



Abschlussbericht zum Verbundprojekt

CHARM - Challenging environments tolerant Smart systems for IoT



Teilvorhaben: Eingebettete Sensoren für raue Umgebung und robuste Elektronik

Zuwendungsempfänger:

Würth Elektronik GmbH & Co. KG (WE)

Förderkennzeichen:

16MEE0011

Laufzeit des Vorhabens:

01.06.2020 bis 29.02.2024

Ziel des europäischen Verbundprojekts CHARM war die Entwicklung von Designstrategien, Komponenten und Montagetechnologien für die Realisierung von IoT-Infrastrukturen in rauen Industrieumgebungen, die durch hohe Drücke, Temperaturen, Flüssigkeiten und/oder Partikelbelastungen gekennzeichnet sind. Gleichzeitig wurde eine weitgehende Miniaturisierung von IoT-Modulen mit hoher Funktionalität angestrebt. Im Rahmen des Projekts CHARM bearbeitete Würth Elektronik zwei Fokusthemen. Das erste Thema umfasste die Entwicklung einer Integrationstechnologie für Sensoren mit Medienzugang unter Verwendung von Opferpolymeren. Das zweite Thema zielte auf die Entwicklung einer flexiblen Leiterplatte mit integrierten Sensoren für den Einsatz in einer Rolle-zu-Rolle-Anlage für die Papierherstellung ab.

1 Integrationstechnologie für Sensoren mit Medienzugang

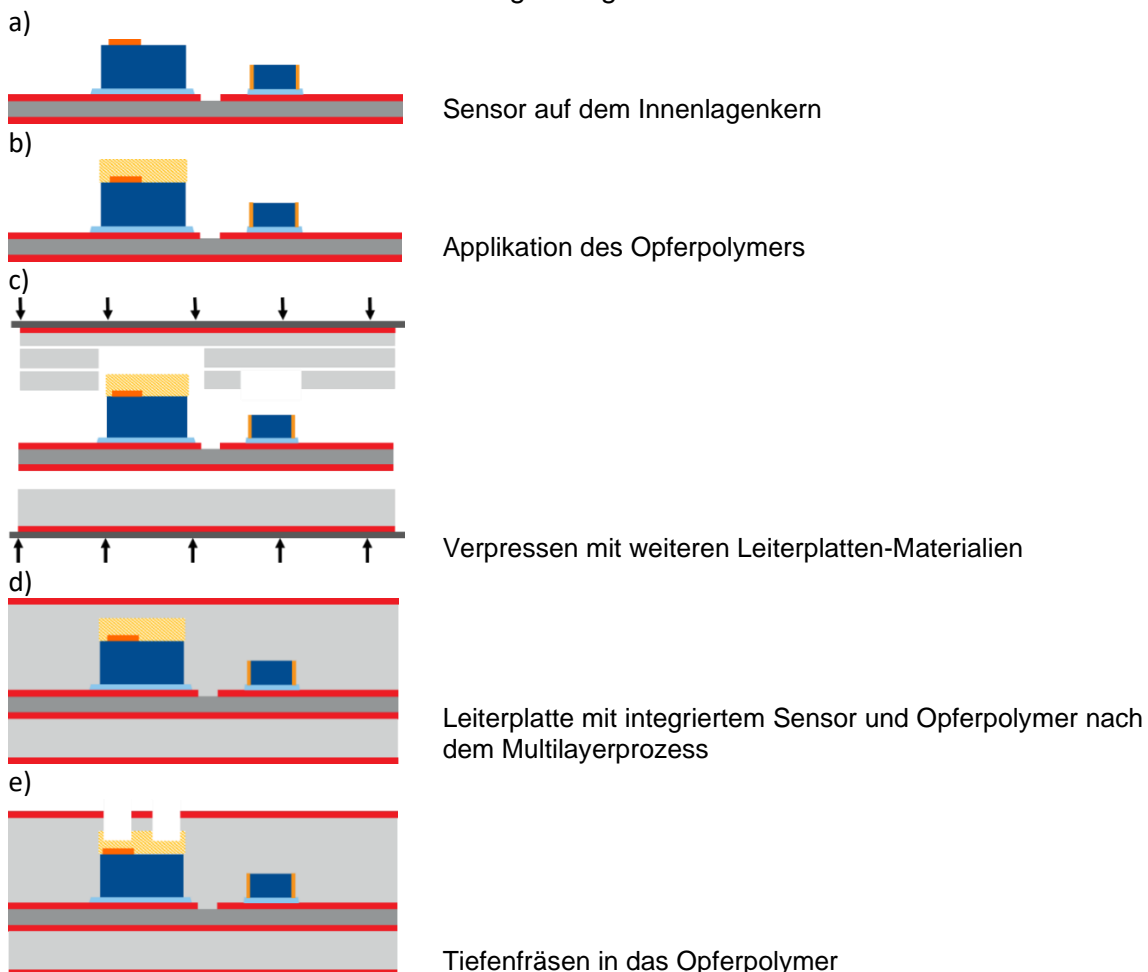
Für den vorliegenden Zweck werden zahlreiche Sensoren lediglich als gehäuste Bauteile angeboten, welche beispielsweise im SMD-Verfahren (Surface-Mounted Device) auf die äußeren Schichten einer Leiterplatte aufgebracht werden. Die direkte Integration der fertig verpackten Sensoren in die Innenlagen einer Leiterplatte gewährleistet deren Schutz vor äußeren Einflüssen. Diese Vorgehensweise realisiert eine signifikante Steigerung der Zuverlässigkeit bei gleichzeitiger Miniaturisierung der Systeme. Im Rahmen dieses Projekts wurde eine Integrationstechnologie für vorverpackte Sensoren, die Zugang zur Umgebung (Flüssigkeiten, Gase) benötigen, in die Leiterplatte entwickelt und untersucht. Die Sensoren wurden als SMD-Bauteile verarbeitet und in

