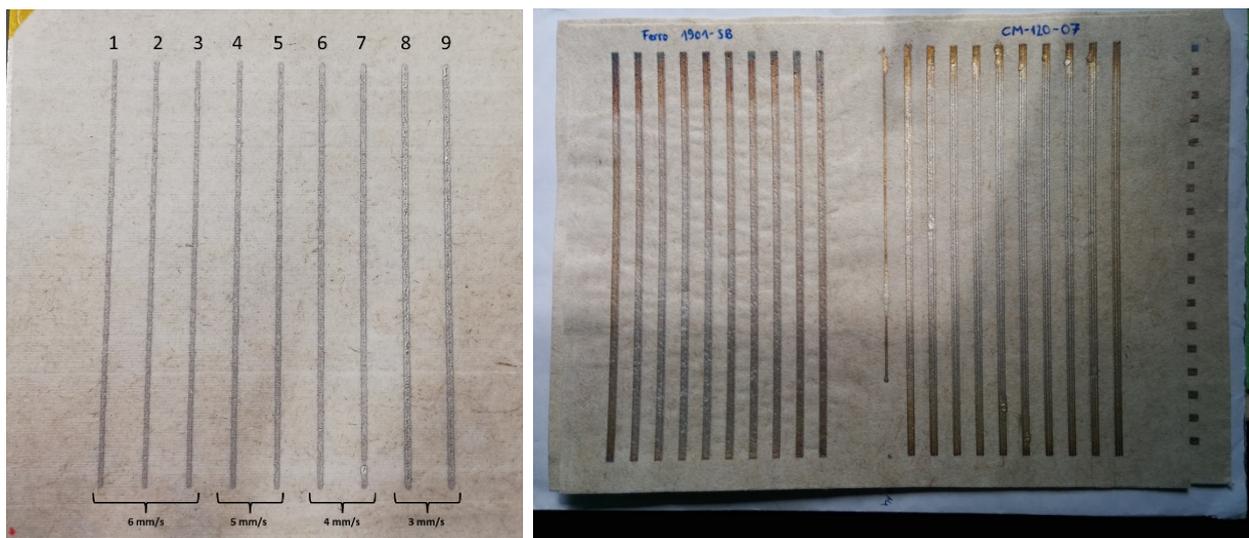


Abbildung 3 Versuche mit unterschiedlichen Druckparametern (links) und verschiedenen Pasten (rechts)

Die Ergebnisse der Testdrucks mit einer silberpartikulären Paste auf dem Flachs/Viskose Vlies von Norafin lieferten gute Ergebnisse. Ein Zerfließen der Paste durch Saugwirkung des Materials hielt sich in akzeptablen Grenzen und konnte durch eine spätere Verbesserung mit dem beschichteten Vlies noch weiter verringert werden.

### II.1.3.3 TAP 3.3 Entwicklung sensorischer Strukturen zur Integration in Textilien

Bis zum Meilenstein S1 war der Anteil an textilen Materialien überwiegend ästhetischer und kaum funktionaler Natur. Ausnahmen sind hier die Deckschicht des Patchfelds, mit seinen Durchkontaktierungen und eingearbeiteten Magneten, die sich vor der flexiblen Kontaktträgerfolie befindet, sowie die berührungsempfindlichen textilen Bezüge der Patches. Beides wurde in erster Linie von InTex konzeptioniert und gefertigt, mit einigen Zuarbeiten und Wissensaustauschen/Diskussionen des IFAM. Die Schnittmuster und der Schichtaufbau musste mit der Hardwareentwicklung der Patches abgestimmt werden, ebenso, wie die elektrische Auswertung von Interaktionsereignissen je nach Material und Aufbau unterschiedlich ausfiel.

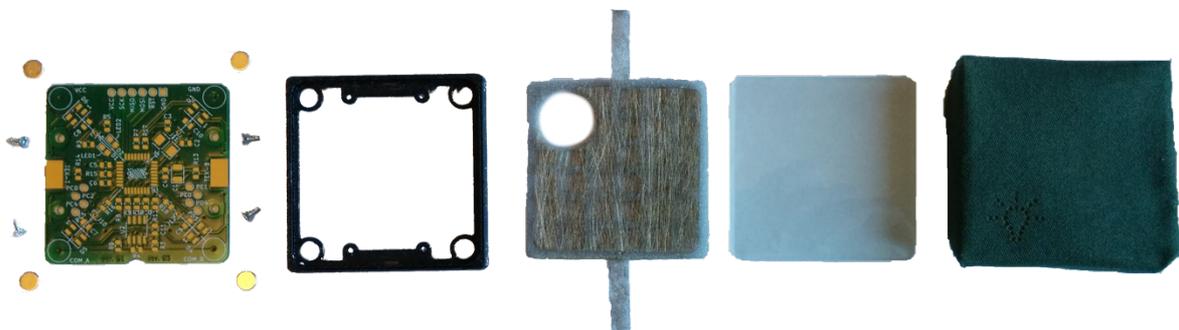


Abbildung 4 Elektronikplatine, Rahmen, Sensorikschichten, Diffusor, textile Einkapselung

Die Touchsensorik des Patches wurde durch eine Schicht graphithaltige Polymerfolie (Velos-

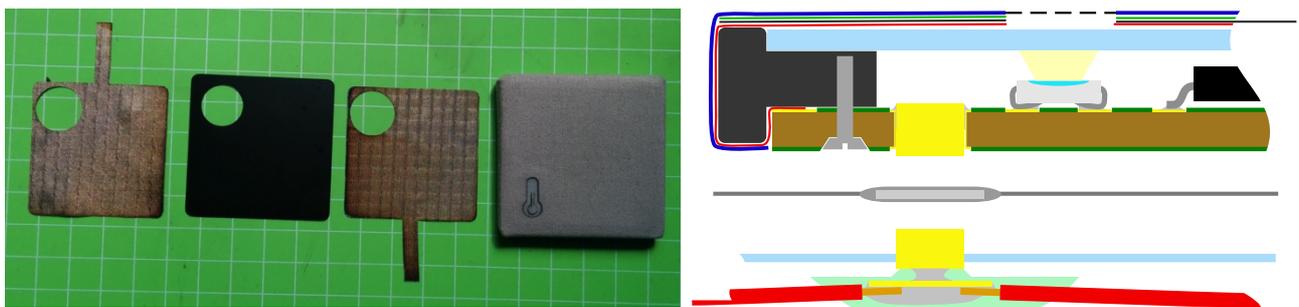


Abbildung 5 Schichten des textilen Sensors und Schnittzeichnung von Patch (Schichten von links in Grün, Anthrazit und Rot), der Elektrodenrasterfolie (Hellblau) und dem dazwischenliegenden Decktextil

tat) zwischen zwei metallisierten Gewebeschichten realisiert. Wird auf diese Aufbau Druck ausgeübt, so verringert sich der Widerstand der Folie, was sich einfach elektrisch messen lässt. Zusätzlich kann die obere Elektrode bei geschickter elektrischer Verschaltung auch als kapazitative Sensorfläche verwendet werden, die Änderungen des elektrischen Feldes – bspw. durch Annäherung mit einer Hand detektieren kann. Die Elektroden sind mit Laschen ausgestattet, die durch entsprechende Nuten im Rahmen geführt werden und dann Kontakt mit der Platine herstellen.

Neben diesen beiden das Umfeld Patches und deren Leiterbereiche betreffenden Themen, verdient natürlich das Touchfeld Erwähnung, für das sich Bosch verantwortlich zeichnet. Das IFAM hat hier an der Gestaltung der Geometrie mitgewirkt, mehrere Siebdruckmasken entworfen und extern in Auftrag gegeben, sowie Qualifizierung und Druckversuche durchgeführt, bevor die Fertigung später an das DITF übertragen wurde. Für die Druckversuche mittels Siebdrucks wurde dieselbe Silberpaste ESL 1901-SB verwendet, die auch für die oben beschriebenen Dispensversuche zum Einsatz kam. Die thermische Nachbehandlung nach dem Druck auf Folie erfolgte bei  $T = 125 \text{ °C}$  für  $t = 20 \text{ min}$  (Abbildung 6). Die Adapter aus flexibler Leiterplattenmaterial (Polyamid), die Touchfeldsensorik mit der Auswerteelektronik verbinden, wurden ebenfalls am IFAM entwickelt. Dieser ist mit zwei Rastern an Durchkontaktierungen versehen, um mit möglichen Änderungen am Touchpad besser kompatibel zu sein. Durch diese Löcher kann überschüssiger Klebstoff nach oben quellen und sie dienen als Fenster für die UV-Aushärtung desselben. Am Ende befindet sich eine Kontaktreihe, die in einen standardmäßigen sog. ZFI-Steckverbinder eingeleitet und arretiert werden kann.

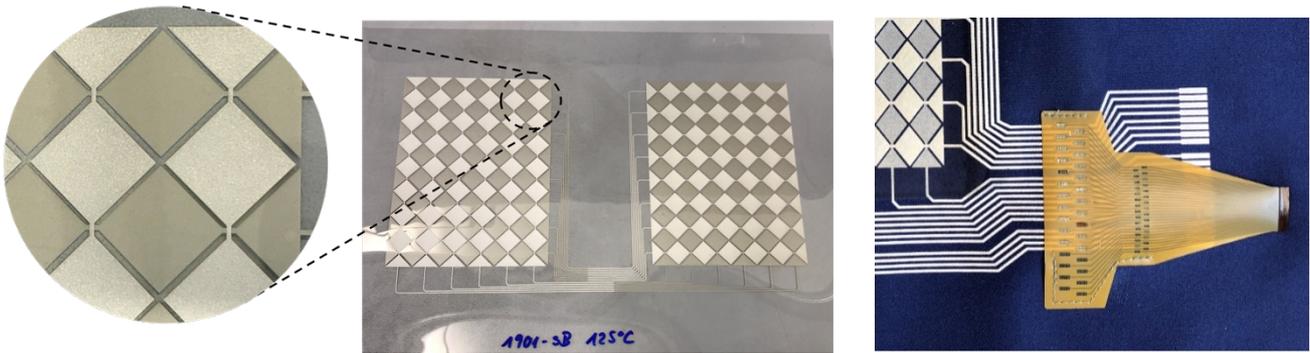


Abbildung 6 Druckversuch der Rautenstruktur des Touchfeldsensorik auf Folie (doppelseitig) und der Folienstecker

Für das Konzept der Streifenraster basierten flexiblen Kontaktierung in S2 (Details ab Beschreibung AP4) sind versuchsweise mittels Dispensdruck gefertigte Geometrien auf Folie hergestellt worden. Hieran wurde das grundsätzliche Funktionsprinzip und die Tauglichkeit der gewählten Geometrieparameter erprobt. Das Bild zeigt dieses erste Design. Es wurden zudem unterschiedliche Materialien aus metallischen Mischgeweben auf Ihre Eignung hin untersucht als Leiterstruktur in der Tapete eingesetzt zu werden. Aufgrund der Steifigkeit verfügbarer Produkte fiel die Bewertung eher negativ aus, wobei die gute elektrische Leitfähigkeit und hohe Dimensionstreu zu loben war.

