

## Abschlussbericht – Kurzbericht (Teil I)

### WIR! – GRAVOmer – R-Print

#### Verbundprojekt: Herstellung LTCC-integrierter Präzisionswiderstände mittels Mikrostrukturierungsverfahren

**Akronym:** R-Print

Fördermaßnahme: Innovation & Strukturwandel

Förderkennzeichen: 03WIR2014C

Projektlaufzeit: 01/2023 – 12/2024

Berichtspflichtiger: Technische Universität Chemnitz

Projektleitung: Prof. Dr. Arved C. Hübler

#### Aufgabenstellung sowie wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn der Arbeiten

Im Projekt „R-Print“ werden die Mikrostrukturierung von Oberflächen mittels innovativem Druckverfahren, neue Design-Möglichkeiten für LTCC-Mehrlagenschaltungen und die Miniaturisierung angestrebt. Dies soll neue Anwendungsfelder, zum Beispiel für 5G- und 6G-Anwendungen erschließen. Wesentliche Zielstellungen dabei sind:

- Verbesserung der Toleranz von innenliegenden Widerständen auf  $\pm 5 \%$
- Verringerung der Bauhöhe im Vergleich zur Leiterplattentechnik (PCB): angestrebter Formfaktor:  $> 5$ , d. h. 80 % Verkleinerung im Vergleich zur Leiterplattentechnik, (derzeitiger Formfaktor 3)
- Verringerung des Flächenbedarfs im Vergleich zur Leiterplattentechnik: angestrebter Formfaktor:  $> 2$  (Vergleich Leiterplattentechnik zu LTCC-Mehrlagenschaltung derzeitiger Formfaktor 1)
- Ablösung des diskontinuierlichen Verfahrens durch kontinuierliche Herstellung der LTCC-basierten Keramiken im Rolle zu Rolle-Verfahren.

Innerhalb des Projektes R-Print werden Tinten für den Rolle zu Rolle-Druck zur Herstellung von Widerstandsnetzwerken in LTCC-Innenlagen (engl. low temperature co-fired ceramics) entwickelt. Hierfür liegen als Schwerpunkte folgende Entwicklungsarbeiten:

- Druckträger in Kooperation mit SurA wurden entwickelt, die z. B. aus Polymer, Lösungsmitteln und rheologische Additiven formuliert sind,
- Geeignete Tintenrezepturen am IKTS wurden hinsichtlich der eingesetzten Feststoffe (Wirkphase wie beispielsweise die Ruthenate RuO<sub>2</sub> oder Bi<sub>2</sub>Ru<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, Glaspulver, Additive) für das Cosintering hergestellt,
- Die rheologischen Eigenschaften der Tinten an das Tiefdruckverfahren wurden adaptiert und

Zudem wurden die elektrischen Eigenschaften der eingebrannten Widerstandsschichten nach Anforderung des Partners VIA eingestellt.

## Ablauf des Vorhabens

Die Herausforderung besteht darin, die Widerstandsschicht mit hoher Auflösung und homogener Schichtdicke zu drucken. Die Schichtausbildung und die Schwindung bei der Trocknung sind so einzustellen, dass eine hohe Genauigkeit und geringe Varianz der Endschichtdicke erzielt werden, um die angestrebte Miniaturisierung und Performance zu realisieren: Toleranz –  $\pm 5\%$ ; Bauraum (Widerstand + Substrat) – 0,024 mm<sup>3</sup>; Formfaktor Bauraum – 17,5, Bauhöhe (Widerstand + Substrat) – 0,2 mm; Formfaktor Bauhöhe – 7,5.

## Wesentliche Ergebnisse sowie Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen

(Hinweis: Hier die wesentlichsten Ergebnisse möglichst nach Arbeitspaketen gegliedert benennen)

- Getrocknete gedruckte Schichtdicke zwischen 2  $\mu\text{m}$  und 10  $\mu\text{m}$  wurde realisiert.
- Druckbilder zeigten matrixartige Effekte und Entnetzung bei einigen Tinten (Oberflächenspannung).
- Widerstandswerte wurden im Bereich von 45  $\Omega/\text{sq}$  bis 19 k $\Omega/\text{sq}$  gemessen, realisiert mit den verschiedenen entwickelten Tiefdrucktinten auf 9k7 LTCC-Material.
- Einige Tinten erwiesen sich als vielversprechend mit Standardabweichungen von weniger als 11 %:
- $\Delta R/R$  von 11 % für die Tinte W24088 D mit 18 ml Tiefdruckzellen (bestätigt auf zwei verschiedenen Substraten)
- $\Delta R/R$  von 10 % für die Tinte W24125 mit 6 ml Tiefdruckzellen
- $\Delta R/R$  von 8 % für die Tinte W24123 B mit 6 ml Tiefdruckzellen
- Weitere Entwicklungen und Untersuchungen sind erforderlich, um den Tiefdruckprozess auf LTCC-Material weiter zu verbessern.
- Ziel: Toleranz < 5 % – wird voraussichtlich im nächsten Iterationsschritt erreicht (aufgrund der fehlenden Verlängerung ist ein neues Projekt erforderlich).

## Abschlussbericht – Sachbericht (Teil II)

**Fördermaßnahme: Innovation & Strukturwandel**

**WIR!-Bündnis WIR! GRAVOmer**

**Vorhaben: Herstellung LTCC-integrierter Präzisionswiderstände  
mittels Mikrostrukturierungsverfahren**

**Akronym: R-Print**



Zuwendungsgeber:	Bundesministerium für Bildung und Forschung
Förderkennzeichen:	03WIR2014C
Projektlaufzeit:	01.01.2023 bis 31.12.2024
Berichtslaufzeit:	01.01.2023 bis 31.12.2024

**Berichtspflichtiger:** Technische Universität Chemnitz, Institut für Print- und Medientechnik  
Reichenhainer Straße 70, 09126 Chemnitz

**Projektleitung:** Prof. Dr. Arved C. Hübler

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03WIR2014C gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autor:innen.

## 1. Kurzdarstellung Projektablauf

### 1.1. Aufgabenstellung

Im Projekt „R-Print“ werden die Mikrostrukturierung von Oberflächen mittels innovativem Druckverfahren, neue Design-Möglichkeiten für LTCC-Mehrlagenschaltungen und die Miniaturisierung angestrebt. Dies soll neue Anwendungsfelder, zum Beispiel für 5G- und 6G-Anwendungen erschließen. Wesentliche Zielstellungen dabei sind:

- Verbesserung der Toleranz von innenliegenden Widerständen auf  $\pm 5 \%$
- Verringerung der Bauhöhe im Vergleich zur Leiterplattentechnik (PCB): angestrebter Formfaktor:  $> 5$ , d. h. 80 % Verkleinerung im Vergleich zur Leiterplattentechnik, (derzeitiger Formfaktor 3)
- Verringerung des Flächenbedarfs im Vergleich zur Leiterplattentechnik: angestrebter Formfaktor:  $> 2$  (Vergleich Leiterplattentechnik zu LTCC-Mehrlagenschaltung derzeitiger Formfaktor 1)
- Ablösung des diskontinuierlichen Verfahrens durch kontinuierliche Herstellung der LTCC-basierten Keramiken im Rolle zu Rolle-Verfahren.

Innerhalb des Projektes R-Print werden Tinten für den Rolle zu Rolle-Druck zur Herstellung von Widerstandsnetzwerken in LTCC-Innenlagen (engl. low temperature co-fired ceramics) entwickelt. Hierfür liegen als Schwerpunkte folgende Entwicklungsarbeiten:

- Druckträger in Kooperation mit SurA wurden entwickelt, die z. B. aus Polymer, Lösungsmitteln und rheologische Additiven formuliert sind,
- Geeignete Tintenrezepturen am IKTS wurden hinsichtlich der eingesetzten Feststoffe (Wirkphase wie beispielsweise die Ruthenate  $\text{RuO}_2$  oder  $\text{Bi}_2\text{Ru}_2\text{O}_7$ , Glaspulver, Additive) für das Cosintering hergestellt,
- Die rheologischen Eigenschaften der Tinten an das Tiefdruckverfahren wurden adaptiert und
- Zudem wurden die elektrischen Eigenschaften der eingebrannten Widerstandsschichten nach Anforderung des Partners VIA eingestellt.

### 1.2. Voraussetzungen des Vorhabens

Die Herausforderung besteht darin, die Widerstandsschicht mit hoher Auflösung und homogener Schichtdicke zu drucken. Die Schichtausbildung und die Schwindung bei der Trocknung sind so einzustellen, dass eine hohe Genauigkeit und geringe Varianz der Endschichtdicke erzielt werden, um die angestrebte Miniaturisierung und Performance zu realisieren: Toleranz –  $\pm 5 \%$ ; Bauraum (Widerstand + Substrat) –  $0,024 \text{ mm}^3$ ; Formfaktor Bauraum – 17,5, Bauhöhe (Widerstand + Substrat) – 0,2 mm; Formfaktor Bauhöhe – 7,5.