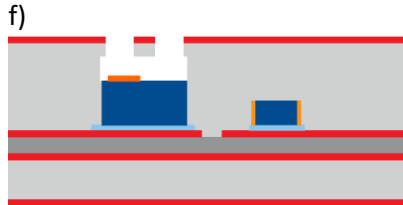
die Polymermaterialien auf den Innenlagen der Leiterplatte eingebettet. Die Einbettungstechnologie umfasst dabei die Verwendung von Stütz- und Ersatzmaterialien.

Für die Entwicklungsarbeit wurden Drucksensoren favorisiert. Im Gegensatz zu konventionellen Embedding-Prozessen, bei denen die SMD- und Chip-Bauteile vollständig mit Epoxidharz umhüllt werden, war bei der CHARM Entwicklung sicherzustellen, dass die empfindliche Oberfläche der Sensoren nach dem Einbetten frei von Partikeln ist und offen liegt, um die Sensorfunktionalität nicht zu gefährden. Es wurden Lösungen erprobt und entwickelt, bei denen das Sensorteil während des Einbettens durch Schutzfolien oder andere sogenannte Opfermaterialien abgedeckt war. Im Anschluss erfolgte die Entfernung der oberen Kupfer- und Epoxidschicht der Leiterplatte, um den Sensorbereich freizulegen. In einem letzten Schritt wurde die Schutzfolie aufgelöst bzw. entfernt, um den freien Zugang zum empfindlichen Sensorbereich zu gewährleisten.

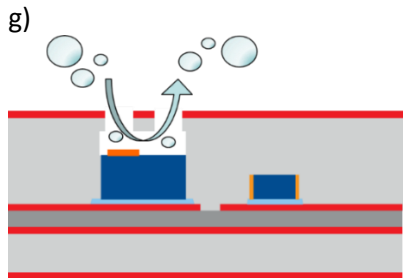
1.1. Integrationskonzept

Das vorliegende Integrationskonzept sah vor, dass ein Drucksensor mittels eines konventionellen SMD-Verfahrens auf den Innenlagenkern gelötet wird. Im Anschluss sollte auf die Oberfläche der Sensoren ein lösliches Polymer (Opferpolymer) aufgebracht werden, das die Funktion einer Stützstruktur übernimmt. Der Aufbau erfolgte durch einen Pressvorgang unter dem Einfluss von Temperatur und Druck sowie weiteren Leiterplatten-Materialien gefolgt von konventionellen Strukturierungsprozessen. Beim Anbringen der Bohrungen wird das Opferpolymer mit einem geeigneten Lösungsmittel (vorzugsweise Wasser) aufgelöst, wodurch ein Hohlraum entsteht. Der schematische Prozessflow ist in Abbildung 1 dargestellt.





Entfernen des Opferpolymers mit Hilfe eines Lösungsmittels und ggf. unter Temperatur- und Ultraschalleinwirkung



Kompletter Aufbau mit Medienzugang

Abbildung 1: Integration der Sensoren im Hohlraum mit Medienzugang - Prozessflow mit Einsatz von Opferpolymer

Es wurde ein Vier-Lagen-Aufbau mit Standard FR4 und Prepreg-Materialien genutzt. Ein Beispielaufbau ist in der Abbildung 2 dargestellt. Zur Auswertung der Sensoren wurden vier einfache Layouts mit dem Drucksensor ST-LPS22HB erstellt (Abbildung 3). Lediglich die Abmessungen und die Anzahl der Öffnungen für den Zu- und Austritt der gasförmigen oder flüssigen Medien wurden variiert. Diese Öffnungen befinden sich im Bereich der sensitiven Sensorfläche und haben die Abmessungen von 2 x 350 µm, 2 x 250 µm, 2 x 150 µm, 4 x 150 µm. Mit dieser Variation konnte das Austrittsverhalten der Polymere besser untersucht werden. Anschließend sollte die passende Kombination eingefügt werden. Die Sensoren waren über Durchkontaktierungen von Innen- zu den Außenlagen der Leiterplatte verbunden. Zum Auslesen der Messwerte wurde ein externes System (open source Arduino) verwendet (vgl. Kap. 1.4).

