



DEUTSCHE INSTITUTE FÜR
TEXTIL+FASERFORSCHUNG

Deutsche Institute für Textil und Faserforschung Denkendorf

Projekt ConText

Verbundvorhaben

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

Verbundnummer: V5IVG017

Teilvorhaben

Entwicklung von textilen Oberflächen mit elektrischer und informationstechnischer Funktionalität

Förderkennzeichen: 16SV8250

Bewilligungszeitraum: 1.7.2019 – 31.12.2022

Teil I – Kurzbericht –

Erstellungsdatum: 28.6.2023

Projektleiter: Dr. Michael Haupt

Autoren

Valérie Bartsch, Michael Haupt

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 16SV8250 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

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 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 störanfällig 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 Synchronisationspunkten 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 Monat 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.

Das Projekt war Teil eines Verbundprojekts zusammen mit den Partnern: BOSCH (Abteilung Mensch-Technik-Interaktion, Robert Bosch GmbH, Renningen), DITF (Deutsche Institute für Textil- und Faserforschung Denkendorf), IFAM (Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung, Bremen), ILI (Innovative Living Institute GmbH und Co. KG, Essen – im Unterauftrag der DITF), Norafin Industries (Germany) GmbH, Mildena, 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.



DEUTSCHE INSTITUTE FÜR
TEXTIL+FASERFORSCHUNG

Deutsche Institute für Textil und Faserforschung Denkendorf

Körschtalstrasse 26, 72636 Denkendorf

Projekt ConText

Verbundvorhaben

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

Verbundnummer: V5IVG017

Teilvorhaben

**Entwicklung von textilen Oberflächen mit elektrischer und informationstechnischer
Funktionalität**

Förderkennzeichen: 16SV8250

Bewilligungszeitraum: 1.7.2019 – 31.12.2022

Teil II

Eingehende Darstellung der durchgeführten Arbeiten

Erstellungsdatum: 28.6.2023

Projektleiter: Dr. Michael Haupt

Autoren

Valérie Bartsch, Michael Haupt, Sandra Blocher, Felix Wollenhaupt

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 16SV8250 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
Liste der Abbildungen.....	3
Liste der Tabellen.....	6
Teil II Eingehende Darstellung der durchgeführten Arbeiten	7
II.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse	7
II.1.1 AP1 Anforderungsanalyse.....	7
II.1.2 AP2 Interaktionsdesign	8
II.1.3 AP3 Textile Elektronik	34
II.1.4 AP5 Demonstratoren und Evaluation	50
II.1.5 AP6 Nachhaltigkeit der Projektergebnisse & Co-Design.....	52
II.1.6 AP7 Projektmanagement	59
II.2 Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	59
II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	59
II.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse	59
II.4.1 Fortschritte bei anderen Stellen	59
II.5 Veröffentlichung der Ergebnisse.....	59

Liste der Abbildungen

Abbildung 1: Chancen, Risiken, Stärken und Schwächen der Produktidee	8
Abbildung 2: (a) textiladaptierte Lösungen; (b) textilintegrierte Lösungen; textilbasierte Lösungen	10
Abbildung 3: (a) Messaufbau zur Bestimmung der Übergangswiderstände nach dem Vierleitung-Messprinzip; (b) Schälversuchsaufbau: Die Leiterplatten werden im Rohling fixiert und mit einer Geschwindigkeit von 100 mm/min auf die kontaktierten Textilbänder gezogen.	12
Abbildung 4: Gewöhnlicher Herstellungsprozess zur Kontaktierung einer Leiterplatte mit textilintegrierten Mikrokabeln.	12
Abbildung 5: Schematische Darstellung des Kavitationsmechanismus beim Ultraschalllöten []	13
Abbildung 6: (a) Textilband mit flexiblen und steifen Abschnitten. Das Band ist 26 mm breit und die Lage der Drähte ist axialsymmetrisch zur Mittellinie. Die äußeren Drähte haben einen Abstand von 12 mm und die inneren Drähte einen Abstand von 6 mm; (b) Bilder des Versuchsaufbaus mit dem Vier-Achsen-Roboter und dem Ultraschall-Lötkolben sowie das Textilband nach der CO ₂ -Laserbearbeitung.....	14
Abbildung 7: Schliffbilder verschiedener Lotwerkstoffe, (a,d) Sn95.5Ag3.8Cu0.7 mit nadelförmigem Gefüge im Bild (a) markiert mit einem roten Kreis, (b,e) Sn99.7Cu0.3, (c,f) Sn97Ag3; (d,f) nicht vollständig benetzte elektrische Leiter ebenfalls durch rote Kreise markiert.	15
Abbildung 8: (a) Ergebnisse des Schältests und (b) Durchgangswiderstände in Abhängigkeit von der Lotlegierung	16
Abbildung 9: Durchgangswiderstand bei unterschiedlichen Lotmengen.	16
Abbildung 10: (a) Ergebnisse des Schälversuchs mit Sn99.7Cu0.3 in Abhängigkeit von der Lötspitztemperatur; (b) Mikroschliffe von Sn99.7Cu0.3 bei verschiedenen Lotprozesstemperaturen: (1), (3) 350 °C und (2), (4) 390 °C; die roten Kreise zeigen Änderungen in der Mikrostruktur, die die mechanische Festigkeit der Verbindungen beeinflussen.....	17
Abbildung 11: (a) Einfluss der Lötzeit auf die mechanische Festigkeit. Je niedriger die Lötzeit, desto höher ist die Festigkeit während des Schältests; (b) Mikroskopische Aufnahmen von Sn99,7Cu0,3-Proben, die mit verschiedenen Ultraschall-Lötzeiten gelötet wurden: (1), (3) 0,5 s Lötzeit; (2), (4) 10 s Lötzeit. Die roten Schaltkreise zeigen Defekte in der Legierung nach einer längeren Ultraschall-Lötzeit.	18
Abbildung 12: Einfluss der Leistung auf die mechanische Festigkeit. Eine reduzierte Ultraschallleistung von 10 W führt zu einer höheren mechanischen Festigkeit.	19

Abbildung 13: Einfluss der Vorbehandlung mit Aceton (a) auf die Schälfestigkeit (b) auf den Kontaktwiderstand	19
Abbildung 14: Phasendiagramm von SAC305 (links) [5] und Sn-Bi-Ag (rechts) [] mit eutektischen Punkten Sn96,5-Ag3-Cu0,5 (rechts) und Sn42-Bi57,6-Ag0,4 (links).....	21
Abbildung 15: Laserabisolierung.....	22
Abbildung 16: Bilder der Querschnitte der Lötstellen bei 60-facher Vergrößerung; Probe 1 (a,b) unter OM (a) und REM (b) mit Leistung 8 W; Probe 2 unter OM (c) und REM (d) mit Leistung 7 W.	27
Abbildung 17: Bild des Querschnitts der Lötstelle bei 200- bis 1000-facher Vergrößerung: Probe 1 unter REM bei 1000-facher Vergrößerung (a,b) (Leistung 8 W); Probe 2 unter REM bei 200-facher (c) und 800-facher (d) Vergrößerung (Leistung 7 W).....	27
Abbildung 18: (a) Thermoden-Lötsystem mit einer 3 Thermode und zwei kontaktierungspunkten, (b) Temperaturprofil eines Thermodenlötprozesses mit einem Zweiphasenprozess	28
Abbildung 19: Kontaktierung einer Leiterplatte mit einem textilen Band mittels Thermodenlöten	29
Abbildung 20: Optische bewertung der Kontaktierungsstellen nach Kontaktierung mittels Thermodenlöten.....	29
Abbildung 21: Kraft-Dehnungskurve während des Schälversuchs	30
Abbildung 22: Schälversuche (a) während des Versuchs, (b) am Ende des Versuchs.....	30
Abbildung 23: Einfluss des Klebstoffarts auf den Kontaktierungsgswiderstand	32
Abbildung 24: Einfluss des Klebstoffs auf die Zuverlässigkeit des Kontaktierungsprozesses. Rot: kontaktierung nicht erfolgt, grün: Kontaktierung erfolgt.....	32
Abbildung 25: Mikroskopische Aufnahme der Kontaktstellen mit ICA 1 und 2	32
Abbildung 26: (a) Einfluss des Klebstoffs auf die Schälfestigkeit der Kontaktierung, (b) Schälfestigkeitskurve und Bildaufnahmen der Kontaktstelle während des Versuchs.....	33
Abbildung 27: Kontaktierung eines Mikrokabels mit einem leitfähigen Textil mittels Ultraschall-Schweißen	34
Abbildung 28: (a) Längs- und (b) Querschnitt des eingewebten leitfähigen Garnes.....	34
Abbildung 29: Dornier Luftdüsenwebmaschine	35
Abbildung 30: Schematische Darstellung des Schusseintrages einer Luftdüsenwebmaschine Bildquelle: Lindauer Dornier.....	36
Abbildung 31: Vergleich einer Köper 1/3 Bindung mit einer Atlas 1/7 Bindung im Bereich der Kupfergarne	39
Abbildung 32: (a) Textil mit eingewebten Drähten, (b) Kapazitive Messungen	40
Abbildung 33: (a) Kapazitive Sandwichstruktur mit 2 leitfähigen Gewebe (b) Kapazitive Messungen	41

Abbildung 34: Stickmaschine	41
Abbildung 35: Einseitige Gitterstruktur mittels isolierten Mikrokabeln.....	42
Abbildung 36: Doppelseitige gestickte Gitterstruktur mit Madeira Garn HC40	43
Abbildung 37: Einstellung der Fadenspannung zum Erhalt von einer komplexeren gestickten Gitterstruktur (Madeira HC40).....	44
Abbildung 38: Komplexere Gitterstruktur mit Madeira HC40 (Vorderseite), (b) Rückseite ...	44
Abbildung 39: Siebdruckkarussell.....	45
Abbildung 40: Schablone für ein gedrucktes Interaktionsdisplay (a) Geometrie 1, (b) Geometrie 2	45
Abbildung 41: Druckergebnisse mit dem Sieb 2 (Maschenweite 115 µm).....	46
Abbildung 42: Druckversuche auf verschiedenen Substraten (a) Vliesstoff, (b) PES Gewebe, (c) PU-beschichtetes Gewirk	47
Abbildung 43: Druckversuch auf dem ausgewählten PU-beschichtetes Gewirk.....	47
Abbildung 44: Textiles Interaktionsfeld	48
Abbildung 45: Kontaktierung einer flexiblen Platine mit dem gedruckten Interaktionsfeld (a) Druck der Klebepunkte (b) flexible Platine kleben.	48
Abbildung 46: Kontaktiertes textiles Interaktionsfeld	49
Abbildung 47: Bindungspatrone für den Demonstrator	50
Abbildung 48: Gedruckte Leiterbahnen auf einem Vliestapete	51
Abbildung 49: ILI-Assessment-Methodik	52
Abbildung 50: Die ILI-Markenanspruchspyramide.	56

Liste der Tabellen

Tabelle 1: Geeignete Parameter zur Kontaktierung eines leitfähigen Textils mit integrierten Mikrokabeln an einer Leiterplatte	20
Tabelle 2: Parameter der Abisolierung	22
Tabelle 3: Parameter und Lötergebnisse des Lötprozesses mit Sn96,5-Ag3-Cu0,5 (SAC305)	23
Tabelle 4: Parameter und Lötergebnisse des Lötprozesses mit Sn43,47-Bi55,85-Ag0,68... ..	24
Tabelle 5: Lötergebnisse in Abhängigkeit von der Korngröße und der Auftragsmenge	25
Tabelle 6: Getestete leitfähige Klebstoffe und Kontaktierungsprozesse.....	31
Tabelle 7: Spezifikationen der Webmaschinen	35
Tabelle 8: Einstelldrücke der Düsen	37
Tabelle 9: Verwendete Materialien für die Gewebeherstellung	37
Tabelle 10: Parameter der Webversuche	38

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. Außerdem waren Reisekosten Teil der Zuwendungen. Diese wurden für Arbeitstreffen zur Abstimmung der Arbeitsschritte zwischen den Projektpartnern, für Projekttreffen mit Verbundpartnern, Stakeholder-Befragungen, Innovationsassessments mit Industrievertretern und Teilnahme an Vernetzungstreffen und Abschlusstreffen mit Projekten aus derselben Bekanntmachung. Weiterhin wurde das Projekt auf Workshops und Foren präsentiert als Teil der Öffentlichkeitsarbeit. 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 DFKI 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

Im Rahmen dieses TAP wurden die Anforderungen an das ConText-System entwickelt, der Stand der Technik im open source Smart Home Plattform bewertet und ein Konzept für einen projektbegleitenden MEESTAR-Workshop entwickelt.

II.1.1.2 TAP 1.2 Chancen & Risikoanalyse

Ziel des TAP war die Bewertung relevanten Aspekte der Produktidee hinsichtlich ihrer Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken. Ausgangspunkt war die Expertenbefragungen aus Abschnitt II.1.1.1. Die Arbeiten fanden ebenfalls unter Federführung von BOSCH statt

unter Beteiligung aller Partner, die Ergebnisse zu Chancen, Risiken, Stärken und Schwächen der Projektidee sind in Abbildung 1 dargestellt.

Umfeld- getrieben	Chancen (begünstigen Marktentwicklung) <ul style="list-style-type: none"> ▪ Use cases für Stand-alone Lösung ▪ Ästhetische Vielfalt ▪ Nachrüstlösung für einzelne Wandzonen 	Risiken (beeinträchtigen Marktentwicklung) <ul style="list-style-type: none"> ▪ Gewährleistung ▪ Angst vor Elektrosmog ▪ Zukunftssicherheit ▪ Verlust von Patches
Produkt- getrieben	Stärken (besser als existierende Produkte) <ul style="list-style-type: none"> ▪ Neuartige Wandinteraktion ▪ Flexible Positionierung Patches ▪ Gestalterische Akzentuierung ▪ Individualisierung Tapete 	Schwächen (schlechter als existierende Produkte) <ul style="list-style-type: none"> ▪ Hoher Preis ▪ Sicherstellung Unversehrtheit ▪ Interaktion an der Wand reicht nicht aus ▪ Keine Unterputzlösung

Abbildung 1: Chancen, Risiken, Stärken und Schwächen der Produktidee

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 Systemnutzer*innen überprüft und erweitert.

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

Zwei Prinzipien zur Anbindung der Sensoren an die Tapete wurden entwickelt:

- Ein Prinzip nutzte polarisierte Magnete, die in das Textil integriert sind, um Stromversorgung und Kommunikation mit den entsprechend polarisierten Patches zu ermöglichen.
- Ein weiteres Prinzip basierte auf gedruckten oder eingewebten Leiterbahnen auf oder in den Textilien, die über Nadelkontakte auf der Rückseite der Patches verbunden werden.

II.1.1.1 TAP 2.2 Verfahren zur Kontaktierung leitfähiger Textilien

Die Integration der elektronischen Funktionalität in den Textilien unterscheidet sich in drei Kategorien:

- Die textiladaptierten Lösungen (Abbildung 2(a)): In diesem Fall erfolgt keine Integration der elektronischen Bauteile bzw. der Leitungen in das Textil. Die Textilien dienen lediglich als Trägermaterialien. Dadurch, dass die Herstellung von Elektronik und Textil getrennt gehalten wird, erfordern diese Lösungen zahlreiche Produktionsschritte für die Herstellung der Halbzeuge und die Fertigung des finalen Produkts.
- Die textilintegrierten Lösungen (Abbildung 2(b)): Diese entsprechen Hybridstrukturen. In diesem Fall werden mikroelektronische Bauteile in Form von SMD mit textilintegrierten Leitungen, z.B. Mikrokabeln oder leitfähigen Fäden, kontaktiert, die die Energieversorgung und den Datentransfer ermöglichen. Die an die DITF in Zusammenarbeit mit der Firma Amohr technische Textilien entwickelte textile Bänder stellen beispielsweise eine textilintegrierte Lösung dar. Solche Lösungen eignen sich in der Herstellung von sensorischen textilen Halbzeugen besonders gut. Durch ihren textilen Charakter werden sie in finale textile Produkte mit herkömmlichen Konfektionstechnologien problemlos integriert.
- Die textilbasierten Lösungen (Abbildung 2(c)): In diesem Fall werden nicht nur Leitungen in das Textil integriert, sondern auch der sensorische Teil. Zur Herstellung solcher Lösungen wird auf textile Technologien wie z. B. Sticken, weben, stricken oder additive Technologien wie z.B. Drucken zurückgegriffen. Die Hauptvorteile solcher Lösungen sind die Reduzierung der Produktionsschritte sowie die Beibehaltung der textilen Eigenschaften beim finalen Produkt.

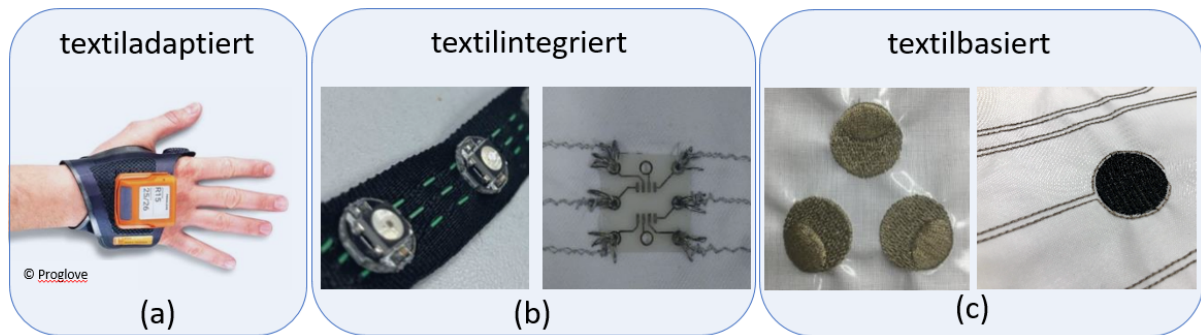


Abbildung 2: (a) textiladaptierte Lösungen; (b) textilintegrierte Lösungen; (c) textilbasierte Lösungen

Einer der Gründe für die geringe Marktdurchdringung elektronischer Textilien ist der hohe Anteil an manuellen Tätigkeiten bei der Produktion. Zudem führt der hohe Anteil an manuellen Produktionsschritten zu hohen Preisen, die das Marktwachstum bremsen. Daher wurden in diesem Vorhaben intensiv an automatisierten Kontaktierungsprozessen geforscht.

Die Herausforderung bei der automatisierten Kontaktierung von Elektronik mit Textilien liegt darin, dass die textile Struktur aufgrund seiner Flexibilität und Elastizität bei der Verarbeitung selten das gleiche Verhalten aufweist. Dies führt u.a. zu Problemen bei der Positionierung zwischen dem Textil und der Elektronik. Darüber hinaus verringert die thermische Empfindlichkeit der textilbasierten Lösungen die Anzahl der möglich anwendbaren Kontaktierungsprozesse.

In diesem Vorhaben wurden automatisierbare Kontaktierungsprozesse zur Kontaktierung von textilintegrierten Mikrokabel sowie zur direkten Kontaktierung textilbasierte Sensoren mit Leiterplatten untersucht. Dafür wurden erstmal nach geeigneten Kontaktierungsverfahren gesucht.

Eine Kontaktierung kann kraftschlüssig, formschlüssig oder stoffschlüssig mit Leiterplatten erfolgen.

Kraftschlüssige Verbindungen

Die Integration von Elektronik in intelligente Textilien durch kraftschlüssige Verbindungen, z.B. Schraubverbindungen, erfordert zwei Schritte: Die mechanische Verbindung mit dem Textil und die elektrische Verbindung mit einer leitenden Struktur. Die Funktion von intelligenten Textilien ist nur gewährleistet, wenn beide Verbindungen zuverlässig sind. Kraftschlüssige Verbindungen haben den Vorteil, dass sie beide Verbindungen ohne thermische Belastung des Substrats herstellen können. Jedoch ist der Aufwand zur Herstellung der Verbindungen deutlich zu hoch und eine Automatisierung konnte nicht realisiert werden.

Formschlüssige Verbindungen

Zu den formschlüssigen Verbindungen gehören z.B. Crimpverbindungen oder lösbare Verbindungen z.B. mithilfe Druckknöpfe oder Klettbander. Crimpverbindungen sind robust, sehr zuverlässig, kostengünstig sowie schnell und einfach in der Verarbeitung. Diese

Methoden haben sich jedoch zur Kontaktierung der E-Textiles nicht durchgesetzt. Grund dafür ist die Inhomogenität der Textilien, die schwierige Positionierung insbesondere bei großen Textilien und die geringe Anpassungsfähigkeit der Werkzeuge an unterschiedliche Produkte. Die textile Fügeverfahren wie das Sticken und das Nähen werden ebenfalls als formschlüssige Kontaktierungsverfahren eingesetzt. Dafür werden oft leitfähige Garne verwendet. Das Relaxieren der Fadenspannung mit der Zeit stellt jedoch das Risiko dar, dass die Kontaktierung Textil/Leiterplatte sich allmählich verschlechtert.

Stoffschlüssige Verbindungen

Typische Beispiele für stoffschlüssige Verbindungen sind u. a. das Schweißen, das Löten sowie das Kleben mittels isotroper und anisotroper leitfähiger Klebstoffe. In dem Fall erfolgt die Verbindung auf atomaren oder molekularen Ebenen. Diese Prozesse lassen sich automatisieren, sind in der Elektronikindustrie schon weitverbreitet und stellen ein großes Potenzial zur Kontaktierung von Textilien mit Leiterplatten.

Aus diesem Grund wurde in diesem Vorhaben folgende Prozesse untersucht:

- Löten
- Kleben
- Schweißen

Test-Verfahren

Zur Beurteilung der Kontaktierungsstellen wurden folgende Prüfungen durchgeführt:

Zunächst wurden Schliffbilder angefertigt und mikroskopisch untersucht. Unter dem Mikroskop können die Größe und die Eigenschaften der Kontaktpunkte untersucht werden. Durch die Messung des Kontaktwiderstands konnte die Qualität der Verbindung untersucht werden. Zur Eliminierung der Leitungswiderstände wurde ein Vierleitung-Messgerät verwendet (Abbildung 3a). Die Kontaktwiderstände lagen im Milliohm-Bereich. Um einen messbaren Spannungsabfall an der Kontaktstelle zu messen, sind hohe Ströme von bis zu 10 A erforderlich. Die mechanischen Eigenschaften der Kontaktierungsstellen wurden in der Regel durch einen Schältest charakterisiert. Schälen ist die ungünstigste Belastungsrichtung für Verbindungen. In diesem Fall wurde die Schälfestigkeit gemessen, um die mechanische Festigkeit der Verbindung zu bestimmen. Die Kraft wurde senkrecht auf die Leiterplatte aufgebracht (Abbildung 3b). Daher wurde eine Kraftmessdose mit einer maximalen Kraft von 1000 N verwendet. Die Ziehgeschwindigkeit betrug 100 mm/min. Für jeden Prüfparameter wurden 10 Proben vorbereitet.

