



Abschlussbericht

BMBF Verbundprojekt MikroBo:

Mikroelektronik für permanente, nichtinvasive Blutdruckmessung im Ohr

Teilvorhaben:

An Otoplastik angepasster Leiterbahndruck und AVT-Prozesse (OLA)

Förderkennzeichen / Angebotsnummer: 16ES0772

Projektlaufzeit: 01.01.2018 – 30.06.2021

Berichtszeitraum: 01.01.2018 – 30.06.2021

Projektträger:

Projektträger Karlsruhe

Projektpartner:

audifon GmbH & Co. KG, Kölleda

Bartels Mikroelektronik GmbH, Dortmund

Bosch Sensortec GmbH, Reutlingen

FZI Forschungszentrum Informatik, Karlsruhe

Herz- und Diabeteszentrum Nordrhein-Westfalen, Bad Oyenhausen

Assoziierte Partner:

Deutsche Hochdruckliga

KIND

Corvolution

CiS Forschungsinstitut für Mikrosensorik GmbH

Verfasser: Kai Werum, Kerstin Gläser, Jonas Jäger, Tim Horter

Kontakt: Kai.Werum@Hahn-Schickard.de

Inhaltsverzeichnis

I.	Kurzdarstellung des Projektes	2
1	Aufgabenstellung	2
2	Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....	2
3	Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn und Ende des Vorhabens	3
4	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	4
5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen oder außerhalb des Verbundprojektes	5
II.	Eingehende Darstellung der Projektergebnisse	6
6	Erzielte Ergebnisse.....	6
6.1	Aerosol Jet Druck auf Otoplastik-Materialien	6
6.2	Löten auf gedruckten Strukturen.....	10
6.3	Leitkleben mit isotrop leitfähigem Klebstoff (ICA) auf gedruckten Strukturen	14
6.4	Voruntersuchungen zum Aufbau des Technologiedemonstrators	16
6.5	Prozesskette zum Aufbau des Technologiedemonstrators.....	18
7	Nutzen für das Unternehmen und Verwertbarkeit des Ergebnisses	22
8	Darstellung des während des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen	22
9	Veröffentlichungen, Vorträge, Referate.....	22
9.1	Vorträge.....	22
9.2	Veranstaltungen	22
9.3	Veröffentlichungen und Fachbeiträge	23

I. Kurzdarstellung des Projektes

1 Aufgabenstellung

Ziel des Verbundprojekts MikroBO war die Erarbeitung eines mikrotechnischen In-Ohr-Systems für die permanente nichtinvasive Blutdruckmessung. Dieses System soll unter anderem aus einer im Ohr zu tragenden Otoplastik bestehen, in welche die Sensor- und Aktor-Komponenten auf einem eingebetteten Trägersystem integriert sind. Die Aktorik übernimmt die Aufgabe der aktiven Druckbeaufschlagung in einer abgeschlossenen Kammer im Gehörgang, welche, ähnlich dem klassischen Manschetten-Prinzip zur Blutdruckmessung, bis zum Erreichen des systolischen Druckwertes und dem damit verbundenen Stopp des Blutflusses in den arteriellen Gefäßen des Gehörgangs erfolgt. Über Mikro-Drucksensoren werden die Druckwerte kontinuierlich erfasst. Die Regelung der Aktorik und die Messwerterfassung erfolgt über eine Hörgeräte-ähnliche Plattform, welche sich hinter dem Ohr befindet und über in die Otoplastik integrierte Schnittstellen mit den elektronischen Komponenten kommuniziert. Die Algorithmen zur Signalverarbeitung und Bestimmung des absoluten Blutdrucks werden ebenfalls auf dieser Plattform ausgeführt.

Hahn-Schickard befasste sich im Rahmen des Teilvorhabens OLA mit dem Drucken von Leiterbahnen für die Realisierung einer funktionalisierten Otoplastik sowie mit der Entwicklung von AVT-Prozessen bis hin zur Bestückung der Otoplastik mit Sensorik.

2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Projekt MikroBo wurde von 01.01.2018 – 30.06.2021 als Verbundprojekt im Rahmen des BMBF-Förderprogrammes „Neue Elektroniksysteme für intelligente Medizintechnik (Smart Health)“ durchgeführt.

Das Vorhaben baut auf den Erfahrungen von Hahn-Schickard zu räumlichen Schaltungsträgern auf, insbesondere zum Drucken von Funktionsstrukturen auf unterschiedlichen Materialien und zur Bestückung von SMD auf Molded Interconnect Devices.

3 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn und Ende des Vorhabens

Zur Funktionalisierung von Bauteilen und Oberflächen mittels digitaler Drucktechnik werden standardmäßig planare Substrate aus spritzgegossenen Kunststoffen, Folien, Leiterplattenmaterialien oder Keramiken verwendet. Dabei werden hauptsächlich Substrate mit geringer Oberflächenrauheit mit nanopartikelhaltigen Tinten bedruckt. Die Substrate weisen üblicherweise eine vergleichsweise hohe Temperaturbeständigkeit auf, sodass nach dem Druckprozess eine Sinterung bis ca. 200°C zum Erreichen einer Leitfähigkeit der Leiterbahnstrukturen möglich ist. Vereinzelt ist es durch den Einsatz alternativer Sinterverfahren, wie bspw. photonischem Sintern möglich, auch temperatursensiblere Materialien zu funktionalisieren.

Das Aerosol Jet Verfahren bietet aufgrund einer Tiefenschärfe von bis zu 5 mm gewisse 3D-Fähigkeiten, deren Potential bei komplexen 3D-Konturen und Leiterbahnlayouts über mehrere Bauteilebenen jedoch mit 3-Achs-Druckern nicht voll ausgeschöpft werden. Speziell bei der Gestaltung des Layouts für kleine und komplexe Oberflächen wie bei Komponenten für Hörgeräte sind die Möglichkeiten der Technologie durch die variable, digitale Layout-Erstellung noch nicht vollständig ausgereizt.

Die SMD-Bestückung (Surface-Mounted Device) findet in der Regel auf planaren Substraten wie FR4-Leiterplatten statt. Die eingesetzten Bestückungsautomaten besitzen eine gewisse Flexibilität hinsichtlich der zu bestückenden Komponenten. Es existieren Design-Guidelines, die Rahmenbedingungen definieren. Individualisierte räumliche Baugruppen erfordern jedoch flexible Prozessketten und können häufig nur mit Sondermaschinen umgesetzt werden. Durch den Drang zu höheren geometrischen Freiheitsgraden und aufgrund der Notwendigkeit einer patientenindividuellen Fertigung der Produkte wird deshalb in der Hörgeräteindustrie noch häufig manuell bestückt. Es gibt jedoch zunehmend Montagevorgänge, die händisch aufgrund kleiner werdender Strukturen und Toleranzen nicht mehr umsetzbar sind. Zusätzlich sind automatisierte Bestückungsprozesse auch aus wirtschaftlichen Gründen wie z.B. kürzere Prozesszeiten und damit verbundene Kosteneinsparungen erstrebenswert.

Die Einsetzbarkeit von Aufbau- und Verbindungstechniken (AVT) auf unterschiedlichen Substraten hängt von der Materialkompatibilität und Oberflächenbeschaffenheit der Fügepartner

ab. So ist beispielsweise eine ausreichende Benetzung beim Lötprozess elementar, um eine zuverlässige Verbindung herzustellen. Beim Löten auf digital gedruckten Leiterstrukturen kommt als weitere Herausforderung hinzu, dass sich die prozessbedingt dünnen Schichten aus gedrucktem Silber aufgrund der beschleunigten Diffusion zwischen Silber und Zinn unter Prozesstemperatur zum Teil vollständig im Lot lösen.

In der Projektlaufzeit wurden unter anderem Druck-, Klebe- und Lötversuche mit digital gedruckten und mittels außenstromloser Metallisierung nachverstärkten Leiterbahnstrukturen, sowie 3D-Substraten in Form von Otoplastiken aus unterschiedlichen Materialien durchgeführt. Hierbei konnten Komponenten wie Drucksensoren auf verschiedenen bedruckten Otoplastikmaterialien ankontaktiert werden. Weiterhin wurden Vorversuche zur Verwendungsmöglichkeit von SnBi-Lot mit Silberanteil zum Löten auf gedruckten Strukturen ohne chemische Nachverstärkung durchgeführt und ebenfalls erfolgreich kontaktiert. Die Projektergebnisse konnten auf einen Technologiedemonstrator transferiert werden.