Dickschichtpasten zur Erzeugung von Widerständen werden in der Literatur in sehr vielen unterschiedlichen Anwendungen und Patenten beschrieben. Dabei werden vorrangig Rutheniumoxid oder Ruthenate als Leitphase in einer Glasmatrix verteilt und mit weiteren anorganischen Additiven versetzt. Die Additive werden dabei zur Steuerung weiterer Schichteigenschaften neben dem elektrischen Widerstand eingesetzt, so zum Beispiel zur Einstellung des Temperaturkoeffizienten des elektrischen Widerstands<sup>2</sup>. Die genannten Feststoffe werden in sogenannten Druckträgern (zumeist ein Polymer in einem organischen Lösungsmittel) dispergiert, in der klassischen hybriden Mikrosystemtechnik mittels Siebdruckes gedruckt, getrocknet und anschließend bei 850 °C gesintert. Typische Schichtdicken liegen nach Einbrand bei 10 – 20 µm und die resultierenden Widerstände liegen im Bereich 10 – 10<sup>7</sup> Ohm/sq<sup>3</sup>. Als Substrat wird häufig 96%iges Aluminiumoxid verwendet, was eine abschließende Abdeckung mit einer Glasschicht und dem damit verbundenen erneuten Durchlaufen der geschilderten Prozesskette notwendig macht.

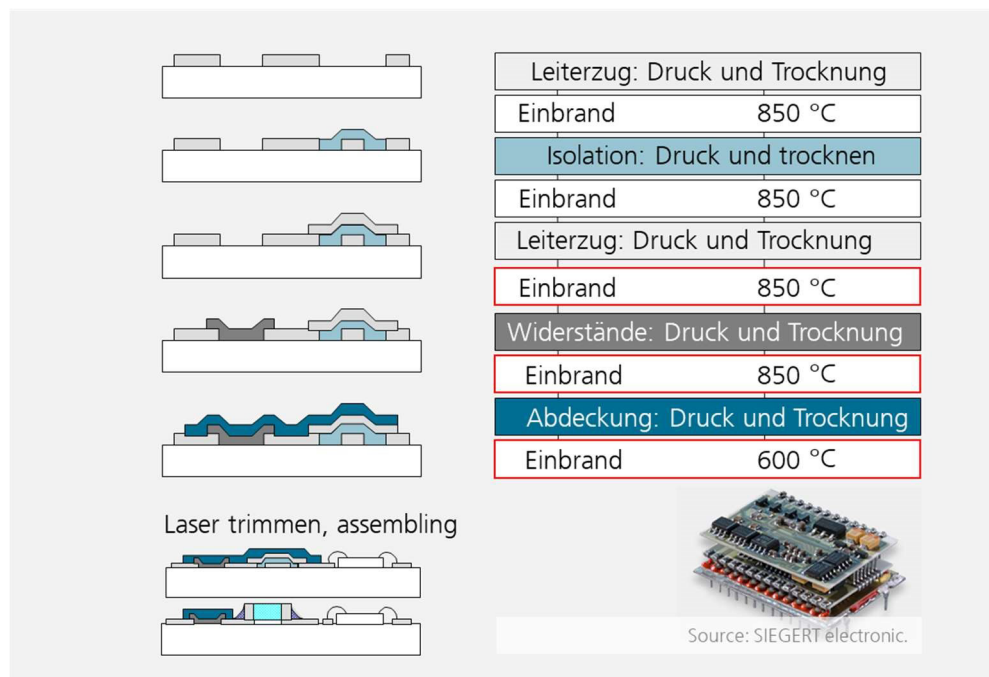


Bild 1: Prozessablauf der klassischen Dickschichttechnik

Beim Schritt des Lasertrimmens wird ein Schnitt in die Widerstandsschicht eingebracht, um die Widerstände einerseits in den Zielbereich einzustellen und andererseits die Toleranz der Widerstandswerte zu verringern: Ein gedruckter, eingebrannter Widerstand kann Toleranzen von bis zu +/- 15 % des nominellen Widerstandswertes aufweisen; durch den Lasertrimmprozess werden die Widerstände bis zu Faktor 2 erhöht und dadurch können die Zielwiderstände auf +/- 0,1 % genau und einer Toleranz von +/- 0,5 % eingestellt werden<sup>1</sup>.

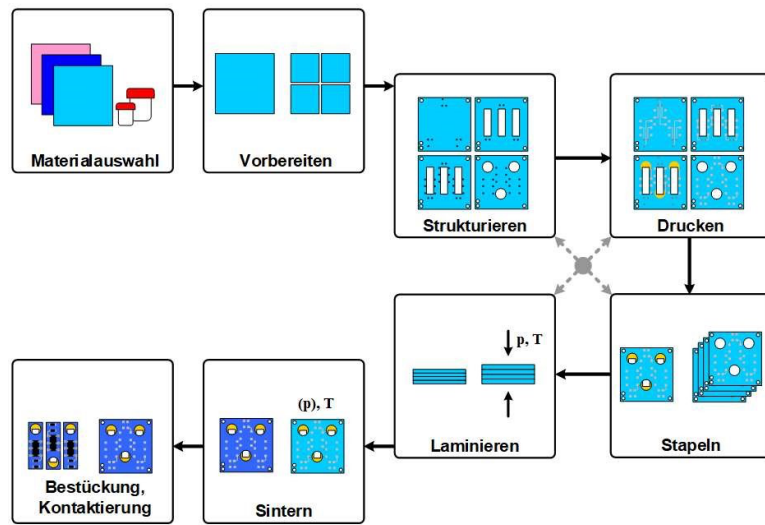


Bild 2: Mehrlagenkeramischer Herstellungsprozess (Quelle: IKTS)

Neben den vielen Vorteilen – Flexibilität, Kosteneffizienz, Fertigungszeiten – gibt es zwei inhärente Nachteile der klassischen Dickschichttechnik: Die Notwendigkeit einer Abdeckschicht sowie das nahezu unvermeidliche Lasertrimmen aufgrund der hohen Toleranzen.

Die keramische Mehrlagentechnologie unter Nutzung von LTCC-Folien (engl. Low Temperature Cofired Ceramics) bietet die Möglichkeit des Einbettens von Funktionsschichten wie Widerständen und Leiterzügen. Zurzeit wird die keramische Folie von der Rolle zu quadratischen Stücken geschnitten. Anschließend erfolgt die Strukturierung hinsichtlich möglicher Durchkontaktierungen (Vias), Kavitäten oder Kanälen. Der nächste Schritt ist der Siebdruck der funktionellen Pasten auf die einzelnen Lagen, gefolgt von einem Stapel- und Laminierprozess – hier werden die Folien in geordneter Reihenfolge übereinandergelegt und unter Druck und Temperaturen bis 100 °C vereint. Als nächstes folgt das Sintern bei Temperaturen bis zu 1000 °C. Währenddessen sintern und verdichten sowohl die Keramik als auch die Funktionsschichten – dies wird als Co-Sinterung bezeichnet. Abschließend können im sogenannten Post-Processing die Aufbau- und Verbindungsschritte durchlaufen und gegebenenfalls auch die Systemintegration von Halbleitern erfolgen (siehe Bild 2).

Unter Anwendung dieser Technologie können keramische Mehrlagenschaltungen mit bis zu 50 Lagen großserientauglich hergestellt werden. Gleichzeitig wurden kompatible keramische Funktionsmaterialien entwickelt, die bspw. eine Integration edelmetallbasierter metallischer Leiterbahnen in der Keramik zulassen<sup>4</sup>.

Die Integration von Leiterzügen wie Silber und Gold ist exzellent möglich und jeder LTCC-Hersteller hat ein an sein System angepasstes Pastensystem<sup>5</sup>.

Stand der Technik ist die Integration von Widerständen auf den Außenlagen im PostProcessing; das heißt nach dem Co-Sintern der Keramik mit den Leiterzügen können auf der Außenseite Widerstände nachträglich aufgebracht werden. Gründe hierfür liegen in der komplexen Schwindungsanpassung der gedruckten Schichten an die Keramik – im Gegensatz zu Silber oder Gold sintern Rutheniumoxid respektive Bismut- oder Bleiruthenat nicht oder nur geringfügig bis 1000 °C – sowie in den bereits beschriebenen üblichen Toleranzen nicht getrimmter Widerstände.