Rigid area structure	Rigid area thickness [µm]	Flex area thickness [µm]	Material description	Assembly/connection types	Flex area structure	Viatypes										
						# 1	# 2	# 3	# 4	# 5	# 6	# 7				
Soldermask	15															
L1	43															
	43		FR4 PP TG150													
	610		FR4 TG150													
	252		FR4 PP TG150													
L2	35															
	100		FR4 TG150													
L3	35															
	252		FR4 PP TG150													
	610		FR4 TG150													
	43		FR4 PP TG150													
L4	43															
Soldermask	15															

Abbildung 2: Lagenaufbau für die Testleiterplatte mit Hohlraum und integrierten Sensoren

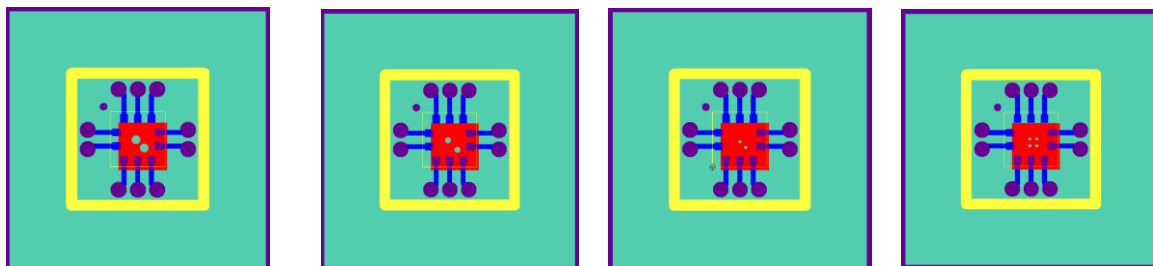


Abbildung 3: PCB-Layouts für integrierten Sensoren mit unterschiedlichen Öffnungen für den Medienzugang

1.2. Evaluierung der Opferpolymere

Die Recherche zu den als potenzielle Opferpolymere in Betracht gezogenen Materialien, die temporär in das System integriert werden sollten, lieferte keine eindeutigen Ergebnisse. Insbesondere konnte die Anforderung an die Löslichkeit in Wasser oder wässrigen Medien nicht erfüllt werden. Auch die Anforderungen an die thermischen Eigenschaften wurden nicht vollständig erfüllt. Die Materialien, die die erforderlichen Eigenschaften teilweise aufgewiesen haben, wurden in experimentellen Versuchen auf ihre Eignung untersucht.

Als erstes wurden die im Portfolio enthaltenen Fotolamine einer umfassenden Untersuchung unterzogen. Der wesentliche Vorteil dieser Fotolamine besteht darin, dass sie als Sheet-Zuschnitt (in fester Form) erhältlich sind. Eine vollflächige Überdeckung der Sensoren mit den genannten Folien ist somit möglich. Dies gewährleistet den Schutz der empfindlichen Membran im Sensorbaustein. Des Weiteren existieren bereits etablierte nass-chemische Verfahren zur Entfernung dieser verfügbaren Materialien. In einem ersten Schritt wurden die Folienlamine in verschiedenen Tests auf ihre Temperaturstabilität sowie auf ihre anschließende Entfernung mit einem wässrigen, alkalischen oder sauren Lösungsmittel untersucht.

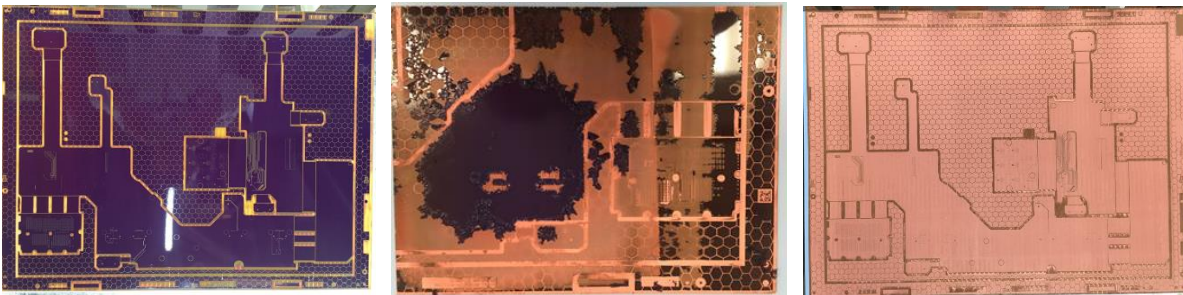


Abbildung 4: Versuch mit einem 50µm dicken Fotolaminat - blaues Laminat nach der Temperatureinwirkung (links); gescheiterter Lösungsmitteltest (mittleres Bild); erfolgreicher Lösungsmitteltest (rechts)

Um den Multilayerprozess entsprechend nachzubilden, war es erforderlich, die Testvehikel mit Opferpolymeren auf eine Temperatur von 200 °C für einen Zeitraum von mindestens 100 Minuten und unter dem Druck von 20 bar zu erhitzen. Die Frage, ob die hohe Temperatur eine irreversible Zerstörung der Polymere und damit eine Beeinträchtigung der Stabilität der Polymere gegenüber den Lösungsmitteln zur Folge hat, wurde durch die anschließende Behandlung in entsprechenden Lösungsmitteln ermittelt.