4 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Verbundprojekt MikroBo wurde mit insgesamt acht Arbeitspaketen geplant (**Abbildung 1**). Hahn-Schickard war an den Arbeitspaketen 1, 2 und 6 beteiligt. Die Schwerpunkte lagen dabei auf der Analyse und Konzeption geeigneter Technologien, der Entwicklung von Druckprozessen zur Aufbringung von Leiterbahnen auf die Otoplastik sowie auf der Entwicklung von AVT-Prozessen für die Integration der Teilkomponenten in das Gesamtsystem.



Abbildung 1: Projektstruktur von MikroBo

Als ursprüngliche Projektlaufzeit waren 36 Monate geplant. Bedingt durch unvorhergesehene Verzögerungen aufgrund der Corona-Krise wurde das Projekt um 6 Monate kostenneutral verlängert.

Nach einer Kick-Off-Veranstaltung wurden halbjährliche Konsortialtreffen abgehalten, in denen die Projektpartner jeweils den aktuellen Stand dem gesamten Konsortium sowie dem Projektträger vorstellten, sowie eventuell aufgetretene Probleme diskutiert werden konnten. Ergänzend fanden wöchentliche Projekt-Calls in kleineren Arbeitsgruppen und Detailabsprachen statt.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen oder außerhalb des Verbundprojektes

Außerhalb des Projektkonsortiums wurde mit keinen anderen Stellen zusammengearbeitet.

II. Eingehende Darstellung der Projektergebnisse

6 Erzielte Ergebnisse

Im Teilprojekt OLA von MikroBo wurden von Hahn-Schickard vielfältige Ergebnisse zum Digitaldruck leitfähiger Strukturen und zur Aufbau- und Verbindungstechnologie (AVT) auf additiv gefertigten Substraten erzielt. Darauf aufbauend wurde ein Technoledemonstrator in einem teilautomatisierten Prozess realisiert.

6.1 Aerosol Jet Druck auf Otoplastik-Materialien

Zu Beginn wurden verschiedene nanopartikuläre Metalltinten hinsichtlich Ihrer Druckbarkeit auf vom Projektpartner Audifon (bzw. KIND) mittels DLP-Verfahren (Digital Light Processing) hergestellten Testplättchen aus zwei gängigen Otoplastikmaterialien (Dreve Fototec DLP A und Luxaprint 3D Mould) untersucht. Ebenso fanden Druckversuche auf mittels DLP-Verfahren hergestellten Substraten aus PLASTCure Rigid 10500 der Firma Prodways statt (siehe Kap. 6.4), welches unter anderem für Rapid Tooling und Elektronikgehäuse geeignet ist. Aufgrund der geforderten kleinen Strukturgrößen wurde als Druckverfahren das Aerosol Jet-Verfahren eingesetzt. Das Verfahren ermöglicht unter optimalen Bedingungen minimale Linienbreiten von 10-20 µm und bietet alle Vorteile additiver digitaler Drucktechnologien, wie z.B. eine berührungslose, maskenfreie und ressourcenschonende Prozessführung sowie zusätzlich eine hohe Tiefenschärfe, die auch das Drucken auf bestimmten 3D-Topographien gestattet. Als Testlayout wurden u.a. Leiterbahnstrukturen, sowie Kontaktstrukturen für einen Drucksensor von Projektpartner Bosch gedruckt, welcher in vergleichbarer Form für das Blutdruckmesssystem verwendet werden soll.

In **Tabelle 1** sind die Ergebnisse für verschiedene Tinte-/Materialkombinationen zusammengefasst. Als weitere Bewertungskriterien sind die Sinterbarkeit und die Haftfestigkeit der gedruckten Strukturen aufgeführt. Zur Sinterung eignen sich thermische und lichtbasierte Verfahren.

Tabelle 1: Vergleich verschiedener nanopartikulärer Tinten auf Otoplastikmaterialien

Tinte	Druckbarkeit	Sinterung Pulse Forge		Haftfestigkeit (Best Results)	
		Dreve Fototec DLP A	Luxaprint 3D Mould	Dreve Fototec DLP A	Luxaprint 3D Mould
Ag PVNC I30 EG-1	+	O/+	+	++	++
Cu PVNC DC 25	+	--	--	--	--
Ag Lab2271 GSB Wahl	○	-	+	+	-
Ag Genes'Ink S-CS01130	-	+	+	- (ohne Plasma)	++ (o.Pl, p2)

Plasmavorbehandlung: O₂-Pls: 5s/40W (P1), 5s/60W (P2)

Aufgrund der Temperaturempfindlichkeit der Substratmaterialien wurde auf ein photonisches Sinterverfahren basierend auf UV-/Vis Lichtblitzen zurückgegriffen. Dieses Verfahren eignet sich im Prinzip auch für oxidationsempfindliche Kupfertinten und wurde mit dem Gerät PulseForge 1200, (Novacentrix, USA) durchgeführt. Aus Tabelle 1 geht hervor, dass auf beiden Substratmaterialien die besten Ergebnisse mit der Silbertinte Sicrys I30 EG-1 von PV NanoCell (Israel) erzielt wurden. In **Abbildung 2** sind zwei gedruckte Kontaktstrukturen mit dieser Silbertinte auf den beiden Materialien dargestellt. Mit dieser Tinte konnte auch erfolgreich eine Drucksensorkontaktstruktur auf eine Otoplastik gedruckt werden, womit die prinzipielle 3D-Fähigkeit des Druckverfahrens demonstriert wurde. Dies ist **Abbildung 3** zu entnehmen.

Die direkte drucktechnische Herstellung von Cu-Strukturen war auf den Otoplastikmaterialien nicht möglich, da die photonische Sinterung der verwendeten Cu-Tinte keine leitfähigen Strukturen ergab (Tabelle 1) und thermische Sinterung bei Cu-Tinten aufgrund ihrer Oxidationsempfindlichkeit allenfalls unter Luftausschluss oder sauerstofffreier Atmosphäre theoretisch möglich ist.

Weiterhin wurden Experimente zur außenstromlos chemischen Nachverstärkung der gedruckten Strukturen mit Kupfer durchgeführt. Die besten Ergebnisse wurden bei einer Beschichtungszeit von 15 min erzielt. Hierbei konnten gut leitfähige Cu-Schichten auf gedruckten Ag-Strukturen ohne Ablösung hergestellt werden (**Abbildung 4**, links). Solcherart hergestellte Cu-Strukturen sind für die Kontaktierung durch Löten interessant, da bei Cu im Gegensatz zu Ag eine geringere Lösungsgeschwindigkeit der gedruckten Kontaktpads im Lot zu erwarten sind (siehe Kapitel 6.2). Die so hergestellten Schichten konnten zudem mit einem außenstromlos abgeschiedenen Ni/Au-

Finish versehen werden, wie in **Abbildung 4**, rechts zu sehen ist. In **Abbildung 5** sind verschiedene Testlayouts auf dem Dreve Fototec DLP A dargestellt.

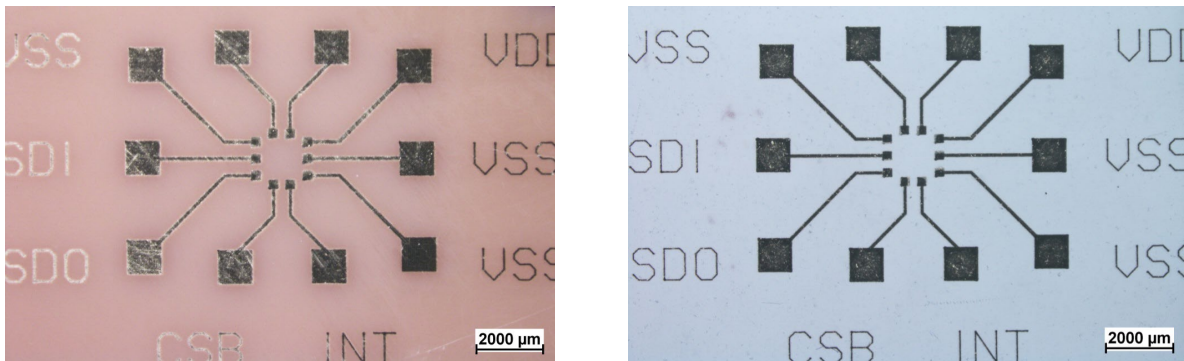


Abbildung 2: Gedruckte Kontaktstruktur auf Tests substratplättchen, Tinte: PV Nanocell I30-EG1, Substrate: Dreve Fototec DLP A (links), Luxaprint 3D Mould (rechts).

