

Autoren: Ricardo Decker¹, Jens Emmrich¹, Kathrin Weise²,
Danny Horn³, Markus Gaitzsch⁴, Steffen Flach⁵

WIR!-Initiative: SmartERZ

Smart Composites: Neue Technologien, Produkte und Geschäftsmodelle für einen innovationsbasierten Strukturwandel in der Region Erzgebirge

Abschlussbericht – Teil I: Kurzbericht

Strukturkonforme Einbettung von mikroelektrischen Systemen in thermoplastische Verbundstrukturen

Projektlaufzeit: 01.11.2021 – 31.10.2024

¹ Technische Universität Chemnitz – Professur Strukturleichtbau / Kunststoffverarbeitung
Strukturkonforme Einbettung von mikroelektrischen Systemen in thermoplastische Verbundstrukturen (FKZ: O3WIR1408A)

² KSG GmbH
Entwicklung von Verfahren zur Herstellung einer mehrlagigen Leiterplatte auf Basis von endlosfaserverstärkten Thermoplasten (Organoblechen) (FKZ: O3WIR1408D)

³ Komitec electronics GmbH
Entwicklung von automatisierbaren Kontaktier- und Bestückungsverfahren für thermoplastische Leiterplatten (FKZ: O3WIR1408B)

⁴ EDC Electronic Design Chemnitz GmbH
Entwicklung eines integrierten Mikroschaltkreises (IC) zur strukturkonformen Einbettung in Leichtbaustrukturen (FKZ: O3WIR1408C)

⁵ Bernd Flach Präzisionstechnik GmbH & Co. KG
Entwicklung von Technologien zum Preformen und Hinterspritzen semidrapierbarer organoblechbasierter Leiterplatten (FKZ: O3WIR1408F)

Aufgabenstellung

Das Vorhaben konzentrierte sich auf die Entwicklung einer Technologie zur Herstellung elektrisch funktionalisierter Halbzeuge, die auf endlosfaserverstärkten Thermoplastplatten (Organoblechen) basieren. Ziel war es in diese Halbzeuge sowohl periphere Signal-, Sensor- und Stromleitungen im globalen Bereich als auch komplexe Sensorelektronik im lokalen Bereich zu integrieren.

Folgende konkrete Ziele wurden definiert:

- Steigerung der Integrationstiefe elektrischer Systeme in kunststoffbasierten Leichtbaustrukturen
- Einführung neuer Leiterplattensubstrate in der Elektronikindustrie
- Prozesskompatible und artefaktfreie Einbettung mikroelektrischer Systeme in thermoplastbasierte Leichtbaustrukturen
- Robuste Verarbeitung in großserienfähigen Verfahren der Kunststoffverarbeitung

Durch das regionale Projektkonsortium aus dem Erzgebirge und Chemnitz sollte die Wertschöpfung im Innovationsfeld Smart Composites in der Region gefördert werden. In KMUs sollte der innovationsgetriebene Strukturwandel vorangetrieben werden.

Stand der Technik

Teilvorhaben TU Chemnitz

Der Stand der Technik an den angeknüpft wurde, umfasst drei Hauptbereiche: technische Textilien, Druckverfahren zur Herstellung flexibler elektronischer Schaltungen und Ultraschall-Drahtlegen.

Smart Textiles sind Textilien, die auf verschiedene Anregungen aus der Umwelt reagieren können und aus den folgenden Hauptkomponenten bestehen: Trägermaterial, Sensoren, Aktoren, Steuereinheiten und elektrische Verbindungen. Elektronische Elemente werden durch Verfahren wie Weben, Stricken, Sticken und Wirken integriert.

Druckverfahren zur Herstellung folienbasierter Elektronik nutzen klassische Drucktechniken wie Siebdruck, Flexodruck, Tiefdruck, Offset-Lithografie und Tintenstrahl, um elektrisch leitfähige Materialien auf thermoplastische Folien zu drucken. Diese Verfahren ermöglichen die Herstellung kostengünstiger, flexibler Elektronik für Anwendungen wie Displays, intelligente Etiketten, Poster und Kleidung. Gedruckte Elektronik verwendet oft flexible Substrate wie PET-, PEN- und PI-Folien, was die Produktionskosten senkt und mechanisch flexible Schaltungen ermöglicht.

Das Ultraschall-Drahtlegen ist ein patentiertes Verfahren der Firma ruhlmat GmbH zur Aufbringung elektrisch leitfähiger Drähte auf thermoplastische Folien welches hauptsächlich für Antennen- und Heizstrukturen verwendet wird.

Teilvorhaben KSG GmbH

Aus Kundenanfragen sowie Erfahrungen vieler industrieller Workshops leitet sich auch für die KSG GmbH der Trend zur Verbindung von mikroelektronischen Systemen mit klassischen industriellen Großserienbauteilen ab. Antrieb dieses Trends sind neben der Einsparung von Kosten durch Reduzierung von Montage- und Materialaufwand die Verbesserung der Ressourcen- und Energieausnutzung für einen umfassenderen Umwelt- und Klimaschutz.

Die auf dem Markt etablierten Technologien zur Funktionalisierung der Oberfläche kunststoffbasierter Strukturbauteilen lassen sich im Wesentlichen unter dem Oberbegriff Molded-Interconnect-Devices (MID)-Verfahren zusammenfassen. Inhibitoren dieser Technologie sind vor allem die bauteilspezifisch erforderlichen, sehr individuellen Strukturierungs- und Bestückungsprozesse der dort eingesetzten 3D-Bauteile. Diese führen im Vergleich zu etablierten und hochentwickelten Standardprozessen der Mikroelektronikindustrie (Leiterplattenfertigung und Bauteilbestückung) zu erhöhtem Aufwand und hemmen dadurch die Steigerung des industriellen Einsatzes derartiger Komponenten.

Ansatz des Projektes war es, die Vorteile effizienter Standardprozesse der Leiterplattenfertigung und Bestückung mit den Vorzügen von 3D geformten „Smart-Components“ zu verbinden, indem sowohl die Strukturierung des Leiterbildes als auch die Bestückung der Leiterplatte mit elektronischen Bauelementen im ebenen Zustand erfolgt und die „smarten“ Halbzeuge erst im Anschluss zu einem 3D-Bauteil umgeformt werden.

Teilvorhaben Komitec electronics GmbH

Um elektronische Bauelemente auf Leiterplatten zu fixieren und elektronisch zu verbinden, sind 2 grundlegende Prozessschritte erforderlich:

1. Unter dem Platzieren der elektronischen Bauelemente auf der Leiterplatte, zumeist in Verbindung mit dem Aufbringen des Lotes versteht man das „Bestücken“ der Leiterplatte
2. Nachgelagert unterlaufen die bestückten Leiterplatten einen Lötprozess

Moderne Bestückungsautomaten ähneln im Prinzip einem Flachbett-Plotter, wobei die Leiterplatte die Stelle des Papiers einnimmt, der Bestückungskopf die des Stiftes und die Bauteileversorgung die des Stiftmagazines. Bei älteren Automaten wurde häufig statt des Bauteils die Leiterplatte bewegt, was aber bei der Verkettung mit den vor- und nachgelagerten Prozessschritten (Pastendruck, Löten) problematischer ist.

Zur Vergrößerung des Durchsatzes arbeiten moderne Maschinen mit mehreren Bestück-Köpfen und „Revolver-Köpfen“, die in der Lage sind, mehrere Bauteile aufzunehmen, was die Wegezeit zwischen Auffüllstation und Leiterplatte verringert.

Ein Bestückungskopf, der in drei Achsen verfahrbar ist und um die Z-Achse rotieren kann, saugt in der Regel durch Unterdruck ein Bauteil aus dem Gurt/Tray, überprüft die Lage mittels eines optischen Systems, berechnet Winkel- und Positionsoffset zur Nominalposition und platziert das Bauteil auf der Leiterplatte. Sind alle Bauteile bestückt, wird die Leiterplatte über ein Fördersystem weitertransportiert und eine neue leere Leiterplatte zugeführt.

Die Z-Achse (Höhe) hat dabei nicht die freie Beweglichkeit, wie es bei einer vergleichbaren Bearbeitungsmaschine ist. Da die klassischen Leiterplatten prinzipiell keine Unebenheiten aufweisen, ist der Verfahrensweg in Z-Richtung nur sehr eingegrenzt und dient vielmehr zum Ausgleich von unterschiedlichen Bauhöhen der Bauelemente, wenn diese aufgenommen bzw. abgesetzt werden. Steuerungsseitig sind bei Bestückungsautomaten keine dreidimensionalen Leiterplatten vorgesehen, wodurch derartige Strukturen mittels Bestückungsautomaten nicht bestückt werden können.

Teilvorhaben EDC Electronic Design Chemnitz GmbH

Gegenüber bekannten dreidimensionalen Schaltungs-Träger-Technologien erlaubt ein entsprechend entworfenes Organoblech mit darauf integrierter Elektronik den direkten Einsatz als mechanisch tragendes Konstruktionselement. Für die Elektronik besteht die größte Herausforderung in den diversen Prozessen, welche die Leitbahnen und die elektronischen Komponenten (Mikrochips) mit durchlaufen müssen.

Es ist bekannt, dass mechanische Spannungen das Kristallgitter von Halbleitern verformen, wodurch sich die Atomabstände verändern, und dadurch die Bandstruktur verändert wird. Der Haupteffekt ist eine Änderung der Krümmung von Leitungs- und Valenzbändern, was zu unterschiedlichen effektiven Massen der Ladungsträger führt, was ihre Mobilität beeinträchtigt.

Teilvorhaben Bernd Flach Präzisionstechnik GmbH & Co. KG

Der Stand der Technik an den angeknüpft wurde, lässt sich in drei Schwerpunkte unterteilen: Temperieren, Preformen und Hinterspritzen von Organoblechen.

Thermoplastische Faserverstärkte Halbzeuge, sog. Organobleche konnten in den letzten Jahren an Bedeutung gewinnen, was sich vor allem durch den technischen Fortschritt bei der Entwicklung leistungsfähiger Thermoplaste, aber auch den erhöhten Stellenwert von Verarbeitung und Recycling in der Industrie, begründen lässt. Sie lassen sich bspw. durch Wärmeeintrag aufschmelzen und erneut um- bzw. urformen. Dadurch lassen sich Produktionsschritte, wie die zeitaufwändige

Faserdurchtränkung textiler Halbzeuge mit der Matrix (häufig Polypropylen oder Polyamide) und die Konsolidierung, aus den Produktionsabläufen der Bauteilherstellung ausgliedern. Die Halbzeuge müssen so später lediglich erneut plastifiziert und in Form gebracht werden.

Die Verarbeitung der flächigen Halbzeuge zum Endprodukt erfolgt durch Thermoformen, wobei der Wärmeeintrag zur Plastifizierung des Kunststoffs durch verschiedene Verfahren realisiert werden kann. Stand der Technik ist das Aufheizen der Bleche durch Kontaktheizungen, Infrarotstrahler oder Umluftöfen. Mit einem aktuell noch in Entwicklung befindlichen Verfahren können zudem Organobleche mit Fasern aus elektrisch leitenden Materialien, wie Kohlenstoff, durch das Widerstandsheizen aus dem Inneren heraus plastifiziert werden. Das Umformen der Bleche kann durch herkömmliche Pressen oder innerhalb eines Spritzgusswerkzeuges erfolgen. Letzteres ist dann sinnvoll, wenn die Konstruktion durch angespritzte Rippen oder ähnliche Strukturen zusätzlich verstärkt wird. Man spricht dabei von einem sogenannten One-Shot-Prozess, da der Umformvorgang vollständig in den Spritzgussprozess integriert wird. Zu beachten ist generell, dass große Umformgrade zu Schereffekten der textilen Verstärkungsfasern führen können und die Verbundfestigkeit beeinflussen. Konstruktionen sollten daher durch geeignete Simulationsmethoden auf solche Effekte geprüft und gegebenenfalls angepasst werden.

Ablauf des Vorhabens und wesentliche Ergebnisse

In enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern konnte im Rahmen des Projekts „StrukTronik“ der WIR!-Initiative „SmartERZ“ eine Technologie entwickelt werden, die es erlaubt Leiterbahnen, elektronische Sensoren und Aktoren sowie Mikrochips zur Datenverarbeitung und andere elektronische Bauelemente direkt in thermoplastische Leichtbaustrukturen zu integrieren. Die lasttragende Komponente dieser Verbundstrukturen bildet dabei eine Organo-Leiterplatte als „Herzstück“ des Smart Composites. Diese besteht aus einem thermoplastischen Matrixmaterial und einer Kurz- bzw. Endlosfaserverstärkung aus Glas. Mit großserienfähigen Technologien der Kunststoffverarbeitung und der Elektronikfertigung wird die Organoleiterplatte hergestellt, mit Leiterbahnen versehen und mit elektronischen Bauelementen bestückt, bevor sie in dem thermoplastischen Faserverbund-Spritzgießprozess dreidimensional umgeformt und die Endform, z. B. mit Rippenstrukturen und Befestigungselementen, spritzgießtechnisch hergestellt wird. Vorteilhaft ist dabei die hohe integrale Funktionalität in Verbindung mit einer standardisierten Prozesskette zu deren Herstellung. Ergänzend sind gegenüber der herkömmlichen Produktgestaltung mit zusätzlich verbauter Leiterplatte der höhere erreichbare Leichtbaugrad, gesteigerte Freiheitsgrade beim Design sowie die Reduzierung von Folgeprozessen zu erwähnen. Anwendungspotentiale sind insbesondere in der Automobilindustrie im Bereich Interieur, der Medizintechnik für Gehäuse und Prothesen, der Elektronik und Elektrotechnik für Gehäuse und Smart-Home-Geräte, in Industrieautomation für Roboterkomponenten und zahlreichen weiteren Branchen zu finden, wo die Schlüsselfunktionen Leichtigkeit, Festigkeit, Sensorik sowie Schutzfunktion für High-Tech- und Massen Anwendungen zu erheblichen Effizienzsteigerungen und Kostenreduktionen führen.

Teilvorhaben TU Chemnitz

Der Fokus des Teilvorhabens der TU Chemnitz lag dabei auf der Entwicklung und Verarbeitung funktionalisierter thermoplastischer Organobleche. Dabei wurden zunächst verfügbare Organobleche analysiert und auf ihre Eignung zur Funktionsintegration untersucht. Dabei zeigte sich eine unzureichende Beständigkeit des ursprünglich favorisierten Materials in den etablierten Prozessen der Leiterplattenfertigung, wodurch die Entwicklung von beständigeren Organoblechen erforderlich wurde. Darauf aufbauend wurden kurz- und endlosfaserverstärkte Halbzeuge gefertigt und mit einer Kupferplattierung versehen, die beim der KSG GmbH zu Leiterplatten strukturiert und bei der KOMITEC electronics GmbH mit elektronischen Komponenten bestückt wurden, deren Kernstück der von der EDC GmbH entwickelte ASIC darstellt. Es folgte eine Charakterisierung dieser Halbzeuge hinsichtlich ihrer Oberflächenbeschaffenheit, insbesondere der Haftfestigkeit der Kupferschicht, sowie ihrer mechanischen Eigenschaften. Parallel dazu wurden weitere Technologien zur Funktionalisierung der Organobleche untersucht. Abweichend vom Projektantrag

kam dabei in Abstimmung mit dem Projektträger anstelle des ursprünglich favorisierten Ultraschall-Drahtlegeverfahrens das Siebdruckverfahren zum Einsatz, da sich dieses im Hinblick auf die hohen Anforderungen an Komplexität und Genauigkeit als besser geeignet herausgestellt hat. So wurden die Halbzeuge mit gedruckter Sensorik und Aktorik funktionalisiert, und diese in Anschluss elektrisch, elektromechanisch und thermisch charakterisiert.

Einen weiteren Schwerpunkt des Teilvorhabens stellte die Weiterverarbeitung der Organo-Leiterplatten mit Verfahren der Kunststoffverarbeitung dar. Die durch die Funktionalisierung entstehende Semi-Drapierbarkeit der Halbzeuge erzeugt für diese Prozesse neue Herausforderungen. Im Rahmen der Arbeiten wurden dazu die einzelnen Prozesse detailliert analysiert. Dabei standen besonders das Handling und die partielle Vorwärmung der funktionalisierten semi-drapierbaren Halbzeuge im Fokus. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse wurde eine Vorwärmstation für die partielle Temperierung der Halbzeuge über Infrarotstrahlung und die Abschattung nicht zu erwärmender Bereiche entworfen. Parallel dazu erfolgte bei der BERND FLACH Präzisionstechnik GmbH & Co. KG die Definition eines Forschungsfunktionsmusters, anhand dessen die einzelnen Teilprozesse im Projekt StrukTronik entwickelt und erprobt wurden. Für die Umformung und spritzgießtechnische Weiterverarbeitung der Organo-Leiterplatte dieses Funktionsmusters wurde an der TU Chemnitz ein kombiniertes Umform- und Spritzgießwerkzeug entworfen und konzipiert. Durch die Kombination beider Teilprozesse in einem Werkzeug konnte die ursprünglich geplante Prozesskette verkürzt und somit die Taktzeit, die Energie- und Ressourceneffizienz sowie die Marktfähigkeit des Fertigungsprozesses signifikant verbessert werden.

Teilvorhaben KSG GmbH

Ziel des Teilvorhabens der KSG war die Entwicklung einer Technologie zur Herstellung einer Leiterplatte auf Basis endlosglasfaserverstärkter thermoplastischer Organobleche sowie deren Bewertung hinsichtlich der Stabilität der elektronischen Strukturen nach dem Umformprozess zum 3D-Leichtbau-Formteil. Dazu wurde die Verarbeitbarkeit der Organobleche in den einzelnen Teilprozessen der Leiterplattenfertigung untersucht und die dazugehörigen charakteristischen Kennwerte wie

- chemische und thermische Beständigkeit
- Dimensionsstabilität
- Verwindung / Wölbung sowie
- Haftung von Lötstoplack auf Organoblechoberflächen

ermittelt. Zur Herstellung von Organo-Leiterplatten konnte eine optimierte Prozesskette etabliert werden.

Die Glasfasergewebeverstärkung führt bei Thermoplasten zu einem Substratmaterial, aus dem dimensionsstabile Leiterplatten herstellbar sind. Es konnte nachgewiesen werden, dass Organo-Leiterplatten in der Lage sind, auch die thermische Belastung des Bestückungsprozesses mit einer vertretbaren Änderung ihrer Dimensionsstabilität sowie Verwindung / Wölbung zu bewältigen.

Darüber hinaus wurde die optimale Presstechnologie zum Aufbringen von Kupferfolien auf Organobleche eruiert sowie die Haftfestigkeit der Kupferleiterbahnen auf diesen Substraten bestimmt und bewertet. Die hergestellten Organo-Leiterplatten wurden hinsichtlich ihrer thermomechanischen Beständigkeit, elektrischen Funktionsfähigkeit, Oberflächenrauheit sowie Verbundqualität charakterisiert.

Einen weiteren Schwerpunkt des Teilvorhabens stellte der Aufbau von Multilayerstrukturen aus glasfasergewebeverstärkten Organoblechen einschließlich der Charakterisierung der hergestellten Platinen sowie die Prüfung der Durchkontaktierungsfähigkeit der Materialien als Grundlage der Herstellung höherwertiger, doppelseitiger bzw. mehrlagiger Leiterplatten dar. Für Organobleche stehen verschiedene Verfahren zur Durchkontaktierung zur Verfügung.

glasfasergewebeverstärkte Organobleche haben grundsätzlich das Potential, sich als Leiterplattenmaterial zu etablieren, sind jedoch in ihrem Eigenschaftsprofil nicht mit klassischen Basismaterialien der Leiterplattenherstellung vergleichbar. Um Organo-Leiterplatten zuverlässig einsetzen zu können, sind nach gegenwärtigem Kenntnisstand unter anderem angepasste bzw. eingeschränkte Design Rules sowie neuartige Prüf- und Charakterisierungsverfahren erforderlich.

Teilvorhaben Komitec electronics GmbH

Das primäre Entwicklungsziel der Komitec electronics GmbH (KTC) fokussierte im Teilvorhaben eine Technologie zur Bestückung einer organoblechbasierten Leiterplatte. Ziel dabei war, die klassischen Bestückungs-, Träger- und Löttechnologien so zu adaptieren, dass ein zuverlässiger Prozess für vollkommen neuartige Materialien und Belastungsszenarien der Bauteile im Lebenszyklus gewährleistet werden kann. Dafür waren mehrere Prozessschritte notwendig, die sich wie folgt gegliedert haben:

- Bestückung von elektronischen Bauelementen auf die Organoblech-Leiterplatte mit Trägersystem:
Die vom Projektpartner KSG GmbH gelieferten organoblechbasierten Leiterplatten waren zunächst nur mit Leiterzügen versehen und sollten seitens KTC mit elektronischen Bauelementen bestückt werden. Die ersten kurzfaserverstärkten Organo-Leiterplatten waren im Vergleich zu klassischen FR4-Leiterplatten bis zu einem gewissen Grad verformbar, was dazu führte, dass sich das kurzfaserverstärkte Organoblech im Bestückungsprozess stark verwölbte sowie leichte Schrumpfungen aufwies und eine erfolgreiche Bestückung so verhindert hat. Daher war u.a. die Konstruktion eines Leiterplattenträger für organoblechbasierte Leiterplatten erforderlich, der das Halbzeug sicher aufnahm und die Bestückung mittels klassischer Verfahren ermöglicht hat.
- Untersuchung der Thermostabilität im Lötprozess und Anpassung des Pastendrucksystems
Das wichtigste Arbeitsziel der KTC war hierbei die Untersuchung des Temperaturverhaltens von Organoblech im Zusammenspiel mit der erforderlichen Temperatur unterschiedlicher Lotpasten. Die durch die Temperatur im Reflowprozess verursachte Schrumpfung bzw. Dehnung und Verwölbung beeinflusste die Konstruktion des zur Bestückung erforderlichen Leiterplattenträgers, für dessen Design mehrere Iterationsschleifen erforderlich waren. Die strukturelle Änderung des Materials durch die Projektpartner zu einem langfaserverstärkten Organoblech und die Analyse der Ergebnisse des kurzfaserverstärkten Materials ermöglicht anschließend den Entwicklungsprozess der Pastenschablone für einen effizienten Auftrag der Lotpaste.
- Beschichtungsprozess für belastungsgerechte Schutzbeschichtungen
Um die bestückten Bauteile ggf. nach dem Verformungsprozess vor mechanischen, klimatischen oder aggressiven Medien zu schützen, wurde untersucht, ob eine Vergussmasse auf das Organoblech aufgebracht werden kann. Die Wahl fiel dabei auf eine Vergussmasse, die bei elektronischen Komponenten eingesetzt werden kann und von einem Projektpartner auf die Eignung getestet wurde.

Teilvorhaben EDC Electronic Design Chemnitz GmbH

Für eine Artefakt-freie Einbettung mikroelektronischer Komponenten entwickelt die EDC GmbH (Chemnitz) einen integrierten Mikroschaltkreis (IC) der für unterschiedliche Messaufgaben geeignet ist und eine kabellose Energie- und Signalübertragung erlaubt. Zielparameter ist die IC-Fertigung mit Signalverarbeitung für die Montage auf das elektrisch strukturierte FKV-Halbzeug mit robuster Daten- und Energieübertragung.

Im Rahmen von StrukTronik wurde ein SSC eingesetzt, welcher neben dem ursprünglich geplanten Standard-Gehäuse (QFN) auch in einem zeitgemäßen WL-CSP („Wafer-Level-Chip-Scale-Package“) verfügbar ist, wodurch die Packungs- und Integrationsdichte steigen sowie die Kosten sinken. Darüber hinaus nimmt die mechanische Belastung durch thermisch bedingte Ausdehnungs-

Vorgänge bei kleineren Gehäusegrößen ab. Vor dem Hintergrund der brandneu entwickelten Prozesse für Schaltungsträger auf Organoblech-Basis ermöglichte der Einsatz des vereinfachten Chips ohne drahtlose Energieübertragung eine funktionale Schaltung.

Mögliche Einflüsse von Leitungsimpedanz bzw. Datenübertragungsrate oder Auswirkung etwaiger Dehnungen im Chip auf die IC-Eigenschaften erwiesen sich als vergleichbar nachrangig wie bei Schaltungen auf herkömmlichen Schaltungsträgern, solange sie keine erhöhten Anforderungen an Signalintegrität, Bandbreite o.a. stellen. Für solche Anwendungen entstehen häufig weitere Anforderungen wie eng tolerierte Dimensionen (Leiterbahnabstände vertikal und horizontal), die in dem frühen Stadium der Technologie noch nicht eingehalten werden konnten. Anspruchsvollere Anwendungen bieten sich aber für weitergehende Untersuchungen an.

Im Struktronik-Projekt konnte EDC Testmethoden für einen SSC vom Wafer-Level-Test bis hin zu Zuverlässigkeitstests entwickeln. Im Rahmen des Projektes wurden Anwendungsschaltungen entwickelt und spezifische Leiterzugbilder entworfen, die eine Fertigung auf Organoblech zulassen. Diese Entwürfe konnten mit Hilfe von CAD-Modellen mit den Verbundpartnern abgestimmt werden, um auch die Bestückung der Bauteile sowie die Umformung und Hinterspritzung zu ermöglichen. Die produzierten Schaltungen wurden untersucht, bewertet und in einem anschaulichen Demonstrator umgesetzt, mit dem auf Messen das StrukTronik-Projekt sowie die Förderinitiative vorgestellt werden kann. Es handelt sich um eine funktionsfähige Lichtschranke, dessen Empfänger-Schaltung mit dem SSC von EDC auf einem Schaltungsträger aus umgeformtem und hinter-spritztem Organoblech sitzt. Der Zustand der Lichtschranke kann dank eines angeschlossenen Microcontrollers drahtlos auf dem Smartphone ausgelesen werden.

Teilvorhaben Bernd Flach Präzisionstechnik GmbH & Co. KG

Der Fokus des Teilvorhabens der BERND FLACH Präzisionstechnik GmbH & Co. KG lag dabei auf der prozesstechnischen Verarbeitung funktionalisierter Organobleche. Schwerpunktmäßig wurden dabei das Preforming und das Hinterspritzen der von den Projektpartnern hergestellten, zu strukturierten Leiterbahnen versehenen und mit elektronischen Bauelementen bestückten Organo-Leiterplatten.

Aufbauend auf grundlegenden Analysen zu geometrischen, mechanischen und prozesstechnischen Restriktionen der favorisierten Organoblechvarianten wurden in Abstimmung mit den Kooperationspartnern und assoziierten Partnern verschiedene Applikationsideen zur Anwendung der im Projekt entwickelten Technologie erarbeitet. Anschließend erfolgte die Definition eines Forschungsfunktionsmusters, das die Funktionalitäten einer Lichtschranke bzw. eines Lichtvorhangs abbildet. Als Grundlage für die Konstruktion dieses Bauteils wurden eine Variantenbetrachtung zum Preforming und erste Umformversuche der semidrapierbaren Organo-Leiterplatten durchgeführt. Darauf aufbauend erfolgten ein prozessgerechter Entwurf und die Detailkonstruktion des Forschungsfunktionsmusters. Dessen Kernkomponenten bilden mehrere vom Projektpartner EDC GmbH entwickelte optoelektronische Funktionsmodule. Neben den Anforderungen dieser Elektronikmodule an die Geometrie der Trägerstruktur flossen auch die Randbedingungen und Restriktionen hinsichtlich der Erzeugung der benötigten Leiterbahnen auf der Organo-Leiterplatte durch den Projektpartner KSG GmbH und der Bestückung mit den erforderlichen elektronischen Komponenten durch den Projektpartner KOMITEC electronics GmbH in die Konstruktion ein. So entstand ein Lichtschranken-Modul, welches aus einer U-förmig umgeformten Organo-Leiterplatte mit vier optoelektronischen Funktionsmodulen besteht und spritzgießtechnisch mit einer Rippenstruktur versehen wird. Die modulare Bauweise erlaubt dabei die Aneinanderreihung mehrerer Lichtschranken zur Überwachung größerer Bereiche.

Zur Fertigung des Forschungsfunktionsmusters wurde eine Preformstation konzipiert. Dabei stellte sich für dieses Bauteil als vorteilhaft heraus, das Preforming in das Spritzgießwerkzeug zu integrieren. Damit verkürzt sich die ursprüngliche Prozesskette und die Taktzeit, die Energieeffizienz sowie infolgedessen auch die Marktfähigkeit des Fertigungsprozesses werden signifikant verbessert. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen und dem Werkzeug- und Niederhalterkonzept des

Projektpartners TU Chemnitz wurde ein kombiniertes Umform- und Spritzgießwerkzeug konstruiert und gefertigt. Es ist in Zwei-Platten-Bauweise ausgeführt und besitzt auf der Düsenseite einen Stempel, der die Innengeometrie und die Rippenstruktur der Lichtschranke abbildet. Über einen federgelagerten Gegenstempel wird die Fixierung und der symmetrische Einzug der Organo-Leiterplatte während des Umformprozesses beim Schließen des Werkzeugs gewährleistet. Mit dem kombinierten Werkzeug wurden umfangreiche Versuche zum Umformen der Organo-Leiterplatten sowie zum Spritzgießen der Rippenstruktur und der Endkontur des Bauteils durchgeführt. Nach der Optimierung der Prozessparameter konnten die Organo-Leiterplatten erfolgreich und beschädigungsfrei umgeformt und angespritzt werden.

Die durchgeführten Arbeiten und erzielten Projektergebnisse sind im Teil II des Sachberichts ausführlich dargestellt.

Autoren: Ricardo Decker¹, Jens Emmrich¹, Kathrin Weise²,
Danny Horn³, Markus Gaitzsch⁴, Steffen Flach⁵

WIR!-Initiative: SmartERZ

Smart Composites: Neue Technologien, Produkte und Geschäftsmodelle für einen innovationsbasierten Strukturwandel in der Region Erzgebirge

Abschlussbericht – Teil II: ausführlicher Sachbericht

Strukturkonforme Einbettung von mikroelektrischen Systemen in thermoplastische Verbundstrukturen

Projektlaufzeit: 01.11.2021 – 31.10.2024

¹ Technische Universität Chemnitz – Professur Strukturleichtbau / Kunststoffverarbeitung
Strukturkonforme Einbettung von mikroelektrischen Systemen in thermoplastische Verbundstrukturen (FKZ: O3WIR1408A)

² KSG GmbH
Entwicklung von Verfahren zur Herstellung einer mehrlagigen Leiterplatte auf Basis von endlosfaserverstärkten Thermoplasten (Organoblechen) (FKZ: O3WIR1408D)

³ Komitec electronics GmbH
Entwicklung von automatisierbaren Kontaktier- und Bestückungsverfahren für thermoplastische Leiterplatten (FKZ: O3WIR1408B)

⁴ EDC Electronic Design Chemnitz GmbH
Entwicklung eines integrierten Mikroschaltkreises (IC) zur strukturkonformen Einbettung in Leichtbaustrukturen (FKZ: O3WIR1408C)

⁵ Bernd Flach Präzisionstechnik GmbH & Co. KG
Entwicklung von Technologien zum Preformen und Hinterspritzen semidrapierbarer organoblechbasierter Leiterplatten (FKZ: O3WIR1408F)

Inhaltsverzeichnis

1	SmartERZ: StrukTronik	3
2	Strukturkonforme Einbettung von mikroelektrischen Systemen in thermoplastische Verbundstrukturen	4
2.1	AP 1: Mikroelektronik für Einbettung in Organobleche	4
2.1.1	AP 1.15: Untersuchungen zu Vergussmaterialien hinsichtlich mechanischer Festigkeit und Steifigkeit unter Temperatureinfluss.....	4
2.2	AP 2: Leiterplatte auf Organoblech-Basis.....	6
2.2.1	AP 2.2: Oberflächenanalyse des FKV-Halbzeuges für Cu-Plattierung; Aufbau Hybridhalbzeug unter Beachtung der Restriktionen aus 2.1	6
2.2.2	AP 2.9: Analyse Siebdruckprozess: Anforderungen, Toleranzen, Materialien, Geometrie	8
2.2.3	AP 2.10: Statistische Versuchsplanung zur Untersuchung prozesstechnischer Grenzen im Siebdruck.....	10
2.2.4	AP 2.13: Entwurf gedruckter Sensorik und Aktorik	12
2.2.5	AP 2.11: Versuchsdurchführung am Siebdruck-Halbautomaten.....	14
2.2.6	AP 2.12: Analyse der Parameterstudie der Druckversuche	16
2.2.7	AP 2.17: Elektro- und thermomechanische Charakterisierung der gedruckten Sensorik und Aktorik	19
2.2.8	AP 2.18: Mechanische Charakterisierung funktionalisierten Halbzeugs	21
2.2.9	AP 2.14: Layoutkonzipierung für Drahtvorrat für belastungsarme Drapierung des Halbzeugs und AP 2.16: Aufbau der Halbzeugfunktionalisierung im globalen Bereich	23
2.3	AP 3: Prozesstechnische Verarbeitung funktionalisierter Organobleche	24
2.3.1	AP 3.3: Prozessanalyse zum Handling von semidrapierbaren Halbzeugen.....	24
2.3.2	AP 3.4: Entwurf Vorwärmstation für partielle Temperierung	26
2.3.3	AP 3.11: Entwurf und Konzipierung Spritzgießwerkzeug.....	27
2.3.4	AP 2.15: Drapiersimulation des funktionalisierten Halbzeugs.....	29
3	Entwicklung von Verfahren zur Herstellung einer mehrlagigen Leiterplatte auf Basis von endlosfaserverstärkten Thermoplasten.....	30
3.1	AP 2: Leiterplatte auf Organoblech-Basis.....	30
3.1.1	AP 2.1: Entwicklung von Lösungsmöglichkeiten zum Aufbringen von Kupfersubstraten auf Organoblech auf Thermoplastbasis	30
3.1.2	AP 2.3: Analyse der Verarbeitbarkeit von Thermoplastsubstraten und Hybridhalbzeugen in Leiterplattenprozessen über Musterherstellung	31
3.1.3	AP 2.4: Analyse von Materialien, Technologien zum Aufbau von Multilayerstrukturen aus Organoblech“	34
3.1.4	AP 2.5: Entwicklung von Durchkontaktierungsmöglichkeiten (Metallisierung von Bohrungen in Organoblechen) und AP 2.6: Alternatives Durchkontaktierungsverfahren (Chemischer Kupferaufbau für Durchkontaktierungen)	37
3.1.5	AP 2.7: Untersuchung technologischer Möglichkeiten zum Aufbringen von Lötstopplack auf Organoblech“	43
3.1.6	AP 2.8: Funktionsanalysen an strukturierten Hybridhalbzeugen.....	46
3.1.7	AP 3.15: Bewertung umgeformter und umspritzter Leiterstrukturen	49

4	Entwicklung von automatisierbaren Kontaktier- und Bestückungsverfahren für thermoplastbasierte Leiterplatten.....	50
4.1	AP 1: Mikroelektronik für Einbettung in Organobleche	50
4.1.1	AP 1.8: Erarbeitung von Anforderungen an Pasten, Reflowprofil und Werkstückträger beim Einsatz von Organoblechen und Auswirkungen auf die Lötstelle	50
4.1.2	AP 1.9: Entwurf, Auslegung, Konstruktion und Fertigung eines Leiterplattenträgers für Organobleche	54
4.1.3	AP 1.10: Untersuchungen zur Thermostabilität des Substrates im Reflowofen unter Einfluss unterschiedlicher Temperaturprofile und AP 1.11: Recherche zu alternativen Lotsystemen und Klebepasten, Evaluation von Hoch- und Niedertemperaturloten in Verbindung mit zerstörenden Testverfahren.....	57
4.1.4	AP 1.12: Konstruktion und Fertigung Pastenschablone; Musterfertigung organoblechbasierter Leiterplatten	61
4.1.5	AP: 1.13: Aufbau von Vergusskavitäten für belastungsgerechte Schutzbeschichtungen und Probekörper	69
4.1.6	AP 1.14: Ableiten von Gestaltungsrichtlinien für die Bestückung und Belotung von organoblechbasierten Leiterplatten	70
5	Entwicklung eines integrierten Mikroschaltkreises (IC) zur strukturkonformen Einbettung in Leichtbaustrukturen.....	74
5.1	AP 1: Mikroelektronik für Einbettung in Organobleche	74
5.1.1	AP 1.1: Anforderungen an das mikroelektronische System	74
5.1.2	AP 1.2: Erforschung der Einflüsse der mechanischen Verformung und Belastung	75
5.1.3	AP 1.3: Schaltungskonzepte und Optimierungen	76
5.1.4	AP 1.4: Entwicklung der Schaltungskomponenten und IC-Layout	79
5.1.5	AP 1.5: Tests am PhotoRX auf Waver-Level.....	80
5.1.6	AP 1.6: Charakterisierungen, Qualifizierung, Optimierung.....	82
6	Entwicklung von Technologien zum Preformen und Hinterspritzen semidrapierbarer organoblechbasierter Leiterplatten.....	85
6.1	AP 3: Prozesstechnische Verarbeitung funktionalisierter Organobleche	85
6.1.1	AP 3.1: Anforderungsanalyse hinsichtlich geometrischer, mechanischer und prozesstechnischer Restriktionen	85
6.1.2	AP 3.5: Variantenbetrachtung zum Preforming von semidrapierbaren Halbzeugen.....	86
6.1.3	AP 3.6: Prozessgerechter Entwurf und Konstruktion des Forschungsfunktionsmusters	88
6.1.4	AP 3.7: Entwurf und Konstruktion der Preformstation und AP 3.8: Umsetzung der Preformstation	90
6.1.5	AP 3.12: Konstruktion des Spritzgießwerkzeugs	90
6.1.6	AP 3.10: Umformversuche semidrapierbarer Halbzeuge und AP 3.13: Spritzgießversuche zur Herstellung der Funktionsmuster	92
7	Funktionsdemonstrator	96
7.1	Demonstrator-Prototyp	96
7.2	Finaler Funktionsdemonstrator	98

8	Notwendigkeit und Angemessenheit der der geleisteten Projektarbeiten.....	100
8.1	Teilprojekt TU Chemnitz	100
8.2	Teilprojekt KSG GmbH	100
8.3	Teilprojekt Komitec electronics GmbH.....	100
8.4	Teilprojekt EDC Electronic Design Chemnitz GmbH	101
8.5	Teilprojekt Bernd Flach Präzisionstechnik GmbH & Co. KG	101
9	Nutzen und Verwertbarkeit.....	102
9.1	Teilprojekt TU Chemnitz	102
9.2	Teilprojekt KSG GmbH	102
9.3	Teilprojekt Komitec electronics GmbH.....	102
9.4	Teilprojekt EDC Electronic Design Chemnitz GmbH	103
9.5	Teilprojekt Bernd Flach Präzisionstechnik GmbH & Co. KG	103
10	Forschungs- und Entwicklungsergebnisse von Seiten Dritter	104
11	Veröffentlichungen	104

1 SmartERZ: StrukTronik

Das Verbundvorhaben StrukTronik konzentrierte sich auf die Entwicklung einer Technologie zur Herstellung elektrisch funktionalisierter Halbzeuge, die auf endlosfaserverstärkten Thermoplastplatten (Organoblechen) basieren. Ziel war es in diese Halbzeuge sowohl periphere Signal-, Sensor- und Stromleitungen im globalen Bereich als auch komplexe Sensorelektronik im lokalen Bereich zu integrieren.

Folgende konkrete Ziele wurden definiert:

- Steigerung der Integrationstiefe elektrischer Systeme in kunststoffbasierten Leichtbaustrukturen
- Einführung neuer Leiterplattensubstrate in der Elektronikindustrie
- Prozesskompatible und artefaktfreie Einbettung mikroelektrischer Systeme in thermoplastbasierte Leichtbaustrukturen

Robuste Verarbeitung in großserienfähigen Verfahren der Kunststoffverarbeitung.

Durch das regionale Projektkonsortium aus dem Erzgebirge und Chemnitz sollte die Wertschöpfung im Innovationsfeld Smart Composites in der Region gefördert werden. In KMUs sollte der innovationsgetriebene Strukturwandel vorangetrieben werden.

Im Rahmen des Vorhabens untersuchte die Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung der Technischen Universität Chemnitz die Strukturkonforme Einbettung von mikroelektrischen Systemen in thermoplastische Verbundstrukturen. Die KSG GmbH befasste sich mit der Entwicklung von Verfahren zur Herstellung einer mehrlagigen Leiterplatte auf Basis von endlosfaserverstärkten Thermoplasten, sog. Organoblechen. Die Entwicklung von automatisierbaren Kontaktier- und Bestückungsverfahren für diese neuartigen thermoplastischen Leiterplatten war Forschungsgegenstand der Komitec electronics GmbH. Die dabei verwendeten Mikroschaltkreise werden gezielt für die strukturkonforme Einbettung in Leichtbaustrukturen von der der EDC Electronic Design Chemnitz GmbH entwickelt. Zur Weiterverarbeitung der Leiterplatten zu Strukturbauteilen entwickelte die Bernd Flach Präzisionstechnik GmbH & Co. KG Technologien zur Preformen und Hinterspritzen semidrapierbarer organoblechbasierter Leiterplatten.

Die Projektergebnisse der jeweiligen Teilvorhaben sind in den folgenden Kapiteln ausführlich dargestellt.

2 Strukturkonforme Einbettung von mikroelektrischen Systemen in thermoplastische Verbundstrukturen

2.1 AP 1: Mikroelektronik für Einbettung in Organobleche

2.1.1 AP 1.15: Untersuchungen zu Vergussmaterialien hinsichtlich mechanischer Festigkeit und Steifigkeit unter Temperatureinfluss

Vergussmaterialien (Gießharze) werden in elektrotechnischen Baugruppen verwendet, um die Durchschlagfestigkeit, den Isolationswiderstand, die Permittivität und die Kriechstromfestigkeit zu erhöhen. Darüber hinaus kommen derartige Materialien zum Einsatz, wenn die Baugruppen äußeren Umwelteinflüssen, wie Staub und Feuchtigkeit, ausgesetzt werden können bzw. müssen. Im vorliegenden Fall kann ein Einsatz dieser Gießharze immer dann sinnvoll sein, wenn die elektronischen Baugruppen mittels Kunststofftechnik weiterverarbeitet werden. Das Gießharz schützt dabei die elektronischen Komponenten und elektrischen Verbindungen vor mechanischen und thermischen Belastungen indem es die Bauelemente isoliert und die auftretenden Kräfte großflächig verteilt. Im Rahmen der Organoblechverarbeitung ist es daher erforderlich, die verwendeten Gießharze unter Temperatureinfluss mechanisch zu charakterisieren, da insbesondere das Umformverhalten (Streckgrenze, Zugfestigkeit) von Bedeutung ist.

In Abstimmung mit dem Verbundvorhabenpartner Komitec electronics GmbH (KTC) erfolgte eine Vorauswahl an möglichen Vergussmaterialien, die in der Praxis Verwendung finden. Anlagenseitig ist seitens KTC derzeit nur der Einsatz einer Polyurethan-Vergussmasse möglich, da andere Materialien nicht kompatibel sind. Für die nachgelagerten Prozessschritte im Bereich der Organoblechverarbeitung wurden Analysen bezüglich dem Schmelzverhalten, der Glasübergangstemperatur und der Temperaturbeständigkeit des Gießharzes durchgeführt. Dafür kommt eine DSC-Prüfung (dynamische Differenzkalorimetrie) zum Einsatz, bei der die Wärmestromdifferenz zwischen einer Referenzprobe und der eigentlichen Probe (Vergussmasse) mittels einem dynamischen Differenzkalorimeter gemessen wird. Ergänzend wurde eine thermogravimetrische Analyse (TGA) bei Umgebungsluft durchgeführt, um zu prüfen, ob das Gießharz durch Zersetzungsreaktionen oder Verdampfen flüchtiger Komponenten an die Umgebung abgibt oder aus der Umgebung zum Beispiel durch Oxidation Reaktionspartner aufnimmt. Wird das Gießharz zum Schutz der elektronischen Bauelemente eingesetzt, können durch diese Analysen Rückschlüsse über die Eignung des Gießharzes für nachgelagerte Prozessschritte im Bereich der Organoblechverarbeitung getroffen werden.

Die Ergebnisse der DSC zeigen eine Glasübergangstemperatur in Höhe von 19,3 °C. Die Glasübergangstemperatur trennt den spröden energieelastischen Bereich (Glasbereich) vom weichen entropieelastischen Bereich (gummielastischen Bereich). Unterhalb der

Glasübergangstemperatur sollte das Gießharz nicht umgeformt werden, da mit Beschädigungen der Verkapselung zu rechnen ist, wodurch die elektronischen Bauelemente nicht mehr geschützt wären. Die TGA zeigt eine thermische Beständigkeit des Materials bis 296,5 °C, wodurch die obere Grenze des Umformbereichs festgelegt wird. Für Organobleche aus Hochtemperaturkunststoffen (zum Beispiel PEEK) müssten andere hochtemperaturbeständige Gießharze zur Verkapselung der elektronischen Bauelemente eingesetzt werden.

Aufbauend auf den Ergebnissen der DSC-Prüfung und der TGA des Vergussmaterials wurden dessen mechanische Eigenschaften in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur untersucht. Dabei wurden Probekörper mit einer Geometrie in Anlehnung DIN EN ISO 527-2 Typ 1BA hergestellt und anschließend bei Temperaturen zwischen 5 °C und 180 °C im Zugversuch in Anlehnung an diese Norm untersucht. Die Ergebnisse der mechanischen Prüfung zeigt Abbildung 1. Die Materialsteifigkeit und die Zugfestigkeit nehmen dabei erwartungsgemäß mit steigender Temperatur ab. Zwischen 25 °C und 80 °C fällt der E-Modul auf 15 MPa ab und bleibt danach auch bei höheren Temperaturen auf diesem konstant niedrigen Niveau. Auch die Zugfestigkeit sinkt bei erhöhten Temperaturen auf unter 3 MPa. Mit Überschreitung der Glasübergangstemperatur steigt, wie erwartet, die Bruchdehnung des Materials deutlich an und erreicht bei Raumtemperatur 63 %. Bei den höheren Prüftemperaturen zeigt sich jedoch eine signifikante Verringerung der Bruchdehnung. Als Ursache dafür kann eine weitere Vernetzung des Materials infolge des Temperatureinfluss angesehen werden. Diese zusätzliche Vernetzung findet zwischen 30 °C und 40 °C statt und verringert so das Abgleiten der Polymerketten, welches jedoch für hohe Bruchdehnungen erforderlich ist.

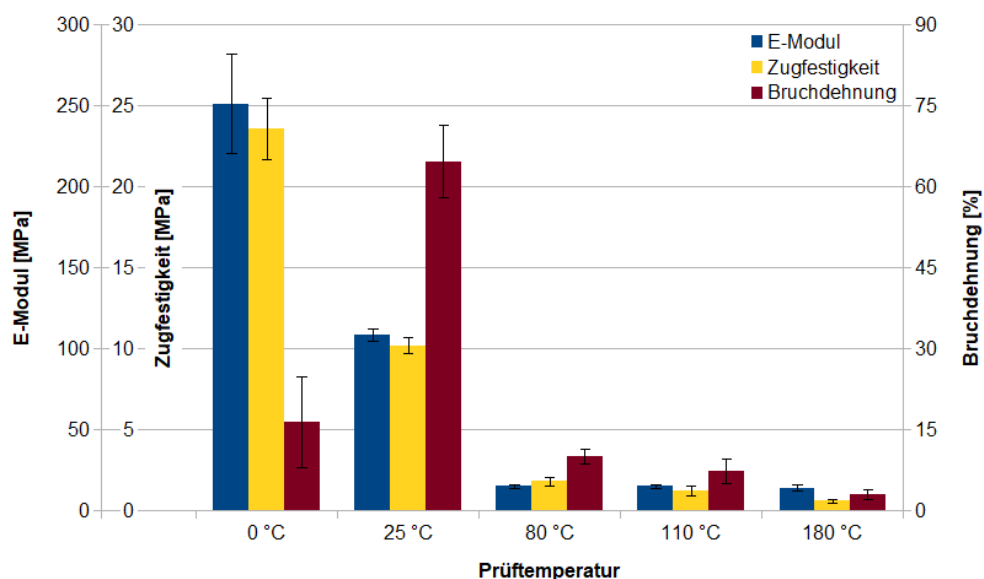


Abbildung 1: Materialkennwerte der Vergussmasse in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur

Die mechanischen Materialkennwerte zeigen, dass dieses Vergussmaterial oberhalb seiner Glasübergangstemperatur und besonders bei erhöhter Temperatur die Umformung der Organobleche nicht behindert. Während der Konstruktion und Auslegung eines Demonstratorbauteils und der Gestaltung eines entsprechenden Umformprozesses ist dabei jedoch die im typischen Temperaturbereich von Organoblechumformungen vergleichsweise geringe Bruchdehnung des Vergussmaterials zu berücksichtigen. Im Kontext des Forschungsvorhabens soll die Vergussmasse zum Einsatz kommen, um auf einem als Leiterplatte funktionalisierten Organoblech, einer sog. Organo-Leiterplatte, aufgebrachte Elektronikkomponenten während des Umformprozesses zu schützen. Da diese funktionalen Bereiche nur einen geringen Umformgrad erfahren sollen, um u.a. die Leiterbahnen und elektronischen Komponenten nicht zu beschädigen, stellt die geringe Bruchdehnung des Vergussmaterials keinen Nachteil für diese Verarbeitungsprozesse dar.