Die Erzielung der erforderlichen Ergebnisse erforderte die Durchführung mehrerer Versuche. Im Rahmen der Untersuchungen wurden verschiedene Lösungsmittel auf ihre Eignung hin analysiert. Verwendet wurden sowohl saure als auch alkalische Lösungsmittel, deren Eigenschaften durch Variation von Zeit und Temperatur sowie Ultraschallbehandlung modifiziert wurden. Einige Resultate der Tests sind in Abbildung 4 dargestellt. In der alkalischen Ätzung konnte das Fotolaminat nach der Temperaturbehandlung vollständig entfernt werden. Die ersten Versuche zur Integration dieses Materials wurden durchgeführt.

Mit einem externen Partner wurden vier weitere thermoplastische Polymere bezüglich des Einsatzes im Integrationskonzept untersucht. Es wurden gleiche Untersuchungen hinsichtlich der Auflösung in wässrigen Lösungsmitteln nach erfolgter Temperatur- und Druckbehandlung durchgeführt. Die Versuchsergebnisse sind in der Tabelle 1 zusammengefasst. Drei Polymere (Polymer 1-3) konnten für die weiteren Tests evaluiert werden. Die Untersuchungsergebnisse der Materialien nach der thermischen Behandlung bei hohen Drücken sind in Abbildung 5 dargestellt. Je nach Zersetzungsgrad änderte sich die Farbe von leicht gelb zu dunkel braun.

Tabelle 1: Voruntersuchungen der Polymere 1-4

	Tm	Temp./°C	Druck/bar	Zeit/min	Löslichkeit in H ₂ O
Polymer 1	140	170	15	90	+
		200	20	100	+
Polymer 2	180	200	20	100	+
Polymer 3	170	170	15	40	+
		170	15	90	+
		200	20	100	+
Polymer 4	215	170	15	40	-
		200	20	100	-

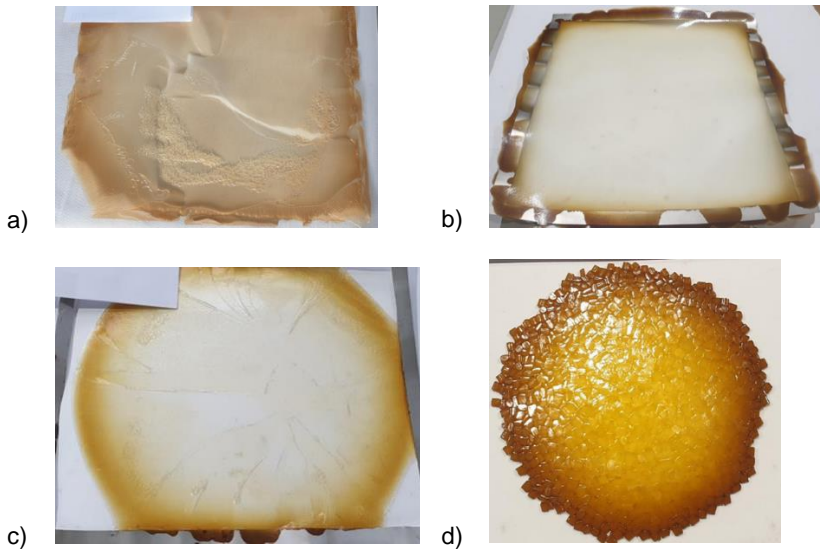


Abbildung 5: Zersetzungsgrad der Polymere 1-4 nach 100 min bei 200 °C, 20 bar - Polymer 1 (a); Polymer 2 (b), Polymer 3 (c), Polymer 4 (d)

1.3. Fertigung inkl. Sensorintegration

Die Testmuster wurden in Übereinstimmung mit dem zuvor ausgearbeiteten Konzept (vgl. Abbildung 1) gefertigt und die Oberfläche der integrierten Sensoren mit den evaluierten Polymeren beschichtet. Anschließend wurden die Kerne mit weiteren Prepregs und Kupferfolien auf der Vor- und Rückseite verpresst, sowie die lithografischen, galvanischen und mechanischen Prozessschritte durchgeführt. Im Anschluss wurden die Öffnungen für den Medienzugang mittels Laserbohren eingebracht (Abbildung 6). Die Aufbauten mit den thermoplastischen Opferpolymeren konnten in der Projektlaufzeit nicht abgeschlossen werden.

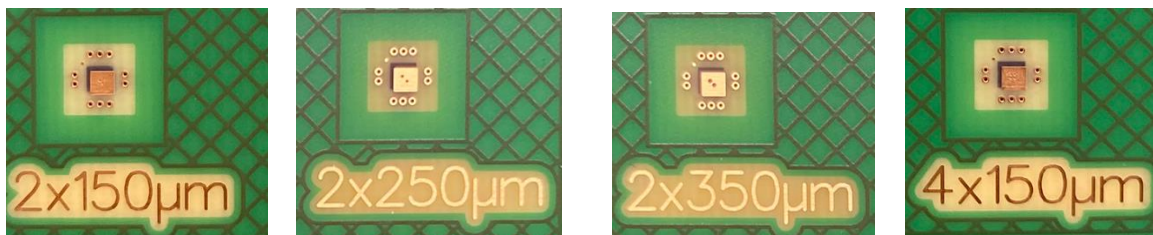


Abbildung 6: Vier Testmodule mit integrierten Sensoren und unterschiedlichen Öffnungen für den Medienzugang; violette Farbe des Fotolaminats jeweils in der oberen linken Ecke der PCB erkennbar

Die Entfernung des Fotolaminats als Opferpolymere unter Verwendung eines wässrigen Lösungsmittels, erhöhter Temperatur und Ultraschall verlief ohne den gewünschten Erfolg. Die nachfolgenden Schlibfbilder demonstrieren, dass eine Entfernung dieser Materialien im Gegensatz zu den zuvor durchgeführten Tests nicht möglich war (Abbildung 7).

