

# Sachbericht zum Verwendungsnachweis

## Verbundprojekt

**Umformung von Folien mit bereits aufgebrauchten elektronischen Komponenten zur Herstellung von Lab-on-a-Chip-Testträgern mit erweiterten Funktionalitäten**

## SmartLab2

in der Fördermaßnahme

**KMU-innovativ Produktionsforschung**

## Autor(en)

OrelTech GmbH

Dr. Konstantin Livanov ([konstantin@oreltech.com](mailto:konstantin@oreltech.com))

**Projektlaufzeit:** 31.10.2022 – 31.12.2024

**Erstellungsdatum:** 30.06.2025

## Projektpartner

- innoME GmbH (Accensors GmbH/Adsensors GmbH) (Kordinator)
- OrelTech GmbH
- SimpaTec Engineering GmbH
- Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e.V.



Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

## Inhaltsverzeichnis

I.	Teil I Kurzfassung (Gemeinsam, alle Projektpartner).....	4
I.1	Aufgabenstellung.....	4
I.2	Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens .....	5
I.3	Wesentliche Ergebnisse im Überblick .....	5
I.4	Motivation und Aufgabenstellung .....	6
I.5	Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens .....	9
I.6	Planung und Ablauf des Vorhabens .....	13
I.7	Ergebnisse .....	24
I.8	Darstellung des während des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen .....	28
I.9	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit der Ergebnisse	28
I.10	Zusammenarbeit mit anderen Stellen außerhalb des Verbundprojektes.....	30
I.11	Veröffentlichungen, Vorträge Referate, etc. ....	30
I.12	Literaturverzeichnis .....	31

## I. Teil I Kurzfassung (Gemeinsam, alle Projektpartner)

Das Projekt SmartLab2 verfolgte das Ziel, ein wirtschaftlich attraktives Herstellungsverfahren für die Produktion von intelligenten, sensorbasierten Probengefäßen zu entwickeln. Das neuartige Herstellungsverfahren besteht darin, das Sensorsystem auf einen Grundkörper zu drucken und diesen dann zum fertigen Probengefäß zu formen. Eine wesentliche Innovation ist die Verwendung einer leitfähigen Tinte in Kombination mit der simulierten Verformung von 2D- zu 3D-Strukturen, wodurch eine homogene Leitfähigkeit der Leiterbahnen nach dem Thermoformen erreicht wird. Dies ermöglicht eine kosteneffiziente Produktion von intelligenten Probengefäßen.

**addSensors GmbH** stellte neben der Koordination des Projekts die Anforderungen an den Testträger, sowie Konstruktionen und Elektroden-Layout für die ersten Prototypen.

Die **SimpaTec Engineering GmbH** entwickelt eine Thermoform-Simulationsmethodik zur Vorhersage des erforderlichen Designs der leitfähigen Schicht vor dem Prozess, indem sie die Verformung und den Effekt der Metalltinte, die während des Prozesses auf der Materialplatte auftreten, einbezieht und ein neues Materialmodell & Charakterisierungsverfahren verwendet.

**OreITech GmbH** entwickelt leitfähige Gold- und Platintinten für die Elektroden. Diese müssen fein gedruckt werden, eine hohe Leitfähigkeit aufweisen und den physikalischen Anstrengungen des Thermoformens standhalten.

**Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e.V.** entwickelte in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern Thermoformprozesse, abgestimmt auf die Anforderungen an Material, Tinten und Positionierung. Auf Basis dieser Prozesse werden Prototypen hergestellt und für weitere Prüfungen hinsichtlich der geforderten Eigenschaften untersucht und die Erkenntnisse in die weiteren Prozessanpassungen der Projektpartner übertragen.

### I.1 Aufgabenstellung

Das Projekt umfasst 9 Arbeitspakete (AP), die zur Entwicklung innovativer Lösungen im Bereich Laborkonsumgüter mit integrierter Sensorik beitragen. Zu Beginn werden Spezifikationen definiert, um Anforderungen und Ziele klar zu definieren. Anschließend erfolgt die Materialauswahl und -evaluierung bei der geeignete Materialien ausgewählt und genau evaluiert wurden. Die Thermoformsimulation berechnet Verzerrungen bei der Herstellung von Formteilen, um diese zu optimieren. Ebenfalls entwickelt wird spezielle Tinten für Laborkonsumgüter durch die Tintenentwicklung.

Eine weitere Schritte ist die Ausrichtung von Folie zu Formwerkzeug, bei der ein Verfahren zum Positionieren der bedruckten Verarbeitungsfolie beim Thermoformen optimiert wird. Die Ergebnisse dieser Arbeitspakete werden dann im Funktionsmuster kombiniert und ihre Gültigkeit überprüft. Anschließend erfolgt die Übertragung auf komplexere Strukturen (Prototypen), bei der erfolgreiche Methoden auf

anspruchsvollere Anwendungen übertragen werden. Diese führen zu Designregeln, die als Leitlinien für zukünftige Entwicklungen, wie Mehrlagenverbünde dienen soll.

## **I.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens**

Die Firma addSensors produziert und vertreibt folienbasierte Sensoren, welche mit verschiedenen Fertigungstechnologien (Siebdruck, InkJet etc.) hergestellt werden. Jedoch wird mit diesen Fertigungsverfahren lediglich eine planare Oberfläche adressiert, bei 3D-Strukturen muss ein kostenintensives (unwirtschaftliches) schreibendes Verfahren verwendet werden.

Das Blisterverfahren (im Folgenden auch unter dem allgemeineren Begriff Thermoformen) stellt eine etablierte Technologie zur Herstellung von Einwegartikeln (z.B Verpackungen) dar, welche sich durch eine hohe Kosteneffizienz und Skalierbarkeit auszeichnet. In der Mikrofluidik fand die Technologie in einer abgewandelten Form als Mikrothermoformen Anwendung, welche einen stärkeren Schwerpunkt auf die formtreue Wiedergabe von kleinen Strukturen (um die 20 µm) hat.

Durch den vorverstreckten Druck von funktionalen Strukturen aus leitfähiger Tinte auf ein Foliensubstrat mit nachfolgendem Thermoformprozess soll eine Herstellmethode entwickelt werden, welche kosteneffizient funktionale Einwegartikel herstellen kann.

## **I.3 Wesentliche Ergebnisse im Überblick**

Im Rahmen des Projekts wurden von den Projektpartnern die folgenden, nach AP gegliederten Ergebnisse erzielt.

**AP1:** Spezifikationen mit Anforderungen an Leitfähigkeit und Materialbeschaffenheiten wurden erstellt und in den nachfolgenden APs in einem Prototyp umgesetzt.

**AP2,3,4:** In den zusammenhängenden Arbeitspaketen wurden Materialien und Tintenkombinationen identifiziert, mit welchen ein erster Prototyp hergestellt werden konnte. Dies umfasst die Entwicklung von Thermoform-Prozessen, mit denen die bedruckten Materialien ohne größere Defekte umgeformt werden können und Designrichtlinien für den Druck der leitfähigen Strukturen.

**AP5:** Strukturen zur Ausrichtung der Elektroden wurden in die Designrichtlinien, für das Layout der leitfähigen Strukturen und Thermoform-Werkzeuge integriert.

**AP6:** Auf Basis der vorangegangenen APs wurden erste Prototypen hergestellt, welche die Erkenntnisse dieser zusammenführen.

**AP7:** Komplexere Strukturen und Mehrlagenverbünde konnten in der Projektlaufzeit nicht mehr umfassend bearbeitet werden.

Zusammenfassend wird das Projekt als erfolgreich bearbeitet angesehen. Es wurden die meisten Ziele der Arbeitspakete erreicht. Weitere Verbesserungen wie eine Integration des simulierten Elektroden-Designs können einfach angeschlossen werden.

## **Teil II Eingehende Darstellung**

*In der eingehenden Darstellung sind die im Rahmen des Vorhabens durchgeführten Arbeiten im Vergleich zur ursprünglichen Vorhabenbeschreibung ausführlicher darzustellen. Hierbei ist darauf zu achten, dass die Verwendung der Zuwendung sowie die erzielten Ergebnisse im Einzelnen nachvollziehbar sind.*

### **I.4 Motivation und Aufgabenstellung**

*Beschreiben Sie hier die Problemlage und Motivation für das Vorhaben. Leiten Sie daraus die Aufgabenstellung ab und erläutern Sie die Partnerstruktur. Beschreiben Sie die Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde (z.B. Ressourcen, Einbindung in die Unternehmensstrategie, Vorarbeiten und Vorkenntnisse, etc.)*

#### **Gesamtmotivation**

Laborprozesse in der medizinischen Diagnostik und Forschung sind grundsätzlich anfällig für menschliche oder prozedurale Fehler, was die Datenintegrität untergraben und zu fehlerhaften Schlussfolgerungen führen kann. Unachtsamkeiten – sei es bei der Probenhandhabung, der Einhaltung zeitlicher Abläufe oder der Zugabe von Reagenzien – stellen eine ernsthafte Gefährdung der Ergebnissicherheit dar. Durch die Integration intelligenter Sensorik direkt in die Probengefäße lassen sich hingegen alle kritischen Prozessparameter auf den einzelnen Etappen – vor dem Beladen, während der Inkubation und nach Abschluss der Analyse – kontinuierlich überwachen und Abweichungen frühzeitig erkennen, um ungültige Resultate zu vermeiden.

Im Rahmen des Projekts „SmartLab2“ verfolgt das Konsortium das Ziel, einen kosteneffizienten und skalierbaren Herstellungsprozess für diese neue Generation sensorfähiger Probenbehälter zu etablieren. Kern dieses Ansatzes ist ein zweistufiger Fertigungsworkflow: Zunächst werden die Sensornetzwerke präzise auf ein flexibles Substrat gedruckt, anschließend erfolgt die Umformung dieses Substrats mittels Thermoformen zur endgültigen Behältergeometrie. Dieses integrierte Produktionsparadigma optimiert nicht nur den Montageaufwand und reduziert den Materialeinsatz, sondern ermöglicht auch eine Echtzeit-Qualitätskontrolle, die das Zuverlässigkeitsniveau in medizinischen Laborbetrieben nachhaltig hebt.