2.2 AP 2: Leiterplatte auf Organoblech-Basis

2.2.1 AP 2.2: Oberflächenanalyse des FKV-Halbzeuges für Cu-Plattierung; Aufbau Hybridhalbzeug unter Beachtung der Restriktionen aus 2.1

Um die elektrische Grundstruktur auf die FKV-Halbzeuge (Organobleche) aufzubringen ist es möglich, die Kupferfolien auf die Deckschicht der Organobleche aufzubringen. Das Aufbringen der Cu-Folien geschieht mittels Pressversuch mit Hilfe eines Plattenwerkzeuges. In Abstimmung mit dem Projektpartner KSG GmbH wurden dafür Kupferfolien mit einer Dicke von 35 µm eingesetzt. Diese besitzen auf der dem Organoblech zugewandten Seite eine aufgeraute Oberfläche (das sog. Treatment) mit einer Rauigkeit von Rz 6 - 10.

Im Vorfeld der Pressversuche wurde die Halbzeugoberfläche von Proben aus verschiedenen Matrixkunststoffen mittels einer Kontaktwinkelmessung in Anlehnung an DIN EN ISO 19403-2 analysiert. Aufgrund der unzureichenden Chemikalienbeständigkeit des ursprünglich favorisierten Thermoplasts („Referenzthermoplast“) in den galvanischen Prozessen der Leiterplattenfertigung wurden zusätzlich besser beständige Proben aus zwei weiteren Thermoplasten „Thermoplast A“ und „Thermoplast B“ untersucht.

Alle Proben wurden nach der Herstellung mit Ethanol gereinigt und entfettet. Die Hälfte der Proben wurde anschließend einer Oberflächenvorbehandlung mit Niederdruckplasma unterzogen. Die Behandlung erfolgte in einer Niederdruckplasma-Anlage vom Typ „Diener PICO“ (Diener Electronic GmbH). Die Proben wurden in einer Sauerstoffatmosphäre für 10 min behandelt. Im Anschluss wurde bei allen Proben der Kontaktwinkel zu Wasser bestimmt. Dabei bildet sich ein umso kleinerer Kontaktwinkel aus, je höher die Oberflächenenergie der Probe ist. Eine höhere Oberflächenenergie deutet auf eine bessere

Haftung der Kupferfolien zu den Organoblechen hin. Bei allen Materialien konnte eine signifikante Verringerung des Kontaktwinkels und damit eine Erhöhung der Oberflächenenergie infolge der Plasmabehandlung beobachtet werden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 im Vergleich zum unbehandelten Referenzthermoplast gegenübergestellt.

Tabelle 1: Ergebnisse der Kontaktwinkelmessungen im Vergleich zum unbehandelten Referenzthermoplast

Kunststoff	Kontaktwinkeldifferenz	
	Unbehandelte Oberfläche	Plasmabehandelte Oberfläche
Referenzthermoplast	$\pm 0,0^\circ$ (Referenz)	$-27,0^\circ$
Thermoplast A	$+45,5^\circ$	$-41,0^\circ$
Thermoplast B	$+33,8^\circ$	$-36,5^\circ$

Neben der Kontaktwinkelmessung erfolgte die Beurteilung der Haftfestigkeit der Cu-Folie auf dem Organoblechhalbzeugen in Anlehnung an DIN EN 1464 „Bestimmung des Schälwiderstandes von Klebungen – Rollenschälversuch“. Ein Versuch entsprechend dieser Norm kommt immer dann zur Anwendung, wenn der Grundkörper (hier: Organoblech) wesentlich starrer ist als der Fügekörper (hier: Cu-Folie). Die Cu-Folien sind aufgrund ihrer geringen Dicke (18 – 70 μm) wesentlich flexibler als die Organobleche. Beim Rollenschälversuch wird die Cu-Folie über die Rollen abgezogen, da bei anderen Versuchsaufbauten andernfalls die Cu-Folie direkt im Abzugsbereich reißen würde, wodurch keine Aussage zur Haftfestigkeit getroffen werden kann. Während des Vorgangs werden die benötigte Kraft und der zurückgelegte Traversenweg der Zugprüfmaschine aufgezeichnet. Aus dem Quotienten der mittleren Haftkraft F über einen Messweg von 10 mm bis 90 mm und der Breite b wird anschließend der Schälwiderstand WS berechnet.

Nach Vorgaben des Projektpartners KSG GmbH sollten Abschälkräfte von mindestens 0,8 N/mm, besser 1,0 N/mm erreicht werden, um eine fertigungs- und anwendungsgerechte Haftung der Kupferfolie zu gewährleisten. Abbildung 2 zeigt die minimale und mittlere Abschälkraft der Kupferfolie von den untersuchten Organo-Leiterplatten. Aufgrund der unzureichenden Chemikalienbeständigkeit des Referenzthermoplasts in den galvanischen Prozessen der Leiterplattenfertigung wurde dieses Matrixmaterial im Projektverlauf nicht weiter betrachtet und dient ebenso wie FR4 lediglich als Referenz. Im Folgenden liegt der Fokus auf den in den galvanischen Prozessen beständigen Thermoplasten A und B. Aufgrund der im Vergleich zum Referenzthermoplasten geringeren Oberflächenenergie der

Polymere wurden diese zur Haftverbesserung mit einem Additiv modifiziert. Beim Thermoplast B konnte damit eine höhere Haftfestigkeit als beim Referenzthermoplast oder Thermoplast A erreicht werden. Die minimale Abschälkraft liegt damit bei 0,75 N/mm, die mittlere Abschälkraft bei 0,85 N/mm. Thermoplast A erreicht dagegen nur Abschälkräfte von 0,64 N/mm bzw. 0,72 N/mm. Aufbauend auf diese Ergebnisse wurde der Pressprozess zum Aufbringen der Kupferfolie auf Organobleche aus Thermoplast B weiter optimiert. Dadurch konnten die Haftfestigkeiten auf 1,14 N/mm bzw. 1,18 N/mm gesteigert werden.

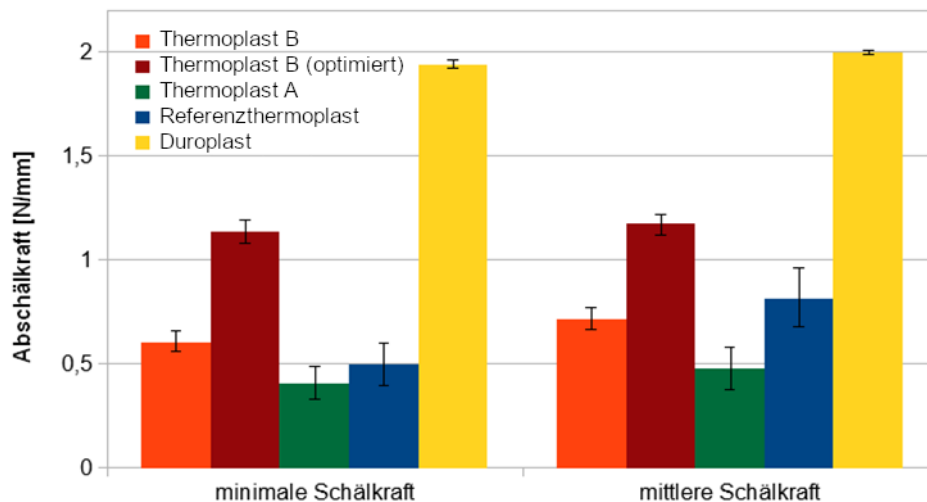


Abbildung 2: Ergebnisse des Rollenschälversuchs

2.2.2 AP 2.9: Analyse Siebdruckprozess:

Anforderungen, Toleranzen, Materialien, Geometrie

Der ursprünglich während der Antragsstellung angedachte Drahtlegeprozess sollte der Entwicklung eines flächigen Halbzeuges mit applizierten elektrischen Zuleitungen zur Signal- und Energieübertragung dienen, um eine Verbindung zwischen der organoblechbasierten Leiterplatte und den peripheren elektrischen Einrichtungen aufzubauen. Die Halbzeuge kommen insbesondere an geometrischen Stellen zum Einsatz, an denen die Bauteile im nachgelagerten Prozess stark drapiert bzw. umgeformt werden. Im Laufe der Projektbearbeitung hat sich dabei herausgestellt, dass der Drahtlegeprozess die hohen Anforderungen an die Komplexität und Genauigkeit der Halbzeuge nicht erfüllt. Daher wurde seitens der TU Chemnitz, Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung, vorgeschlagen, einen Siebdruck-Halbautomaten mit peripheren Einrichtungen zu beschaffen, dem das PTJ zugestimmt hat. Die Inhalte der nachgelagerten Arbeitspakete werden von dieser Änderung nicht tangiert, da lediglich die Technologie zum Aufbringen des Funktionsmaterials modifiziert wird, die Zielstellung des funktionalisierten

Halbzeuges jedoch allumfänglich erhalten bleibt, wodurch keine Änderungen im Arbeitsplan erforderlich sind.

Nach einer detaillierten Analyse des Siebdruckprozesses ergeben sich in Abstimmung mit den Verbundprojektpartnern folgende Anforderungen an die funktionalisierten Halbzeuge:

- **Designfreiheit:** Die Ausgestaltung von sehr dünnen (elektrische Leitungen) und breitflächigen (Flächenelektroden) Funktionsflächen erfordert eine volle zweidimensionale Designfreiheit. Derartige Strukturen können mittels Siebdruck, nicht jedoch mittels Drahtlegeprozess hergestellt werden. Die verschiedenen Funktionalisierungen erfordern dabei unterschiedliche Strukturgrößen und funktionale Bereiche. Im Rahmen des Projekts sind z. B. Druckformate zwischen 75 mm x 75 mm und 370 mm x 450 mm angedacht. Die Strukturgrößen sollten von Abmessungen deutlich unter einem Millimeter mit Toleranzen im Mikrometerbereich, z. B. für filigrane Sensorstrukturen oder Kontakten für mikroelektronische Bauteile, bis hin zu mehreren Dezimetern, z. B. für Zuleitungen oder Abschirmflächen, reichen.
- **Kreuzungspunkte und beidseitige Funktionalisierung:** Je nach Schaltungslayout sind beidseitige Funktionsstrukturen und Kreuzungspunkte der elektrischen Zuleitungen erforderlich. Beim Drahtlegeprozess werden die elektrisch leitfähigen Drähte in das Folieninnere gedrückt, was bei Kreuzungspunkten und beim beidseitigen Funktionalisieren zu Kurzschlüssen führt. Im Siebdruck kann dagegen mittels eines entsprechenden Schichtaufbau (leitfähig/isolierend/leitfähig) eine derartige Struktur hergestellt werden. Da ein solcher Schichtaufbau oder die beidseitige Bedruckung in mehreren Druckschritten mit verschiedenen Druckstoffen erfolgen muss, sind sehr kleine Toleranzen und hohe Wiederholgenauigkeiten im Bereich von 10 µm zwischen den einzelnen Prozessschritten notwendig.
- **Substrate:** Um zukünftigen Anforderungen gerecht zu werden, ist eine große Auswahl an Substratmaterialien erforderlich. Im Siebdruck werden die primär angedachten thermoplastischen Folien z. B. von Organoblechen, duroplastischen Folien, Verstärkungstextilien und naturfaserbasierte Trägermaterialien ergänzt. Für verschiedene Bauteile und Einsatzzwecke sollten Substratdicken zwischen 100 µm und 6 mm verarbeitet werden können

2.2.3 AP 2.10: Statistische Versuchsplanung zur Untersuchung prozesstechnischer Grenzen im Siebdruck

Analog zum ursprünglichen Drahtlegeprozess müssen verschiedenen Materialien und Prozessparameter des Siebdruckprozesses analysiert und im Zusammenhang mit der Entwicklung von Organo-Leiterplatten auf ihre Eignung und ihren Einfluss untersucht werden.

Druckstoff

Die funktionalen Strukturen werden durch verschiedene elektrisch leitfähige und isolierende Druckstoffe (Farben, Pasten, Lacke, ...) auf das Substrat gedruckt. Zur Untersuchung des Siebdruckprozesses für die Herstellung funktionaler Strukturen von Organo-Leiterplatten werden Polyurethandispersionen und Farben auf Basis mehrwertiger Alkohole verdruckt. Die elektrische Leitfähigkeit dieser Druckstoffe wird über elektrisch leitfähige Füllstoffe erzeugt. Im Rahmen der Untersuchungen kommen Silberpulver mit Partikelgrößen im Mikrometerbereich und Leitrüßkompositionen zum Einsatz.

Substrat

Die funktionalen Strukturen werden auf verschiedene Substrate gedruckt. Im Rahmen des Projekts kommen Organobleche auf Basis Thermoplaste aus AP 2.2 zum Einsatz. Darüber hinaus werden Folien und Vliese aus verschiedenen anderen Thermoplasten untersucht.

Schichtaufbau

Zur Realisierung von Kreuzungspunkten, z. B. von elektrischen Zuleitungen, und zur Bestimmung des elektrischen Isoliervermögens nichtleitender Druckstoffe sind mehrschichtige Drucke notwendig. Dabei wird zuerst die untere leitfähige Schicht gedruckt. Nach der Trocknung wird die nächste Schicht aus einem isolierenden Druckstoff mit einem anderen Sieblayout aufgebracht. Analog dazu wird nach erfolgter Trocknung die obere leitfähige Schicht gedruckt. Abbildung 3 zeigt beispielhaft derartige Schichtaufbauten.



Abbildung 3: Schichtaufbau an Kreuzungspunkten (oben) und zur Bestimmung der Durchschlagsfestigkeit (unten)

Layout

Zur Untersuchung des Druckprozesses wurde ein Testlayout (s. Abbildung 4) mit verschiedenen Teststrukturen erarbeitet. Die Strukturgrößen der Punkt-, Linien- und Kreisstrukturen variieren von 50 μm bis 5 mm. Die Strukturabstände variieren dabei zwischen 50 μm und 1 mm. Die Leiterlängen erreichen bis zu 225 mm. Neben den Leiterbahnstrukturen beinhaltet das Layout flächige Strukturen Abmessungen im Zentimeterbereich. Um den Einfluss der Lage der Strukturen im Druckbereich und der Druckrichtung untersuchen zu können sind die verschiedenen Strukturen mehrfach vorhanden und senkrecht bzw. parallel zur Druckrichtung ausgerichtet.

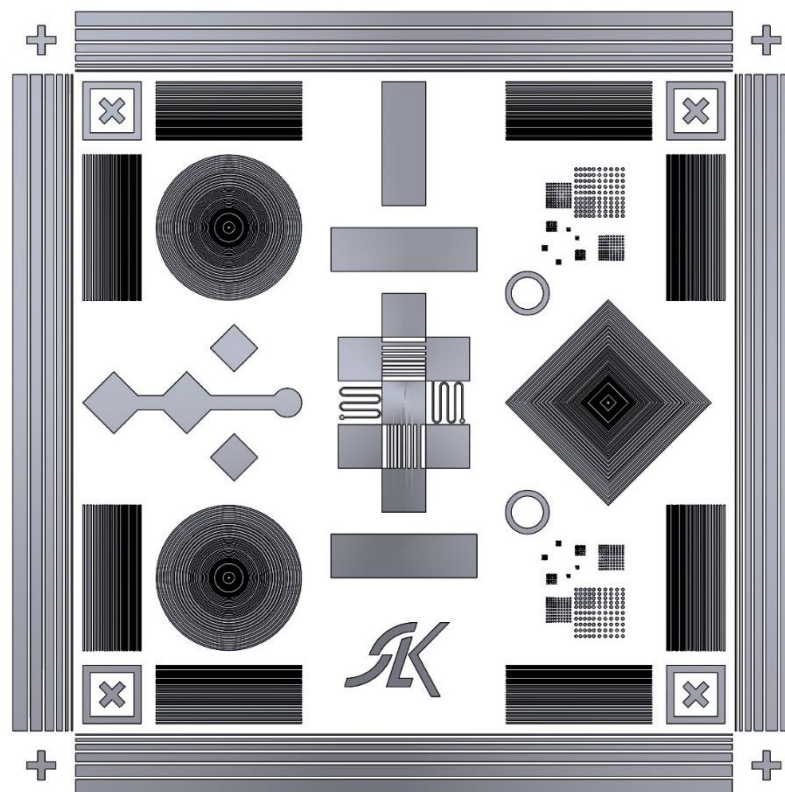


Abbildung 4: Drucklayout zur Beurteilung des Druckprozesses

Prozessparameter

Neben den eingesetzten Materialien wird auch der Einfluss der Druckparameter auf das Druckergebnis untersucht. Von zentraler Bedeutung sind dabei Rakeldruck bzw. -andruckkraft, Rakelgeschwindigkeit und Absprung.

Analyse der gedruckten Strukturen

Die gedruckten Teststrukturen werden anhand des Druckbildes verschiedener Leiterbahnbreiten und -abstände beurteilt. Des Weiteren wird der elektrische Widerstand der leitfähigen Druckschichten über Vierpunktmessungen bestimmt. Im Gegensatz dazu

werden die isolierenden Schichten auf ihre elektrische Durchschlagsfestigkeit getestet. Die Haftfestigkeit der gedruckten Schichten auf den verschiedenen Substraten wird mit Hilfe von Gitterschnittversuchen in Anlehnung an DIN EN ISO 2409 ermittelt. Aus diesen Ergebnissen kann die Eignung der Druckstoffe und Substrate für drucktechnisch funktionalisierte Organo-Leiterplatten abgeleitet werden.

2.2.4 AP 2.13: Entwurf gedruckter Sensorik und Aktorik

Die geplanten Ansätze zu drahtbasierter Elektronik wurden auf die Siebdrucktechnologie übertragen. Darauf aufbauend wurden verschiedene Drucklayouts entworfen, die elektronische, sensorische und aktorische Funktionalitäten enthalten.

Dehnungssensoren

Das Layout der Dehnungssensoren orientiert sich am Design klassischer Dehnungsmessstreifen. Abbildung 5 zeigt exemplarisch zwei Varianten der gedruckten Dehnungssensoren. Sie unterscheiden sich in der Geometrie der Mäander und den Strukturbreiten der Leiterbahnen.

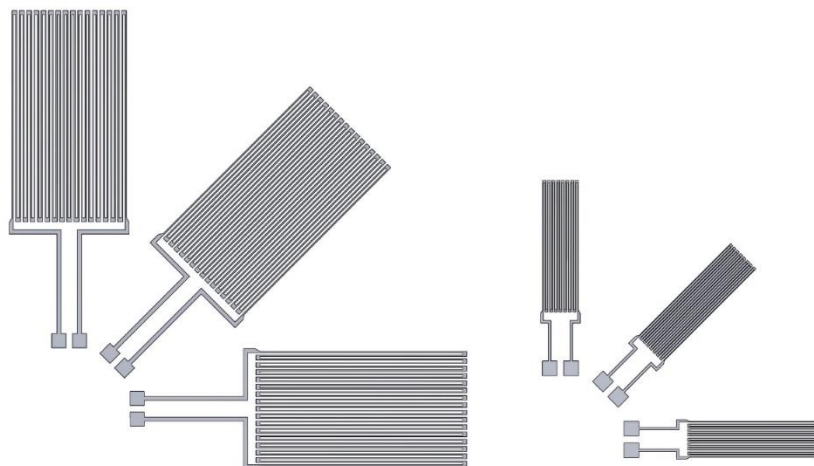


Abbildung 5: Layout gedruckter Dehnungssensoren:
links: 25 mm x 14 mm, Leiterbreite 150 μm
rechts: 15 mm x 4 mm, Leiterbreite 80 μm

Temperatursensoren

Zur Temperaturmessung können die Drucklayouts der Dehnungssensoren verwendet werden. Es muss dazu jedoch ein anderer Druckstoff verwendet werden. Im Gegensatz zu Dehnungssensoren, die eine möglichst geringe Temperaturabhängigkeit aufweisen sollten, benötigen Temperatursensoren ein Leitermaterial mit möglichst großen Temperaturkoeffizienten.

Kapazitive Sensoren und Touchsensorik

Neben den resistiven Dehnungssensoren und Temperatursensoren wurden verschiedene Designs für kapazitive Sensoren erarbeitet. Analog zu den Dehnungssensoren variieren auch hier die Geometrien und Leiterbahnbreiten. Abbildung 6 zeigt zwei derartige Designbeispiele.

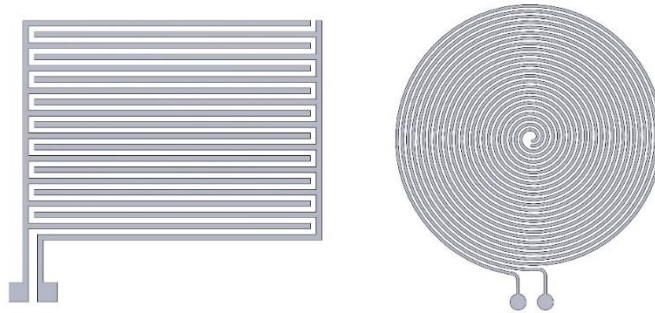


Abbildung 6: Layout kapazitiver Sensoren:
links: rechteckig 26,5 mm x 19,5 mm, Leiterbahnbreite 500 μ m
rechts: rund Durchmesser 25 mm, Leiterbahnbreite 250 μ m

Ergänzend zu den kapazitiven Sensoren wurden flächige Touchsensoren zur Berührungserkennung entworfen. Mehrere Touchsensoren können zu einem Sensorfeld verbunden werden und dabei bspw. Unabhängig voneinander Schaltfunktionen auslösen. Abbildung 7 zeigt ein solches Sensorfeld mit fünf Touchelementen mit jeweils 15 mm Kantenlänge. Das gesamte Sensorfeld misst 94 mm x 39,5 mm.

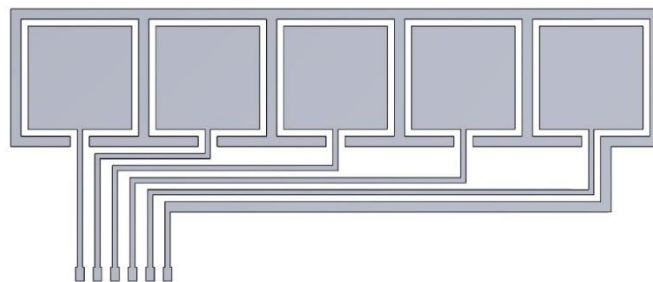


Abbildung 7: Layout eines Touchsensors mit fünf Funktionsflächen

Heizelemente

Zum Erzeugen von aktorischen Funktionen wurden Drucklayouts für Heizelemente entworfen. Im Gegensatz zu sensorischen Anwendungen müssen hierbei deutlich breitere Leiterbahnen zum Einsatz kommen, da höhere elektrische Ströme fließen müssen, um nennenswerte Heizleistungen zu erreichen. Zu schmale Leiterbahnen würden von den höheren Strömen zerstört werden. Abbildung 8 zeigt eine Heizstruktur von 60 mm x 80 mm mit 1,5 mm breiten Leiterbahnen.

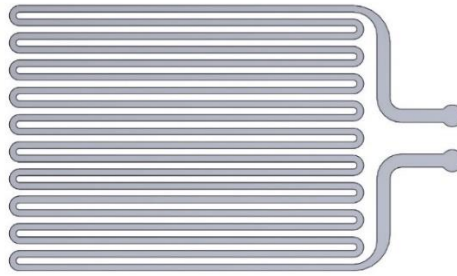


Abbildung 8: Layout eines gedruckten Heizelements

Elektronische Schaltungen

Zur vollen Funktionsfähigkeit müssen die Sensoren und Aktoren weitere elektronische Komponenten zur Auswertung oder Ansteuerung verschaltet werden. Diese elektronischen Schaltungen sollen ebenfalls im Siebdruckverfahren gefertigt werden. Im Rahmen des Projekts wurden verschiedene Schaltungslayouts entworfen, die als Träger für die zusätzlichen Elektronikkomponenten, wie z. B. Widerstände, Kondensatoren, Transistoren, Mikrocontroller oder LEDs, fungieren. Die elektronischen Bauteile werden bspw. mittels elektrisch leitfähigen Klebstoffen auf den gedruckten Leiterbahnen befestigt und kontaktiert. Abbildung 9 zeigt verschiedene Schaltungslayouts zur Aufnahme von elektronisch Bauteilen.

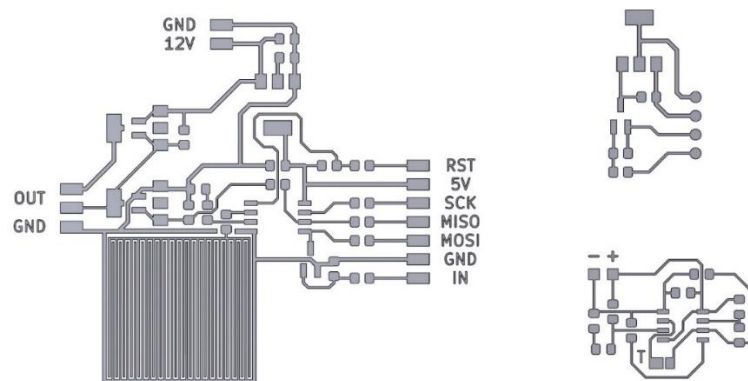


Abbildung 9: Layouts für gedruckte elektronische Schaltungen:
 links: Touchsensor mit Auswertungsschaltung
 rechts oben: Treiberstufen z. B. für Heizelemente
 rechts unten: Timerschaltung mit LED-Ansteuerung

2.2.5 AP 2.11: Versuchsdurchführung am Siebdruck-Halbautomaten

Durch die Änderung der Technologie vom Ultraschall-Drahtlegen zum Siebdruck wurde die Versuchsdurchführung nicht als Leistung Dritter vergeben, sondern im Technikum der TU Chemnitz durchgeführt. Aufbauend auf den Ergebnissen aus AP 2.9 und AP 2.10 erfolgten umfangreiche Versuche im technischen Siebdruck. Dabei wurden neben verschiedenen

Drucklayouts zur Prozessbeurteilung (vgl. AP 2.10) auch erste Layouts zu gedruckten Sensoren (vgl. AP 2.13) umgesetzt. Dabei kam ein Siebdruck-Halbautomat vom Typ EKRA E2, wie in Abbildung 10 dargestellt, zum Einsatz.



Abbildung 10: Siebdruck-Halbautomat EKRA E2

Im Rahmen der Versuche wurden Kunststoffplatten aus Thermoplast B und glasfaserverstärkte Organobleche auf Basis des Referenzthermoplasten sowohl mit grafischen Strukturen zur Beurteilung der Druckqualität als auch mit funktionalen Strukturen bedruckt. Dabei kamen unterschiedliche Siebdruckpasten zum Einsatz. Zur Erzeugung elektrisch leitfähiger Strukturen wurden verschiedene silberbasierten Pasten „Paste A“ und „Paste B“ verwendet. Darüber hinaus wurden Versuche mit nicht leitfähiger Farbe durchgeführt. Dabei wurden die Druckparameter Rakelgeschwindigkeit, Rakeldruck und Absprung systematisch variiert, die Substratdicke jedoch konstant auf 2 mm festgelegt. Abbildung 11 zeigt beispielhaft zwei bedruckte Muster.

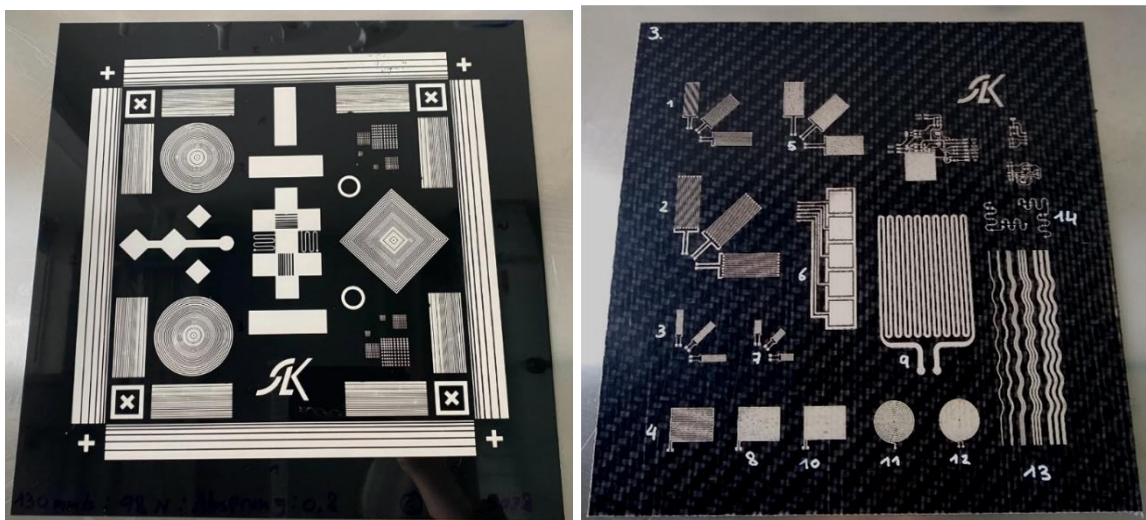


Abbildung 11: Bedruckte Thermoplast-Platte (links) und Organoblech (rechts)

2.2.6 AP 2.12: Analyse der Parameterstudie der Druckversuche

Druckparameter, Druckqualität und Layoutwiedergabe

Ein grundlegendes Ziel dieser Untersuchung war es, die Auswirkungen der Variation und Optimierung verschiedener Druckparameter auf die Qualität der erzeugten Drucke zu untersuchen und die prozesstechnischen Grenzen zu ermitteln. Dieses Ziel wurde durch eine systematische Anpassung, schrittweise Veränderung und Optimierung der Druckparameter, der Siebdruckpasten und Substratmaterialien im Rahmen von AP 2.11 erreicht. Als Substrate kamen dabei Platten aus Thermoplast B und Organobleche mit einer Dicke von 2 mm zum Einsatz

Erste Druckversuche mit der mit den verschiedenen Siebdruckpasten zeigten keine zufriedenstellenden Ergebnisse hinsichtlich Kantenschärfe und Linientreue. Die kleinste erreichbare Strukturbreite betrug dabei 0,4 mm. Kleinere Linienbreiten verlaufen miteinander und können die gewünschte Struktur nicht mehr wiedergeben. Breitere Linien und flächige Strukturen wurden in ausreichend guter Qualität abgebildet.

Mit der Optimierung konnte das Druckergebnis stetig verbessert werden. In umfangreichen Versuchen wurde die Rakelgeschwindigkeit zwischen 50 mm/s und 150 mm/s, der Rakeldruck bzw. die Rakelandruckkraft zwischen 98 N auf 163 N und der sog. Absprung zwischen 0 mm und 1 mm variiert. Den deutlichsten Einfluss auf die Druckqualität, insbesondere auf die Feinheit der gedruckten Linien, aber auch auf eine gleichmäßige Pastenverteilung und Schichtdicke, zeigte dabei der Absprung. Unter Verwendung von optimierten Prozessparameter konnten mit Paste A dünne Linien mit einer Breite von bis hinunter zu 0,05 mm sauber gedruckt werden. Abbildung 12 zeigt den Einfluss der Prozessparameter auf die Druckqualität anhand dünner Linienstrukturen vor und nach der Parameteroptimierung.

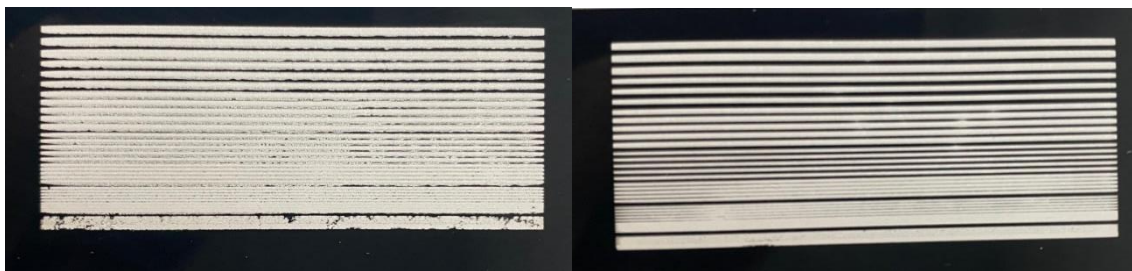


Abbildung 12: Linienstruktur mit unzureichender Geometrieausbildung und Kantenschärfe (links) und Druckbild mit optimierten Parametern (rechts)

Im Rahmen dieser Parameterstudie zeigte das Substrat nur einen geringen Einfluss auf die erreichbare Druckqualität. Es zeigten sich vergleichbare Druckergebnisse sowohl auf den Thermoplast-Platten als auch auf den Organoblechen. Aufgrund der höheren Oberflächengüte waren dabei die Ergebnisse auf den Thermoplast-Platten tendenziell etwas besser.

Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse der Parameterstudie, dass das Erreichen des optimalen Druckbildes zudem eine präzise Auswahl aller Komponenten erfordert, einschließlich der Paste selbst, des Siebmaterials sowie der Siebparameter und des Substrats. Allein die Auswahl und Optimierung der Prozessparameter reichen möglicherweise nicht aus, um eine erstklassige Druckqualität zu erzielen, wenn nicht auch die Materialkompatibilität berücksichtigt wird.

Evaluierung von Kontaktierungsvarianten

Zur Realisierung der elektrischen Verbindung der gedruckten Strukturen nach außen bzw. zur Halbzeugfunktionalisierung im globalen Bereich (vgl. AP 2.15) wurden im Rahmen des Arbeitspakets verschiedene Kontaktierungsvarianten evaluiert. Aufgrund des hohen Silberanteils sind einige leitfähige Siebdruckpasten prinzipiell lötbar. Die sehr geringen Schichtdicken der gedruckten Strukturen stellen dabei jedoch große Herausforderungen dar. Die für eine sichere Lötverbindung notwendige Prozesstemperatur kann zur thermischen Zerstörung der gedruckten Schicht oder zur Beschädigung des Kunststoffsubstrats führen. Zudem sind Siebdruckpasten mit anderer Zusammensetzung wie z. B. Pasten, die ihre elektrische Leitfähigkeit über Kohlenstoffpartikel wie Leitruß oder Carbon-Nanotubes enthalten, nicht lötbar. Für das Projekt ist die Kontaktierung gedruckter Strukturen über Lötverbindungen daher nur bedingt geeignet. Eine erfolgsversprechende Alternative stellt die Kontaktierung mittels elektrisch leitfähiger Klebstoffe dar. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die ersten Kontaktierversuche der gedruckten Strukturen mit elektrisch leitfähigen Klebstoffen. Die Klebstoffe müssen dabei die folgenden Anforderungen erfüllen:

- gute Benetzung der leitfähigen Schicht
- gute Haftung zu Elektroden und Anschlussleitungen
- hohe elektrische Leitfähigkeit im ausgehärteten Zustand
- gute Prozessierbarkeit im flüssigen oder pastösen Zustand

Tabelle 2: Elektrisch leitfähige Klebstoffe und deren Eigenschaften

Klebstoff	Leitfähiger Füllstoff	Übergangswiderstand [Ω]	Erkenntnisse
Klebstoff A	Silberpartikel	$< 1 \Omega$	- für Siebdruck geeignet - gute Verarbeitungseigenschaften - geringe mechanische Festigkeit - langsame Härtung in dickeren Schichten
Klebstoff B	Silberpartikel	$< 1 \Omega$	- für Siebdruck geeignet - sehr gute Verarbeitungseigenschaften - gute mechanische Festigkeit - sehr schnelle Aushärtung unter Temperatureinfluss - hoher lokaler Wärmeeintrag zur Härtung notwendig
Klebstoff C	Silberpartikel	$\approx 1 \Omega$	- 2-Komponenten-Klebstoff - nicht für Siebdruck geeignet - kritische Verarbeitungseigenschaften - sehr gute mechanische Festigkeit - langsame Aushärtung
Klebstoff D	Leitruß	$\approx 320 \Omega$	- für Siebdruck geeignet - thermisch reaktivierbar - sehr gute Verarbeitungseigenschaften - geringe mechanische Festigkeit - vergleichsweise hoher Übergangswiderstand

Die ersten Ergebnisse zeigen nicht nur deutliche Unterschiede in den Haftfestigkeiten und mechanischen Festigkeiten der Klebeverbindungen, sondern auch hinsichtlich der elektrischen Eigenschaften. Die silberbasierten Klebstoffe zeigen sehr geringe Übergangswiderstände und sind damit aus elektrischer Sicht sehr gut für die Kontaktierung der gedruckten Strukturen geeignet. Der rußbasierte Klebstoff zeigt zwar deutlich größere Übergangswiderstände, ist aber aufgrund seiner thermischen Reaktivierbarkeit dennoch für Kontaktierungsprozesse interessant. So kann der Klebstoff bereits während der Halbzeugfertigung auf die Kontaktstelle aufgebracht und die Kontaktierung in einem späteren Prozess, z. B. im Rahmen der Bauteilfertigung, über die Erwärmung in einem vergleichsweise einfachen Prozess hergestellt werden. Das Potenzial dieses Klebstoffs kann besonders bei Anwendungen, in denen Übergangswiderstände nur eine untergeordnete Rolle spielen oder bei großflächigen Kontaktstellen, die für eine Verringerung des Kontaktwiderstandes sorgen, ausgenutzt werden. Darüber hinaus ist im

Sinne einer effizienten großserientechnischen Herstellung der funktionalisierten Halbzeuge die Verarbeitung der Klebstoffe im Siebdruckverfahren von Bedeutung. Die Klebstoffe können in diesem Fall ebenso wie die Funktionselemente gezielt und strukturiert auf das Substrat aufgebracht werden.

Im Rahmen der Untersuchungen konnten die gedruckten Funktionsstrukturen erfolgreich mit elektrisch leitfähigen Klebstoffen kontaktiert werden. Abbildung 13 zeigt beispielhaft einen Schliff durch eine Kontaktstelle zwischen einer gedruckten Funktionsstruktur und einem Kupferdraht zur Kontaktierung.

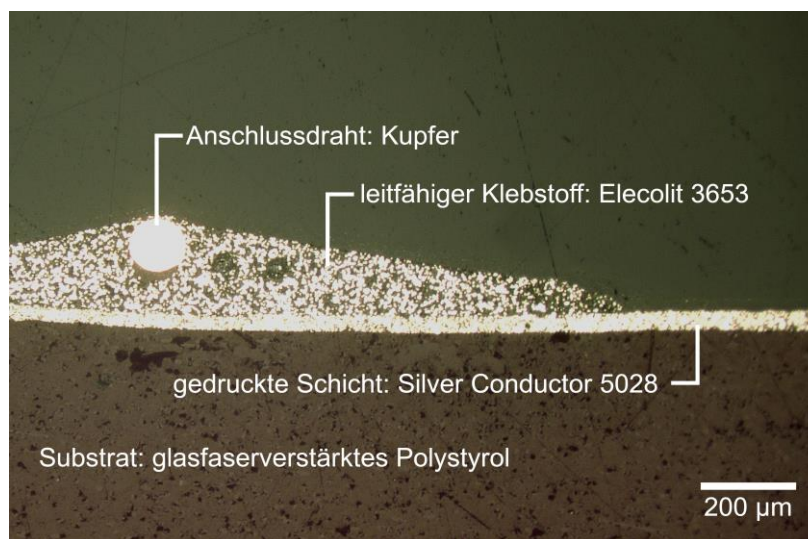


Abbildung 13: Schliff durch Kontaktstelle mit elektrisch leitfähigem Klebstoff

2.2.7 AP 2.17: Elektro- und thermomechanische Charakterisierung der gedruckten Sensorik und Aktorik

Die in AP 2.11 gefertigten Muster wurden anhand von Widerstandsmessungen elektrisch charakterisiert. Zur Ermittlung des Flächenwiderstandes der gedruckten Schichten aus den verschiedenen Siebdruckpasten wurden die Linienstrukturen mit Linienbreiten zwischen 0,5 mm und 5 mm herangezogen. Die Siebdruckpaste B zeigt mit einem Flächenwiderstand von durchschnittlich $0,73 \Omega$ eine geringere elektrische Leitfähigkeit als die Siebdruckpaste A mit durchschnittlich $0,12 \Omega$. Auffällig ist bei beiden Pasten die Tendenz zu einer besseren elektrischen Leitfähigkeit bei dünneren Linien. Jedoch steigt bei geringen Linienbreiten die Gefahr einer Unterbrechung der Leitung infolge von Druckfehlern. Breitere Linien besitzen dagegen eine höhere Fehlertoleranz. Die größere Streuung der Widerstandswerte bei Paste B spiegelt die anspruchsvollere Prozessführung und das damit verbundene geringere Druckqualität wieder (vgl. AP 2.12).

Basierend auf den Erkenntnissen der Analyse der jeweiligen Schichtwiderstände wurde für die Fertigung gedruckter Sensorik die Siebdruckpaste A in den Fokus der Untersuchungen gerückt und die Sensoren anhand ihres Widerstandes elektrisch charakterisiert. Die Dehnungssensoren mit aktiven Länge von 35 mm, einer Breite von 15 mm und einer Linienbreite von 0,25 mm zeigten dabei einen $(146,3 \pm 23,8) \Omega$. Die kleinere Variante mit aktiven Länge von 25 mm, einer Breite von 10 mm und einer Linienbreite von 0,15 mm weist erwartungsgemäß einen höheren Widerstand von $(284,6 \pm 45,5) \Omega$ auf. Anschließend erfolgte die elektromechanische Charakterisierung der Dehnungssensoren unter Zugbelastung indem die Widerstandsänderung der Strukturen in Abhängigkeit der mechanischen Dehnung des Substrates aufgezeichnet wurde. Im Messbereich bis zu einer Dehnung von 0,2 % tritt dabei ein mittlerer k-Faktor von 7,72 auf. Die Dehnungssensoren besitzen damit eine vergleichsweise hohe Empfindlichkeit in Längsrichtung. Die Querempfindlichkeit, die i. A. möglichst klein sein sollte, fällt mit 45 % jedoch sehr hoch aus. Im Bereich plastischer Verformung mit Dehnungen von 1 % steigt der mittlere k-Faktor deutlich auf 30,12 an, während sich die Querempfindlichkeit auf 27,5 % reduziert. Ergänzend zur elektromechanischen Charakterisierung erfolgt auch eine thermoelektrische Charakterisierung der Sensorstrukturen. Dabei zeigte sich im Temperaturbereich zwischen 25 °C und 80 °C eine nahezu lineare Temperaturabhängigkeit des Widerstandes von 0,054 %/K.

Im Gegensatz Sensorstrukturen kam für die Heizstrukturen (vgl. Abbildung 8) aufgrund des etwas höheren Schichtwiderstandes die Siebdruckpaste B zum Einsatz. Die Heizelemente, die eine Fläche von 60 mm x 80 mm und einer Linienbreite von 2,5 mm aufweisen, wurden elektrisch und thermisch analysiert. Sie zeigten Widerstandswerte von $(688 \pm 84) \Omega$. In den Funktionstests konnte wie in Abbildung 14 erkennbar eine relativ gleichmäßige Aufheizung erreicht werden. Bei einer Heizleistung von ca. 6 W tritt dabei mittlere Oberflächentemperatur von rund 56 °C auf.

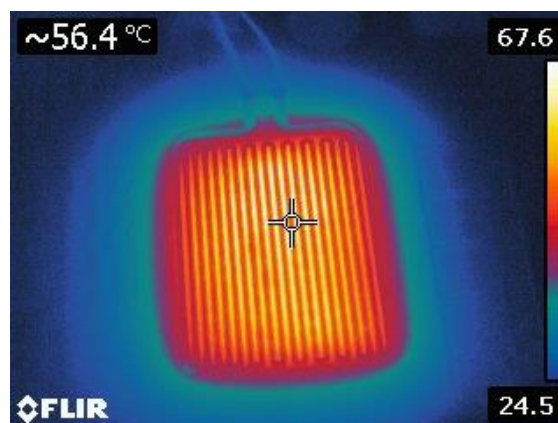


Abbildung 14: Thermographische Aufnahme des gedruckten Heizelementes

2.2.8 AP 2.18: Mechanische Charakterisierung funktionalisierten Halbzeugs

Aufgrund der notwendigen Chemikalienbeständigkeit des Matrixkunststoffs (vgl. AP 2.2 und AP 2.3) war im Rahmen des Projekts eine Neuentwicklung der Substrate für die Organo-Leiterplatten notwendig. Abbildung 15 zeigt exemplarisch verschiedene Substrate auf Basis der Thermoplaste A und B mit 2 mm Dicke, die in umfangreichen Versuchsreihen mechanisch charakterisiert wurden. Die kurzglasfaserverstärkten Varianten wurden spritzgießtechnisch gefertigt. Im Gegensatz dazu erfolgte die Herstellung der endlosglasfaserverstärkten Platten im Film-Stacking-Verfahren.

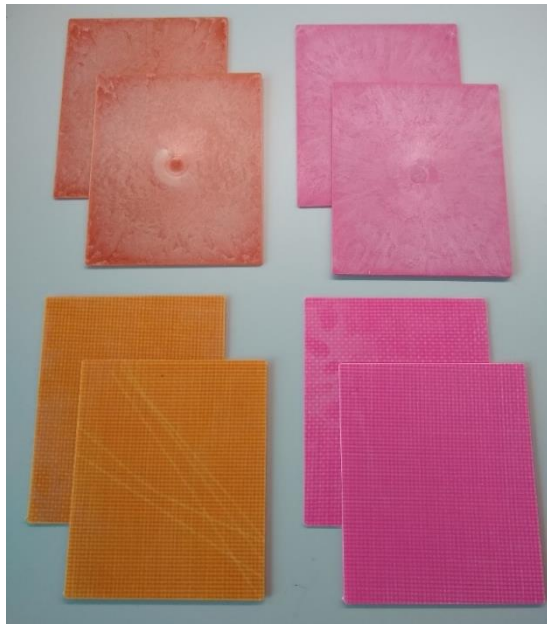


Abbildung 15: Organobleche mit Kurzfaserverstärkung (oben) und Endlosfaserverstärkung (unten) aus Thermoplast B (links) und Thermoplast A (rechts)

Aus den Organo-Leiterplatten wurden mittels Wasserstrahlschneiden Zugproben in Anlehnung an den Probekörpertyp 1BA nach DIN EN ISO 527-2 sowie Biegeproben in Anlehnung an DIN EN ISO 14125 hergestellt. Diese dienen zur Ermittlung der mechanischen Eigenschaften der thermoplastischen Substrate im Zugversuch bzw. 3-Punkt-Biegeversuch in Anlehnung an entsprechenden Normen. Die mechanischen Kennwerte sind in Abbildung 16 und Abbildung 17 dargestellt.

Die Organo-Leiterplatten auf Basis der Thermoplaste A und B mit Kurzglasfaserverstärkung zeigen vergleichbare mechanische Kennwerte. Das Halbzeug aus Thermoplast A besitzt eine etwas höhere Steifigkeit als die Leiterplatte aus Thermoplast B auf. Im Gegensatz dazu sind Festigkeit und Bruchdehnung des Halbzeugs aus Thermoplast B geringfügig höher. Erwartungsgemäß zeigen die endlosfaserverstärkten Organobleche höhere Kennwerte als die kurzfaserverstärkten Varianten. Die Unterschiede zwischen ihnen fallen dabei auch wesentlich deutlicher aus. Alle Kennwerte des Organoblechs aus Thermoplast B liegen

signifikant höher als beim Halbzeug Thermoplast A. Der E-Modul ist um 17 % größer, die Zugfestigkeit um 45 % und die Bruchdehnung um 39 %.