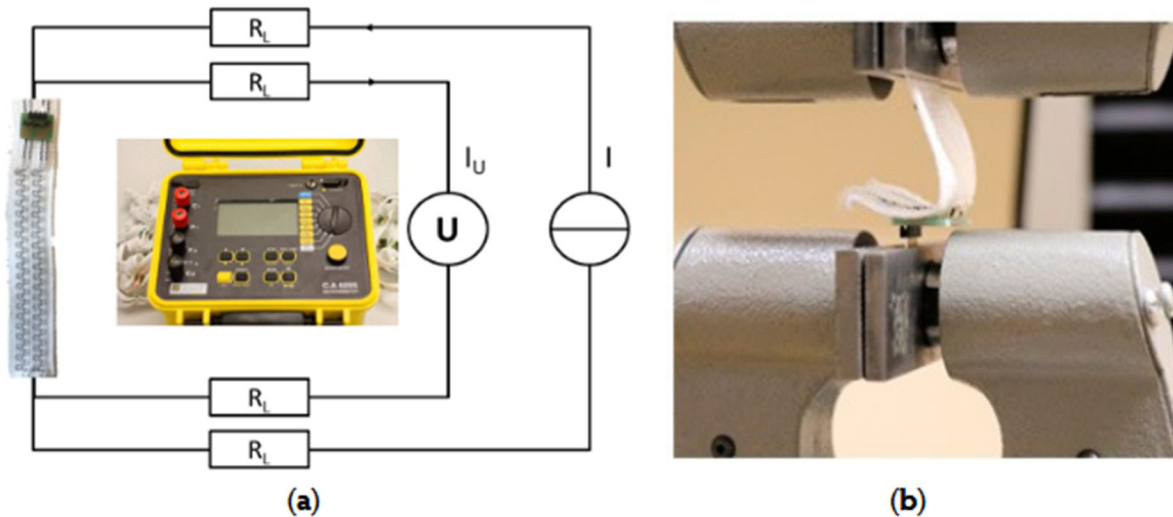


Abbildung 3: (a) Messaufbau zur Bestimmung der Übergangswiderstände nach dem Vierleitung-Messprinzip; (b) Schälversuchsaufbau: Die Leiterplatten werden im Rohling fixiert und mit einer Geschwindigkeit von 100 mm/min auf die kontaktierten Textilbänder gezogen.

II.1.2.1.1 Kontaktierung textilintegrierter Mikrokabel

Isolierte Mikrokabel können mittels unterschiedlichen Textiltechnologien wie beispielsweise Stricken, Weben, Sticken, in Textilien integriert werden. Diese befinden sich dann im Inneren des Textils und ermöglichen es, Bauteile von beiden Seiten zu verbinden. In unserem Fall wurde ein gewirktes Textilband verwendet, das aus Polyester mit integrierten Mikrokabeln bestand. Die zu kontaktierenden Leiterplatten wiesen zwei bis vier Kontaktierungspads auf. Der Kontaktierungsprozess besteht typischerweise aus drei Schritten. Zunächst werden die Drähte automatisch mit einem Laser abisoliert. Danach erfolgt der Verbindungsprozess. Um die Elektronik vor Umwelteinflüssen und Belastungen zu schützen, werden schließlich die Bauteile mit einer Spritzgießmaschine umspritzt.

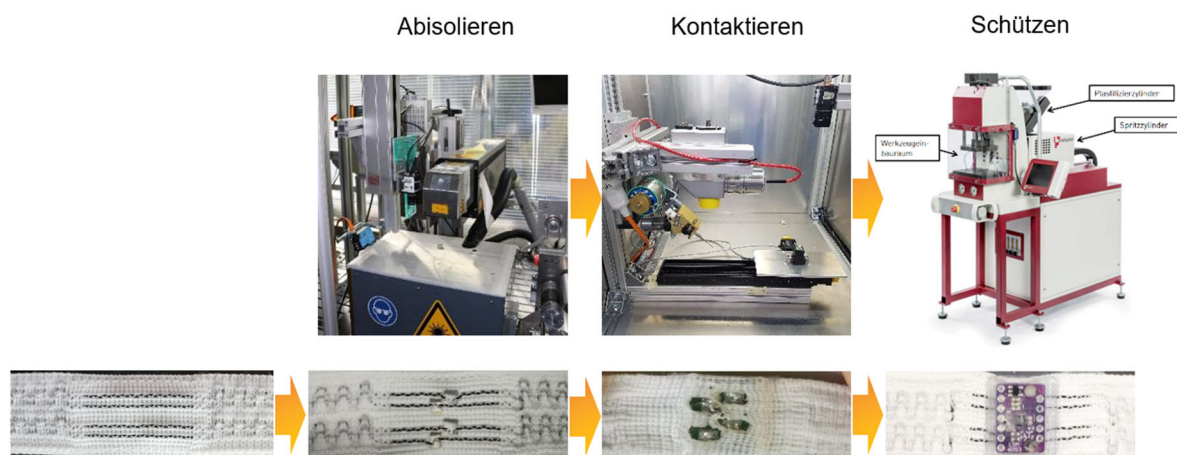


Abbildung 4: Gewöhnlicher Herstellungsprozess zur Kontaktierung einer Leiterplatte mit textilintegrierten Mikrokabeln.

Folgende potenziell automatisierbare Verfahren wurden zur Kontaktierung von Leiterplatten mit textilintegrierten isolierten Drähten untersucht:

- Das Löten (per Ultraschall, Laser oder mit Thermode)
- Das Kleben (mit isotropen und anisotropen Klebstoffen)
- Das Ultraschallschweißen

II.1.1.1.1 LÖTEN

II.1.2.1.1.1 ULTRASCHALL-LÖTEN

Beim Ultraschalllöten erfolgt der Wärmeeintrag in erster Linie durch die temperaturgesteuerte Lötspitze (Abbildung 5). Im Gegensatz zum Ultraschallschweißen oder Drahtbonden, bei denen die Wärmeenergie durch Ultraschallreibung erzeugt wird, schmilzt die temperaturgeregelte Lötspitze das Lot auf. Die Ultraschallanregung führt zu Kavitäten im flüssigen Lot, die ähnlich dem Prinzip der Ultraschallreinigung Verunreinigungen von Oberflächen entfernen. Dies ermöglicht, auf Flussmittel zu verzichten. Zwei Hauptprinzipien sind beim Ultraschalllöten üblich:

- Ähnlich wie beim Tauchlöten: Das Lotbad wird erhitzt und mit Ultraschall angeregt. Allerdings ist diese Anwendung für Textilien nicht geeignet, da das Textil mit dem Lot in Berührung kommt und schmilzt.
- Ähnlich dem Kolbenlöten mit zusätzlichem Ultraschallgenerator: Die Frequenzleistung und die Temperatur können eingestellt werden. So kann eine zu hohe thermische Belastung des Textils vermieden werden.

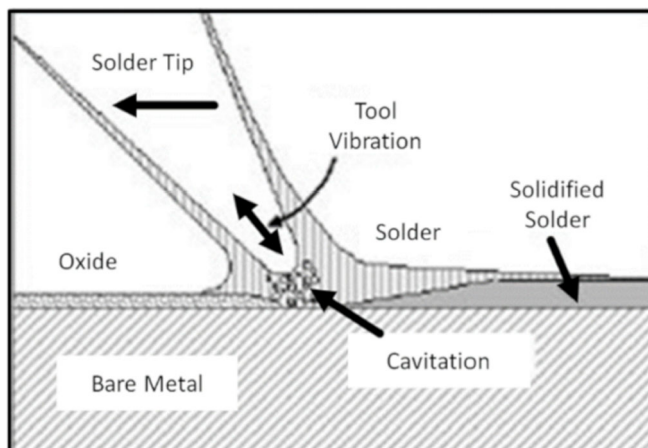


Abbildung 5: Schematische Darstellung des Kavitationsmechanismus beim Ultraschalllöten [1]

Für das Ultraschalllöten muss eine spezielle Lotlegierung ohne Flussmittel verwendet werden, da Lötmaterialien mit Flussmittel die Übertragung von Ultraschall hemmen. Da kein Flussmittel vorhanden ist, dringt trotz Kapillareffekt weniger Lot in den Faden ein. Dadurch wird die Litze weniger spröde und das gesamte Textil behält eine höhere Flexibilität. Darüber

¹ Graff, K. Makrosonics in der Industrie: Ultrasonic soldering. Ultrasonics 1977, 15, 75-81

hinaus lässt sich der gesamte Prozess leicht automatisieren und skalieren. Durch den jahrelangen Einsatz in der Elektronikindustrie sind die Lötmaschinen gut steuerbar und in verschiedenen Abmessungen erhältlich. Die Kontaktstellen haben eine hohe Festigkeit und eine gute elektrische Leitfähigkeit.

Experimenteller Aufbau

Die PTFE-Isolierung der Mikrokabel und kleine Bereiche des Textilbandes werden an den Kontaktstellen von beiden Seiten mit einem CO₂ Laser (Alltec LC300) lokal abgetragen. Zur Kontaktierung wurde ein Ultraschall-Lötkolben USS-4200 von MBR Electronics mit unterschiedlich breiten Spitzen (1, 3 und 5 mm) verwendet. Die Temperatur ist bis zu 500°C einstellbar; die Ultraschallleistung ist zwischen 4 W und 12 W bei 60 kHz variabel.

Ein vierachsiger Industrieroboterarm (Dobot M1) wurde programmiert, um die Herstellung von Testmustern zu automatisieren und ihre Reproduzierbarkeit zu gewährleisten (Abbildung 6a). Darüber hinaus wurde ein spezieller Halter für das Textilband und die Leiterplatte hergestellt. Die Leiterplatten haben eine Größe von 18 × 12 mm². Der Ultraschall-Lötkolben und die Lotzufuhr werden vom Roboter ausgeführt (Abbildung 6b). Das Löten erfolgt in zwei Schritten. Erstens wird das Lot an der Spitze des Lötkolbens geschmolzen und zweitens bewegt sich die Spitze des Lötkolbens zur Kontaktstelle. Die Spitze des Lötkolbens hat eine hohe Tragfähigkeit für das Lot. Drei verschiedene Lotlegierungen wurden verwendet: Sn95,5Ag3,8Cu0,7, Sn99,7Cu0,3 und Sn97Ag3 ohne Flussmittel. Diese Legierungen sind in der Elektronikindustrie, in der flussmittelfreie Lote verwendet werden, weit verbreitet.

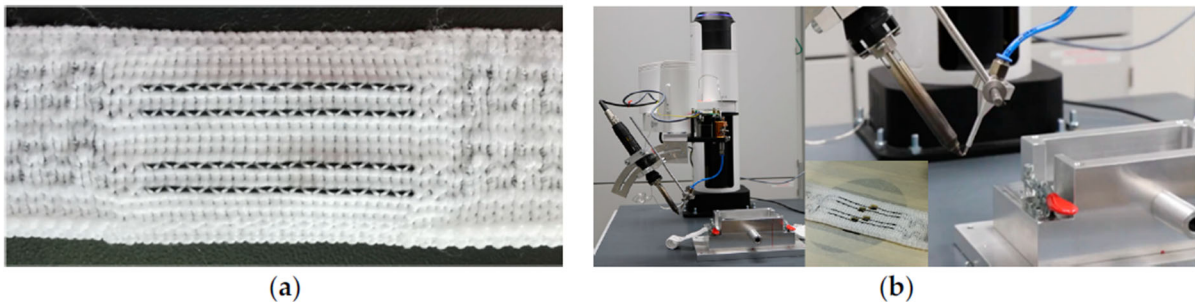


Abbildung 6: (a) Textilband mit flexiblen und steifen Abschnitten. Das Band ist 26 mm breit und die Lage der Drähte ist axialsymmetrisch zur Mittellinie. Die äußeren Drähte haben einen Abstand von 12 mm und die inneren Drähte einen Abstand von 6 mm; (b) Bilder des Versuchsaufbaus mit dem Vier-Achsen-Roboter und dem Ultraschall-Lötkolben sowie das Textilband nach der CO₂-Laserbearbeitung.

Lötzinn

Von allen Lotwerkstoffen (Sn95,5Ag3,8Cu0,7 (Abbildung 7a,d); Sn99,7Cu0,3 (Abbildung 7b,e); Sn97Ag3 (Abbildung 7c,f)) wurden Schliffbilder des Querschnitts angefertigt. Sn99,7Cu0,3 (Abbildung 7e) weist im Vergleich zu den Proben (Abbildung 7d) und (Abbildung 7f) deutlich weniger Poren auf. Sn95,5Ag3,8Cu0,7 (Abbildung 7a) weist eine nadelförmige

Mikrostruktur auf, was darauf hindeutet, dass die Metalllegierung spröde ist. Die Mikrostrukturen von Sn99,7Cu0,3 (Abbildung 7b) und Sn97Ag3 (Abbildung 7c) zeigen eine wesentlich homogenere Struktur.

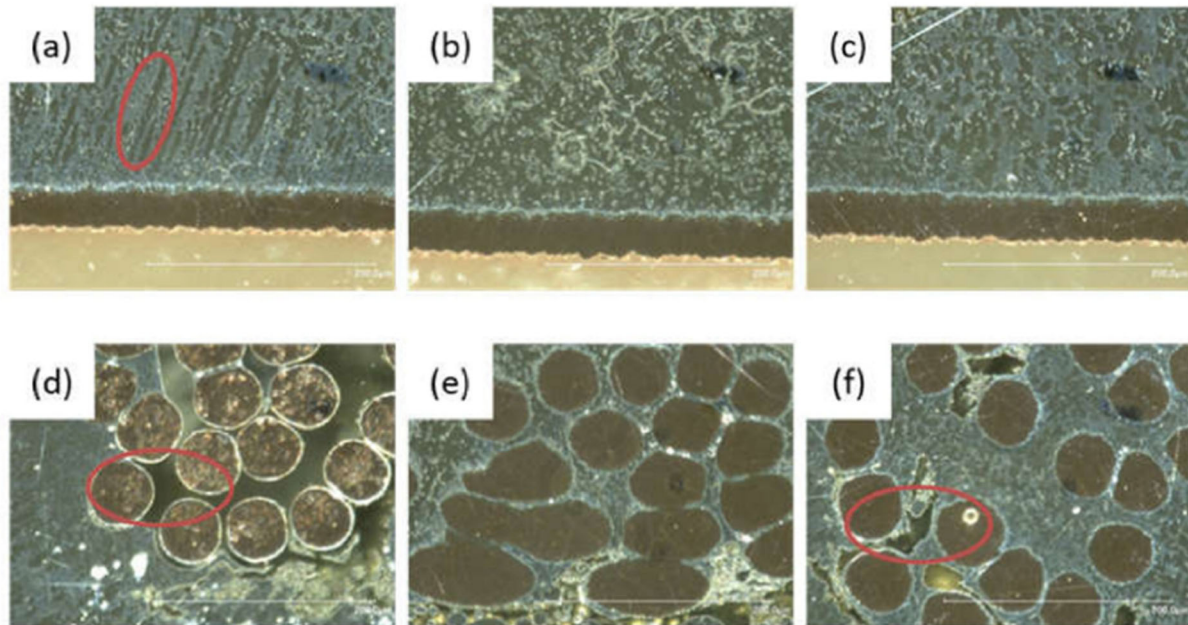


Abbildung 7: Schlichtbilder verschiedener Lotwerkstoffe, (a,d) Sn95,5Ag3,8Cu0,7 mit nadelförmigem Gefüge im Bild (a) markiert mit einem roten Kreis, (b,e) Sn99,7Cu0,3, (c,f) Sn97Ag3; (d,f) nicht vollständig benetzte elektrische Leiter ebenfalls durch rote Kreise markiert.

Dies spiegelt sich in den Ergebnissen des Schältests wider (Abbildung 8a). Bei der Schälprüfung wird das Textilband in einem Winkel von 90° von der Leiterplatte abgezogen. Die Kontaktstellen versagen in der Regel eine nach der anderen. Es gibt hauptsächlich zwei Arten von Versagen. Die eine ist der Bruch außerhalb der Verbindungszone, die andere ist der Bruch innerhalb des Lotes. Darüber hinaus wurden weitere Einflussgrößen und deren Auswirkungen untersucht. Die verwendeten Lötmaterialien haben Auswirkungen auf den Kontaktwiderstand und die mechanische Festigkeit der Verbindung. Lötstellen aus Sn97Ag3 hatten den geringsten elektrischen Widerstand und eine geringe Festigkeit, Sn99,7Cu0,3 weist die höchste Festigkeit und auch den höchsten elektrischen Widerstand (Abbildung 8b) auf. Im Allgemeinen fördert ein höherer Silbergehalt einen geringeren Widerstand. Jedoch hat der Benetzungsgrad des elektrischen Leiters auch einen Einfluss auf den Übergangswiderstand der Verbindung: je größer die Benetzungsfläche desto geringer den Übergangswiderstand. Aufgrund seines guten Benetzungsverhaltens, seiner hohen Schälfestigkeit und seiner niedrigen Kontaktwiderstands trotz seines geringen Silberanteils wurden die folgenden Versuche nur mit der Legierung Sn99,7Cu0,3 durchgeführt.

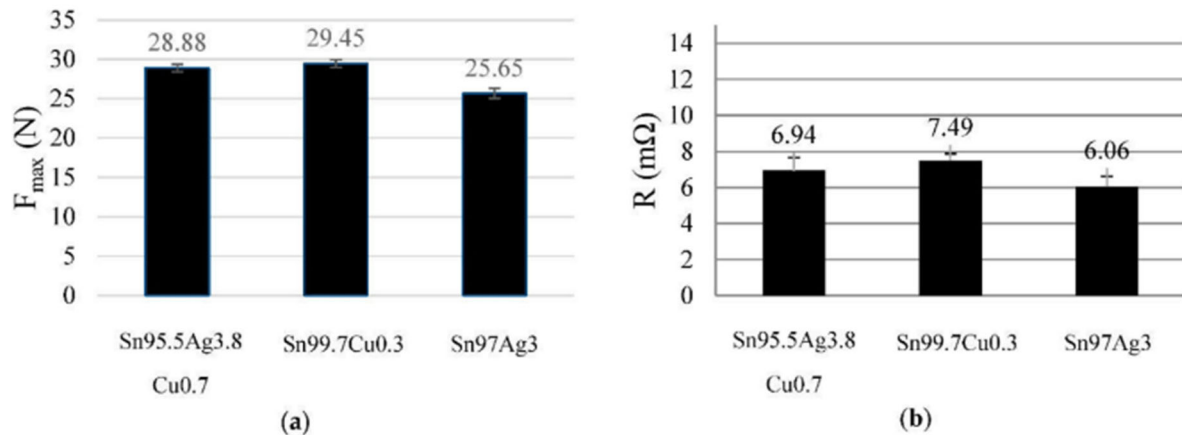


Abbildung 8: (a) Ergebnisse des Schältests und (b) Durchgangswiderstände in Abhängigkeit von der Lotlegierung

Menge an Lötzinn

Die Menge des zugegebenen Lots hat einen Einfluss auf die elektrischen Eigenschaften der Verbindung (Abbildung 6), während die mechanischen Eigenschaften im Schältest gleichbleiben. Proben mit 4,3 g und 8,6 g pro Kontaktstelle wurden hergestellt. Leider erlaubte die automatische Lotzufuhr eine Verarbeitung des Lotes nur in 4,3g-Schritten und 12,9 g waren zu viel Lot für einen Kontaktpunkt. Je mehr Lot verwendet wird, desto größer der Kontaktwiderstand zwischen dem Lot und den einzelnen Drähten der Litze und so desto geringer ist der Kontaktwiderstand. In Anbetracht der hohen Preise für flussmittelfreie Lotlegierungen dürften Kontaktstellen mit weniger Lot für die meisten Anwendungen ausreichend sein.

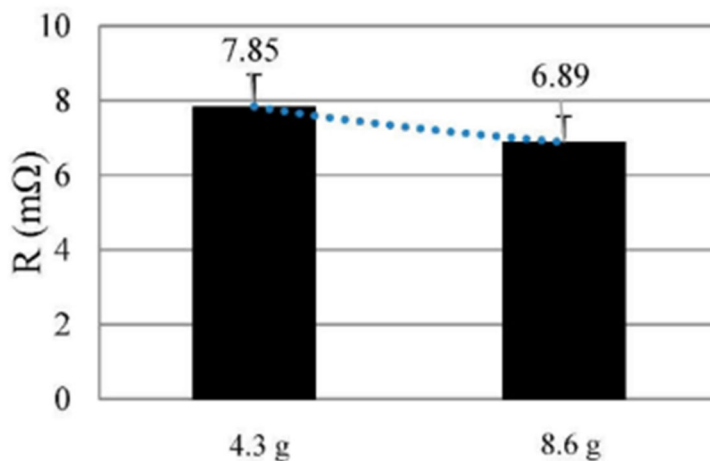


Abbildung 9: Durchgangswiderstand bei unterschiedlichen Lotmengen.

Temperatur

Höhere Temperatur an der Lötspitze (weit über der Liquidustemperatur des Lots) zeigen nach kompletter Abkühlung geringere Schälfestigkeiten: Die mit 370 °C hergestellten Proben weisen eine etwas geringere Festigkeit auf als die mit 390 °C hergestellten Proben, allerdings mit einer größeren Streuung in den Messergebnissen (Abbildung 10a). Ein größerer Durchmesser der Lötspitze fördert die Wärmezufuhr und ermöglicht so ein schnelleres Schmelzen des Lots. Die unterschiedlichen Temperaturen der Lötspitze haben keinen wesentlichen Einfluss auf den Kontaktwiderstand der Verbindung: Ein Kontaktwiderstand von 7,65 mΩ +/- 0,23 mΩ wurde für alle Temperaturen gemessen. Die Festigkeit nimmt mit sinkender Temperatur zu. Zur weiteren Veranschaulichung der Ergebnisse wurden die Schliffbilder der verschiedenen Proben analysiert (Abbildung 10b). Im Vergleich zur Kontaktierung bei 390 °C ist die Kontaktierung bei 350 °C in zweierlei Hinsicht optimiert. Aufgrund der geringen Wärmezufuhr bei 350 °C wird eine Verformung der Drähte und somit ihre Beschädigung vermieden. Außerdem die Mikrostruktur des Lotes ist homogener und feiner (Abbildung 10b (3)), was eine höhere Festigkeit fördert. Trotz der Erscheinung von Poren ist die Schälkraft der 350 °C-Proben größer als 32 N, 20 % mehr als bei höheren Temperaturen. Der Lötprozess funktioniert nicht bei niedrigen Arbeitstemperaturen wie 320 °C, da sich das Lot bei dieser Temperatur nicht schnell genug verflüssigt.