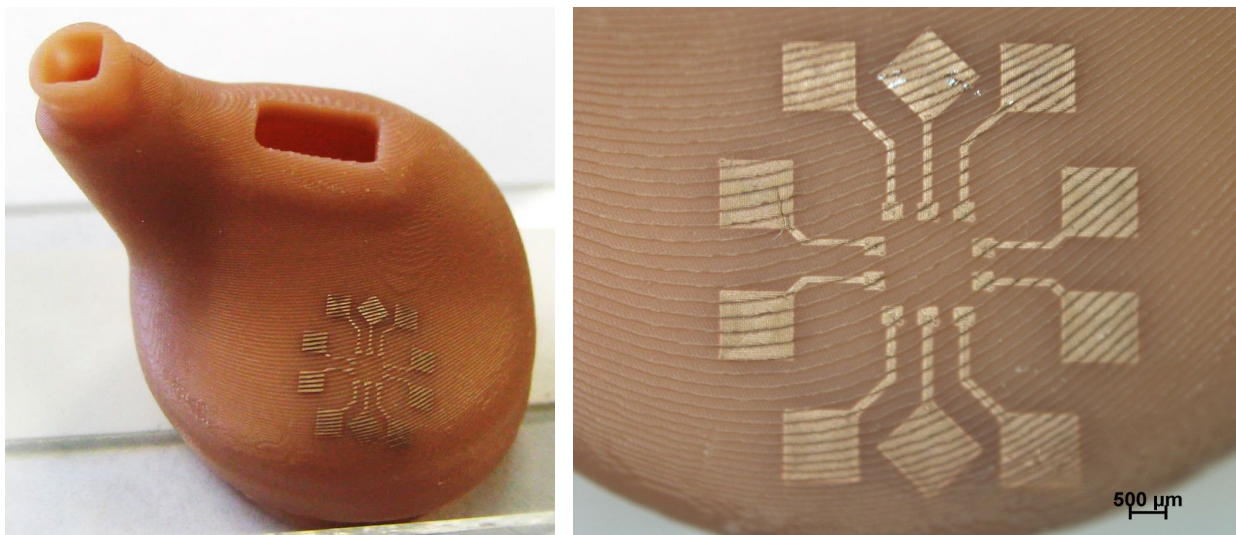


Abbildung 3: Gedruckte Kontaktstruktur auf Otoplastikoberfläche, Tinte: PV Nanocell I30-EG1, Substrat: Dreve Fototec DLP A

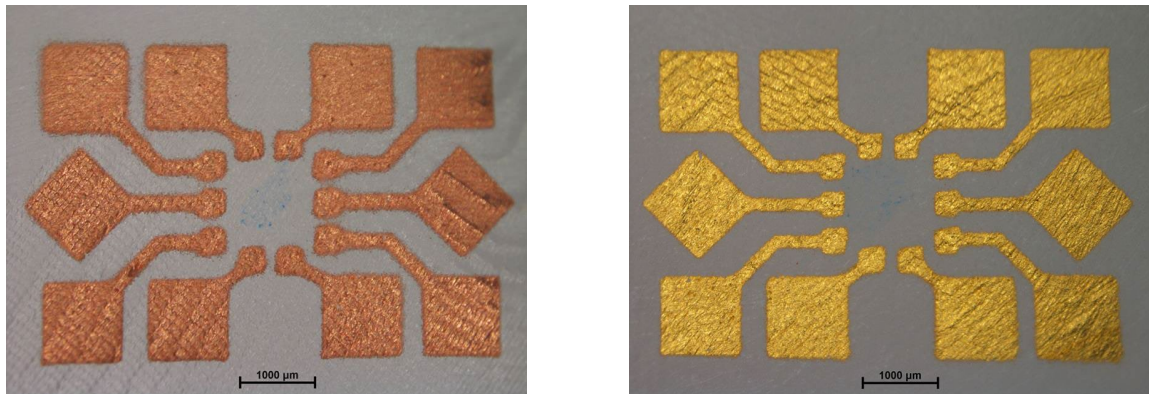


Abbildung 4: Mit Cu (links) und Cu/Ni/Au (rechts) nachverstärkte Ag-Strukturen auf Luxaprint 3D Mould.

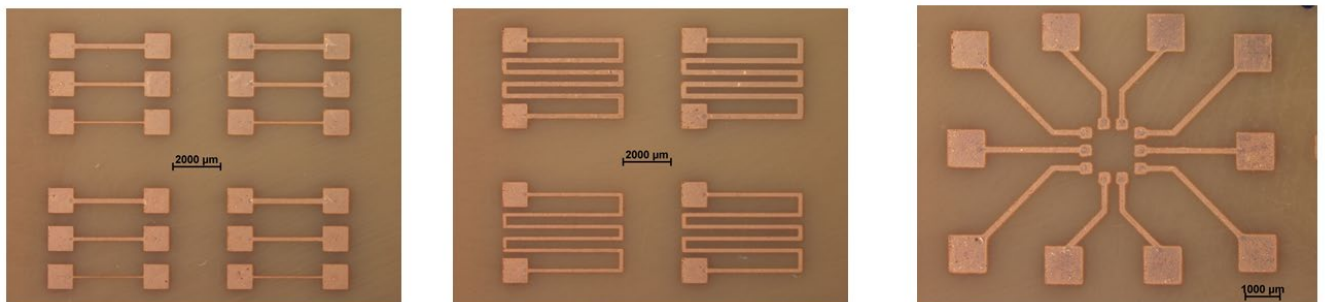


Abbildung 5: Gedruckte Ag-Strukturen, außenstromlos chemisch nachverstärkt mit Cu, Tinte: Ag PV Nanocell I30 EG-1, Verweildauer im Cu-Bad: 15 min, Substrat: Dreve Fototec DLP A

Aufbauend auf den Druckversuchen mit Aerosol Jet wurden verschiedene Otoplastik-3D-Probekörper aus Luxaprint 3D Mould hergestellt. Hierbei wurde weiterhin die Nanosilbertinte I30 EG-1 von PV Nanocell verwendet, die sich als geeignetste aller getesteten Metalltinten erwiesen hatte. In **Abbildung 6** ist beispielhaft das Druckergebnis auf einer gewölbten Oberfläche einer Otoplastik dargestellt. Die Sinterung erfolgte analog mit Hilfe des PulseForge-Verfahrens.

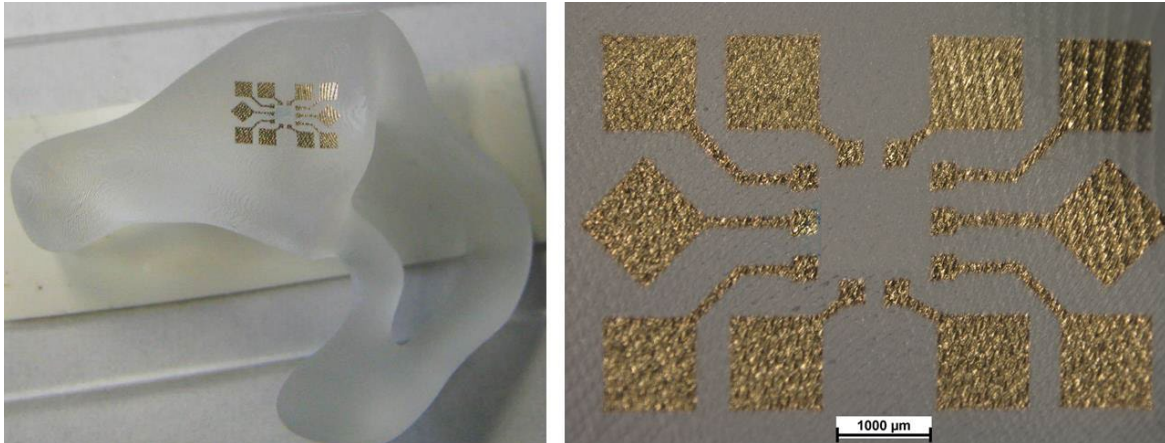


Abbildung 6: Gedruckte Silberstrukturen auf Otoplastik, Tinte: Ag PV Nanocell I30 EG-1, Substratmaterial: Luxaprint 3D Mould

6.2 Löten auf gedruckten Strukturen

Die im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Teststrukturen mit den unterschiedlichen Tinten- und Materialkombinationen wurden auf Ihre Lötbarkeit hin untersucht. Das Layout der Strukturen wurde so gewählt, dass sowohl standardisierte 0603-SMD-Bauteile, als auch Drucksensoren vom Typ „BMP388“ von Bosch auf die Substrate bestückt werden können. Geometrie und Größe der Pads orientierten sich an den vom Hersteller empfohlenen Abmessungen im Datenblatt. Die Bewertungskriterien waren dabei unter anderem die Benetzbarkeit der Pads und die Verbindungsqualität der Lötstelle.