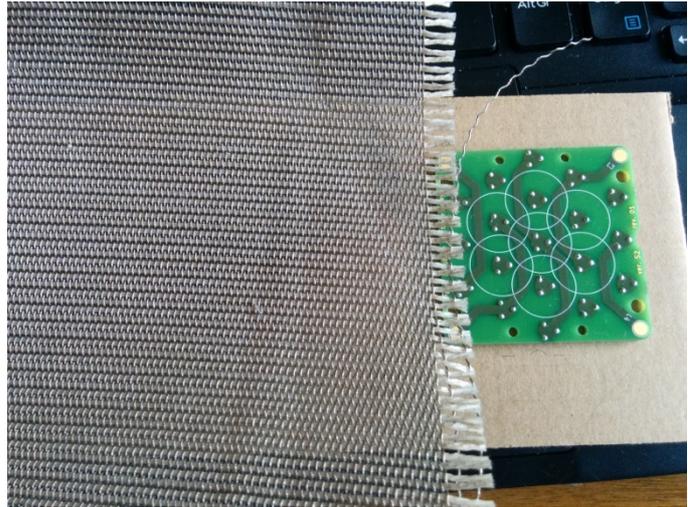
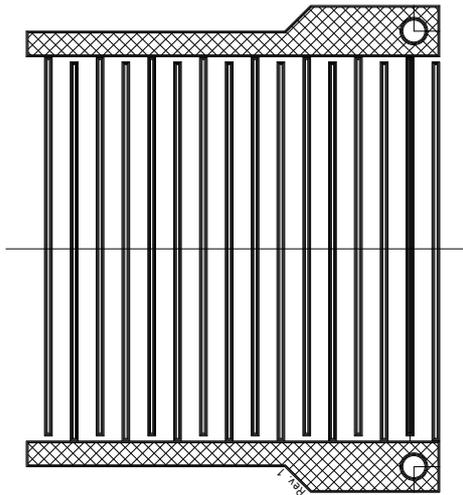


Abbildung 7 Entwurf für Streifenelektrodenraster ist nicht gefüllt, um Material zu sparen und eine Materialprobe eines Gewebes aus Polyester (horiz.) +Edelstahlfäden (vertik.)

#### II.1.3.4 TAP 3.4 Erprobung der entwickelten Sensorik

Von InTex wurden verschiedene leitfähige Vliese und Gewebe getestet und teilweise als Muster an das IFAM zur weiteren Untersuchung versandt. Es waren zahlreiche iterative Verbesserungen notwendig, ehe der Aufbau in den Patches zufriedenstellend funktionierte. Der Zusammenbau gestaltete sich bisweilen schwierig was durch Designänderungen teilweise verbessert wurde. Des Weiteren war die zuverlässige Kontaktierung der Sensorik zu Anfang ein Problem. Auch diese Herausforderungen wurden durch iterative Prozesse betreffend Designänderungen, Isolationsmaterial und Auswahl der Stecker erfolgreich gelöst.

Die gedruckten Streifenraster haben ausgezeichnete Leitwerte erreicht, mit denen sich ein mehr als ausreichendes Maß an elektrischer Leistung übertragen lässt, ohne Überhitzung befürchten zu müssen. Allerdings mussten sie sich in Punkto Widerstand den mit gewebten metallischen Fasern hergestellten Textilien geschlagen geben. InTex hat detaillierte Messungen hierzu angestellt und dokumentiert.

#### II.1.3.5 TAP 3.5 Entwicklung und Herstellung von Demonstratoren zur Demonstration textiler Sensorik und haptischer Interaktionsmuster

Das IFAM hat alle Partner mit den Kontakträgerfolien zum Bau der Demonstratoren ausgestattet (Aufschlüsselung beschrieben unter AP5), die Teil der textilen Komponente sind. Weitere textile Demonstratorkomponenten waren ansonsten lediglich die kleinformig gedruckten Streifenraster, welche eingebunden in eine funktionale Demo mit einigen Patches auch auf dem Verbundtreffen ausgestellt wurden.

## II.1.4 AP4 Low-Power-Computing-Plattform

Ziel dieses Arbeitspakets ist die Strom- und Datenübertragung in und aus den Connecting Textiles heraus, die Integration der textilen Sensoren in Sensorknoten und die Entwicklung der Software-Komponenten für Connecting Textiles und deren Verbindung mit Smart Home Zentralen einerseits, sowie angeschlossenen Smart Home Geräten andererseits. Ausgangspunkt ist das Konzept, dass es innerhalb der Connecting Textiles eine Stromversorgung und eine interne Daten-Transport Ebene gibt, deren Hardware technisch in AP4 entwickelt und in AP5 gefertigt wird. Diese dienen dazu, die Connecting Textiles an ein Bussystem anzuschließen, welches zum Beispiel im Fall von Tapeten in der Fußleiste integriert sein kann. Dieses Bussystem ist angeschlossen an eine Daten- und Stromquelle, verbindet verschiedene Tapeten miteinander, versorgt diese mit Strom und dient zur Kommunikation zwischen den Tapeten und der Datenquelle. Dies umfasst konkrete die folgenden Arbeiten:

- Integration gedruckter, gewebter und vliesstoffbasierter Sensoren in Sensorknoten
- Implementierung kontaktbasierter oder kontaktloser Energieversorgung
- Identifizierung und Auswahl einer geeigneten Hardwareplattform (Mikrocontrollerserie + Peripherie aus Ökosystem eines Herstellers)
- Konzeptionierung anwendungsabhängige Datenübertragung an zentrale Verarbeitungseinheit
- Entwicklung der Connecting Textiles-Software-Plattform zur reaktiven Vernetzung von IoT-Geräten, kompatibel mit Smart-Home-Standards und konfigurierbaren Interaktionsmustern
- Integration von Mechanismen zur Authentifizierung, Verschlüsselungsansätzen und Integritätsprüfung innerhalb der Connecting Textiles und Software-technische Lösung zur niedrigschwelligen Einbindung in Smart Home Systeme und insbesondere Smart Home Geräten (ELSI Aspekte Datenschutz und Selbstbestimmung)
- Integration der Connecting Textiles mit Smart Home Systemen

Weiterhin sind entweder direkt in den Connecting Textiles oder als Aufsätze hierfür haptische textile Sensorflächen integriert, die zur Erkennung von Gesten verwendet werden können. Mit diesen sollen die Benutzer Interaktionsmuster frei gestalten und zur Steuerung der angeschlossenen IoT-Geräte verwenden können.

Bereitstellung niedrigschwellig Konfigurationsmechanismen zur Gestaltung intuitiver haptische Interaktionen (relevant für ELSI Aspekt Selbstbestimmung)

### II.1.4.1 TAP 4.1 Connecting Textiles Basis Stromversorgungs- und Kommunikationssystem

Jede Tapetenbahn bildet eine in sich abgeschlossene Kommunikationsdomäne, innerhalb derer verbundene Patches als gleichberechtigte Peer über einen Bus kommunizieren. Innerhalb der Fußleiste befindet sich die Ankontaktierung der im Textil eingebetteten Leiterstrukturen. Zudem werden hier Energieflüsse überwacht, um auf Kurzschlüsse reagieren zu können, sowie die Kommunikationsströme koordiniert und an einen gemeinsamen Bus, der alle Bahnen zusammenschaltet, ausgeleitet – dies ist die Gatewayfunktion, analog zu einer Bridge in

Ethernet-Systemen. Zudem verwaltet der Controller den Adressraum und weist den Patches dynamische Adressen zu, im Prinzip nicht unähnlich einem DHCP-Server. Das System ist als Master-Slave Design ausgelegt, bei dem das Gateway jedwede Kommunikation initialisiert. Die Benachrichtigung über Änderungen von Registern auf Seiten der Patches erfolgt über ein Subscription/Release System, welches vom Gateway verwaltet wird und in konfigurierbaren Intervallen Updates anfordert (Polling). Dies macht die Protokolllogik immens viel einfacher, weil keine Kollisionserkennungs- und Vermeidungsstrategien notwendig sind.

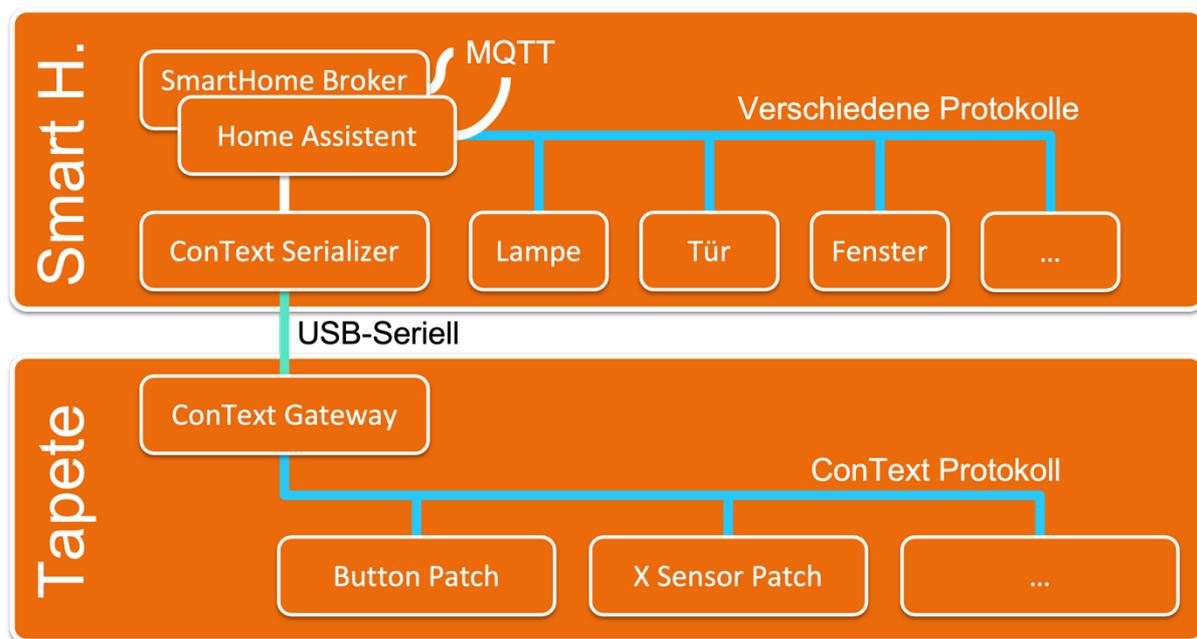


Abbildung 8 Blockdiagramm zeigt die verschiedenen eingesetzten Datenverbindungen/Protokolle zwischen Komponenten

## S1

Für Patches und Gateway wurde aus Gründen der Vereinfachung von Softwarepflege dieselbe Mikrocontrollerplattform gewählt. Hierbei handelt es sich um den ATmega328PB – einen modernen 8-Bit Mikrocontroller mit 64KB ROM und 4KB RAM, sowie vielen integrierten Peripheriegeräten wie seriellen Schnittstellen und einem integriertem Analog-Digital-Wandler (ADC). Diese Chips wurden gewählt, da die alle benötigten Funktionen boten, dem Anschein nach über ausreichend Ressourcen verfügten (mehr zu dieser Fehleinschätzung später), preiswert und verfügbar waren.

### Patches

Die Patches der ersten Generation werden leitend mit Energie versorgt, nutzen zwei weitere Leitungen für die Kommunikation und werden dafür auf ein entsprechendes Raster der Tapete aufgesteckt. Die Kontaktierung wird über vier Magnete hergestellt, die gleichzeitig den Patch an Ort und Stelle fixieren. Der Besondere Vorteil dieser Lösung ist, dass die Magnete eine korrekte Platzierung und Ausrichtung der Patches im Raster sicherstellen, da sie in ihrer Polarisierung entsprechend codiert sind. Auch sorgt die Anziehungskraft der Magnete für den

notwendigen Anpressdruck der Kontaktflächen, um den Übergangswiderstand auf ein hinreichend niedriges Niveau zu senken.