#### **OrelTech-Motivation**

OrelTechs Engagement in diesem Projekt wird durch den Wunsch motiviert, seine Präsenz im sich rasant entwickelnden Markt für medizinische und pharmazeutische Sensorik zu vertiefen und auszuweiten. Aufbauend auf einer soliden Innovationsbasis hat OrelTech bereits beeindruckende Erfolge in diesem Bereich mit seinen proprietären Platin- und Gold-Leitfähigkeitinkombinationen erzielt – Materialien, die aufgrund ihrer Biokompatibilität, chemischen Stabilität und ihrer Präzisionsdruckeigenschaften hoch geschätzt werden. Mit Blick auf zukünftige Anwendungsfelder erschließt das Unternehmen nun proaktiv neue, wertschöpfungsstarke Segmente wie implantierbare diagnostische Arrays, tragbare Überwachungspatches für die Arzneimittelabgabe und Point-of-Care-Testgeräte.

Durch die Verschmelzung seiner hochentwickelten Tintenformulierungen mit innovativen Sensorarchitekturen verfolgt OreITech das Ziel, nicht nur den strengen Leistungs- und Zulassungsanforderungen der Life-Sciences-Branche gerecht zu werden, sondern auch künftige Bedürfnisse vorwegzunehmen. Damit positioniert sich das Unternehmen als zentraler *Enabler* für die nächste Generation medizinischer Diagnostik und intelligenter pharmazeutischer Verpackungslösungen.

## **Projektziele**

Die primäre Aufgabe des Konsortiums besteht darin, voll funktionsfähige Prototypen spritzgegossener Kunststoff-Laborverbrauchsmaterialien – insbesondere einer für biochemische Assays ausgelegten 96-Well-Platte – mit nahtlos integrierten Sensoren zu entwickeln. Anstatt Sensoren erst nachträglich auf fertige dreidimensionale Bauteile zu montieren, werden die Sensorelemente zunächst auf ein zweidimensionales Foliensubstrat aufgedruckt, das anschließend durch Thermoformen in seine endgültige 3D-Geometrie überführt wird. Dieser Workflow vereinfacht die Sensorintegration erheblich, da komplexe Nachmontagen entfallen, und ermöglicht zugleich eine kontinuierliche, in situ-Überwachung des Inhalts jeder einzelnen Vertiefung mit außerordentlicher Präzision. Die so erzeugte Echtzeit-Datenerfassung steigert nicht nur die Zuverlässigkeit und Rückverfolgbarkeit experimenteller Protokolle, sondern stärkt auch die Qualitätssicherung im gesamten Analyseprozess.

Um einen fokussierten und ressourceneffizienten Entwicklungsverlauf zu gewährleisten, nutzt das Konsortium ein innovatives Simulationsframework zur Modellierung des Thermoformprozesses vor der eigentlichen Fertigung. Durch die in silico-Prognose von Folienvormung und Sensorintegrität können Designiterationen beschleunigt, Materialverluste minimiert und die Zeit bis zum Prototypen deutlich verkürzt werden. Die Projektumsetzung verbindet dabei erstmals zwei etablierte Technologien – das Direktbedrucken von Sensorinks auf Polymerfolien und das Mikro-Thermoformen dieser Folien zu Well-Platten-Geometrien. Diese Synergie optimiert nicht nur bestehende Fertigungslinien, sondern ebnet auch den Weg für eine neue Generation „smarter“ Labor-Einwegartikel, die eine hohe Produktionsfreundlichkeit mit integrierten Messfunktionen vereinen.

## **Zusammenarbeitsstruktur**

**InnoME** – Projektkoordinator und Sensorhersteller.

**Simpatec** – Simulationsexperte. Aufgabe ist es, ein finales Druckmuster zu erstellen, das anschließend thermoformtechnisch so umgesetzt wird, dass das nach dem Thermoformen resultierende Muster exakt mit den Merkmalen der Form übereinstimmt.

**OreITech** – Hersteller leitfähiger Tinten. OreITechs Hauptziele umfassen die Bereitstellung einer optimal auf die Anwendung zugeschnittenen Goldtintenformulierung sowie die Implementierung eines Auftrags- und Aushärtungsverfahrens, das sowohl den

Materialeigenschaften als auch den Anforderungen des Endprodukts entspricht. Im Bereich der Auftragstechniken liegt der Fokus auf Druckverfahren wie Inkjet, Aerosol-Jet und Mikrodrop-Printing. Für den Aushärtungsprozess wendet OrelTech seine firmeneigene Niedrigtemperatur-Argon-Sintertechnologie an, die zugleich eine energieeffiziente und nachhaltige Fertigung ermöglicht. Ziel ist es, Tinten zu entwickeln, die den Thermoformprozess unbeschadet überstehen und die geforderten Leitfähigkeitsbereiche aufweisen. Darüber hinaus übernimmt OrelTech das Drucken des von Simpattec simulierten Endmusters und versendet dieses zur Thermoformung an das Hahn-Schickard-Institut.

**Hahn-Schickard-Institut** – Thermoform-Experte, verantwortlich für die thermoformtechnische Verarbeitung des gedruckten Musters.

## **I.5 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens**

*Gehen Sie ausführlich auf den Stand der Wissenschaft und Technik zu Beginn des Vorhabens ein. Stellen Sie diesbezüglich dar, welche Defizite, Herausforderungen oder Bedarfe die Motivation für das Vorhaben bildeten. Umreißen Sie ausführlich den Ablauf des Vorhabens. Zeigen Sie auf, welche Arbeiten zur Zielerreichung durchgeführt wurden. Gehen Sie ggf. auf notwendige Umplanungen bzw. Probleme während der Vorhabendurchführung ein (bspw. Verzögerungen).*

### **Stand der Technik**

Obwohl das Prinzip, leitfähige Muster zweidimensional zu drucken und diese anschließend durch Thermoformen in dreidimensionale Geometrien zu überführen, bereits in etablierten Anwendungsfeldern – insbesondere im Automobilbereich für großflächige, wenig dehnbare Bauteile – zur Anwendung kommt, stellt die Übertragung dieser Strategie auf miniaturisierte, hochdehnbare Komponenten eine deutlich größere Herausforderung dar. In den genannten Anwendungen garantieren einheitliche Substrate und vergleichsweise geringe Dehnverhältnisse, dass die leitfähigen Tinten innerhalb ihrer mechanischen Grenzen blieben. Beim Herunterskalieren auf Mikro-Labverbrauchsmaterialien oder Sensorgehäuse hingegen sind die aufgedruckten Metallschichten extremen Beanspruchungen ausgesetzt, die ohne präzise Auslegung zu Rissen oder Delaminationen führen können.

Hinzu kommt, dass in unserem Projekt nicht lediglich Einkomponenten-Leiterbahnen betrachtet werden. Vielmehr stehen komplexe Mehrlagen-Architekturen im Fokus, bei denen unterschiedliche Ink-Chemistrien (etwa dielektrische Trennschichten, Sensorelektroden und Verbindungsspuren) in klar definierter Reihenfolge übereinandergestapelt werden. Bislang existieren keine veröffentlichten Arbeiten, die untersuchen, wie sich solche geschichteten Systeme unter den hohen Dehn- und Biegebelastungen verhalten, die beim Mikrothermoformen auftreten. Daher ist ein zentraler Forschungsschwerpunkt unseres Projekts die Entwicklung und Validierung mittels fortschrittlicher Deformationssimulationstools eines grundlegenden Verständnisses der Mechanik mehrlagiger Ink-Systeme. Dies gewährleistet eine zuverlässige, rissfreie Funktionalität der finalen dreidimensionalen Smart-Komponenten.

### **Stand der Technik: Gold-Leitfähige Tinten**

In den frühen Projektphasen wurden goldbasierte leitfähige Tinten als leistungsstarker, jedoch kostenseitig herausfordernder Bereich des Printed-Electronics-Marktes identifiziert. Ihre herausragende elektrische Leitfähigkeit und Oxidationsbeständigkeit prädestinieren machen sie besonders geeignet für die Sensorintegration – herkömmliche Gold-Nanopartikel-Tinten erforderten jedoch oftmals hohe Sintertemperaturen, wiesen ungleichmäßige Schichtdicken auf und führten durch Partikelagglomeration gelegentlich zur Verstopfung empfindlicher Präzisionsdruckköpfe. Diese Einschränkungen sind insbesondere für unseren Thermoform-Workflow kritisch, da das Substrat (mit aufgedruckter Metallisierung) hohen Temperaturen und mechanischen Belastungen ausgesetzt wird. Nachfolgend geben wir einen Überblick über bekannte Druck- und Sinterverfahren.

## Drucktechniken & Strukturierung

- **Inkjet und Aerosol-Jet:** Fortschrittliche Goldtinten sind mit beiden Verfahren kompatibel und erreichen Linienbreiten von unter 20 µm sowie gleichmäßige Benetzung auf Substraten wie Polyimid-Folien, PET und Papier.
- **Siebdruck und Slot-Die:** Aufgrund von Beschränkungen in der Merkmalauflösung seltener für Gold eingesetzt, jedoch geeignet, wenn großflächige Strukturen tolerierbar sind.

## Sinterverfahren

### 1. Niedertemperatur-Thermalsintern

- Optimierte Tinten, die bereits bei 120 °C sintern, erzielen bis zu ca. 70 % der Leitfähigkeit von massivem Gold (Resistivität  $\sim 5 \mu\Omega \cdot \text{cm}$  bzw.  $5 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$  nach Behandlung bei 180–200 °C).

### 2. Photonisches/Laser-Sintern

- Ultraflache Laserpulse oder intensive Photonenblitze erlauben eine lokal begrenzte Sinterschritt auf wärmeempfindlichen Substraten; sie erzeugen durchgehende Goldnetzwerke, ohne das Kunststoff-Substrat zu schädigen.

### 3. Plasma-Sintern

- Das von OrelTech entwickelte Plasmaverfahren vermeidet viele Nachteile herkömmlicher Sinterschritte. Mit Temperaturen von nur etwa 70 °C gilt es als das derzeit „kälteste“ und zugleich energieeffizienteste Verfahren zum Sintern leitfähiger Tinten.

## Kernherausforderungen

- Senkung des Goldgehalts zur Reduzierung der Materialkosten durch Verzicht auf das Nanopartikelmodell.
- Integration von Plasma- oder photonischem Sintern direkt in Roll-to-Roll-Produktionslinien für hohe Durchsatzraten.
- Entwicklung recycelbarer oder umweltfreundlicherer Formulierungen, beispielsweise durch den Einsatz wässriger Systeme oder biologisch abbaubarer Liganden als Ersatz konventioneller Additive.