Aufgrund der für den normalen Lotprozess mit SAC-Loten zu niedrigen Temperaturstabilität der generativ gefertigten Substrate wurden hauptsächlich niedrigschmelzende Lotpasten verwendet. Ein SAC-Lot wurde jedoch anfangs als Referenz zum niedrigschmelzenden Lot verwendet. Im Einzelnen kamen folgende Lotpasten zum Einsatz:

- *SnBi, T3 und T5: niedrigschmelzende Lotpaste (Schmelzpunkt 138°C)*
- *SnBiAg1: niedrigschmelzende Lotpaste (Schmelzpunkt 139°C)*
- *SnAgCu, T3: bleifreies SAC-Lotpaste (Schmelzpunkt 217°C)*

Zum Lotpastenauftrag kam das Dispensieren zum Einsatz, da ein Schablonendruck bei dreidimensionalen Substraten, wie einer Otoplastik, nicht möglich ist. Ein manueller Nanodispenser und eine Dosiereinheit einer Automatisierungsanlage wurden hierfür verwendet.

Während auf die größeren Pads der 0603-SMD-Bauteile mit beiden Lotpasten ohne Probleme dispent werden konnte, wurden bei den kleineren Pitches des Drucksensors hauptsächlich Typ 5-Lotpaste verwendet. Die 0603-SMD-Bauteile wurden auf die Substrate, auf denen das Lot appliziert wurde, gesetzt und anschließend per Reflow-Ofen mit einem für die Lotpaste geeigneten Temperaturprofil gelötet.

Bereits bei den ersten Versuchen mit 2-lagig gedruckten Pads der Silbertinte PV NanoCell I30 EG-1 zeigte sich, dass sich die Ag-Pads nicht nur im zinnbasierten SAC-Lot, sondern auch in den zinnbasierten aber niedrighschmelzenden Lotpasten auflösen. Dieser Effekt wurde auch bei höheren Schichtdicken, welche durch mehrere Drucküberfahrten (6-lagig und 12-lagig) realisiert wurden, beobachtet. In **Abbildung 7** ist beispielsweise ein 12-lagig gedrucktes Pad auf Luxaprint 3D Mould nach dem Lötten mit SnBi-Lot bei 155°C zu sehen. Da die Lösungsgeschwindigkeit temperaturabhängig ist, wurden zusätzlich verschiedene Temperaturprofile im Reflow-Ofen getestet, was jedoch zu keiner signifikanten Verbesserung der Lötresultate führte. Eine weitere Reduzierung der Temperatur unter 155°C war nicht möglich, da dies außerhalb der Spezifikationen zur Verarbeitung des Herstellers liegt und das Lot nicht mehr umschmilzt.

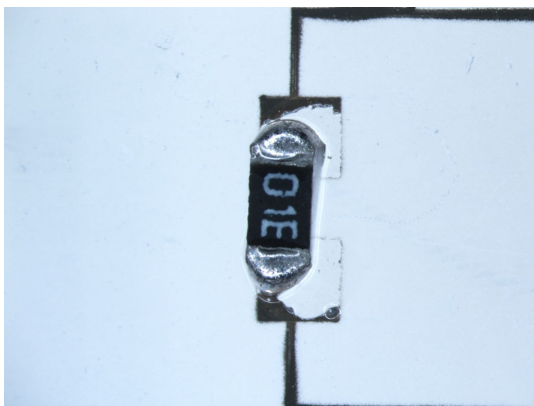


Abbildung 7: 12-lagig gedrucktes Pad, das nach dem Reflow-Prozess teilweise im Lot gelöst ist.

Das Verhalten beim Lötprozess hing stark von der verwendeten Silbertinte ab. So zeigte beispielsweise die Ag-Tinte Lab 2271 von GSB Wahl ein anderes Verhalten als die PV NanoCell Ag-Tinte. Zwar löst sich das Pad bei der Lab2271-Tinte nicht in der Lotpaste, allerdings steht dem eine sehr schlechte Benetzung der gedruckten und gesinterten Silberpads gegenüber. Wie in **Abbildung 8** zu sehen ist, zieht sich das Lot beim Umschmelzen durch die unzureichende Benetzung der Pads an die Metallisierung der 0603-SMD-Bauteile. Dadurch zentrieren sich die Bauteile nicht an den Pads, sondern „verschwimmen“.

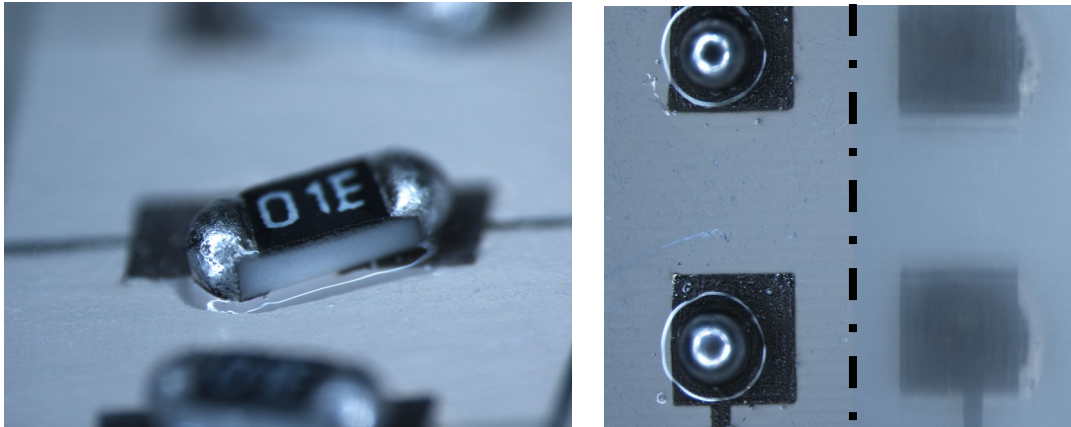


Abbildung 8: 0603-SMD-Widerstand (links) und „Lotkugel“ und Durchsicht durch das Substrat (rechts)

Des Weiteren wurde die Lötbarkeit auf den vorher beschriebenen und mit Cu außenstromlos nachverstärkten Pads untersucht. Auf diesen Cu-Pads konnten mit den SnBi-Loten leitfähige Verbindungen hergestellt werden. Der Meniskus der Lotverbindung zwischen Pad und SMD-Bauteil hat sich gut ausgebildet. In **Abbildung 9** sind aufgelötete 0603-SMD-Widerstände auf Teststrukturen zu sehen. Die Ablösungen der Metallisierung vom Substrat, bzw. das Abheben der seitlichen Leiterbahnen, sind unerwünscht und schon vor dem Lötprozess vorhanden. Diese Ablösungen konnten durch eine Verringerung der Verweildauer im Cu-Metallisierungsbad jedoch weitgehend unterbunden werden (siehe Kapitel 6.1).