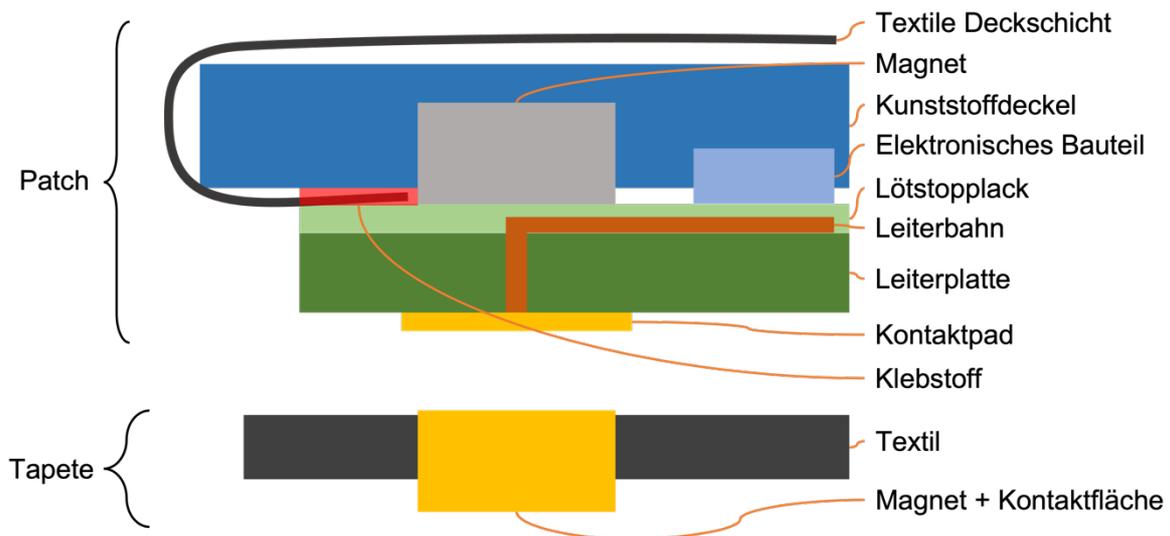


Abbildung 9 Vereinfachte Schnittzeichnung durch einen Patch älterer Bauart

Bei älteren Patches befanden sich die Magnete auf der Platine und ein auf der Gegenseite platziertes Pad stellte den Kontakt dar. Es zeigte sich schnell, dass die Vergoldung der Platinen nicht sehr haltbar ist, was einen der Gründe darstellte das Design dahingehen anzupassen, dass die Magnete in die Platine eingelassen und dort mit dieser verlötet wurden. Das hatte auch den Vorteil, dass die Patches deutlich stärker hafteten und sich die Bautiefe reduzierte – zudem konnte mit im Rahmen eingesetzten Magneten der gesamte Aufbau eines Patches einfach zusammengesteckt werden und Schrauben wurden unnötig.

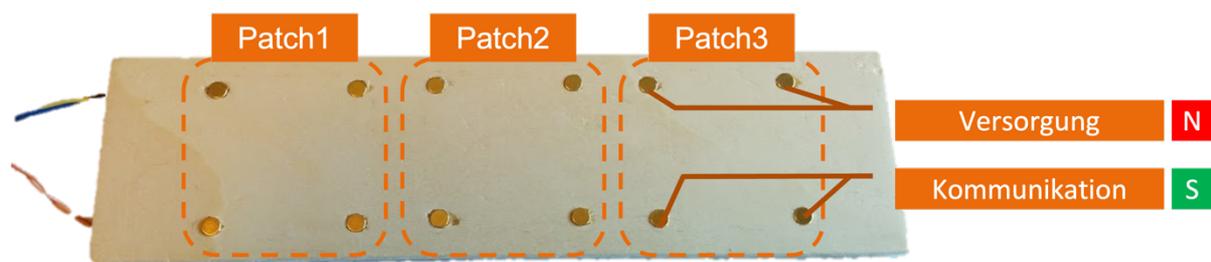


Abbildung 10 Patchfeld mit Kontaktraster - Prototyp auf Sperrholz

Vier Kontakte bedingen ebensoviele Auflagepunkte – wenn beide Flächen starr sind (dünnes Brettchen im Bild), führt dies dazu, dass durch geringe unvermeidbare Toleranzen in der Fertigung, zwei Kontakte stets unzuverlässig sein werden (vergleichbar mit einem wackelnden Tisch). Um dem zu begegnen, muss eine Seite mechanisch entkoppelt werden, was wir mit einem flexiblem Trägermaterial für das Kontaktraster umgesetzt haben. Die Magnete sind hier auf einer Folie aufgeklebt, die nur umlaufend am Rahmen fixiert ist und somit den Magneten minimalen Bewegungsfreiraum lässt, sich den Konturen der Patches anzupassen. Die Mag-

nete auf beiden Seiten sind vergoldet, was Korrosionsprobleme vermeidet aber auch die Lötbarkeit verbessert. Da Magnete nur bedingt temperaturbeständig sind, bevor sie ihre Magnetisierung einbüßen (Stichwort: Currie-Temperatur), ist das Löten mit Standardmitteln nicht realisierbar.

Das Material N45 ist nur bis zu einer Temperatur von 85°C einsetzbar. Das Finden der richtigen Technik, die ein möglichst kurzes Erwärmen des Magneten erfordert, ohne die Festigkeit der Lötstelle zu kompromittieren, in Kombination mit einer anschließend raschen Abkühlung des Magneten und der Verwendung speziellen bismuthaltigen Lots mit geringer Schmelztemperatur, waren der Schlüssel zum Erfolg. Die so konfektionierten Folien wurden dann hinter einer textilen vom DFKI gefertigten Deckschicht positioniert. Diese verbirgt einerseits die dahinterliegende Technik, ist aber auch notwendig, um Beschädigungen an den Patches zu verhindern. Das Zusammenschnappen der Magnete beim Anstecken auf das Patchfeld erzeugt hohe Kräfte, die mehrfach zum Versagen der Lötstellen zu den Magneten in den Patches geführt haben. Ein Nachteil des Speziallots ist die gegenüber gängigen Formulierungen erheblich reduzierte Festigkeit.

Der sehr hohe manuelle Arbeitsaufwand der Fertigung, die nur begrenzte Reduzierbarkeit der Dicke des Aufbaus, mangelnde Integrierbarkeit in textile Fertigung und nicht zuletzt der aus vielerlei Gründen zu beanstandende Materialaufwand durch die hohe Anzahl an verbauten Magneten, stehen dieser Lösung an Kritik gegenüber.

Weitere Komponenten neben den Mikrokontroller sind 4 individuell ansteuerbare RGB-LEDs, zwei Status-LEDs sowie ein Transceiver für RS485. Dieser Übertragungsstandard arbeitet mit einem differenziellen Signal und erhöht somit erheblich die Resistenz gegenüber Störeinflüssen, die zu Übertragungsfehler führen können. Die zwei goldfarbenen Rechtecke zur Rechten und Linken Seite, kontaktieren zur textilen Sensorik (siehe vorangegangenes AP). Es gibt zudem noch 4 weitere davon unabhängige Inputs für kapazitative Toucherkennung, die in der Button-Patch Software aber nicht verwendet wurden.

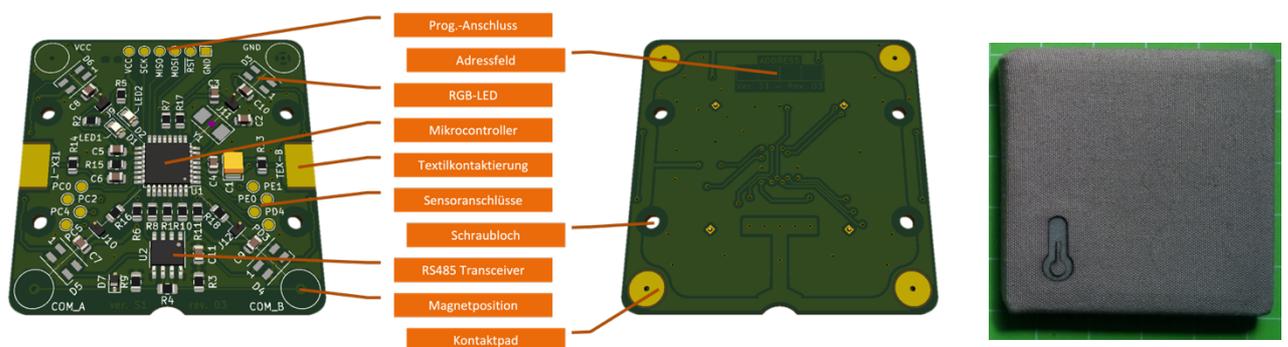


Abbildung 11 3D-Modell eines Patches älterer Bauart und fertiger Patch

Die Spannungsversorgung der Patches entspricht dem des Gesamtsystems bei 5V und stellt einen limitierenden Faktor bei Leistungsaufnahme eines Patches dar, was den Funktionsumfang einschränkt. Dinge wie Leuchten mit Strombedarfen von über einem Ampere sind damit nicht möglich, jedenfalls nicht mit dem Footprint eines einzelnen Patches. Das Raster ermöglicht jedoch grundsätzlich die Gruppierung von Kontaktgruppen und erlaubt so größere Patches, die über die höhere Anzahl an Kontakten auch mehr Energie beziehen könnten. Dies wurde jedoch nicht umgesetzt, auch, weil die Patchfelder recht klein sind.

Auch wenn die Magnete dem Nutzer sehr nachdrücklich die korrekten Rasterpositionen zur Platzierung vermitteln, kann mit Kraftaufwand einen Patch dennoch verkehrt platzieren – muss ihn jedoch an der Stelle halten, da er sonst abfällt. Die Elektronik ist so konzeptioniert, dass dies keine Schäden am System oder dem Patch verursacht.

Neben den auf vorigen Bilder bereits gezeigten Button-Patches, deren Funktion der eines simplen Tasters (mit einigen grundlegenden Gesten und Statusdarstellung) entspricht, wurden noch die Konzepte einiger weiterer Typen betrachtet und teilweise prototypisch umgesetzt.

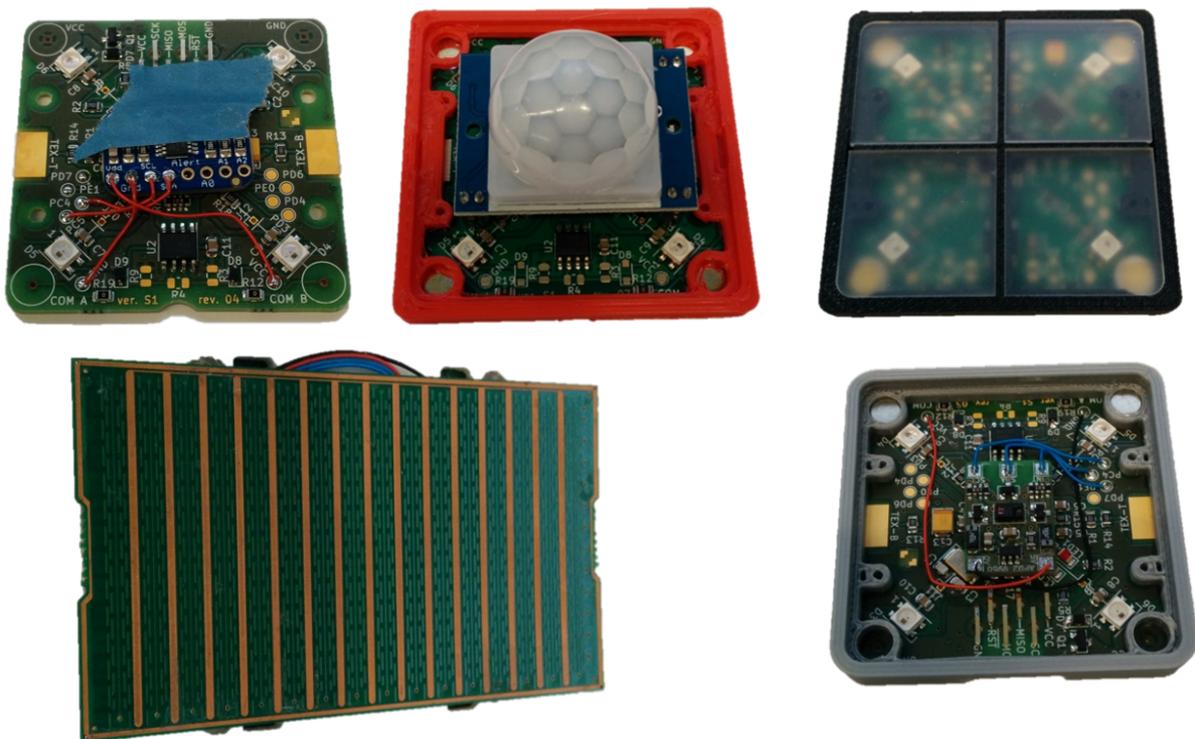


Abbildung 12 Prototypen von Temperatur-, Bewegungs-, Benachrichtigungs-, Touch- und Gestenpatches

- Temperatur-Patch: Ein Umgebungssensor ohne Interaktionsmöglichkeiten. Sammelt passiv Daten, die zu Steuerungszwecken genutzt werden können.
- Bewegungs-Patch: Ein Patch mit einem PIR-Bewegungsmelder. Einsetzbar bswp. Zur Lichtsteuerung.