## OrelTechs Stand der Technik

Die OrelTech GmbH entwickelt nanopartikelfreie, leitfähige Tinten auf Basis metallorganischer Komplexe, die nach dem Druckvorgang mithilfe von ionisiertem Gas (Plasma) zersetzt werden. Dabei entstehen weder feste noch flüssige Rückstände, da alle verbleibenden organischen Bestandteile in die Gasphase übergehen. Plasmakammern sind in der industriellen Fertigung – etwa zur Reinigung von Wafern oder Glassubstraten – bereits weit verbreitet und einfach zu bedienen, was die Implementierung dieser innovativen Tintentechnologie zusätzlich erleichtert.

Zur Überwindung der genannten Herausforderungen hat OrelTech ein wegweisendes Goldtintensystem ohne Nanopartikel entwickelt, das stattdessen auf einen plasmabasierten Sinterschritt mit minimalem thermischen Aufwand setzt. Der Verzicht auf feste Partikel in der Tintenformulierung erhöht die Druckzuverlässigkeit erheblich – verstopfte Druckdüsen gehören der Vergangenheit an – und der Plasmaprozess ermöglicht eine vollständige Verdichtung bei substratschonenden Temperaturen.

Im Verlauf des Entwicklungsprogramms hat OrelTech zudem speziell abgestimmte Gold- und Platin-Tintenrezepturen optimiert, die jeweils drei kritische Eigenschaften erfüllen:

1. Elektrische Leitfähigkeit der ausgehärteten Metallschicht
2. Robuste Haftung auf den gewählten Polymerfolien
3. Dehn- und Biegefähigkeit ohne Rissbildung während des Mikro-Thermoformens

Weitere Vorteile der OrelTech-Tinten im Verbundprojekt — verglichen mit alternativen Technologien — sind in **Abbildung 2.1** dargestellt. Die nanopartikelfreien Formulierungen bieten eine Reihe von Kosteneinsparungen, angefangen bei wirtschaftlich attraktiven Tintenpreisen bis hin zu reduzierten Energieverbräuchen und geringerer Abfallproduktion im Vergleich zu herkömmlichen Verfahren.

	Metal Vapor Deposition (Sputtering)	Nanoparticles inks (Ag NPs)	Conductive Polymers	ITO	OrelTech
Printability	No	Yes	Yes	No	Yes
Medium	Vapor	Dispersion	Solution/Dispersion	Vapor	Solution
Layer Transparency	No	Medium	Medium	Very Good	Good
Process temperature (°C)	~200	120 - 350	~100	~200	<70
Conductivity	High	High	Very Low/Low	Medium	High
Ink/Material price	Medium	High to Very High	High/Medium/Low	Very High	Low
Application on electrically active materials	Partially	No	Partially	Partially	Yes
Application on 3D surfaces (curved surfaces, threads, woven fabric, etc.)	No	Only with thermal curing	Yes	No	Yes
Application on a porous support	No	Only with thermal curing	No	No	Yes
Equipment price (USD)	200K - 2M	10K to 1M (depends on curing)	10 to 50K	200K - 2M	30K to 100K
Production power efficiency	Low to Very Low	Low to Very Low	High	Low to Very Low	High
Production speed	Fast to Very Fast	Slow to Very Fast (depends on curing)	Slow	Fast to Very Fast	Fast
Environmental impact	High	Medium	Low	High	Low

**Abbildung 2.1: Vorteile der OrelTech-Tinten im Vergleich zu alternativen Technologien**

OrelTech bringt umfassende Erfahrungen aus früheren Projekten in relevanten Bereichen wie Technologieapplikation, Prozessentwicklung und Prototyping in diese Zusammenarbeit ein.

### Projektverlauf und Ergebnisse bei OrelTech

Im Verlauf des Projekts hat OrelTech systematisch seine umfangreiche Tintenbibliothek auf den ausgewählten Polymerfolien evaluiert und jede Formulierung rigide anhand zentraler Leistungskennwerte – Leitfähigkeit, Haftung und mechanische Belastbarkeit – gescreent.

Durch die Korrelation von Druckparametern (z. B. Schichtdicke, Druckauflösung, Arbeitsabstand und Plasma-Sinterbedingungen) gelang es dem Team, die Tinten auszuwählen, die unter den thermoformbedingten Beanspruchungen die robusteste Performance zeigten.

In Partnerschaft mit dem Hahn-Schickard-Institut startete OrelTech anschließend eine iterative Testkampagne: Aufeinanderfolgende Zyklen aus Drucken, Plasma-Sintern und Thermoformen dienten der Verfeinerung sowohl der Tintenchemie als auch des Verarbeitungsrezepts. Durch diese enge Kooperation wurde eine optimierte Goldtintenformulierung und ein präzise abgestimmtes Druckprotokoll identifiziert, die den Thermoformzyklus zuverlässig überstanden – mit dauerhaft fester Haftung auf dem Foliensubstrat und niedrigen Widerstandspfaden für eine sichere Gerätefunktion.

Das Ergebnis dieser Arbeit ist eine Palette „thermoformfähiger“ Tinten, die die strengen Leistungsanforderungen des Projekts konstant erfüllten oder übertrafen. Nach dem Druck auf die Zielfolien und dem vollständigen Thermoformzyklus blieben diese Formulierungen durchgehende, niederohmige Leitpfade erhalten und wiesen keinerlei Delamination auf. In jeder Hinsicht bestätigten die finalen Druckmuster die Projektziele und zeigten, dass nanopartikelfreie, plasmagesinterte Tinten sowohl eine robuste Fertigung als auch hochqualitative Leitnetzwerke für die nächste Generation smarterer Labor-Einwegmaterialien gewährleisten können.

## I.6 Planung und Ablauf des Vorhabens

*Stellen Sie hier die geleisteten Projektarbeiten im Einzelnen dar und zeigen Sie auf, inwiefern die beschriebenen Arbeiten zur Zielerreichung notwendig sowie angemessen waren. Stellen Sie hier bitte auch Planabweichungen bzw. Probleme bei der Durchführung etc. dar. Legen Sie hier auch die Verwendung der Zuwendung dar. Gehen Sie dabei auf die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises ein (bspw. Investitionen, Unteraufträge, Material, Personal) und begründen/erläutern Sie deren Notwendigkeit!*

### Arbeitspaket 4 (WP4)

Im Arbeitspaket 4 verschob sich der Fokus auf die gezielte Anpassung der leitfähigen Tintenformulierungen selbst, damit sie den hohen thermischen und mechanischen Beanspruchungen des Mikro-Thermoformings widerstehen und dabei ihre elektrische Performance in vordefinierten 3D-Geometrien beibehalten. Parallel zur Formulierungsentwicklung führten wir eine systematische Untersuchung der Druckparameter durch – Auswahl und Feinabstimmung von Auftragstechniken, Druckauflösung, Düsen-Substrat-Abstand, Druckgeschwindigkeit und weiterer Variablen –, um für jede Tinte das optimale Prozessfenster zu ermitteln. Auf Basis dieser empirischen Datenreihe entstand anschließend eine konsolidierte Serie finaler Druckmuster, die alle gewonnenen Erkenntnisse integriert und reproduzierbare, hochpräzise leitfähige Strukturen für die nachfolgende Montage und Prüfung liefert.

#### WP4.1: Testreihen mit bestehenden Gold-Standard-Tinten

Zu Beginn führte OrelTech eine umfassende Evaluierung seiner sofort einsatzbereiten Goldtinten durch, um ihre Eignung für die anspruchsvollen Projektanforderungen zu prüfen. Mehrere Tintenvarianten wurden unter identischen Druckbedingungen auf das Zielfoliensubstrat (COP ZF14-188 und PC) aufgebracht und anschließend standardisierten Tests hinsichtlich Haftfestigkeit, elektrischer Leitfähigkeit und Drucktreue unterzogen. Aus den vergleichenden Ergebnissen wählte das Team die besten Kandidaten aus und optimierte deren Rheologie, Aushärtungsparameter und Oberflächenchemie, um die mechanischen und funktionalen Anforderungen optimal zu erfüllen.

Insgesamt wurden über 15 verschiedene Tinten getestet, jeweils mit drei Substrat-Vorbehandlungsoptionen:

- **a) keine Vorbehandlung**
- **b) 1 s RF-Plasmavorbehandlung bei 75 W und 35 sccm Ar**
- **c) 3 s RF-Plasmavorbehandlung bei 75 W und 35 sccm Ar**

Nach der jeweiligen Vorbehandlung applizierte man die Tinten per Drop-Casting (3 µl pro Tropfen) auf das Substrat, ließ die Tropfen für 1 Minute zur Ausbreitung stehen und überführte sie dann in die Plasmakammer zur Metallisierung (10 Minuten bei 75 W und 30

sccm Ar). Diese standardisierten Abläufe gewährleisteten eine konsistente Vergleichsbasis für alle getesteten Formulierungen.

### **Bewertung der resultierenden Goldschichten**

Die aufgetragenen Au-Schichten wurden anhand folgender Parameter evaluiert:

1. **Substratkompatibilität vor der Metallisierung** (beurteilt mittels Lichtmikroskopie)
2. **Schichtreinheit** (beurteilt mittels Lichtmikroskopie)
3. **Leitfähigkeit nach Metallisierung** (gemessen mit einer Vier-Punkt-Sonde/Vier-Punkt-Probestation)
4. **Haftung nach Metallisierung** (geprüft mittels Ablösetest gemäß ASTM D 3359-08 oder vergleichbarem Standard)

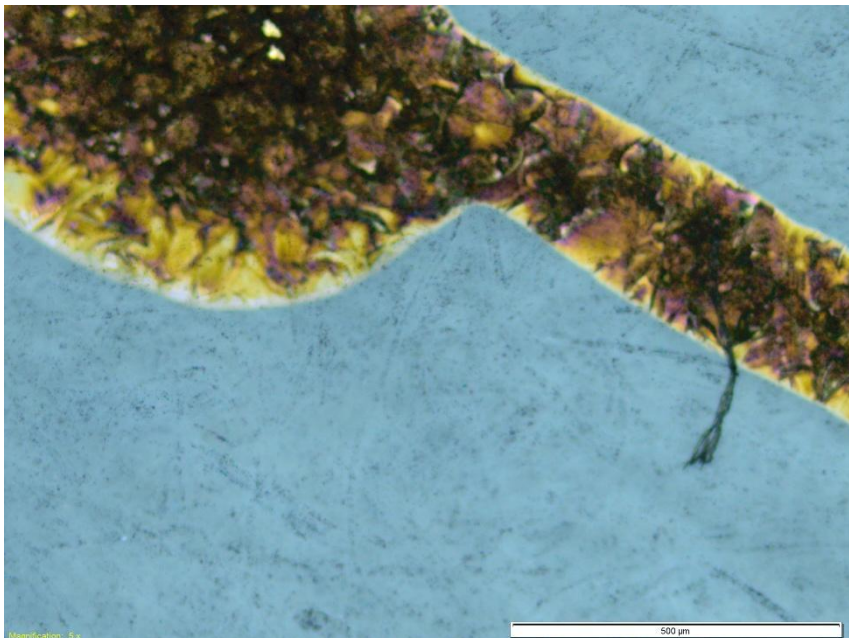
Aus dieser Bewertung gingen drei geeignete Tinten hervor (interne Bezeichnungen: Au8, Au11 und Au17b). Diese Tinten wurden auf beiden gewählten Substraten (PC und COP) testweise gedruckt, um mögliche Schwachstellen zu identifizieren, und anschließend zur weiterführenden Analyse an das Hahn-Schickard-Institut versandt.