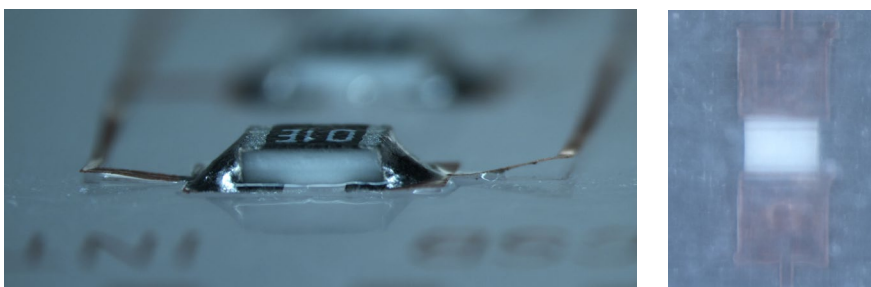


Abbildung 9: Gute Lötverbindung des 0603-SMD-Widerstands auf dem Pad und die zugehörige Durchsicht durch das Substrat, jedoch mit teilweise Ablösung der Metallisierung

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass solcherart hergestellte Kupfer-Strukturen für die Kontaktierung durch den Lötprozess interessant sind, da bei einer Kupferoberfläche im Gegensatz zu Silber die Diffusionsprozesse wesentlich langsamer ablaufen. Aufgrund der Ergebnisse ist davon auszugehen, dass auch außenstromlos chemisch nachverstärkte Strukturen mit oder ohne Ni/Au-Finish für den Funktionsdemonstrator umsetzbar sind. Weiterhin

ist davon auszugehen, dass Metallisierungsschichten mit außenstromlos chemischer Cu-Nachverstärkung bei reduzierter Beschichtungszeit auch auf den Otoplastikkörpern des Funktionsdemonstrators lötbar sind. Allerdings traten im Reflow-Prozess Risse in den nicht planaren Otoplastikgeometrien auf, die wahrscheinlich auf thermische Spannungen durch den massiven Grundkörper zurückzuführen sind, siehe **Abbildung 10**.

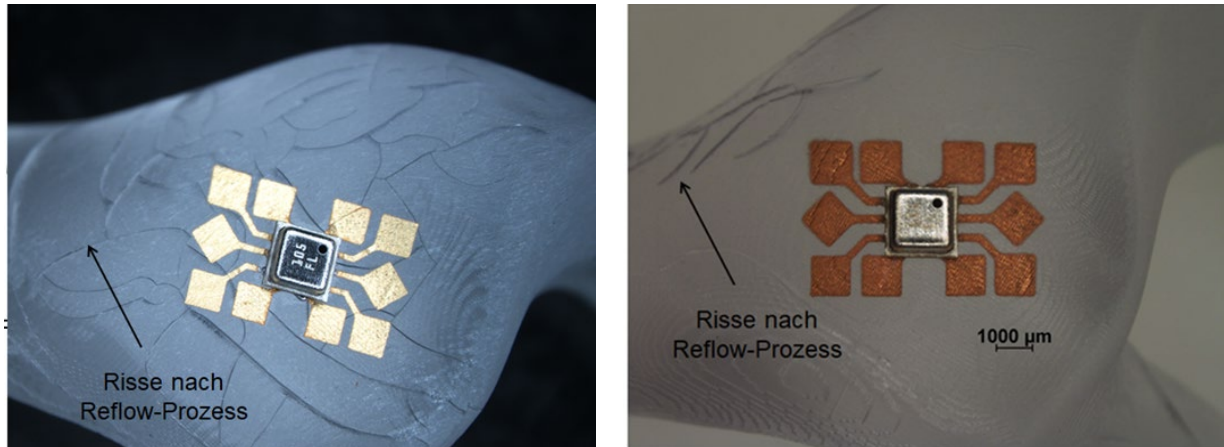


Abbildung 10: Rissbildung nach Reflowprozess auf unterschiedlichen Substraten

Aufgrund der Rissbildung beim Lötprozess sollte der Prozess bei möglichst niedrigen Temperaturen durchgeführt werden, weshalb der Fokus auf Versuchen mit niedrigschmelzenden SnBi-Lotpasten lag. Neben reinem SnBi-Lot wurde auch ein Lot aus SnBi mit 1% Silberanteil getestet. Der Silberanteil hatte eine positive Wirkung auf den Lötprozess, was vermutlich auf einen Sättigungseffekt bei den Diffusionsprozessen zwischen Lot und Silber zurückzuführen ist. Der Vergleich zwischen SnBi und SnBiAg1 ist in **Abbildung 11** dargestellt. Zu sehen ist jeweils die Durchsicht durch ein Substrat auf eine 0603-SMD Lötstelle. Dabei konnten nun auch die nicht nachverstärkten Strukturen erfolgreich gelötet werden. Es traten nach dem Reflow-Prozess allerdings weiterhin Risse in Substraten mit massiven Grundkörper auf.

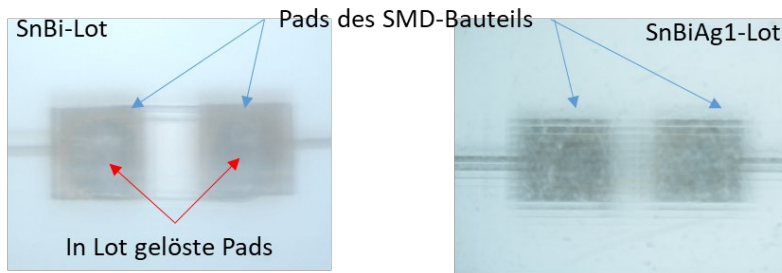


Abbildung 11: Durchsicht durch Substrat nach dem Lötprozess mit niedrigschmelzenden Loten (Kontrast wurde angepasst)

6.3 Leitkleben mit isotrop leitfähigem Klebstoff (ICA) auf gedruckten Strukturen

Im Rahmen von MikroBo wurden umfassende Untersuchungen zur Kontaktierung von SMD-Bauteilen auf gedruckten Strukturen mittels isotrop leitfähigen Klebstoffen (ICA) durchgeführt. Die Untersuchungen umfassen beide im Projekt verwendeten Otoplastik-Materialien (Dreve Fototec DLP A und Luxaprint 3D Mould). Es wurden zwei verschiedene ICA verwendet:

- Standard Leitklebstoff (Epoxy-System, silbergefüllt)
- Leitklebstoff kompatibel mit unedlen Oberflächen wie z.B. Sn

Standard SMD besitzen meist ein unedles Sn-Oberflächenfinish. Zwar gibt es auch spezielle „Terminations“ für ICA mit Edelmetall-Finish, jedoch schränkt diese Vorgabe die Auswahl der SMD-Komponenten deutlich ein. Aus diesem Grund wurden beide Klebstoffarten getestet.

Aufgrund der kleinen Dimensionen der Pads wurde anstelle von Dispensen das Stempeln eingesetzt. Für beide Klebstoffe wurden Stempel mit unterschiedlichen Geometrien angefertigt und unterschiedliche Filmdicken des Klebstoffdepots ermittelt. Im Falle des Standardklebstoffs hat sich 100 µm Schichtdicke als Optimum herausgestellt. Der Klebstoff für unedle Oberflächen hingegen wurde mit 150 µm gestempelt. Es wurden zusätzlich Stempel zum Dippen in einer Direct Dispensing Unit (DDS) gefertigt, die in einem modular einsetzbaren Bestückautomaten verwendet werden kann. Die DDS bei Hahn-Schickard ist in **Abbildung 12** zu sehen. Eine Nahaufnahme eines der Stempeltools ist in **Abbildung 12** auf der rechten Seite zu sehen.