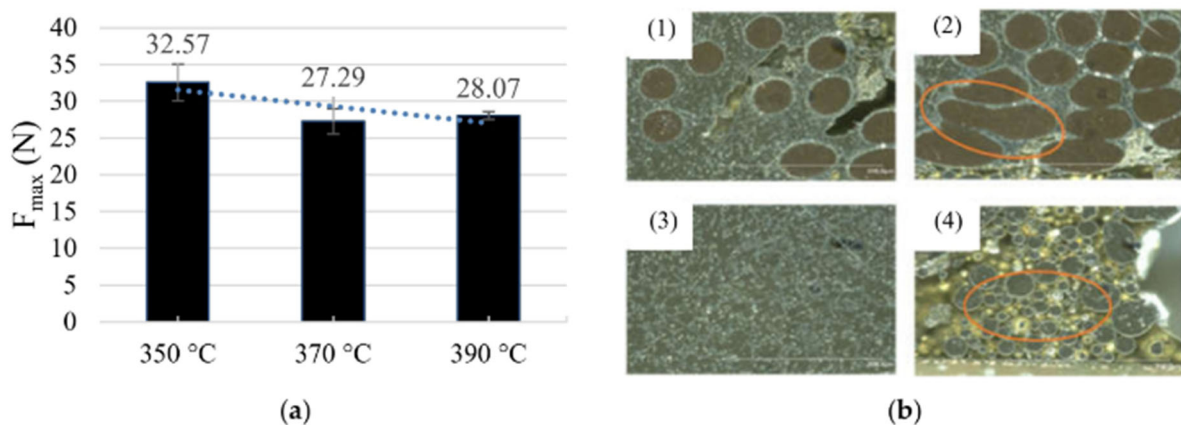


Abbildung 10: (a) Ergebnisse des Schälversuchs mit Sn99.7Cu0.3 in Abhängigkeit von der Lötspitztemperatur; (b) Mikroschliffe von Sn99.7Cu0.3 bei verschiedenen Lotprozessstemperaturen: (1), (3) 350 °C und (2), (4) 390 °C; die roten Kreise zeigen Änderungen in der Mikrostruktur, die die mechanische Festigkeit der Verbindungen beeinflussen.

Zeit des Lötens

Zusätzlich wurde der Einfluss der Zeit auf die Ultraschalllötung untersucht. Es wurde festgestellt, dass eine längere Lötzeit in Kombination mit der Ultraschallanwendung einen negativen Einfluss auf die Festigkeit der Proben während des Schältests hat (Abbildung 11a,b). Proben, die nur 0,5 s lang behandelt wurden, zeigten eine mehr als 40% höhere Schälfestigkeit als Proben, die 10 s lang gelötet wurden. Die Anwendung von Ultraschall bewirkt zwar ein Aufbrechen größerer Körner und damit eine Verringerung der Kristallkörner der Legierung, aber der höhere Wärmeeintrag führt zwangsläufig zu einer Vergrößerung der

Kristallkörner [2]. Darüber hinaus führt die längere Temperatureinwirkung beim Ultraschalllöten zu einer Überhitzung der Lötstellen, sowie zu Oxidation und Verkohlung. Dadurch verringern sich die mechanischen Eigenschaften der Lötstellen [3]. Der Übergangswiderstand zwischen den Proben unterscheidet sich jedoch nicht.

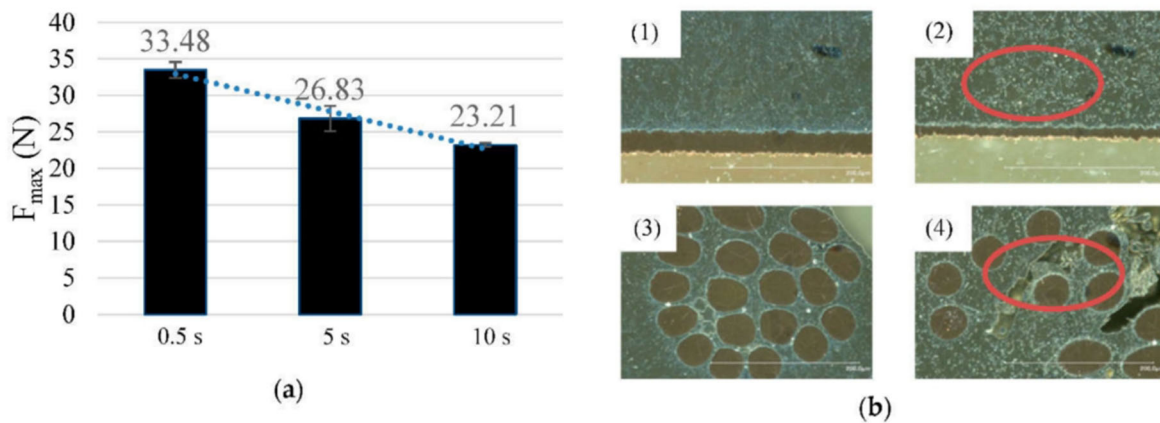


Abbildung 11: (a) Einfluss der Lötzeit auf die mechanische Festigkeit. Je niedriger die Lötzeit, desto höher ist die Festigkeit während des Schältests; (b) Mikroskopische Aufnahmen von Sn99,7Cu0,3-Proben, die mit verschiedenen Ultraschall-Lötzeiten gelötet wurden: (1), (3) 0,5 s Lötzeit; (2), (4) 10 s Lötzeit. Die roten Schaltkreise zeigen Defekte in der Legierung nach einer längeren Ultraschall-Lötzeit.

Ultraschall-Leistung

Die Leistung beeinflusst hauptsächlich die Veränderung der Amplitude während der Bewegung der Lötspitze unter den Ultraschallwellen, und der Einstellbereich der Lötanlage liegt zwischen 4 und 12 W. Bei den Untersuchungen wurde festgestellt, dass die Leistung einen wichtigen Einfluss auf den Lötprozess hat, insbesondere auf den Schmelzprozess des Lots. Bei höherer Leistung wurde das Lot nach dem Schmelzen schnell homogenisiert und bildete Tröpfchen. Dadurch konnte die Spitze mehr Lot tragen und zuführen. Während des Lötvorgangs war die Ausbreitung auf der Lötplatte bei hoher Leistung deutlich besser als bei niedriger Leistung, was zu einer höheren Festigkeit der Lötstelle beitrug. Allerdings gab es auch einen maximalen Leistungswert, bei dem die Festigkeit wieder deutlich abnahm. Bei einer Leistung von 10 W war die Festigkeit der Lötstelle 25 % höher als bei 12 W (Abbildung 12), da eine höhere Ultraschallleistung zu einem höheren Wärmeeintrag führt und zu einer Vergrößerung der Mikrostruktur führt. Die Übergangswiderstände waren nahezu identisch. Aufgrund der Wahl des Prüfgeräts konnte keine höhere Leistung als 12 W getestet werden.

² Ji, H.; Wang, Q.; Li, M. Microstructural Evolution of Lead-Free Solder Joints in Ultrasonic-Assisted Soldering. J. Electron. Mater. 2016, 45, 88-97.

³ Tan, A.T.; Tan, A.W.; Yusof, F. Effect of ultrasonic vibration time on the Cu/Sn-Ag-Cu/Cu joint soldered by low-power-high-frequency ultrasonic-assisted reflow soldering. Ultrason. SonoChem. 2017, 34, 616-625.

Bei zu geringer Leistung war das Löten nicht möglich, da sich das Lot nicht schnell genug ausbreitete und die Fremdschichten möglicherweise nicht entfernt wurden.

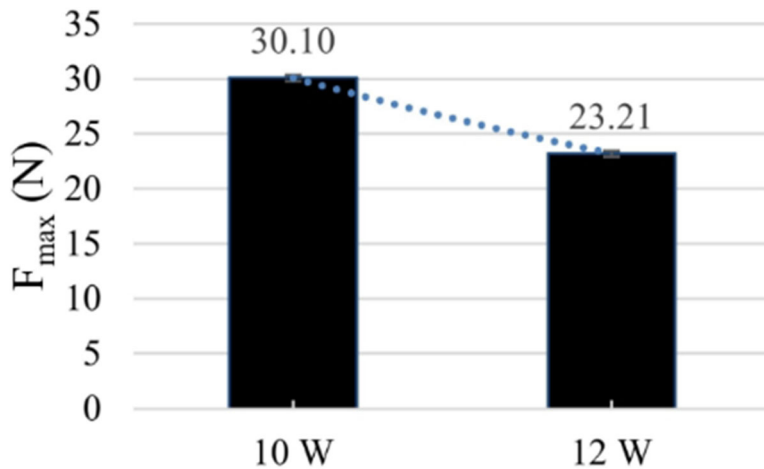


Abbildung 12: Einfluss der Leistung auf die mechanische Festigkeit. Eine reduzierte Ultraschallleistung von 10 W führt zu einer höheren mechanischen Festigkeit.

Vorbehandlung

Die Auswirkungen der Vorbehandlung der Oberfläche mit Reinigungsmitteln wurde ebenfalls untersucht. Es zeigte sich, dass die zusätzliche Vorbehandlung der Kontaktstellen mit Aceton einen negativen Einfluss sowohl auf die Zugfestigkeit als auch auf den elektrischen Widerstand hatte (Abbildung 13). Die Zugfestigkeit während des Schältests verringerte sich von 25,5 N auf 23,5 N, was etwa 10 % entspricht. In Röntgenspektroskopie (XPS)-Tests zur Oberflächenreinigung wurde nachgewiesen, dass Aceton oder andere Reinigungsmittel (Kohlenstoff-)Rückstände auf Oberflächen hinterlassen, die nachfolgende Beschichtungsprozesse negativ beeinflussen [4]

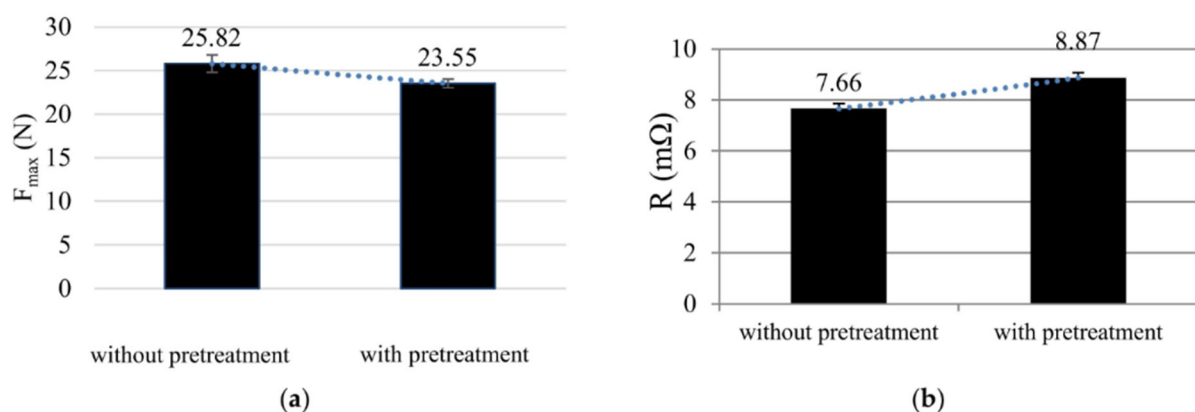


Abbildung 13: Einfluss der Vorbehandlung mit Aceton (a) auf die Schälfestigkeit (b) auf den Kontaktwiderstand

⁴ Oswald, S. X-Ray Photoelectron Spectroscopy in Analysis of Surfaces. In Encyclopedia of Analytical Chemistry: Applications, Theory and Instrumentation; Meyers, R.A., Ed.; Wiley: New York, NY, USA, 2000.

Bezogen auf unseren Versuchsaufbau und unsere apparativen Möglichkeiten haben wir folgende Lötparameter als Kompromiss zwischen Schälfestigkeit und Kontaktwiderstand gefunden: Sn99,7Cu0,3 bei 350 °C, eine Ultraschallarbeitszeit von 0,5 s und eine Leistung von 10 W (Tabelle 1). Die Ergebnisse beruhen auf der Tatsache, dass das Verfahren recht anfällig ist und automatisiert werden muss, um zuverlässig zu sein. Die manuelle Anwendung dieser Technik führt zu einer Vielzahl schlechter Verbindungen. Es wurden viele weitere Parameter ausprobiert, aber sie waren nicht erfolgreich.

Tabelle 1: Geeignete Parameter zur Kontaktierung eines leitfähigen Textils mit integrierten Mikrokabeln an einer Leiterplatte.

Lötzinn	Lotmenge	Lötzeit	Temperatur	Leistung
Sn99,7Cu0,3	4.3 g	0,5 s	350°C	10 W

II.1.2.1.1.2 LASER-LÖTEN

Der Einsatz eines Laserlötverfahrens für die Herstellung von E-Textilien bietet sich aus verschiedenen Gründen an. Zum einen können die ersten beiden Prozessschritte bei der Herstellung von E-Textilien in einem Maschinenbett durchgeführt werden, zum anderen gewährleistet der Laserlötprozess einen geringen Wärmeeintrag in das Bauteil [7]. Das berührungslose Löten mit hoher Energiedichte ermöglicht kurze Prozesszeiten und geringe mechanische Belastungen. Dadurch wird eine Beschädigung des umgebenden Textils vermieden. Darüber hinaus können auch schwer zugängliche Stellen erreicht werden.

Für das Laserlöten werden aktive Medien mit Wellenlängen zwischen 940-1064 nm verwendet, da der Absorptionskoeffizient von Metallen bei diesen Wellenlängen relativ hoch ist und somit ausreichend Energie in das Material eingebracht werden kann. In unserem Fall wurde Der Faserlaser Microline 3D der Firma LPKF für die Versuche eingesetzt. Der erzeugte Laserstrahl weist eine Wellenlänge von 1064 nm auf

Lötmaterialien und -prozess

Beim Laserlöten sollten immer Lotpasten mit einer Korngröße von 4 (Partikelgröße: 20-38 µm), 5 (Partikelgröße: 15-25 µm) oder kleinerer Größe verwendet werden. Kleinere Partikel (größere Korngröße) haben ein größeres Verhältnis von Oberfläche zu Volumen. Dies fördert die Wärmeleitung zwischen den Partikeln. Diese ist wichtig, da die Laserenergie nur optisch über die Oberfläche eingebracht werden kann. Das bedeutet, dass die Lotpaste nur durch Wärmeleitung geschmolzen werden kann. Eine vergrößerte Oberfläche führt aber auch zu einer verstärkten Oxidbildung vor und während des Prozesses. Als Lotpaste wurden zwei verschiedene Legierungen in einer nahezu eutektischen Zusammensetzung verwendet. Dadurch haben die Legierungen einen festen Schmelzpunkt, so dass ein schneller Fest-Flüssig-Übergang stattfindet. Dies ist elementar für einen stabilen Prozess und für die Bestimmung der Laserparameter. Die Bedeutung für die Elektronikindustrie der Legierungen

Sn96,5-Ag3-Cu0,5 (SAC305) und Sn42-Bi57,6-Ag0,4 wurde durch die Literatur nachgewiesen [5,6,7]. Besonders interessant für die textile Kontaktierung ist ihr verhältnismäßig niedriger Schmelzpunkt. Sie haben ein Mischungsverhältnis nahe dem eutektischen Punkt, so dass sie einen schnellen Übergang von fest zu flüssig aufweisen (Abbildung 14).

Beide Legierungen wurde für die Kontaktierung von Textilien auf Leiterplatten untersucht.

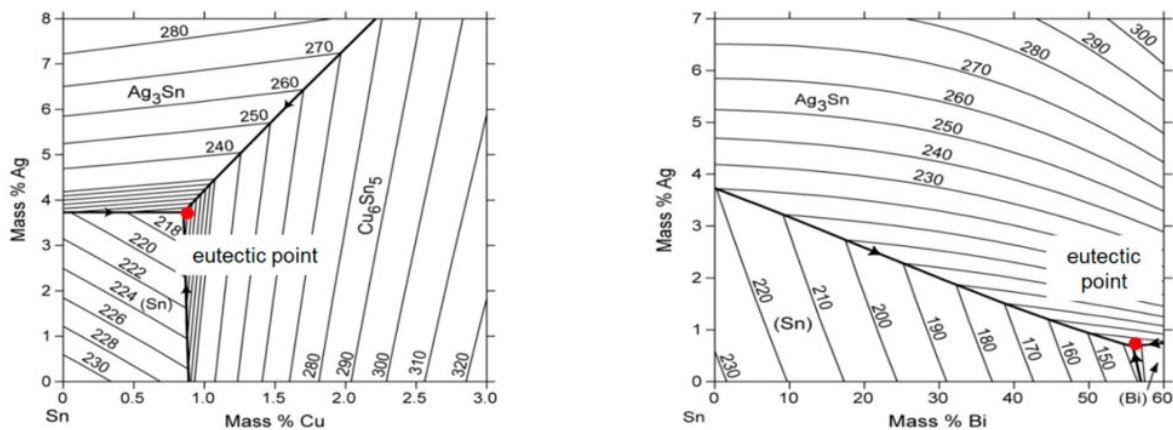


Abbildung 14: Phasendiagramm von SAC305 (links) [5] und Sn-Bi-Ag (rechts) [8] mit eutektischen Punkten Sn96,5-Ag3-Cu0,5 (rechts) und Sn42-Bi57,6-Ag0,4 (links).

Kontaktierungsprozess

Der Kontaktierungsprozess bestand aus einem Abisolierungsprozess und einem Lötprozess. Beide Prozesse wurden direkt nacheinander mit einem Faserlaser MicroLine 3D 160i der Firma LPKF Laser & Electronics durchgeführt.

Die textilintegrierten, lackisolierten Kupferlitzen wurden unter Verwendung des Parametersatzes der Tabelle 2 erfolgreich und zuverlässig von beiden Seiten entfernt (Abbildung 15). Das Bewegungsschema des Lasers zum Abisolieren des Mikrokabels ist ebenfalls in Tabelle 2 dargestellt. Die roten gekreuzten Linien in diesem Bild stellen die Bewegungsbahnen des Laserbrennpunkts dar. Der Abstand zwischen zwei Linien beträgt nur 45 µm. Während des Abisolierprozesses wurde der Laserstrahl hauptsächlich von den Metalldrähten absorbiert, was zu einer indirekten Erhitzung der umliegenden Lackierung und

⁵Kattner, U.R.; Boettinger, W.J. Sn-Bi-Ag. J. Electron. Mater. 1994, 23, 603-610.

⁶ Hügel, H.; Graf, T. Laser in der Fertigung. In Strahlquellen, Systeme, Fertigungsverfahren; Verlag Vieweg Teubner Verlag: Berlin, Deutschland, 2009.

⁷ Ulrich, G.; Scheller, M.; Laser welding and bonding as alternative technology for stitch-free seams; https://smartrx-netzwerk.de/images/PDF/10-2016-Workshop/Scheller_Leister_Laserschweißenstatt_n%C3%A4hen.pdf (Zugriff am 05. Mai 2023)

⁸ Zhang, L.; Xue, S.B.; Zeng, G.; Ye, H. Interface reaction between SnAgCu/SnAgCuCe solders and Cu substrate subjected to thermal cycling and isothermal aging. J. Alloy. Compd. 2012, 510, 38-45

Textilfasern führte. Aufgrund der hohen Strahlungstransmission (ca. 90 %) von Polyester [9] wurde nur ein sehr geringer Teil des Laserstrahls vom Textil absorbiert. Durch die hohe thermische Energie des Lasers blätterte die Lackierung ab und das umgehende Polyestergewirke wurde aufgeschmolzen, so dass die Kupferlitze kontaktiert werden konnte. Dieser Prozess ermöglichte die lokale Integration einer Leiterplatte in ein Textilband, ohne die textilintegrierten Leiterbahnen abzuschneiden.

Mikroskopische Aufnahmen der abisolierten Kupferlitzen zeigten noch Isolierungsreste auf den Leitern. Teile der Litzen waren aufgrund der 17-Draht-Struktur der Litzen immer im Schatten des Laserstrahls. Aus diesem Grund wurden sie wahrscheinlich nicht entfernt. Um die Lackierung der Mikrokabel beim Abisolieren vollständig zu entfernen, musste die Laserbearbeitung wiederholt werden. Die optimale Anzahl der Wiederholungen wurde auf 12 festgelegt, was zum besten Abisolierergebnis führte. Der gesamte Vorgang dauerte etwa 2,4 s.

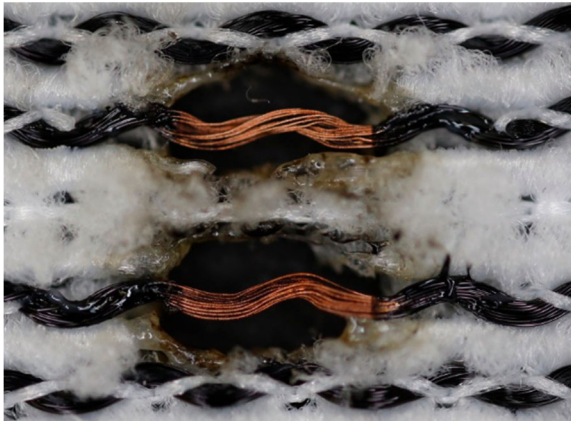
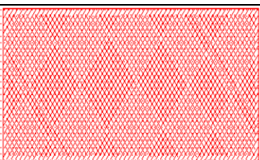


Abbildung 15: Laserabisolierung

Tabelle 2: Parameter der Abisolierung

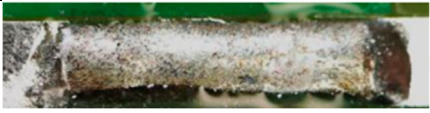

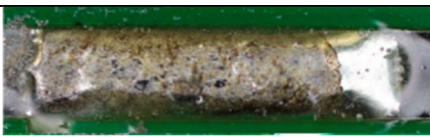



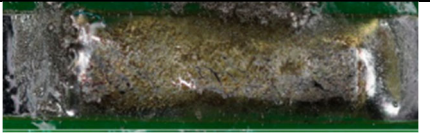


Wiederholungen	Laserleistung (W)	Verfahrensgeschwindigkeit (mm/s)	Frequenz (kHz)	Gelasertes Layout
12	16	1200	85	

Nach dem Laserstrippen konnten die Leiterplatten direkt auf das textile Leiterband gelötet werden. Durch die direkte Bearbeitung der Muster entfiel ein weiterer Positionierungsschritt. Für die Lötpasten wurden zwei etablierte Legierungen aus der Elektronikfertigung (Sn96,5-Ag3-Cu0,5 und Sn43,47-Bi55,85-Ag0,68) ausgewählt. Für beide Legierungen wurde zunächst ein Parametersatz empirisch ermittelt und anschließend eine Versuchsplanung durchgeführt.