In der Literatur sind Arbeiten zur Herstellung vergrabener Widerstände in LTCC zu finden. Dziedzic et al. konnten bei der Verwendung von nominell 1 kOhm/sq Pasten verschiedener Hersteller auf den jeweils zugehörigen LTCC-Substraten Abweichungen von 0,6 - 13,7 kOhm/sq nachweisen<sup>6</sup>. Auch konnte Uhlig aufzeigen, dass Widerstände, welche speziell für das verwendete LTCC angepasst wurden, in ihren elektrischen Kenndaten bis zu 40 % vom Zielwert abwichen<sup>7</sup>. Dies konnte vor allem auf eine Abhängigkeit auf die Prozessbedingungen zurückgeführt werden. Weiterhin wurde ein Zusammenhang vom Design hinsichtlich der Widerstandsgröße und dem Widerstandswert gefunden. Bereits bei einer Linienbreite von 150 µm kam es zu einer starken Streuung der Widerstandswerte; es wurde die Wechselwirkung des Widerstandsmaterials mit dem LTCC als Ursache vorgeschlagen.

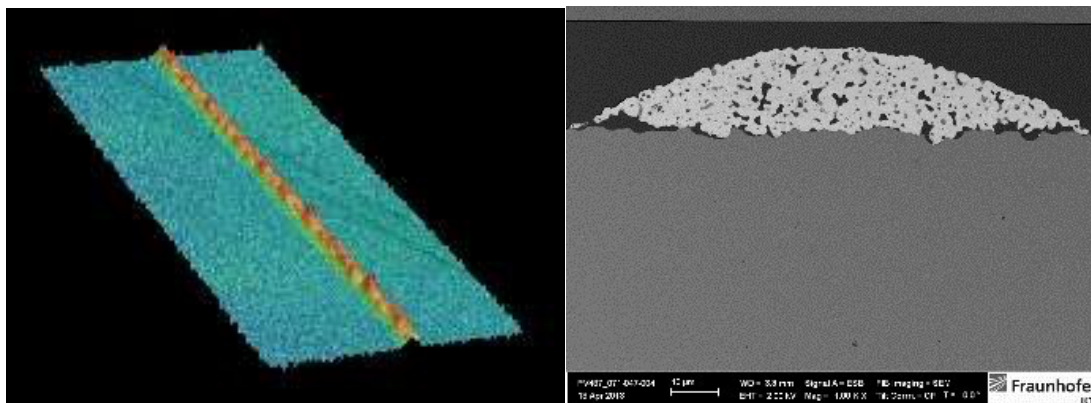


Bild 3: 3D-Profil und Querschnitt einer mittels Siebdruck hergestellten Leiterbahn

Die bisher geschilderten Ergebnisse wurden mit siebgedruckten Widerständen erzeugt; hierbei sind nachteilig einerseits die zu erreichenden Druckauflösungen – insbesondere bei Widerständen – sowie die Oberflächenhomogenität und unregelmäßige Leiterquerschnitte zu nennen. Bei der Herstellung der gedruckten Struktur sind auch immer die nachgelagerten Prozesse, wie zum Beispiel die Verfestigung der Schicht durch Trocknung, zu beachten.

Alternativ zum Siebdruck werden Funktionsschichten mittels Tiefdruckverfahren hergestellt. Der Stand der klassischen Tiefdrucktechnik ist weitestgehend im Standardwerk von Kipphan beschrieben<sup>8</sup>. Neueste Entwicklungen erfolgten in den letzten Jahrzehnten vorwiegend im Bereich der Steuerung, der Antriebstechnik und der Sensorik, sowie in der Druckformenherstellung.

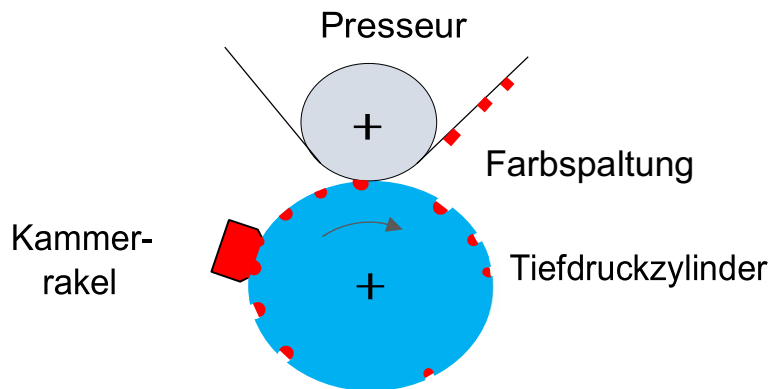


Bild 4: Prinzip Tiefdruck-Verfahren

Die gedruckte Elektronik lieferte neue Anwendungsfelder, die in Monographien und Reviews regelmäßig veröffentlicht werden, wie von Tong in Springer Science<sup>9</sup>. Meistens werden die etablierten klassischen Druckverfahren auf den jeweiligen Einsatzfall adaptiert.

Standarddruckverfahren werden auch modifiziert, wie etwa von Schmidt et.al. gezeigte Verfahren zur Erhöhung der Auflösung der gedruckten Strukturen<sup>10</sup> oder das in Japan und Korea verwendete Reverse Offset Gravure Printing<sup>11</sup>, um bestimmten Anforderungen im Elektronikdruck gerecht zu werden.

Das erforderliche Prozessfenster bestimmt die Rheologieanforderungen an die Drucktinte. Von zentraler Bedeutung ist die Schichtbildung im Druckprozess. Ursachen für Inhomogenitäten – wie das „Viscous Fingering“ können z. B. durch die Farbspaltung an der ablaufenden Oberfläche entstehen. Dieses Phänomen wurde unter anderem von Brumm<sup>12</sup> näher untersucht und es konnten verbesserte Modelle im Zusammenhang mit der Farbspaltung erstellt werden. In der nachfolgenden Abbildung sind die Extrema „Viscous Fingering“ und „Point Splitting“ gezeigt, diese vermindern die Qualität des Druckerzeugnisses und sind in der Entwicklungsphase zu eliminieren.

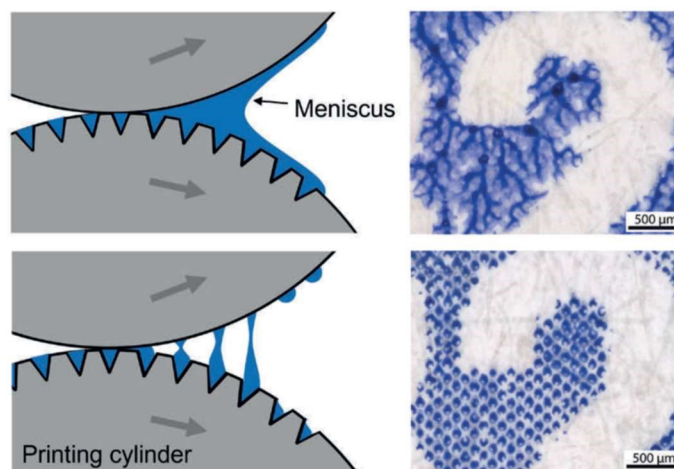


Bild 5: Dynamische Effekte beim Tiefdruck resultieren in „Viscous Fingering“ (oben) und „Point Splitting“ (unten)<sup>12</sup>

Inhomogenitäten in der Schicht, wie verursacht von "Viscous Fingering", und Schwankungen in der Schichtdicke wirken sich störend auf die Filmbildung aus<sup>13,14,15</sup>. Unter dem dynamischen Prozess der Filmbildung sind strömungsdynamische Effekte nicht durchgehend beschrieben. Einflüsse des Verfahrens, z. B. die Schwerkkräfte in der Farbe sind ebenfalls entscheidend<sup>16</sup>. Auf Grundlage dieser Erkenntnisse sind weitere Verbesserungen entstanden, wie die Temperaturkontrolle<sup>17</sup> zur Erzeugung einer homogenen Filmbildung.

Laut Nguyen<sup>18</sup> wird im direkten Tiefdruck der Formzylinder durch den Anpressdruck des Gegendruckzylinders (Presseurs) nicht verformt, folglich ist der Tiefdruck stabiler und zuverlässiger als der Offset-Tiefdruck und der Flexodruck. Aktuelle Auflösungsgrenzen der verschiedenen Druckverfahren werden in nachfolgender Tabelle im Vergleich dargestellt.

Tabelle 1: Vergleich Auflösungsgrenze für verschiedene Druckverfahren [Quelle: pmTUC]

Druckverfahren	Offsetdruck	Flexodruck	Tiefdruck	Siebdruck
Auflösungsgrenze	10 µm	20 µm	10 µm	40 µm
Problem bei Kantenschärfe	durch Feuchtmittel Ausfransen möglich	Quetschrand (Schichtdicke hier höher)	Stege bei Rasterung	Gewebestruktur

Eine Patentrecherche kam zu dem Ergebnis, dass Schutzrechte oder Schutzrechtsanmeldungen Dritter einer eigenen Ergebnisverwertung nicht entgegenstehen. Hierbei wurde nach den Begriffen „LTCC“, „resistor“, „inner layer“ und „Rotogravure printing“ gesucht. Eine fortlaufende Patentrecherche wird durchgeführt, um die Ergebnisverwertung sicherzustellen.