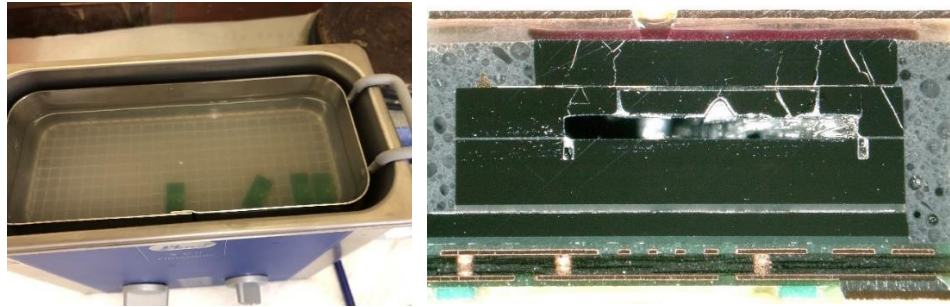


Abbildung 7: Lösetests mit Fotolaminat – Testmuster im Ultraschallbad (links); Schlibfbild des integrierten Fotolaminats – violette Schicht (rechts)

1.4. Konzept Verifikation

Nach Abschluss des Herstellungsprozesses der Leiterplatten erfolgt die Entfernung des Opferpolymers durch Auflösung in einem geeigneten Lösungsmittel. Da es sich bei der hier beschriebenen Methode derzeit noch um ein theoretisches Konzept handelt, ist nicht sicher, ob das Opferpolymer wie vorgesehen funktioniert und ohne Beschädigung des Sensors entfernt werden kann. Im Rahmen der Forschungsarbeiten wurde eine Testumgebung aufgebaut, welche eine Untersuchung des eingebetteten Sensors hinsichtlich seiner Funktionalität und Genauigkeit nach dem Entfernen des Opferpolymers ermöglicht.

Zu diesem Zweck wurde zunächst ein handelsüblicher Sensor mit Hilfe einer Breakout-Platine und eines Mikrocontrollers einer Prüfung unterzogen. Es wurde ein Drucksensor, Typ LPS22HB, verwendet, der im Anschluss mit einem integrierten Sensor verglichen wird. In einem ersten Schritt wurde der Sensor in Betrieb genommen und seine Genauigkeit geprüft. Das Ziel bestand in der Feststellung der externen Signalerkennbarkeit der Sensoren. Die Konzeption und Fertigung einer Testumgebung erfolgten unter Zuhilfenahme des Arduino als Evaluierungswerkzeug. Der Aufbau des Tests umfasste zunächst die Erstellung einer Schaltung sowie eines Layouts für die Breakout-Leiterplatte. Der Schaltplan nebst Layout ist in Abbildung 8 dargestellt. Der Schaltplan zeigt in der Mitte den LPS22HB-Chip sowie dessen zehn Anschlüsse. Die in der rechten oberen Ecke befindlichen STEMMA-Header stellen die Anschlusssteckvorrichtungen für den Mikrocontroller dar. Der I²C-Bus wurde als Slave verwendet, um Daten in ein Register zu schreiben, deren Inhalt anschließend wieder ausgelesen werden konnte.

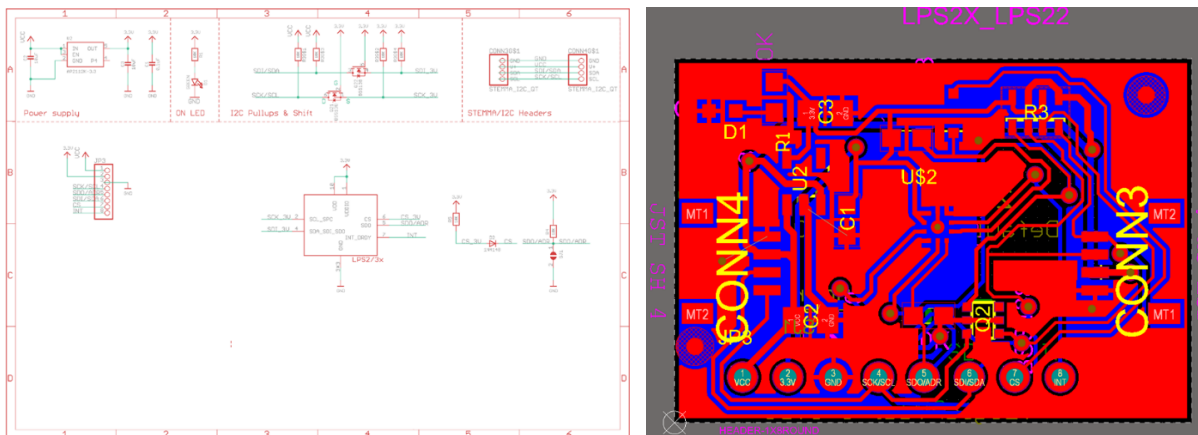


Abbildung 8: Schaltplan der LPS22HB-Breakout-Leiterplatte (links; Layout der doppelseitigen Leiterplatte (rechts)