⁹ GS Kunststoff-Optik, Präzisions-Polymer-Optik. Material-Transmissionstabellen: Polyester. Onlineverfügbar: <https://www.gsoptics.com/transmission-curves/> (Zugriff am 07. Juni 2023)

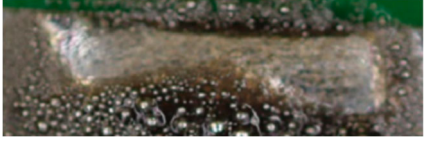

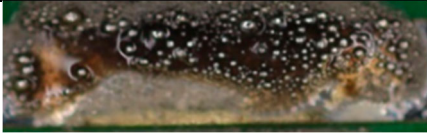


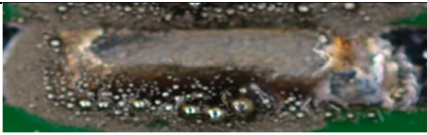


Da die Versuchsplanung pro Werkstoff 27 Parameterkombinationen ergab, wurden in Tabelle 3 und Tabelle 4 die besten Ergebnisse dargestellt. Eine erste Einschätzung der erfolgreichen Kontaktierung lieferte die visuelle Inspektion der Kontaktierungsstelle nach dem Laserlöten. Tabelle 3 zeigt, dass der Parametersatz 7 W, 95 mm/s und 100 kHz das beste optische Ergebnis für eine Lötverbindung mittels der Lötpaste Sn96,5-Ag3-Cu0,5 (SAC305) liefert. Die aufgetragene Lötpaste ist vollständig aufgeschmolzen und es kommt zu keiner Lotkugelbildung. Keine der Erscheinungen lässt sich direkt einem Parameter zuordnen. Es fällt jedoch auf, dass die Energiemenge immer in einem ähnlichen Bereich liegt

Tabelle 3: Parameter und Lötergebnisse des Lötprozesses mit Sn96,5-Ag3-Cu0,5 (SAC305)

Laserleistung (W)	Verfahrgeschwindigkeit (mm/s)	Frequenz (kHz)	Optische Aufnahmen
6	100	95	
7	95	95	
7	95	100	
7	95	105	
7	100	95	
7	100	100	
7	100	105	
7	105	95	
7	105	100	

Bei der Lötpaste Sn43,47-Bi55,85-Ag0,68 führen die optische Auswertung anhand von Form, Oberfläche und Schmauchspuren zu einem optimalen Parametersatz von 4 W, 100 mm/s und 105 kHz (Tabelle 4). Im Rahmen dieser Versuchsplanung war es jedoch nicht möglich, die Bildung von Lotkugeln mit dieser Lötpaste zu verhindern.

Tabelle 4: Parameter und Lötergebnisse des Lötprozesses mit Sn43,47-Bi55,85-Ag0,68




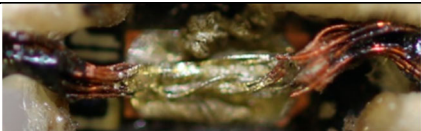

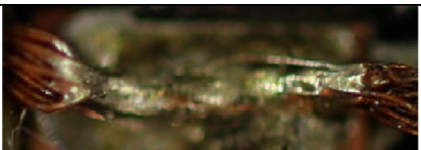
Laserleistung (W)	Verfahrgeschwindigkeit (mm/s)	Frequenz (kHz)	Optische Aufnahmen
4	95	105	
4	100	105	
4	100	100	
4	105	95	
4	105	105	
5	95	105	
5	100	100	
5	105	105	


Die Legierung SAC 305 zeigte deutliche Vorteile in der Handhabung und im Ergebnis. Aus diesem Grund wurde sie für die folgenden Untersuchungen verwendet.

In einem weiteren Schritt wurden die Drähte abisoliert und direkt auf der Leiterplatte verlötet. Dabei wurden die Lotmenge, die Korngröße der verwendeten SAC 305-Legierungen und die Anzahl der Laserprozesse variiert.

Das wiederholte Aufschmelzen der Lotpaste hat einen positiven Einfluss auf das Lötgergebnis (Tabelle 5 Proben 1 und 2). Das erneute kurzzeitige Aufschmelzen der Lotpaste verbesserte das Lötgergebnis, da das Lot mehr Zeit hatte, in die Litze zu fließen, und somit ein besseres Benetzungsverhalten aufwies. Das Lot wird durch das wiederholte Kurzzeitschmelzen nicht geschädigt. Aus der Betrachtung der Oberfläche der Proben 1 und 3 ließ sich schließen, dass die Wärmeverteilung in der Lötpaste mit kleineren Körnern (T4) besser ist als in der Paste mit größeren Körnern. Dies ist auf einen höheren Oberflächen/Volume-Verhältnis zurückzuführen: mehr Kontaktpunkte zwischen den Körnern verbessern die Wärmeübertragung in der Lötpaste. Darüber wurde die verwendete Auftragsmenge bewertet. Dabei ergab sich ein Optimum zwischen 6 mg und 8 mg. Die in Probe 1 verwendete Lotmenge war nicht ausreichend, während Probe 7 deutlich zu viel Lötpaste enthielt.

Tabelle 5: Lötgergebnisse in Abhängigkeit von der Korngröße und der Auftragsmenge

Proben	Korngröße	Lotmenge (mg)	Anzahl der Laservorgänge	Optische Aufnahme
1	T3	3,4	3	
2	T3	3,4	4	
3	T4	4,1	5	
4	T4	6,8	3	
5	T4	8,7	2	
6	T4	11,1	5	

7	T4	19,9	2	
---	----	------	---	--

Die Probe 4 zeigte eine optisch vielversprechende Kontaktierungsstelle. 30 Proben mit den für diese Probe ermittelten Parametern wurden hergestellt, um die Kontaktierungsstelle mittels vier-Leiter-Messung, Schälversuche und mikroskopischen Aufnahmen zu charakterisieren (siehe Kapitel Testverfahren).

Vier-Leiter-Messung

Zur Charakterisierung des Durchgangswiderstands wurden die zwei Kontaktierungsstellen der 30 hergestellten Proben untersucht. Im Durchschnitt wiesen die Proben einen Kontaktierungswiderstand von $92 \pm 4 \text{ m}\Omega$ auf.

Schälversuch

Die Festigkeit der Kontaktierungsstelle wurde durch einen Schälversuch untersucht. Bei diesem Test wurden vor allem drei Versagensarten beobachtet:

- (1) Das Mikrokabel löst sich von der Lötstelle ab
- (2) Das Mikrokabel bricht direkt an der Kontaktstelle
- (3) Das Mikrokabel bricht an der Stelle ab, bei der die Litze während des Lötvorgangs Zinn gesaugt hat.

Beim Schälen der lasergelöteten Proben ergibt sich immer folgendes Bild. Zu Beginn bricht die erste Litze an der Lötstelle ab. Im zweiten Schritt löst sich die gebrochene Litze von der Leiterplatte. Dann wirkt die Kraft nur noch auf die zweite Litze bis diese bricht und schließlich von der Leiterplatte ebenfalls gelöst wird.

30 Proben wurden untersucht zur Charakterisierung der Schälfestigkeit. Eine maximale Festigkeit von $7,8 \pm 1,5 \text{ N}$ wurde gemessen.

Mikroskopische Aufnahmen

Die Mikrostruktur der Lötstelle wurde mikroskopisch untersucht. Dafür wurden zwei Proben verwendet, die mit unterschiedlichen Laserleistungen hergestellt wurden. Die erste Probe (Abbildung 16a, b) wurde mit 8 W gelötet, die zweite Probe (c, d) mit 7 W. Zur Beobachtung der Schliffbilder wurden ein Lichtmikroskop (OM) und ein Rasterelektronenmikroskop (REM) verwendet. Die Aufnahmen zeigen, dass Porosität sich bei der zweiten Probe an der Lötstelle gebildet hat. Die zahlreichen Lötfehler deuten auf eine schlechte mechanische Verbindung der Lötstelle sowie auf eine geringe elektrische Leitfähigkeit hin. Probe 1 zeigt

hingegen eine schlechte Benetzung der Leiterbahnen. Da das Laserlöten Kontaktlos erfolgt, besteht die Gefahr, dass die Litze an die Oberfläche der Lötpaste bleibt.

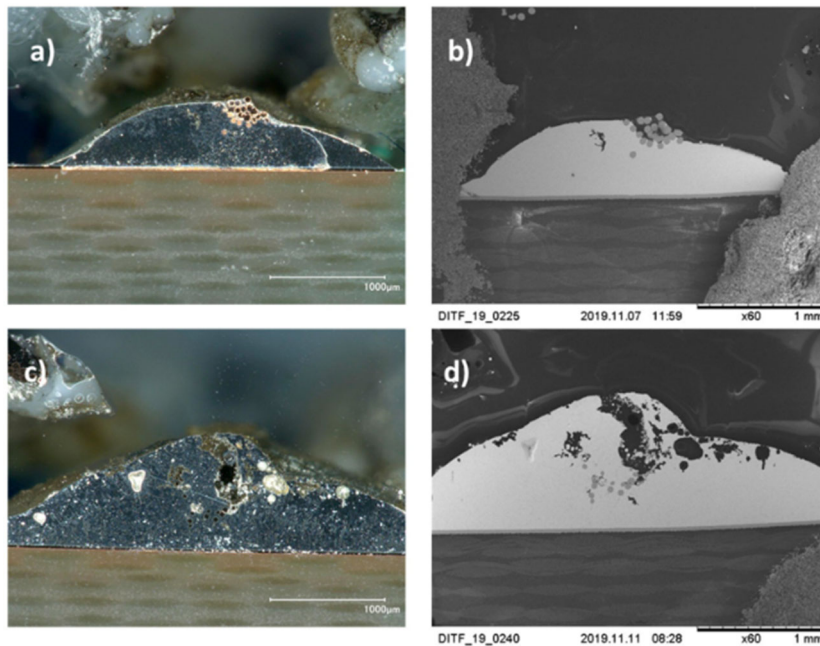


Abbildung 16: Bilder der Querschnitte der Lötstellen bei 60-facher Vergrößerung; Probe 1 (a,b) unter OM (a) und REM (b) mit Leistung 8 W; Probe 2 unter OM (c) und REM (d) mit Leistung 7 W.

In der folgenden Abbildung 17 ist der Querschnitt der Proben bei 200- bis 1000-facher Vergrößerung dargestellt. Hier ließen sich bereits viele Lötfehler feststellen. In den Aufnahmen a) und b) ist eine fehlende Haftung zwischen den Litzen und dem Lot zu erkennen. Dies führte zu einer Verringerung der Festigkeit zwischen den Litzen und dem Lot. Abbildung 17 c,d zeigt nadelförmigen Phaseninkclusionen. Diese fördern das lokale Risswachstum.

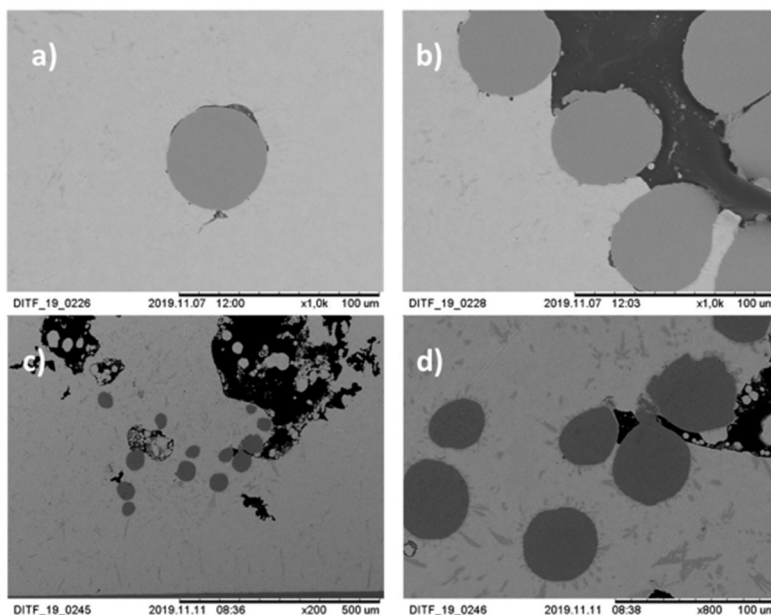


Abbildung 17: Bild des Querschnitts der Lötstelle bei 200- bis 1000-facher Vergrößerung: Probe 1 unter REM bei 1000-facher Vergrößerung (a,b) (Leistung 8 W); Probe 2 unter REM bei 200-facher (c) und 800-facher (d) Vergrößerung (Leistung 7 W)

II.1.2.1.1.1.3 THERMODEN-LÖTEN

Das Thermoden-Löten ist ein kostengünstiges Verfahren, da mehrere Verbindungen gleichzeitig hergestellt werden können und eine schnelle Temperaturerhöhungs- und Abkühlungsrate erreicht werden kann. Somit ist dieser Prozess für die Massenproduktion geeignet. Dabei wird eine Thermode durch gepulsten Strom erwärmt und dann mit definierter Kraft auf zwei vorverzinnte Teile angedrückt. Die Teile werden anschließend durch den Wärmezufuhr miteinander verbunden.

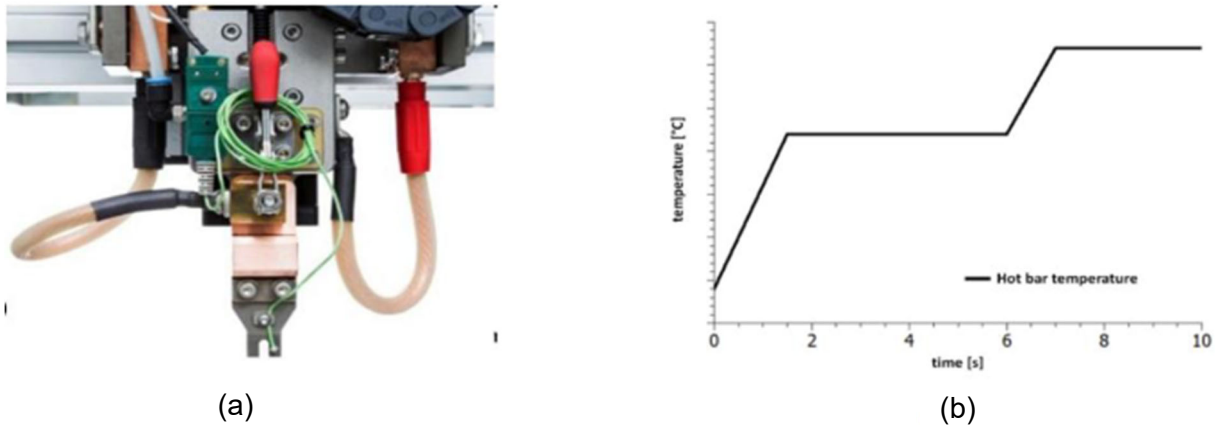


Abbildung 18: (a) Thermoden-Lötsystem mit einer 3 Thermode und zwei kontaktierungspunkten, (b) Temperaturprofil eines Thermodenlötprozesses mit einem Zweiphasenprozess

In diesem Vorhaben wurde eine Thermode mit einer quadratischen Kontaktfläche und einer Kantenlänge von 1,6 mm. Zur Kontaktierung wurde die Thermode nach dem Temperatur-Profil der Abbildung 18 b erhitzt. Pro Kontaktstelle wurden 0,05 g Lotpaste aufgetragen, die Sn96,5Ag3Cu0,5 mit einem Metallgehalt von 87,5 % und Körnung 3 enthielt.

Die Kontaktierungsstellen wurden anschließend durch Vier-Leiter-Messung und Schälversuche charakterisiert (siehe Kapitel Testverfahren).

Vier-Leiter-Messung

30 Leiterplatten mit jeweils 4 Kontaktierungsstellen wurden mit einem textilen Band kontaktiert (Abbildung 19). Jede Kontaktierungsstelle wurde optisch bewertet und den Durchgangswiderstand gemessen.



Abbildung 19: Kontaktierung einer Leiterplatte mit einem textilen Band mittels Thermodenlötten

Die visuelle Inspektion der Kontaktstellen wurde durchgeführt um zu ermitteln, ob bereits durch Sichtkontrolle ein Rückschluss auf die Qualität der Kontaktierung geschlossen werden kann. Jede Kontaktierungsstelle wurde einzeln mit einem Wert von 0 bis 2 bewertet. Der Wert 0 wurde vergeben, sobald erkennbar war, dass keine Kontaktierung erfolgt ist. Beispielsweise durch absteigen der Litze von der Kontaktierungsstelle. Eine Kontaktierungsstelle wurde mit 1 Bewertet, wenn die Möglichkeit eines Kontaktes besteht, jedoch Einschlüsse vorhanden sind, die Platzierung fehlerhaft ist, oder die Gefahr einer Überbrückung besteht. Wurde eine Kontaktierung mit 2 Bewertet, so ist die Kontaktierung ohne erkennbare Fehler erfolgt. Laut der optischen Bewertung hat sich das Thermodenlötten als ein zuverlässiges Kontaktierungsverfahren ergeben.

Probe	Kontaktierungsstelle			
	1	2	3	4
L1	2	2	2	2
L2	2	2	2	2
L3	2	2	2	2
L4	1	2	2	2
L5	2	2	2	2
L6	1	1	2	2
L7	2	2	2	1
L8	2	2	2	1
L9	2	2	1	1
L10	1	2	2	2
L11	2	2	2	2
L12	1	1	2	2
L13	1	1	2	2
L14	2	2	2	2
L15	2	2	2	2
L16	2	2	2	2
L17	2	2	2	1
L18	1	2	2	2
L19	1	2	2	2
L20	2	2	2	2
L21	2	2	2	2
L22	2	2	1	1
L23	2	2	2	2
L24	2	2	2	2
L25	2	2	1	2
L26	2	2	2	2
L27	2	1	1	2
L28	1	2	2	1
L29	2	2	2	2
L30	1	2	2	2

Abbildung 20: Optische Bewertung der Kontaktierungsstellen nach Kontaktierung mittels Thermodenlötten

Dies wurde durch die Widerstandsmessungen bestätigt, die einen Durchgangswiderstand von $8,83 \pm 3,7 \text{ m}\Omega$ ergeben haben.

Schälversuche

In Abbildung 21 zeigt die erste Kraftspitze das Versagen der Kontaktierungsstelle und die zweite das Herausziehen des Mikrokabels vom Textil. Durch die zweite Kontaktierungsstelle war die Leiterplatte mit dem Textilband immer noch verbunden. Beim weiteren Entfernen der Leiterplatte vom Textil blieben die Litzen mit der Kontaktstelle der Leiterplatte verbunden und wurden aus dem Textil herausgezogen. Bis alle Proben vollständig gerissen waren, war ein Verfahrweg von 50 mm erforderlich. Eine maximale Festigkeit von $29,2 \pm 8 \text{ N}$ wurde gemessen.

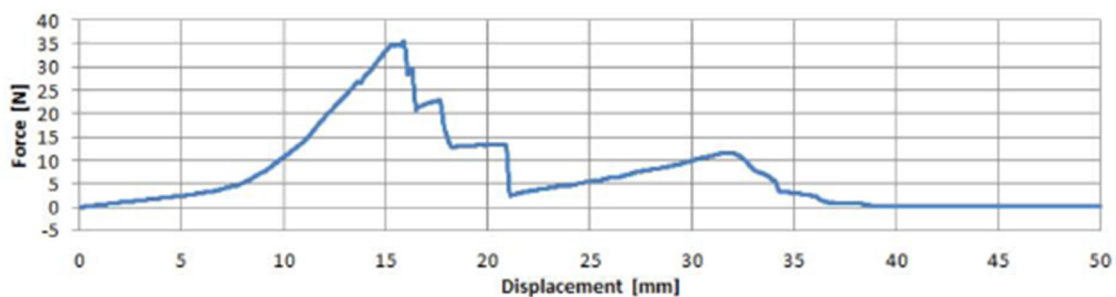


Abbildung 21: Kraft-Dehnungskurve während des Schälversuchs

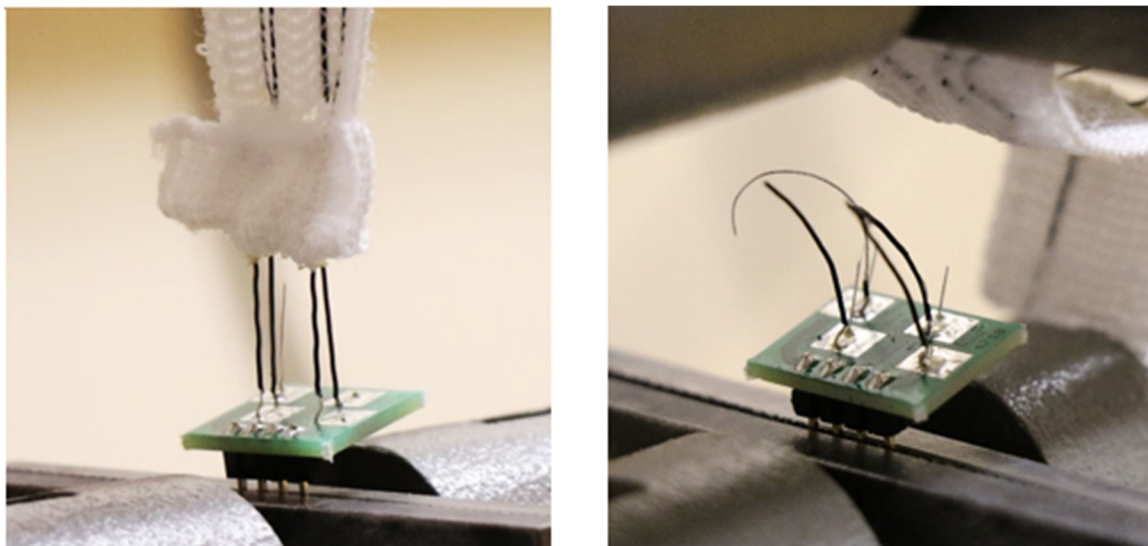


Abbildung 22: Schälversuche (a) während des Versuchs, (b) am Ende des Versuchs

II.1.1.1.2 KLEBEN

Leitfähige Klebstoffe bestehen aus leitfähigen Partikeln in einer Polymermatrix. Anisotrop leitfähigen Klebstoffen (ACA) werden von isotropen Klebstoffen (ICA) unterschieden. Beide Klebstoffarten wurden zur Herstellung einer zuverlässigen Kontaktierung getestet. ACAs weisen einen deutlich geringeren Füllstoffgehalt auf. Dadurch ist der Abstand zwischen den

Partikeln in der isolierenden Polymermatrix so groß, dass kein Kontakt zwischen den Partikeln stattfindet. So werden Kurzschlüsse verhindert. Die Kontaktierung erfolgt unter Druck, der die Klebeschicht auf den Partikeldurchmesser komprimiert. ICA weisen aufgrund der höheren Füllstoffgehalt und Partikelgröße eine bessere Leitfähigkeit auf. Die in diesem Vorhaben getesteten Klebstoffe und die dafür verwendete Kontaktierungsmethode sind in der Tabelle 6 dargestellt. Da die Klebstoffe unterschiedlich aushärtbare Polymermatrix besitzen, mussten die Kontaktierungsprozesse dementsprechend angepasst werden.