- Benachrichtigungs-Patch: Kann mit einem Cover ausgestattet werden, das bis zu 4 Symbole zeigt, die individuell aufleuchten können. Zur Darstellung beliebiger Informationen nutzbar.
- Touch-Patch: Verfügen über ein Touchfeld, wie man es von Notebooks kennt. Erlauben komplexere Gesten wie z.B. Wischen für eine höhere Interaktionstiefe. (Details in TAP4.4)
- Gesten-Patch: Sind mit einem Infrarotsensor ausgestattet und können berührungsfrei Handgesten, wie z.B. Wischen erkennen. Sind ebenfalls dazu in der Lage Umgebungshelligkeit und Farbe zu messen.
- Leucht-Patch: Keine über die Grundversion hinausgehenden Hardwaremerkmale. Angepasste Firmware verwandelt diesen Patch in ein schaltbares Beleuchtungselement.

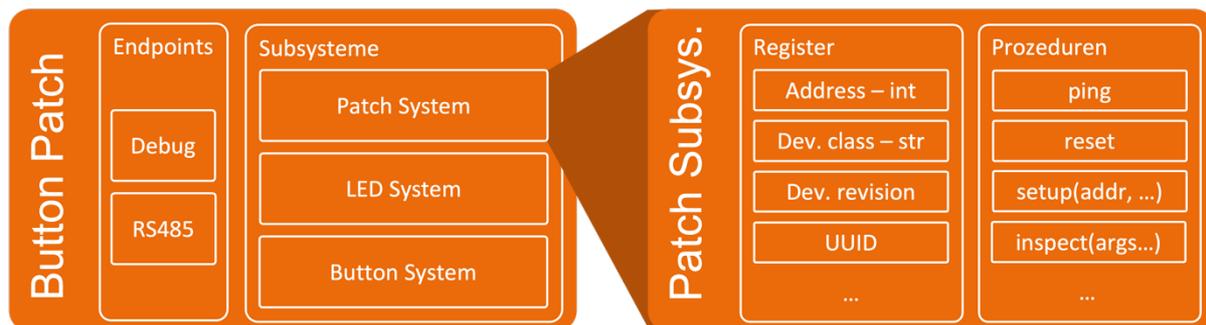


Abbildung 13 Eine kleine Auswahl aus der Hardwareevolution. Es gibt insgesamt 8 Revisionen, mit teils unterschiedlichen Versionen und Ausstattungen – allein in S1

### Firmware

Die Firmware von Patches und Gateway ist eine 100%ige Eigenentwicklung, programmiert in C, ohne externe Abhängigkeiten. Dieser Weg wurde eingeschlagen, um die maximale Kontrolle über die Hardware zu erhalten, denn das populäre Arduino-Suite nimmt mitunter sehr umfangreiche Konfigurationen vor, die mit Kontrollverlust, zusätzlichen Einschränkungen und einem nicht unerheblichen Ressourcenverbrauch einhergehen. Die Idee dies mit Rust umzusetzen, wurde nach einigen Versuchen verworfen, weil der Hardwaresupport der (bisher nur inoffiziell verfügbaren) „Crates“ zu rudimentär war.

Die Firmware besteht aus modularen Komponenten die als austauschbare Subsysteme in ein Framework eingebettet sind. Das erhöht die Wiederverwendbarkeit und erleichtert Entwicklung und Tests. So ist die Firmware des Button-Patches eine Aggregation der Systeme „Button“, „LED“ und des obligatorischen „Patch“-Moduls. Jedes Subsystem besteht aus einer Menge an Registern, Kontrolllogik (Zustandautomaten und Laufzeitroutinen), sowie Prozeduren, die beide über eine Protokollschnittstelle von außen zugänglich sind.



Dieses Protokoll ist ASCII-basiert, daher Menschenlesbar und verwendet eine einfachen Syntax. Ein Befehl besteht dabei immer aus einer Pfadangabe zu der referenzierten Entität (System, Register, Prozedur), einem Operator und optionalen Argumenten. Das Schema zum Aufbau eines Datagramms lautet: <Addr.>:<Subsys.>.<Entität><Operation>[Argumente 1..n] → <Antworttyp><Wert>

Gültige Operationen sind: ! (Prozeduraufruf); ? (Registerabfrage); = (Registerzuweisung)

Jede Anfrage wird mit einer Antwort quittiert. Dies ist eine von zwei Typen: \* (Wertübermittlung); # (Statuscode, alles != 0 sind Fehlercodes)

Einige beispielhaft Anfragen und die Systemantwort:

- 123:patch.ping! → #0, 'OK'
- 123:patch.address? → \*123
- 123:patch.firmware\_version? → \*'0.1alpha-5'
- 123:patch.address=124 → #13, 'Register is not writable!'
- 123:test.add! 3 4 → \*7
- 123:test.add! 3 4 3 → #8, 'Number of Arguments mismatch!'

Das Protokoll ist typsicher und prüft alle Eingaben auf Typ und Wertgrenzen. Es gibt eine zweistellige Anzahl an feingranularen Fehlercodes samt Textbeschreibung.

Für die Hardware wurde eine angepasste Version des Open Source Bootloaders Optiboot erstellt. Hiermit kann eine neue Firmware direkt über die Debugschnittstele geflasht werden und es wird kein ISP-Programmer mehr benötigt. Außerdem schafft dies einen gewissen Schutz vor fehlerhafter Programmierung. ISP mit fehlerhaften Baudraten, falschen Fuse-settings oder inkorrekten Parametern kann sonst leicht zu Hardwareschäden führen und den Patch unbrauchbar machen. Nachteilig ist die Verzögerung durch die Bootsequenz; bis das Hauptprogramm übernimmt, befindet sich die restliche Hardware in einem uninitialisierten Zustand. Neuere Patches verfügen deshalb über zusätzliche Bauteile, um den Transceiver vom Bus abzukoppeln, damit ein bootender Patch keine Glitches in der Kommunikation anderer Teilnehmer erzeugt.

### *Programmieradapter*

Die Firmware der Patches war ständiger unter Weiterentwicklung, sodass häufiges Aktualisieren notwendig war. Die große Anzahl vorhandenen Patches machte ein effizientes und

robustes System erforderlich. Entwickelt wurde hierzu ein Gerät, auf das ein Patch aufgelegt werden kann, um auf folgende Schnittstellen desselben zuzugreifen.

- Debugschnittstelle: Ermöglicht das Ausführen sämtlicher Kommandos und Abfrage der internen Register. Serielle Schnittstelle ist größtenteils funktionsgleich mit dem normalen Netzwerkport, erlaubt aber einige besondere Befehle. Zusätzlich werden hier aber auch Debugausgaben und Events angezeigt, die nicht über die normale Netzwerkschnittstelle zugänglich werden. Spätere Patches verfügen über einen angepassten Bootloader und können hierüber auch bequem programmiert werden.
- Netzwerkschnittstelle: Die normale RS485 Schnittstelle des Systembusses.
- ISP-Port: Low-Level Zugriff auf den Controller, dessen Speicher und CPU- und Peripherie-Register. Wird zum initialen Flashen des Bootloaders und Brennen der Konfigurationsbits (Fuse-Bits) benötigt.
- Hardware-Reset: Startet Bootsequenz und anschließend Programmiersequenz bzw. Hauptprogramm.

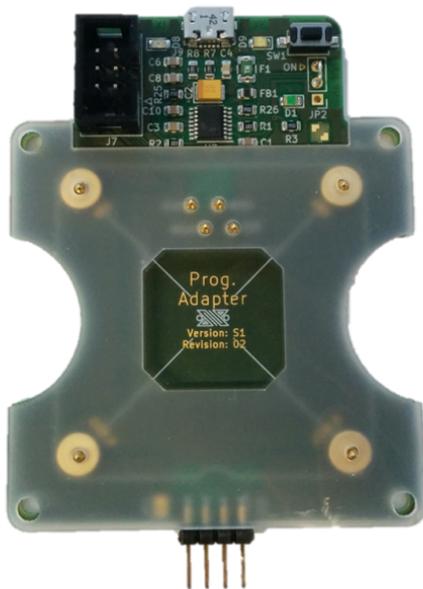


Abbildung 14 Programmier- und Testadapter für Patches

Der Patch wird magnetisch automatisch auf dem Adapter zentriert und über Federkontakte kontaktiert. Derer gibt es insgesamt 8, vier die auf die Magnetkontakte verbinden, die normalerweise Kontakt zur Tapete herstellen und durch mit der Platine verklebte Magnete mit Zentralbohrung geführt werden; die restlichen verbinden zu einem engen Raster von Pads auf der Platine. Zum Schutz der empfindlichen Kontakte gegen seitliche Belastung ragen diese nur ein winziges Stück durch eine Deckplatte aus gelasertem Acrylglas heraus.

Die Stromversorgung von Adapter und Patch erfolgt über einen Micro-USB-Anschluss, die serielle Kommunikation durch einen integrierten Wandlerbaustein von FTDI. Status-LEDs machen die Übertragung von Daten in beide Richtungen sichtbar.

Es ist ein manueller Resetknopf vorhanden – eine ein/ausschaltbare zusätzliche Schaltung generiert den notwendigen Resetimpuls zur seriellen Programmierung über den Bootloader auf Wunsch selbstständig. Ein vierpoliger optional bestückter Stecker erlaubt den Anschluss eines Gateways und einfaches Mitschneiden des Datenstroms zu Debugzwecken. Für In-Circuit Programmierung verfügt der Adapter über einen standkonformen 6-poligen Wannenstecker, der bspw. mit dem AVR-ISP MkII verwendet werden kann.

### Gateway

Das Gateway dient als Vermittler zwischen den Patches einer Domäne (eine Tapetenbahn, bzw. hier einem Patch-Feld) und dem Backend. Zusätzlich nimmt es noch Verwaltungsaufgaben wie die Arbitrierung, Adressverwaltung-/zuweisung/auflösung wahr. Es kommuniziert über eine serielle Schnittstelle mit dem Backend, die über eine USB-Verbindung zur Verfügung gestellt wird. In der ersten Version wurde hierüber auch die Energie zur Versorgung der Patches bezogen – nachdem sich aber negative Auswirkung auf die Systemstabilität offenbarten (auch wenn die Stromaufnahme aus dem Host laut USB-Spezifikation nie überschritten wurde), wurde dies über einen Bypass ausgeschleift und direkt aus dem Netzteil bezogen. Eine Schaltung, welche der Überwachung der Stromaufnahme und der Abschaltung bei Überlast dienen sollte, wurde wegen technischer Schwierigkeiten (Metastabilität und zu empfindliches Ansprechverhalten bei Lastspitzen) vorerst unbestückt gelassen. Die Begrenzung wird behelfsmäßig von einer selbststrückstellenden Sicherung übernommen.