Im Rahmen des vorliegenden Projekts wurde eine doppelseitige Leiterplatte hergestellt und mit den vorgesehenen Bauteilen bestückt (vgl. Abbildung 9). Für den Betrieb und die Steuerung der Sensoren auf dem Breadboard wurde eine Open-Source-Plattform für elektronische Prototypen, Arduino, verwendet. Die Parameter wurden mit der hauseigenen Arduino-IDE in C++ programmiert. Im Rahmen dieses Experiments erfolgte eine Verbindung des Breakout-Boards mit dem Drucksensor LPS22HB und dem Arduino. Zur Programmierung eines in der IDE ausgeführten Programms, welches den Druck in hPa innerhalb der Arduino-IDE anzeigt, wurde eine auf GitHub verfügbare Bibliothek verwendet. Nach der Inbetriebnahme wurden die Sensorsignale zur Verifikation des Konzepts ausgewertet.

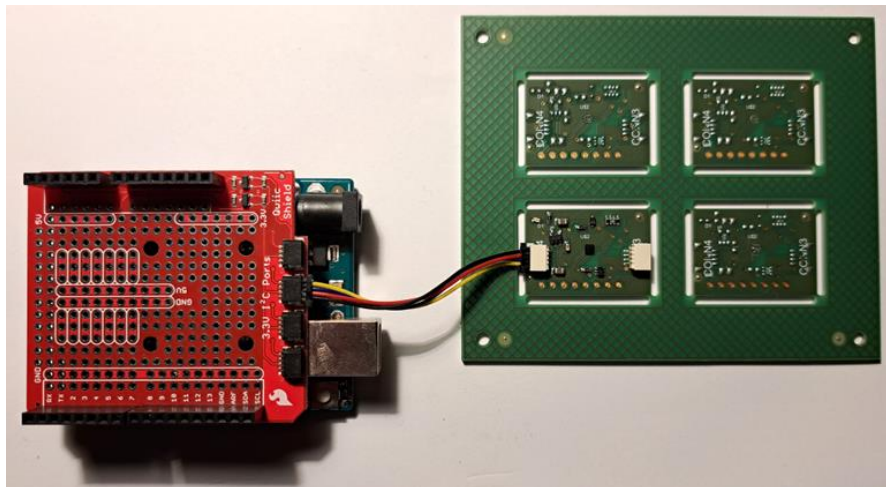


Abbildung 9: Aufbau Breakout-Leiterplatte mit Anschluss an die elektronische Prototyping-Plattform Arduino

Die Ergebnisse des Tests zeigten die Funktionalität des Breakout-Boards und weisen nach, dass die Signale des nicht eingebetteten Sensors erfolgreich ausgelesen werden konnten. Die Installation der eingebetteten Sensoren der CHARM-Muster nach dem neu konzipierten Prozessablauf wurde aufgeschoben und erfolgt erst nach Abschluss des Projekts. Im Anschluss soll der Austausch der diskreten Sensorkomponenten durch den eingebetteten Sensor auf demselben Breakout-Board realisiert werden. Der eingebettete Drucksensor wird anschließend in der festgelegten Reihenfolge getestet.

2 Flexible Leiterplatte mit integrierten Sensoren für die Überwachung in Rolle-zu-Rolle-Anlagen

2.1 Anforderungen und Konzept

Die Papierherstellung findet aktuell überwiegend im Rolle-zu-Rolle-Prozess statt, wodurch Elektronik in rauen Umgebungen wie feuchtem Klima, hohen Temperaturen und Drücken besonderen Belastungen ausgesetzt ist. Im Rahmen eines Rolle-zu-Rolle-Verfahrens ist es erforderlich, die Elektronik inklusive Sensoren äußerst flach zu gestalten, um eine Integration zwischen den Papiermaschinenwalzen zu ermöglichen. Gleichzeitig ist ein hermetisch dichter Schutz erforderlich. Die Leiterplatten und Komponenten müssen auch in einem gebogenen Zustand einwandfrei funktionieren, die Montageprozesse in Papiermaschinenwalzen unbeschadet überstehen und eine hohe Zuverlässigkeit aufweisen.

Die ursprünglichen Anforderungen an die flexible Leiterplatte wurden wie folgt definiert:

- Flexible, schmale Leiterplatte von 10 m Länge für die Installation und Einstellung von Papiermaschinen; Profil in axialer Richtung
- Kontinuierliche Sensorkette, ca. 200 Sensoren abwechselnd entlang des Streifens anordnen; Abstand zwischen den Sensoren ca. 50 mm

- Einmaliges Biegen bei Montagearbeiten notwendig, dynamisches Biegen ausgeschlossen
- Druck- und Feuchtesensoren flach auslegen
- je nach Verfügbarkeit der Sensoren zwei verschiedene Varianten:
 - konventionelle Leiterplatte auf Polyimid-Basis mit diskreten starren Komponenten auf der Folie
 - gedruckte Sensoren direkt auf Polyimid-Substrat