Die Ergebnisse der Drucktests lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Die unten gezeigten Mikroskopaufnahmen offenbaren drei wesentliche Probleme mit den gedruckten Linien, die in der nächsten Phase des Arbeitspakets durch Modifikation der Tintenformulierungen behoben werden mussten.

### **Mikroskopisch festgestellte Defekte:**

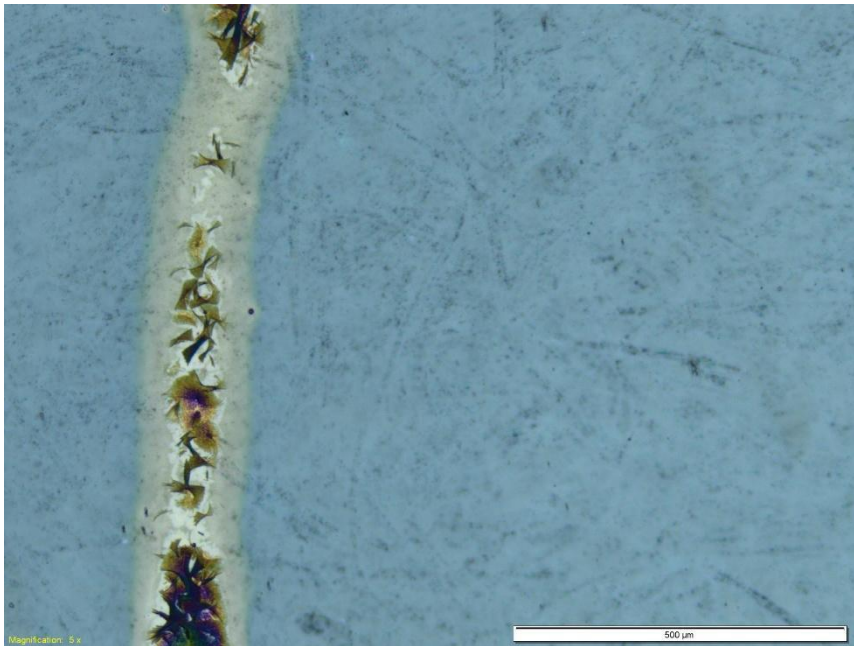
Ungleichmäßiges Druckbild in den XY-Dimensionen



**Abbildung 4.1.1 – Beispiel für ungleichmäßigen XY-Liniendruck**

Wie zu erkennen, weist die Metallschicht eine ungleichmäßige Verteilung auf. Die Ursache für diesen Defekt kann entweder in einer nicht gleichmäßigen Oberflächenaktivierung oder in unzureichender Benetzbarkeit der Tinte liegen. Im letztgenannten Fall wird empfohlen, die Oberflächenspannung der Tinte zu verringern. Dieser Defekt trat bei beiden Substraten gleichermaßen auf.

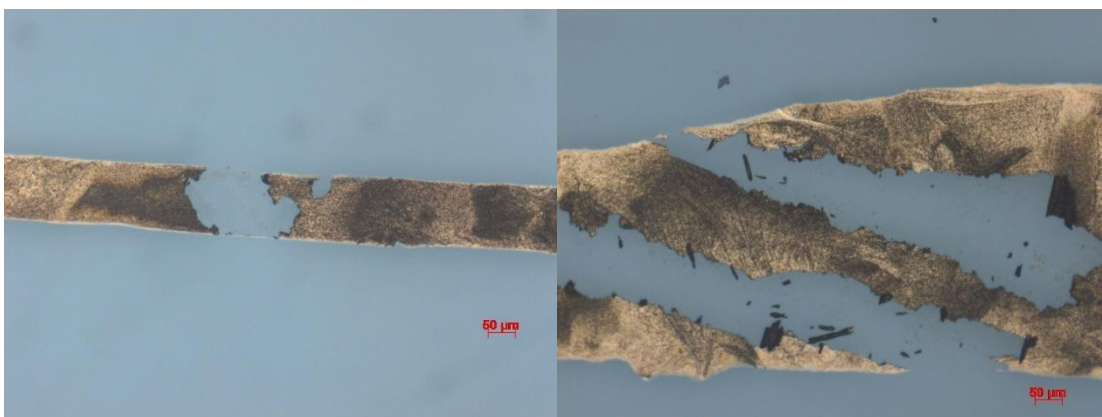
### **Ungleichmäßiger Druck in der Z-Dimension**



**Abbildung 4.1.2: Beispiel für ungleichmäßigen Z-Druck**

Wie im Bild zu erkennen ist, sind einige Bereiche des Drucks dicker (höher) als andere. Die Ursache für dieses Phänomen liegt in unzureichender Ebenheit der Tinte; Abhilfe schafft die Zugabe von Fließmitteln (Levelling-Additiven). Dieser Defekt trat bei PC-Drucken verstärkt auf.

### **Abblättern / Rissbildung der Tinte**



### **Abbildung 4.1.3: Beispiele für Rissbildung (rechts) und Ablättern (links). Bilder mit freundlicher Genehmigung des Hahn-Schickard-Instituts**

Wie ersichtlich, sind die gedruckten Linien instabil und können entweder reißen oder abplatzen. Dieser Defekt tritt besonders bei Biegebeanspruchung auf und ist bei COP-Substraten verstärkt zu beobachten. Ursache ist eine unzureichende Haftung auf dem Substrat.

Ein weiterer Hinweis des Hahn-Schickard-Instituts lautete, dass bei den Linien, die keine dieser Defekte zeigen, die Leitfähigkeit nicht ausreichend hoch ist. Neben den oben beschriebenen Korrekturen soll daher auch eine Erhöhung der Au-Konzentration erprobt werden.

#### **Erreichte Meilensteine WP4.1**

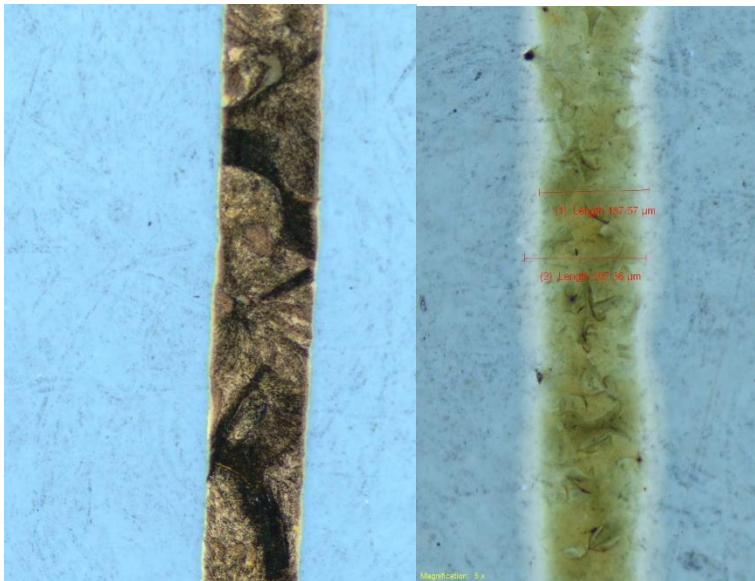
Im Rahmen von WP4.1 konnten sämtliche definierten Kenngrößen erfolgreich abgearbeitet werden: Die Reinheit der aufgedruckten Goldschichten wurde bestätigt, die Haftung nach der Metallisierung erfüllte die Anforderungen, und die elektrische Leitfähigkeit wurde sowohl vor als auch nach dem Thermoformen verlässlich gemessen. Auch die Schichtstabilität während des Thermoformprozesses zeigte keine kritischen Abweichungen. Basierend auf diesen Ergebnissen wurden die drei vielversprechendsten Tinten (Au8, Au11 und Au17b) für die weitere Optimierung ausgewählt und die folgenden Entwicklungsziele festgelegt: eine gleichmäßigere Linienbreite in XY-Richtung, eine verbesserte Schichtdicke in Z-Richtung, eine höhere Haftfestigkeit sowie eine nochmals gesteigerte Leitfähigkeit.

#### **WP4.2: Modifikation und Optimierung der ausgewählten Tintenformulierungen**

In WP4.2 wurden die drei ausgewählten Goldtinten systematisch modifiziert und optimiert. Dazu gehörte die Zugabe von Levelling-Additiven zur Verbesserung der Z-Uniformität, das Absenken von Viskosität und Oberflächenspannung zur Optimierung der XY-Homogenität und zur Erhöhung der Substrathaftung sowie die Erhöhung des Metallanteils zur Steigerung der Leitfähigkeit. Diese Maßnahmen führten zur Entwicklung zweier finaler Formulierungen, die im Projekt als Gold 1 (optimiert für PC-Substrate) und Gold 2 (optimiert für COP-Substrate) bezeichnet werden. Beide Tinten ließen sich problemlos auf ihren Zielmaterialien drucken und zeigten keinerlei der zuvor identifizierten Defekte.

Die abschließenden Drucktests bestätigten die erzielten Verbesserungen: Die gedruckten Schichten wiesen nun eine gleichmäßige Dicke in XY- und Z-Richtung auf, die Haftung auf den Substraten war deutlich erhöht, und die elektrische Leitfähigkeit erreichte die geforderten Werte, ohne dass Rissbildung oder Ablättern auftraten. Damit sind Gold 1 und Gold 2 „thermoform-ready“ und erfüllen alle im Lastenheft definierten Performance-Kriterien.