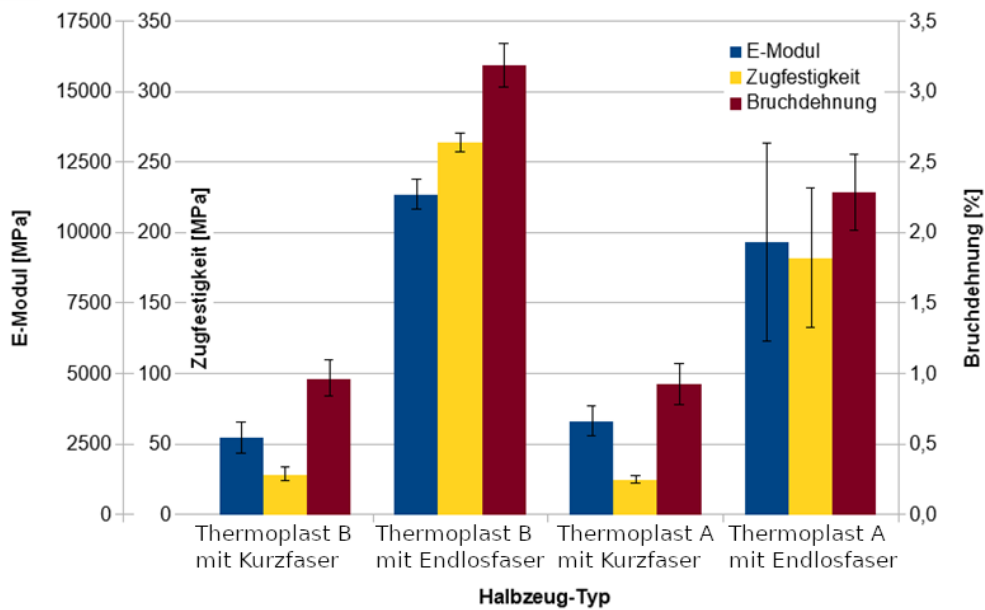


Abbildung 16: Mechanische Eigenschaften der thermoplastischen Leiterplattenmaterialien im Zugversuch

Auch in der 3-Punkt-Biegeprüfung zeigen die Varianten aus Thermoplast B bessere Kennwerte als die Halbzeuge aus Thermoplast A. Bemerkenswert ist dabei die Tatsache, dass im Gegensatz zu den Zugeigenschaften auch bei den kurzfaserverstärkten Varianten sehr deutliche Unterschiede auftreten. Bei Thermoplast B sind beide Kennwerte über doppelt so groß wie bei Thermoplast A. Das endlosfaserverstärkte Organoblech aus Thermoplast B besitzt im Vergleich zur Variante aus Thermoplast A eine 27 % höhere Biegesteifigkeit und über die dreifache Biegefestigkeit.

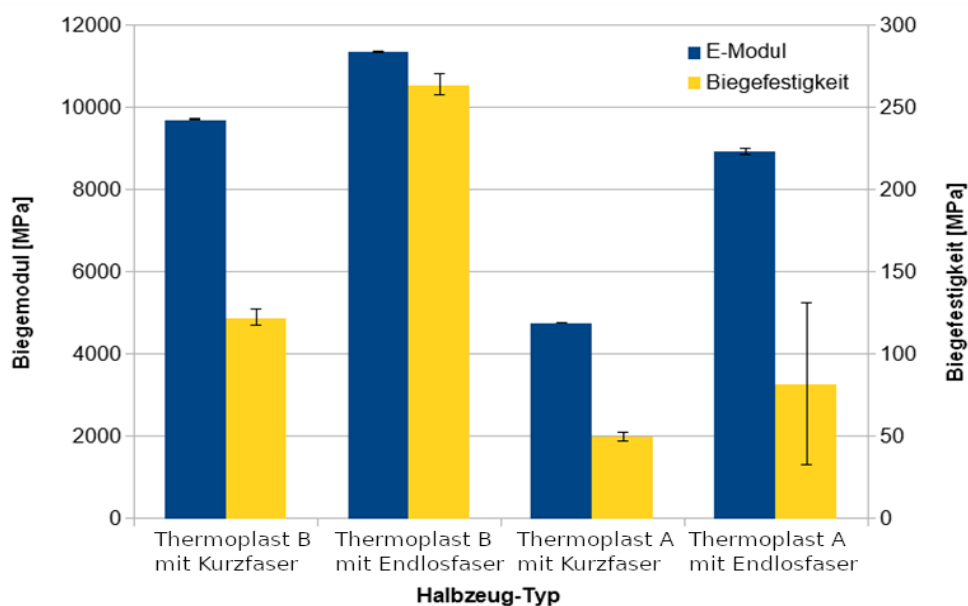


Abbildung 17: Mechanische Eigenschaften der thermoplastischen Leiterplattenmaterialien im 3-Punkt-Biegeversuch

Ausgehend von den mechanischen Kennwerten aus den Zug- und Biegeversuchen sowie den Haftfestigkeiten der Kupferfolien (vgl. AP 2.2) stellen die Organobleche auf Basis von Thermoplast B die Vorzugvariante für die weiteren Entwicklungen im Rahmen des Projektes dar.

2.2.9 AP2.14: Layoutkonzipierung für Drahtvorrat für belastungsarme Drapierung des Halbzeugs und

AP 2.16: Aufbau der Halbzeugfunktionalisierung im globalen Bereich

Trotz der großen Flexibilität der elektrischen Funktionalisierung der Halbzeuge in den Prozessen der Leiterplattenfertigung beim Projektpartner KSG oder durch das Drucken von funktionalen Strukturen ist die Funktionalisierung auf dem Halbzeug lokal begrenzt. Besonders bei Bauteilen, die aus mehreren verschiedenen funktionalen Halbzeugen bestehen, müssen die einzelnen lokalen Funktionalisierungen global miteinander verbunden werden. Diese Verbindung kann durch gezieltes Anreihen der einzelnen Halbzeuge erreicht werden. Die einzelnen Halbzeuge werden dazu so gestaltet, dass sich die für die Verbindung notwendigen Kontaktstellen im globalen Verbund in unmittelbarer Nähe zueinander befinden. Die elektrische Verbindung dieser Kontaktstellen erfolgt dann bspw. über elektrisch leitfähige Klebeverbindungen (vgl. AP 2.12). Im Falle von großflächigen Bauteilen, bei denen die einzelnen lokalen Funktionen weit auseinanderliegen, können diese Entfernungen z. B. durch diskrete Drahtverbindungen überbrückt werden. Im Sinne einer großen Integrationsdichte und des bestmöglichen Ausschöpfens des Leichtbaupotentials ist jedoch die Verbindung über eine zusätzliche Halbzeugfunktionalisierung zu bevorzugen. In diesem Fall werden die bisher nicht funktionalisierten Bauteilbereiche durch ebenfalls funktionale Halbzeuge ersetzt. Deren Funktionalisierung besteht lediglich aus elektrischen Leitungen, die bspw. im Siebdruck aufgebracht wurden und Halbzeuge mit den Hauptfunktionen untereinander verbinden. Ein weiterer technologischer Ansatz ist die Integration der elektrischen Leitungen in Form von Drähten oder Litzen mittels TFP bzw. Stickverfahren in die Halbzeuge. Dieses Vorgehen erlaubt das Einbringen eines Drahtvorrates in die flächige Struktur, der für die Dehnung des Halbzeugs während der Umformung zu Strukturbauteilen genutzt wird. So führen die Verformungen im Bereich der Funktionalisierung nicht zur Beschädigung der Leitungen, die im Vergleich zum Organoblech nur geringe Dehnungen ertragen können. Abbildung 18 zeigt beispielhaft Entwürfe mit verschiedenen Drahtvorräten im Umformbereich.

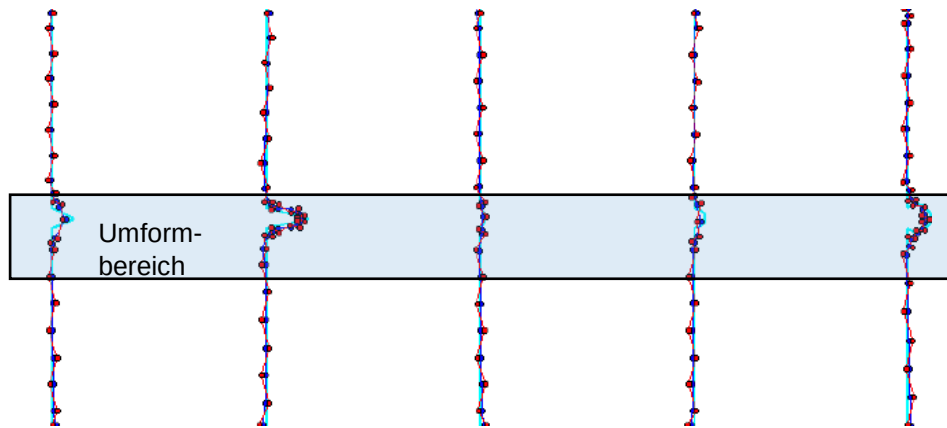


Abbildung 18: Layoutentwürfe und Stichbilder für einen Drahtvorrat im TFP-Verfahren

Nach der Fertigung dieser Strukturen erfolgte die Kombination mit den Organoblechen über einen variothermen Pressprozess. Die elektrische Verbindung zwischen den Funktionalisierungen im Leiterplatten- oder Druckprozess und den integrierten Leitungen erfolgt über Klebeverbindungen mit elektrisch leitfähigen Klebstoffen (vgl. AP 2.12). Anschließend wurden mit diesen Halbzeugen Drapierversuche durchgeführt. Während der Umformung wird der Drahtvorrat gestreckt und kann so den vergleichsweise großen Dehnungen in der Umformzone folgen, ohne dass die Leiterstruktur geschädigt wird. Abbildung 19 zeigt einen Ausschnitt des Halbzeugs vor und nach der Umformung. Die elektrische Zuleitung über die Kupferdrähte bleibt dabei intakt.

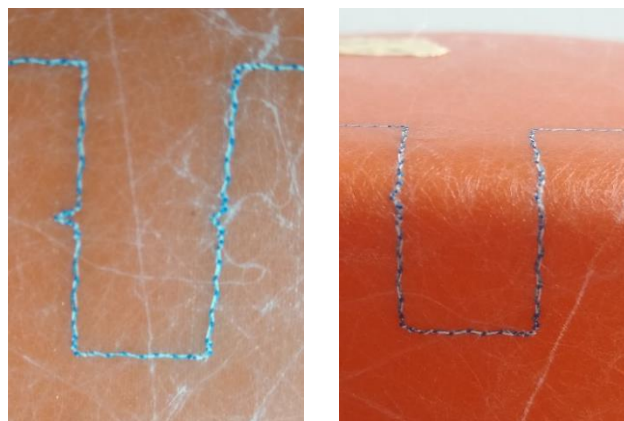


Abbildung 19: Drahtvorrat im TFP-Verfahren vor (links) und nach (rechts) der Umformung

2.3 AP 3: Prozesstechnische Verarbeitung funktionalisierter Organobleche

2.3.1 AP 3.3: Prozessanalyse zum Handling von semidrapierbaren Halbzeugen

Im Rahmen des Projekts wurde das Handling von semidrapierbaren vorgewärmten und nicht vorgewärmten Organoblechen detailliert analysiert. Die fertigen Organo-Leiterplatten werden im weiteren Fertigungsprozess mittels Umformen und Spritzgießen zu einem Strukturbauteil verarbeitet. Dazu ist im Handlingprozess eine partielle Vorwärmung erforderlich. Der detaillierte Ablauf des Handlingprozesses ist in Abbildung 20 skizziert.

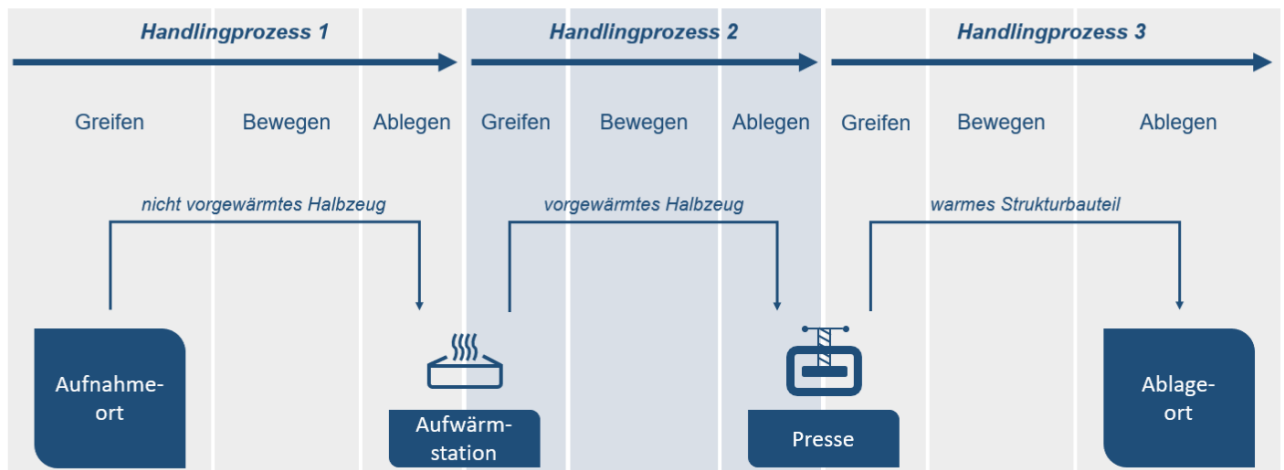


Abbildung 20: Schematischer Ablauf eines Organoblech-Handlingprozesses

Die am Aufnahmeort in einem Magazin bereitstehenden Organo-Leiterplatten müssen gegriffen, zur Aufwärmstation bewegt und dort abgelegt werden. Vorgewärmt wird das Halbzeug anschließend wieder gegriffen, von der Aufwärmstation zur Presse bewegt und in der Presse abgelegt. Das Halbzeug wird anschließend zu einem Strukturbauteil umgeformt. Dieses Strukturbauteil wird schließlich wieder gegriffen, zum Ablageort bewegt und dort erneut in einem Magazin abgelegt. So ergeben sich drei Handlingprozesse mit unterschiedlichen Anforderungen.

Für die Auswahl und Auslegung der jeweiligen Greifersysteme wurden verschiedene Wirkprinzipien und marktverfügbare Greifer analysiert und anhand gewichteter Kriterien (u. a. Handhabungssicherheit und Griffstabilität, Temperaturflexibilität und Eignung für biegeschlaife Objekte, sowie Greiferflexibilität und Formanpassungsvermögen) bewertet. Für das Handling der Organo-Leiterplatten entsprechend der Teilprozesse (vgl. Abbildung 20) haben sich Klemmgreifer bzw. Gelenkfingergreifer und Vakuumgreifer als am geeignetsten herausgestellt.

Klemmgreifer und ihre Spezialform Gelenkfingergreifer eignen sich für alle Teil-Handlingprozesse. Sie sind in der Lage, die kalten starren und vorgewärmten biegeschlaften Organo-Leiterplatten, sowie die umgeformten Strukturbauteile zu handhaben. Die dafür notwendige Temperaturbeständigkeit kann dabei über eine entsprechende Beschichtung der Wirkelemente erreicht werden. Ebenso eignen sich Vakuumgreifer zum Einsatz in den drei Teil-Handlingprozessen für die verschiedenen Zustände der Organo-Leiterplatte bzw. des Strukturbauteils. Durch die Verwendung geeigneter Saugermaterialien ist die geforderte Temperaturbeständigkeit ebenso gegeben. Potentielle Schwierigkeiten können evtl. durch die Permeabilität des Greifobjekts auftreten. Die große Variantenvielfalt an Saugergeometrien und Anordnungsmöglichkeiten prädestiniert Vakuumgreifer dennoch besonders für den Einsatz bei biegeschlaften Werkstücken. Von der Vielzahl der marktverfügbaren Saugerbauformen sind jedoch nicht alle gleichermaßen für die hier

untersuchten Handlingprozesse geeignet. Eine durchgeführte Nutzwertanalyse stellte einen Vakuumgreifer mit Flächensauger als Vorzugsvariante für das Handling der Organo-Leiterplatten heraus. Deren Dichtplatte kann sehr gut an die Oberflächenkontur des Bauteils angepasst werden. Falls die Oberfläche des Greifobjekts kleiner ist als der Greifer, z.B. nach der (teilweisen) Umformung eines Organoblechs, können nicht bedeckte Saugporen automatisch verschlossen werden.

2.3.2 AP 3.4: Entwurf Vorwärmstation für partielle Temperierung

Für die Weiterverarbeitung und Umformung der Organo-Leiterplatten ist eine Erwärmung der thermoplastischen Matrix notwendig. Die erforderlichen Temperaturen hängen dabei vom verwendeten Thermoplast ab und können auf unterschiedliche Weise in die Halbzeuge eingebracht werden. Im Rahmen der Untersuchungen im Projekt StrukTronik ist eine Neukonzipierung einer Vorwärmstation erforderlich, da auf den thermoplastischen Halbzeugen funktionale Elemente und elektrische Verbindungen aufgebracht sind, die nur in gewissen Grenzen erwärmt werden können.

Für eine partielle Erwärmung der Organobleche bieten sich zunächst drei grundsätzlich verschiedene Ansätze an:

- **Modifikation des Halbzeugs durch Wärmeisolierung:** Durch das Aufbringen oder Integrieren von wärmeisolierenden Materialien können bestimmte Eigenschaften in ein Organoblech eingebracht werden. Dadurch können Bereiche gezielt vor oberflächiger Wärme geschützt werden, ohne dass eine separate Vorrichtung notwendig ist.
- **Modifikation des Halbzeuges durch Integration von strukturierten Heizfolien:** Elektrische Heizfolien lassen sich beim Tapelegen zwischen die einzelnen Lagen eines Organoblechs integrieren. Derartige Heizfolien können strukturiert ausgeführt werden, so dass eine Beheizung nur in den geforderten Bereichen erfolgt. Diese Methode erfordert die Integration eines nicht materialkompatiblen Systems, welches als Trennschicht zwischen den Tapelagen fungieren würde und somit den Aufbau eines Strukturbauteils verhindert. Materialkompatible Lösungen (wie zum Beispiel „Smart Textiles“), die die geforderten Temperaturen zum Vorwärmen der Organobleche erreichen, sind auf dem Markt derzeit nicht existent.
- **Abschirmung des Wärmeeinzugsbereichs:** Zwischen der Wärmequelle und dem Halbzeug werden Masken eingesetzt, die definierte Bereiche abdeckt und dadurch einen Wärmeeintrag verhindert (vgl. Abbildung 21). Diese Methode kann immer dann

eingesetzt werden, wenn das Aufwärmen der Organoblechhalbzeuge über Wärmestrahlung (zum Beispiel eine Infrarotlichtquelle) realisiert wird. Von Vorteil ist hier die große Designfreiheit der Maske und die hohe Flexibilität der Methode bei veränderten geometrischen Anforderungen.

Die Varianten „Modifikation des Halbzeugs durch Wärmeisolierung“ und „Integration von strukturierten Heizfolien“ erfordern das Einbringen zusätzlicher, oftmals nicht verbundkompatibler, Materialien in das Organoblech. Zudem schützen die isolierenden Materialien nur im Inneren, unter der Isolierung liegende Bereiche vor dem Wärmeeintrag, nicht aber auf der Oberfläche angebrachten Funktionalisierungen. Großflächige Heizfolien können durch ihre trennende Wirkung den Aufbau eines lasttragenden Strukturbauteils verhindern. Daher stellt die lokale Abschattung des Wärmeeintrags durch Maskierungen die Vorzugslösung für das Projekt StrukTronik dar.

Der Erwärmung erfolgt dabei über einen Infrarotstrahler (IR-Strahler). Zwischen dem Strahler und dem Halbzeug werden Masken eingesetzt, die den funktionalisierten Bereich abschatten. Dadurch wird der Wärmeeintrag an dieser Stelle verhindert. Die Masken können dabei flexibel an das jeweilige Halbzeug angepasst werden. Eine schematische Darstellung der Vorwärmstation für partielle Erwärmung mit Magazin für die Halbzeuge und den notwendigen Handlingsystemen zeigt Abbildung 21.

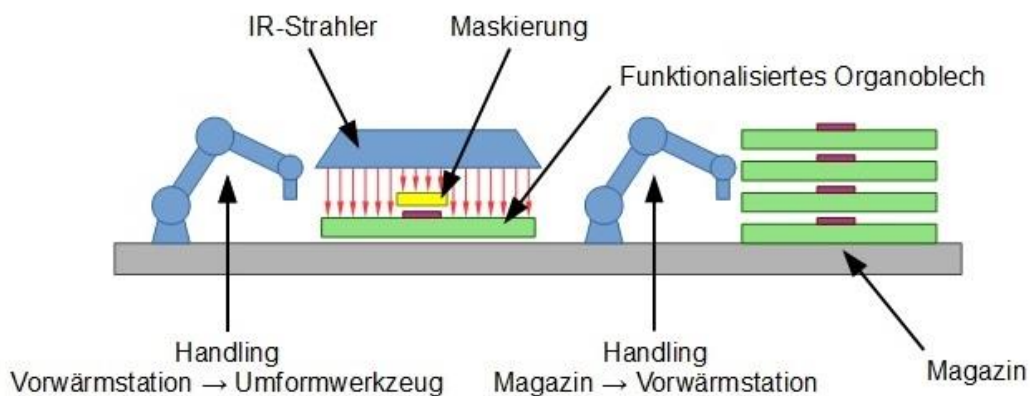


Abbildung 21: Schematische Darstellung der Vorwärmstation

2.3.3 AP 3.11: Entwurf und Konzipierung Spritzgießwerkzeug

Gemeinsam mit den Projektpartnern wurde ein Forschungsfunktionsmuster als „Lichtvorhang“ bzw. „Lichtschranke“ definiert. Dabei wurde der Bauteilquerschnitt auf 40 mm x 48 mm und die Länge der Lichtschranke auf 150 mm festgelegt. Für die Überwachung längerer Bereiche ist eine modulare Aneinanderreihung von mehreren Lichtschranken vorgesehen. Die lasttragende Struktur des Forschungsfunktionsmusters

wird von der Organoleiterplatte gebildet, die auch der Träger für die elektronische Funktionalisierung ist. Dabei befinden sich alle Elektronikbauteile im Inneren eines U-Profiles auf der unteren Fläche entlang der Längsachse der Lichtschranke. Das Organoblech wird komplett mit den bestückten Elektronikkomponenten umgeformt und mit einer versteifenden Struktur angespitzt.

Ausgehend von diesem Entwurf wurde die Geometrie der versteifenden Rippenstruktur abgeleitet. Diese wird materialkompatibel zum funktionalisierten Organoblech-Halbzeug mittels Spritzgießen hergestellt. Abbildung 22 zeigt das Funktionsmuster und die abgeleitete Struktur.

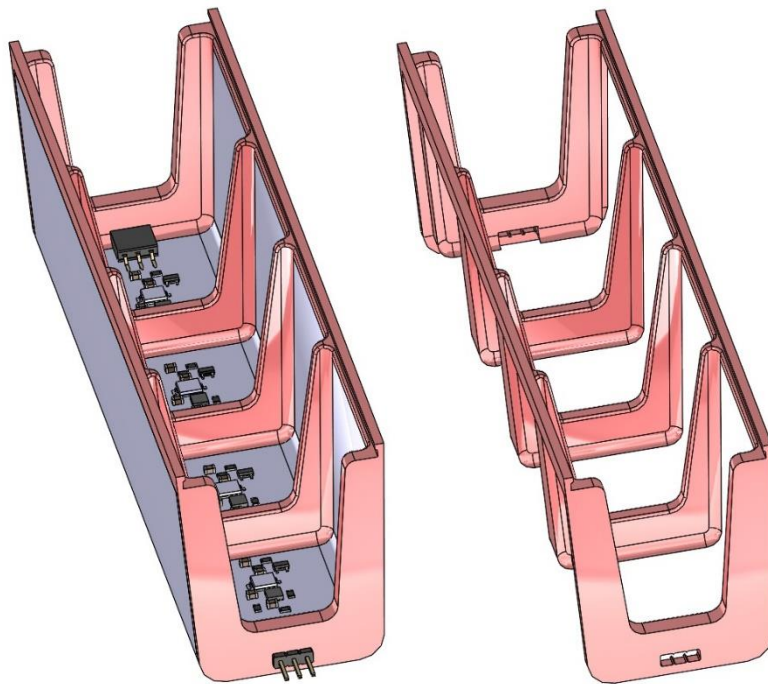


Abbildung 22: Forschungsfunktionsmuster "Lichtschranke" (links) und dazugehörige spritzgegossene Rippenstruktur (rechts)

Basierend auf der Bauteilkonstruktion und der Rippenstruktur wurde ein Niederhalter-Konzept für das Spritzgießwerkzeug entwickelt. Da auf der Grundfläche des Organoblechs nur die wenigen nicht funktionalisierten Bereiche als Kontaktfläche für Niederhalten verwendet werden können, muss diese Fläche optimal ausgenutzt werden. Der Stempel des Niederhalters muss zudem einen Teil der Werkzeugkavität abbilden und die Abdichtung der Organo-Leiterplatte zur Kunststoffschmelze gewährleisten. Im Stempel sind dazu die funktionalen mit elektronischen Komponenten versehenen Bereiche und die

Rippengeometrie ausgespart. Das im entwickelte Niederhaltersystem ermöglicht es, das Halbzeug beim Einlegen präzise zum Stempel zu positionieren und diese Position auch während des Schließvorgangs exakt beizubehalten.

2.3.4 AP 2.15: Drapiersimulation des funktionalisierten Halbzeugs

Aufbauend auf der mechanischen Charakterisierung der Halbzeuge (AP2.18), dem Entwurf eines Forschungsfunktionsmusters (AP3.6) sowie dem Entwurf und der Konzipierung des Spritzgießwerkzeugs erfolgte eine Umform- und Drapiersimulation der Organo-Leiterplatte. Es wurde der Fertigungsprozess detailliert analysiert, um sowohl die Formbarkeit der Materialien als auch die strukturelle Integrität des Bauteils zu bewerten. Dabei lag der Fokus auf der frühzeitigen Erkennung kritischer Bereiche mit potenzieller Faltenbildung, ungleichmäßiger Wanddickenverteilung oder unzureichender Ausformung. Durch gezielte Optimierung der Werkzeuggeometrie, Umformgeschwindigkeit und Temperaturführung konnten die Prozessparameter angepasst werden, um die Bauteilqualität und Prozessstabilität sicherzustellen. In Abbildung 23 sind verschiedene Stufen des Umformvorgangs dargestellt.

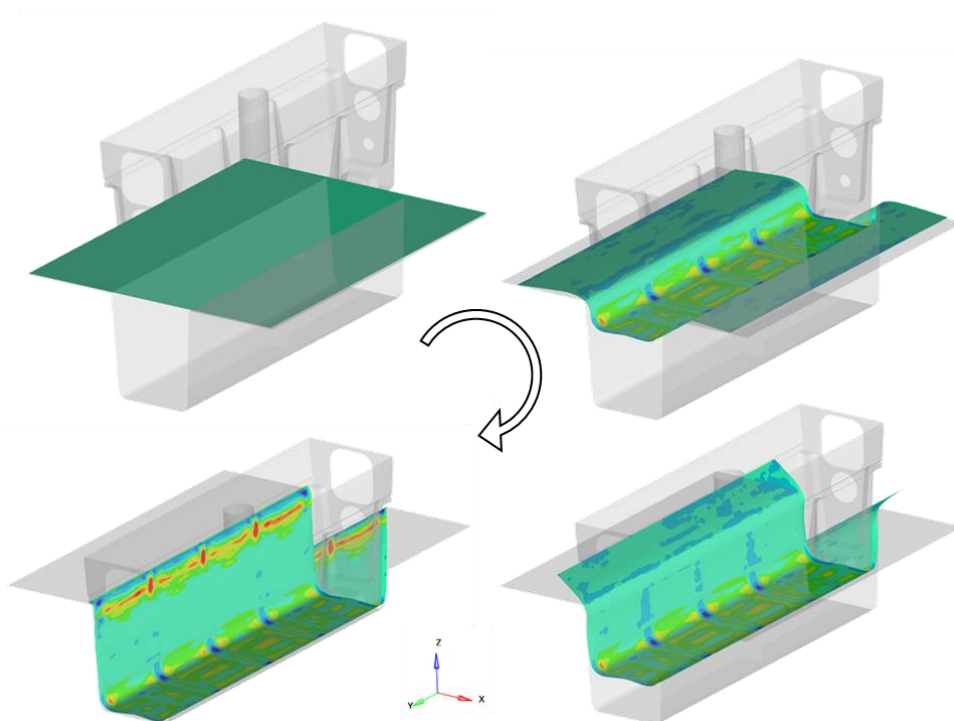


Abbildung 23: Umformsimulation der Organo-Leiterplatte im kombinierten Umform- und Spritzgießwerkzeug

3 Entwicklung von Verfahren zur Herstellung einer mehrlagigen Leiterplatte auf Basis von endlosfaserverstärkten Thermoplasten

3.1 AP 2: Leiterplatte auf Organoblech-Basis

3.1.1 AP 2.1: Entwicklung von Lösungsmöglichkeiten zum Aufbringen von Kupfersubstraten auf Organoblech auf Thermoplastbasis

Der Zusammenhang zwischen dem KSG-intern eingesetzten Adara-Pressprozess (Heizprinzip: direkte Erwärmung der Kupferfolie) sowie den weiteren Fertigungsschritten und der Haftung der Kupferfolie auf kurzglasfaserverstärkten Spritzgussplatten aus den Thermoplasten A und B wurde intensiv untersucht und sind in Abbildung 24 gegenübergestellt. Ziel dieser Versuche war es, während der ersten thermischen Belastung des Materials die Temperatur des Bestückungsprozesses zu nutzen, um die Abschälkräfte der Kupferleiterzüge zu erhöhen. Die in beiden Bestückungsprozessen realisierten Verweilzeiten sind jedoch anscheinend zu kurz, um durch ein oberflächliches Erweichen des Thermoplastes die Haftung zwischen Kupferleiterzug und Substrat so weit zu verstärken, dass eine signifikante Erhöhung der Abschälkraft erreicht wird.

Zwischenzeitlich gelang es dem Projektkoordinator TU Chemnitz, über einen Heißpressprozess glasfasergewebeverstärkte Organobleche herzustellen. Leider konnte auch mit diesem neuen System die Haftung der mittels Adara-Presse aufgedruckten Kupferfolien nicht erhöht werden. Der Durchbruch gelang erst beim direkten Aufpressen der Kupferfolie während der Organoblechfertigung an der TU Chemnitz. Hier wurde erstmals die im Projekt angestrebte Abschälkraft (F) der Kupferfolie von mindestens 0,8 N/mm erreicht (Abbildung 24).

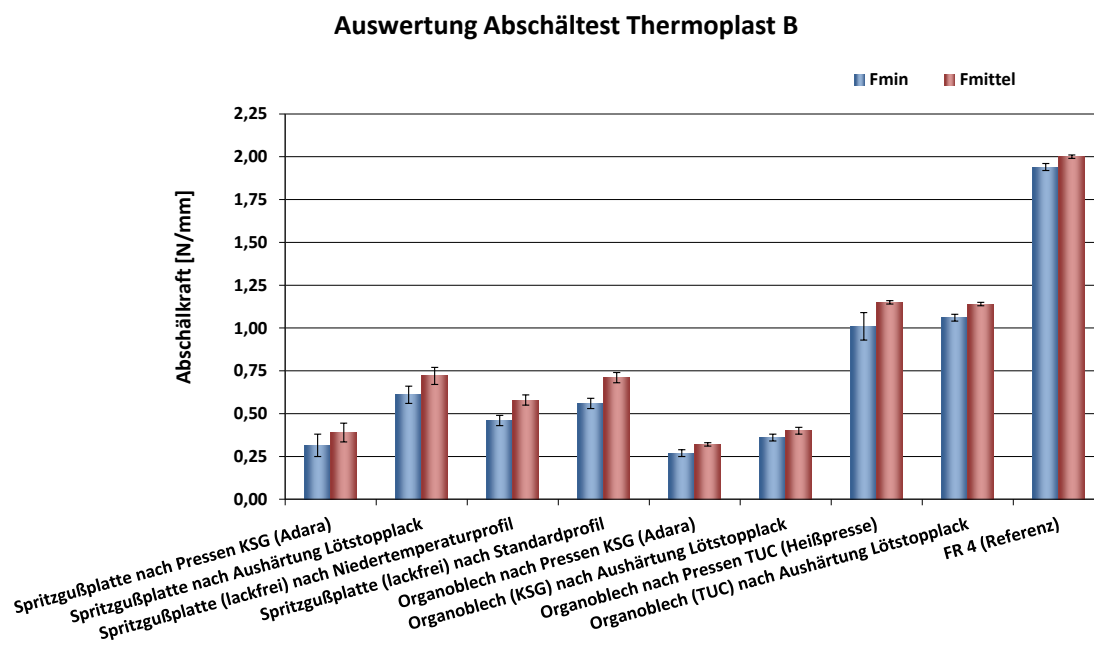


Abbildung 24: Ergebnisse Abschältest Thermoplast B in verschiedenen Abhängigkeiten

Bei den kurzglasfaserverstärkten Spritzgussplatten ist bei der Temperaturbelastung beim Aushärten des aufgetragenen Lötstopplackes (150 °C / 90 min) eine deutlich sichtbare Erhöhung der Abschälkräfte festzustellen (Abbildung 24). Die Temperaturbelastung scheint bei beiden Materialien Relaxation- und/oder Verformungsprozesse zu bewirken, die die Haftung der Kupferfolie auf beiden Materialien erhöhen. Warum dieses Phänomen bei den glasfasergewebeverstärkten Organoblechen viel geringer ausgeprägt ist, konnte nicht abschließend geklärt werden. Die unterschiedliche Änderung der Oberflächentopographie von Spritzgussplatte und Organoblech während der thermischen Aushärtung des Lötstopplackes, die dieses Verhalten eventuell beeinflusst, zeigt Abbildung 25.



Abbildung 25: Oberflächenaufnahmen von Thermoplast B mit und ohne Kupferfolie nach Aushärtung des Lötstopplackes

3.1.2 AP 2.3: Analyse der Verarbeitbarkeit von Thermoplastsubstraten und Hybridhalbzeugen in Leiterplattenprozessen über Musterherstellung

Die Schwerpunkte der Musterfertigung lagen im letzten Projektjahr auf der ausreichenden Versorgung der Projektpartner mit Organo-Leiterplatten sowie dem Vergleich der Dimensionsstabilität zwischen kurzglasfaserverstärkter Spritzgussplatte und glasfasergewebeverstärktem Organoblech. Zur Untersuchung der Dimensionsstabilität wurde die in Abbildung 26 dargestellte Leiterplatte herangezogen und ihre Maßänderungen nach verschiedenen Fertigungsschritten erfasst.

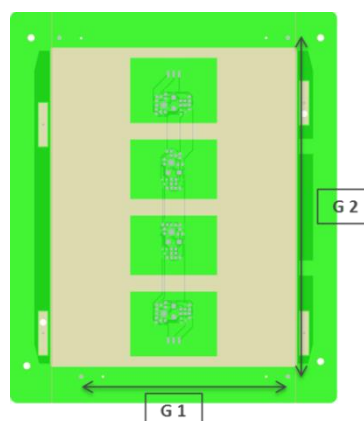


Abbildung 26: Leiterplatte zur Erfassung der Dimensionsstabilität

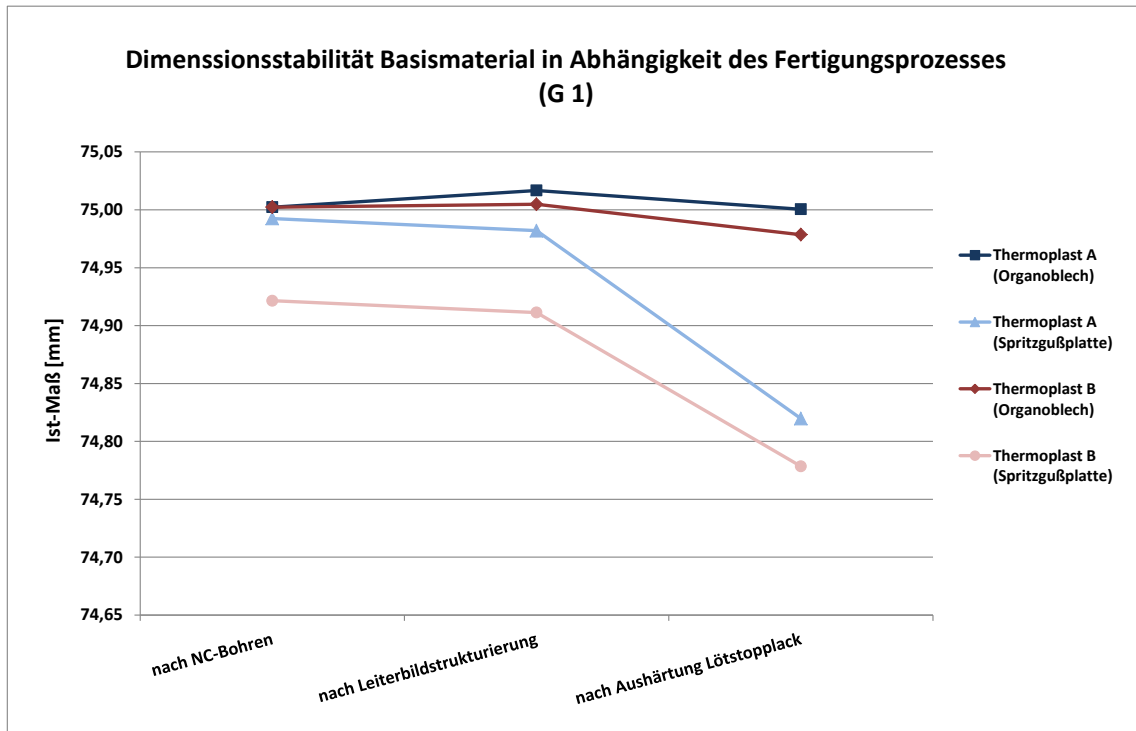


Abbildung 27: Dimensionsstabilität diverser Organo-Leiterplatten in Abhängigkeit vom Fertigungsprozess (Seite G 1)

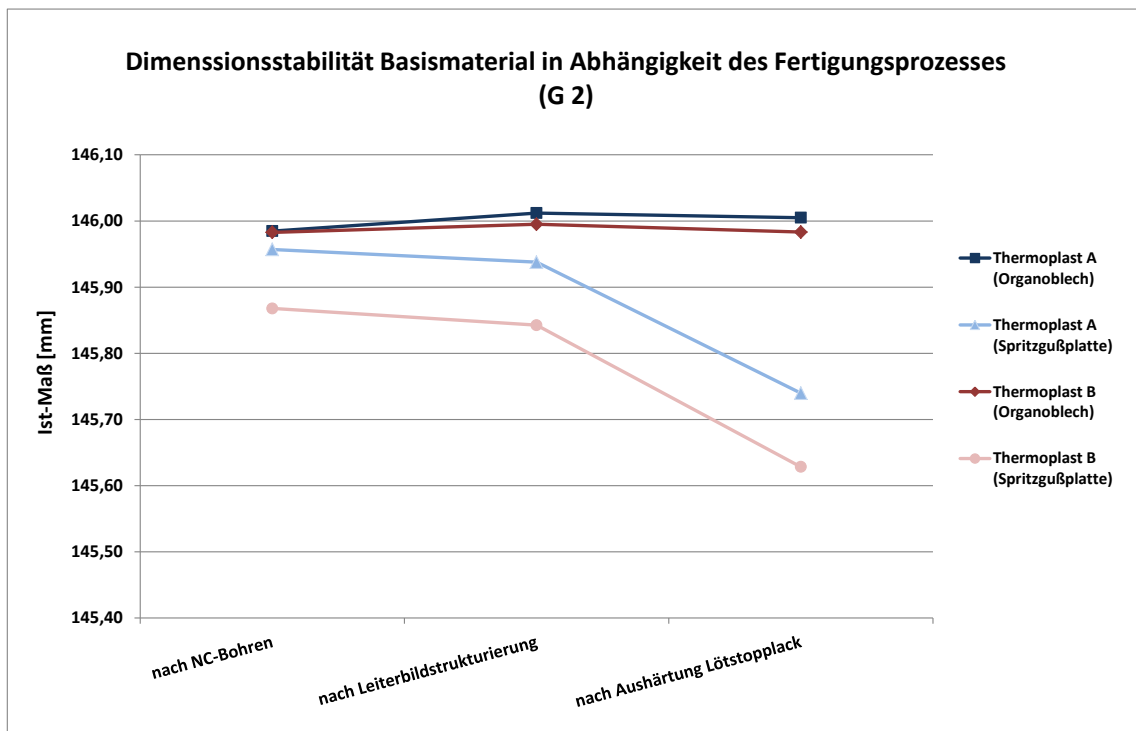


Abbildung 28: Dimensionsstabilität diverser Organo-Leiterplatten in Abhängigkeit vom Fertigungsprozess (Seite G 2)

Prinzipiell lässt sich feststellen, dass die Stabilität kurzglasfaserverstärkter Spritzgussplatten nur in den Fertigungsprozessen ohne größere Temperaturbelastung gegeben ist (Abbildung 27 und Abbildung 28). Diese Eigenschaft wird anscheinend weniger

durch den thermoplastischen Charakter der Substrate, als durch die Art des Verstärkungsmaterials beeinflusst. Die starke Dimensionsänderung von Organo-Leiterplatten in Prozessen mit höherer Temperaturbelastung (z.B. Aushärtung Lötstopplack) kann nur durch eine Glasfasergewebeverstärkung der Substrate vermieden werden.

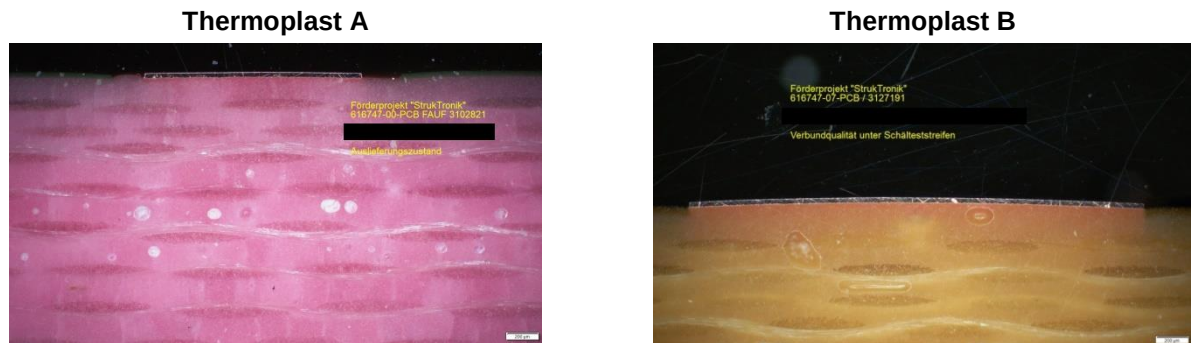


Abbildung 29: Verbundqualität glasfasergewebeverstärkter Organo-Leiterplatten

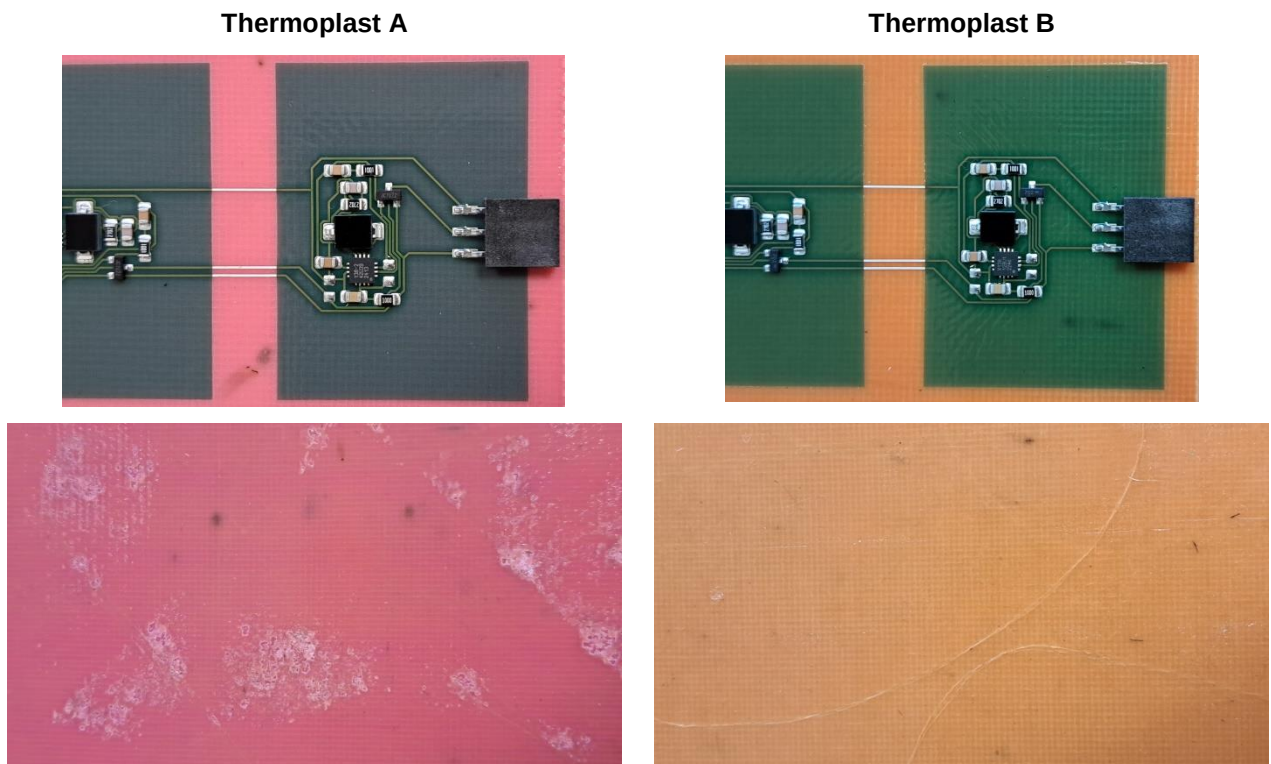


Abbildung 30: Organo-Leiterplatten nach Bestückungsprozess

Abbildung 29 und Abbildung 30 geben einen Überblick über Verbundqualität und Oberflächenbeschaffenheit der ersten glasfasergewebeverstärkten Organo-Leiterplatten. Der eingesetzte flexible Lötstopplack kann ohne mechanische Beschädigungen die Änderungen der Topographie der Substratoberflächen ausgleichen. Die Verbundqualität sowie die Durchdringung der Glasfaserbündel durch den Thermoplast sind als gut einzuschätzen. Optimierungsbedarf besteht noch bei den beobachteten Hohlräumen bzw. Blasen im Verbund (Abbildung 29: Verbundqualität glasfasergewebeverstärkter Organo-Leiterplatten

), die zu den in Abbildung 30 ersichtlichen Oberflächendefekten führen können.

Beide Materialien wiesen in ihrer orangen bzw. pinkfarbenen Einfärbung in den fotolithographischen Fertigungsschritten eine ausreichende optische Registrierbarkeit auf. Mit diesen Ergebnissen konnte eine Prozesskette zur Herstellung einer einseitigen, strukturierten Organo-Leiterplatte erfolgreich festgelegt werden. Die Haftung der mit der Adara-Presse aufgetragenen Kupferfolie ist nicht optimal, aber ausreichend, strukturierte Organo-Leiterplatten mit einem line/space-Verhältnis von 250/120 μm herzustellen. Mit den glasfasergewebeverstärkten Organoblechen steht zum Projektabschluss ein Substratmaterial zur Verfügung, aus dem dimensionsstabile Leiterplatten herstellbar sind, die auch einen erfolgreichen Bestückungsprozess erwarten lassen.

3.1.3 AP 2.4: Analyse von Materialien, Technologien zum Aufbau von Multilayerstrukturen aus Organoblech“

Trotz anfänglicher Verzögerungen konnte das Arbeitspaket bis zum Projektende erfolgreich bearbeitet und abgeschlossen werden. An der TU Chemnitz wurde die Multilayerkomponente „kupferkaschierte Innenlage“ hergestellt, die anschließend in der KSG strukturiert und mit einem kupferorganischen Haftvermittler beschichtet wurde. Diese Innenlage wurde in einem zweiten Schritt an der TU Chemnitz mit Folien aus Thermoplast B sowie Glasfasergewebe und Kupferfolien zu einem Multilayer verpresst und der KSG erneut zur Weiterverarbeitung zur Verfügung gestellt.