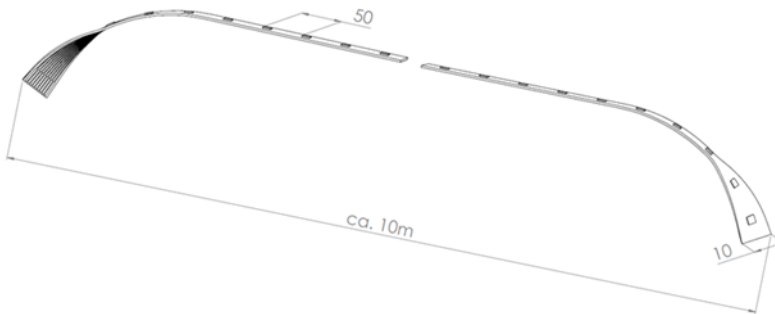


Abbildung 10: Der ursprüngliche Entwurf des flexiblen Systems

Die ursprünglichen Anforderungen an das flexible System und die ursprünglich geplanten gedruckten Sensorstrukturen konnten zu Beginn nicht erfüllt bzw. realisiert werden. Die Anforderungen der kohlenstoff- und silberbasierten Sensoren waren für die gewünschte Leistung in der Papierherstellungsmaschine nicht ausreichend. Ein weiterer Punkt, der nicht realisiert werden konnte, war die Länge des Systems. Hierfür gab es innerhalb des Konsortiums keine geeignete Rolle-zu-Rolle-Lösung. Des Weiteren hat sich bei einigen Versuchen mit einem externen Lieferanten gezeigt, dass die Rolle-zu-Rolle-Technologie nicht die erforderliche Genauigkeit für die kleinsten Flip-Chip-Komponenten aufweist. Aus den genannten Gründen wurde deshalb im Rahmen des Projekts ein konventioneller Weg mit kurzen, polyimidbasierten Leiterplatten und diskreten Bauteilen realisiert. Dafür wurde eine flexible Leiterplatte von Würth Elektronik hergestellt und vom Projektpartner Valmet in Betrieb genommen.

2.2 Umsetzung und Herstellung

Bei der Realisierung des UC 2 wurden die Temperatursensoren MAX31825 mit dem geringsten Footprint ausgewählt. Die Fertigung war eine Herausforderung, da zunächst die feinstrukturierte Lötstopmmaske realisiert und anschließend die Bauteile direkt auf dem flexiblen Träger montiert werden mussten. Im nächsten Schritt wurde eine dünne und flexible Leiterplatte mit den Maßen 416 mm x 6 mm entworfen. Als Kernsubstrat wurde eine 50 µm dicke Polyimidfolie verwendet. Für die Produktion wurden konventionelle Verfahren der Leiterplattenfertigung eingesetzt. Die feinen Ätz- und Lötstoppstrukturen ließen sich ohne Probleme realisieren. Für das Aufbringen des Lötstopplacks wurde die fotoempfindliche Lötstopmmaske genutzt, die im Sprühverfahren appliziert wird. Als lötbare Oberfläche wurde chemisches Ni/Au verwendet. Der Schichtaufbau ist in der Abbildung 11 dargestellt.

Rigid area Structure	Flex area Thickness	Rigid area Thickness	Material description	Flex area Structure	Viatypes
	15		photosensibile flexible soldermask		
L1	35	35		Top Layer	
	50	50	polyimid		
L2	35	35		Bottom Layer	
	15	15	photosensibile flexible soldermask		
adhesive foil		50	adhesive foil		
FR4 stiffer material		100	FR4		

Abbildung 11: Lagenaufbau einer doppelseitigen Flexleiterplatte

Bei der Montage der Bauteile zeigten sich größere Probleme beim Auftragen der Paste. Die Pads für die MAX31825 Sensoren sind ca. 100 μm groß, der Abstand zwischen den Pads beträgt ca. 250 μm . Daraus ergibt sich ein Toleranzbedarf von ca. 50 μm , was für Standard-Leiterplattenprozesse mit einer Trägerplatte eine große Herausforderung darstellt. Als Referenz wurden vom Partner Valmet fünf weitere Leiterplattenchargen bei anderen Lieferanten bestellt. Ausschließlich Prozess von Würth Elektronik erwies sich jedoch als hochpräzise. Eine Charge mit 20 Leiterplatten enthielt 18 verwertbare Platinen, lediglich 2 wurden vor der Bestückung aussortiert.