Drucktechnik: Die Veröffentlichung WO 2021155967A1 von Chassot Daniel (Schweiz) zum Tiefdruckwerk mit Farbwerkszylindern betrifft die Intaglio-Druckmaschine. Es handelt sich um Einfärbesysteme mit mehreren Farbwalzen, die selektiv die Farbe auf den Sammelzylinder und dann auf die Druckform übertragen, wobei der Farbwerkszylindermantel Vertiefungen besitzt, die zu den Vertiefungen auf dem Formzylinder korrespondieren. Für die hohen Genauigkeitsanforderungen der zu druckenden Widerstände und Schichthomogenität ist dieses Verfahren nicht geeignet.

## Bisherige Arbeiten der Antragstelle

### pmTUC

Das Institut für Print- und Medientechnik (pmTUC) der Technischen Universität Chemnitz gilt als Forschungspionier auf dem Gebiet „Gedruckte Elektronik“. Die konventionellen Massendruckverfahren werden weiterentwickelt für die Realisierung von flexiblen elektronischen Bauelementen und Systemen angepasst. Beispiele dafür sind gedruckte organische Transistoren und Schaltkreise, verschiedenste Dünnschicht-Sensoren, Papiersolarzellen und piezoelektrische Folien- und Papierlautsprecher. Außerdem ist das Projekt „Innovative Druckformtechnologien zur wirtschaftlichen und qualitätsgerechten Herstellung polymerelektronischer Elemente und Schaltungen im Tief- und Flexodruckverfahren“ des pmTUC mit der Sächsischen Walzengravur (SWG) (FuE-

Verbundförderung des Freistaates Sachsen) zu nennen. 2012 wurden u. a. für den Tiefdruck die Druckformen an leitfähige und halbleitende Polymerlösungen angepasst. Dies umfasste die Druckformgestaltung, die Layoutgestaltung als auch die Anpassung der Tiefdruckeinrichtung an der Druckmaschine „LaborMAN“ an die höheren Anforderungen der gedruckten Elektronik.

### 1.5. Arbeitsteilung und Zusammenarbeit mit Dritten

Für die regionale Verbreitung der Ergebnisse bietet der GRAVOMer e. V. mit seinen Partnern und Veranstaltungen ein ideales Netzwerk zum Austausch und Präsentation der Forschungsergebnisse und neuartiger Anwendungen für Forschungseinrichtungen und industrielle Partner.

Des Weiteren sind die Partner des Verbundprojektes bereits in nationalen und internationalen Vereinigungen organisiert und präsentieren ihre aktuellen Entwicklungen regelmäßig auf internationalen Veranstaltungen und Messen. Nachfolgend wird ein Auszug dargestellt:

VIA: Über die Mitgliedschaft im ZVEI und den Arbeitsgruppen Integrierte Schichtschaltungen erfolgt ein Austausch mit deutschen Herstellern von hybriden Schichtschaltungen.

Wissenschaftliche Veranstaltungen insbesondere organisiert von der iMAPS (jährliche Treffen im deutschsprachigen Raum und internationale Tagung CICMT) oder die European Microwave Week bieten ideale Voraussetzungen die wissenschaftlichen Ergebnisse einem breiten Fachpublikum vorzustellen.

pmTUC: Das Institut für Print- und Medientechnik der TU Chemnitz ist Mitglied in vielen verschiedenen Vereinen und Verbänden, z. B. VDD Verein Deutscher Druckingenieure e. V. sowie VDI Verein Deutscher Ingenieure und des Weiteren im VDMA Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V.. Über die Verbandsarbeit, deren Organe und Veranstaltungen werden die wissenschaftlichen Ergebnisse präsentiert.

IKTS: Das Fraunhofer IKTS ist in einer Vielzahl von Verbänden und Allianzen tätig, unter anderem im Verbund MicroTec Südwest innerhalb der Fachgruppe „Drucktechnologien“ aktiv. In diesen können die Ergebnisse vielen Partnern zugänglich und präsentiert werden.

Den Verbundpartnern liegt bereits ein Entwurf eines Kooperationsvertrages vor (Bereitstellung über GRAVOMer Netzwerk) und die im Unionsrahmen für staatliche Beihilfen zur Förderung von Forschung, Entwicklung und Innovation enthaltenen Vorgaben für die Zusammenarbeit von Unternehmen und Forschungseinrichtungen werden eingehalten. Eine grundsätzliche Übereinkunft zu den wesentlichen Vertragsinhalten gemäß dem BMBF-Merkblatt für Antragsteller/Zuwendungsempfänger zur Zusammenarbeit der Partner von Verbundprojekten besteht.

## 2. Ausführliche Darstellung

Auflistung der wichtigsten wissenschaftlichen und technischen Ergebnisse und Darstellung des Fortschrittsstatus der Arbeitspakete

Während des Berichtszeitraums waren die konzentrierten Anstrengungen des Projektteams hauptsächlich darauf ausgerichtet, die in den Arbeitspaketen 4 und 5 skizzierten Ziele voranzutreiben, wie in der Projektbeschreibung dargelegt. Diese Arbeitspakete traten als Schwerpunkte hervor, die kritische Forschungsbemühungen umfassten, die darauf abzielten, den Stand der Technik in der gedruckten Elektronik und Fertigungstechnologien voranzutreiben.

Das Eröffnungstreffen aller Konsortialpartner markierte einen wegweisenden Moment in der Laufbahn des BMBF-Projekts R-Print. Dieses Treffen, das am 25. Januar 2023 in Dresden stattfand, diente als Katalysator für die Zusammenarbeit und bot eine Plattform für die Stakeholder, ihre gemeinsame Vision abzustimmen und einen Kurs zur Realisierung der ehrgeizigen Ziele des Projekts zu setzen. Aufbauend auf der Grundlage, die während dieses Eröffnungstreffens gelegt wurde, nahm das Projekt an Fahrt auf, angetrieben durch das gemeinsame Engagement und die Expertise seiner vielfältigen Konsortialpartner.

Ein bemerkenswerter Meilenstein in der Zeitleiste des Projekts war das Zusammenkommen zu einem weiteren persönlichen Treffen am 21. Juni 2023 in Chemnitz. Dieses Treffen war richtungsweisend für das Projekt, erleichterte substanzielle Diskussionen und strategische Planungen, die darauf abzielten, Herausforderungen zu überwinden und sich neu ergebende Chancen zu nutzen.

Parallel zu diesen physischen Zusammenkünften verfolgte das Projektteam einen proaktiven Ansatz zur Kommunikation und Zusammenarbeit, indem monatliche Online-Meetings organisiert wurden, um den Schwung aufrechtzuerhalten und kontinuierliche Fortschritte zu gewährleisten. Diese virtuellen Treffen dienten als Foren für die Koordination, die es den Beteiligten ermöglichten, den Fortschritt zu überprüfen, Herausforderungen anzugehen und Strategien bei Bedarf neu auszurichten. Indem sie einen offenen Dialog und Informationsaustausch förderten, stärkten diese Online-Meetings die Zusammenarbeit und formten ein kohärentes Konsortium, das auf Erfolg ausgerichtet war.

### 2.1 Arbeitspaket 4 – Druckuntersuchungen an Widerstandstinten. 4.1. Evaluation des Druckverhaltens

Im Rahmen der Druckstudien wurden eine Reihe von Testdrucken sorgfältig durchgeführt, wobei die semi-automatische Siebdruckeinheit Ekra X1-SL und die Tinte SunChemical C2030519P4 verwendet wurden. Der Schwerpunkt dieser Bemühungen lag darauf, die Qualität und Präzision der Druckergebnisse zu bewerten, mit besonderem Augenmerk auf die Aufklärung der Interaktionsdynamik zwischen der Tinte und dem Substrat.