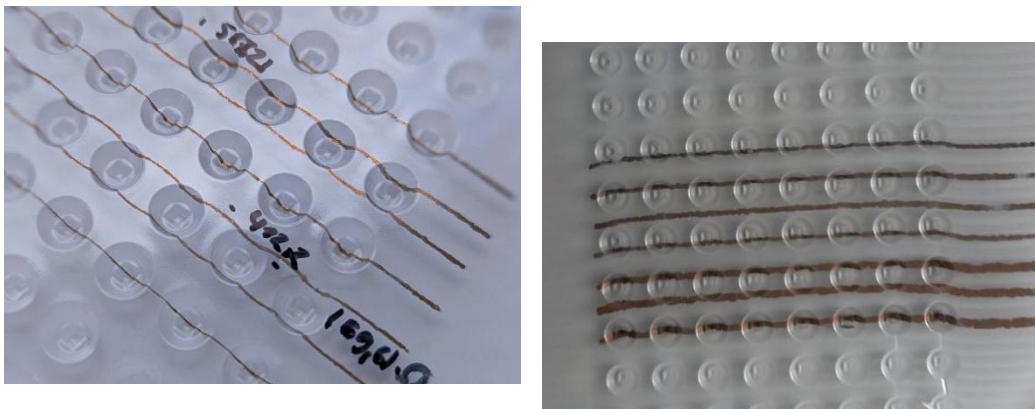
**Die Ergebnisse lauten wie folgt:**



**Abbildung 4.2.1: Links: gedruckte Linie mit der Gold-1-Tinte auf PC. Rechts: gedruckte Linie mit der Gold-2-Tinte auf COP.**

Wie aus den obigen Bildern ersichtlich, erscheinen beide Linien in XY- und Z-Richtung gleichmäßig und weisen eine exzellente Haftung auf den jeweiligen Substraten auf (Bewertung 5B).

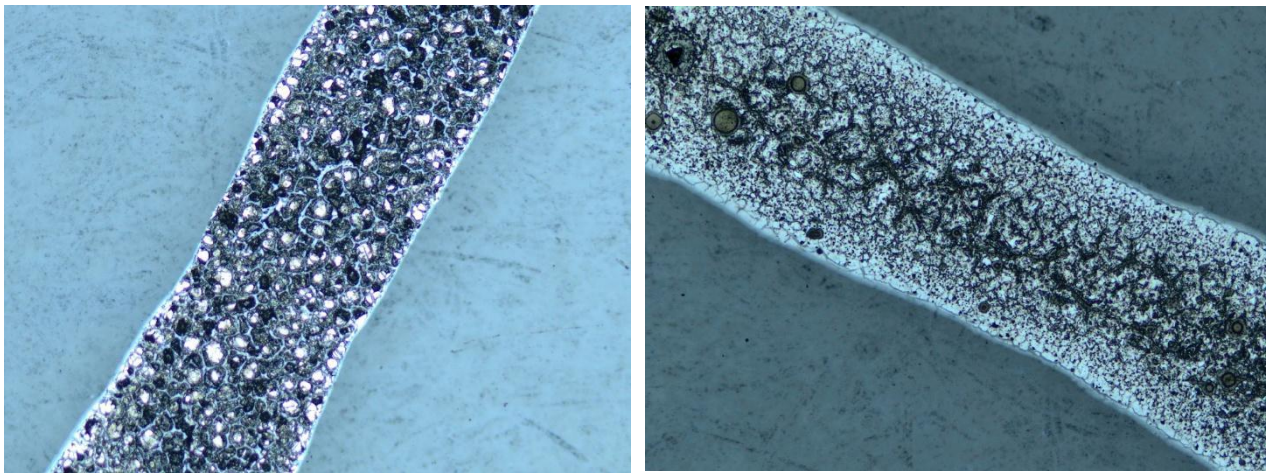
Ein weiterer Probenatz wurde gedruckt und an das Hahn-Schickard-Institut verschickt, um die Thermoformexperimente durchzuführen. Die Ergebnisse des ersten erfolgreichen Thermoformversuchs werden im Folgenden vorgestellt:



**Abbildung 4.2.2: Ergebnisse des ersten erfolgreichen Thermoformversuchs. Links: PC-Substrat, rechts: COP-Substrat. Bilder mit freundlicher Genehmigung des Hahn-Schickard-Instituts.**

Wie aus den Abbildungen ersichtlich, haben die gedruckten Leitbahnen den Thermoformzyklus schadlos überstanden: Sowohl auf PC als auch auf COP blieben Integrität und leitfähige Verbindungspfade erhalten. Dieser Befund wurde als eindeutiger Erfolg gewertet, sodass die Weiterarbeit mit der Goldtinte planmäßig in Arbeitspaket 4.3 übergehen konnte.

Parallel zur Goldlinie wurde im selben methodischen Vorgehen eine geeignete Platintinte entwickelt. Zunächst kamen sechs verschiedene Platinformulierungen unter identischen Testbedingungen wie bei den Goldtinten zum Einsatz, um einen universell auf beiden Substraten einsetzbaren Kandidaten zu identifizieren. Anschließend wurde die ausgewählte Platintinte analog zu den Goldsystemen optimiert: Zugabe eines Levelling-Additivs zur Verbesserung der Z-Uniformität; Absenkung von Viskosität und Oberflächenspannung zur Homogenisierung in XY-Richtung und zur Steigerung der Substrathaftung; sowie Erhöhung des Metallgehalts zur Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit. Die so entstandene „Platinum 1“-Formulierung wies auf beiden Substraten eine exzellente Haftung (4B auf PC, 5B auf COP), eine gleichmäßige Schichtdicke und eine adäquate Leitfähigkeit auf. Druckversuche bestätigten diese Eigenschaften und lieferten zufriedenstellende Resultate.



**Abbildung 4.2.6: Druck der Platinum 1-Tinte auf PC (links) und COP (rechts) zeigt eine gleichmäßige Schichtdicke in XY- und Z-Richtung.**

Aufgrund der begrenzten Rechenkapazität des Simulationspartners Simpatec und des straffen Projektzeitplans entschied das Konsortium, seine Entwicklungsanstrengungen auf ein einziges leitfähiges Metall zu konzentrieren. Dementsprechend wurden sämtliche Arbeiten an platinbasierten Tinten ausgesetzt, um die verfügbaren Ressourcen vollständig auf die Optimierung zweier Goldformulierungen zu fokussieren: Gold 1 für PC-Substrate und Gold 2 für COP-Substrate. Durch diese gezielte Eingrenzung konnte die verbleibende Tintenentwicklung sowie die Prozessvalidierung und Leistungstests mit maximaler Effizienz und technischer Präzision fortgeführt werden.

#### **Erreichte Meilensteine WP4.2**

Im Anschluss an die initiale Testphase wurden die ausgewählten Tinten gezielt modifiziert und optimiert, um die in WP4.1 identifizierten Defizite auszugleichen. Aus diesem Entwicklungszyklus gingen zwei neue Goldformulierungen hervor – Gold 1 auf PC und Gold 2 auf COP – sowie eine Platinvariante (Platinum 1). Die Goldtinten unterzogen die Forscher anschließend dem kompletten Thermoformprozess, wobei die finalen Formulierungen den Zyklus erfolgreich überstanden und als „thermoform-ready“ bestätigt wurden.

### Arbeitspaket 4.3: Erprobung der Druckverfahren

Verschiedene Druckverfahren wurden auf Basis der zuvor ausgewählten und modifizierten Tinten, des gewählten Substrats und des Zielmusters getestet. Für die ausgewählten Verfahren wurden die Druckparameter so angepasst, dass zunächst die von Hahn-Schickard gelieferten Zwischenmuster und anschließend das finale Muster gemäß den von Simpatec bereitgestellten Berechnungen vollständig reproduziert werden konnten.

#### 4.3.1 Vergleich der Druckansätze

Drei Druckverfahren wurden mit den Gold-1- und Gold-2-Tinten analysiert und erprobt. Die Ergebnisse der Untersuchung sind in der nachstehenden Tabelle zusammengefasst:

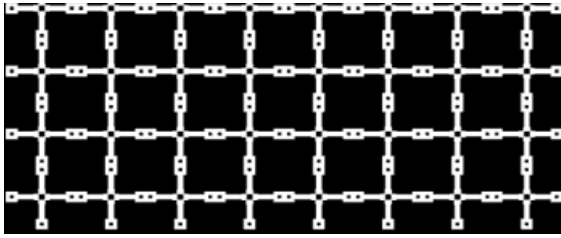
	Inkjet printer	Aerosol jet printer	Microdrop deposition
<b>Cost</b>	<b>80-100 K€</b>	<b>100-120 K€</b>	<b>40-60 K€</b>
Production speed	printhead-depended	high	low
Precision	35 micron	10 micron	50 micron
Ink compatibility	printhead-depended	excellent	excellent

**Tabelle 4.3.1: Vergleich verschiedener Druckverfahren**

Aufgrund budgetärer Erwägungen entschied man, die Forschungs- und Entwicklungsphase des Projekts auf das Microdrop-Dispensing-Verfahren zu konzentrieren. Für die spätere Serienfertigung sollen hingegen sowohl Inkjet- als auch Aerosol-Jet-Verfahren berücksichtigt werden, um die hohen Durchsatzraten dieser Technologien zu nutzen. In allen Experimenten kam ein Autodrop Compact Printing System mit der MD-K-140-320-Düse zum Einsatz, das OrelTech von der Microdrop GmbH erworben hatte. Dieses System verfügt über eine einzelne Quarz-Düse, die eine äußerst sorgfältige und präzise Tintenapplikation ermöglicht und gegenüber tintenbedingter Korrosion unempfindlich ist. Aufgrund dieser Eigenschaften wurde es als optimale Lösung für den aktuellen Projektumfang ausgewählt.