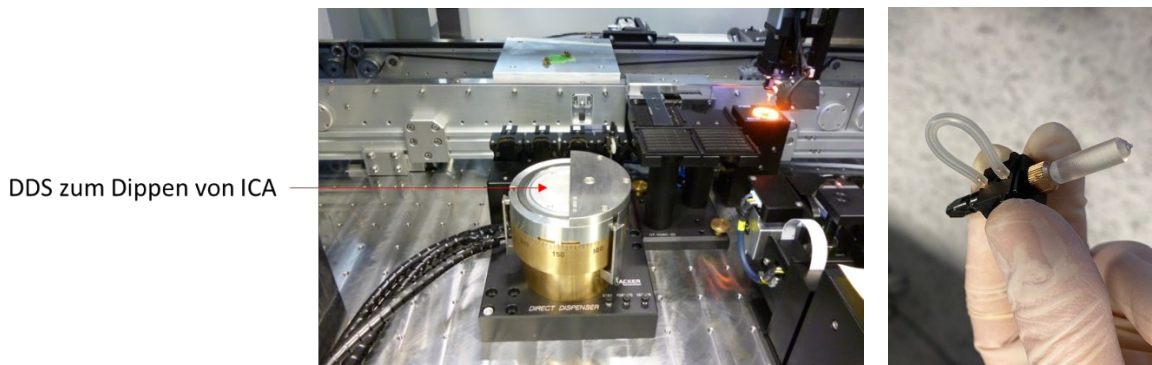


Abbildung 12: Direct Dispensing Unit (DDS) im Bearbeitungsraum eines modularen Vollautomaten bei Hahn-Schickard

Standard SMD-Komponenten (0603-Widerstände, 0Ω) und SMD-Drucksensoren (Bosch BMP388) wurden auf die im Projekt erarbeiteten Teststrukturen leitgeklebt und analysiert. Die Ergebnisse der Schertests sind in **Abbildung 13** dargestellt. Bei angepassten Parametern konnten sowohl für den Standard Leitklebstoff, als auch für Leitklebstoff für unedle Oberflächen hohe Scherwerte erreicht werden.

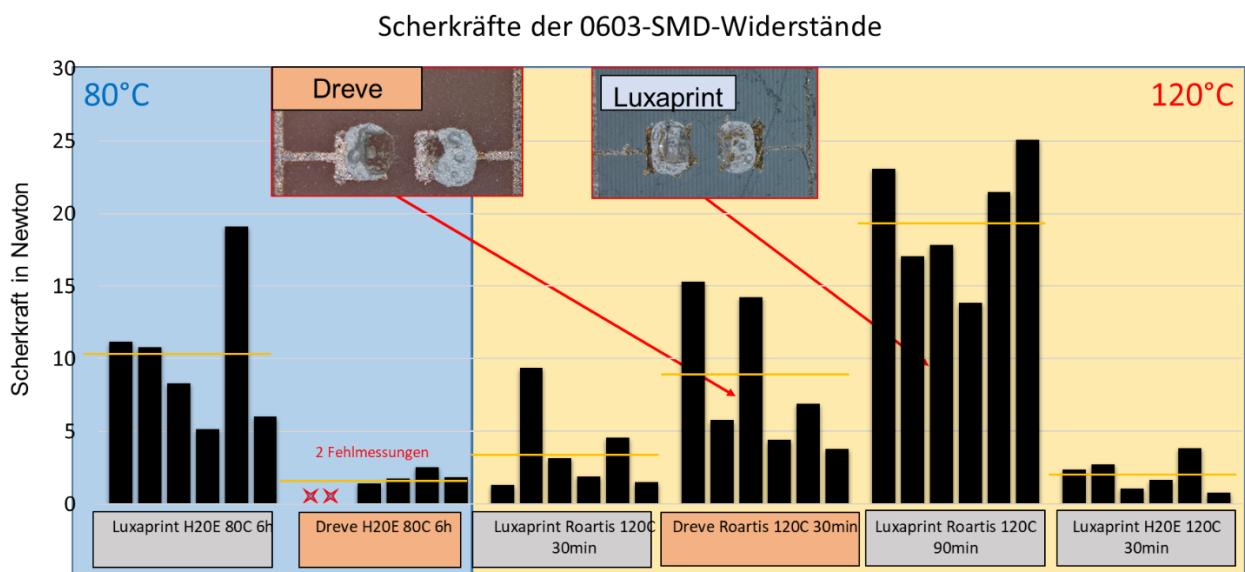


Abbildung 13: Ergebnisse der Scherversuche der ICA bei unterschiedlichen Prozessparametern

Die SMD-Drucksensoren zeigten bei 7 Versuchen nur einen Kurzschluss (jeweils 10 Pads mit $500 \mu\text{m}$ Pitch). Somit wird die Kontaktierung mittels ICA in Kombination mit dem Stempelprozess als grundsätzlich erfolgreich betrachtet. Dies konnte auch durch Röntgenaufnahmen und Schliffbilder (siehe **Abbildung 14**) bestätigt werden.

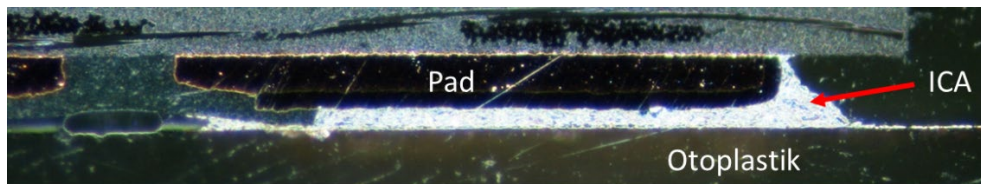


Abbildung 14: Schliffbild durch leitgeklebten SMD-Drucksensor im Bereich des Pads

6.4 Voruntersuchungen zum Aufbau des Technologiedemonstrators

Die Otoplastik des Technologiedemonstrators wurde in Zusammenarbeit mit Projektpartner Audifon designt (siehe **Abbildung 15**, mitte). Auf dem Demonstrator befindet sich ein Drucksensor der Firma Bosch Sensortec des Typs BMP388 der über I2C angesteuert werden kann. Es wurden alle für die Funktion relevanten Anschlüsse des Demonstrators kontaktiert. Dazu zählen CSB, SDO, SDI und SCL. Auf der Oberseite ist beispielhaft eine Mäanderstruktur zu sehen, welche mit entsprechender Auswerteelektronik als integrierte Temperatursensorstruktur eingesetzt werden kann. Es wurde auch eine Variante mit einem PPG-Sensor (Auflicht-Photoplethysmographie) konstruiert. Da der Fokus des Demonstrators auf den gedruckten Strukturen liegt und der PPG-Sensor bereits in einem weiteren Demonstrator für die klinischen Tests untersucht werden sollte, wurde dieser nicht im Rahmen dieses Funktionsdemonstrators des Leiterbahndrucks integriert.

Der Technologiedemonstrator wurde in zwei verschiedenen Aufspannungen im Aerosol-Jet bedruckt. Die Halterungen wurden additiv gefertigt. In der **Abbildung 15** (links und rechts) sind zwei Nahaufnahmen einer Otoplastik mit digital gedruckter Leiterbahnstruktur dargestellt.

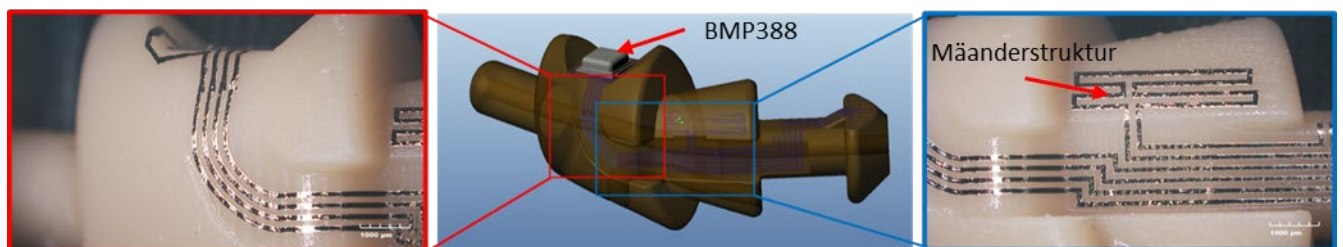


Abbildung 15: Nahaufnahmen von Otoplastiken aus Dreve Fototec DLP A (links, rechts) und CAD-Modell des Technologiedemonstrators (mitte)

Aufgrund der eingeschränkten Verfügbarkeit von Luxaprint 3D Mould während der Corona-Pandemie wurden die Technologiedemonstratoren aus Dreve Fototec DLP A gefertigt und

getestet. Zusätzlich zu dem beigen Dreve Fototec DLP A wurde auch eine opake Version desselben Grundmaterials verwendet. Die Druck- und Sinterparameter konnten 1:1 übertragen werden. Zunächst wurden jedoch einige Druckversuche auf dem DLP-Material PLASTCure Rigid 10500 der Firma Prodways durchgeführt (siehe **Abbildung 16**). Das Material ist zwar nicht biokompatibel, kann aber für die grundsätzliche Demonstration genutzt werden. Darüber hinaus könnte das Material zukünftig für andere Anwendungen interessant werden, die hohe Anforderungen an thermische Stabilität, Präzision, Genauigkeit oder auch an Elektronikgehäuse stellen. Die Druck- und Sinterparameter wurden anhand der eingesetzten Testlayouts bestimmt. Dreve Fototec DLP A wurde analog zum PLASTCure Rigid 10500-Material bedruckt.