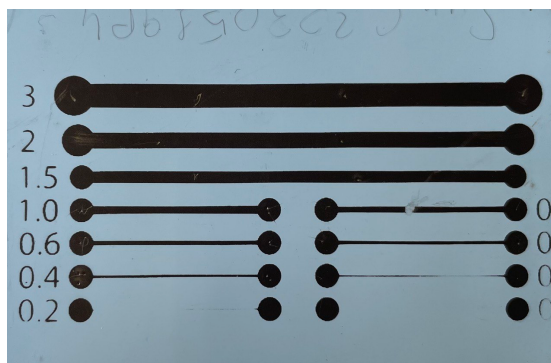


Bild 6: Gedrucktes Muster

Umfassende Analysen wurden durchgeführt, um die Schlüsselparameter zu untersuchen, die die Druckqualität bestimmen, einschließlich der Rauheit der gedruckten Oberfläche und der durchschnittlichen Schichtdicke. Diese Parameter wurden mit dem hochauflösenden Keyence Color 3D Laser-Mikroskops VK-9710 bestimmt. Die gemessene Rauheit der gedruckten Oberfläche ( $R_a$ ) lag im Bereich von  $4,8 \pm 0,3 \mu\text{m}$ , was auf eine fein texturierte Oberfläche hindeutet, die für eine optimale Drucktreue förderlich ist, mit insgesamt fünf Messungen, um statistische Robustheit zu gewährleisten. Darüber hinaus wurde die durchschnittliche Schichtdicke auf  $12,0 \mu\text{m} \pm 1,2 \mu\text{m}$  bestimmt, was die Gleichmäßigkeit und Konsistenz des Druckprozesses unterstreicht.

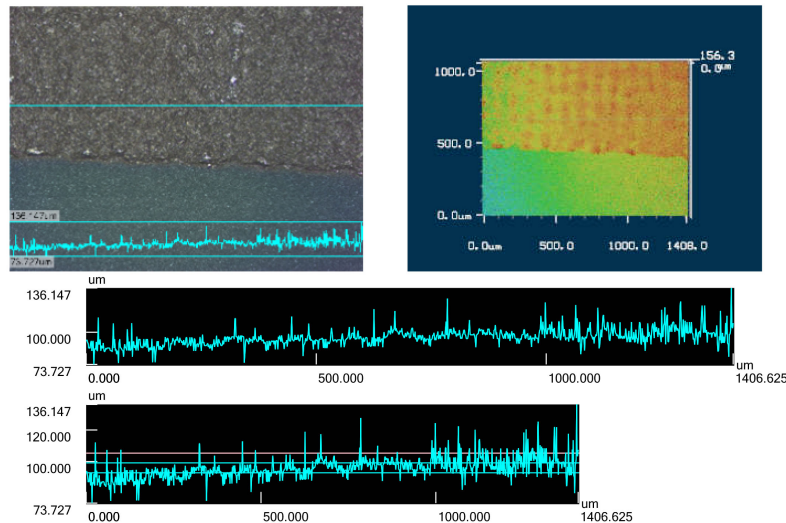


Bild 7: Messung der Rauheit der bedruckten Oberfläche

Diese Erkenntnisse liefern wertvolle Einblicke in das nuancierte Zusammenspiel zwischen Tintenformulierung, Druckparametern und Substrateigenschaften und bilden eine solide Grundlage für die weitere Verfeinerung und Optimierung der Drucktechnologien im Bereich der gedruckten Elektronik.

Die durchgeführten Untersuchungen unterstreichen das inhärente Potenzial der verwendeten Tintenformulierung, präzise und gleichmäßige Druckergebnisse zu erzielen, was auf ihre Eignung für eine Vielzahl von Anwendungen im Bereich der gedruckten Elektronik hinweist. Als solche dienen diese Erkenntnisse als Katalysatoren für weitere

Fortschritte bei der Optimierung des Druckprozesses und der Erforschung neuer Anwendungen, die gedruckte Elektroniktechnologien nutzen.



Measure A	Seg.	Step	Ave. height	Min. height	Max. height	Comment
0(Ref.)	Rect.		32.822um	20.264um	46.181um	
1	Area	11.066um	43.888um	32.069um	63.200um	
2	Area	13.061um	45.884um	36.420um	71.527um	
3	Area	13.590um	46.412um	34.884um	62.192um	
4	Area	10.359um	43.182um	16.775um	66.868um	
5	Rect.	11.987um	44.809um	26.941um	71.527um	
Total		60.063um	256.997um	167.353um	381.495um	
Max.		13.590um	46.412um	36.420um	71.527um	
Min.		10.359um	32.822um	16.775um	46.181um	
Ave.		12.013um	42.833um	27.892um	63.583um	
Std. DV		1.201um	4.609um	7.323um	8.582um	
3sigma		3.604um	13.828um	21.968um	25.746um	

Bild 8: Durchschnittliche Schichtdicke

Im März 2023 wurden entscheidende Diskussionen über den Aushärtungsprozess geführt, die in der Identifizierung der UV-Aushärtungseinheit bei pmTUC als optimale Lösung gipfelten, die eine Spitzenwellenlänge von 365 nm aufweist. Nach dieser Feststellung wurden strenge Tintenanforderungen sorgfältig entwickelt und in tabellarischer Form katalogisiert, was einen umfassenden Rahmen für die Auswahl und Beschaffung von Tinten bietet.

Tabelle 2: Tintenanforderungen

Anforderung	Spezifikation
Anforderungen Tinte:	
Viskositätsbereich Tiefdruck	0,1 / 1 Pa·s Tinte (Basis Toluol)
Massenanteil der Feststoffe	10 % (Angabe in Vol-%)
Lösungsmittel (organ. ja/nein)	ja
Lösungsmittel Siedepunkt/Explosionspunkt	Referenz Toluol
Minimaltintenbedarf pro Druckversuch	100 mL (später 1000 mL)

Im Juni 2023 wurden Proben von PEDOT:PSS-Tinte an das IKTS versandt, die als Referenzbenchmark für leitfähige Tintenformulierungen dient, die für Tiefdruckanwendungen zugeschnitten sind.

Im Oktober 2023 trafen Proben der verdünnten kommerziellen Siebdrucktintenproben vom IKTS ein. Diese Proben wurden umgehend Testdrucken unterzogen, die den Grundstein für nachfolgende Untersuchungen und Prozessverfeinerungen legten.

## 2.2 Arbeitspaket 5 – Entwicklung und Anpassung Druckprozess an Mikrostrukturierung. 5.1 Prozessentwicklung zum Handling von LTCC

Die Bewertung des LTCC (Low-Temperature Co-fired Ceramic) Substrats bildete einen entscheidenden Aspekt der Forschungsbemühungen innerhalb dieses Arbeitspakets, wobei der Hauptfokus darauf lag, dessen physikalische Eigenschaften umfassend zu charakterisieren. Eine Reihe von analytischen Techniken wurde eingesetzt, um wichtige Parameter zu untersuchen, einschließlich Oberflächenrauheit, Tintenschichtdicke und Oberflächenenergie, die Einblicke in die Eignung des Substrats für hochauflösende Druckprozesse lieferten.

Mit Hilfe des Bruker DektakXT Profilometers wurde die Oberflächenrauheit sowohl der unbedruckten als auch der bedruckten LTCC-Substrate quantifiziert. Die erzielten Ergebnisse zeigten eine durchschnittliche Rauheit ( $R_a$ ) von  $0,29 \pm 0,1 \mu\text{m}$ , was auf eine relativ glatte Oberflächentextur hindeutet, die förderlich für hochwertige Druckergebnisse ist, mit einer umfassenden Reihe von zehn Messungen, um eine robuste statistische Analyse zu gewährleisten. Zusätzlich wurde der Rz-Parameter, der den Unterschied zwischen dem höchsten „Peak“ und dem tiefsten „Tal“ auf der Oberfläche darstellt, sorgfältig mit  $1,93 \pm 0,1 \mu\text{m}$  gemessen, was die außergewöhnliche Oberflächenqualität des Substrats weiter bestätigt.



Bild 9: Ergebnisse der Rauheitsmessungen

Die Oberflächenenergie, ein kritischer Faktor für die Haftung zwischen Substrat und Tinte, wurde mit dem Dataphysics Kontaktwinkelsystem OCA 20 bestimmt, wobei jede der Testflüssigkeiten, einschließlich Wasser, Ethylenglykol und Diiodmethan, fünfmal für eine statistische Auswertung gemessen wurde. Die Berechnung nach der Owens-Wendt-

Kaelble-Methode ergab eine Oberflächenenergie (SE) von  $43,28 \pm 2,16$  mN/m, was die robusten Haftungsfähigkeiten des LTCC-Substrats bestätigt und seine potenzielle Eignung für eine Vielzahl von Druckanwendungen unterstreicht.