Tabelle 6: Getestete leitfähige Klebstoffe und Kontaktierungsprozesse

Klebstoff	Klebstoffart	Füllstoffgehalt	Polymermatrix	Aushärtung
1	ICA	>60% Silber	PU (wasserbasiert)	180 °C für 2s mittels Thermode
2	ICA	>60% Silber	Epoxidharz	120 °C für 5min mittels Heißluft
3	ACA	3% goldbeschichtete Partikel	Acrylat	UV-A Wellenlänge 385 nm, 30s
4	ACA	3% goldbeschichtete Partikel	Acrylat	UV-A Wellenlänge 385 nm, 30s
5	ACA	1% goldbeschichtete Partikel	Acrylat	UV-A Wellenlänge 385 nm, 30s

Zur Charakterisierung der Kontaktierung wurde eine Leiterplatte mit vier Kontaktierungspads mit textilintegrierten Mikrokabel kontaktiert. Zur Charakterisierung der Kontaktierungsstellen wurden Vier-Leiter-Widerstandsmessungen, Schälversuche und mikroskopische Aufnahmen durchgeführt (Siehe Kapitel Test und Verfahren).

Vier-Leiter-Messung

Zur Durchführung der Vier-Leiter-Widerstandsmessung wurden 10 Proben mit vier Kontaktierungsstellen untersucht.

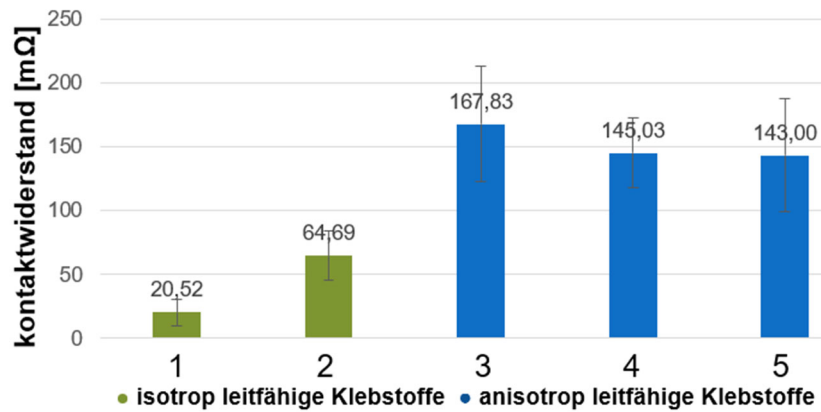


Abbildung 23: Einfluss des Klebstoffarts auf den Kontaktierungswiderstand

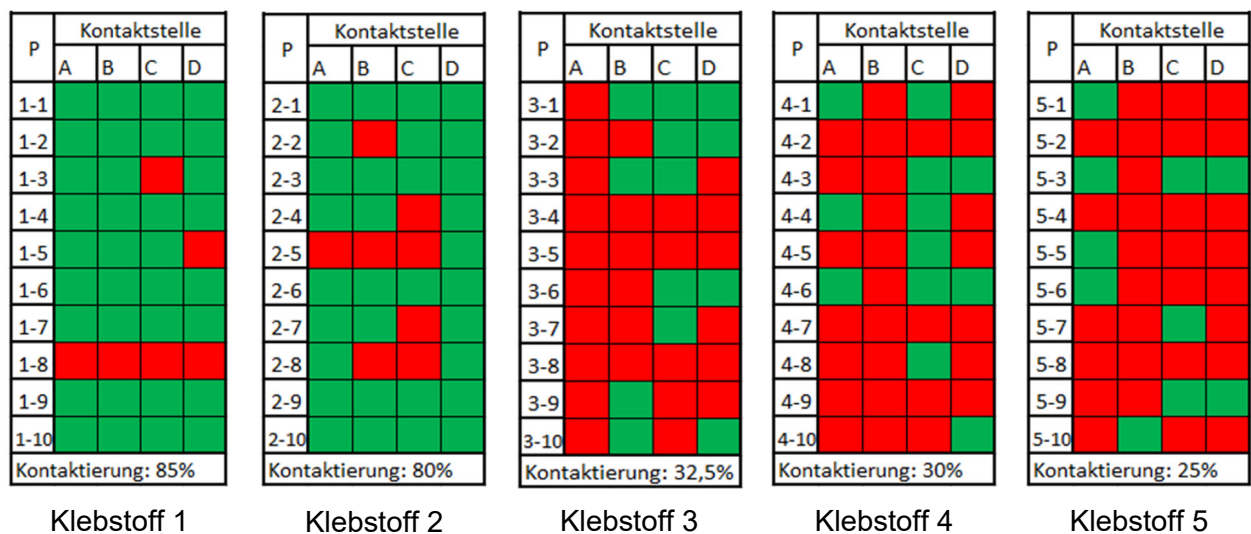


Abbildung 24: Einfluss des Klebstoffs auf die Zuverlässigkeit des Kontaktierungsprozesses. Rot: Kontaktierung nicht erfolgt, grün: Kontaktierung erfolgt

Aufgrund des höheren Füllstoffgehalts weisen die isotrop leitfähigen Klebstoffe einen niedrigeren Kontaktierungswiderstand und führen vor allem zu einer zuverlässigeren elektrischen Verbindung. Bei dem ICA 1 wurde während des Kontaktierungsprozesses Druck mittels Thermode aufgebracht, was einen direkten Kontakt zwischen Mikrokabel und Leiterplatte ermöglicht hat (Abbildung 25). Dies führte zu einer zuverlässigeren Kontaktierung.

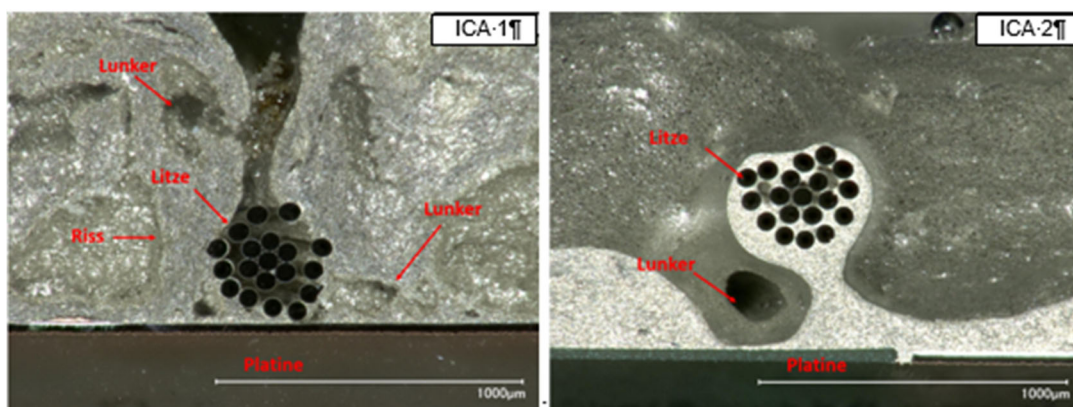


Abbildung 25: Mikroskopische Aufnahme der Kontaktstellen mit ICA 1 und 2

Schälversuche

Die Hauptversagensart in der Schälprüfung war das Schalen des Klebstoffs, kein Drahtbruch wurde in der Prüfung festgestellt.

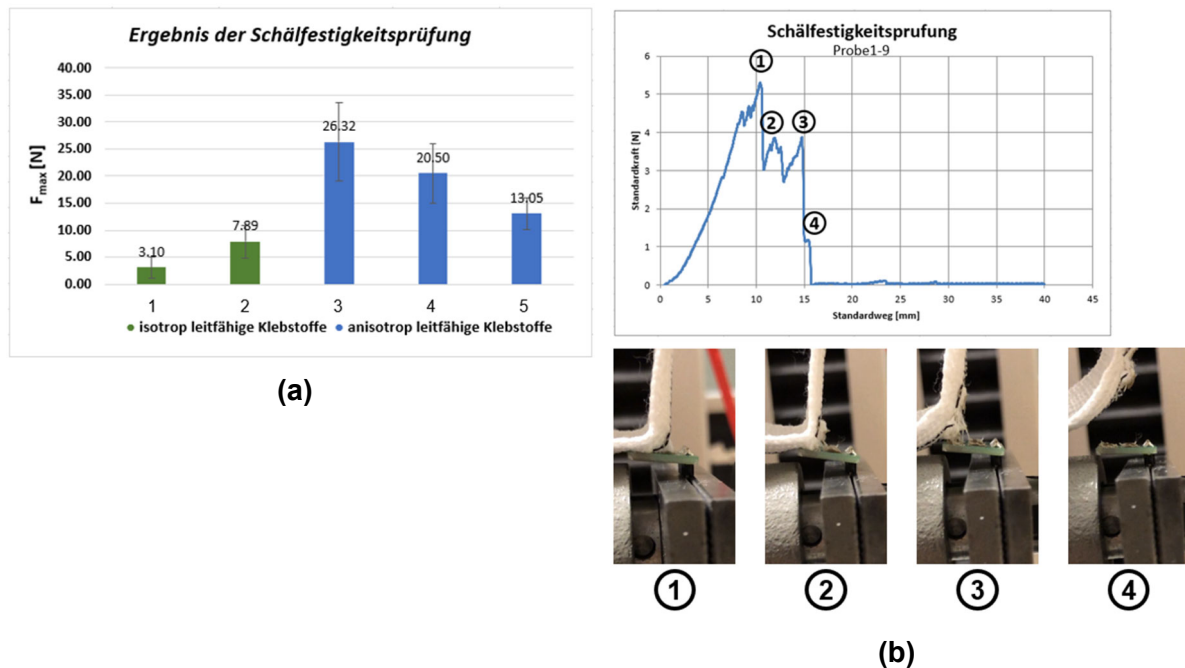


Abbildung 26: (a) Einfluss des Klebstoffs auf die Schälfestigkeit der Kontaktierung, (b) Schälfestigkeitskurve und Bildaufnahmen der Kontaktstelle während des Versuchs.

ACAs weisen höhere Schälfestigkeiten als ICAs auf (Abbildung 25). Jedoch ist dies hochwahrscheinlich zu der Polymermatrix zurückzuführen: Die getesteten Klebstoffe basieren auf unterschiedlichen Polymeren (Tabelle 6). Die ACAs bestehen i.d.R. aus Acrylat, was generell eine gute Schlagzähigkeit und Schälfestigkeit ergibt. Die Unterschiede zwischen den ACAs entsprechen die im Datenblatt angegebenen mechanische Eigenschaften. Hingegen bestehen die ICAs aus Epoxidharz bzw. Polyurethan. Epoxidharz ist besonders hart und somit weist eine schlechte Reißbeständigkeit und Schlagzähigkeit. Zudem ist aus den Schliffbilder ersichtlich, dass sich Mikrorissen, Lunker und Luftblasen in den ICA-Klebstoffe befinden. Diese fördern das Mikrorisswachstum unter Einwirkung äußerer Kräfte und somit führen zur Reduzierung der Schälfestigkeit.

II.1.1.1.3 ULTRASCHALL-SCHWEIßEN

Das Ultraschall-Schweißen ist aufgrund seiner niedrigen Verarbeitungstemperatur und der Möglichkeit auf den Abisolierprozess zu verzichten für die Kontaktierung von E-Textiles vielversprechend. Um dieses Verfahren zu testen wurde Kontaktierungsversuche zwischen einem Mikrokabel und einem leitfähigen Gewebe aus silberbeschichtete Polyamidfäden mit einem Ultraschallschweißgerät durchgeführt. Beim Aufbringen einer Kraft von 225 N und eine Energie von 9 J konnten die zwei Komponenten erfolgreich kontaktiert werden, ohne das Textil zu beschädigen (Abbildung 27). Gleichzeitig blieb die Kontaktierungsstelle geschützt.



Abbildung 27: Kontaktierung eines Mikrokabels mit einem leitfähigen Textil mittels Ultraschall-Schweißen

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

Die DITF haben in diesem Teilarbeitspaket des Verbundprojekts keine Arbeitsanteile.

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

Um die sensorischen Strukturen mit Strom zu versorgen wurde ein Gewebe mit eingewebten leitfähigen Fäden hergestellt. Das ausgewählte leitfähige Garn besteht aus 7 gezwirnten Multifilamentgarnen, die mit einer dünnen Kupferfolie umwunden sind (Abbildung 28). Aufgrund der Dicke der Metallfolie sind diese Garne unempfindlicher gegenüber Abrieb und weisen einen sehr geringen Widerstand ($1,03 \Omega/50 \text{ cm}$) auf.

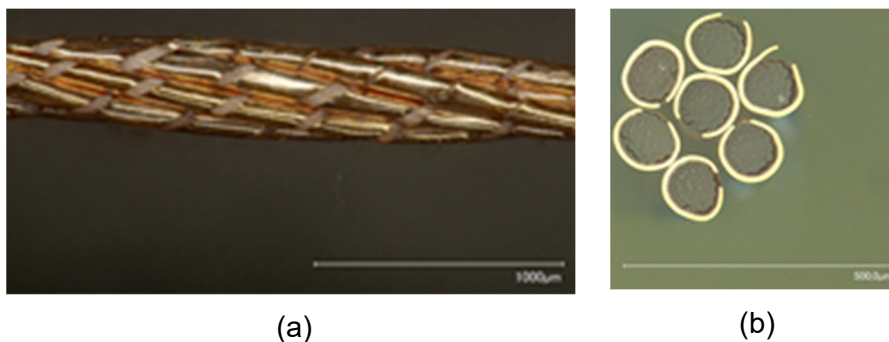


Abbildung 28: (a) Längs- und (b) Querschnitt des eingewebten leitfähigen Garnes

Um zu entscheiden welches Webverfahren für die Herstellung der Gewebe eingesetzt werden sollte, musste zunächst abgeklärt werden, ob die leitfähigen Fäden in Schuss- oder in Kettrichtung in das Gewebe eingebracht werden sollten. Da zu diesem Zeitpunkt die Dichte, mit welcher die Fäden im Gewebe eingebracht werden, unbekannt war, wurde die Eintragung der Fäden über den Schuss gewählt. Dies bietet die Möglichkeit flexibel die Dichte und Anzahl der Fäden einzustellen. Jedoch ist mit einer schwierigeren Verarbeitung des Materials im

Schuss zu rechnen. Allerdings ist die Einbringung über den Schusseintrag während der Entwicklung des Gewebes auf Grund der Flexibilität von enormem Vorteil.

Für die Webversuche standen an den DITF mehrere Webmaschinen mit unterschiedlichen Eintragsvarianten zur Verfügung. Nachfolgend sind diese Maschinen in Tabelle 7 kurz beschrieben.

Tabelle 7: Spezifikationen der Webmaschinen

Maschine	Eintrag	Webbreite [cm]	Nennbreite [cm]	Kette
CCi Evergreen II	Greifer	50	50	-
Dornier LWV4/S	Luft	198	220	Polyester 167f32
Sulzer G6300	Greifer	112	190	-

Da für die Demonstratoren nach Möglichkeit leitfähige Gewebestücke mit ca. 2 m Höhe (respektive Breite) hergestellt werden sollten, sowie der Eintrag durch den Schuss gewünscht war, wurde die Dornier Luftdüsenwebmaschine gewählt (Abbildung 29). Luftdüsenwebmaschinen sind extrem produktive und weit verbreitete Webmaschinen, welche überwiegend in der Industrie eingesetzt werden. Durch die Verwendung einer industriellen, schnelldrehenden Webmaschine soll zudem gezeigt werden, dass das Produkt wirtschaftlich produziert werden kann.



Abbildung 29: Dornier Luftdüsenwebmaschine

Grundsätzlich werden heutzutage im Wesentlichen zwei verschiedene Eintragstechniken der Webmaschinen eingesetzt. Zum einen Greiferwebmaschinen, diese zeichnen sich dadurch aus, dass viele unterschiedliche Materialien eingesetzt werden können. Zum anderen werden die Schussfäden mit Luft eingetragen. Diese Eintragstechnik setzt voraus, dass die Garne

eine gewisse Angriffsfläche für die Luft bieten und zudem durch die Luft nicht auseinander geblasen werden können. Das Luftdüsenweben zeichnet sich durch seine hohe Produktivität aus. Moderne Luftdüsenwebmaschinen können mit über 1600 U/min betrieben werden. Greifermaschinen hingegen nur mit ca. 600-800 U/min. Nachfolgend ist in Abbildung 30 der Schusseintrag einer Dornier Luftdüsenwebmaschine schematisch dargestellt.

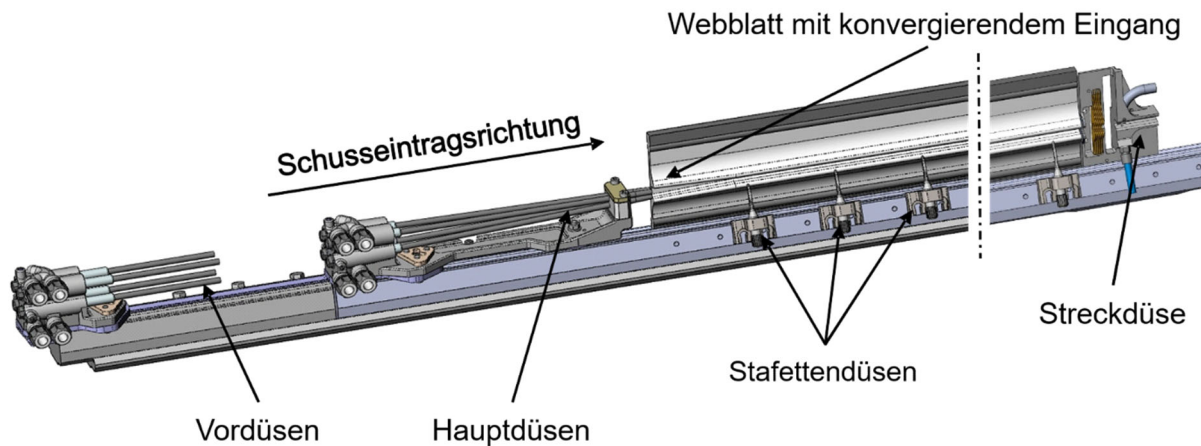


Abbildung 30: Schematische Darstellung des Schusseintrages einer Luftdüsenwebmaschine Bildquelle: Lindauer Dornier

Der Schusseintrag erfolgt immer von links nach rechts und beginnt mit der Vorbeschleunigung in den Vordüsen. Hier wird jedes Schussmaterial in einer eigenen Düse vorgelegt. Die Vorbeschleunigung ist notwendig, um eine Beschädigung des Garnes durch die Hauptbeschleunigung in der folgenden Hauptdüse zu vermeiden. Sowohl die Vor- wie auch die Hauptdüse werden permanent mit der sogenannten Halteluft versorgt, welche den Faden gestrafft hält. Für den Schusseintrag wird auf beide Düsen ein Luftstoß gegeben, welcher den Faden beschleunigt. Der beschleunigte Faden wird in ein spezielles Webblatt geführt, welches einen Schusskanal ausformt und so den Faden führt. Da die Beschleunigung nicht ausreichend ist, um den Faden auf die andere Seite des Webblattes zu befördern, wird mit Hilfe von Stafettendüsen ein Wanderfeld erzeugt, welches mit der Fadenspitze durch das Webblatt wandert. Auf diese Weise wird der Faden bis zur Streckdüse geführt. Die Streckdüse Streckt den Faden, während er durch das Webblatt angeschlagen wird. Die Länge des eingetragenen Schussfadens wird durch die Fadenlieferung der Vorspulgeräte bestimmt. Die Erkennung, ob der Schussfaden angekommen ist, erfolgt durch einen optischen Sensor vor der Streckdüse. Die Einflussfaktoren auf den Schusseintrag sind bei diesem Eintragsverfahren sehr vielseitig. Als Haupteinflussfaktoren zählen der Druck der Luft, der Startzeitpunkt des Schussfadens und die Blasdauer des Wanderfeldes.

Für die Webversuche wurde zunächst versucht das Schussmaterial direkt von den gelieferten Kreuzspulen auf die Vorspulgeräte abzuspielen. Jedoch hat sich gezeigt, dass auf Grund der hohen Drehung des elektrisch leitfähigen Garnes sofort Kräuselungen entstehen, da das Garn nicht gleichmäßig von der Spule abgespult wird. Diese Kräuselungen machen einen

Schusseintrag unmöglich. Durch einen Umstieg auf einen Tangentialen Abzug, bei dem die Abzugsspulen abgebremst werden, konnte dieses Problem behoben werden. Auf Grund der hohen Masse des elektrisch leitfähigen Garnes mussten die Spulen sehr klein gewählt werden. Die verwendeten Federbremsen waren sonst nicht dazu in der Lage die Spulen wieder abzubremesen und den Faden dabei gespannt zu halten, um Kräuselungen zu vermeiden. Das Abbremsen der Spulen ist notwendig, da die Vorspulgeräte nicht kontinuierlich das Material von den Spulen abziehen, sondern erst wenn eine gewisse Vorratsmenge auf den Geräten unterschritten wird.

Im Folgenden wurden Eintragsversuche mit dem leitenden Garn vorgenommen. Hierbei wurde festgestellt, dass sich das Material mit Luft eintragen lässt. Jedoch musste hierfür der Druck der Hauptdüse, sowie der Stafettendüsen stark gesteigert werden. Die Einstelldrücke sind im Folgenden in Tabelle 8 dargestellt:

Tabelle 8: Einstelldrücke der Düsen

Hauptdüse	Stafettendüsen	Streckdüse
6 bar	6,4 bar	4 bar

Die Webgeschwindigkeit für die Webversuche wurde auf 174 U/min eingestellt. Eine deutlich höhere Drehzahl wäre auch möglich gewesen. Da aber eine Vielzahl von Bindungen untersucht werden sollte, wurde eine höhere Geschwindigkeit nicht benötigt.