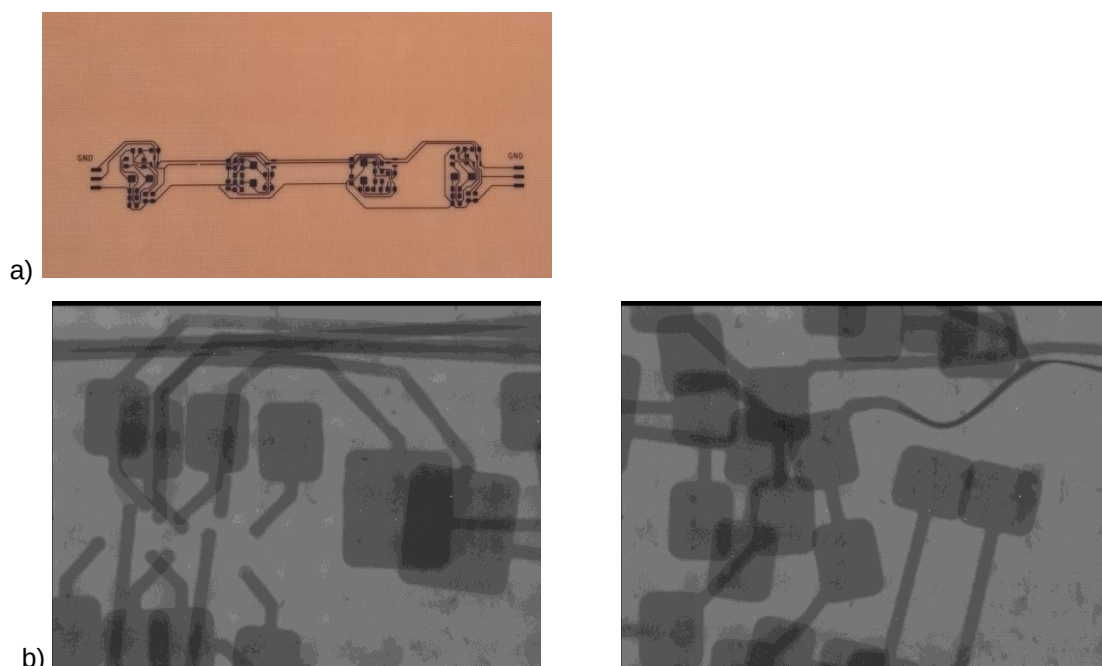


Abbildung 31: Erscheinungsbild Leiterplatten-Layout der Innenlage:
a) nach der Herstellung b) nach Verpressen zum Multilayer

Die Fertigung der Innenlage verlief ohne Schwierigkeiten (Abbildung 31 a). Probleme zeigten sich nach der Verpressung der Innenlage zum Multilayer. Druck und / oder

Temperatur der zweiten Verpressung führen zu einer Erweichung des Thermoplastes und damit zu einer Verschiebung des Leiterbildes zwischen Ober- und Unterseite der Innenlage (Abbildung 31 b). Ein derartiger Leiterbildversatz ist in der Fertigung einer Multilayer-Leiterplatten nicht tolerierbar. Für die qualitätsgerechte Herstellung einer mehrlagigen Organo-Leiterplatte müssen in einem nächsten Schritt die Pressparameter optimiert werden.

Die nach der Lötstopplack-Aushärtung beobachtete Schrumpfung einer nicht durchkontaktierten Bohrung im Multilayer um 18 % ist ein weiterer Hinweis darauf, dass sich das Material thermisch noch zu stark bewegt. Anscheinend existiert in den Prozessen Pressen und Aushärtung Lötstopplack nur ein eng begrenzter Bereich von Temperatur, Druck und Verweilzeit, um aus dem Material einen qualitätsgerechten Multilayer-Verbund bzw. eine gebohrte Organo-Leiterplatte herzustellen.

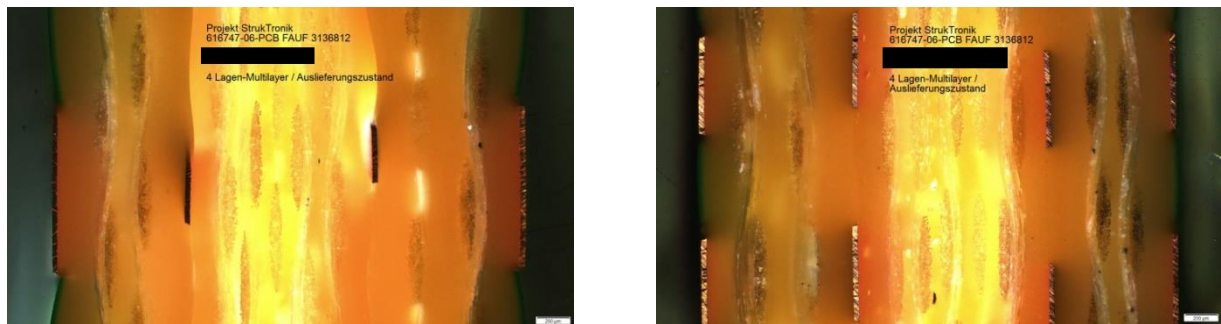


Abbildung 32: Querschliffaufnahmen einer mehrlagigen Organo-Leiterplatte aus Thermoplast B

Abbildung 32 zeigt die erste Multilayer-Organo-Leiterplatte im Querschliff. Die Thermoplast-Folien zeigen ein gutes Fließverhalten, eine gute Durchdringung des Glasfasergewebes sowie eine gute Haftung zum Kupfer der Innenlage.

Optimierungsbedarf gibt es noch bei der Haftung zwischen den aufgedruckten Folien und der Oberfläche des abgeätzten Innenlagenmaterials (Abbildung 33). Nach der thermischen Aushärtung des Lötstopplackes wird gelegentlich eine Delamination des Multilayers beobachtet. Die Querschliffaufnahmen verdeutlichen, dass der Verbund an der abgeätzten Fläche der Innenlage delaminiert. Hier sind weiterführende Untersuchungen zur Ursachensuche und Optimierung der Verbundhaftung erforderlich.

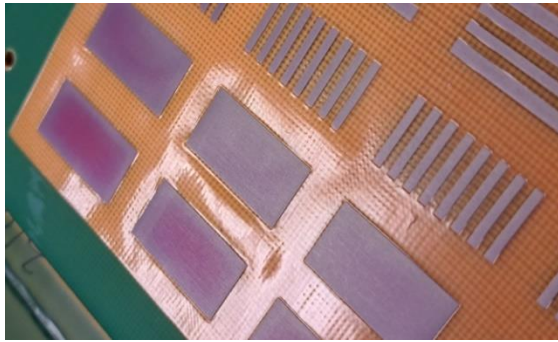


Abbildung 33: Oberflächen- und Querschliffaufnahmen einer Multilayer-Organo-Leiterplatte aus Thermoplast B

Zur weiteren Charakterisierung der Multilayer-Verbundhaftung wurden beim Projektpartner Komitec zwei mehrlagige Organo-Leiterplatten durch die zur Bestückung der Organo-Leiterplatten genutzten Profile „Standard“ und „Niedertemperatur“ prozessiert.

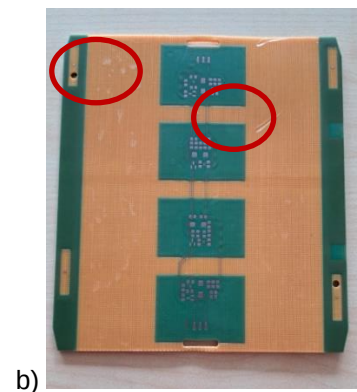
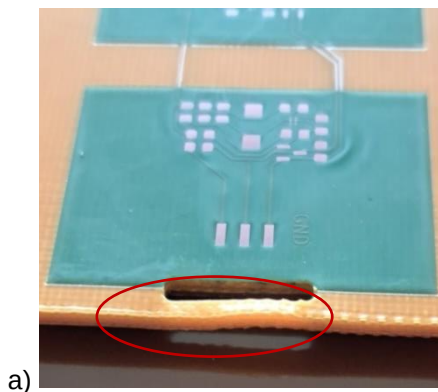


Abbildung 34: Erscheinungsbild einer mehrlagigen Organo-Leiterplatte aus Thermoplast B nach Durchfahrt durch ein Standard-Bestückungsprofil

Bei beiden Temperaturbelastungen ist eine ausreichende Verbundhaftung gegeben. Aufschlussreich sind die beiden in Abbildung 34 dargestellten Herausforderungen, die in späteren Arbeiten unbedingt gelöst werden müssen. Zum einen sieht man die unzulässige Verformung eines schmalen Leiterplattensteges (Abbildung 34 a), der man höchstwahrscheinlich nur durch spezielle Design Rules für Organo-Leiterplatten entgegenwirken kann. Zum anderen sieht man auf den lackfreien Bereichen der Organo-Leiterplatte plötzlich auftretende Oberflächendefekte (Abbildung 34 b), die durch das

„Auffüllen“ innerer Hohlräume mit dem fließfähig werdenden Thermoplast entstanden sein könnten (siehe Abbildung 29 und Abbildung 30).

Grundlegend konnte gezeigt werden, dass aus dem Thermoplast B mehrlagige Organoleiterplatten herstellbar sind. Der Schwerpunkt weiterführender Arbeiten sollte auf der Optimierung des Pressprozesses sowie der Verbesserung der Haftung des Multilayer-Verbundes liegen.

3.1.4 AP 2.5: Entwicklung von Durchkontaktierungsmöglichkeiten (Metallisierung von Bohrungen in Organoblechen) und AP 2.6: Alternatives Durchkontaktierungsverfahren (Chemischer Kupferaufbau für Durchkontaktierungen)

Im September 2024 wurden beide Arbeitspakete abgeschlossen. Im intern getesteten Direktmetallisierungsverfahren DMSE wurden durch den Einsatz einer zusätzlichen Plasma-Desmear-Vorbehandlung die besten Ergebnisse erreicht. Die Durchkontaktierung beider Materialien ist optisch mit der Durchkontaktierung eines FR4-Materials vergleichbar. In den Bohrhülsen bilden sich geschlossenen Kupferschichten mit akzeptablen Kupferstärken aus (Abbildung 35).

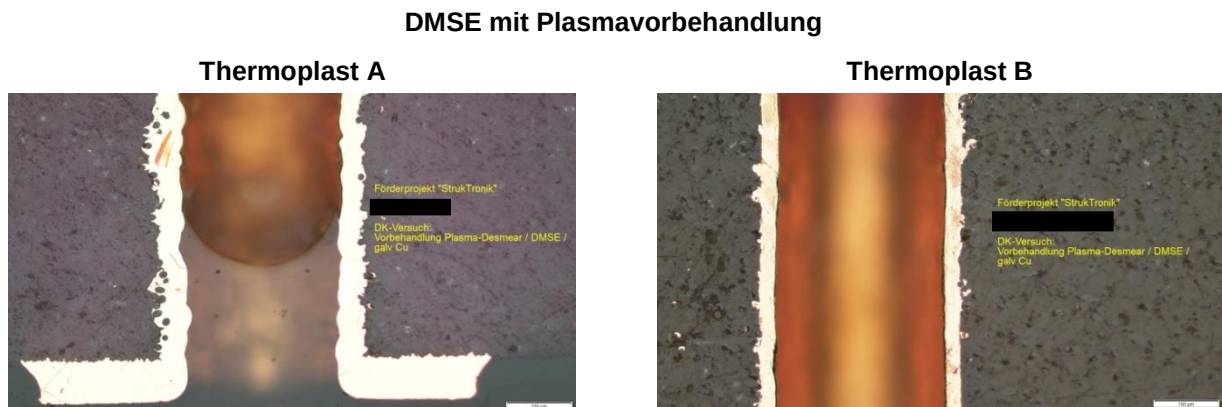


Abbildung 35: Querschliffaufnahmen des KSG-internen Durchkontaktierungsverfahrens DMSE

Auf Grund der relativ spät zur Verfügung stehenden glasfasergewebeverstärkten Organobleche wurden die Bohr- und Durchkontaktierungsversuche nur an den kurzglasfaserverstärkten Spritzgussplatten durchgeführt. Bei beiden Materialien besteht noch Optimierungsbedarf beim Einbringen der Bohrungen. Bei der mechanischen Bearbeitung der Thermoplaste werden an den eingesetzten Bohrwerkzeugen unerwünschte Materialreste festgestellt (Abbildung 36). Diese Erkenntnis deckt sich mit früheren Erfahrungen beim Bohren thermoplastischer Materialien. Die Materialreste verursachen eine mangelnde Qualität der Bohrhülse und können zum vorzeitigen Verschleiß der

Werkzeuge führen. Eine Glasfasergewebeverstärkung der Materialien reduziert zwar die Schwierigkeiten bei ihrer mechanischen Bearbeitung, kann sie aber wahrscheinlich nicht vollständig verhindern.

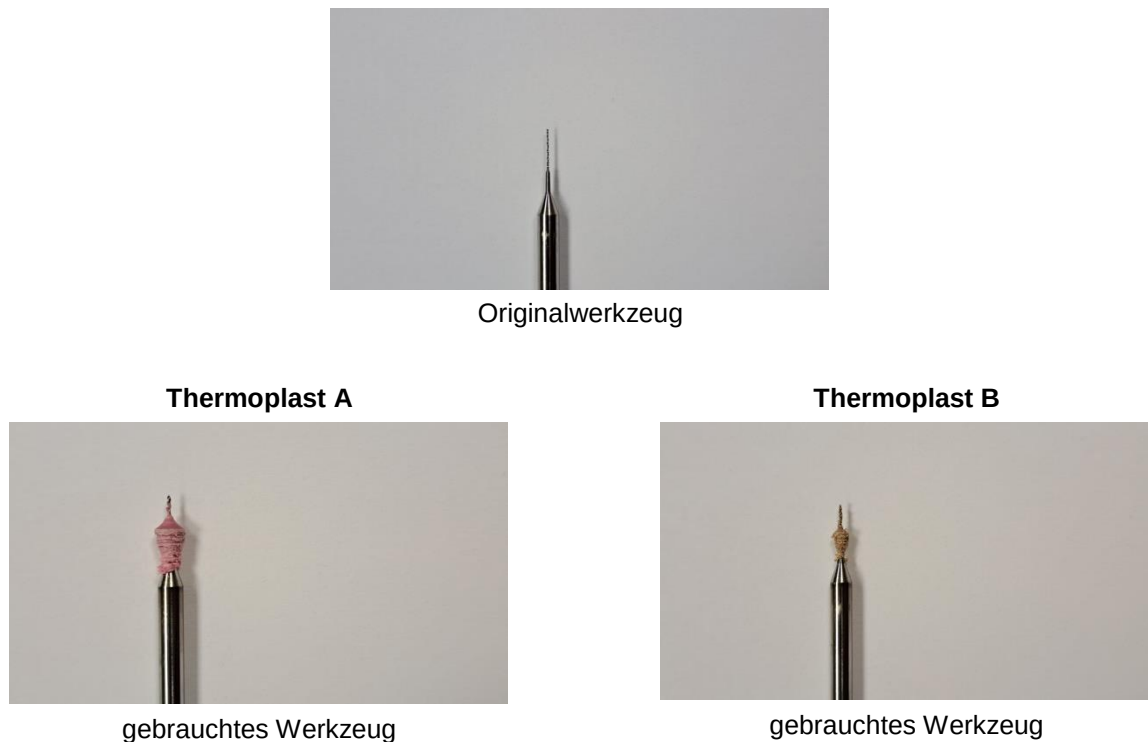


Abbildung 36: Erscheinungsbild Bohrwerkzeuge nach der Bearbeitung von Thermoplast A bzw. B

Umfangreiche Versuchsreihen zur Optimierung von Bohr- bzw. Fräsparametern sowie zur Ermittlung von Werkzeugstandzeiten waren bis zum Projektabschluss nicht realisierbar. Aus diesem Grund wurde sowohl auf die Hülsenauszugstest (DIN IEC 326-2 Prüfung 10a) als auch die Ermittlung der Langzeitzuverlässigkeit der durchkontaktierten Bohrungen verzichtet.

Zusätzlich zu den internen Durchkontaktierungsversuchen wurden extern noch folgenden die alternativen Verfahren getestet und ausgewertet:

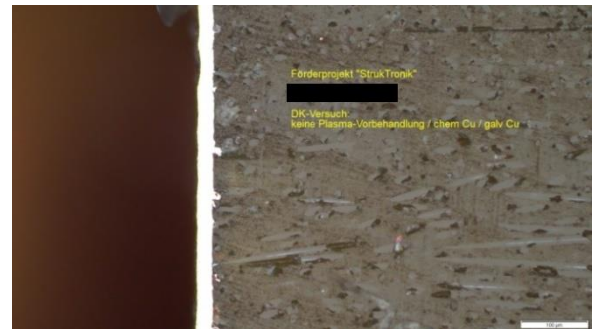
- chemisch Kupfer und eine direkt anschließend erforderliche galvanische Kupfer-Nachverstärkung
 - ohne Vorbehandlung
 - mit Plasmavorbehandlung für Teflon-Materialien
 - mit Plasmavorbehandlung für Polyimid-Materialien sowie
- Direktmetallisierung auf Palladium-Basis (Neopact) und eine direkt anschließend erforderliche galvanische Kupfer-Nachverstärkung
 - ohne Vorbehandlung
 - mit Nass-Desmear-Vorbehandlung

Chemisch Cu ohne Vorbehandlung

Thermoplast A

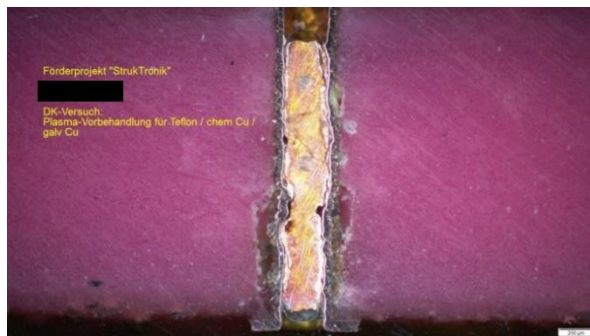


Thermoplast B



Chemisch Cu mit Plasmavorbehandlung für Teflon-Materialien

Thermoplast A

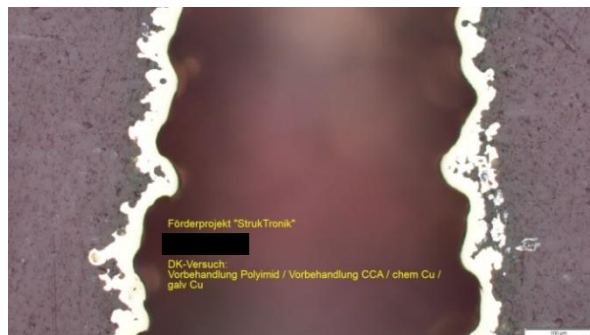


Thermoplast B



Chemisch Cu mit Plasmavorbehandlung für Polyimid-Materialien

Thermoplast A



Thermoplast B

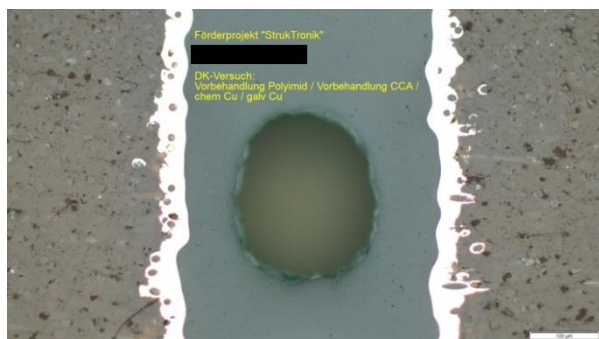


Abbildung 37: Querschliffaufnahmen des Durchkontaktierungsverfahrens chemisch Cu

Die im Durchkontaktierungsverfahren chemisch Cu eingesetzten Plasma-Vorbehandlungen greifen insbesondere den Thermoplast A sehr stark an und sollten in einer Serienfertigung von durchkontaktierten Organo-Leiterplatten vermieden werden. Die Materialschädigungen werden sowohl im Querschliff, als auch auf der Substratoberfläche beobachtet (Abbildung 37 und Abbildung 39).

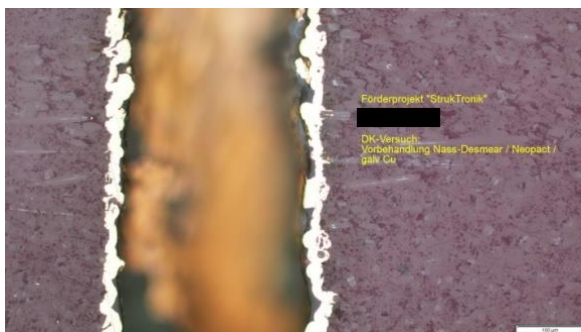
Neopact ohne Vorbehandlung

Thermoplast B



Neopact mit Nass-Desmear-Vorbehandlung

Thermoplast A



Thermoplast B



Abbildung 38: Querschliffaufnahmen des Durchkontaktierungsverfahrens Neopact

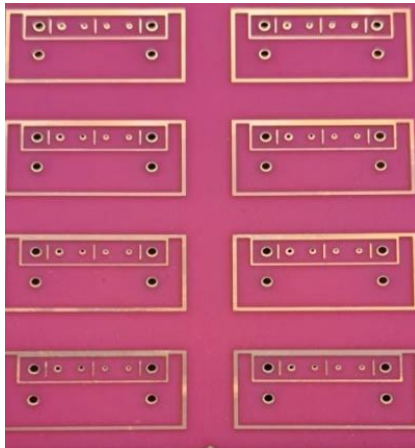
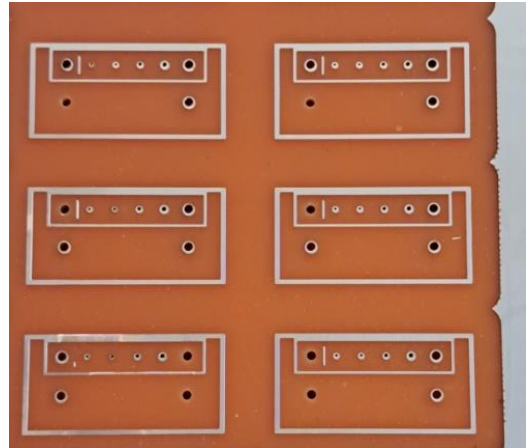
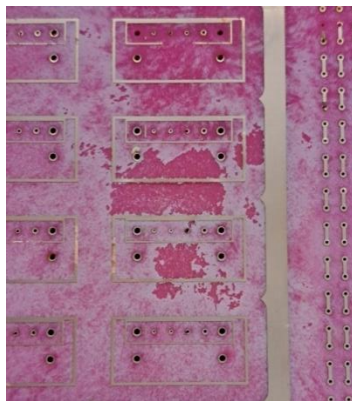
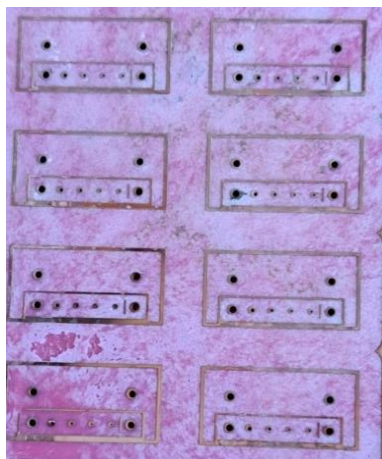
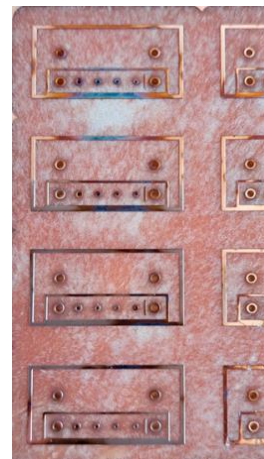
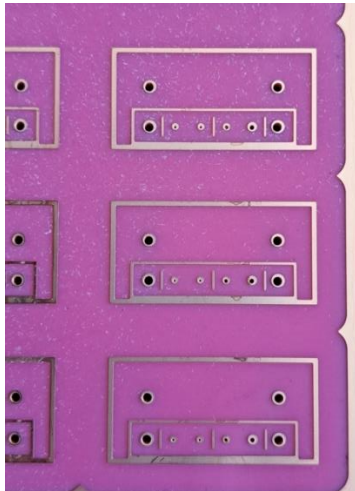
Chemisch Cu ohne Vorbehandlung**Thermoplast A****Thermoplast B****Chemisch Cu mit Plasmavorbehandlung für Teflon-Materialien****Thermoplast A****Thermoplast B****Chemisch Cu mit Plasmavorbehandlung für Polyimid-Materialien****Thermoplast A****Thermoplast B**

Abbildung 39: Oberflächenaufnahmen der Substrate nach Durchkontaktierungsverfahren chemisch Cu

Neopact mit Nass-Desmear-Vorbehandlung

Thermoplast A



Thermoplast B

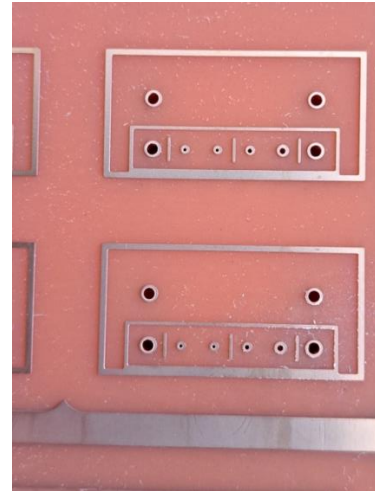


Abbildung 40: Oberflächenaufnahmen der Substrate nach Durchkontaktierungsverfahren Neopact

In den Verfahren DMSE und Neopact einschließlich der dort eingesetzten Vorbehandlungen sind beide Materialien chemisch ausreichend beständig und gut verkupferbar (Abbildung 35, Abbildung 38 und Abbildung 40).

Alle Durchkontaktierungsverfahren scheiden in den Bohrhülsen eine ausreichende Kupferstärke ab (Abbildung 41).

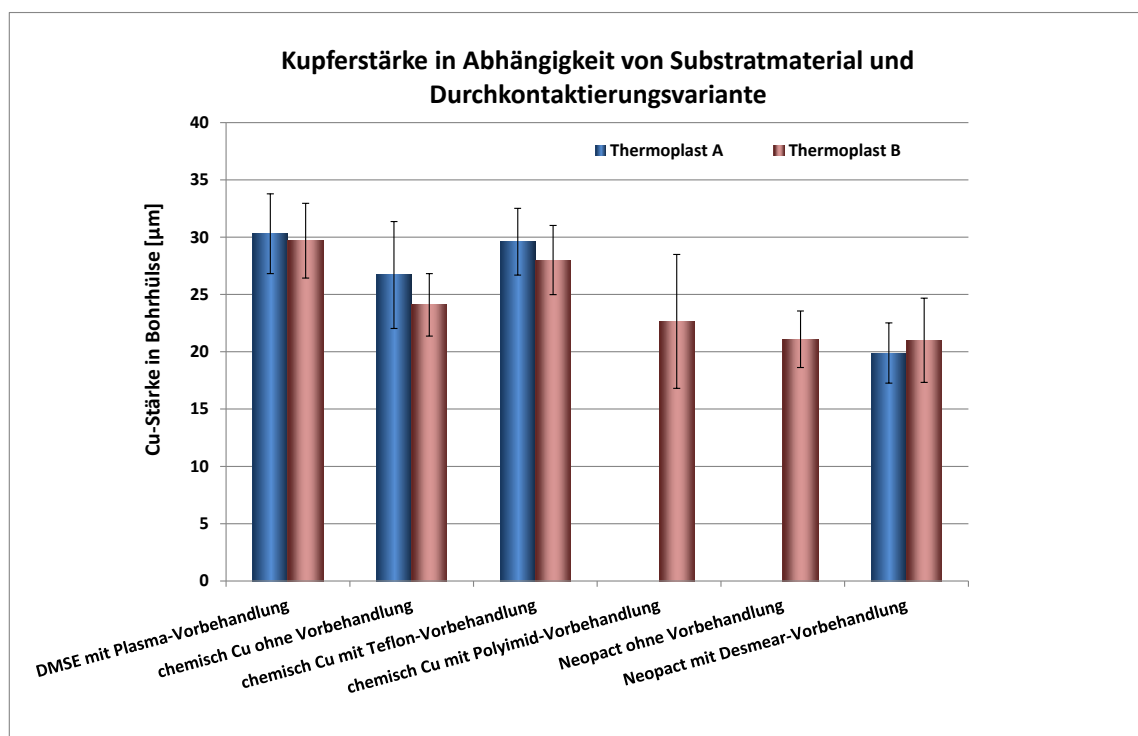


Abbildung 41: Kupferstärke aller getesteten Durchkontaktierungsvarianten

Prinzipiell sind alle drei Verfahren in der Lage, die untersuchten Materialien zu verkupfern. Neopact und chemisch Cu scheinen als additive Verfahren eine etwas ungleichmäßigere Kupferhülse abzuscheiden (Abbildung 37 und Abbildung 38). Nach Auswertung aller Ergebnisse ist der Thermoplast B zur Herstellung einer durchkontaktierten Organo-Leiterplatte besser geeignet als Thermoplast A. Es stehen sowohl das KSG-interne, als auch zwei alternative Durchkontaktierungsverfahren zur Verfügung

Die Daisy-Chain-Testleiterplatten der Substrate, die während des Durchkontaktierungsversuches nicht sichtbar geschädigt wurden, waren elektrisch voll funktionsfähig.

Auf Grund der im Projektverlauf relativ spät entwickelten und nur in begrenzter Menge zur Verfügung stehenden glasfasergewebeverstärkten Organobleche wurde vorerst auf eine umfangreiche Versuchswiederholung mit diesem Material sowie einen standardisierten Hülseauszugstest verzichtet.

3.1.5 AP 2.7: Untersuchung technologischer Möglichkeiten zum Aufbringen von Lötstopplack auf Organoblech“

Bei der Herstellung der kurzglasfaserverstärkten Organo-Leiterplatten wurde festgestellt, dass der aufgebrachte flexible Lötstopplack nicht die gewohnte Qualität aufweist. Im Gegensatz zu Standardprodukten ist im ausgehärteten Lötstopplack eine unzulässige Blasenbildung zu beobachten. Der Einsatz von zusätzlichem Lösungsmittel führt bei den neuen Substratmaterialien zwar zur Reduzierung der Blasenbildung, jedoch nicht zu ihrer vollständigen Eliminierung. Außerdem setzen während der Aushärtung des Lötstopplackes (150 °C / 90 min) in den kurzglasfaserverstärkten Spritzgussplatten weitere unerwünschte Vorgänge ein, die sogar bis zu einer in der KSG noch nie beobachteten Rissbildung eines flexiblen Lötstopplackes führen. Durch die Umstellung des Substratmaterials auf glasfasergewebeverstärkte Organobleche konnte dieses Problem vollständig eliminiert werden.

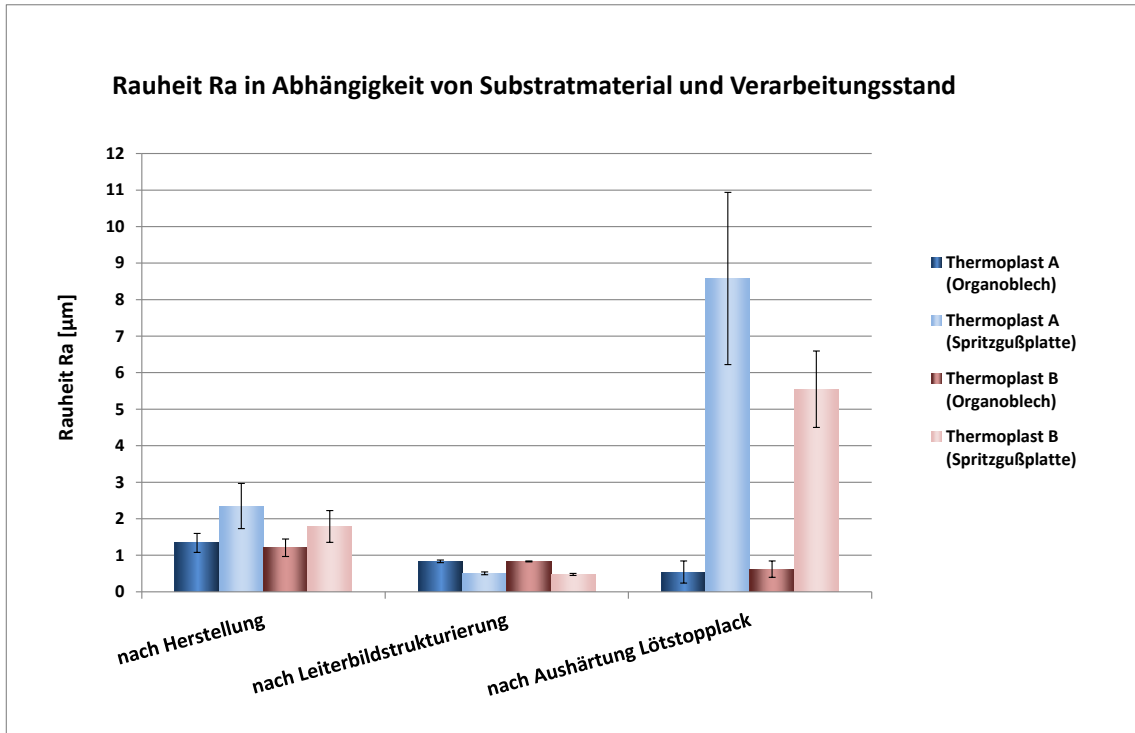


Abbildung 42: Rauheit Ra von Thermoplast A und B in Abhängigkeit vom Verarbeitungsstand

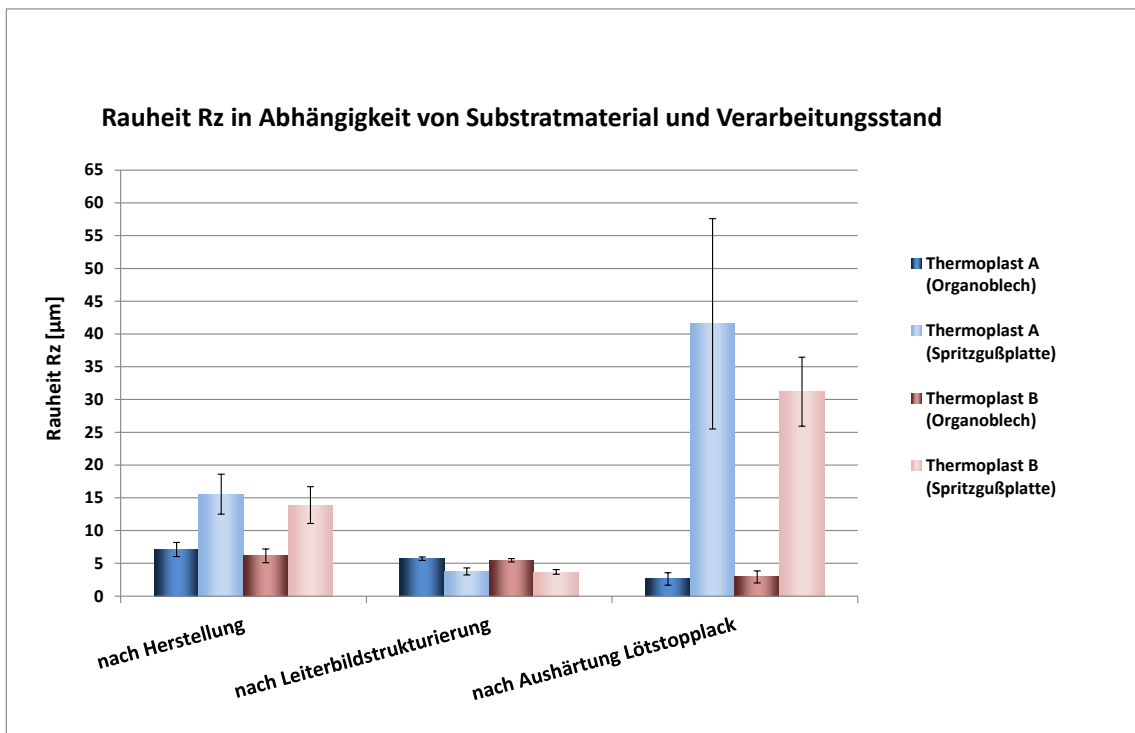


Abbildung 43: Rauheit Rz von Thermoplast A und B in Abhängigkeit vom Verarbeitungsstand

Die Ursache der Probleme lag wie vermutet im starken Anstieg der Oberflächenrauheit Kurzglasfaserverstärkter Spritzgussplatten während der thermischen Aushärtung des Lötstopplackes (siehe auch Abbildung 25). Während sich bei den glasfasergewebe-verstärkten Organoblechen die Rauheit tendenziell sogar noch verringert, steigt bei den Spritzguss-Substraten der Ra- und Rz-Wert extrem an (Abbildung 42 und Abbildung 43). Anscheinend richten sich die Kurzglasfasern während der thermischen Belastung der

Leiterplatte auf und bilden auf der Oberfläche, zusätzlich zur höheren Oberflächenrauheit, den Ausgangspunkt für die im Lötstopplack beobachteten Blasen.

Abbildung 44 und Abbildung 45 zeigen sehr deutlich den Einfluss der Substratherstellung auf das Erscheinungsbild des darauf aufgetragenen und ausgehärteten Lötstopplackes.

Trotz dieser Widrigkeiten wurden die beiden klassischen Qualitätsprüfungen für Lötstopplack, der Tape-Test nach IPC-TM 2.4.28.1 sowie der Gitterschnitttest (DIN 53151) mit dem Ergebnis GT 0 erfolgreich bestanden. Eine visuelle Stichprobenprüfung ergab auch nach dem Bestückungsprozess sowohl auf den kurzglasfaserverstärkten Spritzgussplatten als auch auf den glasfasergewebeverstärkten Organoblechen eine gute Haftung des flexiblen Lötstopplackes.

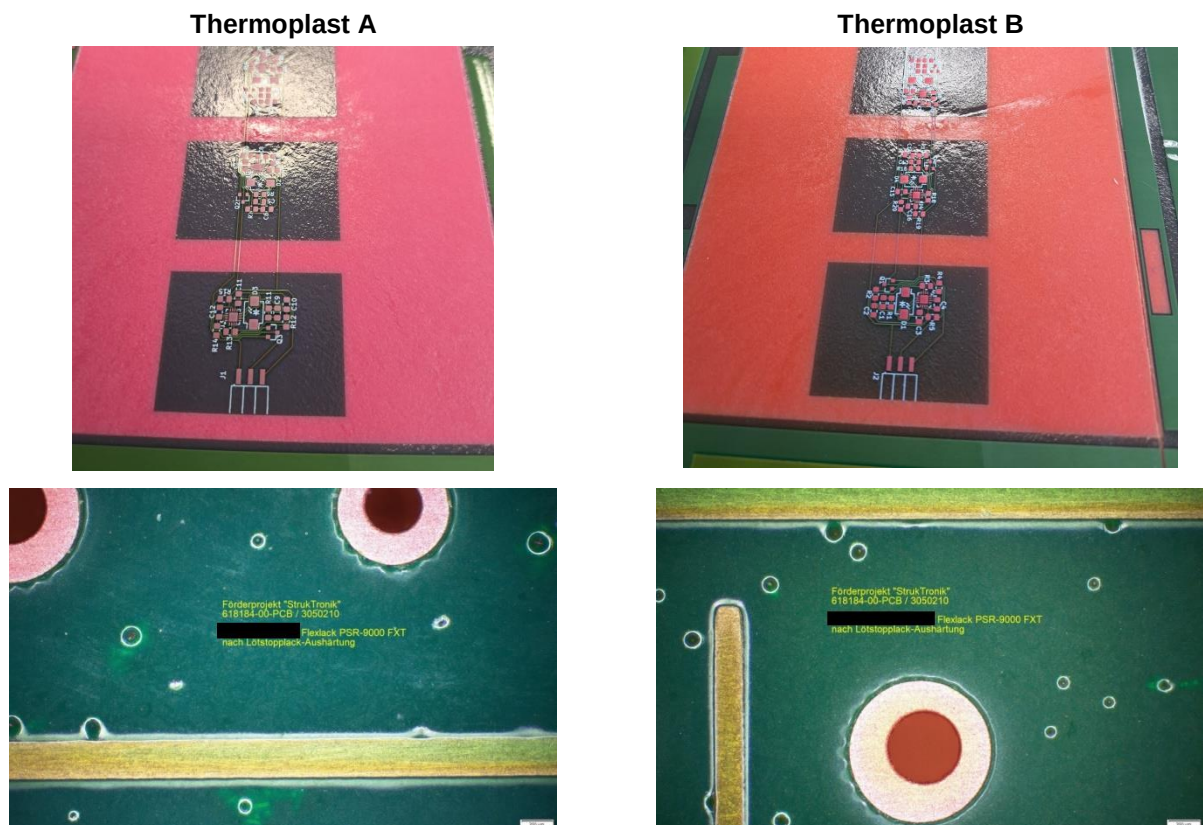


Abbildung 44: Erscheinungsbild Lötstopplack auf kurzfaserverstärktem Thermoplast A und B

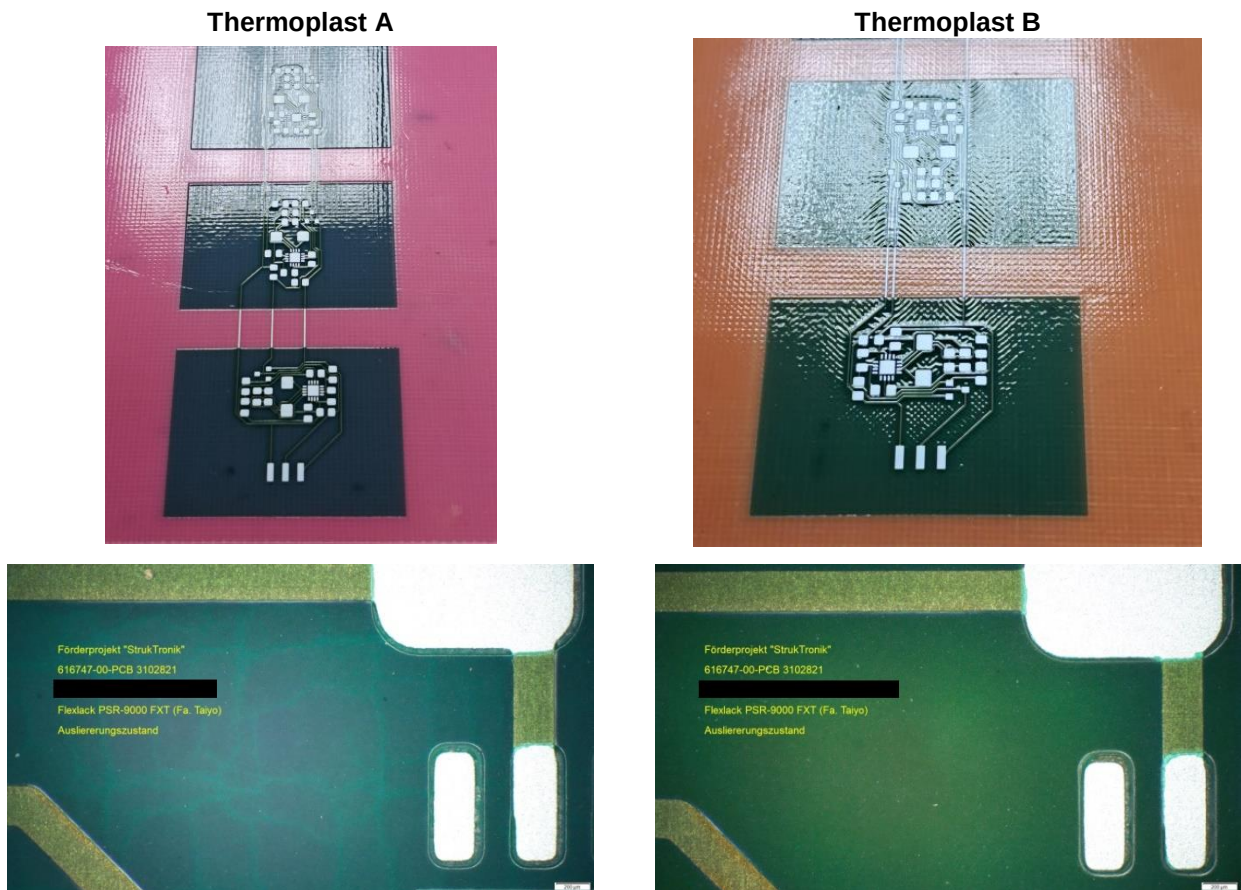


Abbildung 45: Erscheinungsbild Lötstopplack auf endlosfaserverstärktem Thermoplast A und B

Mit einem flexiblen Lötstopplack kann eine qualitätsgerechte Beschichtung einer Organo-Leiterplatte gewährleistet werden. Dieser Lötstopplack ist in der Lage, die gegenwärtig noch unvermeidbaren Oberflächentopographieänderungen glasfasergewebeverstärkter Organo-bleche ohne Qualitätsverlust auszugleichen.

3.1.6 AP 2.8: Funktionsanalysen an strukturierten Hybridhalbzeugen

Das Arbeitspaket 2.8 wurde im Rahmen der Leiterplattenfertigung fortlaufend bearbeitet. Zu den Kriterien Abschälkräfte von Leiterzügen, Dimensionsstabilität, Verwindung / Wölbung sowie Verbundfestigkeit liegen ausreichend Erkenntnisse vor.

Abschließend wurden noch Untersuchungen zur thermischen Belastung von kurzglasfaser-verstärkten Spritzgussplatten sowie glasfasergewebeverstärkten Organoblechen aus den Thermoplasten A und B durchgeführt. Zusätzlich zu den Arbeiten des Projektpartners Komitec sollte die Bestückbarkeit der Organo-Leiterplatten sowie die nach dem Bestückungsprozess zu erwartende Qualität (insbesondere Verbundfestigkeit sowie Verwindung/Wölbung) bewertet werden.

In Vorbereitung einer späteren Serienfertigung werden zum Abschluss des Projektes die neuartigen Leiterplatten mit kommerziellen FR4-Leiterplatten verglichen. Dazu wurden die

in der Leiterplattenfertigung etablierten Prüfverfahren Lötchocktest (288 °C / 3 x 10 s, IPC TM 650: Kap. 2.6.8) sowie Reflowsimulation (dreimaliger Durchlauf, Standardprofil Pb-frei), IPC TM 650: Kap. 2.6.27) genutzt.

Die in Abbildung 46 bis Abbildung 48 dargestellten Ergebnisse verdeutlichen sehr anschaulich, dass Organo-Leiterplatten nicht mit den klassischen thermischen Prüfmethoden der IPC bzw. den nach der Leiterplattenproduktion durchgeführten thermomechanischen Belastungsprüfungen charakterisiert werden können. Durch ihren thermoplastischen Charakter zeigen die kurzglasfaserverstärkten Spritzgussplatten in beiden Prüfverfahren eine für ein klassisches Basismaterial absolut undenkbbare Verformung.

Thermoplast A: Kurzglasfaserverstärkte Spritzgussplatte



Ausgangszustand

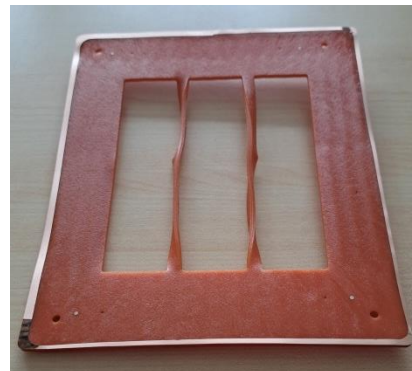


nach 1. Reflowsimulation

Thermoplast B: Kurzglasfaserverstärkte Spritzgussplatte



Ausgangszustand



nach 1. Reflowsimulation

Abbildung 46: Erscheinungsbild kurzfaserverstärkter Thermoplast A / B nach 1. Reflowsimulation

Durch die Umstellung des Substratmaterials auf glasfasergewebeverstärkte Organobleche können diese Probleme zumindest in der Prüfung „Reflowsimulation“ signifikant reduziert werden (Abbildung 47). Die in Abbildung 47 b sichtbare thermische Verformung der Substratoberfläche verdeutlicht jedoch das potentielle Risiko des Einsatzes einer für thermoplastische Substrate ungeeigneten Prüfmethode, das bis hin zu Fehlinterpretationen führen kann.

Thermoplast B: Glasfasergewebeverstärktes Organoblech



Ausgangszustand



a)



b)

nach 1. Reflowsimulation

Abbildung 47: Erscheinungsbild endlosfaserverstärkter Thermoplast B nach 1. Reflowsimulation

Die Durchführung des Lötschocktests mit Standard-Prüfequipment ergab sogar eine völlig deformierte Probe, die nicht mehr charakterisiert werden kann (Abbildung 48). Um das Prüfequipment der KSG nicht zu gefährden oder zu beschädigen, wurden die thermischen Belastungsprüfungen nach der ersten Reflowsimulation bzw. nach einer Verweilzeit von 2 x 10 s im Lötschockbad abgebrochen.