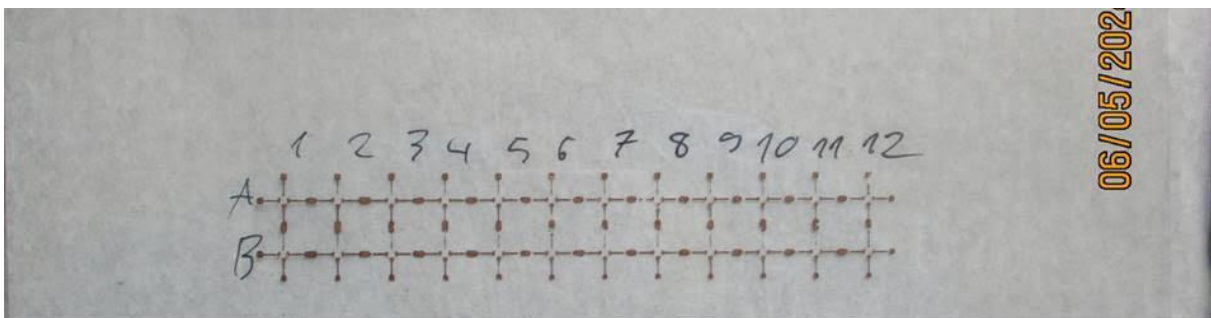
#### 4.3.2 Druck der ersten Muster

Die ersten, vereinfachten Muster wurden vom Hahn-Schickard-Institut bereitgestellt und stellten frühe Emulationen des finalen Druckbildes dar.



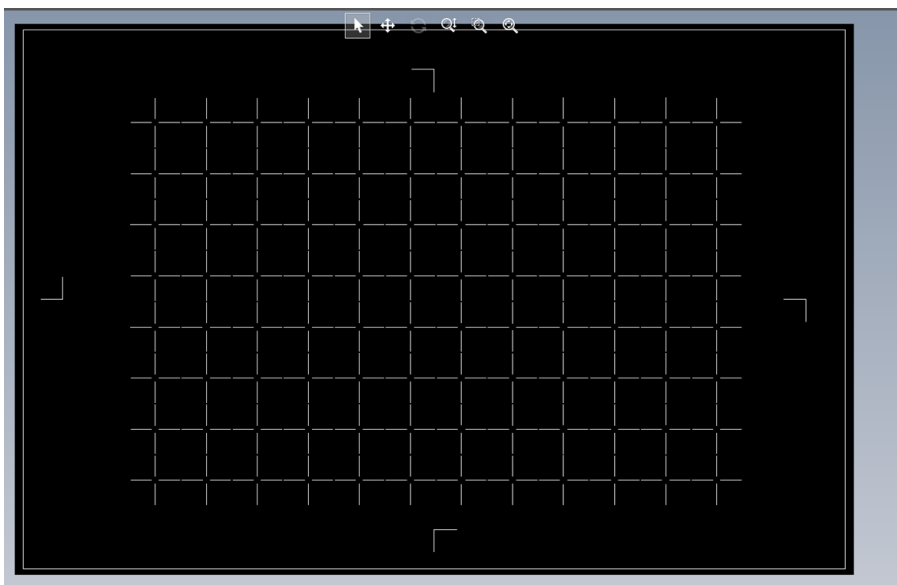
**Abbildung 4.3.1: Erstes Muster, bereitgestellt vom Hahn-Schickard-Institut**

Nach mehreren Druckversuchen wurden zunächst für eine einzelne Elektrodenzelle und anschließend für eine längere Liniengeometrie zufriedenstellende Prozessparameter identifiziert. Die so erzeugten Linien wurden gedruckt und zur weiteren Analyse an das Hahn-Schickard-Institut übermittelt.



**Abbildung 4.3.2: Größere Elektrode, versandt an das Hahn-Schickard-Institut (Bilder mit freundlicher Genehmigung des Hahn-Schickard-Instituts)**

Zum jetzigen Projektstand, da die finale Mustersimulation noch nicht vorlag, entschied man sich, eine weitere vereinfachte Vollformatprobe zu drucken, um den Thermoformprozess an einem repräsentativen Muster testen zu können. Das Hahn-Schickard-Institut lieferte hierzu seinen Vorschlag für die vereinfachte Elektrodengeometrie in Originalgröße.



**Abbildung 4.3.3: Die vereinfachte Elektrodengeometrie in Originalgröße, vorgeschlagen vom Hahn-Schickard-Institut (Bild mit freundlicher Genehmigung des Hahn-Schickard-Instituts).**

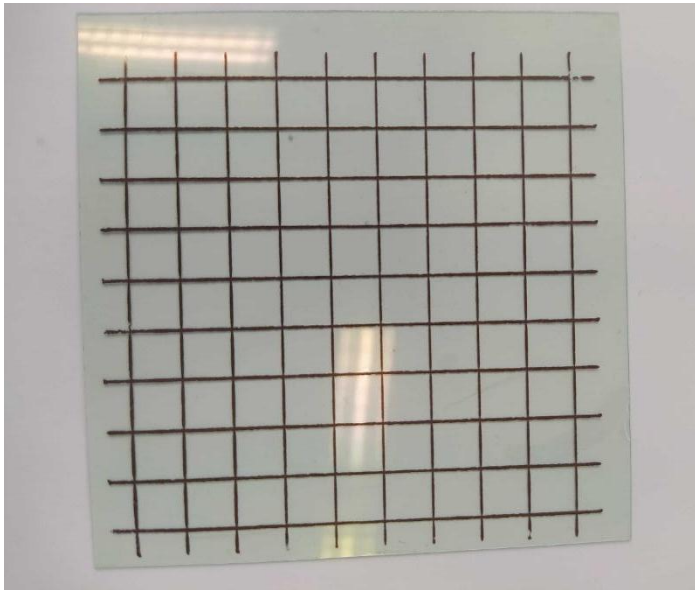
Diese vereinfachten Elektroden wurden gedruckt und zur Durchführung der Thermoform-Experimente an das Hahn-Schickard-Institut versandt. Die resultierenden Aufnahmen sind im Folgenden dargestellt.



**Abbildung 4.3.4: Ergebnisse des ersten erfolgreichen Vollformat-Thermoformens der vereinfachten Elektrode. Bilder mit freundlicher Genehmigung des Hahn-Schickard-Instituts**

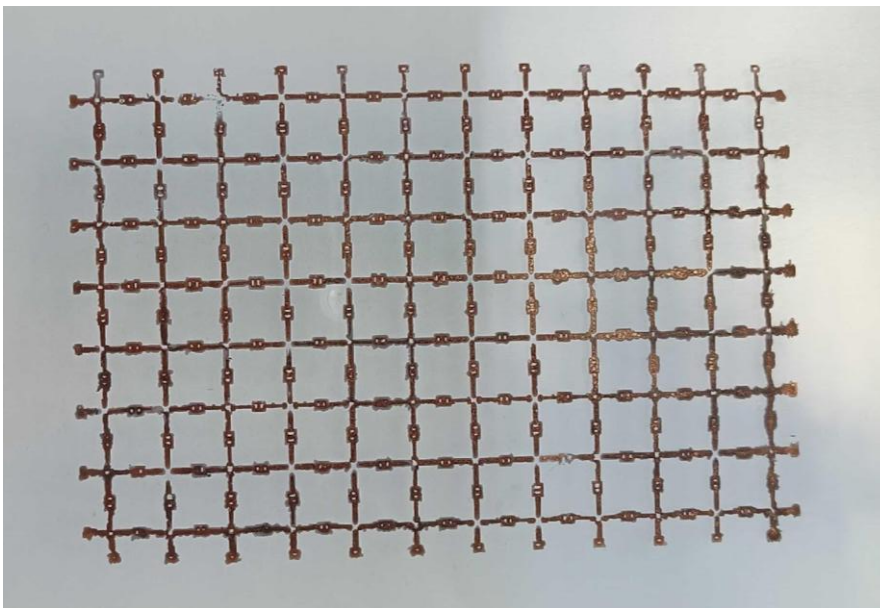
Aus den nachfolgenden Abbildungen geht hervor, dass die Tinten den Thermoformprozess insgesamt gut überstehen. Allerdings zeigt sich eine Fehlausrichtung zwischen den Vertiefungen und den Elektroden, sodass nicht alle Elektrodenknoten präzise in den Wells positioniert sind. Dies liegt daran, dass die vereinfachte Elektrodenversion (Abbildung 4.3.3) den Thermoformvorgang selbst nicht berücksichtigt hat. Um dies zu korrigieren, sind daher die Simulationsergebnisse von Simpatec erforderlich.

Für die materialtechnischen Untersuchungen, die als Grundlage für diese Simulationen dienen sollten, musste eine größere Anzahl an Proben gedruckt werden. Aufgrund der budgetären und personellen Beschränkungen entschied man sich, sich auf ein Substrat (PC) und eine Tinte (Gold 1) zu konzentrieren. Hierfür wurden vereinfachte 9×9-Linien-Muster in einer Stückzahl von insgesamt 30 gefertigt und an Simpatec zur Durchführung der Materialtests versandt.



**Abbildung 4.3.8:** 9×9-Liniennmuster, von der Firma Simpatec für Materialtests benötigt.

Nach Abschluss der Materialprüfung erstellte Simpatec das finale Muster, und es gelang uns, mehrere Endmuster zu drucken. Eines dieser Proben ist nachfolgend dargestellt:



**Abbildung 4.3.9:** Das finale gedruckte Muster

Die Proben wurden anschließend an das Hahn-Schickard-Institut zur Thermoformung und Vorbereitung des abschließenden Demonstrators übergeben.

### **Erreichte Meilensteine WP4.3**

Im Rahmen von WP4.3 wurden verschiedene Drucksysteme evaluiert, und das Autodrop Compact Printing System mit MD-K-140-320-Düse als geeignetes Gerät für diese Entwicklungsstufe ausgewählt. Die Druckparameter wurden sukzessive getestet und

optimiert, bis mehrere Generationen von Mustern—erstellt durch das Hahn-Schickard-Institut und Simpatec—erfolgreich gedruckt und an die jeweiligen Projektpartner versandt werden konnten.

#### **WP4.4: Herstellung der finalen Tintenformulierung in den erforderlichen Mengen**

Ziel von WP4.4 war die Bereitstellung von insgesamt 300 ml Goldtinte über die Laufzeit von zwei Jahren. Da OreITech als Hauptdruckpartner im Konsortium fungierte, floss der Großteil dieser Tintenmenge in die interne Fertigung finaler Proben. Die detaillierte Aufschlüsselung der Tintenherstellung und -verwendung findet sich im Erfolgskontrollbericht.

Insgesamt wurden im Projektrahmen produziert und verbraucht:

- Goldtinte: 360 ml
- Platintinte: 76 ml

Damit wurde der Meilenstein von WP4.4 vollumfänglich erfüllt.