Nach erfolgter Einstellung der Eintragsseite wurde als zweites Schussmaterial für die nichtleitenden Bereiche ein 1100 dtex Polyestergarn der Fa. Diolen gewählt somit hat sich die in Tabelle 9 dargestellte Materialkombination für das Gewebe ergeben:

Tabelle 9: Verwendete Materialien für die Gewebeherstellung

Kettmaterial	Schussmaterial 1	Schussmaterial 2
Polyester 167 dtex	Karl Grimm HighFlex 3981 7x1	Polyester 1100 dtex

Basierend auf den Stickversuchen für die Materialauswahl wurden mehrere Webversuche mit unterschiedlichen Anzahlen an Schüssen für die geforderte Teilung zwischen leitenden und nichtleitenden Bereichen vorgenommen. Im Weiteren wurde auch die Schussdichte variiert. Die Wahl der Bindungen wurde durch die Anzahl der Schäfte eingeschränkt. Daher wurden als Bindungsvarianten Köper und Atlasbindungen ausgewählt (Abbildung 31). Bei den Köperbindungen wurde bewusst keine Symmetrische Bindungen ausgewählt, um eine Gewebeseite zu erzeugen, bei welcher die leitfähigen Garne nicht von Kettfäden verdeckt werden. Eine Leinwandbindung wurde ausgeschlossen, da diese eine gesicherte Querkontaktierung der leitenden Garne verhindert. Tabelle 10 zeigt die Parameter der vorgenommenen Bindungsversuche. Insgesamt wurden neun verschiedene Bindungen untersucht. Durch Messen der einzelnen Streifen im entspannten Zustand wurden die Abmessungen der Streifen bestimmt. Eine rechnerische Bestimmung mit Hilfe der

Schussdichte liefert nur eine grobe Orientierung, da die Kette gespannt ist und somit noch ein Schrumpf im Textil erfolgt.

Tabelle 10: Parameter der Webversuche

Nummer	Schussdichte [Sf/cm]	Polyester-Schüsse	Resultierende Breite in [mm]	Kupfer-Schüsse	Resultierende Breite in [mm]	Gesamtbreite [mm]	Bindung
C01	15	9	5,9	5	2,8	8,7	K 1/3
C02	15	10	6,6	6	3,4	10	K 1/3
C03	15	10	6,6	6	3,1	9,7	Polyester K 1/3 Kupfer A 1/7
C04	15	10	6,6	7	3,4	10	Polyester K 1/3 Kupfer A 1/7
C05	15	10	6,6	6	3,4	10	K 1/3 Bindungsverlauf wird bei Materialwechsel umgekehrt
C06	20	10	5	7	2,45	7,45	Polyester K 1/3 Kupfer A 1/7
C07	20	13	6,54	9	3,39	9,93	K 1/3
C08	21	13	6,51	9	3,42	9,93	K 1/7
C09	21	14	6,97	9	3,43	10,4	K 1/7

Im Folgenden zeigt Abbildung 31 eine Nahaufnahme der eingewebten Kupfergarne. Die Abbildung vergleicht eine Körperbindung 1/3 (oben) und eine Atlasbindung 1/7 (unten) auf der Vorderseite (links) und Rückseite (rechts). Beide Gewebe wurden mit derselben Schussdichte und derselben Rapportlänge hergestellt. Es ist zu sehen, dass die Körperbindung auf der Vorderseite die Kupfergarne stärker mit Kettgarnen verdeckt als die Atlasbindung. Auf der

Rückseite jedoch ist umgekehrtes zu erkennen. Hier verdeckt die Atlasbindung die Kupfergarne wesentlich stärker. Durch diese Anordnung ist davon auszugehen, dass eine Kontaktierung auf der Vorderseite bei beiden Bindungen sehr gut möglich ist. Die Atlasbindung bildet aufgrund der geringeren Anzahl an Hebungen eine größere leitfähige Fläche auf der Vorderseite. Es muss aber beachtet werden, dass eine Atlasbindung bei einer geringen Schussdichte wenig Schiebefest ist. Dies bedeutet, dass beim Eindringen der Kontaktierungsstifte in das Gewebe, die Kupferfäden verschoben werden könnten und möglicherweise keine Kontaktierung mehr gewährleisten. Beheben lässt sich dies durch eine Steigerung der Schussdichte, vgl. Tabelle 10 C06-C09.

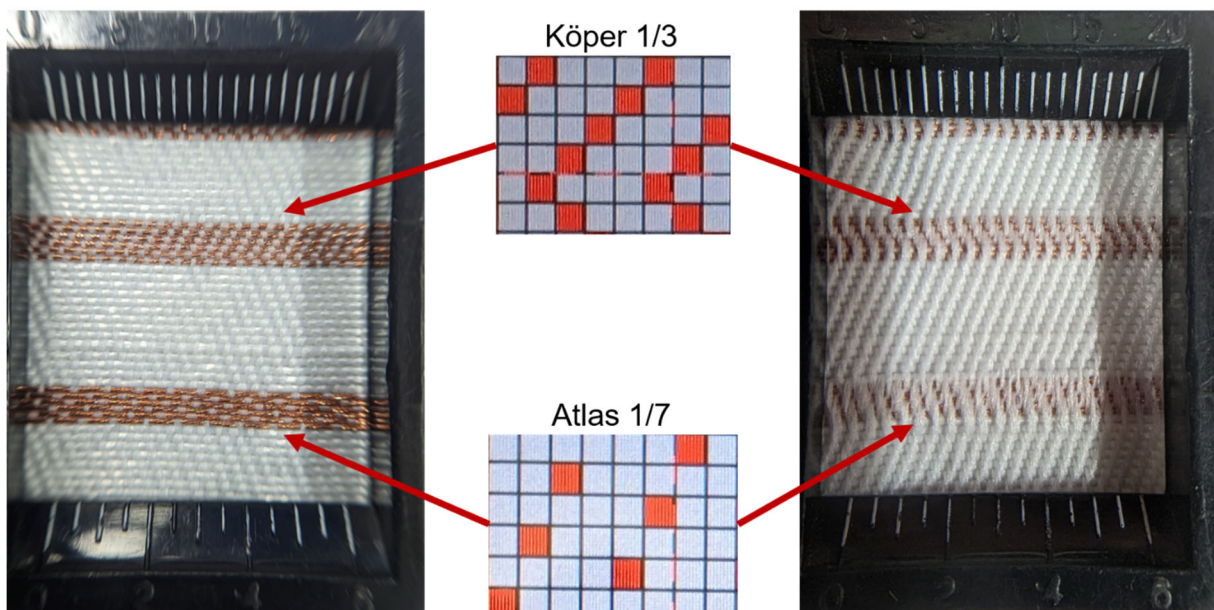


Abbildung 31: Vergleich einer Köper 1/3 Bindung mit einer Atlas 1/7 Bindung im Bereich der Kupfergarne

Die Gewebemuster wurden dem DFKI zur Durchführung von Kontaktierungsversuche übergeben. Die Bindung C05 wurde dementsprechend als finale Bindung ausgewählt.

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

Zur Erzeugung sensorischer textiler Strukturen wurde auf verschiedene Textilprozesse zurückgegriffen. Zunächst wurde mit einem vorhandenen partiell leitfähigen Gewebe kapazitive Strukturen konfektioniert und getestet. Danach wurden Gitterstrukturen gestickt. Schließlich wurden Interaktionsfelder gedruckt.

II.1.3.3.1 Vorversuche mit partiell leitfähigem Gewebe

Zunächst wurde ein Gewebe mit drei leitfähigen Streifen aus eingewebten Drähten verwendet. Die Drähte der oberen und unteren Streifen wurden durch eine Schweißnaht voneinander getrennt, wodurch 4 voneinander isolierte leitfähige Felder entstanden (Abbildung 32 (a)). Zur Prüfung der kapazitiven Eigenschaften des entstandenen Systems wurde eine isolierende

Folie auf das Gewebe gelegt Die Kapazität zwischen jedem Feld und dem mittleren Streifen wurde anschließend während der Betätigung eines oder zwei Felder gemessen (Abbildung 32 (b)). Dafür wurde der Datalogger AtTiny3217 von Bosch verwendet. Die Betätigung jedes Feldes war eindeutig erkennbar. Jedoch eine Betätigung mehrerer Felder verringerte die Kapazitätsänderung.

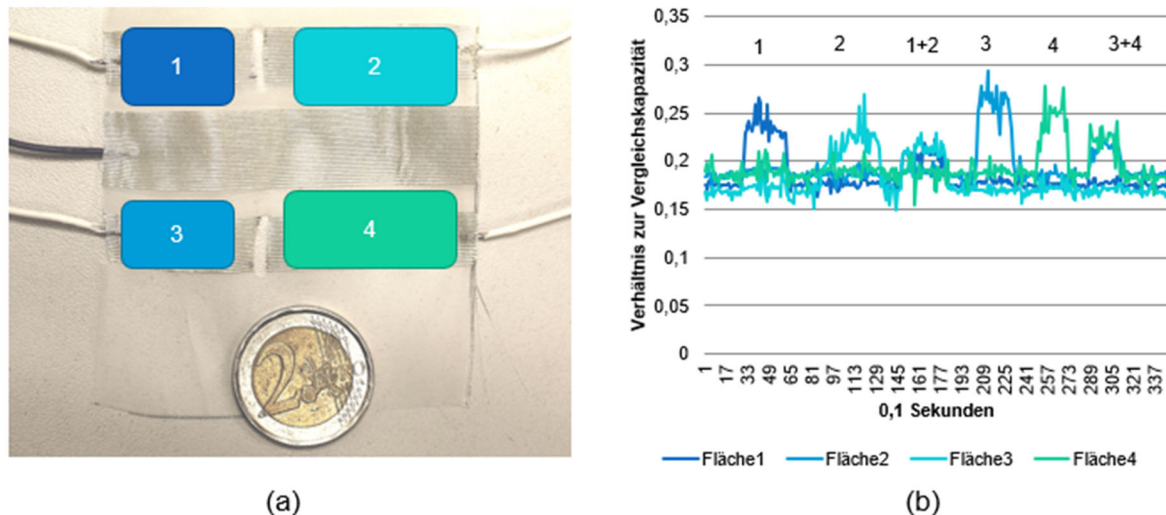


Abbildung 32: (a) Textil mit eingewebten Drähten, (b) Kapazitive Messungen

Zur Erhöhung der Kapazität wurde angestrebt, den Abstand zwischen den Streifen zu reduzieren. Daher wurde eine Sandwichstruktur aus zwei Geweben mit leitfähigen Streifen zusammengenäht, die durch eine isolierende Folie voneinander getrennt waren (Abbildung 33). Wie vorhin wurde das Textil zusätzlich mit einer isolierenden Folie abgedeckt, damit die Leiter nicht direkt berührt werden. Mit dieser Struktur konnten die gemessenen Kapazitätsänderungen erhöht werden. Jedoch wies das Signal hohe Streuungen auf und die betätigten Flächen konnten nicht immer eindeutig erkannt werden. Dies kann auf eine Änderung des Abstands zwischen den leitfähigen Textilien zurückgeführt werden: Dieser war nur durch die äußere Naht bedingt.

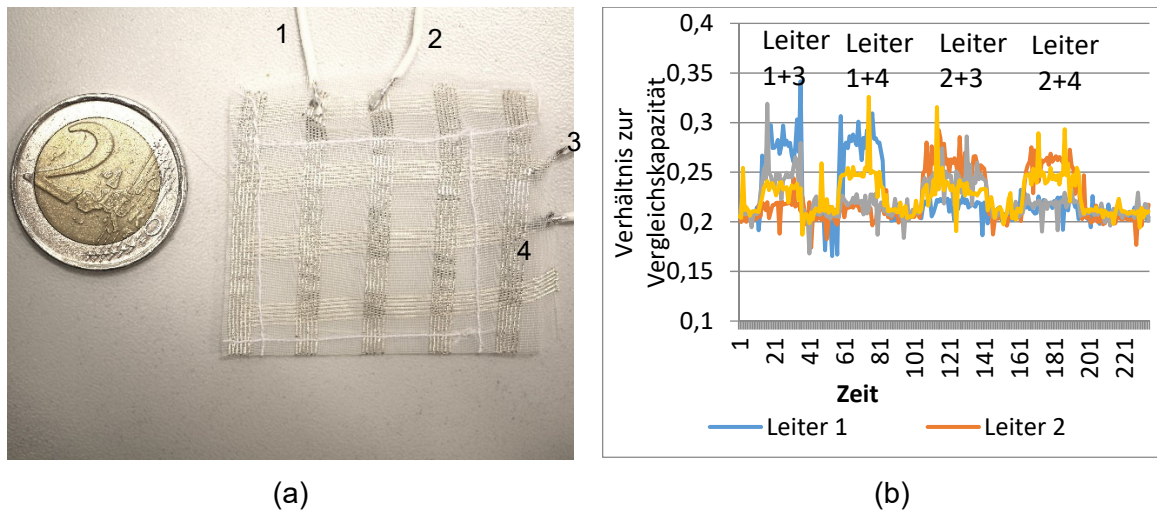


Abbildung 33: (a) Kapazitive Sandwichstruktur mit 2 leitfähigen Gewebe (b) Kapazitive Messungen

II.1.3.3.2 Gesticktes Interaktionsfeld

Um den Abstand zwischen den Elektroden besser definieren und die Strukturen automatisiert herstellen zu können, wurde auf das Stickverfahren zurückgegriffen. Somit wurden



Abbildung 34: Stickmaschine

Gitterstrukturen aus leitfähigen Garnen bzw. Mikrokabeln mittels einer ZSK-Stickmaschine angefertigt (Abbildung 34). Dafür wurde der Farbkopf links im Bild verwendet.

Um eine Gitterstruktur zu erzeugen wurde erstmal mit isolierten Mikrokabeln gestickt (Abbildung 35). Dabei wurde das isolierte Mikrokabel als Unterfaden verwendet. Da Mikrokabel eine höhere Biegesteifigkeit haben als Stickgarne und dicker sind, musste das

Mikrokabel als Unterfaden verwendet werden. Die Gitternetzstruktur wurde so programmiert, dass die Nadel nicht in die Mikrokabel sticht. Als Stich wurde ein Steppstich verwendet. Der Abstand zwischen den Leitern war durch die Teflonbeschichtung vorgegeben. Der Einsatz der Mikrokabel beeinträchtigte die haptischen Eigenschaften sowie die Biegeschlaffheit des textilen Substrates. Deswegen wurde diese Struktur nicht weiteruntersucht.

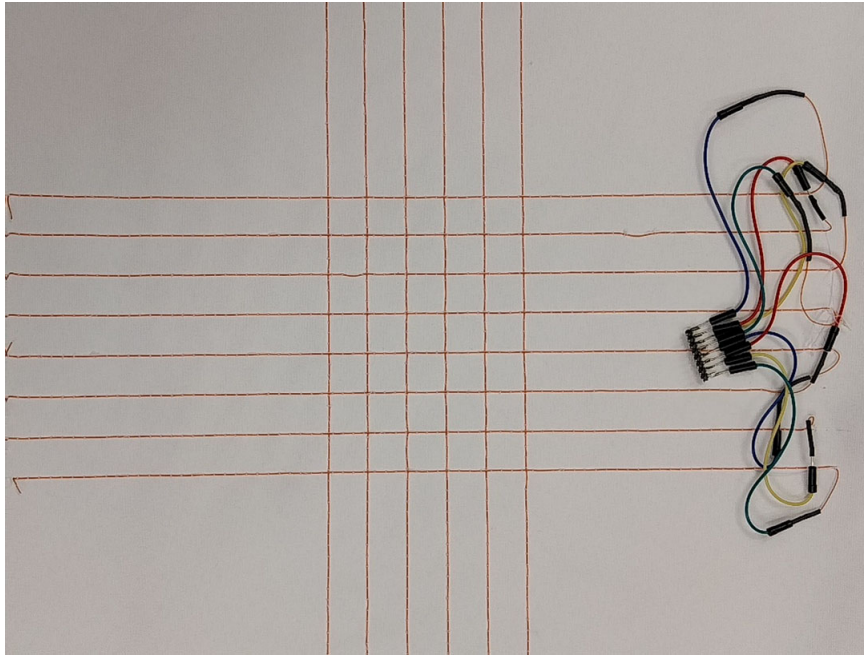


Abbildung 35: Einseitige Gitterstruktur mittels isolierten Mikrokabeln

In einem weiteren Versuch wurde die gleiche Geometrie gestickt. Damit die Haptik dünner ist als bei den gestickten Mikrokabeln wurde das Stickgarn Madeira HC40 verwendet. Dieses Garn besteht aus einem Polyamidgarn welches mit Silber beschichtet ist. Zur Herstellung der ersten Elektrode wurde das Garn als Oberfaden verwendet. Zur Herstellung der zweiten Elektrode wurde das Garn als Unterfaden verwendet. Bei der Stickerei war darauf zu achten, dass sich der leitfähigen Unter- und Oberfaden sich nicht treffen und es dadurch zu keinem elektronischen Kontakt kommt. Der elektronische Kontakt konnte während dem Stickern vermieden werden, indem die Fadenspannungen so eingestellt wurden, dass der leitfähige Faden gestreckt in der Stickerei vorliegt. Dies bedeutet, dass der leitfähige Faden mit einer hohen Fadenspannung gestickt wurde. Dies erforderte eine manuelle Änderung der Fadenspannung während des Stickprozesses.

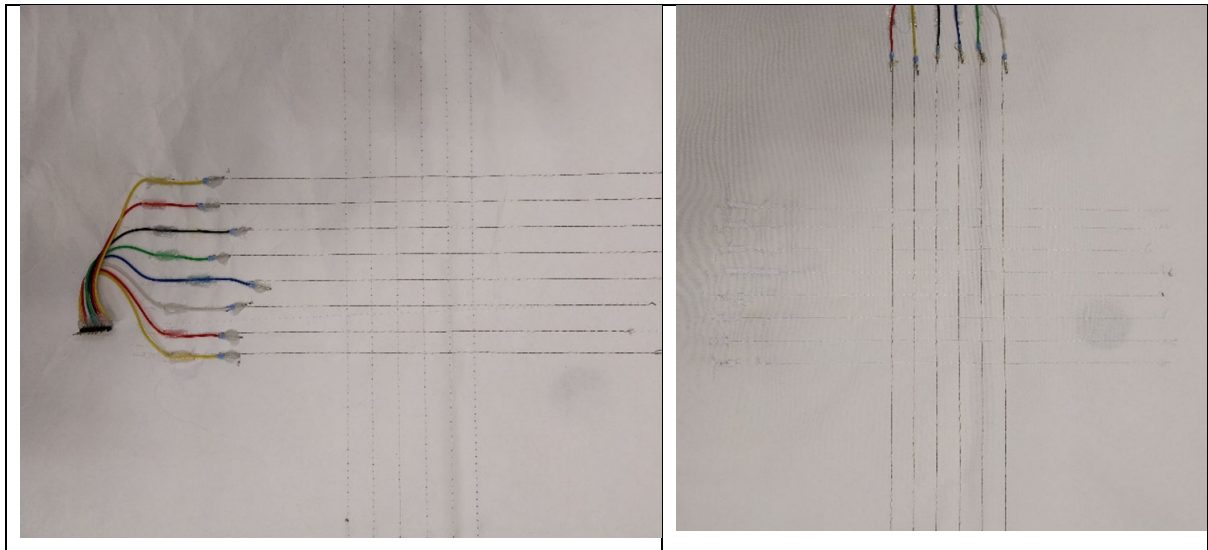


Abbildung 36: Doppelseitige gestickte Gitterstruktur mit Madeira Garn HC40

In einem weiteren Versuch wurde eine Gitterstruktur, mit einer Kästchenlänge von 5 mm gestickt. Dadurch sollten die Grundkapazität der Struktur sowie die Kapazitätsänderung bei Betätigung des Textils erhöht werden. Damit keinen elektrischen Kontakt zwischen dem horizontalen und vertikalen Gitter entstand, wurde auch hier die Fadenspannung so angepasst, dass der Ober- und Unterfaden möglichst wenig auf die gegenüberliegende Seite hindurchgezogen wird. In der Abbildung 37 ist die schrittweise Einstellung der richtigen Fadenspannung zu sehen. Bei zu niedriger Fadenspannung ergab sich kein Gittermuster. Eine ideale Fadenspannung war dann erreicht, wenn zum einen die Gittergeometrie rechtwinklig war und zum anderen kein elektrischer Kontakt zwischen der vertikalen und horizontalen Stickerei entstand. Die Stickerei wurde ebenfalls mit dem leitfähigen Madeira HC 40 Garn gestickt. Beim Programmieren des Stickmusters musste darauf geachtet werden, dass sich die Stiche der vertikalen und horizontalen Stickerei nicht treffen. Dies konnte verhindert werden, indem die Stichlänge auf exakt 5mm programmiert wurde und die beiden Gitter dementsprechend verschoben wurden (Abbildung 38).

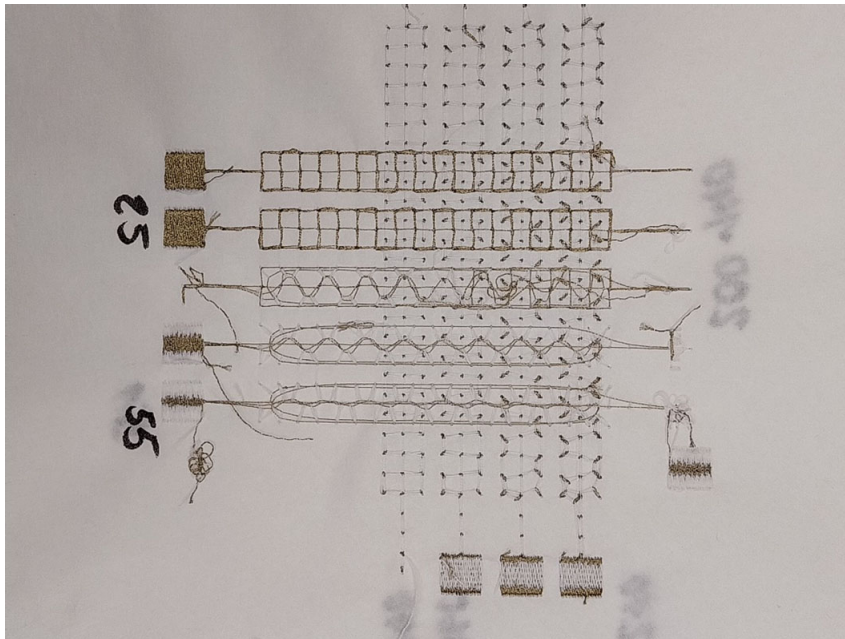
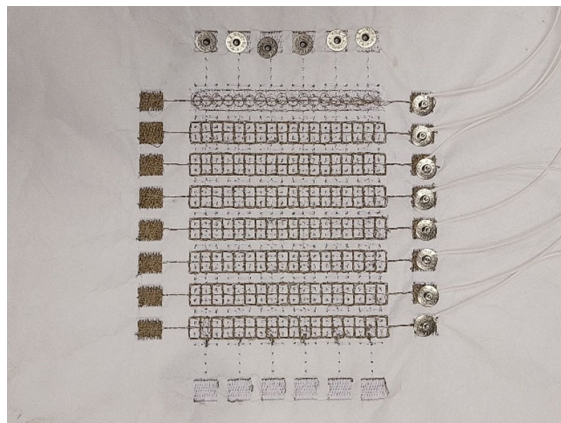


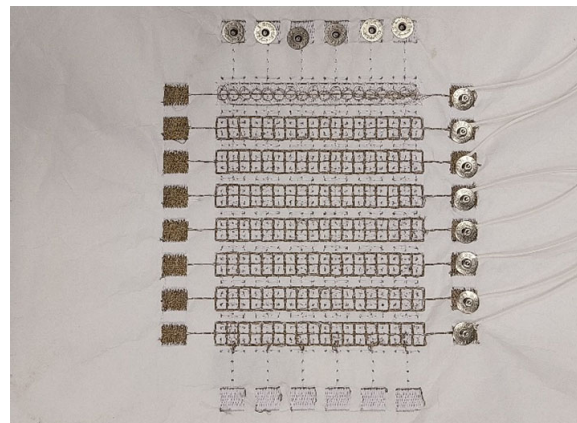
Abbildung 37: Einstellung der Fadenspannung zum Erhalt von einer komplexeren gestickten Gitterstruktur (Madeira HC40)

Für die Kontaktierung wurde an die Gitterstruktur eine leitfähige Fläche gestickt. Anschließend wurde die gestickte Gitterstruktur mit Druckknöpfen kontaktiert. Dafür wurden die Druckknöpfe in die gestickte leitfähige Fläche genietet.