Thermoplast A / Thermoplast B: Kurzglasfaserverstärkte Spritzgussplatte



Ausgangszustand



nach Lötschocktest 288 °C / 2 x 10 s

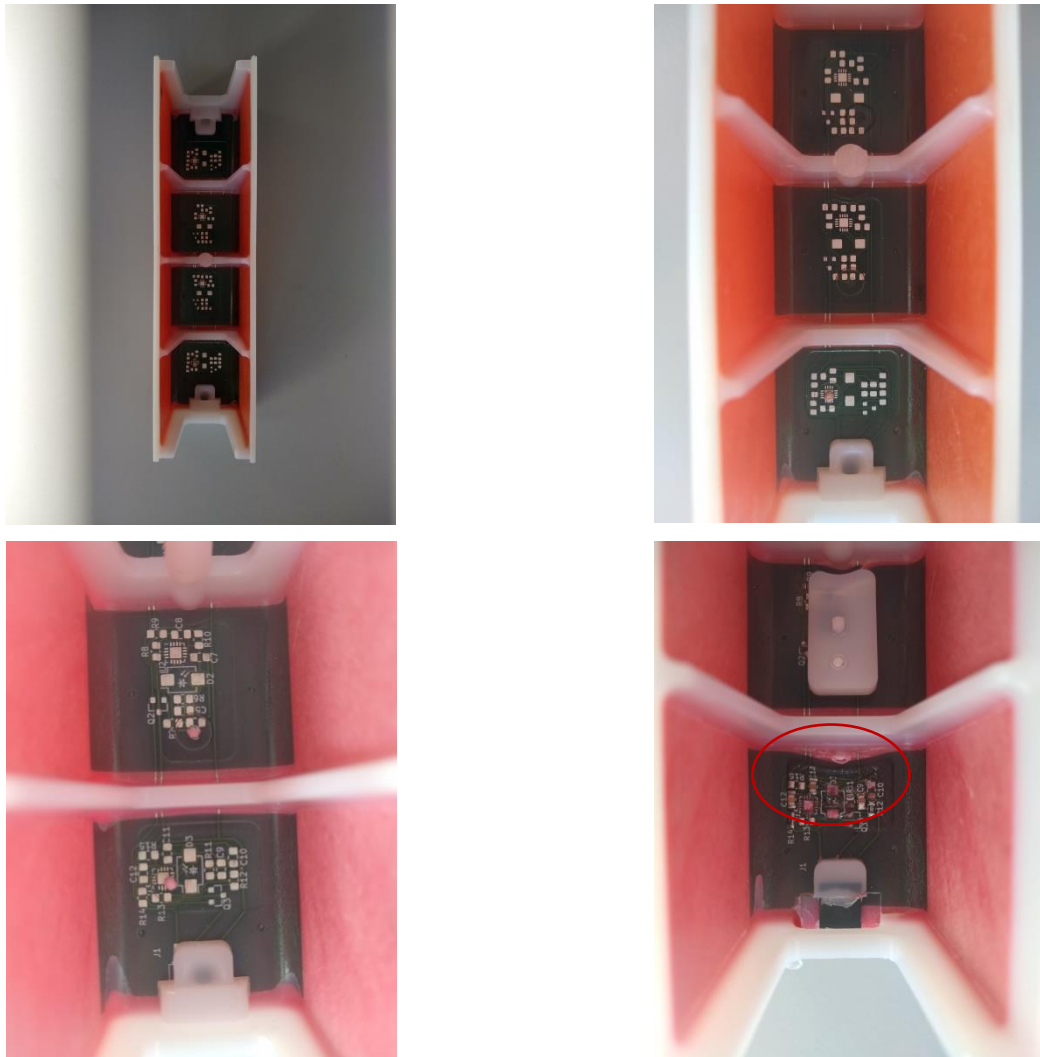
Abbildung 48: Erscheinungsbild Thermoplast A und B nach Lötschocktest

Grundlegend konnte das Potential der Thermoplaste A und B zur Herstellung einer weiterverarbeitbaren Organo-Leiterplatte aufgezeigt werden. Aufgrund der nachgewiesenen Möglichkeit zur Durchkontaktierung und zum Aufbau von Multilayer-Strukturen haben diese Materialien das Potential, sich zu alternativen Leiterplattenmaterialien zu etablieren. Durch ihren thermoplastischen Charakter kann man sie jedoch weder mit klassischen FR4-Basismaterialien vergleichen, noch mit den für diese

Materialien ausgelegten Prüfverfahren charakterisieren. In dieser Richtung ist noch eine sehr umfangreiche Grundlagenforschung erforderlich.

3.1.7 AP 3.15: Bewertung umgeformter und umspritzter Leiterstrukturen

Das Arbeitspaket 3.15 wird mit einer visuellen Beurteilung der ersten umgeformten und umspritzten Organo-Leiterplatten abgeschlossen.



qualitätsgerechte Umformung und Umspritzung Beschädigung des Leiterbildes bei der Umformung
Abbildung 49: Umgeformte und umspritzte Organo-Leiterplatte im Projekt-Demonstrator „Lichtschranke“

Durch den Einsatz optimierter Parameter kann beim Umformen und Umspritzen einer Organo-Leiterplatte sowohl die Formstabilität der Leiterstrukturen als auch die Verbundhaftung bewahrt werden. Dadurch werden mechanische Beschädigungen des Leiterbildes verhindert und die Funktionsfähigkeit der Leiterplatte vollständig erhalten (Abbildung 49).

4 Entwicklung von automatisierbaren Kontaktier- und Bestückungsverfahren für thermoplastbasierte Leiterplatten

4.1 AP 1: Mikroelektronik für Einbettung in Organobleche

4.1.1 AP 1.8: Erarbeitung von Anforderungen an Pasten, Reflowprofil und Werkstückträger beim Einsatz von Organoblechen und Auswirkungen auf die Lötstelle

Im Arbeitspaket 1.8 wurde sich mit der Erarbeitung von Anforderungen an Lotpasten, Reflowprofil und Werkstückträger auf der Basis FR4 gegenüber Organoblech beschäftigt. Des Weiteren wurden auch die Auswirkungen auf die Lötstelle durch verschiedene Temperaturbereiche und damit verbundene unterschiedliche Lotsysteme verglichen.

Anforderungen an Lötpasten, Reflowprofil bzw. dem allg. Lötprozess

Um die Rahmenparameter für einen Lötprozess hinsichtlich des Organobleches gegenüber dem Standard-FR4-Material eingrenzen zu können, erfolgte die Betrachtung möglicher Lötpasten und den daraus resultierenden nötigen Temperaturen. Die Lötpasten benötigen bei dem Lötprozess unterschiedliche Peak(Spitzen)-Temperaturen im Reflowofen, die abhängig von der eingesetzten Paste eine unterschiedlich lange Zeitdauer aufrechterhalten werden müssen. Dadurch kommt eine definierte Lötverbindung zwischen den Bauteilen und der organoblechbasierten Leiterplatte zustande. In Tabelle 3: Legierung und Schmelzbereiche der verschiedenen Lötpastensind die eingesetzten Lötpasten mit zugehörigen unterschiedlichen Schmelzbereichstemperaturen aufgeführt und werden im Folgenden separat betrachtet.

Tabelle 3: Legierung und Schmelzbereiche der verschiedenen Lötpasten

Einsatzbereich	Legierung	Schmelzbereich in °C
Standard - Lötpaste	Sn 3.0Ag 0.5Cu	217-219
Hochzuverlässige Lötpaste	Sn/3.5Ag/0.5Bi/6.0In/0.8Cu	202
Niedertemperatur - Lötpaste	Sn0.4A57.6Bi	139

Standard-Lötpaste

Die Standard-Lötpaste hat im Vergleich zur Niedertemperatur-Lötpaste einen relativ hohen Schmelzpunkt und damit verbunden einen höheren Temperatureintrag in das Material. Die für den Lötprozess benötigte Peak-Temperatur sollte sicherheitshalber mindestens bei 225 °C liegen.

Der Vorteil bei der Verwendung dieser Lötpaste ist der ausgezeichnet erprobte bzw. validierte Einsatz in der Lötprozessumgebung im Reflowofen. Dadurch können valide Aussagen gegenüber den anderen eingesetzten Lötpasten über Stoßempfindlichkeit oder eingrenzende Eigenschaften der Lötverbindung zum Bauteil gegeben werden. Abbildung 50 zeigt ein mögliches Temperaturprofil der Standard-Lötpaste.

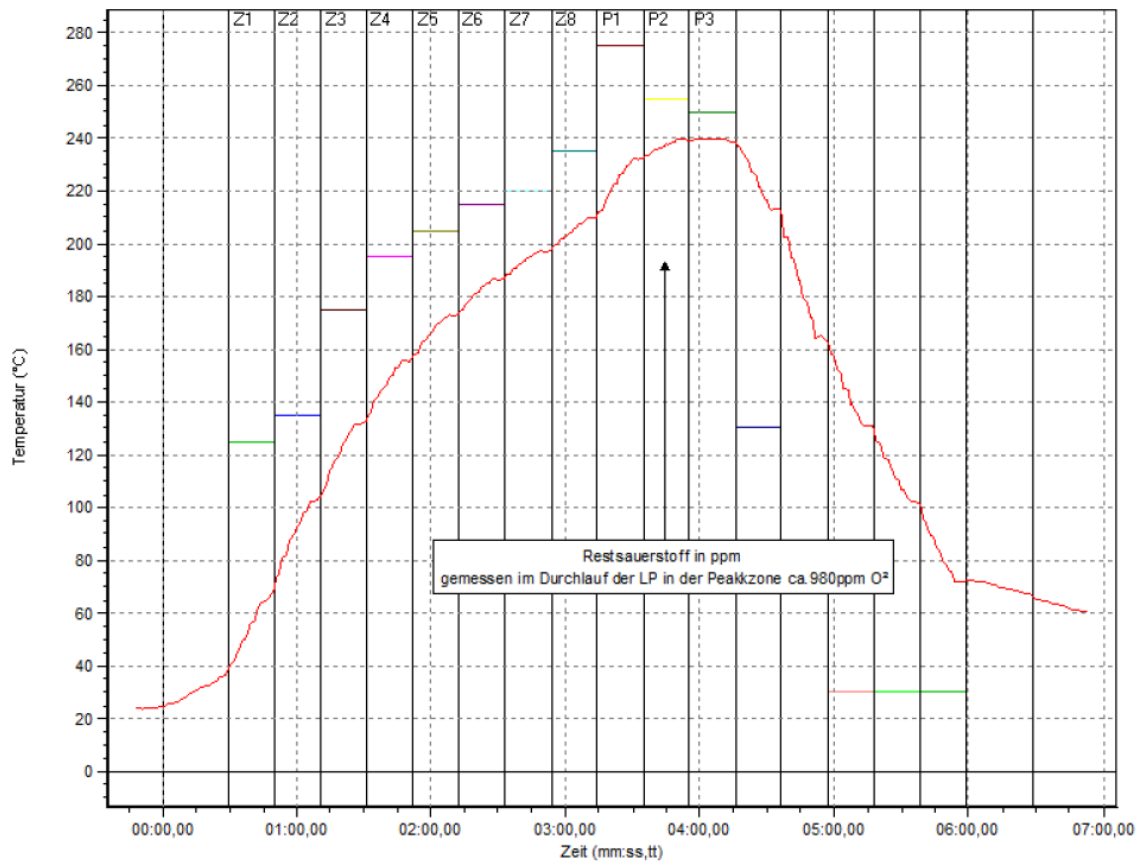


Abbildung 50: Lötprofil Standard-Lötpaste (Datapaq Insight Reflow Tracker)

Hochzuverlässige Lötpaste

Bei der hochzuverlässigen Lötpaste ist als projektrelevanter Vorteil der geringfügig niedrigere Schmelzpunkt zu nennen, da hierdurch die Materialauswahl bei den zur Verfügung stehen Organoblechmaterialien vergrößert werden konnte. Zudem hat die Lötverbindung zwischen den späteren Bauteilen und der Leiterplatte eine bessere Zyklenfestigkeit bei einem Wechsel von Warm zu Kalt. Das heißt die Lötverbindungen zwischen Bauteil und Kupferpad auf dem Organoblech behält im Vergleich zur Standard-Lötpaste länger ihre definierten Eigenschaften.

Da das Organoblech bei diesem Projekt nach der Bestückung und dem Lötprozess noch einmal thermisch belastet sowie mechanisch verformt wurde, ist diese Lötpaste aus den o.g. Gründen bei den finalen Baugruppen eingesetzt wurden.

Als Nachteil muss aber die etwas teurere Legierung festgehalten werden. Die benötigte Peak-Temperatur muss bei dieser Lötpaste lt. Herstellerangaben 30 Sekunden bei über 204 °C liegen. Unten folgt mit Abbildung 51 das Temperaturprofil des hier genannten Lötsystems.

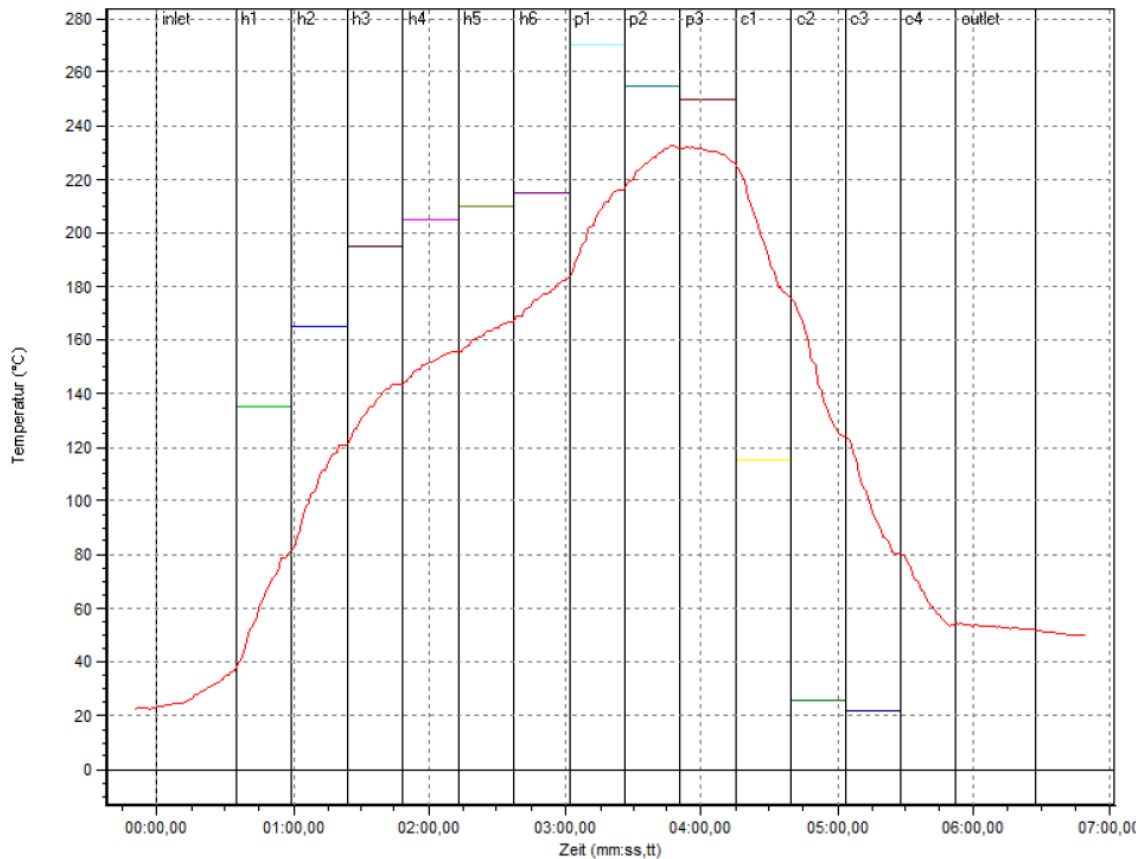


Abbildung 51 Lötprofil hochzuverlässige Lötpaste (Datapaq Insight Reflow Tracker)

Niedertemperatur-Lötpaste

Bei der zum Einsatz gekommenen Niedertemperatur-Lötpaste bestand die größte Auswahl der infrage kommenden organoblechbasierten Materialien, da diese Paste einen Schmelzpunkt von nur 139 °C besitzt und dadurch einen signifikant niedrigeren Schmelzbereich aufweist.

Allerdings ist die Lötverbindung sehr stoßanfällig und hinsichtlich der anschließenden thermischen Verformung sowie des mechanischen Stresses auf die Lötverbindung eher ungeeignet. Da zu Projektbeginn aber noch nicht feststand, welche maximalen Temperaturen im Lötprozess eingesetzt werden können, wurde diese Lötpaste ebenfalls getestet.

Die nötige Peak-Temperatur dieser Lötpaste im Lötprozess liegt laut Hersteller bei mindestens 140 °C. In Abbildung 52 ist der Standard-Verlauf der Niedertemperatur – Lötpaste aufgeführt.

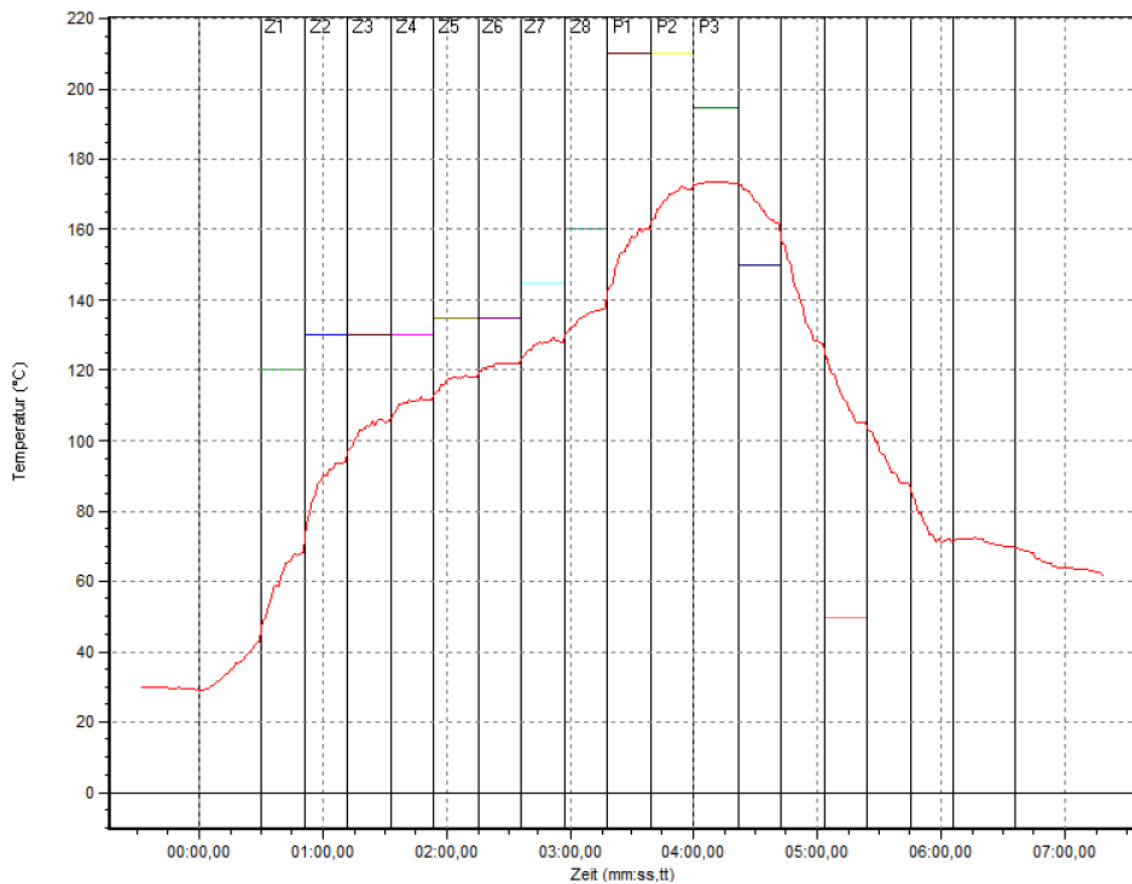


Abbildung 52 Lötprofil Niedertemperatur – Lötpaste (Datapaq Insight Reflow Tracker)

Testaufbau zur Verifizierung der Temperaturzonen in den Lötprofilen

Folgender Aufbau kam im Forschungsprojekt zur Verifizierung der Temperaturzonen im Reflowofen zum Einsatz. Für die Auswertung der Temperaturprofile wurde der hauseigene Messrahmen 4625 (Abbildung 53) verwendet. Die weitere Ausrüstung und die angewandten Versuchsparameter sind in Tabelle 4 aufgelistet.

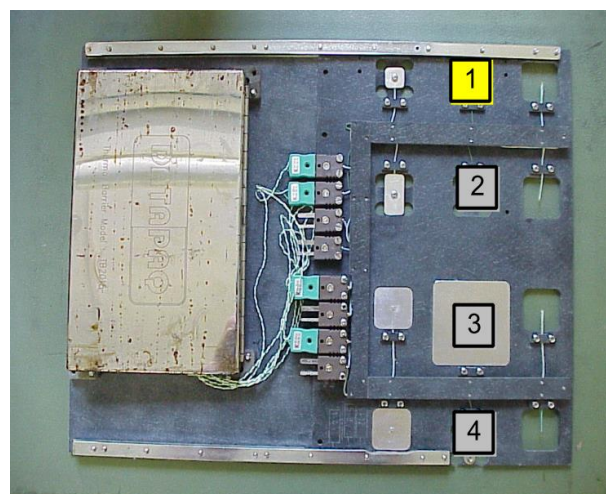


Abbildung 53: Hauseigener Messrahmen 4625

Tabelle 4: Testequipment und Parameter zur Temperaturverifizierung

Test-Equipment / Parameter	Bezeichnung / Wert
Messinstrument	hausinterner Messrahmen 4625
Temperaturfühler	4 Stück Typ K
Datenlogger	Datapaq 9000 (Surveyor)
Messtakt	1 s
Max. interne Temperatur	45,5 °C
Reflow-Ofen	Rehm VXP+ nitro 3850 Typ 835
Prozess	Messrahmen 4625
Produkt	Referenz-Messplatte, Variante 2
Toleranzkurve	Messrahmen 2720.tol
Ofengeschwindigkeit	102 cm/min
Mikroskop	Leica DMS 1000

4.1.2 AP 1.9: Entwurf, Auslegung, Konstruktion und Fertigung eines Leiterplattenträgers für Organobleche

Im Arbeitspaket 1.9 wurde der Entwurf, die Auslegung und die Konstruktion eines Leiterplattenträgers für die organoblechbasierten Leiterplatten betrachtet. Dabei wurde die Betrachtung der Genauigkeit und den Toleranzen einbezogen.

Entwurf des geeigneten Leiterplattenträgers für Organobleche

Im Zuge der Überlegungen im Projekt zu einem Entwurf für den Leiterplattenträger wurden die maximalen Maße von 300 mm x 300 mm als Grundlage gewählt. Das Material wurde so gewählt, dass die definierten Eigenschaften und die Stabilität des Trägers bei den Temperaturen der verschiedenen Lötssysteme erhalten bleiben. Des Weiteren sollte der Träger im Projektverlauf dafür Sorge tragen, dass bei den Testdurchläufen ggf. das geschmolzene Organoblechmaterial nicht in das Lötprozesssystem oder das Beförderungssystem läuft und dabei ein Defekt auslöst. Zudem musste eine gewisse Resistenz gegenüber den eingesetzten Chemikalien (z.B. Flussmittel) in den Lötssystemen

vorhanden sein und das Material sollte sich sehr gut mechanisch bearbeiten lassen, damit ggf. auch komplexere Leiterplattengeometrien berücksichtigt werden könnten.

Auslegung des Leiterplattenträgers für organoblechbasierten Leiterplatten

Das Leiterplattenträgersystem wurde aus dem Material Durostone CAS761 hergestellt. Dieses Material ist für die Verfahren der Leiterplattenbestückung und SMT-Reflowverfahren geeignet und hat folgende relevante Eigenschaften (Tabelle 5):

Tabelle 5: Material Trägersystem (Durostone CAS761 der Firma: Röchling SE & Co. KG)

Durostone CAS761 	• Sehr gute mechanische Eigenschaften bei hohen Temperaturen
	• Niedrige Wärmeleitfähigkeit
	• Für die Trägerfertigung sehr gute mechanische Bearbeitungseigenschaften, dadurch können diese Träger auch für ein komplexeres Leiterplattenlayout eingesetzt werden
	• Widerstandsfähig gegen die chemischen Inhaltsstoffe beim Lötprozess (z.B. Flussmittel etc.)

Konstruktion und Fertigung des Leiterplattenträgers für organoblechbasierten Leiterplatten

Für die Bearbeitung des Durostone CAS761 für einen Trägeraufbau wurde eine CNC-Fräsmaschine eingesetzt. Bei der Auslegung des Werkstück- bzw. Leiterplattenträgers spielt die Geometrie der Platine eine große Rolle, da hierdurch die Form des Trägers bestimmt wird. Die Fertigungstoleranzen des Trägers für den Reflowprozess sollten kleiner als 2 mm sein um einen sicheren Transport durch den Reflowofen zu gewährleisten. Abbildung 55 zeigt beispielhaft den prinzipiellen Aufbau des Trägersystems.

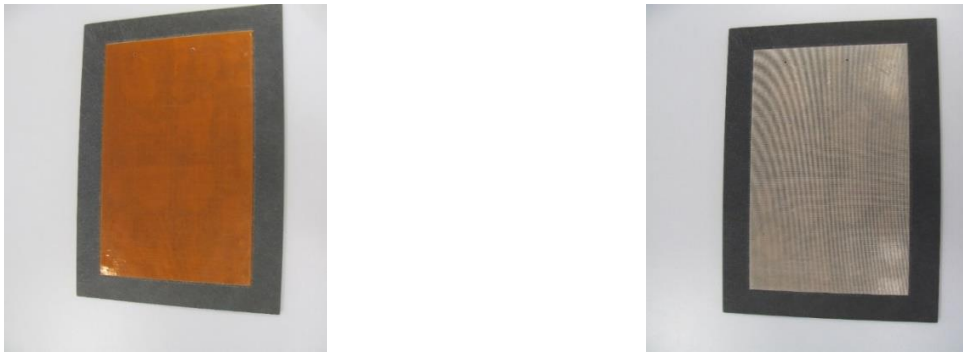


Abbildung 54: Prinzipieller Aufbau des Trägersystems

Mit der finalen Musternutzenkonstruktion im Laufe der Projektarbeiten waren alle benötigten Parameter bekannt, die für den Entwurf und die Auslegung des spezifischen Trägersystems benötigt wurden. Um unterschiedliche Temperatureinträge bei den Leiterplatten mit Kupferleiterzügen und bestückten Bauteilen ggf. testen zu können, wurde eine offene und eine geschlossene Trägerkonstruktion (s. Abbildung 55) im Projektverlauf für die verschiedenen Leiterplattenversionen konstruiert und gefertigt. Die offene Konstruktion lässt mehr Unterhitze zu, was bei Normalbedingungen mit herkömmlichen FR4-Material zu einer besseren Wärmeverteilung führt aber bei dem Organoblechmaterial die Verwölbung deutlich erhöht hat. Der unten geschlossene Träger schirmt die Unterhitze ab und reduziert dadurch den Temperatureintrag in das Organoblech. Durch die gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich der Schrumpfung und Verwölbung wurde für die finalen OrganoblechLeiterplatten ausschließlich die geschlossene Variante eingesetzt, da der Temperatureintrag in das Organoblech bei dem offenen Trägersystem zu hoch war bzw. negative Effekte wie zum Beispiel die Verwölbung verstärkt wurden.

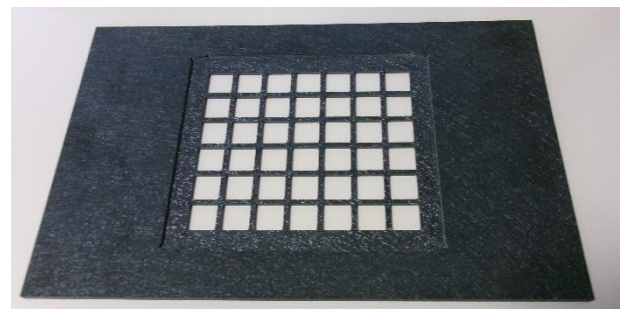
geschlossene Trägerkonstruktion**offene Trägerkonstruktion**

Abbildung 55: Trägersystem für Organoblech mit elektr. Schaltung als geschlossene (links) und offene (rechts) Konstruktion

4.1.3 AP 1.10: Untersuchungen zur Thermostabilität des Substrates im Reflowofen unter Einfluss unterschiedlicher Temperaturprofile und AP 1.11: Recherche zu alternativen Lotsystemen und Klebepasten, Evaluation von Hoch- und Niedertemperaturloten in Verbindung mit zerstörenden Testverfahren

Diese Arbeitspakete beschäftigen sich mit den Untersuchungen zur Thermostabilität des Substrates im Reflowofen unter Einfluss unterschiedlicher Temperaturprofile durch die Nutzung unterschiedlicher Lötssysteme. Das Thermoplast A- und Thermoplast B-Material wurde aus den verschiedenen zur Verfügung stehenden Organoblech-Materialien letztendlich ausgewählt, weil es u.a. eine größere Thermostabilität besitzt. Das war zum einen für den Fertigungsprozess bei dem Projektpartner KSG von Vorteil und auch für das bei Komitec angewandte Reflowlötverfahren sowie die spätere Verformung der Leiterplatte nach der Bestückung. Ebenfalls wurde sich in diesen Arbeitspaketen mit der Evaluation der recherchierten Hoch- und Niedertemperaturlötverfahren beschäftigt.

Parameter für Referenzmuster

Damit die von dem Projektpartner entwickelte elektrische Schaltung für die Lichtschranke getestet werden konnte, wurde im Vorfeld der Versuche mit dem Organoblech eine Leiterplatte konstruiert und gefertigt, die aus herkömmlichen FR4-Material besteht (vgl. Abbildung 56). Für dieses Muster wurden die Maße 146 mm x 112 mm (Nutzengröße mit Nutzenrand: 146 mm x 130 mm) festgelegt. Bei der Bestückung gab es keine Auffälligkeiten hinsichtlich der Pastendepots bei den kritischen Bauteilen oder der Bestückbarkeit der elektronischen Bauteile. Als Lötprofil im Reflowofen wurde das Standardprofil für FR4-Leiterplatten mit Standardlötpaste gewählt.

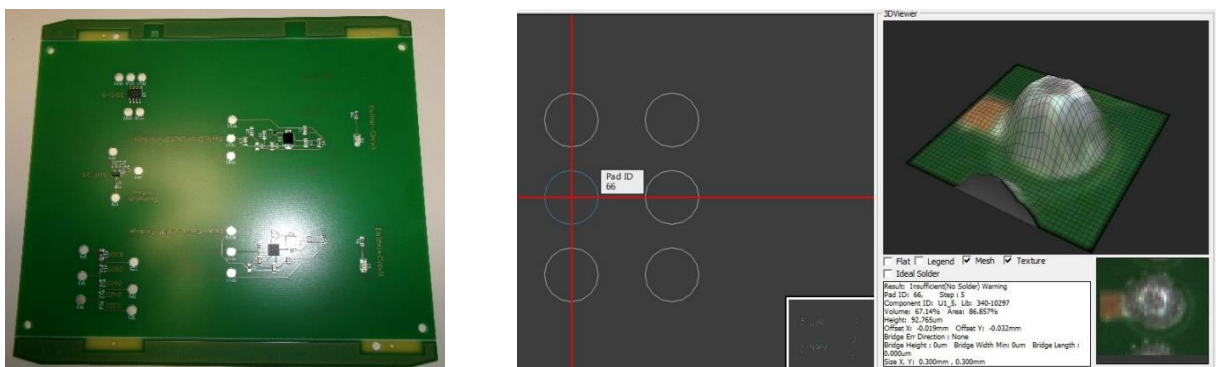


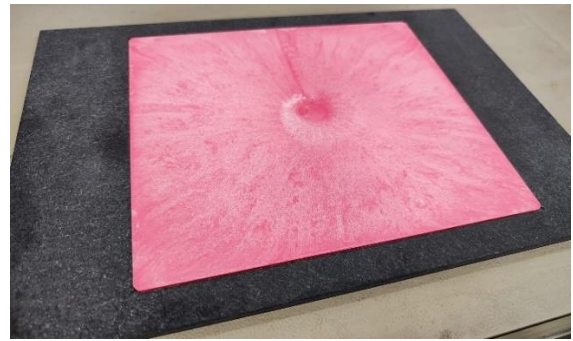
Abbildung 56: FR4-Referenzmuster und Koh Young Technology SPI-Auswertung (statistische Prozesskontrolle (SPC))

Testdurchlauf Thermoplast A und Thermoplast B im Standard-Lötprofil

Für den ersten Testdurchlauf wurden jeweils ein Organoblech-Muster aus Thermoplast A und ein Muster aus Thermoplast B zur Verfügung gestellt. Diese Proben besaßen keine elektronische Schaltung und wurden in den Maßen 180 mm x 150 mm ausgeführt (s.

Um die Verformung zu reduzieren, wurde auch ein Fertigungsträger in der o.g. geschlossenen Variante nach dem prinzipiellen Aufbau für die Muster angepasst, konstruiert und gefertigt.

Organoblech-Muster Thermoplast A (Kurzfaser) mit Trägersystem vor Reflowtest



Organoblech-Muster Thermoplast B (Kurzfaser) mit Trägersystem vor Reflowtest

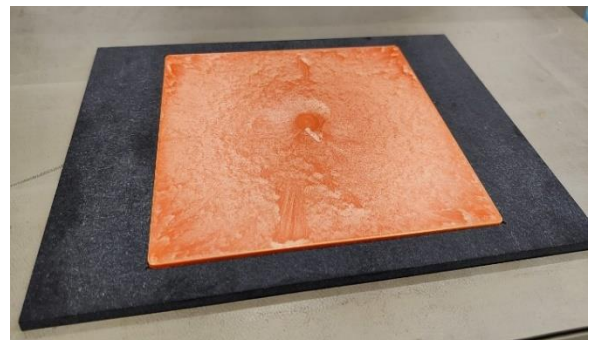
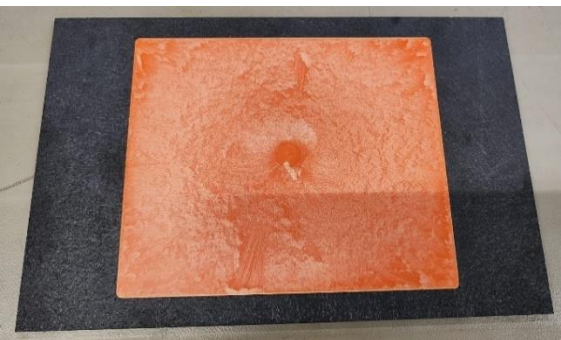
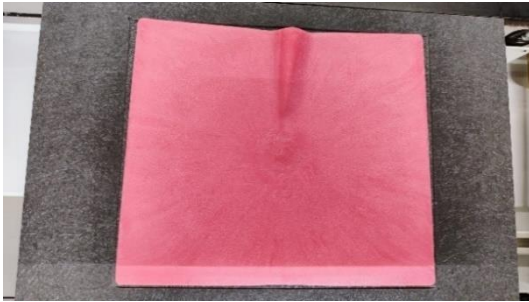


Abbildung 57: Thermoplast A und Thermoplast B-Muster mit Trägersystem vor dem Reflowtest

Nach dem ersten Reflow-Testdurchlauf mit eingestellten Lötprofil für die Standardlötpaste waren deutliche Verformung sichtbar (s. Abbildung 58). Die Rauheit der Oberfläche hat sich verändert bzw. deutlich erhöht.

Verwölbung Thermoplast A im Standardlötprofil



Verwölbung Thermoplast B im Standardlötprofil

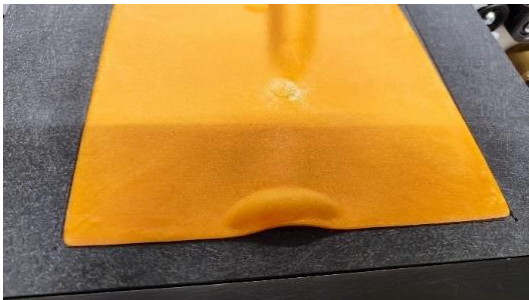


Abbildung 58: Verwölbung der thermoplastischen Proben nach dem Reflowtest mit Standardprofil

Auch optisch sind Veränderungen der Oberfläche erkennbar. Die deutlich sichtbare Verformung im oberen Bereich bei den Mustern stellt ein großes Problem für die Bestückung mit elektronischen Bauteilen dar. Durch die sichtbar große Schrumpfung war die spätere Bestückung zu diesem Zeitpunkt schwer realisierbar. Zusätzlich waren in der Thermoplast A-Materialprobe Blasenbildung zu beobachten. Die Blasenbildung war ggf. auf eine Restfeuchtigkeit im Material zurückzuführen. Schritte für eine mögliche Feuchtigkeitsreduzierung im Material wurden vor einem erneuten Testdurchlauf validiert.

Testdurchlauf Thermoplast A und Thermoplast B im Niedertemperatur-Lötprofil

Durch die Beobachtungen im Testdurchlauf mit dem Standardlötprofil wurde für die nächste Testdurchführung das Lötprofil für die Lötpaste im Niedertemperaturprofil verwendet. Diese Entscheidung unterlag der Tatsache, dass das Lötprofil für die hochzuverlässige Lötpaste ähnlich hohe Temperaturen wie das Standardlötprofil verwendet.

Auch im Lötprofil für die Niedertemperaturlötpaste waren Verwölbungen zu beobachten (s. Abbildung 59). Die Verwölbungen fielen zwar im Vergleich etwas geringer aus, waren aber hinsichtlich einer späteren Bestückung immer noch kritisch. Die Veränderungen der Oberfläche waren in dieser Versuchsdurchführung wesentlich geringer und auch die

Farbänderungen fielen geringer aus. Die im vorherigen Versuch gebildeten Blasen im Thermoplast A sind in dieser Versuchsdurchführung nicht aufgetreten.

Thermoplast A & Thermoplast B mit Trägersystem nach Reflowtest (Niedertemp.)

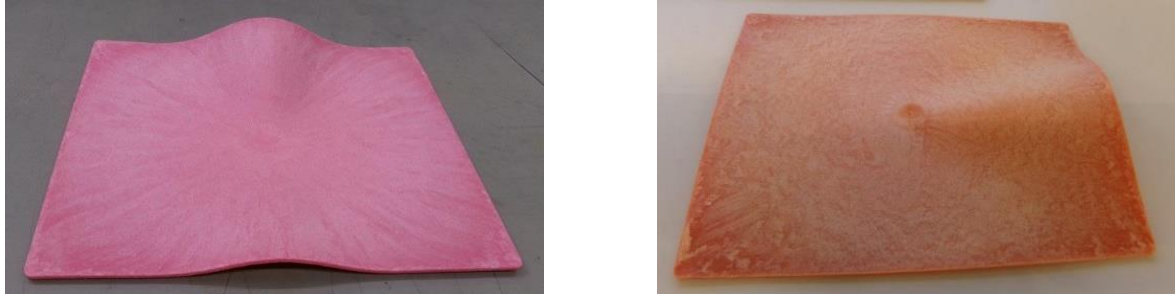


Abbildung 59: Verwölbung der Proben nach dem Reflowtest mit Niedertemperaturprofil

Nach den beiden ersten Testdurchführungen mit den Musterproben war das Material ohne Änderungen in der Materialstruktur bzw. der Zusammensetzung oder Anpassungen der Einflussfaktoren im Lötprozess zunächst nicht für eine Bestückung mit elektronischen Bauteilen geeignet. Auch die Haftung der späteren Kupferleiterzüge auf dem Organoblech würde durch die Schrumpfung und der Verwölbung sehr stark mechanisch beansprucht werden.

Lötsystemwahl durch kritische Bauteile

Für die Muster und Pastenschablonenkonstruktion lagen die Schwerpunkte bei den kleineren ASIC-Bauteilen des Partners EDC auf der Bestückposition U1 (X138, Bauform: WLCSP-6 1,4x1,0mm) und U2 (X138, Bauform: QFN-16-1EP 3x3mm). Das Bauteil U1 war als kritisch einzustufen, da für diese Gehäusegeometrien nur sehr kleine Bestück-Toleranzen zulässig sind. Das geringe Maß von 0,3mm pro Pad, als auch das geringe Rastermaß erfordert eine Leiterplattenfertigung mit sehr engen Toleranzen und einer geringen Ausdehnung bzw. Schrumpfung der Leiterplatte und damit einhergehenden Änderung der Positionen von den betreffenden Kupferpads. Die Genauigkeit der Positionen sollte auf der gesamten Nutzenfläche gleich sein bzw. dürfen nur kleinen Abweichungen unterliegen, da sonst der Versatz von Kupferpad, gedruckten Pastendepot und Bauteilanschluss zu groß wird. Bei der o.g. Recherche und Evaluation zu den alternativen Lotsystemen wurde neben dem Standard- und Niedertemperaturprofil auch das Temperaturprofil der hochstabilen Lotpaste berücksichtigt. Da die Temperatureinstellungen im Standardprofil und dem Lötprofil der hochstabilen Lotpaste sehr nah beieinanderliegen, waren die Testergebnisse im Vergleich zum Standardprofil gleich.

4.1.4 AP 1.12: Konstruktion und Fertigung Pastenschablone; Musterfertigung organoblechbasierter Leiterplatten

Konstruktion der Muster-Lötpastenschablone für die Musterfertigung

Die geringen Abstände der Anschlusspads bei einigen Bauteilen auf der Leiterplatte zogen besondere Anforderungen an die Aperturen der Pastenschablone nach sich. Durch die Dimensionierung der Aperturen in der Pastenschablone wird das Auslöseverhalten und der Lötpastenauftrag auf das Kupferpad maßgeblich beeinflusst. Zusätzlich wurde auch ein geeigneter Reinigungszyklus im Pastendrucker validiert, da nach abgeschlossenen Druckvorgang hängengebliebene Lötpastenreste in den Aperturen der Schablone ggf. den Pastenauftrag bei dem nächsten Druckvorgang negativ beeinflussen können bzw. dadurch auch die Fehleranfälligkeit bei dem Lötprozess zunimmt. Abbildung 60 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer Pastenschablone.

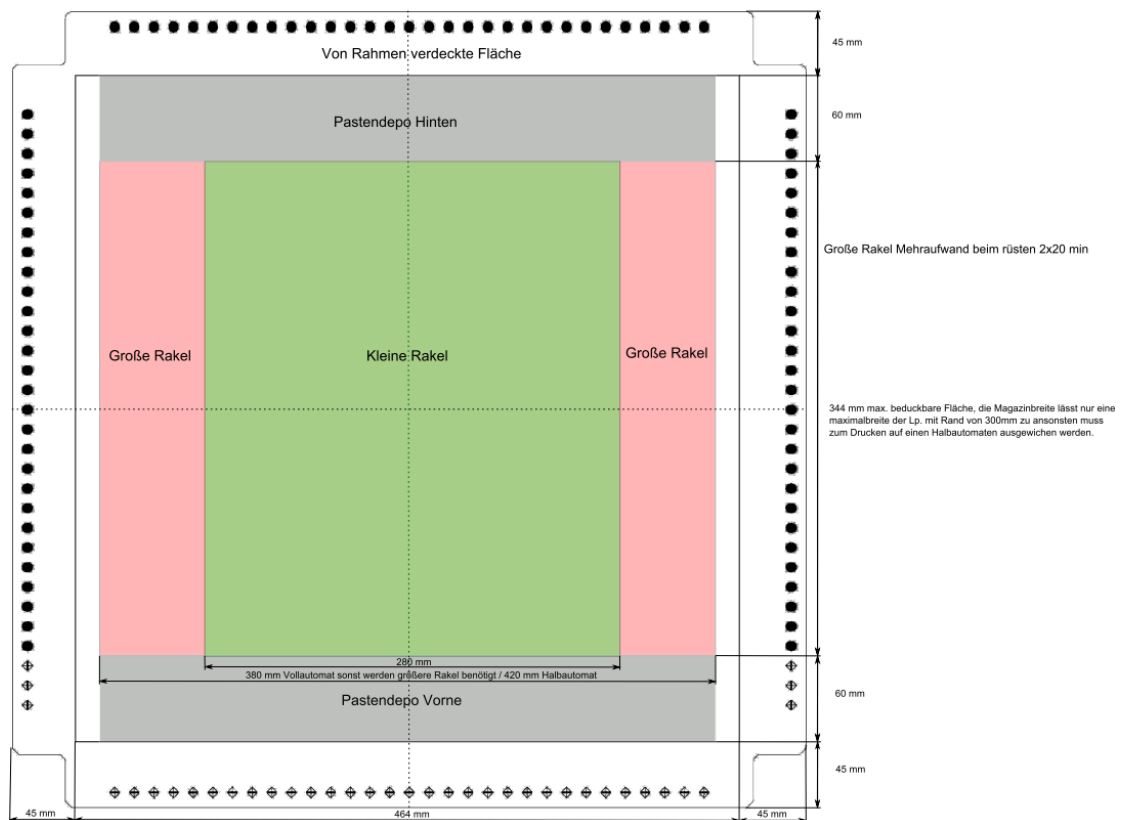
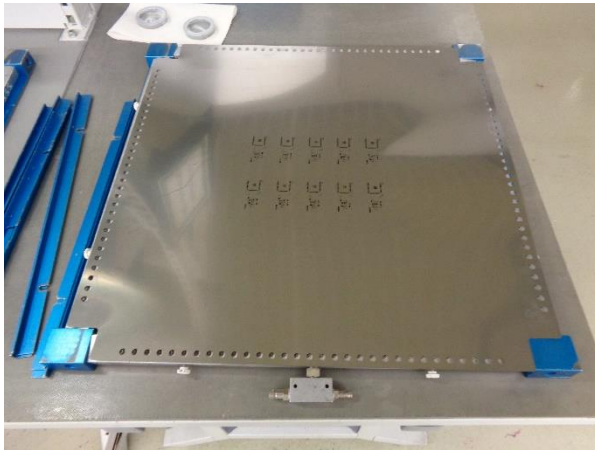
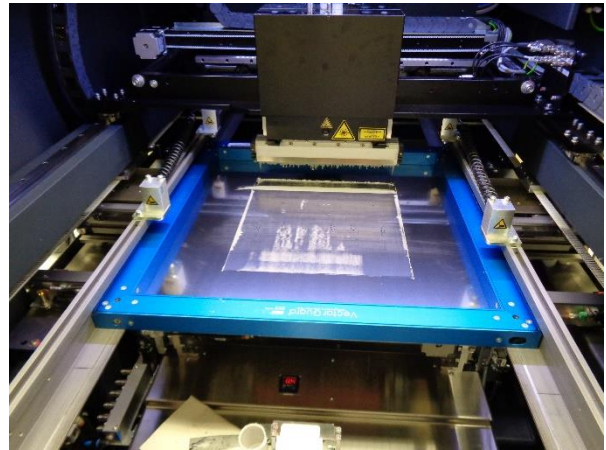


Abbildung 60 prinzipieller Aufbau Pastenschablone

Mit einer Pastenrakel wurde die Lotpaste über die Schablone auf die Kupfer-Pads der Leiterplatte aufgetragen (vgl. Abbildung 61). Die Leiterplatte wurde dabei mit Hilfe der o.g. Passermarken ausgerichtet und anschließend von unten an die Schablone gedrückt. Wenn alles korrekt eingerichtet und eingemessen wurde, liegen nun die Aperturen der Schablone passgenau über den Kupferpads auf der Leiterplatte. Nach dem Druckvorgang haben alle Pads ein definiertes Pastendepot und sind damit für die folgende Bestückung vorbereitet.

Muster-Pastenschablone

Schablone wird über Spannrahmen mit Hilfe von Luftdruck gespannt

Pastendrucker Typ: DEK Horizon 03iX

Rahmen in Lötpastendrucker und Pastenrakel

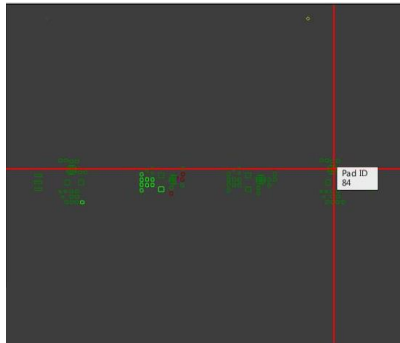
Abbildung 61: Spannrahmen, Pastenrakel, Pastendrucker

Der Pastenauftrag wurde vor der Bauteilbestückung mit einem sogenannten computergestützten SPI-Systemen (SPI = Solder Paste Inspection) vom Hersteller Koh Young Technology bestimmt und auf Abweichungen über die SPC (statistische Prozesskontrolle) kontrolliert. Dabei wurden die Parameter von Musterrunde zu Musterrunde neu validiert um die optimale Pastenmenge und damit ein definiertes Lötergebnis erzielen zu können.