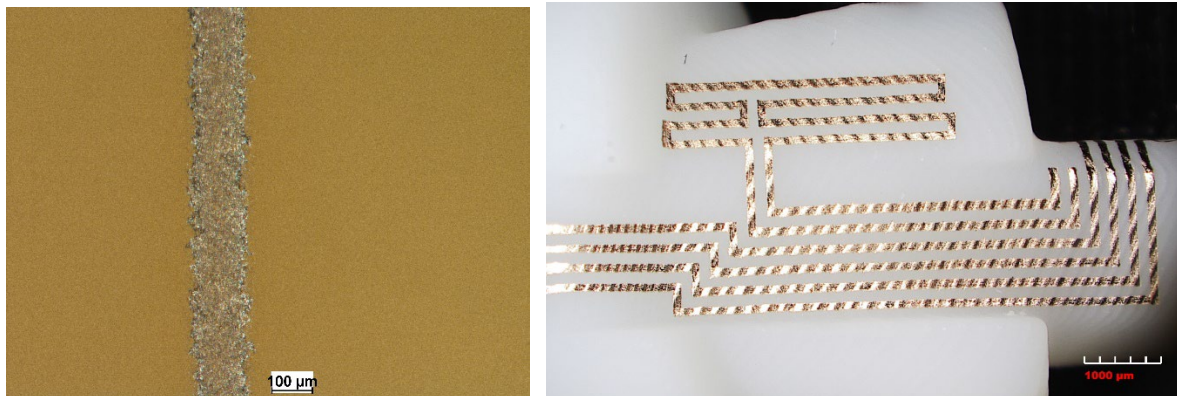


Abbildung 16: Voruntersuchungen mit PLASTCure Rigid 10500: thermische gesinterte Leiterbahn auf planarem Substrat (links) und Leiterbahnen auf Otoplastik (rechts)

Dreve Fototec DLP A wurde nach der additiven Fertigung in Trommeln gleitgeschliffen. Sowohl bei PLASTCure Rigid 10500 als auch bei Dreve Fototec DLP A war eine Plasmavorbehandlung notwendig. In der **Abbildung 17** ist eine Otoplastik einmal mit und einmal ohne Plasmavorbehandlung (Atmosphärenplasma) vor dem Bedrucken zu sehen. Ohne die Vorbehandlung wird die Substratoberfläche nicht ausreichend benetzt.

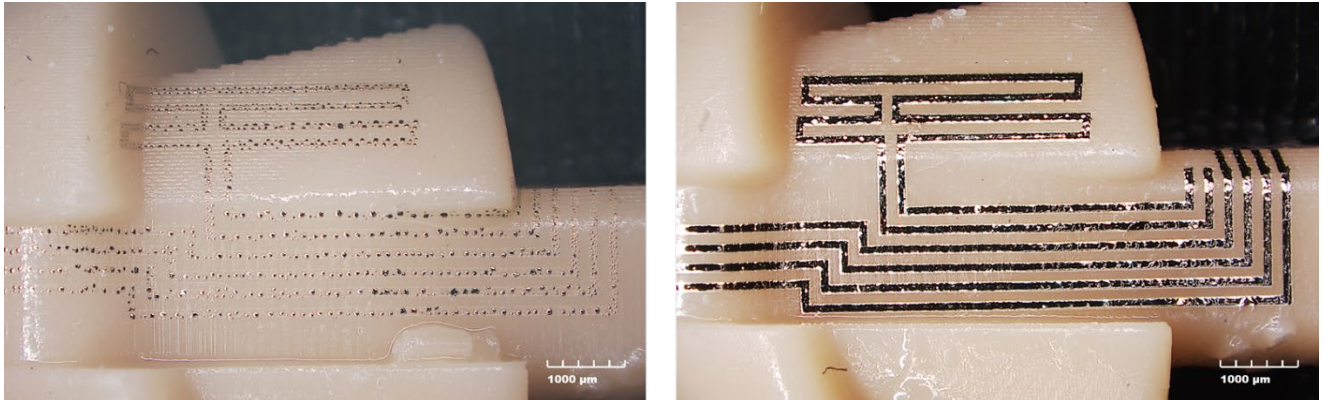


Abbildung 17: Digital gedruckte Leiterbahnen auf Otoplastik ohne (links) und mit (rechts) Plasmavorbehandlung

6.5 Prozesskette zum Aufbau des Technologiedemonstrators

Auf den Otoplastikkörpern wurden die SMD elektrisch mittels Leitkleben kontaktiert (**Abbildung 18**). Bei den Drucksensoren handelt es sich um digitale MEMS-Sensoren für Druck- und Temperaturmessungen vom Typ BMP388 der Fa. Bosch. Der Sensor sitzt in einem LFA-Gehäuse mit Metalldeckel und hat die Abmaße von $2 \times 2 \times 0,8\text{mm}^3$. Des Weiteren wurde ein 0 Ohm Widerstand als 0603-SMD zur Leiterbahnkreuzung bestückt.

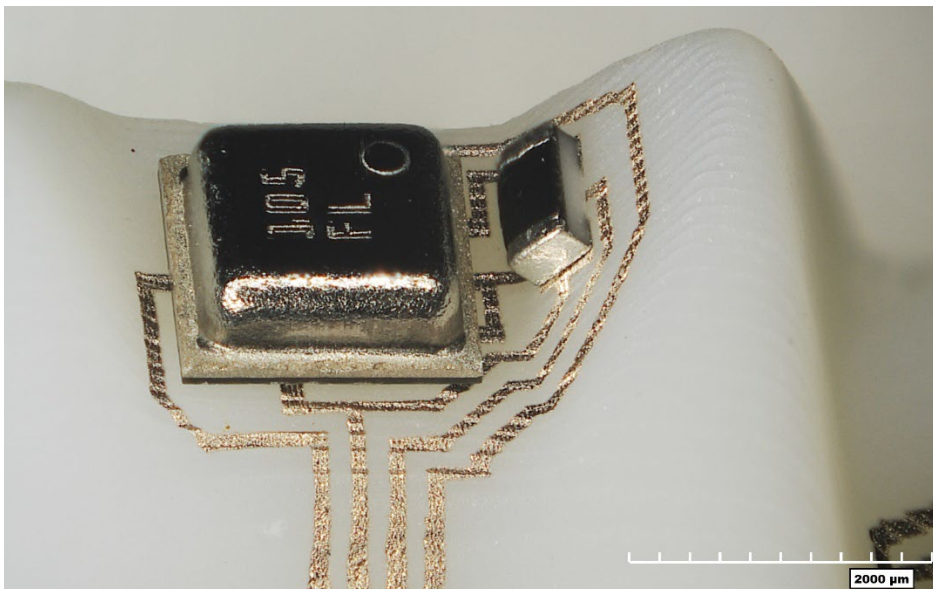


Abbildung 18: Elektrisch kontaktierte SMD-Komponenten auf Otoplastik-Grundkörper

Abbildung 19 zeigt eine Übersicht über die komplette, im Rahmen des Projektes erarbeitete Prozesskette für den Technologiedemonstrator. Die Otoplastikkörper werden mittels Digital Light Processing (DLP) aufgebaut. Vor dem Bedrucken mittels Aerosol-Jet werden die Bauteile plasmabehandelt, um die Benetzbarkeit der Tinte zu erhöhen. Die Bauteile mit den gedruckten Strukturen werden anschließend photonisch gesintert, um die Leitfähigkeit auf dem Substrat zu erzeugen.