#### **Erreichte Meilensteine WP4.4**

Über die gesamte Projektlaufzeit wurden erfolgreich 360 ml Goldtinte und 76 ml Platintinte hergestellt und eingesetzt.

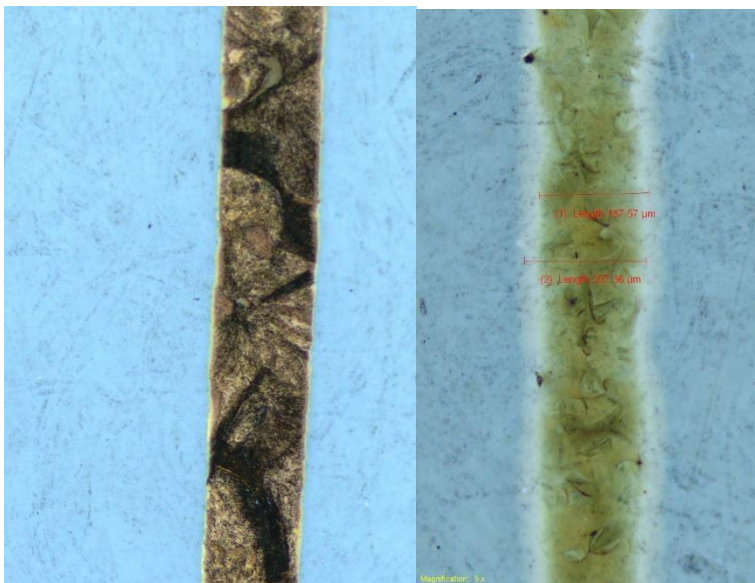
## I.7 Ergebnisse

*Die fachlichen Ergebnisse werden hier dargestellt und ausführlich erläutert. Im Vergleich zu I.3 ist hier eine detaillierte Darstellung der Ergebnisse erforderlich. Nehmen Sie hierbei auch Bezug zur in der Vorhabenbeschreibung festgehaltenen Zielstellung. Erläutern Sie ggf. bestehende Abweichungen zur Zielstellung sowie deren Auswirkungen auf die Erfüllung des Anwendungszwecks.*

### 1. Modifikation und Optimierung der Tinten

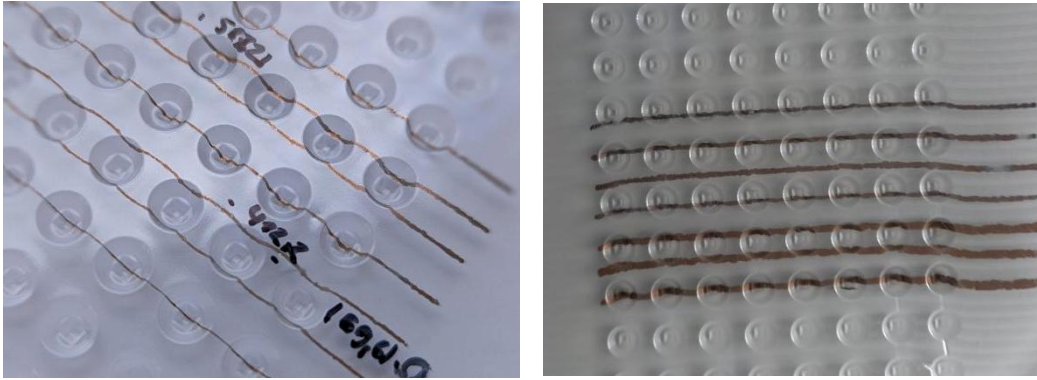
Aufbauend auf dem initialen Screening handelsüblicher Formulierungen entwickelte OrelTech zwei nanopartikelfreie Gold-Leitertinten, die den spezifischen Anforderungen des Mikrothermoformings gerecht werden. Aus diesem Prozess gingen die Formulierung „Gold 1“, optimiert für die Applikation auf Polycarbonat-(PC-)Filmen, sowie „Gold 2“, maßgeschneidert für cyclische Olefin-Polymere (COP), hervor.

Beide Tinten gewährleisteten auf ihren Zielsubstraten eine hervorragende Drucktreue ohne die bei früheren nanopartikelbasierten Tinten beobachteten Rissbildungen oder Delaminationen. Die Gleichmäßigkeit der Linienbreite und die Oberflächenglätte wurden optisch überprüft und bestätigt (siehe Abbildung 4.2.1).



**Abbildung 4.2.1:** Links: eine einzelne mit Gold 1 gedruckte Linie auf PC, die eine gleichmäßige Breite aufweist und keinerlei Oberflächendefekte zeigt. Rechts: eine einzelne Linie mit Gold 2 auf COP abgebildet, ebenfalls ohne erkennbare Mängel.

Die gedruckten Linien wurden zur weiteren Prüfung an das Hahn-Schickard-Institut übermittelt und zeigten dort ein erfolgreiches Verhalten beim Thermoformen.



**Abbildung 4.2.2 Links: Mehrere gedruckte Linien mit Gold 1 auf PC, die nach dem Thermoformen ein stabiles Verhalten zeigen. Rechts: Mehrere gedruckte Linien mit Gold 2 auf COP, die nach dem Thermoformen ein stabiles Verhalten zeigen.**

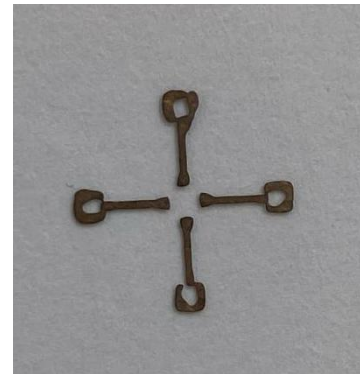
Diese Ergebnisse erfüllten die Meilensteine 4.1 und 4.2 des Projekts.

## 2. Thermoforming Trial

Um die Beständigkeit der Tinte unter Umformbeanspruchungen zu bewerten, wurden vereinfachte Elektrodenmuster gedruckt und zur Mikrothermoformung an das Hahn-Schickard-Institut weitergeleitet.

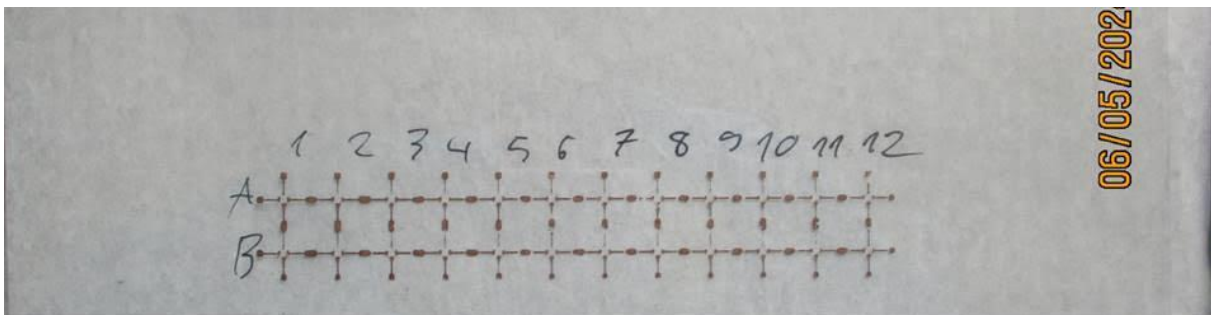
### 1. Einzel-Elektrodenzellen

In ersten Versuchen kam eine einfache „Einlinien“-Elektrodengeometrie zum Einsatz. Nach mehreren Druck-Form-Zyklen wurden die Prozessparameter so optimiert, dass nach dem Formvorgang durchgehende Leitpfade erzielt wurden.



### 2. Längere Linienelektroden

Unter den optimierten Bedingungen wurde ein größeres, mehrere Millimeter langes Linienmuster gefertigt. Abbildung 4.2.4 (mit freundlicher Genehmigung des Hahn-Schickard-Instituts) zeigt, dass die geformte Linie über ihre gesamte Länge Haftung und Leitfähigkeit behält.



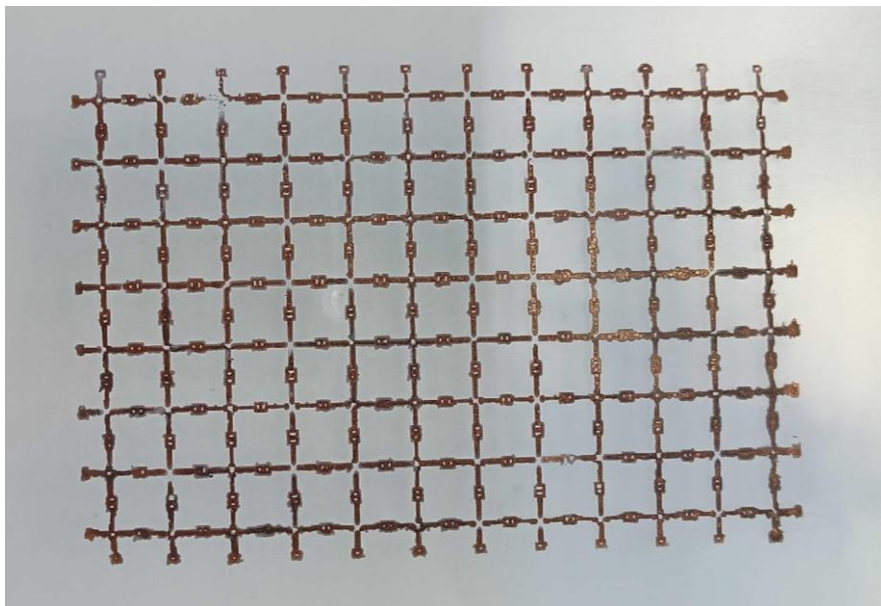
### 3. Vereinfachte Vollformatmuster

In Erwartung der finalen Demonstratorgeometrien – und vor Verfügbarkeit der vollständigen Simulationsdaten – wurde eine maßstabsgetreue Vollformat-Elektrodenanordnung gedruckt und thermoformt. Dieser Zwischennachweis erlaubte eine zügige Validierung der Umformparameter auf einem realistischen Footprint.



#### 4. Finale Probenherstellung

Sobald Simpattec die Thermoform-Simulationsdaten geliefert hatte, druckte OreITech mehrere Proben mit dem Finalmuster. Abbildung 4.2.6 zeigt eine dieser Proben: ein komplexes Elektrodennetz auf dem PC-Film, vollständig intakt und bereit zur Integration. Diese Muster wurden zur abschließenden Demo-Montage an das Hahn-Schickard-Institut zurückgesandt.