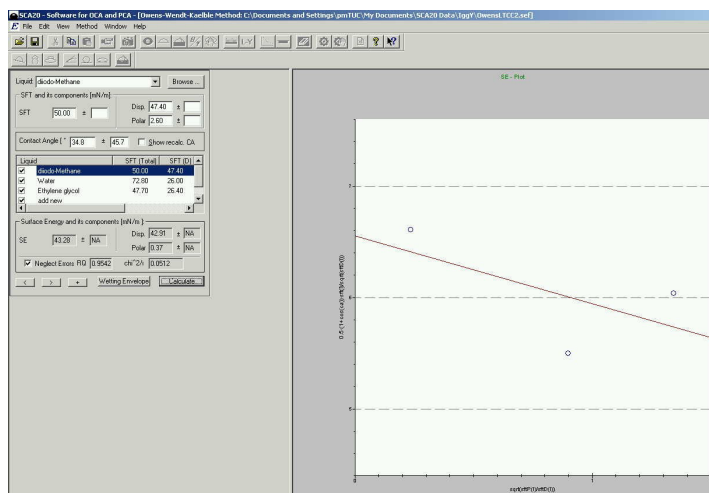


Bild 10: Messung der Substratoberflächenenergie

Aufbauend auf diesen vielversprechenden Ergebnissen ist es ratsam, die Kompatibilität des LTCC-Substrats mit dem Roll-to-Roll (R2R) Tiefdruckprozess zu erforschen, insbesondere für großflächige Elektronikfertigungsanwendungen. Solche Bemühungen versprechen, das volle Potenzial des Substrats zu erschließen, während die Druckprozessskalierbarkeit und -effizienz optimiert werden, wodurch eine nahtlose Integration in bestehende Produktionsabläufe erleichtert wird.

Trotz der Festlegung von Mindestmaterialanforderungen, die Abmessungen von 2 Metern in der Länge, 14 cm in der Breite und ein maximal bedruckbares Feld von 12,5 cm umfassen, bestehen weiterhin Herausforderungen bei der Beschaffung des erforderlichen Materials in der spezifizierten Konfiguration. Als vorläufige Maßnahme werden derzeit Experimente mit LTCC-Blechmaterialtyp 9K7 durchgeführt, welches auf einer Rolle aus PET-Folie montiert ist.

Der Erwerb einer zusätzlichen Charge von 20 Blättern des Substratmaterials 9K7 im Juli 2023 und November 2023 unterstreicht das Engagement des Projekts, einen kontinuierlichen Materialnachschub für laufende Experimente und Forschungsaktivitäten zu gewährleisten.

Im März 2023 wurde eine formelle Anfrage für die Druckdatei an VIA electronic gesendet, die im Juli 2023 zur Entgegennahme der Druckdatei führte. Die anschließende Erweiterung der Druckdatei mit Testbildern vom pmTUC bereitet die Bühne für umfassende Testdrucke vor, die die Bewertung der Druckleistung über verschiedene Substrate und Druckmethodologien hinweg ermöglichen.

Das IKTS berichtete im September 2023 über die Entwicklung einer neuen Tintenformulierung, allerdings mit dem Vorbehalt, dass die Stabilität der neu entwickelten Tintenpaste auf etwa eine Woche begrenzt ist. Zudem erfordert die Notwendigkeit, den Photoinitiator vor Ort zu mischen, eine strategische Entscheidung, auf die Verfügbarkeit des

Druckformularen für neue Tests zu warten, um eine optimale Tintenformulierung und Prozesskompatibilität zu gewährleisten.

## 2.3 Arbeitspaket 5 – Entwicklung und Anpassung Druckprozess an Mikrostrukturierung. 5.3 Prozessentwicklung Druck

Im Rahmen der Aufgabe 5.3 Prozessentwicklung Druck wurde ein systematischer Ansatz zur Optimierung des Tiefdruckverfahrens für hochpräzise Anwendungen verfolgt. Es wurde beschlossen, eine speziell bestellte Tiefdruckform, gemeinsam von Sura Chemicals und IKTS entwickelte Druckfarben, eine kleine Tiefdruck-Testeinheit sowie die LaborMAN-Tiefdruckmaschine am pmTUC zu verwenden. Diese Ressourcen wurden ausgewählt, um verschiedene Prozessparameter zu bewerten und zu verfeinern, darunter die Formulierung der Druckfarben, die Substratkompatibilität, die Gravurtiefe und die Drucktechniken, mit dem übergeordneten Ziel, konsistente und reproduzierbare Ergebnisse zu erzielen, die für die Herstellung elektronischer Bauteile geeignet sind.

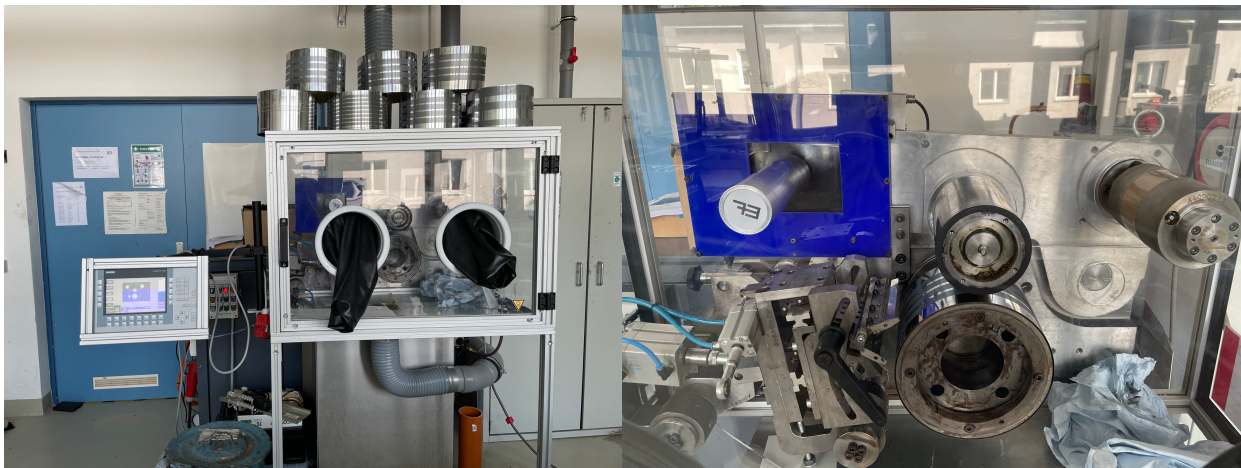


Bild 11: Tiefdruck-Testeinheit

Die ersten Testdrucke wurden im Januar 2024 auf einer kleinen Tiefdruck-Testeinheit durchgeführt, um die Ausgangsbedingungen des Prozesses festzulegen. PET-Folie mit einer Dicke von 100 µm wurde als Substratmaterial gewählt, da sie eine glatte Oberfläche, chemische Beständigkeit und eine gute Haftung für Tiefdruckfarben aufweist. Für diese ersten Versuche wurde die IKTS W24001-Farbe verwendet. Zur Druckvorbereitung wurden 21 Gramm W24001 mit 0,61 Gramm Photoinitiator gemischt, um die Härteigenschaften zu verbessern, und 0,7 ml Verdüner hinzugefügt, um die Viskosität anzupassen. Die Tinte zeigte jedoch eine hohe Anfangsviskosität und erhebliche Agglomeration, was eine gleichmäßige Farbübertragung behinderte und zu Druckfehlern führte.

Nach der Analyse der Testergebnisse wurde deutlich, dass mehrere Anpassungen erforderlich waren, um die Druckqualität zu verbessern. Insbesondere musste die Viskosität der Farbe gesenkt werden, um einen gleichmäßigen Farbfluss und eine konstante Farbübertragung zu gewährleisten. Zudem musste die Lieferzeit der Farbe von IKTS verkürzt werden, um das Risiko von Agglomerationen während des Transports und der

Lagerung zu minimieren. Darüber hinaus wurde festgestellt, dass eine neue Tiefdruckform mit variierenden Gravurtiefen hergestellt werden sollte, um die optimale Zellstruktur für eine kontrollierte Farbabgabe zu untersuchen.

Um die in der ersten Testphase identifizierten Einschränkungen zu beheben, wurde eine neue Tiefdruck-Testform bestellt und im März 2024 geliefert. Diese Druckform wies eine Reihe von Gravurtiefen auf – 6, 12, 18, 30 und 40 ml/m<sup>2</sup> –, um vergleichende Studien zur Auswirkung unterschiedlicher Zellgravurtiefen auf die Farbübertragung und die Schichtdicke zu ermöglichen. Das Hauptziel bestand darin, die Gravurparameter zu identifizieren, die gleichmäßige, gut definierte Druckmerkmale mit optimaler Farbabgabe liefern.

Der Testdruck wurde mit der neu entwickelten Farbe W24026 durchgeführt, die eine geringere Viskosität als W24001 aufwies. Die Versuche ergaben jedoch, dass sich das Herstellungsverfahren für Druckformen mit Zellgravurtiefen von 30 und 40 ml/m<sup>2</sup> erheblich von dem Verfahren für 6, 12 und 18 ml/m<sup>2</sup> unterschied. Diese Abweichung führte zu Inkonsistenzen bei der Farbübertragung, wodurch aussagekräftige Vergleiche über alle Gravurtiefen hinweg erschwert wurden. Daher wurde beschlossen, zwei separate Druckformen herzustellen: eine mit Zellgravurtiefen von 6, 12 und 18 ml/m<sup>2</sup> und eine zweite speziell für 30 ml/m<sup>2</sup>. Diese Anpassung sollte die Herstellungsprozesse für jede Gravurtiefenreihe standardisieren und eine höhere Konsistenz und Zuverlässigkeit der Testergebnisse gewährleisten.