Auswertung Pastendruck mit SPI (kurzfaserverstärktes Organoblech)

In Abbildung 62 ist zu sehen, dass der Pastenauftrag auf den Kupferpads teilweise im roten Bereich bei 200µm liegt (Sollwert: ca. 120 - 150µm). Dadurch bestand die Gefahr, dass ggf. Zinnperlen einige Kurzschlüsse erzeugen oder die Bauteile beim Lötprozess zu sehr schwimmen und dadurch nicht mehr definiert auf Ihrer Position liegen. Durch eine Reduzierung der Schablonenstärke kann dem Problem des erhöhten Pastenauftrags entgegengewirkt werden, allerdings ist dadurch dann in den Bereichen, wo die Pastenschablone plan aufliegt, die Pastenmenge ggf. zu gering. Dadurch wurde die strukturelle Materialzusammensetzung der Organoblechmuster im Projektverlauf geändert und damit eine Reduzierung der Welligkeit bei höheren Temperaturen erreicht.

Padposition



SPI-Auswertung

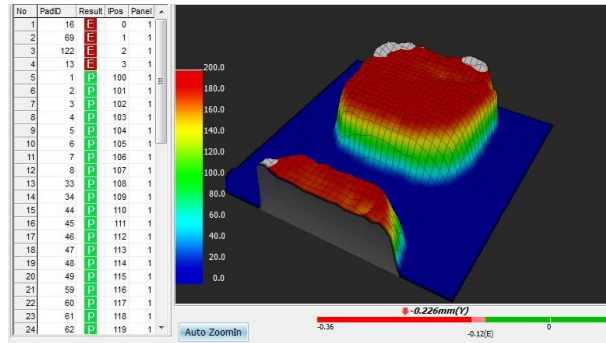


Abbildung 62: Erhöhter Pastenaufdruck (Koh Young Technology SPI-Auswertung (statistische Prozesskontrolle (SPC)))

Im nächsten Schritt wurde die Positionierung der einzelnen Pastendepots auf den Kupferpads betrachtet. Die genau definierte Position ist wichtig, da auf diese Pastendepots im folgenden Schritt die elektrischen Bauteile bestückt werden. Die Lötpaste selbst hat dabei eine klebende Wirkung und hält die bestückten Bauteile bis zum Lötprozess in Position. Die folgende Abbildung 63 zeigt, dass der Versatz verursacht durch die Schrumpfung bei dem kurzfaserverstärkten Organoblech teilweise sehr groß war. Dadurch wurde das Pastendepot in einigen Abschnitten komplett neben den Kupferpads aufgebracht und beeinflusste dadurch das Lötresultat negativ. Für den Lötprozess sollte das Pastendepot üblicherweise Kontakt zum Kupferpad haben, da sich ansonsten Lötperlen bilden können, die wiederum zu Kurzschlüssen und Funktionsausfall der gesamten Baugruppe im Einsatz führen können.

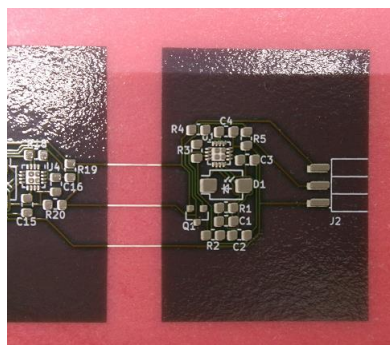
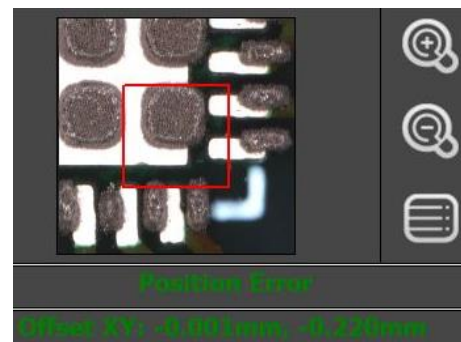
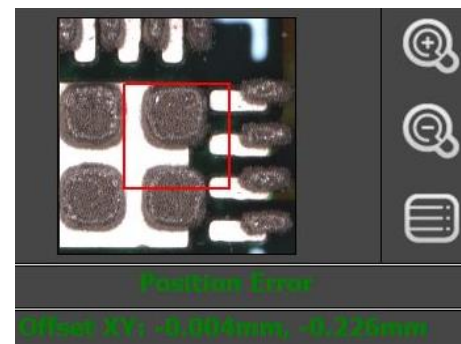
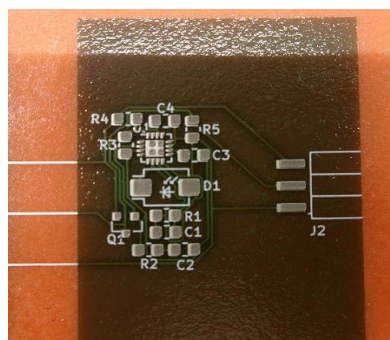
Thermo-
plast AThermo-
plast B

Abbildung 63: Druckversatz und Versatzmessung (Koh Young Technology SPI-Auswertung (statistische Prozesskontrolle (SPC)))

Der Bestückautomat bestimmt über optische Systeme die Positionen der Referenzmarken und berechnet damit die Positionierung der Bauteile anhand der digitalen Vorgabedaten die bei der Layouterstellung erzeugt wurden. Dadurch konnte der Offset, verursacht durch die Schrumpfung, auch bei den bestückten Bauteilen beobachtet werden (s. Abbildung 64). Problematisch war dabei, dass die Bauteilanschlüsse zwangsweise Kontakt mit der Lötpaste als auch mit dem Kupferpad benötigen, um eine Lötverbindung einzugehen. Die Anschlusspins der Bauteile lagen nach der Bestückung zumindest teilweise noch auf den Kupferpads und hatten so die Möglichkeit, bei dem Reflowprozess auf dem flüssigen Zinn (Kapillareffekt) ggf. auf Ihre Position zurückzuschwimmen und eine sichere Verbindung einzugehen.

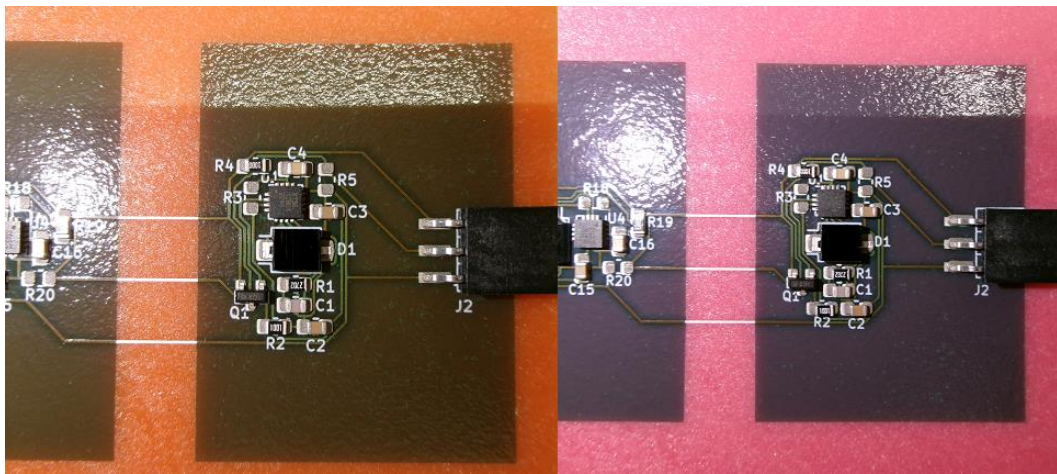


Abbildung 64: Bestückversatz Thermoplast B & Thermoplast A

Auswertung Lötstellen bei Thermoplast A und Thermoplast B (kurzfaserverstärkt)

Die Auswertung der Leiterplatten nach dem Lötprozess hat gezeigt, dass das vorherige Tempern der unbestückten OrganoblechLeiterplatten für 4 Stunden bei 80 °C die starke Verwölbung und Blasenbildung deutlich reduziert hat. In Abbildung 65 wird gezeigt, dass auch die Bauteile beim Lötprozess auf ihre Positionen gezogen wurden und somit über das Lötzinn eine Lötverbindung zu den Kupferpads gegeben war.

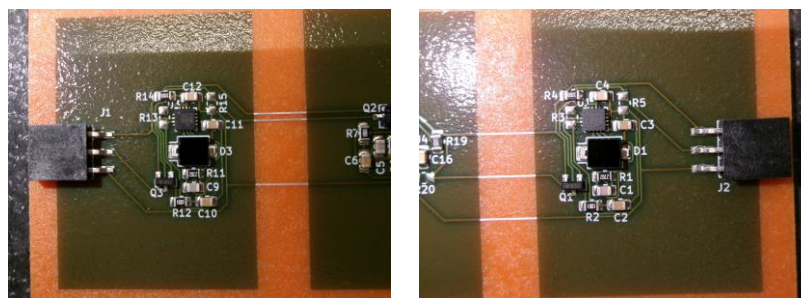


Abbildung 65: Lötstellen Thermoplast B

Die leichte Verwölbung die nach dem Tempervorgang beobachtet wurde, hat sich bei dem Lötverfahren nicht vergrößert. Auch der auf der Unterseite geschlossene Bestückträger hat den Temperatureintrag in die Organo-Leiterplatte weiter reduziert. In Abbildung 66 ist das Trägersystem mit Leiterplatte gezeigt.

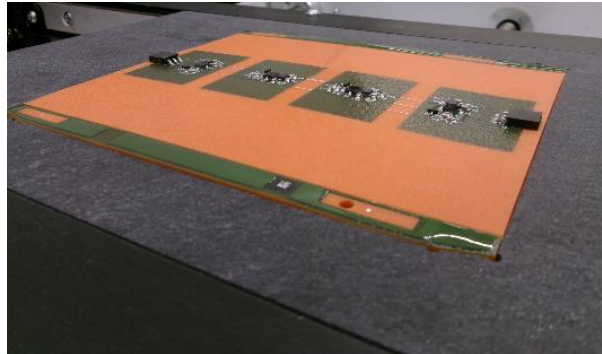


Abbildung 66: Thermoplast B -Leiterplatte mit Trägersystem

Auch bei dem kurzfaserverstärkten Thermoplast A (vgl. Abbildung 67) konnte keine weitere Erhöhung der Verwölbung oder eine Blasenbildung im Material festgestellt werden. Die beiden Materialien haben sich augenscheinlich vergleichbar im Lötprozess verhalten. Die unterschiedlichen Lötpasten und Lötprofile (Standard-/Hochstabil- und Niedertemperaturprofil) haben funktioniert und die elektrischen Bauteile wurden mit den Kupferpads auf der OrganoblechLeiterplatte verlötet. Bei dem Standard/Hochstabil - Profil war die Leiterplatte höheren Belastungen ausgesetzt. Das zeigte sich durch ein leichtes Kleben am Bestückträger nach dem Lötprozess.

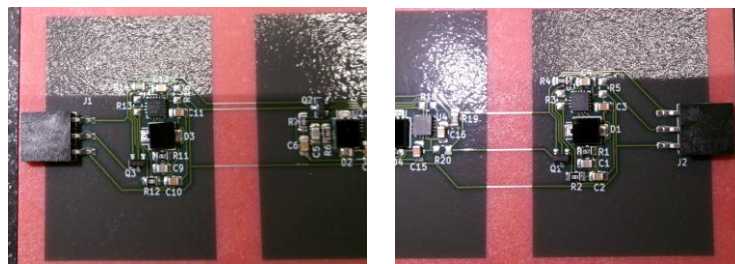


Abbildung 67: Lötstellen Thermoplast A

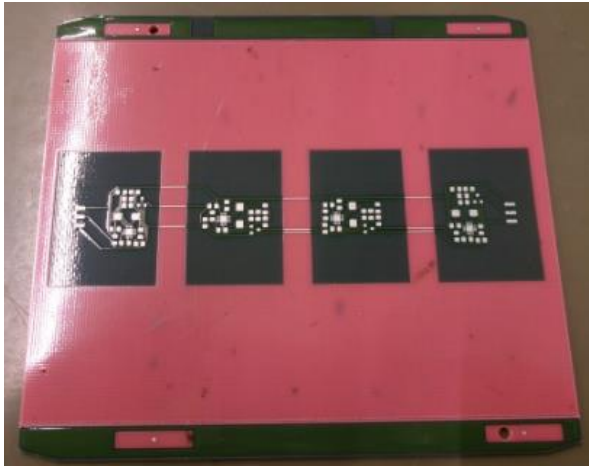
Das geschlossene Trägersystem hat sich sowohl bei dem Thermoplast A als auch bei dem Thermoplast B als richtige Wahl herausgestellt.

Musterfertigung mit endlosfaserverstärkten Organoblech

Um der in den vorrangegangenen Auswertungen erkannte Verwölbung und Schrumpfung bei dem kurzfaserverstärkten Organoblech weiter entgegenzuwirken, wurden die Organoblech-Leiterplatten vom Projektpartner mit Endlosfasern verstärkt (s. Abbildung 68).

Dadurch sollte der Versatz der Pastendepots bzw. die damit verbundenen Lötfehler (u.a. z.B. Zinnbrücken) weiter reduziert werden können und die allg. Stabilität erhöht werden. Die Muster wurden wie bei den vorherigen Musterdurchführungen zur Feuchtigkeitsreduzierung im Material auch wieder für 4 Stunden bei 80°C im Temperofen getempert.

Endlosfaserverstärkter Thermoplast A



Endlosfaserverstärkter Thermoplast B

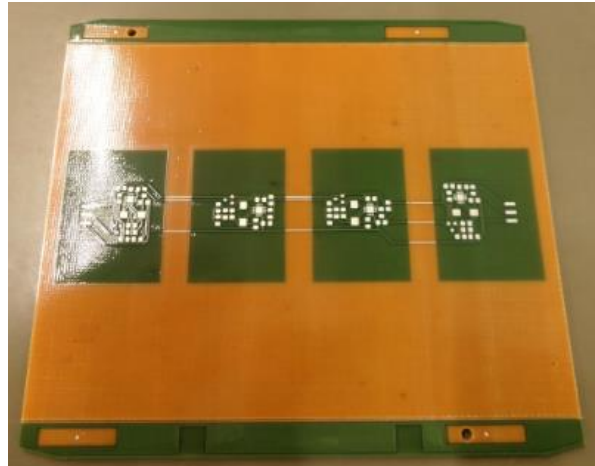


Abbildung 68: Endlosfaserverstärkte Organo-Leiterplatten

Beide Organo-Leiterplatten waren, wie in Abbildung 69 erkennbar, im Lieferzustand bzw. vor dem Tempervorgang und Fertigungsbeginn bereits leicht verzogen. Diese Spannungen im Material sind auf die Fertigungsverfahren vorgelagerten Fertigungsschritte zur Erstellung der Leiterplatte zurückzuführen.



Abbildung 69: Endlosfaserverstärkter Thermoplast B vor Trockenofen

Nach dem Tempervorgang war eine Reduzierung der Verspannung zu beobachten. Abbildung 70 zeigt die Verwölbung bzw. den Offset über alle Musterleiterplatten nach dem Temperofen.

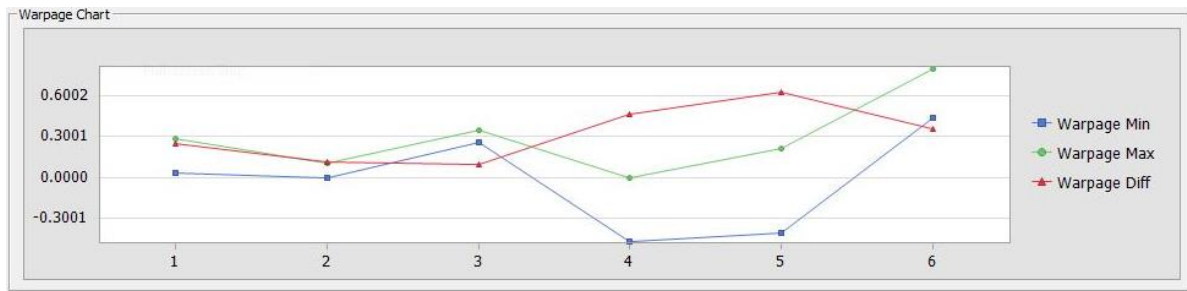
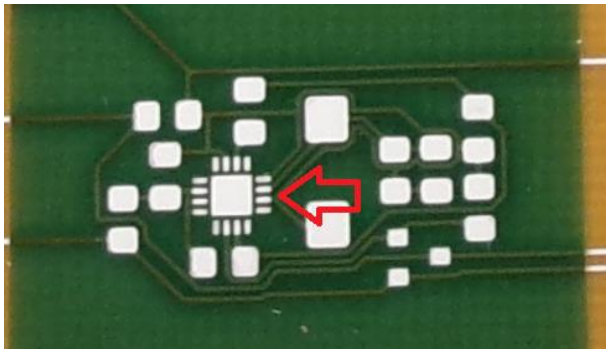


Abbildung 70: Offset Schrumpfung (Koh Young Technology SPI-Auswertung (statistische Prozesskontrolle (SPC)))

Die elektronische Schaltung auf den Organoblechplatinen wurden in zwei Varianten ausgeführt. Bei Variante 1 wurde der vom Projektpartner entwickelte ASIC-IC in der Bauform QFN und in Variante 2 in der CSP-Bauform designt. Die CSP-Bauform war dabei deutlich kleiner und damit verbunden die Toleranzbereiche ebenfalls (vgl. Abbildung 71).

Layout mit QFN-ASIC



Layout mit CSP-ASIC

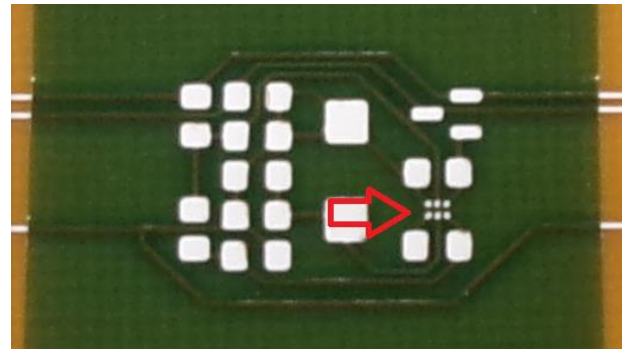


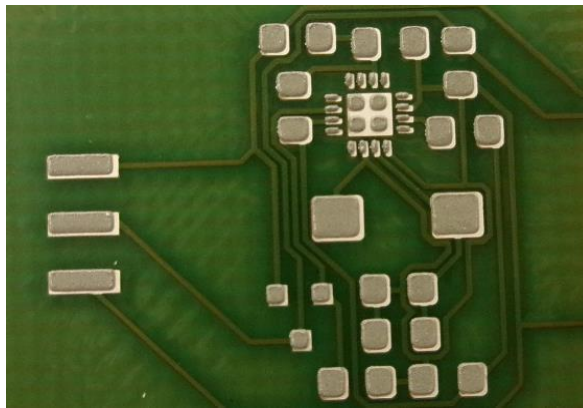
Abbildung 71: Layout QFN und CSP

Damit die Lötstellen die maximal mögliche mechanische Belastbarkeit hinsichtlich der späteren Verformung bei dem Projektpartner haben, wurde hier die Lötpaste mit der hochzuverlässigen Lötmetall-Legierung verwendet. Das Lötprofil wurde mit Hilfe des Messrahmens im Reflowofen auf die vom Hersteller vorgegebenen Temperaturbereiche konfiguriert. Als Trägersystem für das Organoblech wurde wieder die geschlossene Trägerversion eingesetzt.

Auswertung Pastendruck und Löttergebnis

Im Vergleich zu den kurzfaserverstärkten Organoblech in den ersten Fertigungsversuchen konnte die Schrumpfung durch die Langfaserverstärkung deutlich reduziert werden. Damit verbunden verkleinerte sich ebenfalls der Versatz der Lötpastendepots zu den Kupferpads der elektronischen Schaltung auf der Leiterplatte (s. Abbildung 72). Den geringsten Offset zeigte der Pastendruckversuch auf das Organoblech mit dem CSP-Layout.

Pastendruckversatz QFN-Layout



Pastendruckversatz CSP-Layout

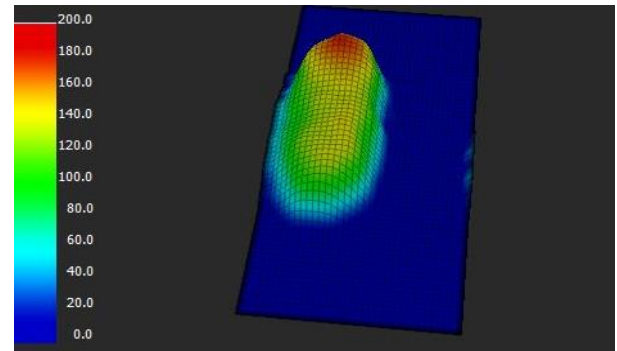
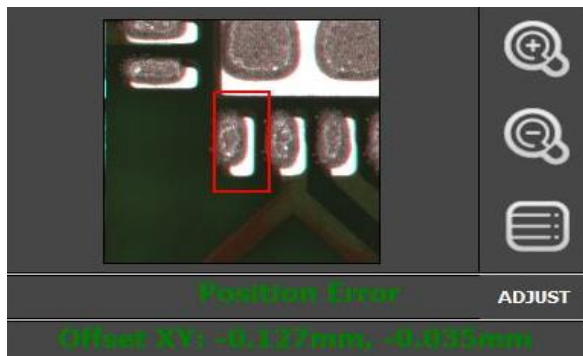
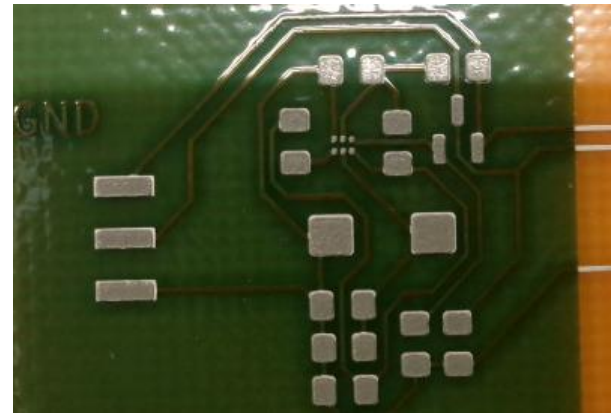


Abbildung 72: Druckversatz und Versatzmessung Pastendepot
(Koh Young Technology SPI-Auswertung
(statistische Prozesskontrolle (SPC)))

Auch die maximale Höhe der Pastendepots fällt im Gegensatz zu den Vorversuchen geringer aus, wodurch das Risiko von auftretenden Lötperlen nach dem Reflowprozess gesenkt wird. Das folgende Diagramm zeigt den Offset über den Toleranzbereich hinaus über alle OrganoblechLeiterplatten die als Muster vorlagen. Dabei ist zu beobachten, dass die Abweichung auf der X-Achse größer als auf der Y-Achse war (Abbildung 73). Alle kleineren Pastendepots lagen dabei aber zu über 50% auf den Kupferpads auf, was die Fehlerwahrscheinlichkeit im Lötprozess reduzierte.

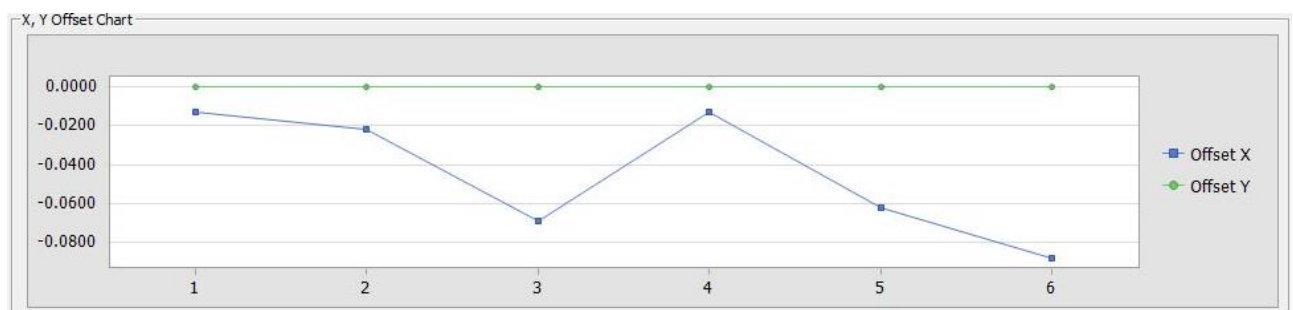


Abbildung 73: Offset Druckversatz (Koh Young Technology SPI-Auswertung
(statistische Prozesskontrolle (SPC)))

Das Lötergebnis spiegelt die geringere Verwölbung und Schrumpfung bei den endlosfaserverstärkten OrganoblechLeiterplatten wieder. Bei der automatisierten optischen Inspektion der bestückten Bauteile zeigten sich keine Lötfehler wie Zinnbrücken o.ä. (s. Abbildung 74).

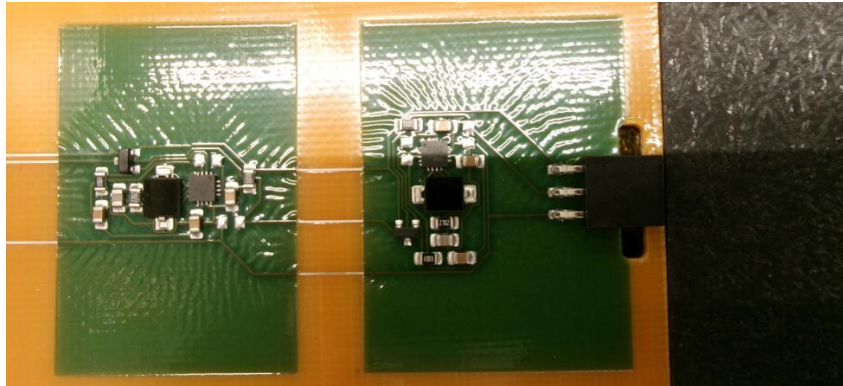


Abbildung 74: Lötstellen Thermoplast B (endlosfaserverstärkt)

Der Lötstopplack hat durch den Temperatureintrag in das Material eine deutlich sichtbare Struktur gebildet. Es gab aber keine kritische Ablösung oder Blasenbildung des Lötstopplacks um die Anschluss pads der Bauteile durch den Reflowprozess. Lediglich in den Randbereichen der Leiterplatte gab es an einigen Stellen Delamination im Material (s. Abbildung 75).

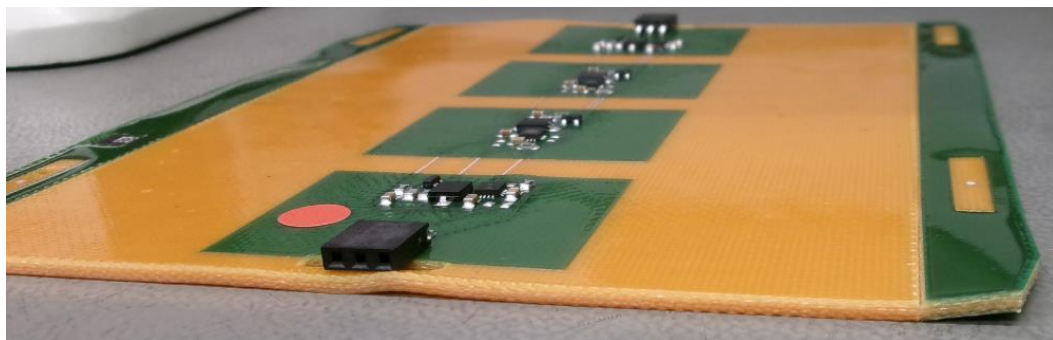


Abbildung 75: Delamination im Randbereich

Die elektrische Funktionsprüfung bei dem Projektpartner EDC bestätigte das positive Prozessergebnis, da der Funktionstest bestanden wurde.

4.1.5 AP: 1.13: Aufbau von Vergusskavitäten für belastungsgerechte Schutzbeschichtungen und Probekörper

Um die bestückten Bauteile ggf. nach dem Verformungsprozess vor mechanischen, klimatischen oder aggressiven Medien zu schützen, wurde in diesem Arbeitspaket untersucht, ob eine Vergussmasse auf die Thermoplast-Materialien aufgebracht werden

kann. Die Wahl fiel dabei auf eine Vergussmasse, die bei elektronischen Komponenten eingesetzt werden kann und von einem der Projektpartner auf die Eignung getestet wurde. Sie bestand dabei aus einer Harzkomponente und einer Härterkomponente.

Da die Bauteile im bestückten Zustand auf dem Organoblech eine Höhe von 5 mm haben, musste vor dem eigentlichen Verguss ein Damm mit einem Lack oder Kleber gebildet werden. Damit war die genaue Positionierung der Vergussmasse bis zur Aushärtung auf der Leiterplatte möglich. Für den Damm im Vergusstest wurde ein thixotroper Lack eingesetzt. In Abbildung 76 ist die Vergussmasse (blau) und der thixotroper Lack (schwarz) nach dem Verguss abgebildet.



Abbildung 76: Vergusstest

Das Dammmaterial als auch das Vergussmaterial haftet sehr gut an den Organoblechplatinen und kann dadurch als Schutz der elektronischen Komponenten eingesetzt werden.

4.1.6 AP 1.14: Ableiten von Gestaltungsrichtlinien für die Bestückung und Belotung von organoblechbasierten Leiterplatten

Aus den oben genannten Versuchsdurchführungen, den Ergebnissen und Beobachtungen lassen sich folgende Gestaltungsrichtlinien ableiten, die die Bestückung und Belotung der organoblechbasierten Leiterplatten ermöglicht haben.

Auslegung einer bestückbaren OrganoblechLeiterplatte

Um die Fläche des Produktionspanels voll auszunutzen, wurde ein Produktionsnutzen (s. Abbildung 77) nach folgenden Kriterien entwickelt. Dieser Aufbau allg. ist notwendig, damit alle optischen Mess-Systeme in der Produktionslinie die Musterleiterplatte korrekt Einlesen können und sich u.a. der Pastendruck und das Bestücksystem korrekt automatisch justieren.

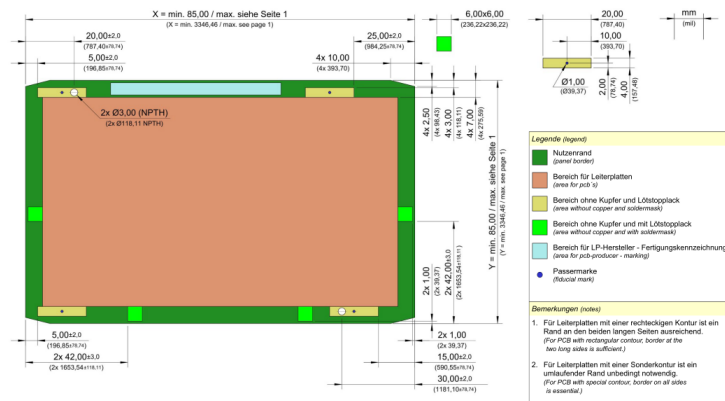
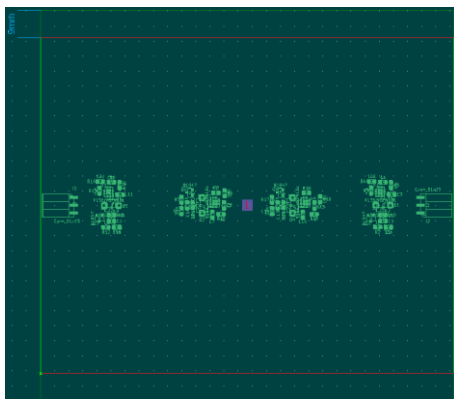


Abbildung 77: Nutzenvorgaben, Referenzmarken usw.

Zur exakten Positionierung der Bauteile auf den Kupferpads der organoblechbasierten Leiterplatte müssen Referenzmarken auf der Leiterplatte vorhanden sein. Über diese Marken kann zum einen der Offset zu den digital vorliegenden Datensatz zur Leiterplatte bestimmt werden und zum anderen die Position der Bauteile auf dem Layout ermittelt werden. Je nach Abmessung der Organoblechplatine kann auch ein Nutzen mit mehreren Einzel-Leiterplatten aus Organoblech mit einem abtrennbaren Nutzenrand konstruiert werden. Die Referenzmarken können dabei auf den Nutzenrand, der nicht zwangsweise als umlaufender Rand ausgeführt sein muss, verlegt werden und nach der Bestückung bzw. dem Lötprozess über eine Ritzkante abgetrennt werden. Auf dem Rand kann ebenfalls eine Kontrollbohrung (Verdrehschutz) und ggf. ein Platz für einen 2D-Code für die Rückverfolgbarkeit vorgesehen werden. Der Nutzenrand dient ebenfalls zur Klemmung und dem Transport innerhalb der Bestücklinie. Diese Elemente sind in Abbildung 78 am Beispiel der Musterleiterplatte des Funktionsmusters dargestellt.

Prinzipzeichnung



finale Konstruktion

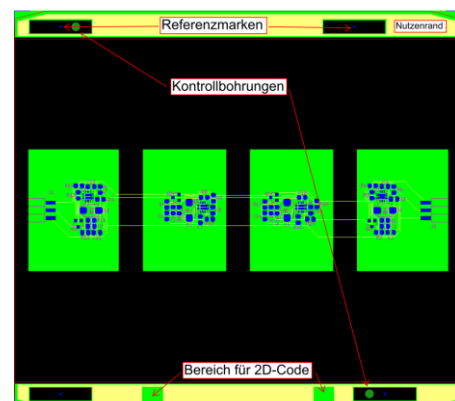


Abbildung 78: Konstruktion Organoblech mit Leiterzügen

Da diese Referenzmarken über optische System am Bestückautomat eingelesen werden, ist darauf zu achten, dass ein für die optischen Systeme gutes Kontrastverhältnis

vorherrscht. In den ersten Versuchen zeigte sich, dass es bei dem Material ohne Farbpigmentzugabe zu Problemen beim Einlesen der Referenzmarken kam (vgl. Abbildung 79). Dadurch sollte bei dem Organoblech ein Farbanteil beigemischt werden, da dadurch ein besseres Kontrastverhältnis bei optischen Messsystemen gegeben ist.

Referenzmarke Organoblech (o. Färbung)



Referenzmarke FR4

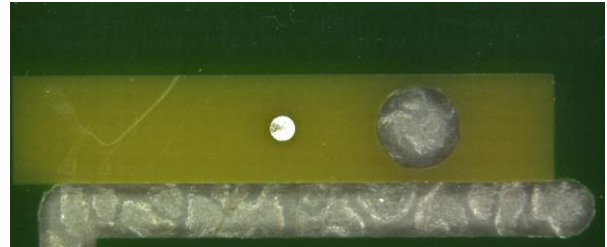


Abbildung 79: Referenzmarken ungefärbtes Organoblech im Vergleich zu FR4

Maßnahmen zur Feuchtigkeitsreduzierung im Organoblech

Da bei den Versuchen mit den Materialproben Verformungen aufgetreten sind, wurden alle Muster mit elektrischer Schaltung vor dem Bestückungsversuch getempert. Die Restfeuchtigkeit im Material sollte damit unmittelbar vor der Bestückung und anschließend dem Lötprozess gesenkt werden, um damit die Verwölbung zu reduzieren. Die unbestückten Rohleiterplatten wurden für 4 Stunden bei 80 °C vor den Bestücktests getempert. Abbildung 80 zeigt, dass die kurzfaserverstärkten Baugruppen nach dem Tempern auch leicht wellig geworden sind, was bei den langfaserverstärkten Organoblechplatten weiter reduziert werden konnte. Bei der Oberfläche von dem Thermoplast A und Thermoplast B beider Varianten wurden durch den Temperatureintrag bei 80°C keine nennenswerten Veränderungen festgestellt.



Abbildung 80: Organoblech nach Temperofen

Gestaltung Trägersystem

Bei der Konstruktion der Leiterplattenträger sollte versucht werden, den Temperatureintrag bei dem Reflowprozess auf das nötige Maß zu reduzieren, um damit die Schrumpfungerscheinungen und Verwölbung der OrganoblechLeiterplatte im Toleranzbereich zu halten. Das Material des Trägersystems sollte wie im Kapitel der

Trägersysteme beschrieben so ausgelegt sein, dass es bei den Temperaturen im Reflowofen eingesetzt werden kann und eine chemische Widerstandfähigkeit gegen die Inhaltstoffe zum Beispiel der Lötpaste besitzt.

Auslegung der Pastenschablone und Lötssystem

Bei der nach zahlreichen Testdurchläufen im Forschungsprojekt gefundenen Materialzusammensetzung für das Organoblech haben die nötigen Temperaturen der hochstabilen Lötpaste im Reflowprozess nicht zu negativen Auswirkungen auf das Lötresultat geführt. Die zu Projektbeginn aufgetretene hohe Verwölbung und Schrumpfung konnte durch die Materialanpassungen vom Projektpartner Stück für Stück auf ein verträgliches Niveau hinsichtlich der einzuhaltenden Toleranzen im Lötprozess angepasst werden. Der daraus resultierte mögliche Einsatz der hochstabilen Lötpaste hatte positive Auswirkungen auf die Lötverbindung zwischen elektr. Bauteilen und der Kupferpads auf dem Organoblech bei dem späteren Verformprozess.

Ebenfalls konnte das Druckergebnis der Paste durch gezielte Anpassungen der Aperturen in der Pastenschablone bei den kritischen kleinen Bauteilen optimiert werden. Je nach Bauform und eingesetzter Lötpaste mussten die Aperturen angepasst und validiert werden. Für das im Forschungsprojekt eingesetzte Organoblech lieferte eine Pastenschablone mit einer Stärke von 80 µm das beste Ergebnis. Diese Schablonenstärke hat die Toleranzschwankung am besten ausgeglichen.

5 Entwicklung eines integrierten Mikroschaltkreises (IC) zur strukturkonformen Einbettung in Leichtbaustrukturen

5.1 AP 1: Mikroelektronik für Einbettung in Organobleche

5.1.1 AP 1.1: Anforderungen an das mikroelektronische System

Sicherheits-Lichtvorhänge werden zum Schutz von Fabrikpersonal weltweit eingesetzt. Obwohl die Technologie seit fast 70 Jahren bekannt ist, kommen immer wieder neue Entwicklungen hinzu, welche erweiterte Möglichkeiten für Konstruktion und Funktion des Sicherheits-Lichtvorhangs ermöglichen.

Anstelle einer üblichen FR4-Leiterplatte soll ein Faserverbundwerkstoff verwendet werden. Der Faserverbundwerkstoff kann thermisch umgeformt werden. Das ermöglicht die Verwendung des Leitungsträgers als dreidimensional geformtes Konstruktionsbauteil.

Der Lichtvorhang basiert auf einer optischen Strecke, bestehend aus LED und Photodiode (vgl. Abbildung 81). Der Ausgangsstrom der Photodiode soll durch einen MOSFET in der Elektronik der LED schaltbar sein. Damit der Sicherheitsvorhang auch bei sehr hellem Umgebungslicht funktioniert, besteht die Herausforderung in dem extremen Verhältnis dunkel zu hell von 1 zu 1,00002. Das entspricht 0,02 Promille. Weiterhin ist die Anforderung an die erforderliche Flankensteilheit kleiner $1\ \mu\text{s}$.

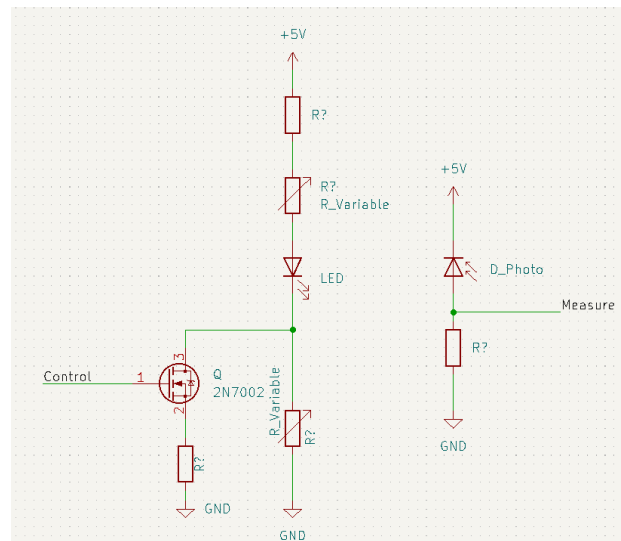


Abbildung 81: Elektronik und optische Strecke

Mit Hilfe einer auf FR4 aufgebauten Schaltung (s. Abbildung 82) sollen in einem ersten Schritt vergleichende Experimente durchgeführt werden, die später, bei Verwendung von Organoblech, zur Verifikation herangezogen werden können. Hierbei sollen Einflüsse von Schaltungskomponenten, der verwendeten Messtechnik, des eingesetzten Messaufbaus und -ablaufs sowie mechanischer Belastungen untersucht werden.

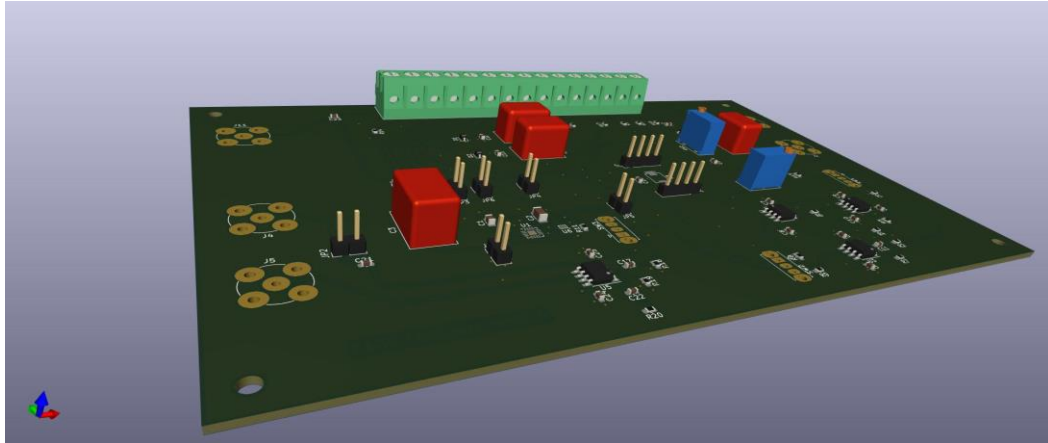


Abbildung 82: Visualisierung des eingesetzten Testboards

5.1.2 AP 1.2: Erforschung der Einflüsse der mechanischen Verformung und Belastung

Mechanische Belastung von Silizium-Strukturen spielen insbesondere bei Mikro-Elektro-Mechanischen-Systemen (MEMS) eine große Rolle, weil diese Chips Funktionen (bspw. Vibrations-Erkennung) in der mechanischen Domäne ausführen. Je empfindlicher diese MEMS-Sensoren ausgelegt werden umso stärker wirken sich mechanische Verspannungen auf sie aus, welche durch die Befestigung auf dem Schaltungsträger (bspw. Kleben oder Löten) entstehen. In diesem Anwendungsbereich liegt die Ursache in veränderten Federkonstanten von elastischen Strukturen. Ein Lösungsansatz besteht darin die Fläche zu minimieren, auf die mechanische Spannungen wirken. [1] Dieser Ansatz lässt sich auch für rein elektronische ICs (wie den SSC im Struktronik-Projekt) anwenden und führt zu der Anforderung nach minimaler Chip-Fläche zur erfolgreichen Integration auf Schaltungsträgern die mechanischen Spannungen (Verformungen) unterworfen sind.

Der SSC-IC, mit dem im Struktronik-Projekt die Anwendung umgeformter Organobleche als Schaltungsträger demonstriert wird, kann im Chip-Scale-Package (CSP) mit Abmessungen von lediglich $1,4 \times 1,0 \text{ mm}^2$ geliefert werden, wodurch der mechanische Stress auf die elektrischen Kontakte minimiert wird. Alle zeitkritischen Signale und empfindlichen Messungen werden direkt auf dem Chip durchgeführt. Der Schaltungsträger und die Anschluss-Leitungen haben somit keinen größeren Einfluss auf die Schaltung als bei einem herkömmlichen FR4-Schaltungsträger.¹

[1] An, J.E.; Park, U.; Jung, D.G.; Park, C.; Kong, S.H. Die-Attach Structure of Silicon-on-Glass MEMS Devices Considering Asymmetric Packaging Stress and Thermal Stress. *Sensors* **2019**, *19*, 3979. <https://doi.org/10.3390/s19183979>

5.1.3 AP 1.3: Schaltungskonzepte und Optimierungen

Die Applikation „Sicherheits-Lichtschanke“ erfordert drei wesentliche Unterbaugruppen:

1. Steuerung und Auswertung:

Mikrocontroller bieten ausreichend Rechenleistung und sind einfach anzuwenden. Sie eignen sich daher zur Steuerung der Lichtschanke und zur finalen Bewertung der aufbereiteten Sensorsignale.

Während der Entwicklungsphase erfolgt die Steuerung und Auswertung durch Messequipment (Laborgeräte).

2. Lichtquelle:

LED(s) mit Vorwiderstand zur Strombegrenzung erzeugen Lichtsignale um den zu überwachenden Bereich abzudecken. Zur Unterscheidung der Signale für die Lichtschanke von Umgebungslicht ist es zweckmäßig eine markante Signalform zu verwenden. Eine Folge von Impulsen lässt sich ausreichend deutlich von natürlichen Helligkeitsschwankungen unterscheiden.

3. Lichtempfänger:

Eine Photodiode (PD) als Lichtsensor liefert zum Teil nur wenige Mikroampere als Ausgangssignal und muss mit einer elektrischen Spannung betrieben werden. Diese Aufgaben und die Bereitstellung eines Ausgangssignals mit definiertem Strompegel übernimmt ein SSC-IC („PhotoRX“) innerhalb einer Lichtempfänger-Schaltung.

Es können beliebig viele Lichtempfänger miteinander verbunden und verwendet werden, sodass sich ohne weiteres großräumige Lichtschranken realisieren lassen: s. Abbildung 83.

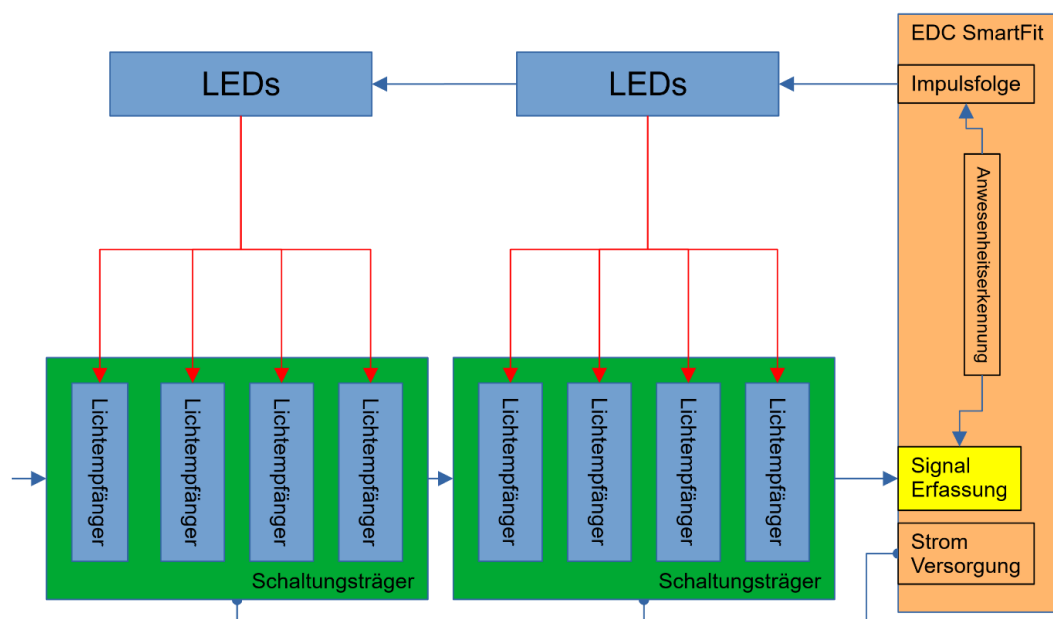


Abbildung 83: Schematische Darstellung des Funktionsdemonstrators „Lichtschanke“ mit zwei Schaltungsträgern (mehr wären möglich)

Das o.g. Konzept muss einen Zielkompromiss finden. Dieser sollte einerseits eine hohe Empfindlichkeit sicherstellen, um einen sehr großen Abstand zwischen LED und Photodiode zu ermöglichen. Andererseits muss er einen großen Dynamikbereich aufweisen, um auch bei kleinen Abständen zwischen LED und Photodiode nicht zu übersteuern. Darüber hinaus ist eine wirksame Unterdrückung von Störlicht wichtig, insbesondere hervorgerufen durch verrauschte Lichtströme der Raumbeleuchtung. Um diesen Kompromiss zu finden, können die Bauteilwerte der Außenbeschaltung und die Erkennungsschwelle des PhotoRX optimiert werden.

Zunächst wurde eine Schaltung für die Lichtempfänger-Schaltung entworfen und realisiert. Eine zusätzlich eingeführte Kollektor-Schaltung ermöglicht den parallelgeschalteten Betrieb mehrerer Lichtempfänger an nur einer drei-adrigen Leitung, wobei trotzdem noch von der Auswertungseinheit erkannt wird, wenn nur ein Lichtempfänger keine Impulse mehr erkennt, weil sich beispielsweise eine Hand in der Lichtschranke befindet. Die Entwürfe sind in Abbildung 84 bis Abbildung 87 dargestellt.