Die Proben wurden an das Hahn-Schickard-Institut zur Thermoformung und Vorbereitung des finalen Demonstrators übergeben. Damit wurde Meilenstein 4.3 erfüllt.

### 3. WP4.4: Tintenproduktions-Meilenstein

Ein zentrales Ergebnis von WP4.4 war die Herstellung von mindestens 300 mL Goldtinte in produktionsgerechten Chargen innerhalb des zweijährigen Projektzeitraums. Als leitender Druckpartner übernahm OrelTech die großvolumige Synthese und den internen Verbrauch für die Prototypfertigung:

- Goldtinten: 360 mL produziert (über dem Ziel von 300 mL)
- Platintinten: 76 mL produziert (für frühere Vergleichstestreihen)

Diese Mengen deckten sämtliche Druckkampagnen ab – von den ersten Linienversuchen bis zu den finalen Demonstratormustern – und erfüllten damit vollständig die Anforderungen des Meilensteins WP4.4.

## **I.8 Darstellung des während des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen**

*Sofern zutreffend*

## **I.9 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit der Ergebnisse**

*Zeigen Sie auf, welcher wirtschaftliche/wissenschaftlich-technische/gesellschaftliche Nutzen sich aus den Projektergebnissen voraussichtlich ableitet. Gehen Sie in diesem Abschnitt auch auf konkrete Planungen für die nähere Zukunft im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans ein.*

### **Ökonomische Vorteile**

**Erweiterte Umsatzquellen:** Im Verlauf des zweijährigen SmartLab2-Projekts führte OrelTech

- vier Machbarkeits-/Pilotprojekte für Goldtinten durch (mit drei Folgeaufträgen – zwei akademische, ein industrieller), und

- sechs Machbarkeits-/Pilotprojekte für Platintinten durch (mit zwei Folgeaufträgen – ein akademischer, ein industrieller).

Diese Kooperationen bestätigen einen wachsenden Marktbedarf und bilden die Basis für wiederkehrende Tintenverkaufsaktivitäten.

**Optimierung der Prozesskosten:** Die großvolumige Produktion von 360 ml Goldtinte (über dem Zielwert von 300 ml) demonstriert die Machbarkeit einer Kleinserienfertigung. Für die Zukunft verspricht der Umstieg auf ein einstufiges Advanced Rapid Metallization (ARM)-System (Aerosol + Plasma) deutlich höhere Durchsatzraten bei niedrigeren Stückkosten.

**Dienstleistungsbasierte Geschäftsfelder:** Die Bereitstellung von ARM-Beschichtungsdiensten als Komplettpaket (Tinte + Maschine + Prozessrezept) für Lohnfertiger und F&E-Labore eröffnet ein margenstarkes Beratungs- und Geräteverkaufssegment.

### **Wissenschaftliche Vorteile**

**Leistung reiner Metallschichten:** Sowohl die Au- als auch die Pt-Tinten ermöglichen präzise applizierte, schnell ausgehärtete Filme mit hoher Reinheit, die leitfähig, katalytisch, schützend und sensierend wirken – eine Grundlage für neuartige Untersuchungen in flexiblen Biosensoren und Mikroreaktorbeschichtungen.

**Innovationsplattform:** Das ARM-Konzept, das Aerosolabscheidung und Plasmasinterung in einem Schritt vereint, eröffnet neue Forschungsfelder im Bereich der Metallisierung bei Raumtemperatur, insbesondere für wärmeempfindliche Substrate.

### **Technische Vorteile**

**Thermoform-ready Tinten bestätigt:** Die Gold-1-(PC) und Gold-2-(COP) Formulierungen überstehen den Umformprozess zuverlässig, ohne Haftung oder Leitfähigkeit einzubüßen.

**Kodifizierte Druckprotokolle:** Optimierte Parameter (Auflösung, Geschwindigkeit, Arbeitsabstand, Plasmaeinstellungen) sind nun in einem robusten Workflow hinterlegt.

**Deposition der nächsten Generation:** Die Identifizierung der „Tintenauftragung“ als Engpass führte direkt zum ARM-Verfahren – einem einstufigen Aerosol-und-Plasma-Prozess, der die Druckdauer pro Probe von über 90 Minuten auf wenige Minuten reduzieren kann.

### **Soziale Vorteile**

**Verbesserte diagnostische Zuverlässigkeit:** Durch die direkte Einbettung intelligenter Sensoren in Einwegmaterialien werden menschliche Fehler reduziert und das Vertrauen in medizinische sowie pharmazeutische Tests gestärkt.

**Kompetenzen und Zusammenarbeit:** Das Konsortiumsmodell – Industriepartner (OrelTech und InnoME), akademische Laboratorien (Hahn-Schickard) und Simulationsexperten (Simpatec) – hat zu einem interdisziplinären Wissensaustausch im regionalen Innovationsökosystem geführt.

**Nachhaltigkeitsgewinne:** Die Eliminierung separater Sensormodule und der Einsatz von Niedertemperatur-Plasmasinterung reduzieren Materialabfälle und Energieverbrauch, was zu umweltfreundlicheren Laborabläufen beiträgt.

### **Kurzfristige Verwertung & Aktualisierter Plan**

1. **ARM-Prozessentwicklung**
  - o Finalisierung des Designs für den Aerosol+-Plasma-Auftragkopf und die zugehörige Steuerungssoftware
  - o Aufbau eines Tisch-ARM-Demonstrators und Präsentation der schnellen, einstufigen Metallisierung bei Labortouren
2. **EIC-Förderantrag**
  - o Vorbereitung und Einreichung eines Antrags beim European Innovation Council zur Finanzierung der ARM-Skalierung und der automatisierten Maschinenauslegung für die Aufbringung von Edelmetallschichten in den Bereichen Sensorik, Katalyse und Schutzbeschichtungen
3. **Pilotinstallation & Kundentests**
  - o Aufstellung eines ARM-Prototyps bei ausgewählten akademischen und industriellen Partnern für praktische Evaluierungen
  - o Erweiterung der „Smart Consumable“-Pilotprojekte auf mikrofluidische Kartuschen und Lateral-Flow-Teststreifen
4. **Kommerzielle Markteinführung**
  - o Markteinführung von ARM-Geräten und Lizenzpaketen, insbesondere für Lohnfertiger in der Medizintechnik und Katalyse
  - o Skalierung der Tintenproduktion auf Multi-Liter-Chargen und Abschluss von Lieferverträgen für Au- und Pt-Formulierungen
5. **Langfristiges Wachstum**
  - o Nutzung von Pilotdaten und Anwenderfeedback zur Weiterentwicklung von ARM zu einer vollautomatisierten Depositionsplattform

Durch diese Schritte wird OrelTech die im SmartLab2-Projekt validierten Tinten und Prozesse in ein skalierbares Geschäftsmodell überführen, das ARM-Systeme und maßgeschneiderte Edelmetall-Depositionslösungen anbietet.

## **I.10 Zusammenarbeit mit anderen Stellen außerhalb des Verbundprojektes**

*Welche Aktivitäten zur Vernetzung und zum Erfahrungsaustausch haben stattgefunden? Wurden Maßnahmen zur Schulung ergriffen?*

Das Konsortium absolvierte einen disziplinierten Rhythmus monatlicher virtueller Meetings, die jeweils per Videokonferenz stattfanden und von den technischen Leitern aller Partner besucht wurden. In jeder Sitzung wurde der Fortschritt in Bezug auf die Arbeitspaket-Meilensteine überprüft, Zwischendaten (z. B. Leitfähigkeitsmessungen der Tinten, Thermoform- und Simulationsergebnisse) ausgetauscht und gemeinsam nach technischen oder logistischen Hindernissen gesucht.

Ergänzend zu diesen Online-Terminen organisierte das Konsortium drei Präsenz-Workshops, die jeweils von einem der Partner ausgerichtet wurden, um die Zusammenarbeit zu vertiefen und praxisnahes Problemlösen zu beschleunigen:

### **1. Kick-off bei InnoME**

Während des ersten Vor-Ort-Treffens öffnete InnoME sein Materiallabor für Demonstrationen der Sensortechnologien. Die Teilnehmer unternahmen Laborführungen, nahmen an Break-out-Sessions zur Abstimmung von Substratauswahl und Prozessparametern teil und legten so die Grundlagen für die weiteren Arbeitspakete.

### **2. Thermoforming beim Hahn-Schickard-Institut**

Das zweite Treffen konzentrierte sich auf das Thermoformen. Gäste von OrelTech, Simpatec und InnoME erhielten eine Führung durch den Reinraum des Instituts und beobachteten den Thermoform-Vorgang an Testmustern.

### **3. Abschlussworkshop und Laborführung bei OrelTech**

Im abschließenden Präsenz-Workshop präsentierte OrelTech seine Plasmasinterkammer sowie das Microdrop-Dispensing-System. Zeitgleich stellten Simpatec-Experten die neuesten Deformationsmodelle vor und diskutierten Ansatzpunkte für weitere Simulationen.

Diese persönlichen Begegnungen stärkten nicht nur die technischen Erkenntnisse aus den virtuellen Meetings, sondern förderten auch das gegenseitige Vertrauen und ebneten den Weg für künftige gemeinsame Projekte, Co-Autorschaften in Fachpublikationen und mögliche Co-Investments in fortschrittliche Metallisierungstechnologien.

## **I.11 Veröffentlichungen, Vorträge Referate, etc.**

*Hier sind Veröffentlichungen, Vorträge, Referate etc. aufzuführen, die erfolgt oder geplant sind.*

- Dr. Konstantin Livanov stellte das Projekt während der BMBF-Mittelstandskonferenz 2023 mit einem Poster vor.
- Dr. Kristina Lovrek präsentierte das Projekt und dessen neueste Ergebnisse zum Thermoformen gedruckter Linien auf dem Microprinting Workshop 2024 „Emerging Trends in Microprinting: Materials, Methods, and Applications“ in Bad Schandau (März 2024).
- Einige der Projektergebnisse wurden von OrelTech auf den Konferenzen LOPEC 2024 und LOPEC 2025 im Rahmen des OES-Messestands (Organic Electronics Saxony) vorgestellt (März 2024 und Februar 2025).

- Dr. Konstantin Livanov hielt eine Gastvorlesung über das Projekt im Abschlussworkshop des M-era.NET-Projekts InsBIOration (Mai 2025).

## **I.12 Literaturverzeichnis**