Im April 2024 wurden zusätzliche Tests mit der am pmTUC verfügbaren Tiefdruckform durchgeführt. Diese Versuche konzentrierten sich auf die Bewertung des indirekten Tiefdrucks, einer alternativen Technik, die sich vom herkömmlichen Tiefdruck durch ihren Mechanismus der Farbübertragung unterscheidet. Die Ergebnisse zeigten, dass mit indirektem Tiefdruck eine deutlich dickere Farbschicht auf das Substrat aufgebracht werden kann als mit konventionellem direktem Tiefdruck.

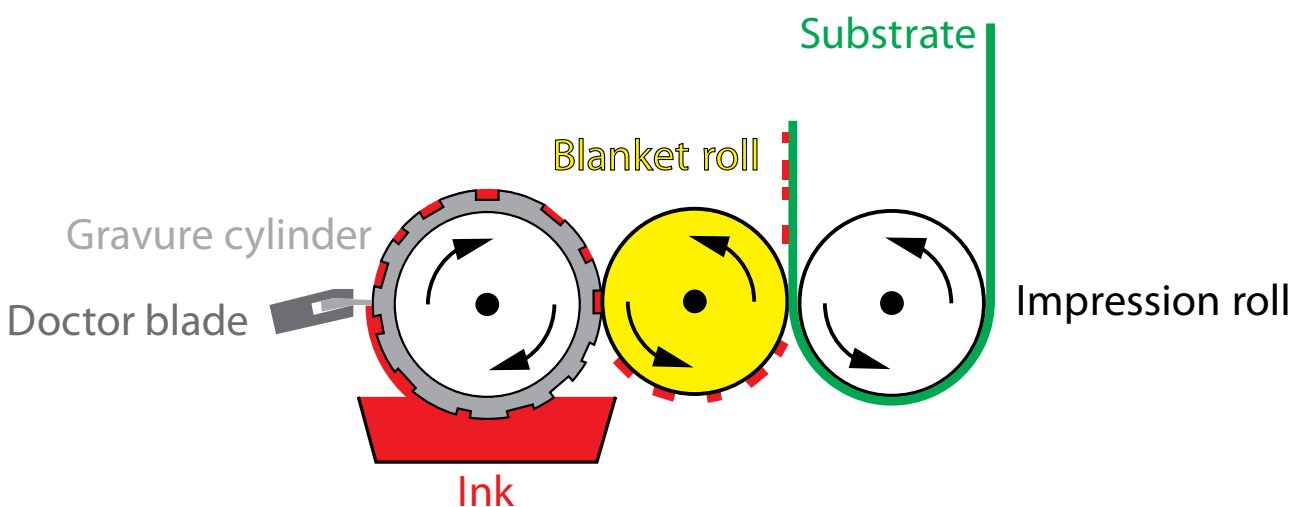
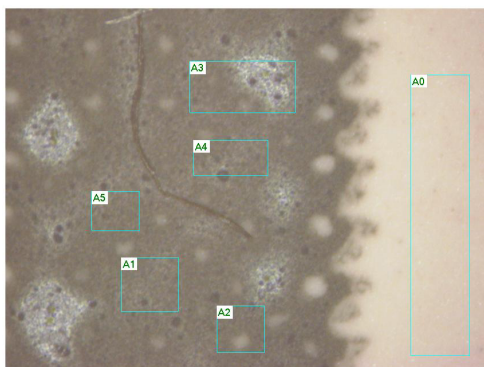


Bild 12: Indirekter Tiefdruck

Diese Erkenntnis war besonders wichtig, da eines der Hauptziele des Projekts darin bestand, hochpräzise Linien mit einer ausreichenden Farbschichtdicke zu drucken. Durch eine kontrollierte Farbabgabe zeigte der indirekte Tiefdruck vielversprechende Möglichkeiten zur Erreichung der gewünschten Auflösung und elektrischen Leistungseigenschaften gedruckter Widerstände. Die Möglichkeit, feine Linien mit einer genau kontrollierten Farbschichtdicke zu drucken, ist entscheidend für die Stabilität und Funktionalität elektronischer Bauteile, da Schwankungen in der Farbabgabe deren elektrische Eigenschaften direkt beeinflussen können.

Tabelle 3: Vergleich der Schichtdicke im direkten und indirekten Tiefdruck

Drucktyp, Tintentyp, Volumen	Ra, $\mu\text{m}$	Rz, $\mu\text{m}$	Dicke der bedruckten Schicht, $\mu\text{m}$
Direkt, original, 6 ml	4,82	19,87	6,34
Indirekt, original, 6 ml	6,65	20,73	15,11
Direkt, original, 12 ml	2,57	13,47	2,37
Indirekt, original, 12 ml	6,93	27,1	14,95
Direkt, original, 18 ml	2,7	14,54	8,25
Indirekt, original, 18 ml	4,85	16,15	8,4
Direkt, verdünnt, 6 ml	9,4	36,17	12,8
Indirekt, verdünnt, 6 ml	5,22	21,54	2,65
Direkt, verdünnt, 12 ml	3,12	15,54	8,48
Indirekt, verdünnt, 12 ml	7,8	30,18	3,22
Direkt, verdünnt, 18 ml	5,86	24,54	22,38
Indirekt, verdünnt, 18 ml	7,17	32,45	12,16



Measure A	Seg.	Step	Ave. height	Min. height	Max. height	Comment
0(Ref.)	Rect.		98.412um	49.065um	172.056um	
1	Rect.	1.888um	100.300um	61.624um	166.897um	
2	Rect.	6.436um	104.848um	0.000um	169.171um	
3	Rect.	2.502um	100.913um	45.796um	171.326um	
4	Rect.	5.091um	103.502um	79.156um	167.127um	
5	Rect.	0.546um	98.958um	53.310um	163.811um	
Total		16.462um	606.933um	288.951um	1010.388um	
Max.		6.436um	104.848um	79.156um	172.056um	
Min.		0.546um	98.412um	0.000um	163.811um	
Ave.		3.292um	101.155um	48.159um	168.398um	
Std. DV		2.157um	2.320um	11.927um	2.812um	
3sigma		6.470um	6.959um	35.781um	8.437um	

Bild 13: Bedruckte Schichtdicke

Basierend auf den Erkenntnissen aus den vorherigen Phasen wurde im Juni 2024 eine neue Tiefdruckform mit Zellgravurtiefen von 6, 12 und 18 ml/m<sup>2</sup> beschafft. Dies ermöglichte eine systematischere Bewertung der Auswirkungen unterschiedlicher Gravurtiefen auf die Farbübertragung unter kontrollierten Bedingungen. Testdrucke wurden mit den Farben W24026 und W24045 auf einem 951PX-Substrat mit der LaborMAN-Tiefdruckmaschine durchgeführt.

Tabelle 4: Bedruckte Schichtdicke

Tinte, Volumen	Durchschnittliche Dicke der gedruckten Schicht vor dem Aushärten, $\mu\text{m}$	Durchschnittliche Dicke der gedruckten Schicht nach dem Aushärten, $\mu\text{m}$
W24088, 6 ml	7,27	12,05
W24088, 12 ml	6,75	26,47
W24088, 18 ml	27,91	34,98
W24088, 30 ml	42,26	10,33
W24088 + 0,5%wt BYK3511, 6 ml	1,28	13,17
W24088 + 0,5%wt BYK3511, 12 ml	3,22	3,29
W24088 + 0,5%wt BYK3511, 18 ml	2,53	8,1
W24088 + 0,5%wt BYK3511, 30 ml	8,00	21,81

Im September 2024 wurde eine neue Druckform mit einer einzelnen Gravurtiefe von 30 ml/m<sup>2</sup> angeschafft. Diese Form wurde verwendet, um weitere Testdrucke auf der LaborMAN-Tiefdruckmaschine mit der Farbe W24088 auf einem 9K7-Substrat durchzuführen. Die Ergebnisse wurden mit früheren Testdrucken mit Gravurtiefen von 6, 12 und 18 ml/m<sup>2</sup> verglichen, um den Einfluss der höheren Farbkapazität auf die Druckgleichmäßigkeit, die Schichtdicke und die Detailauflösung zu bewerten.

Die durchgeführten Tests lieferten wertvolle Erkenntnisse zur Optimierung des Tiefdruckverfahrens für hochauflösende gedruckte Strukturen, die für elektronische Anwendungen von entscheidender Bedeutung sind.