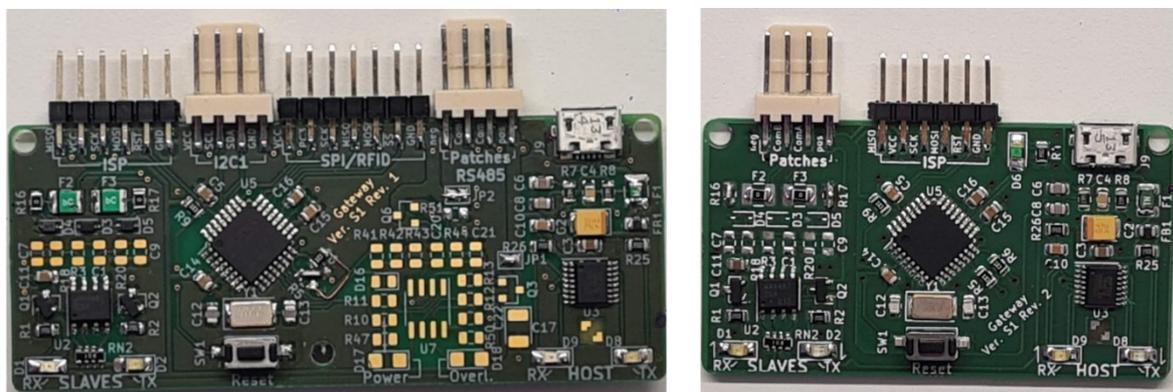


Abbildung 15 Gateway Revision 1 & 2

Auf dem Gerät kommt der gleiche Controller wie auf den Patches zum Einsatz – eine Entscheidung die sich später als problematisch herausgestellt hat. Der ATmega328PB verfügt mit seinen 4KB SRAM nur über unzureichende Ressourcen, weswegen die Anzahl an gleichzeitig nutzbaren Patches an einem Gateway auf 4 begrenzt werden musste. Die später geplante Transition auf den ATmega4809 wurde wegen Beschaffungsproblemen, aber insbesondere auch wegen der Vielzahl an bekannten technische Hardwareproblemen (und dem Wissen, dass das offizielle Erratum sehr unvollständig ist) vorerst nicht durchgeführt.

Weiterhin findet sich der identische RS484-Tranceiver wie er auch auf den Patches verbaut ist auf dem Board, ist aber zusätzlich mit einer AC Terminierung und zusätzlicher Schutzschaltung mit Supressordioden und Polyfuses ausgestattet.

Als weitere Merkmale sind ein Reset-Knopf und neben den Anschlüssen für Host-USB, Programmieranschluss und dem Stecker zum Patchfeld, noch zwei weitere Ausgänge für I2C und SPI Busse vorhanden. Wegen Nichtverwendung wurden die letzteren beiden bei der 2. Revision eingespart, zudem gab es einige Fehlerbehebungen.

## S2

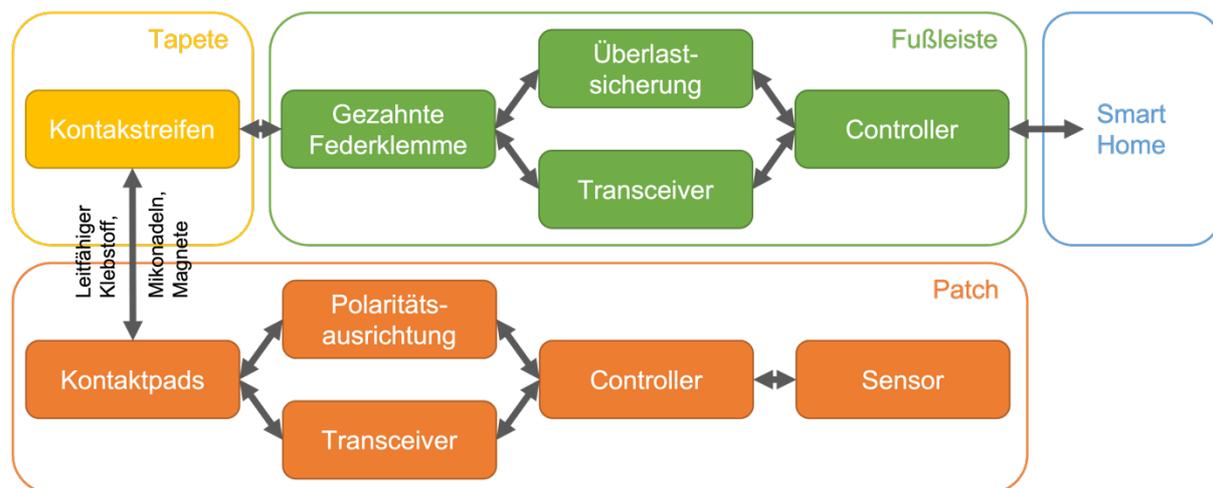


Abbildung 16 Blockdiagramm des S2-Systems

Mit diesem Entwicklungsschritt wird die Projektdefinierende Vision eines textilen Wandbelags mit vollständig frei platzierbaren Patches angegangen. Das magnetische Raster des Vorgängers wird durch eine textilintegrierte Leiterstruktur ersetzt, welche die Patches über eine geeignete Elektrodenanordnung kontaktieren. Die Unterseite der Patches ist mit wabenförmigen Elektroden in 4er-Gruppen ausgekacht, deren Geometrie auf die der streifenförmigen Leiterbahnen in einer Weise abgestimmt ist, dass sich unabhängig von der Positionierung, eine Überdeckung von mindestens zwei der vier Elektroden, mit zwei unterschiedlich polarisierten Streifen ergibt. Feinanpassung der Abstände und Durchmesser bilden einen Kompromiss aus minimal garantierter Überdeckung und der Robustheit gegenüber Dimensionsungenauigkeiten des Textils und einer schiefen Positionierung des Patches. Ein zu starkes Verkippen beim Aufstecken verursacht Kurzschlüsse, die von der Elektronik erkannt werden müssen, um Schäden zu vermeiden. Ein Patch muss mindestens einer solchen Kachel Platz bieten, kann darüber hinaus aber jede Form und Größe annehmen. Größere Patches haben auch eine größere Kontaktfläche und können somit mehr Strom aus der Tapete beziehen – praktisch für bspw. Displays oder Leuchtelemente.

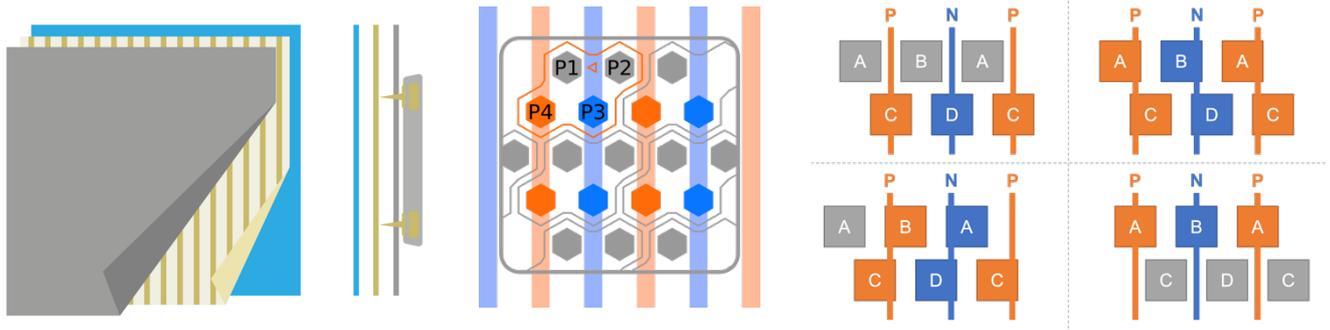


Abbildung 17 Schichten der Tapete und Seitenansicht; Anordnung der Elektroden am Patch und die sich aus der Positionierung ergebenden Anordnungsmöglichkeiten

Die konkrete elektrische Kontaktierung zwischen Patch und Tapete erfolgt über Mikronadeln. Diese sind so kurz, dass sie in das Textil eindringen, es aber nicht durchstoßen und mit ihrer kurzen Länge somit auch keine Gefahr beim Handling durch den Anwender für diesen darstellen. Die Inspiration hierfür stammt aus dem medizinischen Bereich, in dem sog. Microneedle Arrays klebstofffreie Pflaster ermöglichen, die sich schmerzfrei in den oberen Hautschichten verankern und auch als Elektroden oder zur Abgabe von Medikamenten dienen können. Was diese Lösung besonders ansprechend macht, ist die Möglichkeit die Leiterbahnen innerhalb der Tapete zu verstecken. Schwierig ist es eine ausreichende Haftung allein mit Nadeln zu erreichen. Wir haben uns mit der Zuhilfenahme von Magneten im Patch beholfen, die in Kombination mit einem magnetischen Anstrich auf der Wand den Halt stark verbessern. Wir halten es aber für durchführbar auf diese zugegeben recht unschöne Lösung zu verzichten, indem entweder die Nadeln sich über eine entsprechende Form (z.B. Verjüngung hinter der Spitze) besser im Textil verankern oder über einen Mechanismus schräg aus unterschiedlichen Richtungen in das Textil getrieben werden. Auch Ansätze ähnlich von Klett-samen mit ihren Widerhaken scheinen vielversprechend. Obwohl es viele solcher Systeme bereits gibt (z.B. den Klettverschluss), ist die Schwierigkeit dies mit den elektrischen Ansprüchen zu vereinen. Dies ist nicht trivial und konnte im Rahmen dieses Projektes nicht in der nötigen Tiefe erforscht werden.

Ebenfalls in Betracht gezogen wurden leitfähige Klebstoffe, aber nach positiven Versuchen mit dem Ansatz Nadeln – auch wegen der potenziellen Nachteile einer klebstoffbasierten Lösung (Abnutzung, Rückstände, Haftung, Leiter müssten auf der Tapete liegen) nicht weiterverfolgt. Eine weitere in Betracht gezogene semipermanente Befestigungslösung basierte ebenfalls auf dem Nadelprinzip, aber mit deutlich längeren und stärkeren Nadeln, die in die dahinterliegende Wand eindringen und somit eine sehr viel belastbarere Verbindung herstellen. Die Idee war, dass robuste Ramen, ausgestattet mit Stahlstiften mit einem Hammer in die Wand getrieben werden und der Patch dann auf diesem Befestigungspunkt aufgesteckt wird.

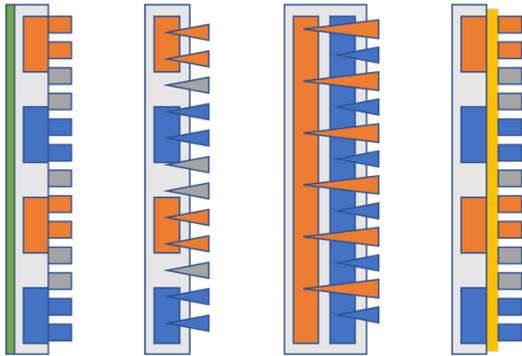


Abbildung 18 Unterschiedliche Kontaktierungskonzepte: Magnetische Schicht, Mikronadeln und Klebstoff

Ein Problem an dem Streifenrasterkonzept ist, dass die Anzahl korrespondierender Kontakte am Patch quadratisch mit der Zahl Leitungen wächst, die es zu kontaktieren gilt. Bei mehr als zwei Leitungen wird dies viel zu aufwendig. Deswegen musste eine Lösung gefunden werden Energie und Daten über ein Leitungspaar zu übermitteln. Die Lösung ist den Datenlink auf ein Hochfrequenzsignal zu modulieren und dem Gleichstrom der Versorgung zu überlagern, was als Trägerfrequenzmodulation bekannt ist. Die Wahl der Trägerfrequenz stellt einen Zielkonflikt dar, den folgende Tabelle zu veranschaulichen versucht.

	Niedrige Freq.	Hohe Freq.
EMV (Elektromagnetische Verträglichkeit)	besser	schlechter
Mögl. Datenraten	geringer	höher
Techn. Anspruch	einfacher	schwieriger
Physische Größe	größer	kleiner

Letztendlich fiel die Wahl auf einen Träger von 1Mhz. Dieser stellt einen akzeptablen Kompromiss zwischen erzielbaren Datenrate und Hardwareanforderungen dar. Weil der Bus, auf dem die Patches kommunizieren prinzipbedingt nicht terminiert ist, kommt es zwangsläufig zu Signalverschlechterungen durch Effekte wie Reflektionen an den Enden der Leiterbahnen. Die hohe Wellenlänge bei 1Mhz macht den Effekt gerade noch vernachlässigbar. Um den Einfluss von etwaigen Übertragungsfehler auf die Kommunikation zu begrenzen, wurde das Protokoll um Prüfsummen erweitert. Eine 8Bit lange CRC (cyclic redundancy check) Wird jedem Datagramm angehängen.