Diese Struktur erfüllte alle technischen Anforderungen zur Herstellung eines funktionierenden textilen Interaktionsfläche. Jedoch war dieser Prozess sehr zeitintensiv.



(a)



(b)

Abbildung 38: Komplexere Gitterstruktur mit Madeira HC40 (Vorderseite), (b) Rückseite

II.1.3.3.3 Gedrucktes Interaktionsfeld

Die Siebdrucktechnologie ist ein kosteneffizientes Verfahren, das in der Elektronikfertigung schon anerkannt und eingesetzt wird. Die DITF verfügen über einen Siebdruckkarussell (Abbildung 39), der eine genaue Positionierung von 3 Druckschichten zueinander ermöglicht. Er verfügt dafür über 3 Druckstationen und 3 Stationen mit Infrarot-Strahler zum Trocknen der

gedruckten Schichten. Mit diesem Karussell und geeignete Siebe wurden Interaktionsfelder gedruckt.



Abbildung 39: Siebdruckkarussell

Druckgeometrie

Die Interaktionsfelder bestehen, wie bei den gestickten Strukturen, aus zwei Elektroden. Diese bestehen selber aus mehreren Zeilen bzw. Spalten. Die Zwei Elektroden werden übereinander und versetzt positioniert. Die Elektroden werden durch eine isolierende Schicht getrennt. Um die Grundkapazität jeder Zeile bzw. Spalte der Elektroden hoch zu halten, wurden die Elektroden in Form einer Rautestruktur gedruckt. In der ersten Geometrie wurden beide Elektroden auf einem Textil gedruckt und geschützt. Anschließend wurde das Textil zusammengefasst, um den gewünschten kapazitiven Sandwichaufbau zu bilden (Abbildung 40-a).

In der zweiten Geometrie wurde zunächst die erste Elektrode, danach eine isolierende Schicht und schließlich die zweite Elektrode gedruckt (Abbildung 40-b). Eine Herausforderung dieser Geometrie besteht in dem Drucken der isolierenden Schicht.

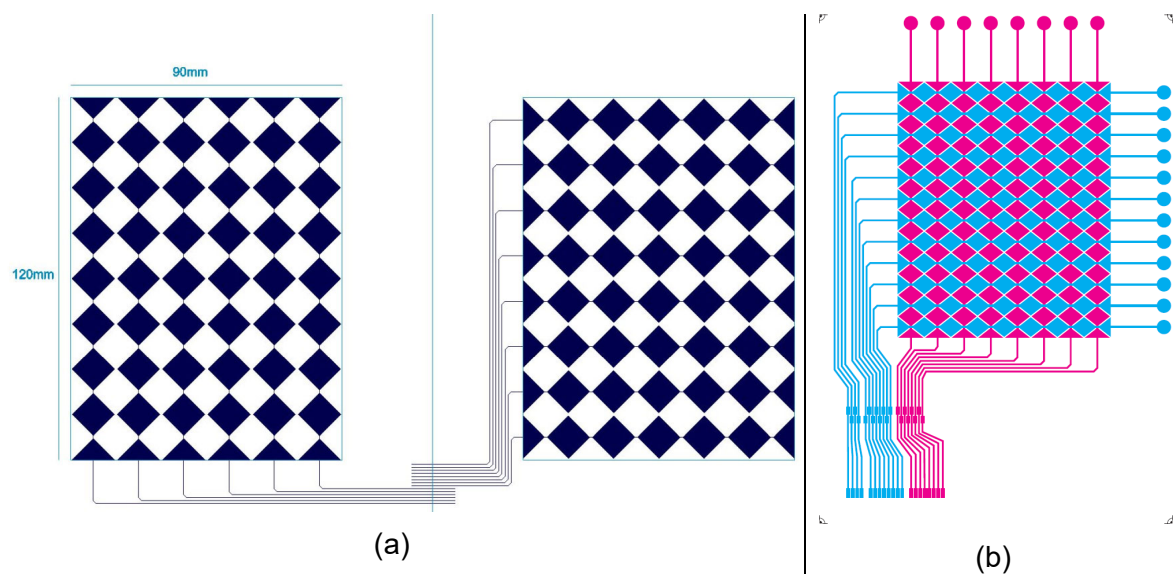


Abbildung 40: Schablone für ein gedrucktes Interaktionsdisplay (a) Geometrie 1, (b) Geometrie 2

Auswahl der Druckmaterialien

Zur Herstellung des leitfähigen Musters wurde eine kommerzielle lösungsmittelhaltige Paste mit Silberpartikeln verwendet. Die Paste weist einen spezifischen Widerstand von $0,0003 \Omega \cdot \text{cm}$ auf und ist somit für die Herstellung eines hochleitfähigen Musters geeignet. Zur Herstellung der isolierenden Schicht wurden entweder eine kommerzielle Polyurethanfolie oder eine an den DITF entwickelte Polyurethanpaste eingesetzt.

Auswahl des Siebgewebes

Die Maschenöffnung der Siebgewebe sowie die Feinheit der eingewebten Fäden haben einen signifikanten Einfluss auf die Auflösung sowie auf die Leitfähigkeit des gedruckten Musters. Eine größere Maschenöffnung und dickere Fäden führen zu einem höheren Pastenauftrag. So kann z.B. eine hohe Leitfähigkeit erreicht werden, die Auflösung des Musters wird aber beeinträchtigt.

Da das gedruckte Muster eine hohe Auflösung benötigt, wurden zwei Siebe mit einer niedrigen Maschenweite von $90 \mu\text{m}$ (Sieb 1) und $115 \mu\text{m}$ (Sieb 2) ausgewählt und getestet.

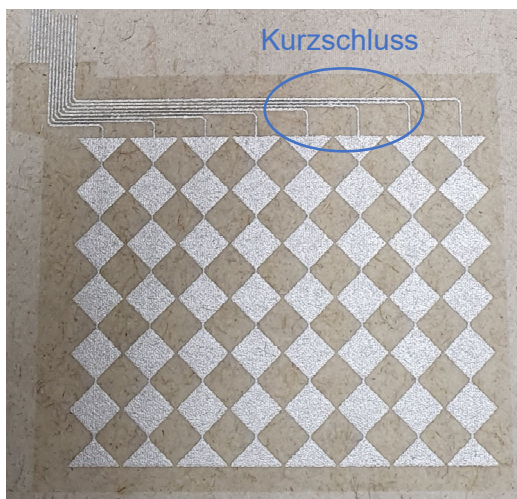


Abbildung 41: Druckergebnisse mit dem Sieb 2 (Maschenweite $115 \mu\text{m}$)

Das gedruckte Muster mit dem Sieb 2 wies Kurzschlüsse zwischen den Leiterbahnen auf (Abbildung 41). Dies ist zu dem höheren Pastenauftrag zurückzuführen. Deswegen wurden die zukünftigen Druckmuster nur noch mit dem Sieb 1 gedruckt.

Auswahl der Substrate

Da die textilen Eigenschaften des Substrats, z.B. das Material, die Oberflächenstruktur, die Druckergebnisse beeinflussen, wurden Druckversuche mit verschiedenen textilen Substraten durchgeführt:

- Auf einem Vliesstoff der Firma Norafin
- Auf einem Polyestergewebe
- Auf einem Polyurethan-beschichtetes Gewirk

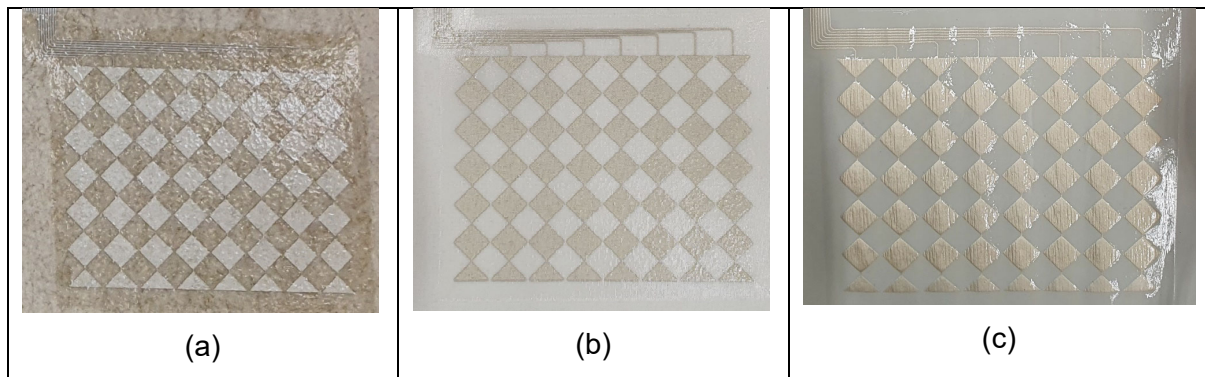


Abbildung 42: Druckversuche auf verschiedenen Substraten (a) Vliesstoff, (b) PES Gewebe, (c) PU-beschichtetes Gewirk

Auf dem Vliesstoff wie auf dem Polyestergewebe wurden Kurzschlüsse zwischen den Leiterbahnen gemessen. Dies lag daran, dass die leitfähige Paste in die 3D-Struktur des Textils eindrang. Auf dem Polyurethan-beschichtetes Gewirk konnte das Muster gedruckt werden. Jedoch die hohe Elastizität des Textils führte zu einer Beschädigung der Leiterbahnen. Aus diesem Grund wurde ein stabileres PU-beschichtetes Gewirk als Substrat ausgewählt. Das Druckmuster konnte auf die nicht beschichtete Seite des Textils gedruckt werden (Abbildung 43). Um die Leiterbahnen vor mechanischen Belastungen zu schützen wurde das Textil mit einer an den DITF entwickelten Polyurethan-Dispersion vorbehandelt.

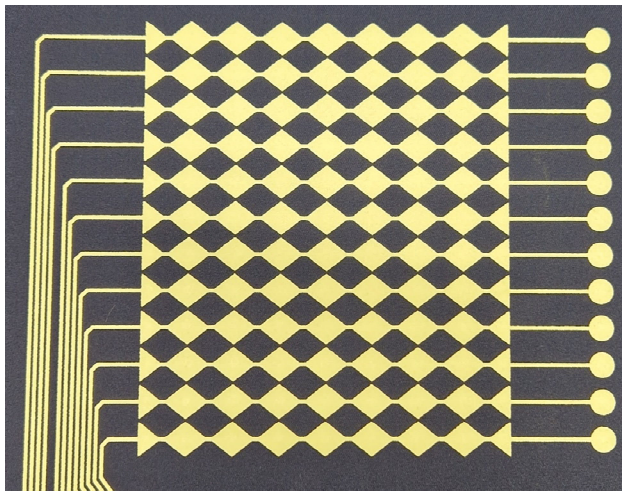


Abbildung 43: Druckversuch auf dem ausgewählten PU-beschichtetes Gewirk

Gedrucktes Interaktionsfeld

Da die Geometrie 2 (Multilayer-Aufbau) eine zuverlässigere Positionierung der Elektroden zueinander ermöglichte, haben sich die Projektpartner entschieden, diese zu verwenden. Als Isolationsschicht wurde zuerst eine Polyurethan-Dispersion angewendet. In diesem Fall musste die Paste sieben Mal hintereinander, damit die Elektroden komplett voneinander isoliert wurden.

Um den Arbeitsaufwand zu reduzieren, wurde eine thermoplastische Polyurethan-Folie als isolierende Schicht verwendet.

Somit bestand die Herstellung des finalen gedruckten Interaktionsfelds (Abbildung 44) aus folgenden Schritten:

- Vorbehandlung des Gewirks
- Druck der ersten leitfähigen Elektrode
- Laminierung der isolierenden thermoplastischen Polyurethan-Folie
- Druck der zweiten leitfähigen Elektrode
- Fixierung der gedruckten Pasten

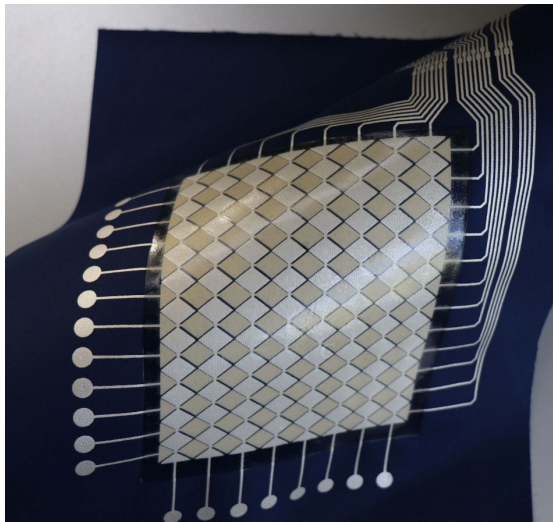


Abbildung 44: Textiles Interaktionsfeld

Kontaktierung des Interaktionsfelds

Basierend auf die Ergebnisse des Kapitels II.1.1.1 wurde das Klebverfahren zur Kontaktierung des Interaktionsfelds mit einer flexiblen Platine eingesetzt. Der leitfähige Kleber wurde zunächst mittels einer Schablone auf die Kontaktierungspads aufgebracht. Anschließend wurde die flexible Platine geklebt und an das Textil angenäht, um die Kontaktierungsstellen vor Belastung zu schützen.

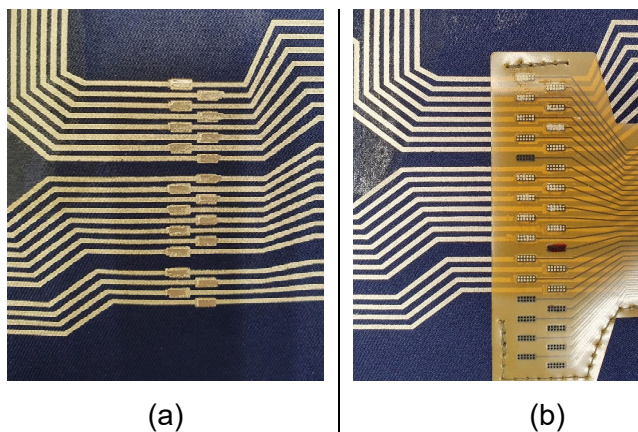


Abbildung 45: Kontaktierung einer flexiblen Platine mit dem gedruckten Interaktionsfeld (a) Druck der Klebepunkte (b) flexible Platine kleben.

Somit konnte das Interaktionsfeld an die Elektronik angebunden werden.

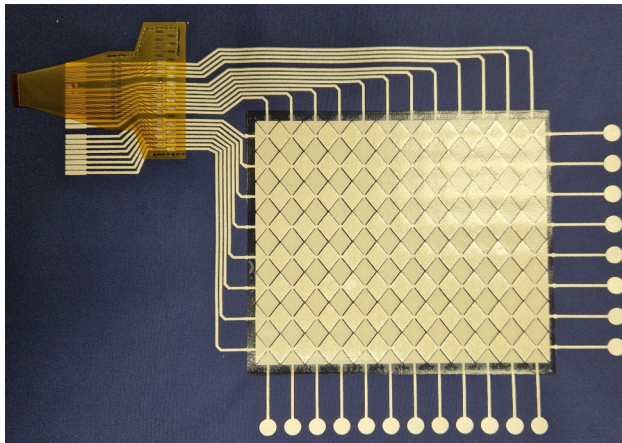


Abbildung 46: Kontaktiertes textiles Interaktionsfeld

II.1.3.4 TAP 3.4 Erprobung der entwickelten Sensorik

Die entwickelten Interaktionsfelder und textilen Sensoren wurden an die Firma Bosch zur Testung gesendet. Durch die Rückmeldung der Firma Bosch konnten die textilen Interaktionsfelder iterativ verbessert werden. Die DITF führten jedoch nicht die elektronische Testung der entwickelten Sensorik durch.

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

Zur Entwicklung und Herstellung von Demonstratoren wurden an den DITF ein gedrucktes textiles Interaktionsfeld (siehe II.1.3.3.3) und ein leitfähiges Gewebe zur Stromversorgung entwickelt (siehe II.1.3.2).

II.1.3.6 TAP 4.1 Connecting Textiles Basis Stromversorgungs- und Kommunikationssystem

Die entwickelte textile Sensorik wurde an das Stromversorgungs- und Kommunikationssystem angepasst.

II.1.3.7 TAP 4.2 Strom- und Datenverbindung für Verbindungsmodule für Smart Home Geräte

Die DITF hatten in diesem Teilarbeitspaket des Verbundprojekts keine Arbeitsanteile.

II.1.3.8 TAP 4.3 Hardware/Software zur Kommunikation mit Smart Home Zentralen

Die DITF hatten in diesem Teilarbeitspaket des Verbundprojekts keine Arbeitsanteile.

II.1.3.9 TAP 4.4 Erkennung haptischer Muster

Die DITF hatten in diesem Teilarbeitspaket des Verbundprojekts keine Arbeitsanteile.

II.1.3.10 TAP 4.5 Niedrigschwellige Definition haptischer Interaktionen

Die DITF hatten in diesem Teilarbeitspaket des Verbundprojekts keine Arbeitsanteile.

II.1.4 AP5 Demonstratoren und Evaluation

II.1.4.1 TAP 5.1 Fertigung in realistischen Produktionsrahmen zur Weiterverwendung in Demonstratoren und Living Labs und Evaluation der Arbeitsmuster

II.1.4.1.1 Herstellung elektrisch leitfähiger Gewebe

Zur Herstellung der Demonstratoren wurden 8 leitfähige Gewebe an einem Stück produziert. Dafür wurde die ausgewählte Bindung C05 (siehe II.1.3.2) in einem Rapport bestehend aus 51 leitfähigen und ebenso vielen nichtleitenden Streifen gewebt. An den Seiten wurde jeweils ein 20 cm breiter, nichtleitender Streifen gewebt. Um die Konfektionierung zu erleichtern wurde als Abtrennung zwischen den einzelnen Stücken ein schwarzer Faden eingewebt. Nachfolgend zeigt Abbildung 47 die Bindungspatrone der gewebten Demonstratoren.

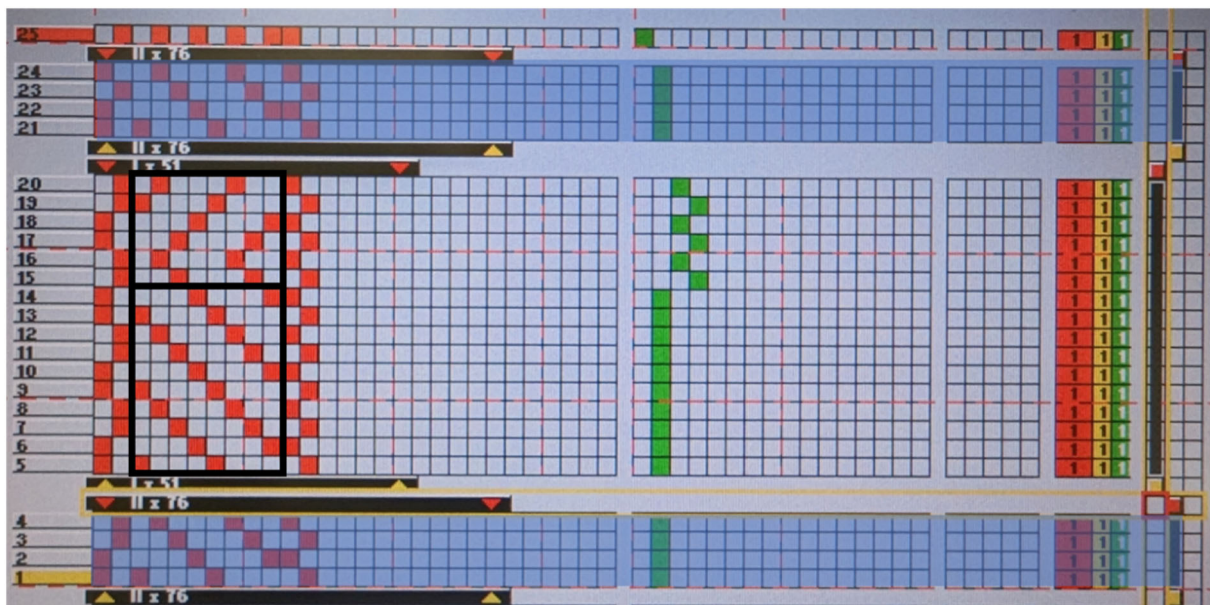


Abbildung 47: Bindungspatrone für den Demonstrator

Die Bindungspatrone zeigt die Hebungen (rot) und die Senkungen (grau) der Webschäfte. Im mittleren Bereich der Abbildung befindet sich die Bindung der leitenden und nichtleitenden Streifen. Der untere schwarze Kasten zeigt die Körperbindung (K1/3) der Polyesterfäden, der obere die gegenläufige Körperbindung (K1/3). Die beiden blau unterlegten Bereiche stellen die 20 cm des reinen Polyestergewebes dar. Durch die grüne Farbe werden die Schussmaterialien charakterisiert. Es ist zu sehen, dass die leitfähigen Garne von zwei Hauptdüsen eingetragen wurden. Dies war notwendig, da die tangential abgezogenen Spulen

sonst zu schnell drehen und für Fadenbrüche sorgen. Generell musste die Maschine häufig abgestellt werden, da die Schussspulen bedingt durch ihre geringe Kapazität häufig leerliefen.