Während der Krankheit von Herrn Adamantov wurden weitere Testdrucke durchgeführt. Die neuen Druckfarben W24088, W24125, W24123 und W24045 wurden mit unterschiedlichen Viskositätsstufen und Gravurtiefen von 6, 12 und 18 ml/m<sup>2</sup> getestet. Obwohl weitere Optimierungs- und Forschungsarbeiten erforderlich sind, um Toleranzen zu minimieren, wurde die Standardabweichung vom Mittelwert mit 29 % für 12-ml-Näpfcchen, 21 % für 6-ml-Näpfcchen und 11 % für 18-ml-Näpfcchen angegeben. Es wurde beobachtet, dass eine Erhöhung der Verdünnung der Tinte W24088 zu einem entsprechenden Anstieg der Resistenz führte, ein Effekt, der bei 6-ml-Zellen besonders ausgeprägt war. Außerdem verbesserten sich mit zunehmender Verdünnung die Glätte und die Konnektivität des Widerstandsbereichs in den Druckbildern. Die geringsten Standardabweichungen vom Mittelwert (< 11 %) wurden für 18-ml-Zellen mit W24088 und seiner verdünnten Variante W24088D erzielt. Darüber hinaus erzeugte die unverdünnte Tinte W24125 bei 6-ml-Zellen ein sehr glattes und gleichmäßiges Druckbild mit stabilen Widerstandswerten, was eine Standardabweichung von 10 % ergab. In ähnlicher Weise erzielte die verdünnte Tinte W24123B mit 6-ml-Näpfcchen ein sehr glattes Druckbild und Widerstandswerte mit der geringsten festgestellten Standardabweichung von nur 8 %. Im Gegensatz dazu führte die

im indirekten Tiefdruckverfahren hergestellte W24045 (die der W24123 ähnlich ist) zu einem unscharfen Druckbild und Widerstandswerten mit einer größeren Standardabweichung, die bei den getesteten Zellvolumina zwischen 18 % und 21 % lag.

Die laufenden Tests konzentrierten sich auf die Verfeinerung des Druckprozesses, indem die verbleibenden Herausforderungen angegangen wurden, wie z. B. die Optimierung der Tintenhärtungsbedingungen, die Erforschung alternativer Substratmaterialien und die Bewertung der Langzeitstabilität der gedruckten Merkmale. Diese Verfeinerungen sind entscheidend, um sicherzustellen, dass das Tiefdruckverfahren durchgängig hochpräzise elektronische Komponenten mit reproduzierbaren elektrischen Eigenschaften herstellen kann.

### 3. Wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

- Getrocknete gedruckte Schichtdicke zwischen 2  $\mu\text{m}$  und 10  $\mu\text{m}$  wurde realisiert.
- Druckbilder zeigten matrixartige Effekte und Entnetzung bei einigen Tinten (Oberflächenspannung).
- Widerstandswerte wurden im Bereich von 45  $\Omega/\text{sq}$  bis 19  $\text{k}\Omega/\text{sq}$  gemessen, realisiert mit den verschiedenen entwickelten Tiefdrucktinten auf 9k7 LTCC-Material.
- Einige Tinten erwiesen sich als vielversprechend mit Standardabweichungen von weniger als 11 %:
- $\Delta R/R$  von 11 % für die Tinte W24088 D mit 18 ml Tiefdruckzellen (bestätigt auf zwei verschiedenen Substraten)
- $\Delta R/R$  von 10 % für die Tinte W24125 mit 6 ml Tiefdruckzellen
- $\Delta R/R$  von 8 % für die Tinte W24123 B mit 6 ml Tiefdruckzellen
- Weitere Entwicklungen und Untersuchungen sind erforderlich, um den Tiefdruckprozess auf LTCC-Material weiter zu verbessern.
- Ziel: Toleranz < 5 % – wird voraussichtlich im nächsten Iterationsschritt erreicht (aufgrund der fehlenden Verlängerung ist ein neues Projekt erforderlich).

### 4. Verwertung der Ergebnisse und fortgeschriebener Verwertungsplan

Die Verwertung der Ergebnisse erfolgt bei den Projektpartnern.

### 5. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Fortschritte auf dem Gebiet bei anderen Stellen sind nicht bekannt geworden.

### 6. Veröffentlichungen der Ergebnisse

Die Ergebnisse des Projekts sind nirgendwo veröffentlicht worden.

## Literaturverzeichnis

- <sup>1</sup> J. R. Larry, R. M. Rosenberg, R. O. Uhler, „Thick-Film Technology: An Introduction to the Materials“, IEEE TRANSACTIONS ON COMPONENTS, HYBRIDS, AND MANUFACTURING TECHNOLOGY, VOL. CHMT-3, NO. 2, JUNE 1980
- <sup>2</sup> T. Inokuma, Y. Taketa, „CONTROL OF ELECTRICAL PROPERTIES OF RuO<sub>2</sub> THICK FILM RESISTORS“, Active and Passive Elec. Comp., 1987, Vol. 12, pp. 155-166
- <sup>3</sup> G. E. Pike, C. H. Seager, „Electrical properties and conduction mechanisms of Ru-based thickfilm (cermet) resistors“, J. Appl. Phys. 48, 5152 (1977); doi: 10.1063/1.323595
- <sup>4</sup> Y. Imanaka, „Multilayered Low temperature cofired ceramics (LTCC) Technology“, 2005, Springer Verlag, ISBN 0-387-23130-7
- <sup>5</sup> [www.dupont.com/products/greentape-951-ltcc-material-system.html](http://www.dupont.com/products/greentape-951-ltcc-material-system.html)
- <sup>6</sup> A. Dziejczak, L. Golonka, J. Kita et al., „Electrical and stability properties and ultrasonic microscope characterisation of low temperature co-fired ceramics“, Microelectronics Reliability 41 (2001) 669–676
- <sup>7</sup> P. Uhlig, A. Serwa, J. Müller et al., „LTCC Resistors – The Influence of Production Conditions on the Absolute Value and its Reproducibility“, 2018 IMAPS Nordic Conference on Microelectronics Packaging (NordPac)
- <sup>8</sup> H. Kipphan (Ed.) „Handbook of print media: technologies and production methods“ Springer Science (2001)
- <sup>9</sup> C. Tong „Advanced Materials for Printed Flexible Electronics“, Springer (2022)
- <sup>10</sup> G. Schmidt, M. Bellmann, B. Meier, M. Hamsch, K. Reuter, H. Kempa, and A. C. Hübler, „Modified mass printing technique for the realization of source/drain electrodes with high resolution“, Org. Electron. 11, 1683 (2010)
- <sup>11</sup> Y. Kusaka, N. Fukuda & H. Ushijima „Recent advances in reverse offset printing: an emerging process for high-resolution printed electronics“ Japanese J. Appl. Phys. 59 SG0802, (2020)
- <sup>12</sup> P. Brumm, T. E. Weber, H. M. Sauer & E. Dörsam „Ink splitting in gravure printing: localization of the transition from dots to fingers“, J. Print Media Tech. Res.10/2 81–93 (2021)
- <sup>13</sup> C. Neto, K. Jacobs, R. Seemann, R. Blossey, J. Becker & G. Grün "Satellite hole formation during dewetting: experiment and simulation" J. Phys. Condens. Matter 15 3355 (2003)
- <sup>14</sup> R. Seemann, S. Herminghaus, C. Neto, S. Schlagowski, D. Podzimek, R. Konrad, H. Mantz & K. Jacobs „Dynamics and structure formation in thin polymer melt films“ J. Phys.: Condens. Matter 17 S267 2005
- <sup>15</sup> M. L. Morgan, A. Holder, D. J. Curtis, D. Deganello "Formulation, characterisation and flexographic printing of novel Boger fluids to assess the effects of ink elasticity on print uniformity", Rheologica Acta 57:105–112 (2018)
- <sup>16</sup> G. Hernandez-Sosa, S. Tekoglu, S. Stolz, R. Eckstein, C. Teusch, J. Trapp, U Lemmer, M. Hamburger & N. Mechau "The Compromises of Printing Organic Electronics: A Case Study of Gravure-Printed Light-Emitting Electrochemical Cells" Adv. Materials 26, 3235- 3240 (2014)
- <sup>17</sup> T. Hartwig, T. Siesel, H. M. Sauer & E. Dörsam "Controlling Film Formation of Functional Organic Materials in Gravure Printing by Using Temperature-Controlled Substrate Carriers", 19th International Coating Science and Technology Symposium, Long Beach, USA (2018)
- <sup>18</sup> H. A. D. Nguyen, C. Lee, K.-H. Shin, "Approach to optimizing printed conductive lines in high-resolution roll-to-roll gravure printing" Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 46 122–129 (2017)