Was hier keine Berücksichtigung findet, sind rechtliche Rahmenbedingungen. Im Sinne der Gesetzgebung zur Elektromagnetischen Verträglichkeit. Dies dürfte bei einem Produkt natürlich nicht außer Acht gelassen werden. Es bietet sich hier geg. an die Übertragungsfrequenz

ein ISM-Band zu verschieben, das die Regularien hier weniger streng sind. Allerdings ist hier auch mit mehr Störungen zu rechnen und die Frequenz ist mit knapp über 13MHz im nächstliegenden Frequenzband deutlich höher (und damit schwieriger zu handhaben).

Bei der Modulation handelt es sich um eine Trägerumtastung, eine Form der Amplitudenmodulation die als OOK (On-Off-Keying) bezeichnet wird. Das Trägersignal wird von dem Controller als Pulsweitenmoduliertes Signal mit 50% Duty-Cycle generiert und mit einem Gatter, das als Leistungstreiber dient, mit dem Datensignal gemischt. Ein auf die Frequenz abgestimmter schmalbandiger PI-Filter eliminiert die störenden Oberwellen und rekonstruiert ein annähernd sinusförmiges Signal, die über einen Transformator potenzialgetrennt und dann kapazitativ auf den Bus gekoppelt wird.

Der Empfänger ist als einkreisiger Geradeausempfänger ausgeführt, um es mit den Worten der zeitgenössischen Literatur auszudrücken, aus der viel Inspiration für das Design stammt. Das Problem an den 1MHz-Träger ist, dass dieser in den Rundfunkbereich der sog. Mittelwelle fällt – ein Band, das seit langem technisch obsolet ist. Aus diesem Grund ist die Lektüre überwiegend sehr alt und oftmals noch auf Röhrentechnik bezogen, moderne Halbleiter für diese Anwendung gibt es praktisch nicht und ältere werden schon lange nicht mehr hergestellt. Transistoren zu finden, die in dem Bereich wie gewünscht operieren erforderte eine Menge Ausprobieren, denn eine Spezifizierung für diese Anwendung findet i.d.R. nicht mehr statt und ist in den Datenblättern nicht angegeben.

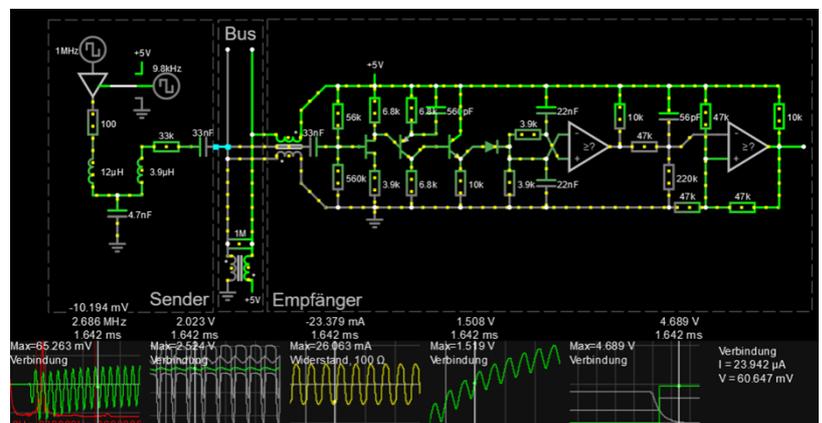
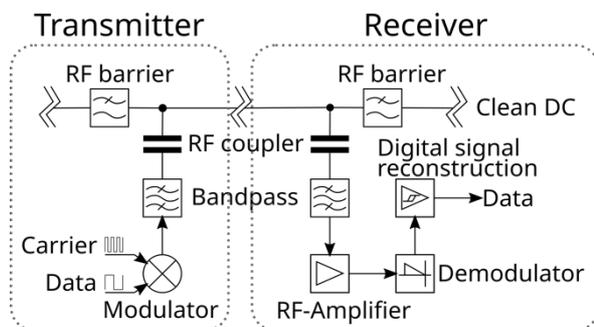


Abbildung 19 Blockschaltbild der Transceiverstufe und eine Simulation der vereinfachten Schaltung

Auf Empfängerseite wird der AC-Anteil des Bussignals ausgekoppelt und über einen präzise vorgespannten Hochfrequenz-JFET gepuffert, damit die Pegelabschwächung den Empfang anderer Stationen nicht zu stark beeinträchtigt. Ohne diese Maßnahme wären nur wenige davon an einem Bus möglich. Im Anschluss wird das Nutzsignal über einen zweistufigen selektiven Verstärker verstärkt. Dieser verfügt über einen eigenen Schwingkreis, um störende Frequenzkomponenten zu unterdrücken. Diese Konstruktion aus FET und Bipolartransistoren

nennt sich BIFET-Verstärker und kombiniert die Vorteile einer sehr geringen Quellenbelastung, mit hoher Verstärkung und geringer Ausgangsimpedanz. Der Verstärkungsfaktor ist dabei recht hoch gewählt, damit auch bei schwachem Pegel noch empfangen werden kann (Pegel muss über Flussspannung der Diode liegen, aber nicht so hoch, dass die Verstärker in Sättigung gehen), was den Transistor in den nichtlinearen Bereich treibt. Weil das Nutzsignal aber digital ist, stören die Verzerrungen nicht. Das verstärkte Nutzsignal wird nun über einen Spitzendemodulator von seiner Trägerfrequenz befreit und gleichgerichtet. Tiefpassfilter und Komperatorschaltungen mit schwacher Hysterese rekonstruieren nun das Digitalsignal. Bei ausreichend niedrigen Baudrate hat der durch die Einschwingzeiten der Filter eingefügte Jitter keine großen Auswirkungen auf Qualität des USART-Signals. Ergebnisse hierzu finden sich weiter unten.

Um ein Verschleppen des Hochfrequenzsignals in die Versorgung der Elektronik zu verhindern und gleichzeitig Störungen von diesen auszufiltern, ist jede Station mit einer HF-Sperre ausgestattet. Sie muss eine ausreichende Impedanz aufweisen um das Störsignal genügend zu bedämpfen, gleichzeitig aber den gesamten Strom der Schaltung tragen können. Dies bedingt bei niedrigen Frequenzen normalerweise eine große Bauform, für die die Patches jedoch keinen Platz bieten. Die Lösung war die Verwendung einer Gleichtackdrossel, die „verkehrt“ herum angeschlossen, eine sehr hohe Induktivität für Gegentaktstörungen darstellt und dabei mit wenigen Windungen Draht auf einem Ringkern auskommen, was sie kompakt und niederohmig macht.

### *Fußleiste*

Fußleisten bieten die Möglichkeit die Kontaktierung der Tapete zu verstecken und können zusätzlich die notwendige Elektronik beherbergen. Die Herausforderung hierbei waren:

- Eine kompakte Gestaltung, sodass alles möglichst in ein schmales Profil hineinpasst
- Einfache Installation durch den Anwender
- Zuverlässige Kontaktierung der Leiterbahnen in der Tapete
- Keine Beschädigung der Tapete, keine Kurzschlüsse

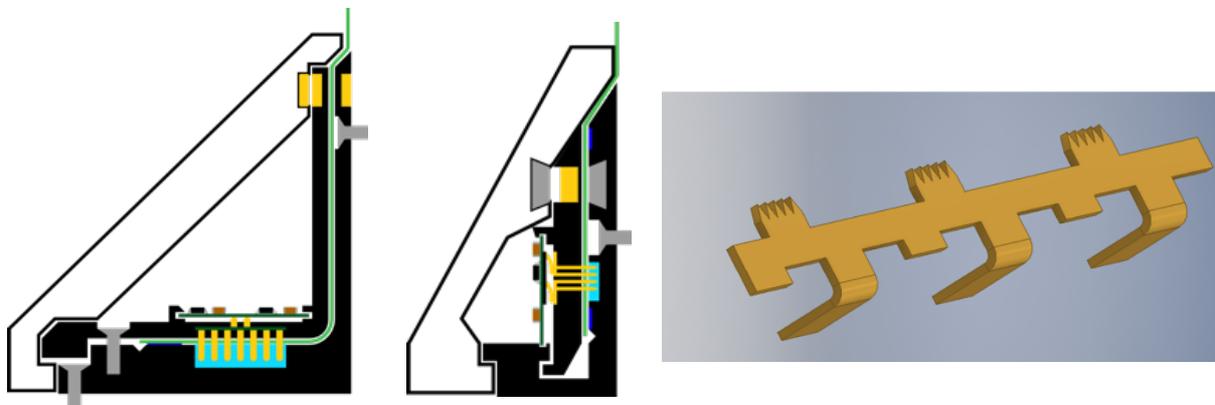


Abbildung 20 Querschnitt Fußleiste Entwurf A und B, sowie CAD-Modell der Zahnleisten

Die Skizzen zeigen Entwürfe, wie eine solche Fußleiste aufgebaut sein könnte. Sie besteht aus einem Wandprofil, das mit Dübeln festgeschraubt oder geklebt wird. Wenn dann die Tapete (Grün) an die Wand gebracht wird, wird diese in das Profil geführt, auf den Klebestreifen (blau) angedrückt und bündig mit einer eingelassenen V-Nut abgelängt. Anschließend wird ein Schlitten in das Profil eingesetzt, welches die Elektronik und Kontakte trägt und mit dem Profil verbunden. Die erste Version erledigt dies mit Schrauben+Magneteten, da nicht durch die Tapete geschraubt werden darf. Der zweite Entwurf schwenkt den Einsatz über einen Anhebel in das Profil und verlässt sich rein auf Magnetkraft. Abgeschlossen wird das Ganze mit einem aufgesetzten Verblender, der in verschiedenen Designs erhältlich sein könnte; ganz so, wie es jetzige Systeme schon bieten.

Die elektrische Verbindung zwischen Platine und textiler Leiterbahn wird über Blechstreifen hergestellt. Diese sind in Nuten der Fußleiste leicht federnd eingelegt und durchstoßen mit ihren scharfen Zähnen die obere Textilschicht. Konzept, Entwurf und Herstellung dieser ersten Version erfolgte direkt am IFAM, wo wir über eine Anlage zum sehr präzisen Laserschneiden von Dünoblechen verfügen. Diese war in der Lage die für die Funktion unabdingbaren scharfkantigen Strukturen präzise herzustellen. Beim Material selbst handelt es sich dabei um 0,5mm starkes halbhartes Messingblech, welches wegen seiner mechanischen und elektrischen Eigenschaften gewählt wurde.

Es wurde ein CAD-Modell einer Fußleiste erstellt, das sich aus handelsüblichen Aluminiumprofilen fräsen lässt (einzig das Rundprofil ist problematisch) und als 3D gedrucktes Modell getestet.

Die Fertigstellung der Entwicklung der Fußleiste wurde später an InTex übertragen, auf deren Projektbericht wir für die finale Hardware verweisen möchten.

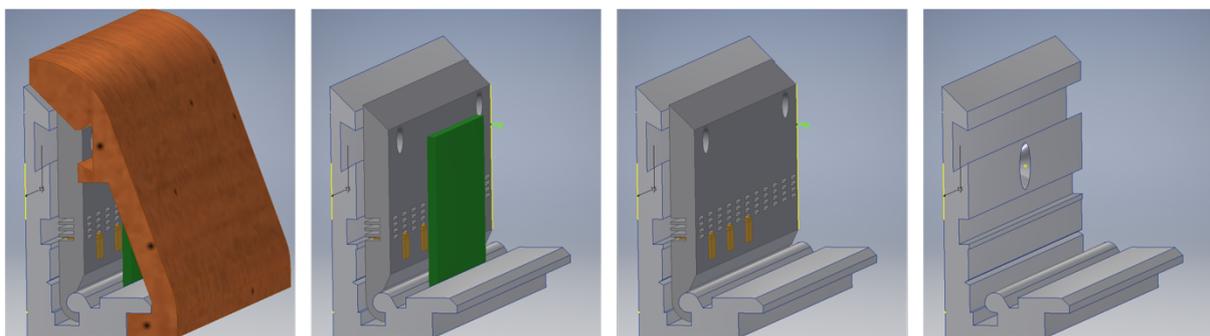


Abbildung 21 3D CAD Entwurf der vorangegangenen Skizzen

## Patches

Die S2 Patches sind in ihren Funktionen größtenteils gleichwertig mit den älteren Modellen zu betrachten. Die Touch- und Leuchtfunktionen sind erhalten geblieben, aber der Controller ist deutlich leistungsfähiger geworden.