Als Fazit kann festgehalten werden: Das leitfähige Material eignet sich für die Verarbeitung im Schuss, stellt aber hohe Anforderungen an den Weber. Für den Entwicklungsprozess war die Wahl des Schusseintrags jedoch zielführend. Im Fall einer Serienproduktion ist zu empfehlen die leitfähigen Garne in der Kette zu verarbeiten. Hier wird es allerdings notwendig sein, dass eine Maschine mit zwei Kettablässen, respektive einem Gatter, verwendet werden, da die leitfähigen Garne eine sehr viel geringere Dehnung aufweisen als die Polyestergarne.

II.1.4.1.2 Herstellung gedruckter Tapete

Die DITF übernahmen den Druck von leitfähigen Bahnen auf Vliestapeten. Die Tapeten wurden von der Firma Norafin zur Verfügung gestellt. Eine Siebschablone wurde in Abstimmung mit den Projektpartnern konzipiert. Aufgrund seiner großen Maschenöffnung wurde ein Siebgewebe PET 1500 32-100W für die Druckversuche ausgewählt. Dies ermöglichte mehr Paste auf einmal aufzubringen und somit förderte eine hohe Leitfähigkeit der gedruckten Bahnen.

Zunächst wurde ein Testmuster hergestellt (Abbildung 48). Dafür wurde zuerst eine an den DITF entwickelte Vorbehandlung an die Stellen aufgebracht, an denen die leitfähige Paste gedruckt werden sollte. Die Vorbehandlung wurde mittels Infrarot-Strahler getrocknet. Die Vliesstapete wurden anschließend mit einer Lösungsmittelhaltigen Silberpaste bedruckt und wieder mit Infrarot-Strahler getrocknet. Die Pasten wurden schließlich 2 Minuten lang bei 120°C in einer Thermopresse fixiert.



Abbildung 48: Gedruckte Leiterbahnen auf einem Vliestapete

Nachdem eine Widerstandsmessung bestätigte, dass die Druckversuche erfolgt waren, wurde der Prozess auf eine Tapete von 1,20 m x 0,5 m zur Herstellung eines Demonstrators hochskaliert. Die Tapete wurde dem DFKI zur Herstellung eines Demonstrators gesendet.

II.1.4.2 TAP 5.2 Konzeption der Evaluationsumgebungen und Probandenauswahl

Die DITF hatten in diesem Teilarbeitspaket des Verbundprojekts keine Arbeitsanteile.

II.1.4.3 TAP 5.3 Durchführung und Auswertung der Evaluationen

Die DITF hatten in diesem Teilarbeitspaket des Verbundprojekts keine Arbeitsanteile.

II.1.5 AP6 Nachhaltigkeit der Projektergebnisse & Co-Design

II.1.5.1 TAP 6.2 Potenzial für neue Geschäftsmodelle

Durch die Assessmentbegleitung des ILI-Innovative Living Institute wurden unter Einbringung der Industrie, Wirtschaft und Technologie User die notwendigen strategischen Grundlagen zur Entwicklung möglicher innovativer, ganzheitlicher Geschäftsmodelle erarbeitet.

Die ILI-Assessment-Methodik (Abbildung 49) zielt darauf ab, dass Teilnehmer die gemeinsam erarbeiteten Kenntnisse und Herangehensweise standardisiert und vom ILI unabhängig anwenden können.

Das Gesamtziel des Projekts ist die Ermöglichung intuitiver und individueller Konfiguration von Smart Homes und die Bereitstellung frei einsetzbarer neuer haptischer

Es ist das Heranführen von relevanten Industrievertretern aus Produkt- und Smart Homes Bereich, das Aufzeigen von möglichen Geschäftsmodellen und Marktpotentialen.

Dies ist dann die Benchmark für die Beurteilung aller Maßnahmen und Grundlage für alle weiteren Entwicklungsschritte.

Abbildung 49: ILI-Assessment-Methodik

Erkenntnisse

Das Umfeld der „Technologiemarke“ ConText hat folgende Erkenntnisse gebracht:

Es wurden hierzu repräsentative Studien zur Entwicklung von Smart Homes in Deutschland ausgewertet, Markt, Potentiale und Markenansprüche gegenübergestellt,

Anschaffungsgründe, Aufklärungsbedarf und Befürchtungen bewertet und die Aktuelle Nutzung und Anwendung festgestellt.

Gezeigt hat sich, daß Europäer, die im Smart Homes leben, kaufen mit höherer Wahrscheinlichkeit weitere Smart Homes Produkte, weil sie Mehrwert und Vorteile erkannt und wertgeschätzt haben. sie fühlen sich wohl in einem vernetzten Zuhause, das sie unterstützt. Es ist also eine große Nachfrage von Produkten vorhanden.

Wesentlich ist, dass für den Massenmarkt vernetzte Geräte zugänglich, erschwinglich und einfach zu bedienen sind und zu den Bedürfnissen von Konsumenten passen.

SmartHomes unterstützt auf vielfältige Weise, indem es das Zuhause sicherer, komfortabler, energieeffizienter und kostengünstiger macht und in Zeiten des Energiewandels Energiesparen -und Effizienz immer wichtiger werden.

Erhebliche Nachteile sind:

Das Umfeld ist weiterhin als Zukunftsmarkt zu charakterisieren mit kaum verlässlichen Marktzahlen zu Smart Homes.

Es gibt kaum umfassende Smart Homes Lösungen und Nutzer fehlen relevante Informationen über Anwendungspotentiale von SmartHomes Diensten.

Außerdem ist das Preisniveau zu hoch, eine überzogene Preisgestaltung und mangelnde Interoperabilität bis hin zu unzureichenden Informationen über technische Möglichkeiten für Architekten und Kunden.

Das bedeutet, dass nicht die Technik an sich, sondern der Nutzen durch die Technik entscheidend ist für die Akzeptanz neuer Geräte, Funktionen, Dienstleistungen und virtueller Welten.

In dem Assessment „Themenkomplex „haben wir uns mit Zielgruppen, Umfeld und Konkurrenz beschäftigt und was die Technologiemarkte so einzigartig macht:

Was macht ConText wertvoller?

Individuelle Gestaltung, die freie Programmierbarkeit, keine Abhängigkeit von Technologien. „Bei uns hört keiner zu“, bei uns kommt keiner rein“.

ConText geht weit über „Alexa“ hinaus, Purpose: Egal in welchem Lebensumfeld (Arbeitnehmer, Kind, Rentner) absolut individuell auf meine Bedürfnisse einstellbar, es gibt keine Grenzen, ein extremer Grad der Individualisierung und eine große Zielgruppe.

Eine wesentliche Erkenntnis ist:

Über „Alexa“ kann ich nur steuern, die schon da sind- mit ConText kann ich neue Dinge kreieren.

Wertschöpfend ist ebenfalls: Die Plattform ist gleichzeitig offen für Anbieter und ein „Closed Room“ hinsichtlich Cyberkriminellen.

Weitere Technologiemarken Vorteile wurden reflektiert:

Dort wo Strom liegt kann ConText funktionieren, haptische Komponenten der Patches lösen einen einzigartigen Spieleffekt aus, sowie ConText in der Innenarchitektur Flexibilität bedeutet.

Weitere Vorteile sind:

Durch die individuelle Gestaltbarkeit von Patches sind der eigenen Kreativität keine Grenzen gesetzt und sind flexibel, weil sie jeden Tag neu bespielt werden können: ConText fördert die Motivation, Dinge selbst zu gestalten.

ConText in der Anwendung

Bei den Anwendungsideen wurden sehr gut vorstellbare Ideen reflektiert

Schnittstellen zum SmartHomes, Patches für Rollos , Heizung, programmierbare

Patches für Mediennutzung, als Schwerpunkt auf Material und Interaktion

und der Flexibilität und haptischem Erleben.

Der Nutzen bei der Sicherheit ist das geschlossene System aus dem nichts nach außen dringt, die Sicherheitslücken sind klar definiert und somit müssen Wände für Neuanschlüsse nicht aufgestemmt werden.

„Die ConText- Tapete ist das Betriebssystem, die Patches sind die Apps.

Somit werden größtmögliche Flexibilität, Sicherheit, Unabhängigkeit und Störsicherheit gewährleistet.

Die Zielgruppen

Sie teilen sich auf in: Privatbereich, Gesundheitswesen, Shared Office- Bereich und ConText kann im Verbund mit allen denkbaren Systemen eingesetzt werden aufgrund der hohen Kompatibilität.

Ernstzunehmende Mitbewerber

sind E.ON SmartHomes, ein Großteil im Gebäudebau ist Bestandsveränderung, der klassische Elektriker, Projektierer und das Großhandelsgeschäft, die Mitbewerber Haga, Wandbeschichter (Erfurt), Lizenzerwerber, Knauf, Rigips etc..

Weitere Schnittstellen-Technologien wie: Funk, Bluetooth, IOT-Sensorik

Smartphone/iPad, Alexa und die kabelgebundene Kommunikationsstelle zum SmartHomes (Computer mit Maus).

Somit bildet das verbaute SmartHomes Display an der Wand die einzige gleich sichere Alternative.

Der direkte Nutzen für Unternehmer

Er leitet sich ab von der Stärke und Kompetenz des Forschungsverbundes „Innovations- und Technologie- Partnerschaft durch die Stärken des Verbunds aus wohlbekannten Marken und kleineren Innovationstreibern, der Erwartungshaltung des Verbund- Qualitätsversprechen Anspruch: „ConText inside“. Die Ansprüche des Verbundes sind also höhere, als die der Einzelunternehmen. Dies spiegelt sich auch im Markenskapital nieder, durch Menschen die für diese Technologiemarkte arbeiten. Denn hinter einem Unternehmen und einer Technologiemarkte steht immer auch eine Idee, Philosophie ein Markenkern.

Die Stärken der Technologiemarkte

Schaut man auf die Stärken der Technologiemarkte ConText, so ist es die außergewöhnliche Innovationskraft. Sie macht die smarte Technologiemarkte ConText einzigartig. Sie ermöglicht neue IoT-Anwendungen für reale und virtuelle Anwendungen (NFT, Blockchain). Auch liegt die Stärke in der Innovationskraft eines jeden Projektpartners, in der sich ständig anpassenden Autoren und Sensoren. Keine vergleichbaren Lösungen sind bekannt in Form und Funktion. Plug & Installation sorgt für einfachen Aufbau und nahtlose Integration. Frei gestaltete neue Integrationsflächen ermöglichen neue innovative Produktgattungen, sie spiegeln die Gewohnheiten der modernen digitalen Gesellschaft wider. Auch die Skalierbarkeit der Produktion smarterer Textilien ist ein entscheidender Vermarktungsvorteil für die erfolgreiche Platzierung und ein extremer Grad der Individualisierung.

Die Schwächen der Technologiemarkte

Zu den Schwächen der Technologiemarkte lässt sich sagen:

Das Protokoll ist aktuell zu einfach, größere Authentifizierungs und

Verschlüsselungsverfahren sind schwer zu realisieren, sowie ToDo's:

Bei der Weiterentwicklung Bussystem umstellen. Die Authentifizierung von Patch zu SmartHomes muss ein sauberer Prozess sein.

II.1.5.2 TAP 6.3 Innovationsassessment

Die Resultate der gemeinsamen Erkenntnisgewinnung wurden in einem konkreten Business Case definiert. Dieser gibt, basierend auf der ILI-Innovations- Anspruchspyramide, klare Empfehlungen für die strategische Positionierung von Technologie, eine grundlegende akzeptanzstiftende Kommunikation, sowie strategische Ansätze zur Vermarktung als Technologiemarkte.

ConText Innovationspositionierung und Assessment

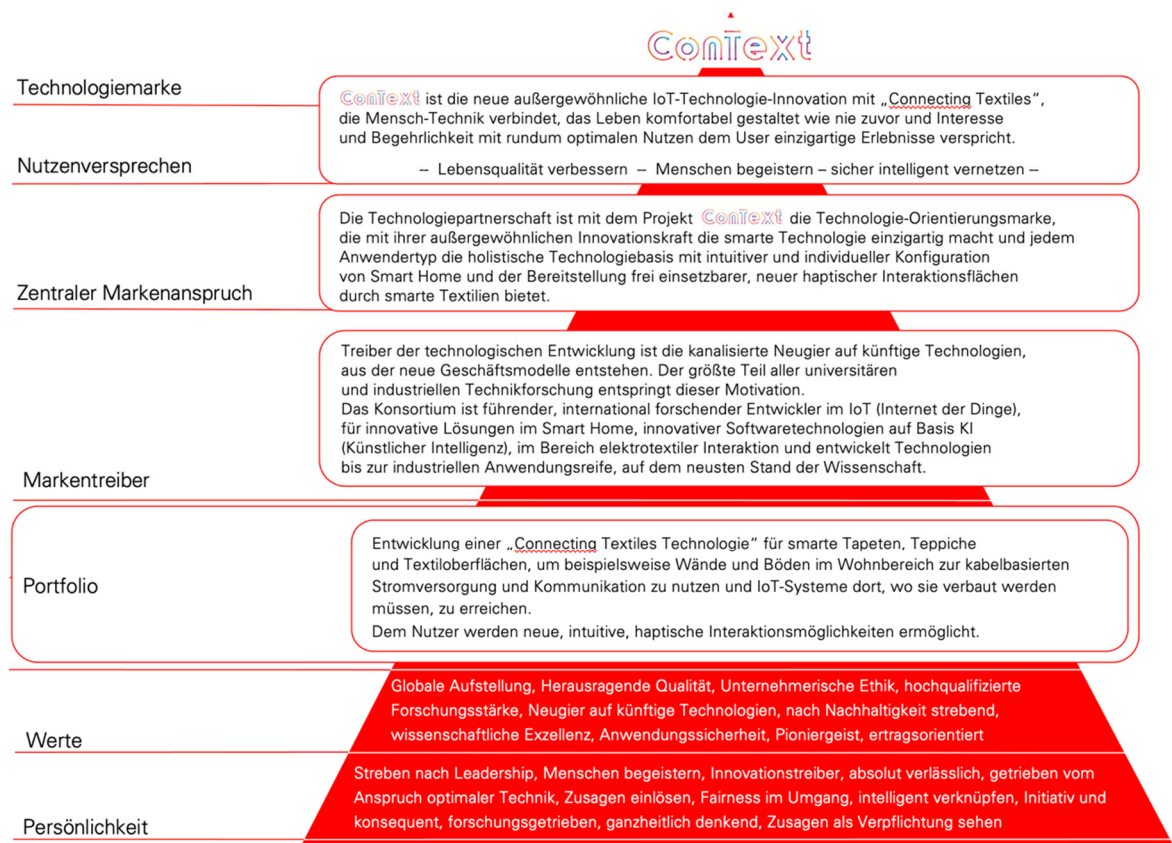


Abbildung 50: Die ILI-Markenanspruchspyramide.

Innovation-Geschäftsmodelle Markenpotenziale

Zum diesem Themenkomplex ergibt sich folgendes Markenversprechen: Das geschlossene, sichere System bietet hohe Flexibilität und unendliche Möglichkeiten; Drittanbieter entwickeln Patches für individuelle Bedürfnisse und bieten das in einem Patch Store an (Beispiel: Patch zum Kaffee kochen), Autonomes System und einfache intuitive Bedienbarkeit.

Die Technologiemarkte ConText kann eine Gegenbewegung zu „Meta“ auslösen, weil ihre Anwendungen real erlebbar und kontrollierbar sind. So ergeben sich Anwendungspotenziale in der temporären Architektur und Innovationspotenziale für die Industrie, die heute bspw. Schalter produziert und auf Patches umstellen.

Die außergewöhnliche Innovationskraft der smarten und einzigartigen Technologiemarken wurden wie folgt reflektiert:

Menschen wollen Dinge greifen und spüren und darauf gibt ConText eine moderne Antwort mit modernem Vokabular auf „virtuelles Gedöns“. Unser Technologie-Anspruch hat Haptik, Optik, Klima, Olfaktorik. Bspw. Individuelle Duftstimmung in Hotels über die Klimaanlage steuerbar. ConText ist demnach eine Technologiemarken für alle Sinne.

Effizienz, Effektivität und Nachhaltigkeit

Auch die Fragen nach Effizienz, Effektivität und Nachhaltigkeit wurde sehr positiv eingeschätzt: Effizienz: unabhängig, geschlossen, breit spektiert anwendbar und ein System, das Kabeleffizienz vorantreibt. So können in Zukunft Produkte, die heutzutage viel Strom benötigen, in Niedrigstrom übersetzt werden.

Das Netzwerk ist langlebig und Flexibilität wird über Anwendungen erzielt.

Effektivität: Die Technologiemarken ConText ist nicht mehr nur das Produkt „Tapete“ an der Wand, sondern unterstützt viele Produkte, die durch die Technologie getragen werden.

Nachhaltigkeit: Die Technologiemarken ist langlebig, wiederverwendbar und aufwändiger. Neuaufbau wird vermieden. Sie ermöglicht also eine flexible Raumvernetzung und kann damit über lange Zeit ohne aufwändige Umbauarbeiten individuelle Bedürfnisse erfüllen.

Urbanisierung, Digitalisierung, Dezentralisierung, Gegentrend zu Big Data, Nutzung moderner Technologie im geborgenen Raum und Patch als Authentifikator - Ersatz für Passwort und Alternative für 2-Faktor- Authentifizierung werden sich zu Treibern unserer Zeit entwickeln.

Erkenntnisse für die Innovationspositionierung aus dem Assessment

Die außergewöhnliche Innovationskraft macht die Technologiemarken einzigartig. Nach unseren Recherchen sind keine vergleichbaren Lösungen in Form und Funktion bekannt. Autoren und Sensoren und deren Funktionen passen sich ständig an. Auf Grund von Basis-Komponenten kauft der User nach Bedarf, tauscht oder erweitert. Die Plug-&-Installation sorgt für einen einfachen Aufbau und nahtlose Integration sowie frei gestaltete, neue Interaktionsflächen ermöglichen neue innovative Produktversionen.

Die neue Technologiemarken ConText spiegelt die Gewohnheiten der modernen Gesellschaft wider. Die Skalierbarkeit der Produktion smarter Textilien ist ein entscheidender Vermarktungsvorteil für die erfolgreiche Platzierung.

Eine Besonderheit ist ein extremer Grad der Individualisierung. Treiber technologischer Entwicklungen ist sowohl die kanalisierte Neugier auf künftige Technologien, auch als Innovationstreiber in der Kreativwirtschaft, aus der neue Geschäftsmodelle entstehen.

Verbundpartner als Stärke

Eine weitere wesentlich Erkenntnis ist die Stärke der Verbundpartner, sie sind führende international forschende Anbieter im IoT. Sie stehen für innovative Lösungen und Softwaretechnologien im Smart Home. Auf Basis KI im Bereich elektrotextiler Interaktion entwickeln sie Produkte bis hin zur industriellen Anwendungsreife auf dem neusten Stand der Wissenschaft. Eine hohe Erwartungshaltung verpflichtet: Gutes Beispiel ist hierfür „ConText inside“.

Die Technologiemarkte ConText als neuartige Plattform

Sie gibt kreativen Developern grenzenlose Möglichkeiten für die Entwicklung von IoT Anwendungen.

Ihr Nutzenversprechen für Businesskunden bietet ein geschlossenes und abhörsicheres System, das effektiv vor Cyberattacken schützt. Sie bietet eine Plattform-Technologie, die Drittanbietern die grenzenlose Entwicklung von IoT-Anwendungen ermöglicht und eine innovative Technologie die flexibles (Um-) Gestalten ermöglicht.

Sie fördert die Kreativität in jedem Alter durch eine intuitive Oberfläche , durch reales Erleben und haptische Anwendungen. Eine hochwertige Konstruktion, die langlebig und nachhaltig ist. Sie ist auch ein haptisches Erlebnis für die ganze Familie, das sich durch intuitive Eingabeschnittstellen einfach bedienen lässt. So werden intelligente Abkürzungen durch frei programmierbare und flexibel anbringbare Patches zum ganz persönlichen Wohnerlebnis auch durch grenzenlose Individualisierbarkeit. Die absolute Sicherheit vor Cyberangriffen ist durch ein geschlossenes System gewährleistet.

Zusammenfassung

Die außergewöhnliche Innovationskraft macht die smarte Technologiemarkte „ConText“ einzigartig. Als neuartige Plattform gibt kreativen Developern grenzenlose Möglichkeiten für die Entwicklung von IoT-Anwendungen. ConText hat das Potential als ein neues haptisches, vereinfachendes, hochsicheres Interaktions- Universum entwickelt und positioniert zu werden, dass jeden Menschen der Welt begeistern kann– eine Technologie für alle Sinne!

II.1.5.3 TAP 6.4 Standardisierung und Normierung

Der Forschungsbereich InTex brachte gemeinsam mit dem Forschungsbereich CPS wie in den entsprechenden Arbeitspaketen bereits beschriebenen Expertise hinsichtlich der Konzeption, Durchführung und Analyse von partizipativen Aktivitäten zur Nutzer*inneneinbindung ein, um sicher zu stellen das die erarbeiteten Systemanforderungen umgesetzt werden.

Der Forschungsbereich brachte seine Expertise in Bezug auf Standards im Smart Home Bereich ein (siehe TAP 1.1; TAP 4.3)

II.1.6 AP7 Projektmanagement

Das Projektmanagement übernahm das DFKI. Die DITF hatten in diesem Teilarbeitspaket des Verbundprojekts keine Arbeitsanteile.

II.2 Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Siehe gesondertes Dokument.

II.3 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.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

II.4.1 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.5 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 Königshulte, Serge Autexier, Annika Sabrina Schulz, Bodo Pahlke, Valerie Bartsch, and Hendrik Leibrandt. 2023. Connecting Textiles: Exploring Textile 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>



Die Ergebnisse bzgl. der Kontaktierung von Textilien mit Elektronik wurden in mehreren peer-reviewed Zeitschriften veröffentlicht:

- Micus, S.; Haupt, M.; Gresser, G.T., Automated Joining of Electrical Components to Smart Sensors, 21(2), 545 (2021); <https://doi.org/10.3390/s21020545>
- Micus, S.; Haupt, M.; Gresser, G.T.; Soldering Electronics to Smart Textiles by Pulsed Nd:YAG Laser Textiles by Ultrasonic Soldering; Materials, 13(11), 2429 (2020); <https://doi.org/10.3390/ma13112429>

Die Ergebnisse des Projektes sowie die Demonstratoren wurden in folgenden Messen/Veranstaltungen nach Rücksprache mit den Projektpartnern vorgestellt:

- TechTextil 2022
- Anwenderforum Smart Textiles 2022 & 2023
- LOPEC 2023
- Innovationstag der DITF 2023
- ITMA 2023

Über das Projekt wurde ebenfalls in dem Jahresbericht der DITF (2020) sowie in einem DITF Report (März 2019) berichtet, und somit das Projekt sowie die erreichten Ergebnisse dem Netzwerk der DITF vorgestellt.