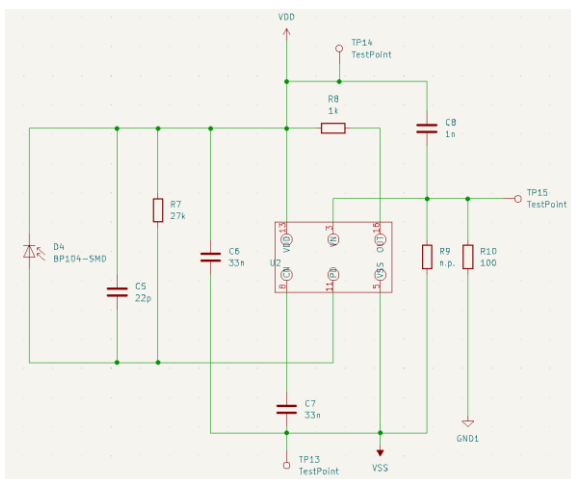


Abbildung 84:
Schematic der entworfenen
Lichtempfänger-Schaltung

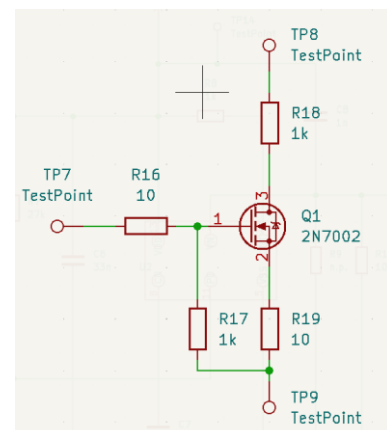


Abbildung 85:
Schematic der entworfenen
Kollektor-Schaltung

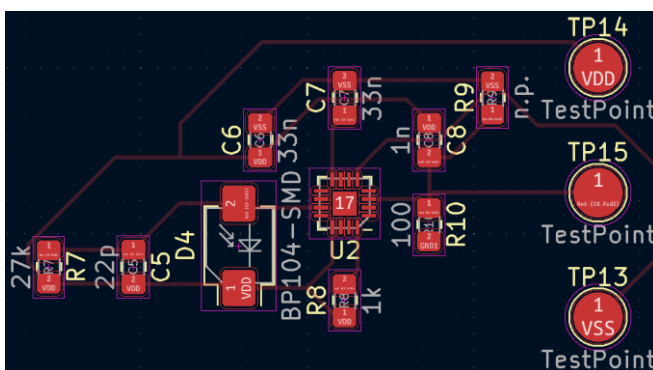


Abbildung 86:
Layout der entworfenen Lichtempfänger-
Schaltung (QFN-Package)

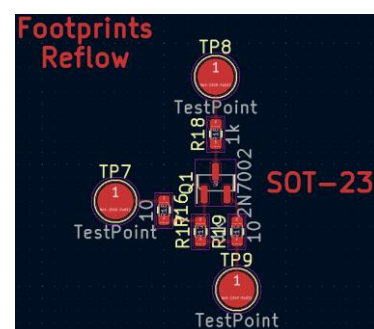


Abbildung 87:
Layout der entworfenen Kollektor-
Schaltung

Die drei Signale Versorgungsspannung („VDD“), Masse („GND1“) und Signalausgang („OUT“, logisches UND aller verbundenen Lichtempfänger) liegen in der nächsten Schaltungsrevision auf einem einzigen Stecker. Jeweils vier Lichtempfänger-Systeme in Reihe sind auf einem Schaltungsträger zusammengefasst. Beliebige viele Schaltungsträger können miteinander verbunden werden. Die Schaltungen dazu enthalten Abbildung 88 und Abbildung 89.

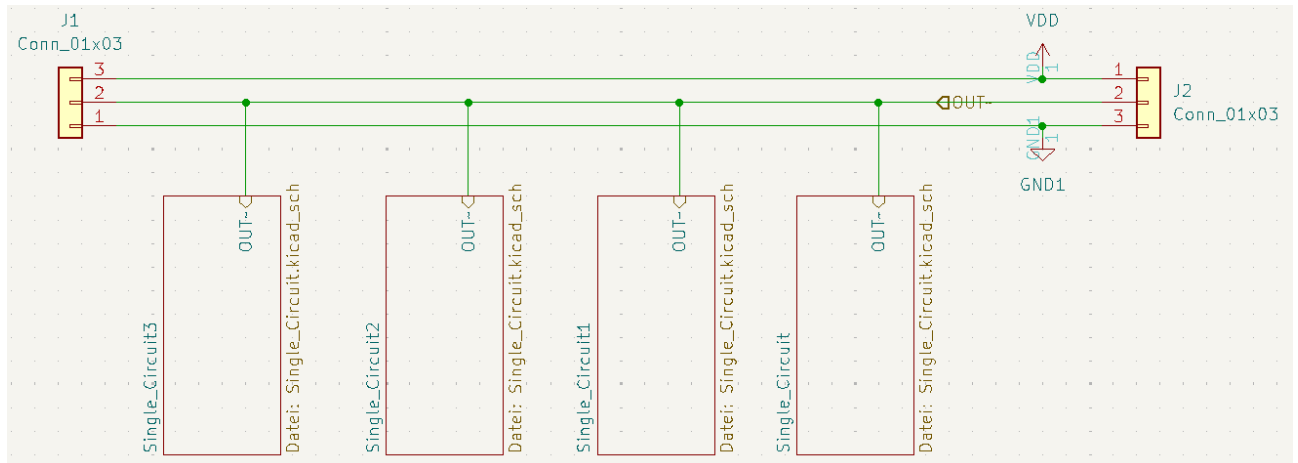


Abbildung 88: Anordnung der vier Lichtempfänger auf einem Schaltungsträger

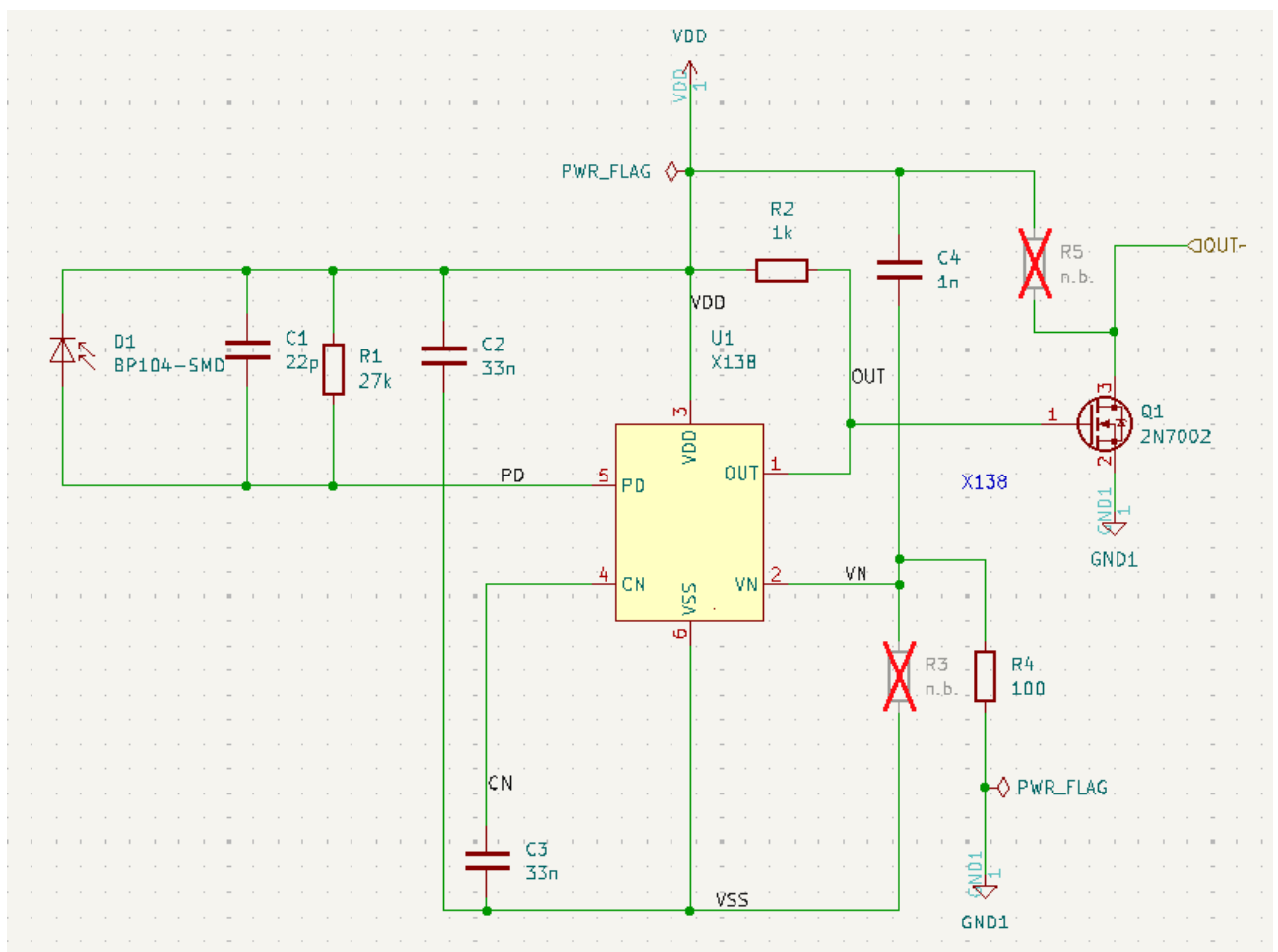


Abbildung 89: Schaltung eines der Lichtempfänger

5.1.4 AP 1.4: Entwicklung der Schaltungskomponenten und IC-Layout

Der zu entwerfende IC sollte, wie beschrieben, die Eingangsbeschaltung (Photodiode und Parallel-Widerstand) geeignet bestromen, DC-Photoströme (Umgebungslicht) von dynamischen Stromimpulsen (Nutzsignal) abziehen können, Störungen unterdrücken und mit einer geringen Stromaufnahme auskommen.

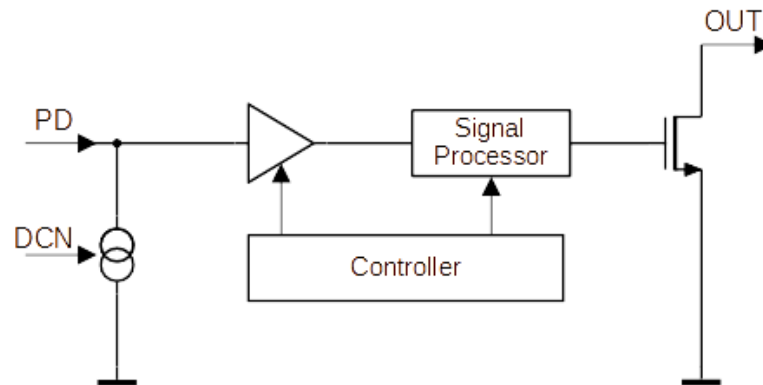


Abbildung 90: Blockschaltbild IC

In Abbildung 90 ist das Blockschaltbild des IC schematisch dargestellt. Über den Eingang PD wird das Signal des Eingangskreises mit der Photodiode eingespeist, über den Eingang DCN wird die Höhe des abzuleitenden ungewollten DC-Photostromes eingestellt. Über den Verstärker wird das Eingangssignal variabel verstärkt, der Signal-Processor bereitet das Signal auf (Filterung, Shaping, Timing), bevor es der Ausgangsstufe zugeführt wird. Der Controller-Block sorgt für die Einstellung der Verstärkung und dient der Kalibrierung einiger Parameter während des Tests.

Für den Systementwurf wurde das Tool MathCad Simulink benutzt, für den Schaltungs- und Layoutentwurf wurden Tools der Firma Cadence benutzt. Als Halbleiter-Technologie wurde eine 180nm-Technologie der koreanischen Firma Dongbu Hitek (DBH) eingesetzt. DBH stellte das notwendige Process Design Kit (PDK), Device-Libraries und Rulefiles zur Verfügung. Mit diesen Werkzeugen konnten die Schaltungen erstellt, simuliert und das Layout erstellt werden. Am Ende wurden die GDS-Daten (Chip-Layout) an DBH übergeben. DBH erzeugte in eigener Regie die Maskendaten, ließ den Maskensatz herstellen und prozessierte die Wafer. Diese wurden dann an EDC zum Wafertest und für folgende Arbeitsschritte übergeben.

Der entworfene Chip weist eine Kantenlänge von <1,2 mm im Chip-Scale-Package (CSP) auf, wodurch er unempfindlicher für mechanische Spannungen des Schaltungsträgers ist, als größere ICs. Trotzdem wurden auch Muster im größeren QFN-Package hergestellt, mit denen erste Bestückungs-Versuche erfolgreich von den Projektpartnern durchgeführt werden konnten.

5.1.5 AP 1.5: Tests am PhotoRX auf Wafer-Level

Der Test des entwickelten SSC-ICs stellt hohe Ansprüche an die Messgenauigkeit, weil zwei Parameter des ICs in Abhängigkeit der Messwerte dauerhaft konfiguriert werden. Zu diesem Zweck wurden mehrere Revisionen einer Messschaltung entwickelt, die mit einem Nadelkranz bestückt werden kann, wie in Abbildung 91. Auf diesem Weg können die Pads des SSC-ICs kontaktiert werden, während er sich noch im Waferverband befindet. Nicht-funktionale ICs – beispielsweise am Waferand – können so frühzeitig verworfen werden und verursachen beim Packaging (Lot-Bumps) und bei der Bestückung keine unnötigen Kosten. Die Produktions-Sicherheit steigt.

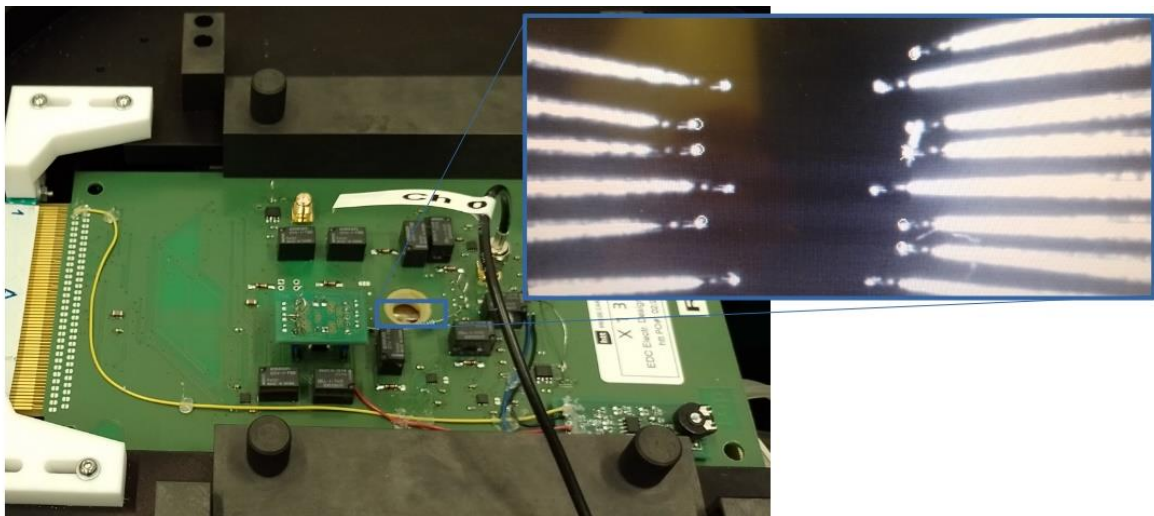


Abbildung 91: Prototyp (in Entwicklung) einer Probecard für den Wafer-Level-Test von SSC-ICs

Mit dem kontinuierlich verbesserten Messaufbau konnten große Stichprobenumfänge getestet werden. Deren Ergebnisse lassen sich in sogenannten Wafermaps darstellen wie in Abbildung 92. Jeder Pixel entspricht einem SSC-ICs und seine Farbe entspricht dem jeweiligen Messwert. So wird deutlich, dass die Chips am Rand des Wafers eine zu große (rot) oder zu kleine (blau) Stromaufnahme besitzen und aussortiert werden müssen.

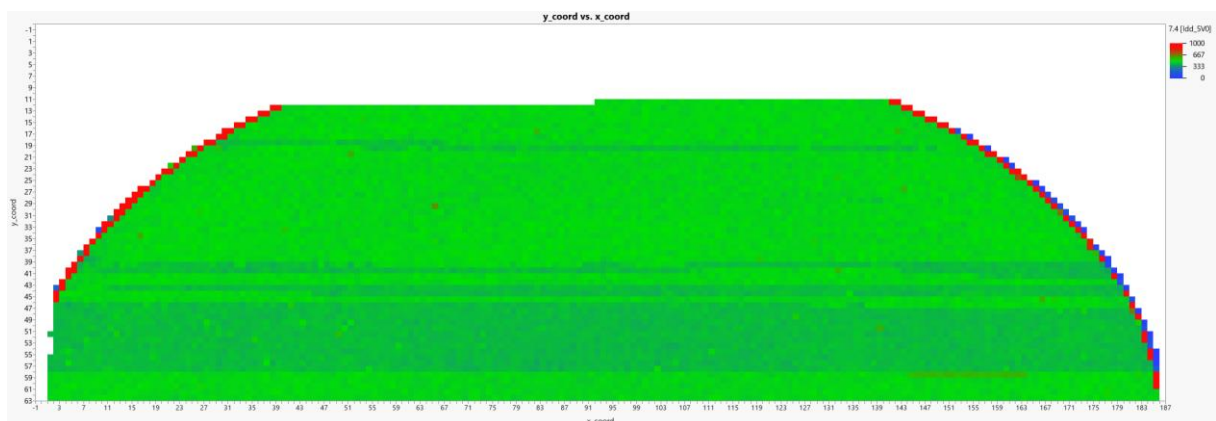


Abbildung 92: Teil eines Wafers mit Messergebnissen zur Stromaufnahme

Eine statistische Auswertung, wie in Abbildung 93 gezeigt, kann selbstverständlich auch erfolgen. Sie wäre Grundlage für die Berechnung der sog. Waferausbeute, also dafür wie viele Gut-Chips auf einem Wafer gemessen wurden.

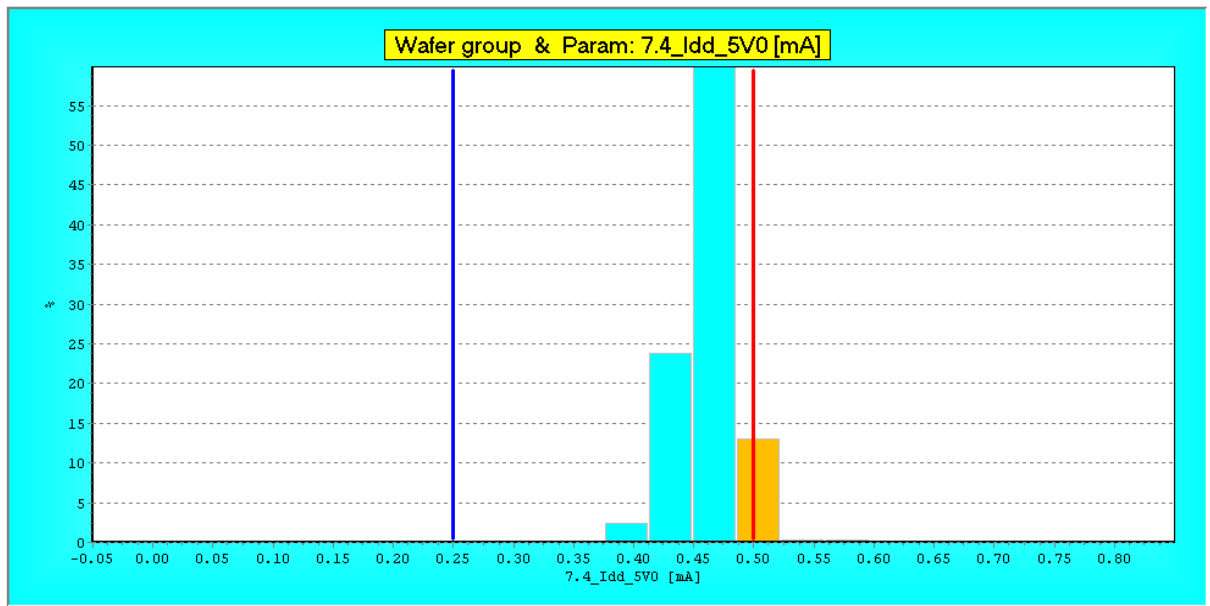


Abbildung 93: Statistische Verteilung der Stromaufnahme als Beispiel für einen von dutzenden Messwerten

Die große Ausfallrate am Waferrand spiegelte sich auch bei der Messung von SSC-ICs, welche noch vor dem Wafer-Level-Test (WLT) gesägt, offenbar vom Waferrand entnommen und in standardisierte QFN-Packages eingesetzt wurden. Abbildung 94 zeigt den entsprechenden Messaufbau mit der Adaptierung für diese Gehäuseform und die vorbereiteten Muster in einem sog. Waffle-Pack.

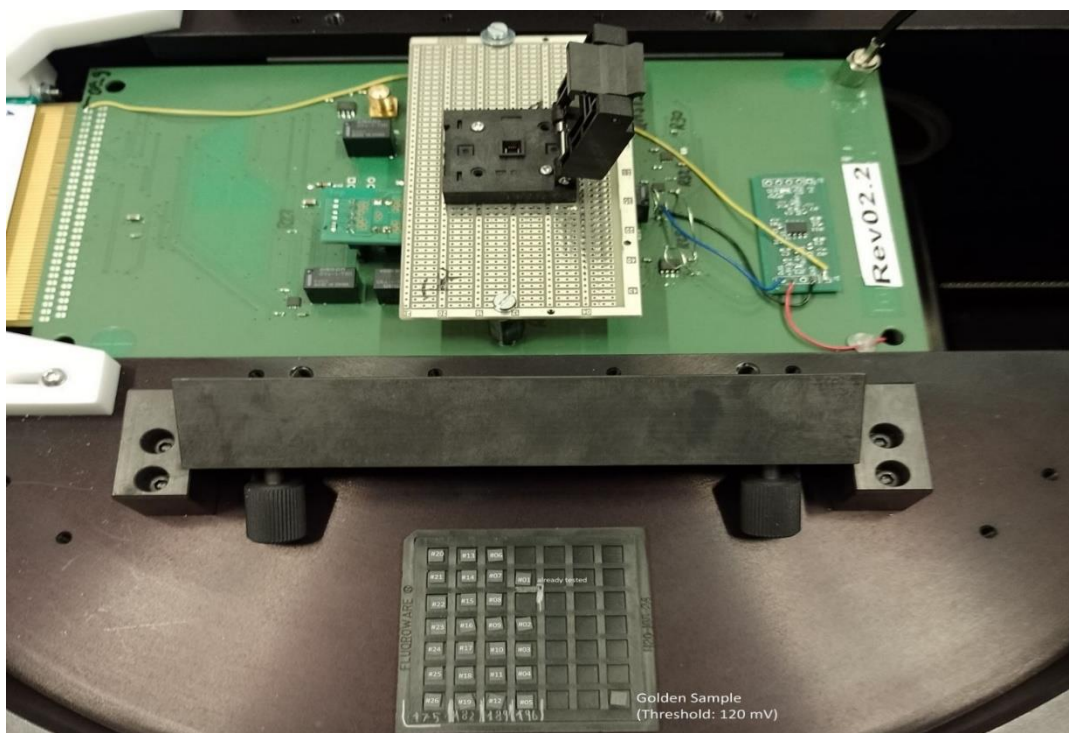


Abbildung 94: Vorbereitung und Test der QFN-Chips für den Aufbau eines Demonstrators

Das QFN-Package lässt sich einfacher bestücken und wurde daher für den Aufbau der ersten Demonstratoren gegenüber dem CSP (quasi „Bare Die“) favorisiert. Entsprechend der Erfahrungen mit den vorangegangenen Versuchen wurde die Empfindlichkeitsschwelle der SSC-ICs hochgesetzt. Damit ist das Gesamtsystem „Lichtschranke“ immer noch ausreichend empfindlich, gleichzeitig aber weniger anfällig für Störungen und ungewollte Erkennung („Falsch-Erkennung“ von einfallendem Licht).

5.1.6 AP 1.6: Charakterisierungen, Qualifizierung, Optimierung

Mit der Schaltung aus AP 1.3 konnte die Funktion der Applikationsidee „Lichtschranke“ mit Hilfe eines Standard FR4-Schaltungsträgers nachgewiesen werden. In Abbildung 95 bis Abbildung 97 wird das anhand der Antwort-Impulse der Schaltung (gelbe Kurve auf dem Oszilloskop-Bildschirm) auf die Anregung durch eine LED (grüne Kurve) im Falle einer unverdeckten optischen Strecke ersichtlich.

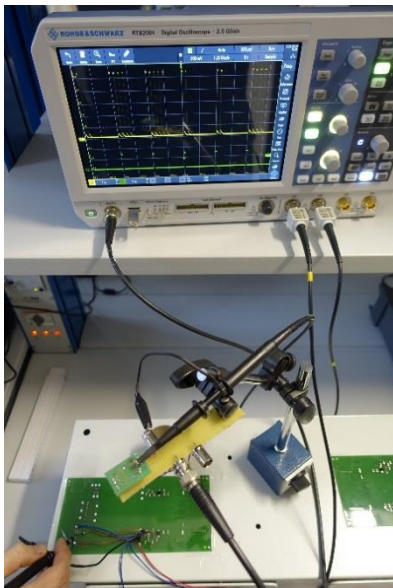


Abbildung 95:
Messaufbau ohne PD-
Abschirmung – Falsch-
Impulse

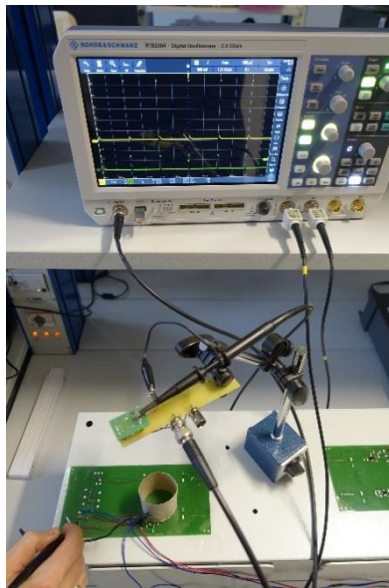


Abbildung 96:
Messaufbau mit PD-
Abschirmung – keine Falsch-
Impulse

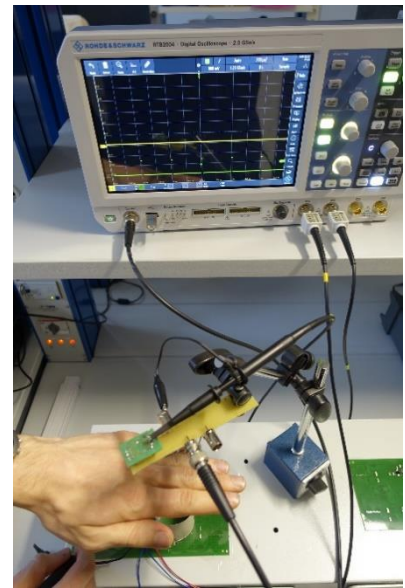


Abbildung 97:
Messaufbau mit PD-
Abschirmung –
Handerkennung

An diesem Aufbau konnte der Einfluss einer Vergussmasse erprobt werden, siehe Abbildung 98 und Abbildung 99.

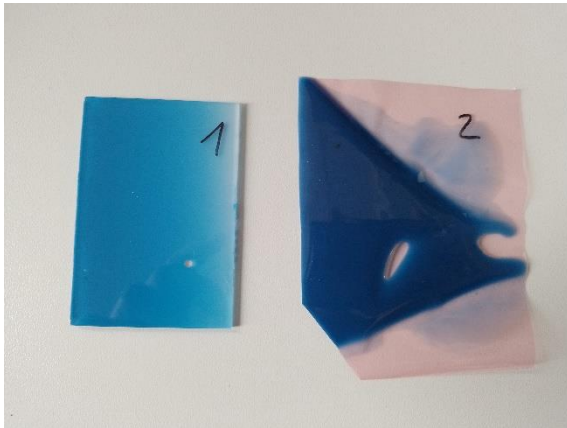


Abbildung 98: Proben der Vergussmasse

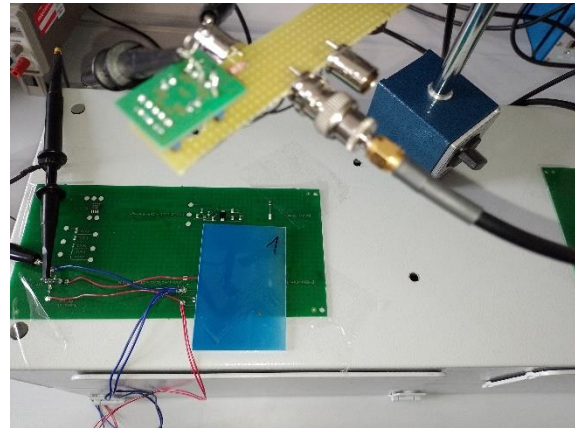


Abbildung 99: Aufbau mit Probe #1

Dabei konnten zwei grundlegende Erkenntnisse gewonnen werden:

1. Die Licht-Absorption der Vergussmasse ist nur gering.
2. Ihr Einfluss kann mit einer Erhöhung der LED-Versorgungsspannung um nur 0,04 V vollständig kompensiert werden.

Der Technologiesprung vom QFN- auf das CSP-Package konnte ebenfalls erprobt werden. Von zwei aufgebauten Schaltungen funktionierte eine wie erwartet und vergleichbar zu den QFN-Mustern, siehe Abbildung 100.

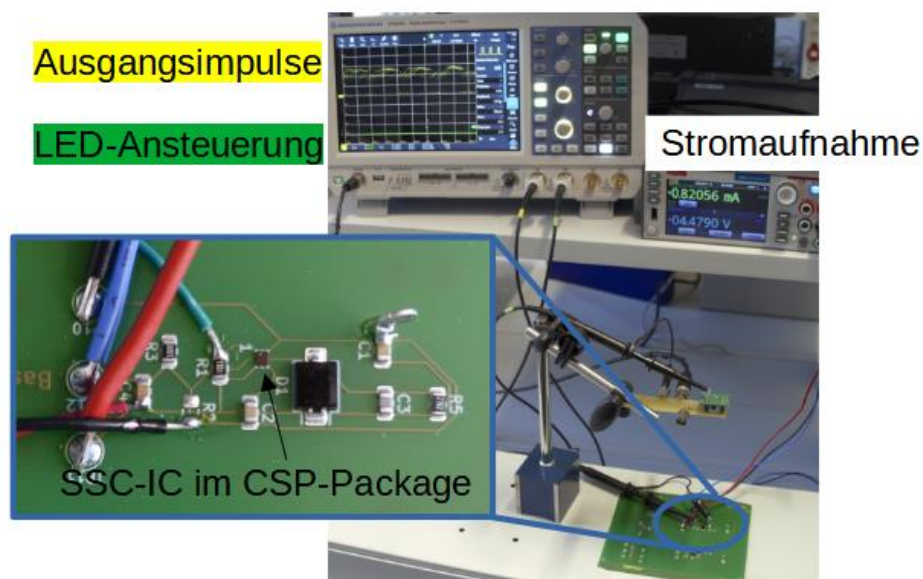


Abbildung 100: Messung eines Lichtempfängers mit SSC-IC im CSP-Package

An der anderen zeigte sich ein Verhalten an den Pins, welches entweder auf eine Beschädigung durch ein ESD-Ereignis oder durch eine falsche Orientierung bei der

Bestückung hindeutet. Letzteres wäre ein Problem, dass u.a. aus der fehlenden Beschriftung auf dem blanken Silizium-Chip resultiert.

Das Demonstrator-Konzept aus Abbildung 83 kombiniert auf jedem Schaltungsträger mehrere Lichtempfänger. Außerdem soll der Schaltungsträger nicht aus FR4-Material, sondern aus Organoblech bestehen. Dieser wichtige Schritt im Projekt-Verlauf konnte erfolgreich für mehrere Arten von Organoblech jeweils mit SSC-ICs im QFN-Package erprobt werden, wie Abbildung 101 und Abbildung 102 zeigen. Auf dem darauf abgebildeten Oszilloskop ist die Reaktion aller vier Lichtempfänger-Schaltungen als Impuls in der gelben Kurve zu sehen.

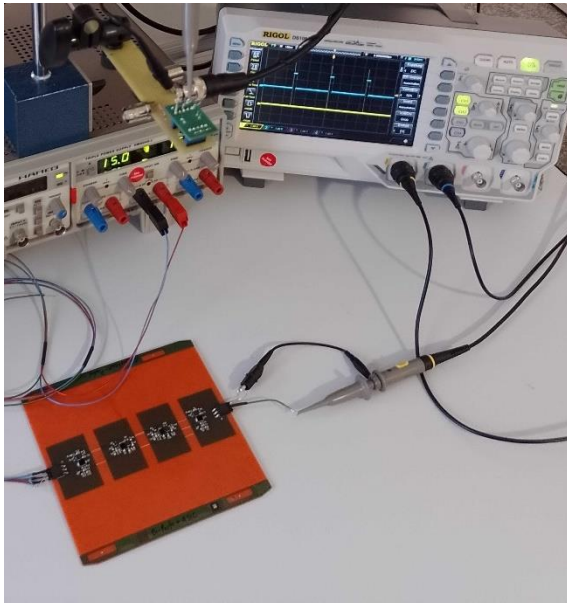


Abbildung 101: Organoblech orange

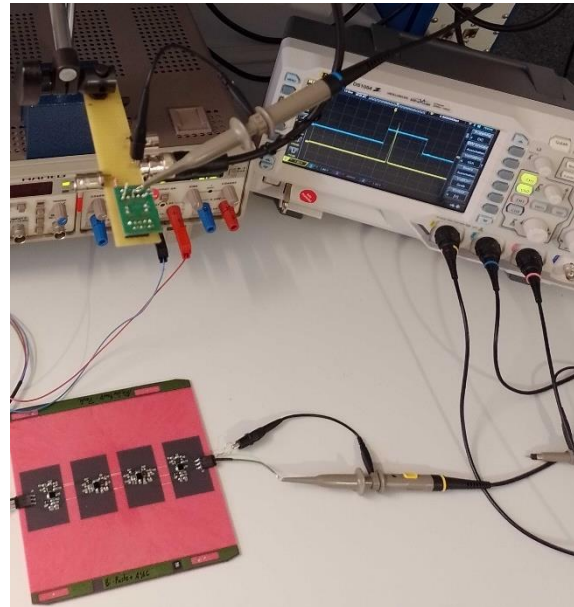


Abbildung 102: Organoblech rosa

Darüber hinaus konnten die Optimierungs-Aktivitäten der Projektpartner zu Ausgasungen, welche zur Blasenbildung an den Lötstellen führten, mit Lichtmikroskop-Bildern (Abbildung 103) erfolgreich unterstützt werden.

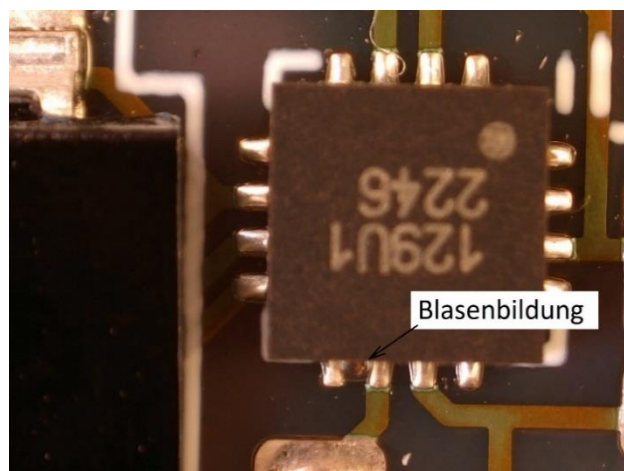


Abbildung 103: Lichtmikroskop-Aufnahme eines QFN-Gehäuses, bestückt auf Organoblech

6 Entwicklung von Technologien zum Preformen und Hinterspritzen semidrapierbarer organoblechbasierter Leiterplatten

6.1 AP 3: Prozesstechnische Verarbeitung funktionalisierter Organobleche

6.1.1 AP 3.1: Anforderungsanalyse hinsichtlich geometrischer, mechanischer und prozesstechnischer Restriktionen

Im Rahmen des Verbundvorhabens wurden die Materialanforderungen hinsichtlich verschiedener Restriktionen gründlich analysiert. Dabei sind die spezifischen Eigenschaften der unterschiedlichen Materialien zu beachten und untereinander abzustimmen. Vor allem im Hinblick auf die Weiterverarbeitung der Organobleche sind hinsichtlich der weiteren Untersuchungen bei den Verbundprojektpartnern folgende Anforderungen zu beachten:

- Für die Umformung benötigt die thermoplastische Matrix der Organobleche ein materialabhängiges Temperaturfenster.
 - Diese Temperaturen sollten von den aufgetragenen Lötungen zumindest kurzzeitig ertragbar sein, um ein Entlöten beim Aufwärmen der Organobleche zu vermeiden. Sollten die Lote diese Temperaturen nicht ertragen, so muss eine partielle Aufwärmung der Halbzeuge erfolgen.
- Die aufgetragene Kupferleiterbahn muss zwangsläufig eine ausreichende Anbindung zum Thermoplast haben. Dafür ist eine Materialauswahl und eine Analyse der Anbindung zwischen Thermoplast und Kupferfolie erforderlich. Das Hinzufügen von Additiven in die Kunststoffmatrix der Organobleche geschieht derzeit nur mit Industrie-Ruß (Carbon Black), um die Gleiteigenschaften im Herstellprozess der Organoblechhalbzeuge zu verbessern.
 - Zur Verbesserung der Anbindung zwischen Kupferfolie und Thermoplastmatrix kann insbesondere die Kupferfolie, aber auch die Thermoplastoberfläche mit unterschiedlichen Behandlungsverfahren vorbereitet werden.
 - Die Additivierung der Thermoplastmatrix stellt zwar einen erheblichen Eingriff in die Organoblechherstellung dar ist aber im Rahmen des Projekts durchaus sinnvoll. Da der ursprünglich favorisierte Referenzthermoplast nur eine unzureichende chemische Beständigkeit in den Prozessen der Leiterplattenfertigung zeigten und auf beständigere Organobleche aktuell nicht marktverfügbar sind, war für das Projekt StrukTronik eine Neuentwicklung von Organoblechen notwendig, die den Anforderungen an die chemische Beständigkeit und den weiteren Verarbeitungsprozessen gerecht werden. So wurden Organobleche auf Basis von Thermoplast A und

Thermoplast B entwickelt. Aufgrund der geringeren Oberflächenenergie dieser Kunststoffe im Vergleich zum Referenzthermoplasten, die eine geringere Haftfestigkeit zu den Kupferfolien erwarten lässt, wurden diese Matrixmaterialien mit Additiv zur Haftverbesserung modifiziert.

6.1.2 AP 3.5: Variantenbetrachtung zum Preforming von semidrapierbaren Halbzeugen

Das Preforming erfolgt mittels einer bauteilspezifischen Vorrichtung. Zunächst wird das Halbzeug auf eine Form drapiert. Unter Drapierbarkeit wird die sphärische Verformbarkeit eines textilen Flächengebildes ohne Faltenbildung verstanden. Im Gegensatz zur freien Verformung eines textilen Flächengebildes durch sein Eigengewicht, das als Fallvermögen bezeichnet wird, kennzeichnet die Drapierbarkeit die Möglichkeit einer dreidimensionalen Formgebung eines solchen Gebildes durch eine erzwungene Verformung. Voraussetzung für eine faltenfreie Ablage auf einem sphärischen geformten Körper ist eine uneingeschränkte zweidimensionale Verformbarkeit der textilen Fläche. Anschließend erfolgt die finale Formgebung durch einen Erwärmungsprozess, wobei das zunächst biegeschlaife Halbzeug für nachgelagerte Prozessschritte in Form gebracht wird.

Im Vorhaben StrukTronik werden semidrapierbare Halbzeuge eingesetzt, d.h., dass einzelne Bereiche, auf denen hochkomplexe elektrische Bauelemente aufgebracht worden sind, nicht oder wesentlich weniger drapierbar sind als Bereiche, die eine vollständige Drapierbarkeit besitzen.

Zum Anpassen der finalen Kontur müssen die Halbzeuge gestreckt auf der Vorwärmstation aufgebracht und fixiert werden. Dabei müssen beim Lagenaufbau schon folgende Punkte beachtet werden:

- **Stackingsequenz:** Die einzelnen Organoblechlagen weisen eine Faserausrichtung in die 0°-Richtung auf, daher werden die einzelnen Lagen im Wechsel zumeist symmetrisch aufeinandergestapelt um einen stabilen Verbund zu erzeugen. Diese Lageausrichtung beeinflusst wesentlich die Drapierbarkeit und muss daher beim Lagenaufbau Berücksichtigung finden.
- **Lokales Verbinden der Einzellagen:** Um ein Verrutschen der einzelnen Lagen Organoblechlagen zu verhindern, werden die einzelnen Lagen an kritischen Stellen mittels Ultraschall (Wärmezufuhr) miteinander verbunden. Dadurch wird die Drapierbarkeit wesentlich eingeschränkt, wodurch eine an den Drapierprozess angepasste Wahl der Verbindungspunkte gewählt werden muss.

- Integration von Sekundärstrukturen: Ist das Integrieren von Sandwich-Materialien erforderlich, können die Halbzeuge in diesen Bereichen nur eingeschränkt vorgeformt werden. Empfehlenswert sind in diesem Zusammenhang multiaxial biegbare Kernmaterialien wie beispielsweise thermoplastische Schäume oder Wabenstrukturen.
- Drapierrichtung & -winkel: Das Stapeln der Einzellagen der Organobleche erfolgt nach strukturmechanischen Aspekten der finalen Strukturbauteile. Gegebenenfalls kann vor diesem Hintergrund ein Zielkonflikt in Bezug auf das Drapiervermögen entstehen.

Im Bereich des Preformings sind die folgenden Kernpunkte zu beachten:

- Segmentierung Unter- und Oberwerkzeug: Komplexe Strukturen, die beispielsweise auch Hinterschnitte enthalten, bedürfen einer segmentierten Ausführung der Ober- und/oder Unterform beim Preforming. Das Halbzeug muss sich nach dem Preformingprozess entformen lassen und darf in diesem Fall keine Beschädigung erfahren.
- Sequentielle Umformung: Können die Halbzeuge aufgrund der Komplexität der geometrischen Anforderungen nicht in einem Schritt umgeformt werden, so ist eine sequentielle Umformung unabdingbar.
- Lokale Erweichung: Sofern einzelne Bereiche nicht oder nur erschwert drapiert werden können, ist eventuell eine lokale (Vor-)Erweichung möglich. Die Organoblechhalbzeuge sind im Schichtstapel je nach Aufbau biegesteif, wodurch eine Drapierung durch eine örtlich begrenzte Erweichung ermöglicht wird.
- Stütz- und Auflagepunkte: Im Bereich der Ober- und/oder Unterform können Stütz- und Auflagepunkte außer- oder innerhalb der eigentlichen Bauteilstruktur ein Verschieben und Verrutschen der Halbzeuge verhindern. Zielführend sind oftmals Fixierelemente außerhalb der Bauteilstruktur, die nach dem Vorformprozess entfernt (abgeschnitten) werden.
- Erwärmungsstrategie: Für einen wirtschaftlichen Prozess sind unterschiedliche Erwärmungsstrategien der Halbzeuge möglich. Die sogenannte „Kalt drapierung“ mit anschließender Temperierung des Werkzeuges ermöglicht eine sehr hohe Formgüte, die erreichbaren Taktzeiten sind jedoch sehr hoch, da die Werkzeuge zyklisch geheizt und gekühlt werden müssen. Bei der „Warm drapierung“ werden die

thermoplastischen Halbzeuge mittels einer externen Wärmequelle temperiert und im „kalten“ Werkzeug in Form gebracht.

Ausgehend von der Materialauswahl und der Variantenbetrachtung wurden erste Preformversuche mit den favorisierten Materialien der Organoleiterplatten durchgeführt. Probekörper auf Basis von Thermoplast A und Thermoplast B mit jeweils 40 Gew.-% Glasfasern wurden lokal erwärmt und im V-Biegeverfahren mit Biegeradien zwischen 3 mm und 6 mm umgeformt. Abbildung 104 und Abbildung 105 zeigen die ungeformten und mit verschiedenen Radien und Prozessparametern gebogenen Probekörper.

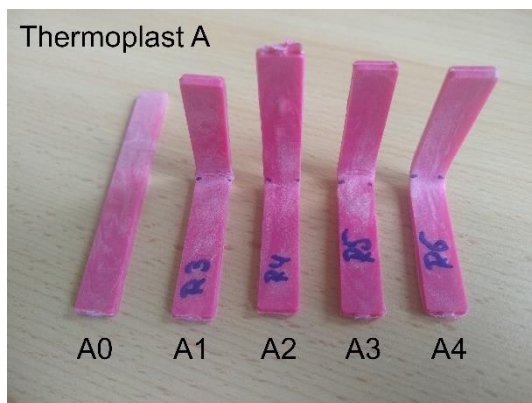


Abbildung 104:
Biegeproben aus Thermoplast A

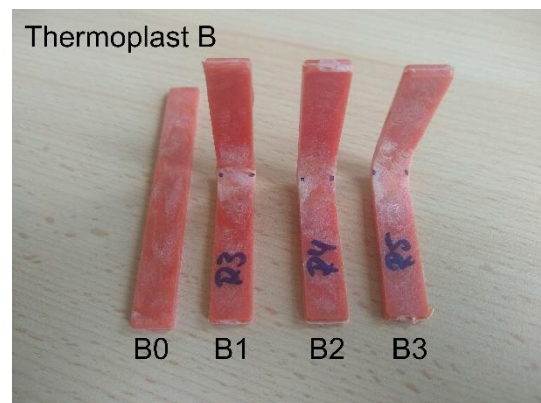


Abbildung 105:
Biegeproben aus Thermoplast B

Dabei konnten alle Proben erfolgreich umgeformt werden, ohne dass die Struktur beschädigt wurde. Bei kleinen Biegeradien von 3 mm (vgl. A 1 und B 1) oder bei unzureichender Temperierung (vgl. A 3) tritt allerdings infolge der Materialstauchung eine Faltenbildung im inneren Biegeradius auf. Nach entsprechender Optimierung der Prozessparameter Wärmeeinflusszone und Umformtemperatur konnte das Umformergebnis deutlich verbessert werden. Umformradien ab 4 mm (z. B. A 2 und B 2) lassen sich fehlerfrei umformen und bilden damit den Minimalradius für die Umformbereiche im Forschungsfunktionsmuster „Lichtschranke“. Ausführliche Umformversuche der semidrapierbaren Organoleiterplatten und die dazugehörige Ermittlung der Prozessparameter ist in AP 3.10 dargestellt.

6.1.3 AP 3.6: Prozessgerechter Entwurf und Konstruktion des Forschungsfunktionsmusters

Aufbauend auf den Anforderungen und Randbedingungen aus AP 3.2 und den Ergebnissen aus AP 3.5 wurde das Forschungsfunktionsmuster „Lichtschranke“ entworfen und konstruiert. Eine Lichtschranke besteht dabei aus vier optoelektronischen

Funktionsmodulen, die sich gemeinsam auf einer Organoleiterplatte befinden. Die elektronischen Schaltungen sind über integrierte Leiterbahnen miteinander und mit Steckverbindern, die den Kontakt zu benachbarten Lichtschranken herstellen, verbunden. Das so funktionalisierte Halbzeug wird partiell temperiert, wobei der Wärmeeintrag auf funktionalen Elemente so gering wie möglich gehalten wird, und zu einem U-Profil umgeformt. Anschließend wird es spritzgießtechnisch mit einer Rippen- bzw. Käfigstruktur versehen. Die Spritzgießkomponente ist materialkompatibel zu den Organoleiterplatten und erfüllt verschiedene Aufgaben. Zum einen wird dadurch das lasttragende U-Profil versteift, zum anderen sind darin mechanische Funktionselemente integriert. An der offenen Seite des U-Profiles sind Nuten eingebracht, die eine transparente Abdeckung aufnehmen können, welche die elektronischen Bauelemente, insbesondere die optisch aktiven Fotodioden, vor Staub und anderen Verunreinigungen schützt, aber dennoch lichtdurchlässig ist. Die stabiler ausgeführten Rippen an den Stirnseiten der Lichtschranke dienen zur Befestigung der benachbarten Lichtschranken im Falle einer Aneinanderreihung von mehreren Modulen. Zudem wird in diesem Bereich der elektrische Steckverbinder teilweise umspritzt, um diesen sicher und mechanisch belastbar mit dem Organoblech und der Rippenstruktur zu verbinden. Abbildung 106 zeigt den Aufbau des Forschungsfunktionsmusters.