Abbildung 22 Elektrodenraster, Elektronikmodul und Blockdiagramm der darin enthaltenen Komponenten

Neu an Bord sind folgende Funktionsblöcke:

- 4-Wege-Gleichrichter:  
Die sich aus der Kontaktgeometrie ergebenden Möglichkeiten zur Polarisierung müssen korrigiert und auf einen deterministischen Output gebracht werden. Die 4 Kontaktgruppen müssen dafür auf zwei Leiter konsolidiert werden. Die entstandene Schaltung haben wir 4-Wege-Gleichrichter getauft.  
Einfache Dioden haben den Nachteil, dass sie einen Spannungsabfall verursachen. Bei Si-Dioden sind dies  $\sim 0,6V$ , also in Summe  $1,2V$ . Bei 5V Versorgung sind die Verluste somit erheblich. Deswegen wurden MOSFETs als Gleichrichter verwendet, die einen sehr geringen ohmschen Widerstand ausweisen. Die Schaltung wird dadurch aber auch komplexer, insb. wenn auch höhere Eingangsspannungen ab ca. 10V aufwärts verarbeitet werden sollen. Schuld hieran ist die nur geringe Spannungsfestigkeit des Gates, welches mit Spannungsteiler und Z-Dioden geschützt werden muss.

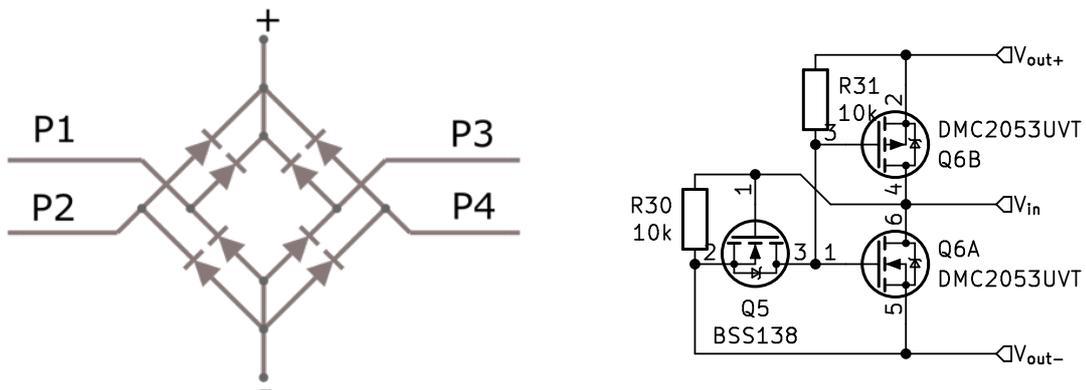


Abbildung 23 Prinzip: 4-Wege-Gleichrichter und Äquivalentschaltung für einen Zweig (von 4) bis max. 10V

- Spannungswandler:  
Patches der 2. Generation waren dann auch nicht mehr den Beschränkungen einer 5V-Versorgung unterworfen, was ihnen eine deutlich erhöhte Leistungsaufnahme gestattet. Zur Versorgung der Digitallogik sind sie mit einem Schaltwandler ausgerüstet.

- Modem:  
Die AVR-DB-Familie verfügt über einige integrierte Analogfunktionen, darunter zwei vollständige Operationsverstärker samt einstellbarer Spannungsteilernetzwerke. Diese zu nutzen, hat den externen Bauteil Aufwand deutlich reduzieren können. Das Bild zeigt zum ersten den Schaltplan des Transceivers und reale Messungen an einem fertigen Modul (vgl. Simulation).

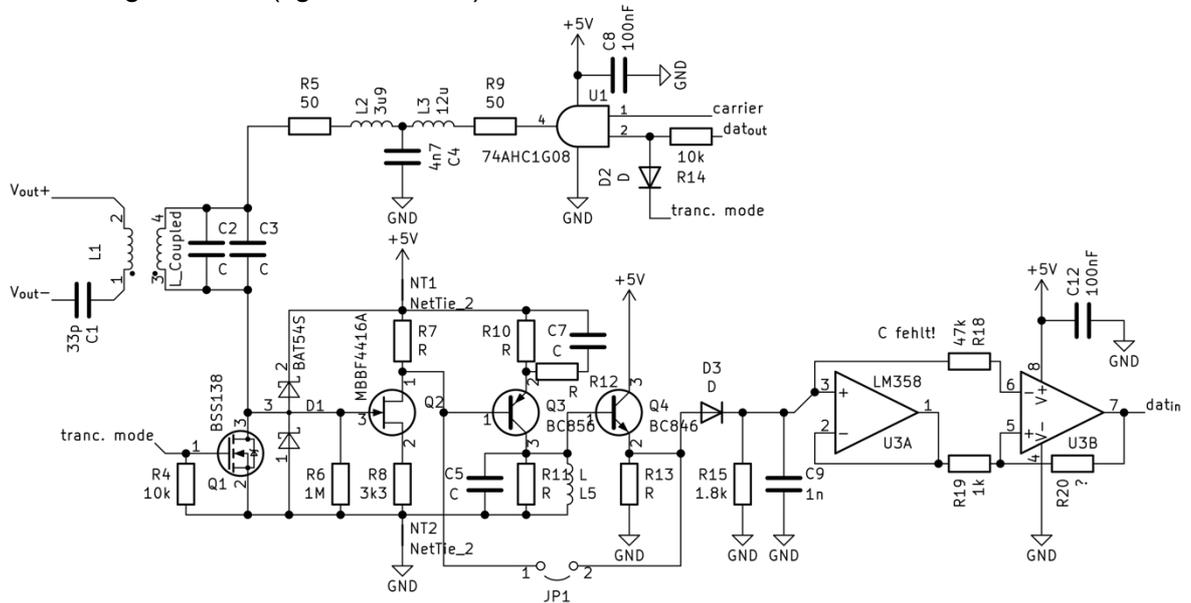


Abbildung 24 Schaltplan des Modems – Erzeugung des Trägers und digitale Auswertung geschieht im Controller



Abbildung 25 Demodulation und -codierung eines empfangenen Signals, gemessen an echter Hardware

## Gateway

Das S2 Gateway erfüllt die gleichen Funktionen und Schnittstellen wie das vorangegangene Modell und ist somit mit der Interfacesoftware kompatibel. Es gibt jedoch weitreichende Erweiterungen an Hard- und Firmware.

Zum einen ist der Controller gegen eine leistungsfähigere Variante mit deutlich mehr RAM ausgetauscht worden, den AVR128DB28.

Die Beschaffungsprobleme der USB-Transceiver und Mikrokontroller haben sich zum Projektende derart verschärft, dass auch die als Ausweichoptionen nicht mehr erhältlich waren. Es konnten daher nicht alle Projektpartner mit Hardware versorgt werden und es wurde davon abgesehen, die finale Version auf Leiterplatten herzustellen. Es existiert daher nur ein Prototyp als Steckbrettaufbau mit einer Firmware, die etwa ein Dutzend Patches gleichzeitig verwalten kann.

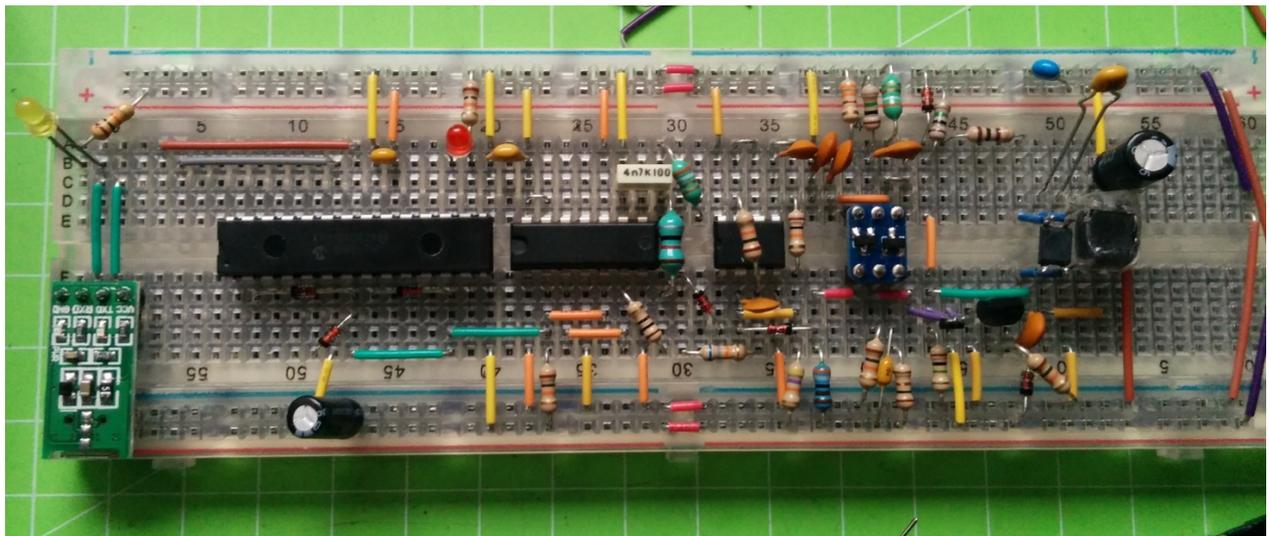


Abbildung 26 Prototyp des S2 Gateways auf Steckbrett

Die Modem/Transceiver-Schaltungen sind baugleich mit denen der Patches, erweitern diese jedoch um ein Terminierungsnetzwerk für den Bus. Dies verbessert geringfügig die Signalintegrität durch die Dämpfung von Reflexionen.

Die elektronische Sicherungsfunktion ist für S2 von noch deutlich höherer Bedeutung, da ein fehlerhaftes Aufsetzen eines Patches leicht Kurzschlüsse erzeugen kann. Die Schaltung ist gegenüber der ursprünglichen Version deutlich überarbeitet und funktioniert nun zufriedenstellend. Es findet eine konstante Überwachung der Stromaufnahme des Busses statt und bei Überschreitung eines einstellbaren Niveaus wird dieser umgehend abgeschaltet, noch lange bevor Schäden auftreten können. Das Gateway versucht dann in regelmäßigen Abständen das System neu zu starten. Das Leistungsbudgets wird mit jedem registrierten Patch sukzessive erhöht; die Idee dabei ist, dass Patches erst bei erfolgter Anmeldung den vollen Strom beziehen dürfen. Spätere Hardware könnte dabei Leistungsprofile übermitteln, um genauere Kenntnisse über die zu erwartenden Lastflüsse zu erhalten. Die unvermeidbaren Stromspitzen beim Initialisieren der Busteilnehmer (Laden der Entkopplungskapazitäten) werden von

der Sicherungsschaltung auf das Maß des eingestellten Maximalstroms begrenzt, solange die Schaltung im Reset gehalten wird.