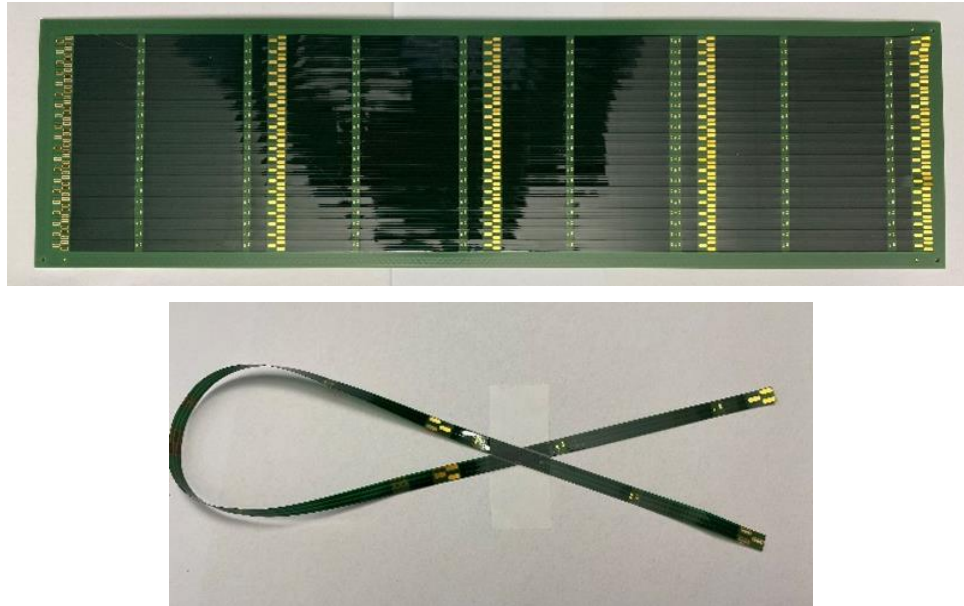


Abbildung 12: Liefernutzen (oben) und eine einzelne unbestückte flexible Leiterplatte (unten)

Nach der Montage der Komponenten wurden die Temperaturwerte der einzelnen Leiterplattenstreifen getestet. Es zeigte sich, dass alle Messwerte gute Resultate zeigten. Aufgrund des guten Ergebnisses wurden die einzelnen Streifen von der Trägerplatte entfernt und zu einer langen Sensorkette verlötet. Insgesamt entstand eine Sensorkette von 90 m Länge (Abbildung 13).



Abbildung 13: Langer Sensorstreifen aus kürzeren miteinander gelöteten Streifen; Quelle: Valmet

Im Rahmen der finalen Evaluierung der Sensorkette wurde festgestellt, dass eine Abstimmung des digitalen Signals sowie eine Optimierung der Impedanzen mittels einer umfassenden Kette von I²C-Sensoren ungedingt erforderlich ist. Aufgrund der Signalverbreiterung des Rufimpulses (Abbildung 14) konnte keine Ablesung von sämtlichen Sensoren der 90 m langen Kette vorgenommen werden, da sich der Rufimpuls verlangsamte und die Sensoren den Ruf nicht erfassten. Bei kürzeren 10 m-Streifen konnte der Test hingegen erfolgreich durchgeführt werden, wobei die Ergebnisse der Sensoren eindeutig abgelesen werden konnten.

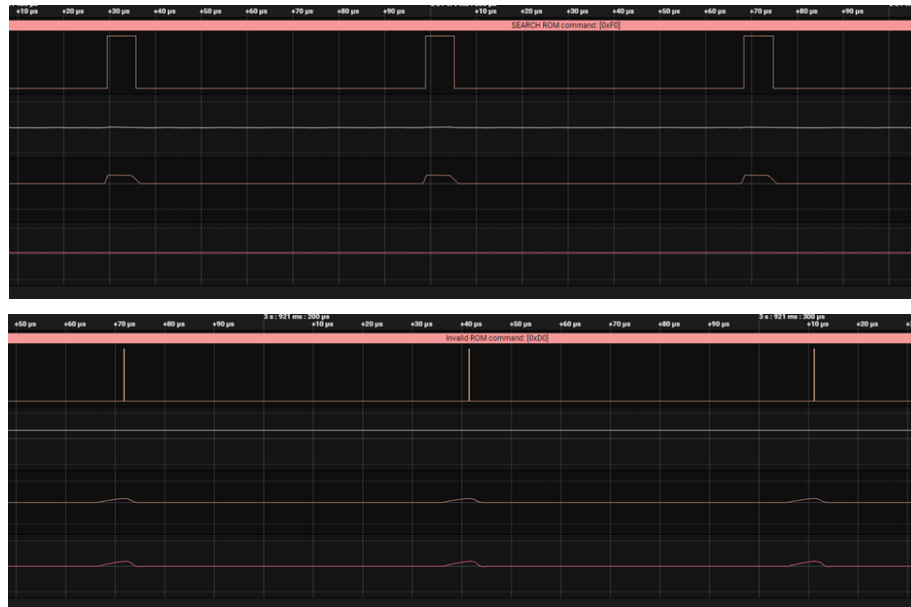


Abbildung 14: Signalabruf in einer kürzeren Kette (oben) und Verbreiterung des digitalen Signals in einer langen Sensorkette (unten); Quelle: Valmet

Die Abstimmung der Impulszeiten, der Kettenimpedanz sowie gegebenenfalls der Leiterbahnen auf dem FCB muss für den finalen Einsatz der längsten Sensorstreifen noch überprüft werden. Die bereits erreichte Länge von 10 m erweist sich jedoch für die meisten Papiermaschinenwalzen als ausreichend. Zudem wurde festgestellt, dass der Sensorlieferant einen Chip für die digitale Kommunikation mit I²C-Sensoren entwickelt hat, der mehrere Einstellungsmöglichkeiten zur Optimierung der Kommunikation bietet. Dadurch eröffnen sich erweiterte Abstimmungsmöglichkeiten.