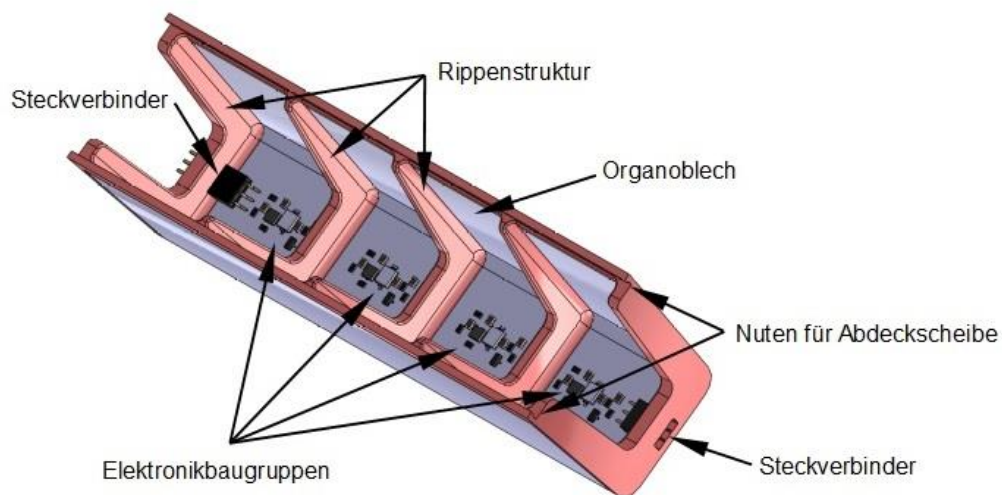


Abbildung 106: Aufbau des Forschungsfunktionsmusters

Im Rahmen der Konstruktion des Forschungsfunktionsmusters wurde eine Spritzgießsimulation der Rippenstruktur durchgeführt. Damit konnte die theoretische Herstellbarkeit des Forschungsfunktionsmusters im Spritzgießverfahren nachgewiesen werden. Es zeigte sich auch, dass ein zentraler Angusspunkt auf der mittleren Rippe ausreichend ist, um die Rippenstruktur vollständig zu füllen. Abbildung 107 zeigt den Fortschritt der Formfüllung zu verschiedenen Zeitpunkten des Spritzgießprozesses.

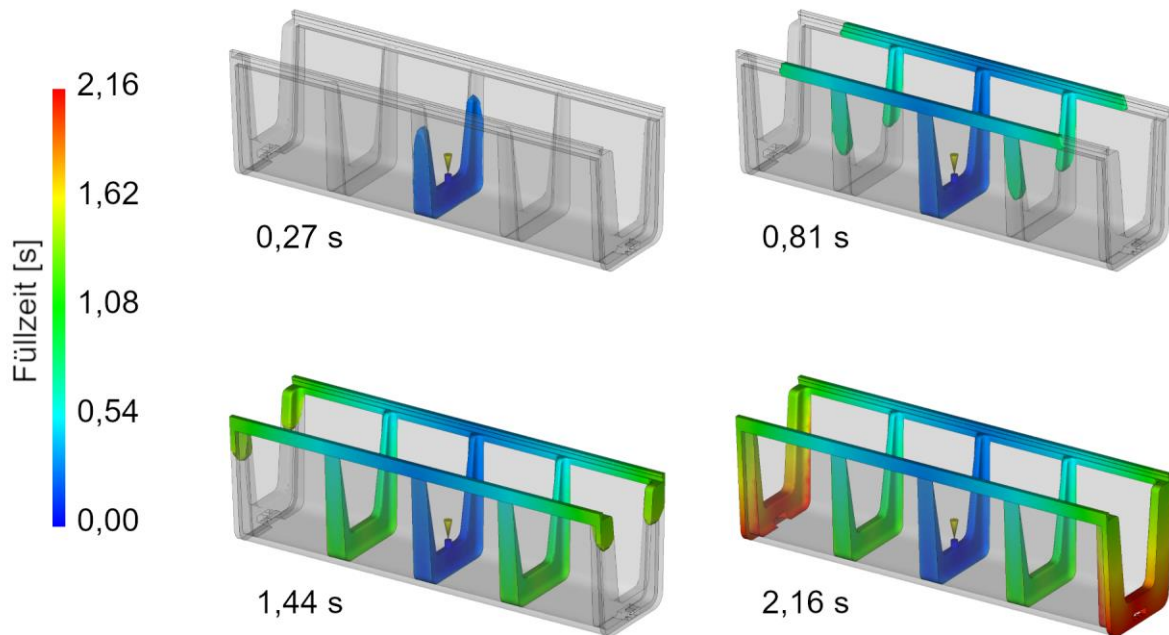


Abbildung 107: Füllsimulation des Spritzgießprozesses

6.1.4 AP 3.7: Entwurf und Konstruktion der Preformstation und AP 3.8: Umsetzung der Preformstation

Ausgehend auf der Variantenbetrachtung zum Preforming (vgl. AP 3.5) und dem Entwurf des Forschungsfunktionsmusters (vgl. AP 3.6) wurde eine Preformstation konzipiert. Dabei stellte sich heraus, dass es speziell für das Forschungsfunktionsmuster „Lichtschränke“ vorteilhaft ist, das Preforming in das Spritzgießwerkzeug zu integrieren. Da die Umformung des Halbzeugs in eine Endkonturnahe Geometrie direkt im Spritzgießwerkzeug stattfindet verkürzt sich die geplante Prozesskette um die Schritte „Konsolidierung im Umformwerkzeug“, „Transfer des umgeformten Halbzeugs zum Spritzgießwerkzeug“ und „Vorwärmen des Halbzeugs für den Spritzgießprozess“. Damit werden die Taktzeit und die Energieeffizienz und damit auch die Marktfähigkeit des Fertigungsprozesses signifikant verbessert. Die konstruktive Umsetzung des Prefomings im Spritzgießwerkzeug wird in AP 3.12 beschrieben.

6.1.5 AP 3.12: Konstruktion des Spritzgießwerkzeugs

Die Kernkomponente des Forschungsfunktionsmusters „Lichtschränke“ stellt die vollständig funktionalisierte und mit den elektronischen Bauteilen bestückte Organoleiterplatte dar. Im ersten Prozessschritt zur Herstellung des Funktionsmusters erfolgt die Erwärmung der

Organo-Leiterplatte und deren Umformung zu einem U-Profil. Im nachfolgenden Schritt wird eine verstärkende Rippenstruktur angespritzt, die Endkontur vervollständigt und damit die Lichtschanke fertig gestellt. Die einzelnen Fertigungsstufen sind in Abbildung 108 dargestellt.

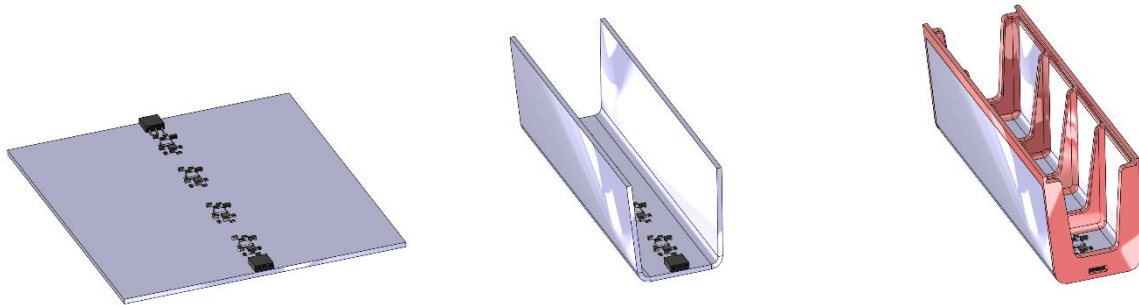


Abbildung 108: Prozessstufen zur Herstellung der Lichtschanke:
Bestückte Organoleiterplatte (links),
umgeformte Verbundstruktur (mittig) und
fertiges Bauteil mit angespritzter Rippenstruktur (rechts)

Darauf aufbauend wurde nach Abschluss der Arbeitspakete 3.6 und 3.11 das kombinierte Umform- und Spritzgießwerkzeug konstruiert. Das Werkzeug ist in Zwei-Platten-Bauweise ausgeführt und als CAD-Modell in Abbildung 109 dargestellt.

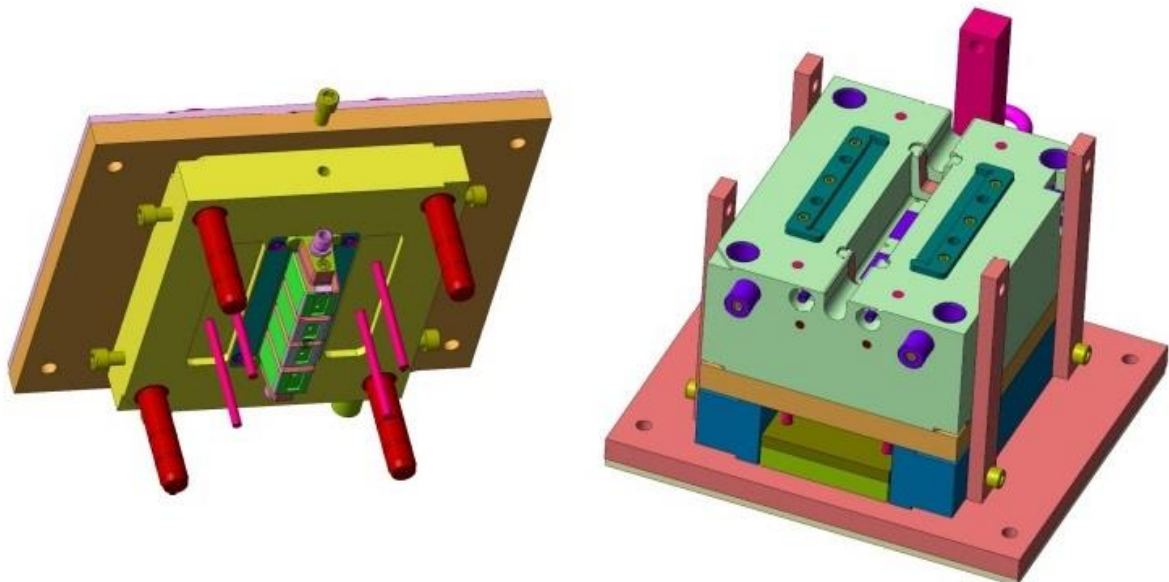


Abbildung 109: Spritzgießwerkzeug des Forschungsfunktionsmusters "Lichtschanke":
links: Düsenseite; rechts: Auswerferseite

Auf der Düsenseite befindet sich ein Stempel, der die Innengeometrie und die Rippenstruktur des U-Profils der Lichtschanke abbildet (s. Abbildung 110). Über Anschlagleisten wird die vorgewärmte Organo-Leiterplatte exakt unter dem Stempel positioniert. Während des Werkzeugschließvorgangs taucht der Stempel gemeinsam mit

der Organo-Leiterplatte in die Auswerferseite des Werkzeugs ein, formt diese dabei zum U-Profil der Lichtschränke um und verschließen die Kavität. Nach der Umformung erfolgt der Spritzgießprozess zur Erzeugung der Rippenstruktur und der Bauteilendkontur. Da die Organo-Leiterplatte zu diesem Zeitpunkt noch nicht vollständig abgekühlt ist, bildet sich ein fester Verbund zwischen Organoblech und Rippenstruktur aus. Nach dem Spritzgießvorgang, dem Abkühlen der Struktur und der Konsolidierung des Organoblechs verbleibt das Bauteil aufgrund der Hinterschneidungen im Bereich der Nuten für die Abdeckscheibe am Stempel und wird während der Werkzeugöffnung aus der Auswerferseite herausgezogen. Die Zwangsentformung vom Stempel gewährleisten federbetätigte Auswerferleisten, die durch eine Druckluftereinleitung zwischen Stempel und Organoblech unterstützt werden können.



Abbildung 110: Formstempel mit integrierten Kavitäten der Rippenstruktur

6.1.6 AP 3.10: Umformversuche semidrapierbarer Halbzeuge und

AP 3.13: Spritzgießversuche zur Herstellung der Funktionsmuster

Mit dem kombinierten Umform- und Spritzgießwerkzeug aus AP 3.12 wurden umfangreiche Umform- und Spritzgießversuche durchgeführt, um die Forschungsfunktionsmuster reproduzierbar herzustellen und die optimalen Prozessparameter dafür zu ermitteln. Das Werkzeug wurde dazu in eine vertikal schließende Spritzgießmaschine vom Typ Arburg 1200T eingebaut. Die vertikale Schließereinheit hat dabei den Vorteil, dass die vorgewärmte Organo-Leiterplatte auf das Werkzeug aufgelegt werden kann und nicht hängende fixiert werden muss. Damit steigt die Positionier- und Wiederholgenauigkeit beim Einlegen des Halbzeugs und während des Schließvorgangs des Werkzeugs. Abbildung 111 zeigt das in die Auswerferseite des Werkzeugs eingelegte Organo-Leiterplatte. Die

Positionierung erfolgt dabei über die beiden Positionierleisten auf der linken und der rechten Seite.

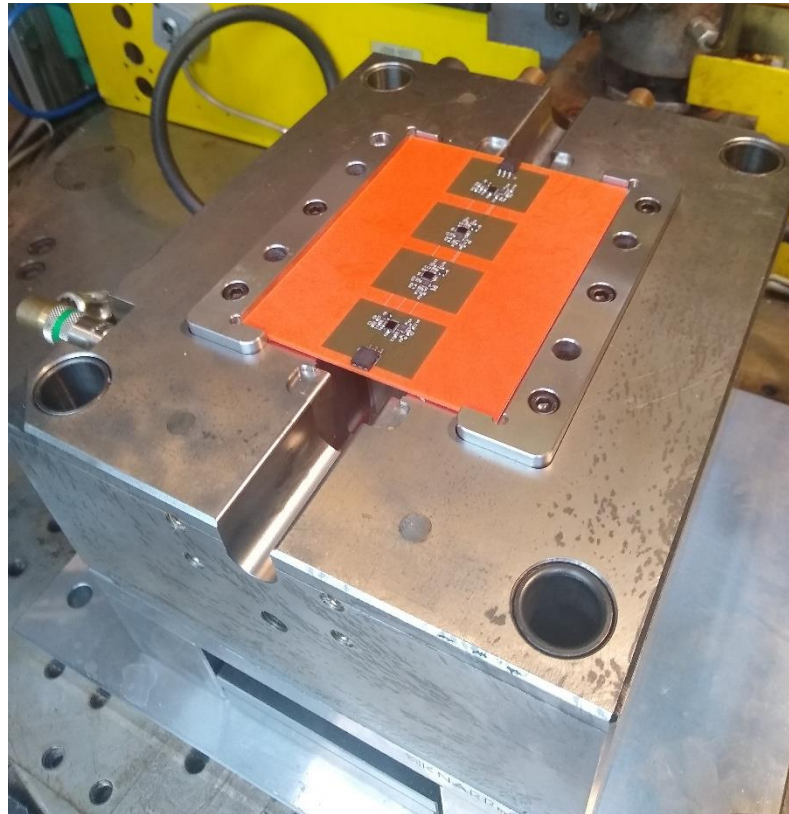


Abbildung 111: Umform- und Spritzgießwerkzeug mit eingelegter Organo-Leiterplatte

Im Rahmen des Projekts wurden umfangreiche Umformversuche durchgeführt. Als wichtigste Parameter stellten sich dabei die Vorwärmtemperatur der Organo-Leiterplatten und die Werkzeugtemperatur heraus. Ist die Vorwärmtemperatur zu gering, reicht die Fließfähigkeit des Materials nicht aus. Die Organo-Leiterplatte wird in diesem Fall in den Umformbereichen beschädigt. Die Schadensbilder reichen dabei von Rissen in den Bereichen stärkster Umformung bis zum Bruch oder zum Abscheren des Materials in den Umformzonen. Bei zu hohen Temperaturen ist zwar der eigentliche Umformprozess nicht beeinträchtigt, jedoch wird das präzise Handling durch die verminderte Formstabilität des sehr weichen Halbzeugs erschwert. Zudem sind auch die Lötverbindungen und die Elektronikkomponenten den höheren Temperaturen ausgesetzt, wodurch dort die Gefahr von defekten oder Kontaktverlusten infolge der Erweichung des Lotes. Über die Werkzeugtemperatur wird die Abkühlrate der Organo-Leiterplatte beeinflusst. Aus einer höheren Temperatur resultiert eine langsamere Abkühlung und damit einhergehend ein besseres Umformverhalten. Mit steigender Werkzeugtemperatur könnte somit auch die Vorwärmtemperatur reduziert werden, wodurch sich die thermische Belastung von Organoblech, Elektronikkomponenten und Lötverbindungen reduziert. Auf der anderen Seite muss die Werkzeugtemperatur aber auch so gering sein, dass die Organo-Leiterplatte

konsolidiert werden kann. In verschiedenen Versuchsreihen konnten für beide Materialien optimale Parameterkombinationen für Vorwärm- und Werkzeugtemperatur ermittelt werden. Die Schließkraft der Spritzgießmaschine wurde für den nachfolgenden Spritzgießprozess auf 1000 kN festgelegt und war damit für alle Umformversuche ausreichend hoch. Abbildung 112 zeigt die Organoleiterplatten vor und nach der erfolgreichen Umformung. Dabei sind, wie zu erwarten, Einfallstellen im Bereich der Rippenstruktur erkennbar, da an diesen Stellen aufgrund der Kavität nicht genügend Druck auf die Organo-Leiterplatte wirkt. Die Funktionalisierung der Organobleche übersteht die Umformung unbeschadet.

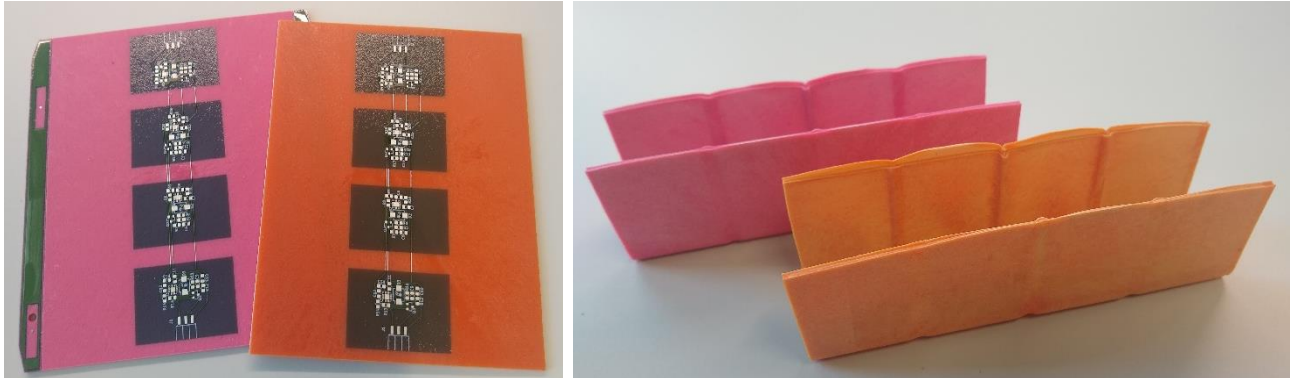


Abbildung 112: Organo-Leiterplatten vor (links) und nach (rechts) erfolgreicher Umformung

Zur Ermittlung der optimalen Spritzgussparameter wurden auch für diesen Teilprozess umfangreiche Versuche durchgeführt. Abbildung 113 zeigt die Ergebnisse einer Füllstudie ohne eingelegte Organo-Leiterplatten. Dabei kamen aus Gründen der Materialkompatibilität und mit dem Ziel einer möglichst hohen Verbundfestigkeit die gleichen Thermoplaste zum Einsatz, die auch bei der Herstellung der Organobleche verwendet wurden.

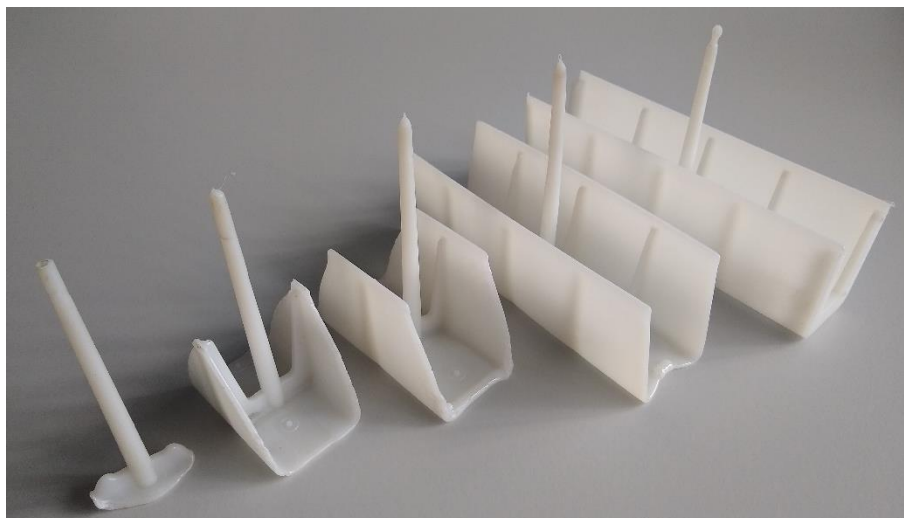


Abbildung 113: Füllstudie zur Ermittlung der optimalen Prozessparameter

Auch für den Spritzgießprozess stellte sich die Werkzeugtemperatur als einer der wichtigsten Prozessparameter heraus. Dabei sind zu geringe Temperaturen besonders kritisch. Die Form wird dann nicht vollständig gefüllt, es tritt ein starker Bauteilverzug auf und die Bauteile lassen sich nur schwer entformen. Außerdem führt die zu schnelle Abkühlung der Organo-Leiterplatte zu einer unzureichenden Anbindung der Rippenstruktur. Mit steigender Werkzeugtemperatur nimmt die Bauteilqualität und Verbundfestigkeit deutlich zu. Bei zu hohen Temperaturen findet allerdings nur eine unzureichende Konsolidierung des Bauteils statt, wodurch Beschädigungen während der Entformung auftreten und die Maßhaltigkeit der Bauteile nicht mehr gewährleistet ist. Durch die Kombination des Umform- und des Spritzgießprozesses muss die Werkzeugtemperatur für beide Teilprozesse gleich sein. Mit den optimierten Temperaturen aus den Umformversuchen konnten auch im Spritzgießprozess die besten Ergebnisse erzielt werden. Abbildung 114 zeigt die Umgeformten und mit der Rippenstruktur versehenen Forschungsfunktionsmuster. Dabei ist deutlich erkennbar, dass mit optimalen Prozessparametern auch Einfallstellen im Bereich der Verrippung (vgl. Abbildung 112, rechts) verschwinden. Die Organo-Leiterplatte ist dann während des Einspritzvorgangs noch so weich, dass die Umformung durch den Schmelzedruck vollständig abgeschlossen wird. Dabei entstehen auch die geforderten hohen Verbundfestigkeiten zwischen Organo-Leiterplatte und Rippenstruktur infolge einer stoffschlüssigen Verbindung.

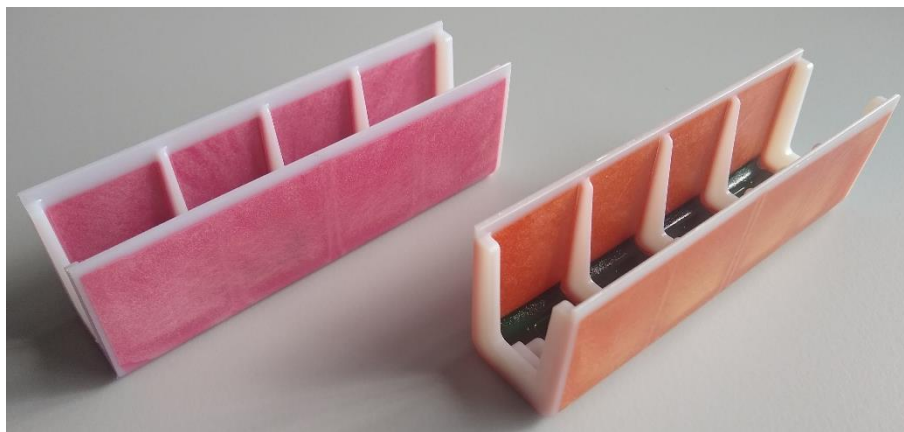


Abbildung 114: Forschungsfunktionsmuster "Lichtschranke" mit angespritzter Rippenstruktur

Neben der Werkzeugtemperatur wurde in den Parameterstudien weitere Prozessparameter untersucht. Dazu zählten u. a. die Temperatur der Kunststoffschmelze, der Volumenstrom der Schmelze während des Einspritzvorgangs und der Nachdruck. Im Rahmen einer Prozessoptimierung konnte dabei die Bauteilqualität weiter gesteigert werden.

7 Funktionsdemonstrator

7.1 Demonstrator-Prototyp

Die in Kapitel 5.1.3 beschriebenen Schaltungen auf Organoblech konnten in einen ersten Demonstrator (Abbildung 115) integriert werden, der wie eine Lichtschranke eine Hand erkennt. Damit können bspw. Maschinen oder automatische Türen abgesichert werden.

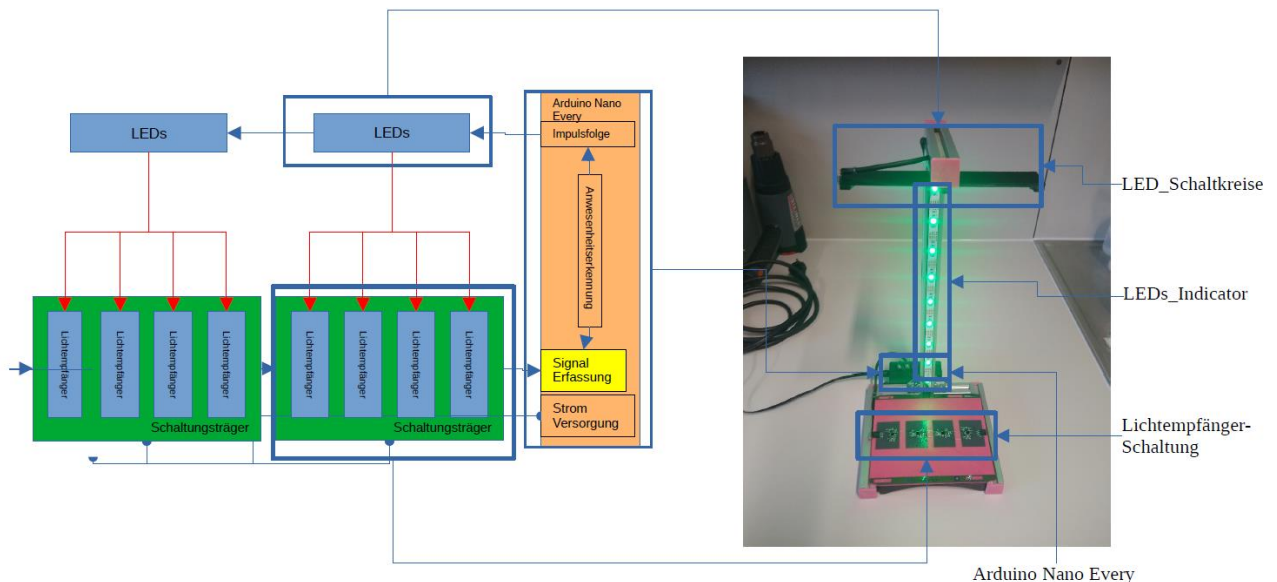


Abbildung 115: Umsetzung des Konzeptes in einen realen Demonstrator

Eine Mikrocontroller-Schaltung mit eigens entwickelter Software (

Abbildung 116) ermöglicht die Anzeige des Zustands der optischen Strecke („frei“ oder „mindestens teilweise verdeckt“) über einen LED-Streifen. Dazu steuert sie die LED-Leiste, welche unter dem schwarzen oberen Balken in Abbildung 115 sitzt und Lichtblitze im infraroten Bereich aussendet, die nicht sichtbar sind. Die Lichtempfänger-Schaltung auf dem Organoblech erkennt diese Blitze, sofern sich kein Hindernis in der Strecke befindet, und kommuniziert ihren Zustand an den Microcontroller. Dieser steuert die Farbe eines LED-Streifens entsprechend grün oder rot, wie in Abbildung 117 gezeigt. In einer realen Anwendung könnten weitere Funktionen ausgelöst werden, bspw. eine Drehmoment- oder Drehzahlsteuerung auf 0, je nachdem was die Maschinensicherheit in der jeweiligen Anwendung am besten gewährleistet.

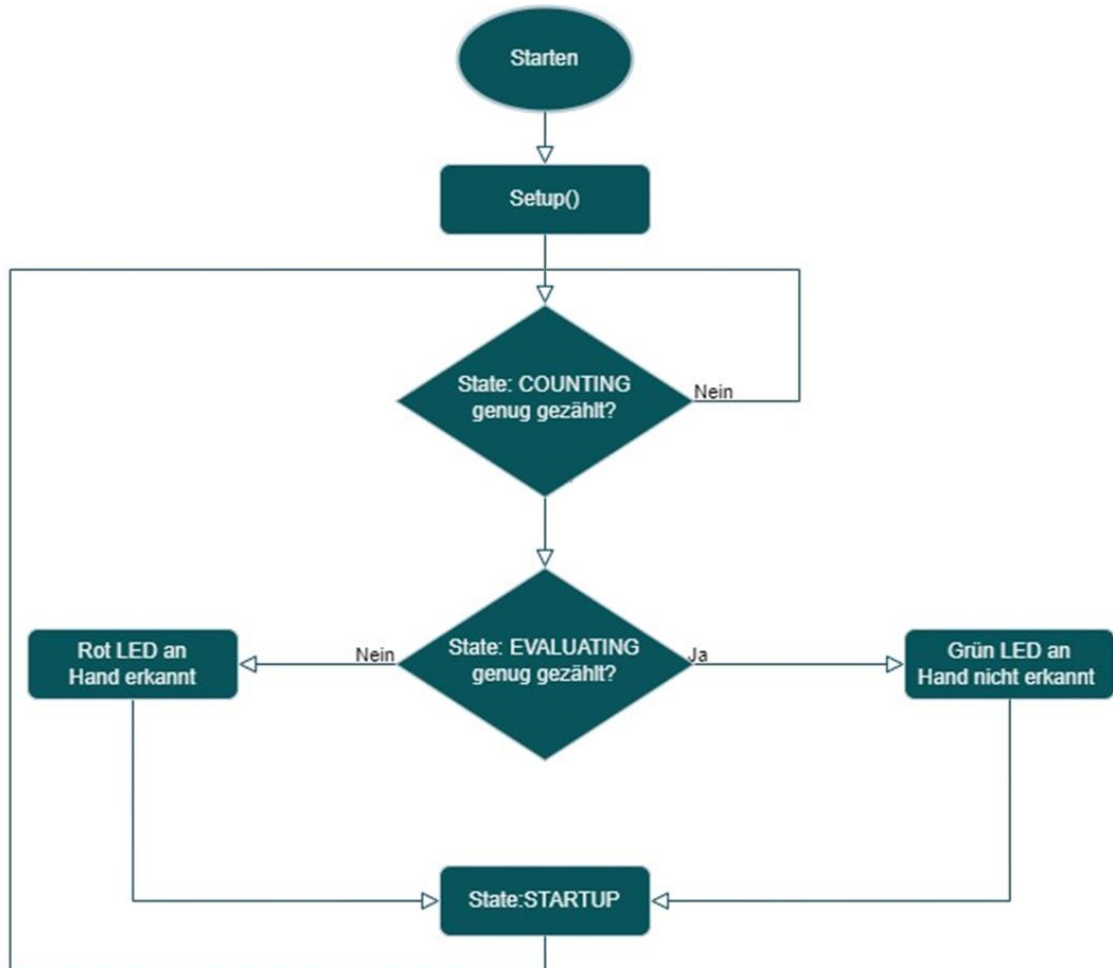


Abbildung 116: Ablaufdiagramm der Software des Demonstrators

Ein zusätzliches WLAN-Modul erlaubt darüber hinaus die Anzeige des Status über eine Webseite im WLAN, wodurch solche Geräte sehr komfortabel in betriebliche Abläufe integriert werden können (siehe Abbildung 117 unten).

Gegen Ende des Projektes konnte auch der Betrieb des Demonstrators mit Lichtempfänger-Schaltungen mit SSCs im CSP-Package, sowie mit umgeformten und angespritzten Organoblechen erfolgreich getestet werden. Die Komponenten Lichtempfänger-Schaltung, LED-Schaltkreise und Mikrocontroller-Schaltung können auch im erweiterten Struktronik-Demonstrator eingesetzt werden.

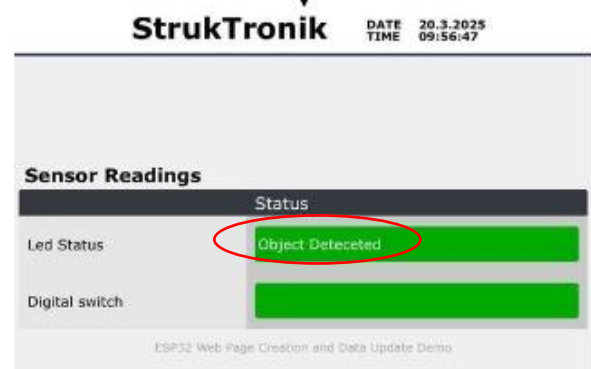
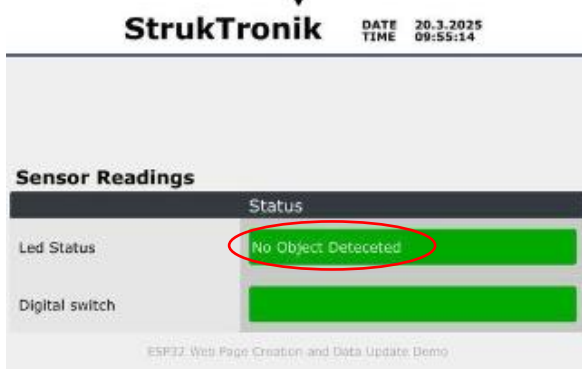


Abbildung 117: Handerkennung mit dem Demonstrator:
oben: Foto des ersten Demonstrators
unten: Anzeige des drahtlos verfügbaren Web-Interfaces

7.2 Finaler Funktionsdemonstrator

Aufbauend auf dem Forschungsfunktionsmuster und dem Demonstrator-Prototypen wurde unter Zustimmung des Projektträgers ein Funktionsdemonstrator im Unterauftrag entwickelt und gefertigt. Dieser diene im Projekt zur anwendungsnahen Generierung von Messdaten zur Funktionsweise der elektronischen Schaltung innerhalb der Lichtschranke. Darüber hinaus wird der Demonstrator auch nach Projektende genutzt, um die Potentiale der im Projekt StrukTronik erforschten Technologie z. B. auf Messen und Tagungen zu präsentieren. Der Demonstrator bietet dazu neben dem Funktionsbereich mit den integrierten funktionsfähigen Forschungsfunktionsmustern auch einen Vitrinenbereich, in welchem z. B. die einzelnen Fertigungsstufen entlang der Prozesskette ausgestellt werden

können. Abbildung 118 zeigt den Funktionsdemonstrator. Herzstück ist ein Hologram (hier leider nicht sichtbar), welches im Hohlraum das Interesse des Betrachters wecken soll. Beim Griff in den Hohlraum leiten die hier im Projekt entwickelte Lichtschrank das Signal an die integrierte Steuerung weiter und lösen z. B. einen Alarm in Form eines Lichtsignals (Angeordnet im Deckel) aus. Zudem wird das Signal über das generierte WLAN z. B. an kabellos verbundene, smarte Geräte gesendet, um z. B. dem Werker zu informieren und eine weitere Aktion auslösen zu können.



Abbildung 118: Funktionsdemonstrator zur Präsentation der Projektergebnisse

8 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

8.1 Teilprojekt TU Chemnitz

Das Projektziel verfolgte einen völlig neuartigen Ansatz, um thermoplastische endlosfaserverstärkte Halbzeuge mit elektronischen Komponenten zu funktionalisieren. Folglich bestand die Notwendigkeit ausgehend von Grundlagenuntersuchungen bis hin zur letztendlichen praxisnahen Anwendung umfassende, interdisziplinäre Entwicklungsarbeiten im Projekt durchzuführen. Ohne dieses Forschungsprojekt wären die Durchführung dieser notwendigen Projektarbeiten nicht möglich gewesen. Darüber hinaus kann aus Sicht der erzielten Ergebnisse zusätzlich die Notwendigkeit der geleisteten Projektarbeiten hervorgehoben werden. Die erreichte Eigenschaftsvereinigung von Steifigkeit, Festigkeit, Leichtbaugrad und „Intelligenz“ durch die Integration von elektronischen Komponenten kann für zukünftige Technologien in verschiedensten Branchen von hohem Interesse sein. Insofern sind die geleisteten Projektarbeiten ebenso als angemessen zu bezeichnen.

8.2 Teilprojekt KSG GmbH

Aufgrund des Neuheitsgrades von Leiterplatten auf Organoblech-Basis ist es nicht möglich, derartige Leiterplatten erst an konkreten Kundenanfragen oder -produkten zu entwickeln. Hierzu ist im Vorfeld eine umfangreiche Grundlagenforschung erforderlich, die im Rahmen des Projektes in weiten Teilen umgesetzt werden konnte.

Während des Projektes konnten die Rahmenbedingungen zur Herstellung ein- und doppelseitiger Leiterplatten auf Organoblech-Basis erarbeitet und Wege zur Herstellung mehrlagiger Organo-Leiterplatten eruiert werden. Außerdem wurden durch die intensiven und umfangreichen Arbeiten wichtige Einblicke in die Aufgaben und Herausforderungen erhalten, die im Hinblick auf eine spätere Serienproduktion zwingend zu lösen sind.

8.3 Teilprojekt Komitec electronics GmbH

Aufgrund des Neuheitsgrades der entwickelten Organoleiterplatten waren umfangreiche Grundlagenuntersuchungen, aber auch weitergehende anwendungsnahe Arbeiten notwendig, die im Rahmen des Projektes zu großen Teilen umgesetzt werden konnten. Im Projektverlauf konnten Rahmenbedingungen für die Bestück- und Lötbarkeit der organoblechbasierten Leiterplatten erarbeitet werden. Ebenso konnten Richtlinien für ein Trägersystem aufgestellt und Vorgaben für die Pastenschablone validiert werden. Des Weiteren wurden durch die geleisteten Arbeiten wichtige Punkte ersichtlich, an die hinsichtlich einer späteren Serienbestückung von Organoblech-Leiterplatten angeknüpft

werden kann. Die im Projekt entwickelten Konzepte bilden dabei die Grundlage für die künftigen Herausforderungen bei der Bestückung organoblechbasierter Leiterplatten.

8.4 Teilprojekt EDC Electronic Design Chemnitz GmbH

Im Struktronik-Projekt hat EDC Anwendungsschaltungen entwickelt und spezifische Leiterzugbilder entworfen, die eine Fertigung auf Organoblech zulassen. Diese Arbeiten besitzen einen großen Neuheitsgrad und bedurften umfangreiche und enge Abstimmungen mit den Partnern, um auch die Bestückung der Bauteile sowie die Umformung und Hinterspritzung zu ermöglichen. Die produzierten Schaltungen hat EDC untersucht, bewertet und in einem anschaulichen Demonstrator umgesetzt, mit dem auf Messen das Struktronik-Projekt sowie die Förderinitiative vorgestellt werden kann. Dabei ist zu berücksichtigen, dass es sich bei den bisherigen Ergebnissen um Forschungsergebnisse handelt.

8.5 Teilprojekt Bernd Flach Präzisionstechnik GmbH & Co. KG

Aufgrund des Neuheitsgrades der entwickelten Organo-Leiterplatten waren Grundlagenuntersuchungen und umfangreiche anwendungsnahe Arbeiten notwendig. Durch die Funktionalisierung mit Leiterbahnen und elektronischen Bauelementen unterscheidet sich die Umformung und spritzgießtechnische Weiterverarbeitung der Organo-Leiterplatten deutlich von herkömmlichen Organoblechen. Besondere Herausforderungen stellten dabei die auftretenden hohen Kräfte, Temperaturen, Drücke und der Kunststoffschmelze für die Elektronik dar. Die geleisteten Projektarbeiten zur Weiterverarbeitung der Leiterplatten waren dazu zwingend notwendig und angemessen. Dennoch besteht auch weiterhin großer Forschungs- und Entwicklungsbedarf auf diesem Gebiet.

9 Nutzen und Verwertbarkeit

9.1 Teilprojekt TU Chemnitz

Mit den Projektergebnissen aus StrukTronik konnten neue Erkenntnisse zur Funktionalisierung von Organoblechen und thermoplastischen Verbundstrukturen erlangt werden. So konnte die Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung ihre Kompetenzen auf diesen stärken und damit die Grundlagen für weitergehende Forschungs- und Entwicklungsprojekte legen. Zusätzlich können aus diesen Ergebnissen hervorgehende Veröffentlichungen, Tagungsbeiträge und Messeauftritte die Sichtbarkeit der Professur innerhalb der nationalen und internationalen Forschungslandschaft erhöhen und damit auch längerfristig konkurrenzfähige und innovative Forschungen auf diesen Gebieten gewährleisten. Ergänzend ist die Einbindung der Ergebnisse in die Lehre vorgesehen, wodurch sich perspektivisch weitere Verwertungsszenarien ergeben werden.

9.2 Teilprojekt KSG GmbH

Der Nutzen des Projektes für die KSG GmbH liegt darin, das Potential von Organoblechen als Leiterplattenmaterial eruiert zu haben. Durch die grundlegende Möglichkeit, aus dieser Materialklasse nicht nur einseitige Leiterplatten herzustellen, sondern die Materialien auch durchkontaktieren und Multilayer-Strukturen aufbauen zu können, haben sich die Aussichten auf eine erfolgreiche Serienfertigung von Organo-Leiterplatten signifikant erhöht. Gelingt eine serienmäßige Produktion aller Arten von Organo-Leiterplatten, wäre es möglich, sich mit diesen Substratmaterialien vielfältige Marktsegmente zu erschließen. Die Herausforderung wird darin liegen, spezielle Anwendungen zu eruieren, die entweder zwingend die thermoplastischen Eigenschaften dieser neuartigen Substrate erfordern oder bei denen bei der Betrachtung des Gesamtsystems signifikante Kosteneinsparungen im Vergleich zu klassischen FR4-Leiterplatten zu generieren sind.

9.3 Teilprojekt Komitec electronics GmbH

Die Ergebnisse der Forschungsarbeit haben gezeigt, dass ein verformbares Organoblech mit einer elektronischen Schaltung zuerst bestückt, verlötet und anschließend noch einmal verformt werden kann. Dadurch kann die Elektronik beispielsweise direkt in ein Gehäuse integriert werden bzw. ist dafür keine konventionelle Leiterplatte zusätzlich mehr nötig. Da die konventionelle Leiterplatte entfallen kann, können ggf. Platzeinsparungen und Kosteneinsparungen erzielt werden. Durch den Einsatz von Materialien mit thermoplastischen Eigenschaften (wenn erforderlich) kann ggf. ein größerer Einsatzbereich abgedeckt werden und es kann ggf. auch eine Gewichtsreduktion erreicht werden.

Durch die Teilhabe am Forschungsprojekt wurde bei der Komitec GmbH eine wesentliche Know-how-Steigerung erreicht, die es ermöglicht, ggf. an weiteren, nachgelagerten Forschungsvorhaben teilzuhaben um dadurch die Innovationskraft des Unternehmens noch weiter auszubauen. Dadurch kann auch die Attraktivität und Sichtbarkeit als Arbeitgeber gesteigert und mit den Erkenntnissen aus dem Forschungsprojekt in neue Marktsegmente vorgedrungen werden. Damit können neue Impulse erlangt und Kundenkontakte generiert werden. Insbesondere durch den Zugang zu neuen Anwendungsgebieten, Kundenkreisen und die damit verbundenen Herausforderungen dieser neuartigen thermoplastischen Leiterplattenmaterialien erhofft sich die Komitec GmbH mittelfristig eine Umsatzsteigerung.

9.4 Teilprojekt EDC Electronic Design Chemnitz GmbH

Im Rahmen der Produktentwicklung wird EDC die gewonnenen Erkenntnisse zur Nutzung von Organoblechen als Schaltungsträger in Kundenprojekte integrieren und für zukünftige Entwicklungen nutzen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass es sich bei den bisherigen Ergebnissen um Forschungsergebnisse handelt, die derzeit noch keine belastbaren Aussagen zu Fertigungskosten, Zuverlässigkeit und Lebensdauer ermöglichen. Daher ist ein Folgeprojekt erforderlich, das die industrielle Weiterentwicklung der Technologie bis zur Serienreife zum Ziel hat. Entsprechende Gespräche mit Projektpartnern finden bereits statt.

9.5 Teilprojekt Bernd Flach Präzisionstechnik GmbH & Co. KG

Mit den Projektergebnissen aus StrukTronik konnten neue Erkenntnisse zur Funktionalisierung von Organoblechen und thermoplastischen Verbundstrukturen erlangt werden. Mit den Ergebnissen kann die BERND FLACH Präzisionstechnik GmbH & Co. KG ihr Produktportfolio um die Verarbeitung von funktionalisierten Organoblechen im Allgemeinen und von Organo-Leiterplatten im Speziellen sowie die Fertigung von komplexen Werkzeugen für diesen Einsatzzweck erweitern. Das Unternehmen sieht sich dabei als Dienstleister für die Werkzeugfertigung und Verarbeitung der Organo-Leiterplatten, insbesondere in Verbindung mit den beteiligten und assoziierten Partnern. Besonders Gehäusebauteile mit elektronischen Funktionalitäten und Bauteile neuartiger Mikromobilitätsanwendungen stellen dabei ein großes Marktpotential dar. Für eine serientechnische Umsetzung müssen dazu konkrete Anwendungsszenarien generiert werden. Dazu sollen die Projektergebnisse auf Tagungen und Messen vorgestellt werden, um weitere potentielle Anwendungsfelder und Kunden zu erreichen. Für eine Serienumsetzung besteht in diesem Zusammenhang jedoch weiterhin Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

10 Forschungs- und Entwicklungsergebnisse von Seiten Dritter

Während der Projektbearbeitung sind von Seiten Dritter keine Forschungs- und Entwicklungsergebnisse sowie Schutzrechtsanmeldungen auf dem Gebiet des Forschungsprojekts bekannt geworden.

11 Veröffentlichungen

Erfolgte Veröffentlichungen

- Decker, R.; Emmrich, J.; Nendel, W.; Kroll, L.: Strukturkonforme Einbettung von mikroelektrischen Systemen in thermoplastischen Verbundstrukturen. In: "Zukunft: Textile Technologien" Tagungsband der 18. Chemnitzer Textiltechnik-Tagung, S. 260-266, Chemnitz, 2024.
- Decker, R.; Emmrich, J.; Weise, K.; Fiehler, R.; Horn, D.; Schmitt-Ruenhorst, J.; Gaitzsch, M.; Billep, D.; Blechschmidt, M.; Flach, S.; Kroll, L.: SmartERZ StrukTronik - Strukturkonforme Einbettung von mikroelektrischen Systemen in thermoplastische Verbundstrukturen. Posterbeitrag zur SmartERZ-AREA, Annaberg-Buchholz, 2024.
- Decker, R.; Emmrich, J.; Weise, K.; Fiehler, R.; Horn, D.; Schmitt-Ruenhorst, J.; Gaitzsch, M.; Billep, D.; Blechschmidt, M.; Flach, S.; Kroll, L.: SmartERZ StrukTronik - Strukturkonforme Einbettung von mikroelektrischen Systemen in thermoplastische Verbundstrukturen. Posterbeitrag zur 18. Chemnitzer Textiltechnik-Tagung "Zukunft: Textile Technologien", Chemnitz, 2024.
- Messeauftritt electronica 2024, München.
- Messeauftritt JEC World 2025, Paris.

Geplante Veröffentlichungen

- Vorstellung der Projektergebnisse auf der SmartERZ-Abschlussveranstaltung „Vom Projekt zum Zukunftsbündnis“ in Zwönitz
- Vorstellung der Projektergebnisse auf dem „Anwenderforum Smart Composites“ 2025 in Chemnitz
- Vorstellung der Projektergebnisse auf der internationalen Fachtagung „TECHNOMER 2025“ in Chemnitz
- Weitere Veröffentlichungen der Projektergebnisse auf Fachtagungen und in Fachzeitschriften