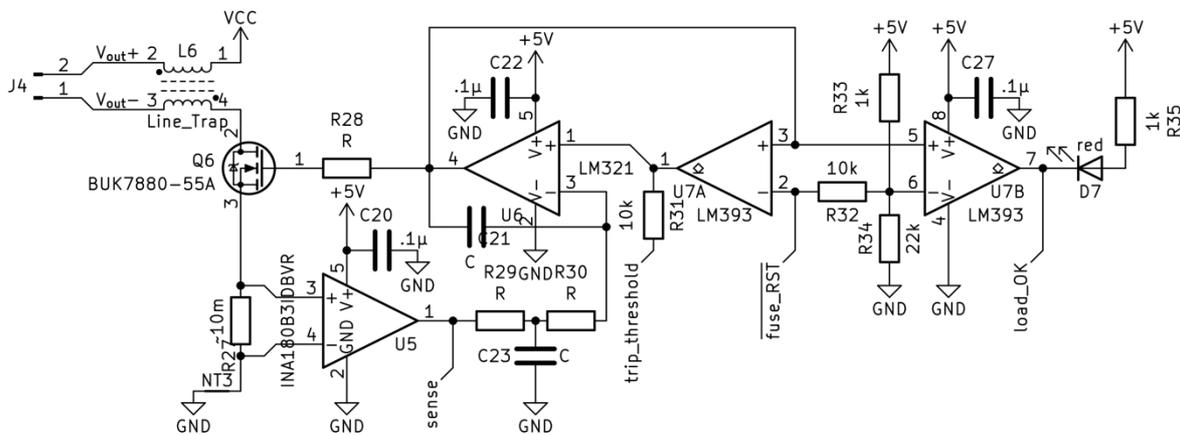


Abbildung 27 Stromüberwachung und Begrenzung

#### II.1.4.2 TAP 4.2 Strom- und Datenverbindung für Verbindungsmodulare für Smart Home Geräte

Weil alle Funktionen entweder als Patches verwirklicht oder noch als getrennte Module in den Demonstrator integriert wurden, ist dieses TAP obsolet geworden.

#### II.1.4.3 TAP 4.3 Hardware/Software zur Kommunikation mit Smart Home Zentralen

Die Implementierung der Backendsoftware befand sich im Verantwortungsbereich des CPS, jedoch hat das IFAM das Softwaremodul zur Anbindung zwischen diesem und dem ConText-Gateway bereitgestellt. Dieses kümmert sich um die Initialisierung und Überwachung der Kommunikation, Scheduling von Anfragen und Implementierung der Flusskontrolle, Bereitstellung der Treiber für die unterschiedlichen Device-Typen und Verwaltung der Subscriptions für diese, sowie Übersetzung der dynamischen Adressen und des Routings. Ebenso liefert es Funktionen zur Ereigniskontrolle und Fehlerbehandlung.

#### II.1.4.4 TAP 4.4 Erkennung haptischer Muster

Es wurde im Rahmen der Exploration technischer Möglichkeiten für Interaktionskonzepte ein Patch entwickelt, der die Eingabe komplexer Berührungsgesten erlaubt. Ermöglicht wird dies über ein integriertes Touchpad im Notebookformat. Unterstützte Gesten sind Tippen, Doppel-tippen, Zweifingertippen und Wischen in jede beliebige Richtung. Weil das Modul intern über ein softwareemuliertes PS/2- Interface angebunden ist, gibt es Einschränkungen die sich aus der beabsichtigten Funktion als Zeigergerät ergeben. Das Koordinatensystem ist relativ, absolute Positionen können nicht ausgelesen werden. So ist nicht unterscheidbar, wo auf die Oberfläche getippt wurde. Dies und Zugriff auf die Eingaberohdaten wären nur über das USB-

Interface des Touchpadcontrollers möglich, scheitern jedoch aufgrund der fehlenden USB-Host Funktionen des AVR-Controllers auf dem Patch.

Ungeachtet dessen sind viele Interaktionsmöglichkeiten denkbar und teilweise auch in einer Demofirmware umgesetzt, die über das beschränkte Interface des Button Patches hinausgehen.

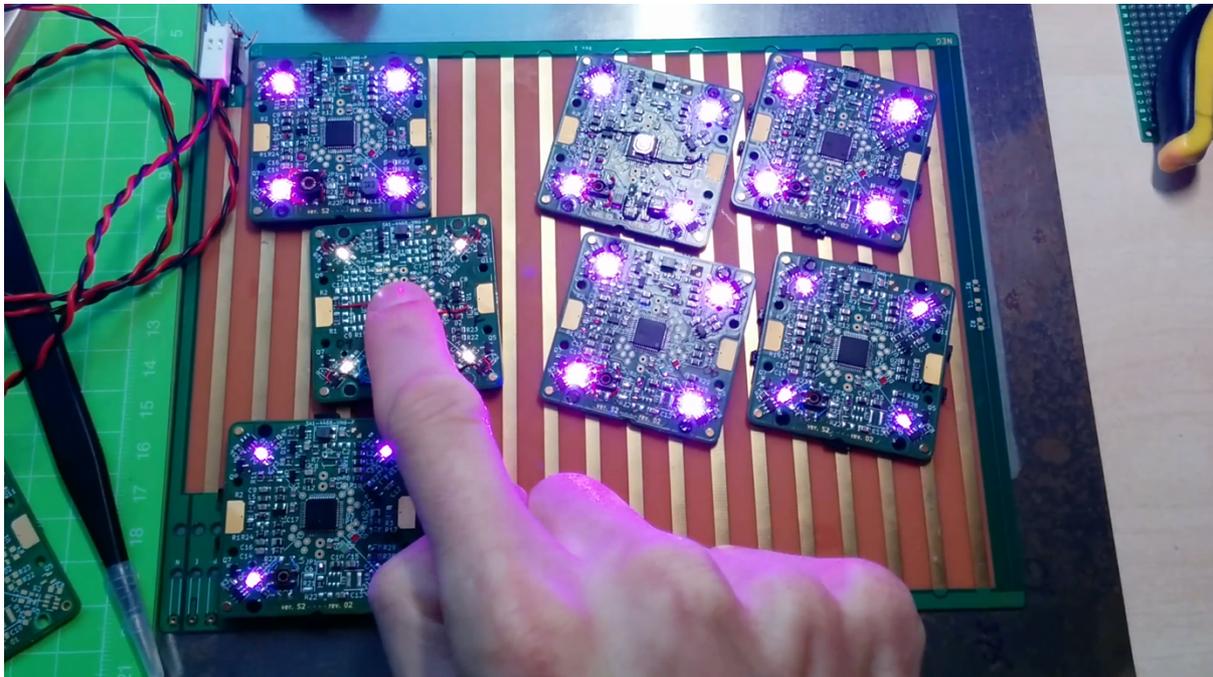


Abbildung 28 S2 Touchdemo mit vielen gleichzeitig kommunizierenden Patches

Das Bild zeigt eine Demo zur Kommunikation über das neue S2-System. Ein Patch wird durch Berührung aktiviert (Leuchtet weiß) und alle anderen verbundenen Patches leuchten (violett) auf. Die gezeigten Patches verfügen noch nicht über die Nadelarrays, sondern sind mit kleinen nachgiebigen Schnipseln Alufolie auf Ihren Elektrodenarrays bestückt, die Unebenheiten ausgleichen. Tests beim Projektabschlussstreifen konnten die Funktionalität auch mit dem neuen Textil+Nadelarray nachweisen.

## II.1.5 AP5 Demonstratoren und Evaluation

### II.1.5.1 TAP 5.1 Fertigung in realistischen Produktionsrahmen zur Weiterverwendung in Demonstratoren und Living Labs und Evaluation der Arbeitsmuster

An Partner verteilte Hardware wurde inventarisiert, um den Überblick über die unterschiedlichen Hard- und Softwarerevisionen zu erleichtern. Dokumentiert wurden u.A. die Demonstratoriteration, die Seriennummer, Hardwareversion/-revision, Herstellungsdatum sowie für Patches zusätzlich; Hardwarevariante, Softwareversion, Bootloaderversion und Konfigurationsbits der Controller.

Sämtliche den Partner zur Verfügung gestellte Hardware (nur finale Versionen, keine Muster und Prototypen):

- S1
  - Patchfelder Folien: 13x
  - Programmieradapter: 8x (3x A, 5x B)
  - Gateways: 7x (4x Rev.A, 3x Rev.B) Begrenzt durch Knappheit der Seriellwandler
  - Patches
    - Batch 1 (Rev. A8)  
17x, hauptsächlich Button, teilweise Proto für CPS, InTex und Bosch
    - Batch 2 (Rev. 07)  
8x Allesamt Proto, da LEDs nicht funktionsfähig
    - Batch 3&4  
5x Proto und Button

(Proto-Patches sind die rohe Basishardware ohne spezifische Funktionsaddons wie Sensoren etc.)
- S2
  - Patches
    - 2x Protoversionen unterschiedlicher Hardwareausstattung, aber funktional gleichwertig
    - 7x Serienmodell aus den verfügbaren Teilen erstellt. Mehr geht nicht
    - 2x Ohne Controller, nur Spannungsversorgung und Filter - "Leuchtpatches"
  - Gateway

Wurde wegen der erheblichen Problematik bei der Teilverfügbarkeit nur als einzelner Prototyp gebaut. Es können auf absehbare Zeit keine Einheiten hergestellt werden. Es fehlen USB/Seriell Brücken, Hauptcontroller

### **II.1.5.2 TAP 5.2 Konzeption der Evaluationsumgebungen und Probandenauswahl**

Dieser Punkt findet sich in der realen Projektdurchführung kaum mehr als eigenständiges Aufgabenpaket für das IFAM wieder, sondern ist überwiegend in den APs 3, 4 und TAP 5.1 aufgegangen. Auch aufgrund der Corona-Situation wurden agilere Arbeitsansätze in kleineren Teilgruppen verfolgt, sodass beständig Verbesserungen an den Entwicklungen vorgenommen, integriert und von den Partnern getestet wurden. Der Austausch von IFAM und den beiden Teilen des DFKI war hier besonders eng und es wurden wöchentliche Besprechungen durchgeführt.

Aus Grund der Lesbarkeit wurden die thematisch AP5 zugehörigen Arbeiten und Ergebnisse an den inhaltlichen Stellen der genannten Abschnitte eingepflegt.

### **II.1.5.3 TAP 5.3 Durchführung und Auswertung der Evaluationen**

Es wurden in-house Tests zu den Entwicklungen des IFAM durchgeführt, um eine ausreichende Performance hinsichtlich technischer Anforderungen wie der Robustheit, Zuverlässigkeit und Leistungsfähigkeit zu erreichen. Diese wurden über zahlreiche Iterationen (siehe implementierungsspezifische APs) immer weiter verbessert.

Die eigentlichen Probandentests zum Testen auch der nichttechnischen Anforderungen wurden vom DFKI und DITF mit Unterstützung des ILI durchgeführt.

### **II.1.5.4 TAP 5.4 Gestaltung der finalen Demonstratoren und Umgebungen**

Das IFAM hat alle Partner mit der nötigen Hardware zu Komplettierung der eigenen Demonstratoren ausgestattet. Eine Auflistung der gelieferten Teile findet sich in AP5. Es wurde an dem Plattformkonzept für die Demonstratoren mitentwickelt, deren Fertigung durch einen externen Dienstleister vom DITF in Auftrag gegeben wurde.

## **Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

Siehe gesondertes Dokument.

## **II.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Die Arbeiten wurden sorgsam geplant und anschließend entsprechend dem Projektplan und der zur Projektlaufzeit festgestellten Anforderungen umgesetzt. Alle geleisteten Arbeiten waren angemessen und notwendig, um die Projektziele zu erreichen.

## **II.3 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse**

### **II.3.1 Fortschritte bei anderen Stellen**

Seit Vorhabenbeginn sind keine Fortschritte bei anderen Stellen bekannt geworden, welche die in dem Projekt bearbeiteten Themenbereiche, geleisteten Arbeiten und erzielten Ergebnisse maßgeblich betreffen.

## **II.4 Veröffentlichung der Ergebnisse**

Zur Projektlaufzeit wurde eine zentrale Publikation von allen Projektpartnern gemeinsam auf der Konferenz IoT '22: Proceedings of the 12th International Conference on the Internet of Things, in Delft, Niederlande, vom 7-10 November 2022 erfolgreich eingereicht und präsentiert. Zudem wurde der Beitrag mit dem Best Paper Award ausgezeichnet.

- Frank Beruscha, Katharina Lorenz, Anke König-schulte, Serge Autexier, Annika Sabrina Schulz, Bodo Pahlke, Valerie Bartsch, and Hendrik Leibrandt. 2023. Connecting Textiles: Exploring Tex-tile Interior Surfaces for Power Supply, Communication and User Interaction in the IoT. In Proceedings of the 12th International Conference on the Internet of Things (IoT '22). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 88–95. <https://doi.org/10.1145/3567445.3567455>