Der Bestückungsprozess findet auf einer hochpräzisen Fertigungsanlage (Haecker VICO XTec) statt, die durch seine modulare Maschinenplattform an verschiedene Anwendungen adaptierbar ist. Das Ziel war es, den Prozess über das Laborstadium hinaus bis hin zur Produktionsphase abbilden zu können. Die Bauteile können über eine Aufnahme in allen räumlichen Dimensionen ausgerichtet werden. Die Positionserkennung erfolgt über ein Kamerasystem das neben x- und y- auch die z-Ebene hochgenau inspizieren kann. Durch die optische Inspektion können sowohl die Stempel- als auch die Bestückpositionen abgeglichen werden. Das Stempeln des Leitklebstoffs erfolgt über ein Stempeltool. Der Stempel wird dafür in einen Klebstofffilm mit definierter Filmhöhe eingetaucht, der Leitklebstoff aufgenommen und anschließend auf das Pad auf dem Substrat transferiert. Die SMD-Bauteile werden über ein Vakuumtool aufgenommen und über eine Unterseitenerkennung und der Referenzinspektion am Substrat abgeglichen. Das Aushärten des Leitklebstoffs findet in einem konventionellen Ofen statt.

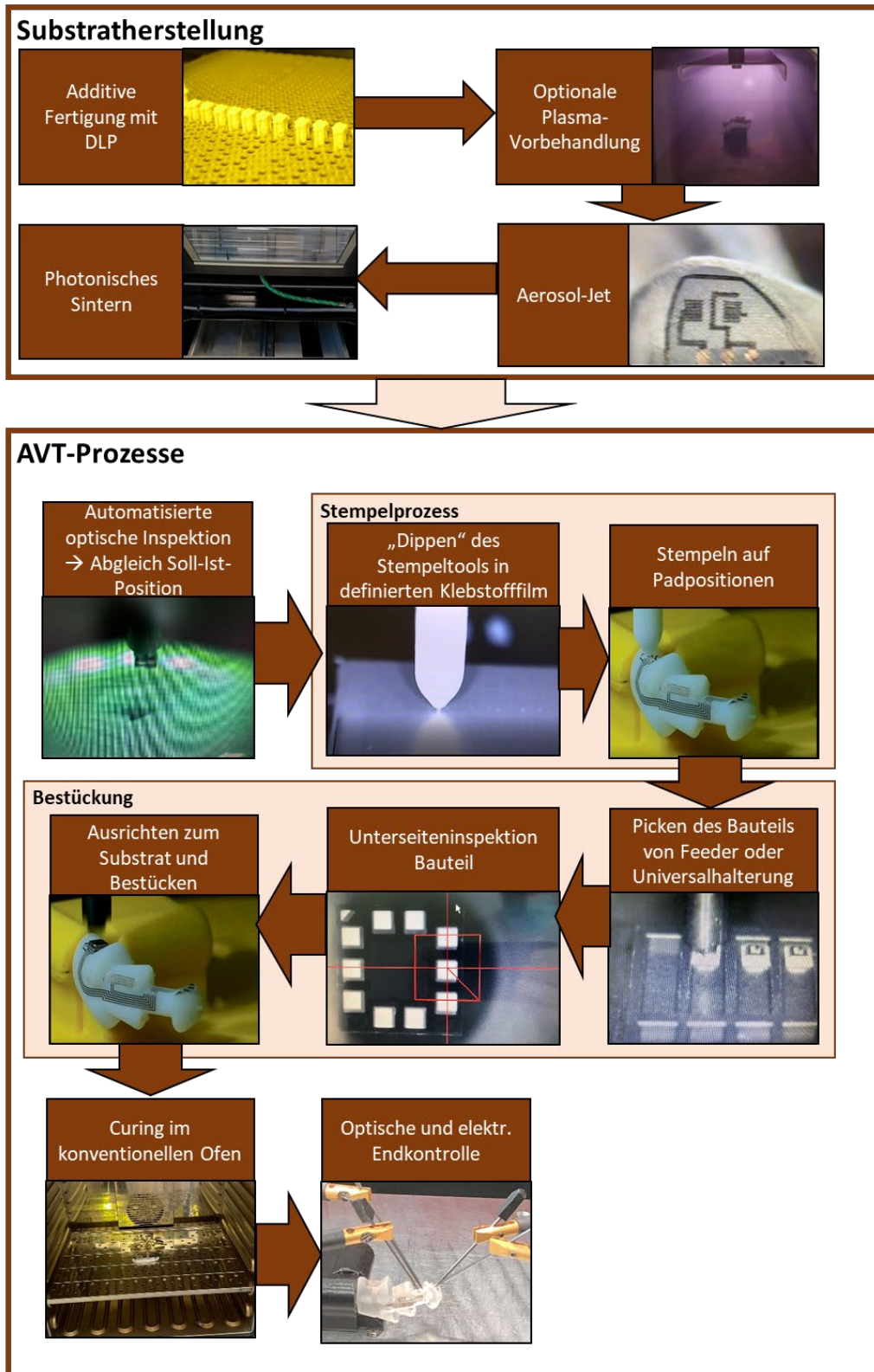


Abbildung 19: Übersicht über die im Projekt erarbeitete Prozesskette bei Hahn-Schickard

Über einen 4-Spitzenmessplatz und Mikroskope werden die Bauteile optisch und elektrisch überprüft. Mit der Prozesskette konnten die Demonstratoren aus verschiedenen Materialien mit demselben Bestückprozess aufgebaut werden. In der **Abbildung 20** sind drei Demonstratoren aus verschiedenen Materialien nebeneinander zu sehen. *Der mittlere Demonstrator ist mit 0603-SMD und Drucksensor bestückt.*



Abbildung 20: Funktionalisierte Otoplastikkörper in 3 unterschiedlichen Ausführungen: Prodways PlastCure Rigid 10500 (links) und Dreve FotoTec DLP A (mitte und rechts).

7 Nutzen für das Unternehmen und Verwertbarkeit des Ergebnisses

- Kompetenzausbau bei Hahn-Schickard bei digitalen Prozessketten, insbesondere Digitaldruck und 3D-Bestückung auf individualisierten Schaltungsträgern.
- Hahn-Schickard kann anwendungsorientierte Entwicklungsdienstleistungen für individualisierte Schaltungsträger anbieten.
- Hahn-Schickard kann die Ergebnisse für die Hahn-Schickard TransferFab am Standort Stuttgart zur Fertigung von Prototypen und Kleinserien nutzen.

8 Darstellung des während des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

Hahn-Schickard sind während der Durchführung des Vorhabens keine Fortschritte Dritter auf dem Gebiet des Vorhabens bekannt geworden.

9 Veröffentlichungen, Vorträge, Referate

Hahn-Schickard hat die Ergebnisse des Projektes MikroBo vielfältig und in verschiedenen Formaten sowohl national auch international veröffentlicht.

9.1 Vorträge

- Expertenseminar in der Aufbau- und Verbindungstechnologie „Wir gehen in die Tiefe“, Titel: „Aufbau- und Verbindungstechniken für zuverlässige räumliche Elektronik“, Referent: Maximilian Barth, 22.09.2021

9.2 Veranstaltungen

- IJC 2018 (Inkjet Conference) – 16.-17.10.2021 – Düsseldorf
- Workshop Visions to Products - MID and Beyond, 15.10.2019, Stuttgart

- COMPAMED 2019, Düsseldorf
- MID Summit – Plattform für MID Technologien, 30.09.2021, Nürnberg

9.3 Veröffentlichungen und Fachbeiträge

- K. Werum, J. Keck: Permanent non-invasive in-ear blood pressure measurement, inno Innovative Technologies - New Applications, Volume 25, No. 76, 2020.
- K. Werum, M. Barth, J. Jaeger: Funktionalisierte Otoplastiken volladditiv herstellen, Mikroproduktion, 06/2021.
- J. Keck, K. Gläser, D. Juric, W. Eberhardt, A. Zimmermann: Digital Functional Printing Based on Nano Metal Inks, in W. Zapka: Inkjet Printing in Industry, Wiley - VCH, erscheint voraussichtlich 03/2022.
- K. Werum et al.: Aerosol Jet printing and interconnection technologies on 3D printed substrates, Journal of Manufacturing and Material Processing, in Vorbereitung.
- J. Jäger et al.: Surface Mount Technologies on Inkjet-Printed Silver Nanoparticle Structures, IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, in Vorbereitung.