

## **Sachbericht zum Verwendungs nachweis**

**zum Teilvorhaben** Direktdruck und Integration von optischen Kurzstreckennetzwerken (OptiK-Net), LUH - ITA

**des Verbundprojektes** Miniaturisierte optische Systeme hoher Integrationsdichte

**Laufzeit des Verbundprojekts:** 01.10.2019 – 31.03.2023

### **1 Zusammenfassung**

Das Verbundprojekt „Direktdruck und Integration von optischen Kurzstreckennetzwerken (OptiK-Net)“, welches im Rahmen der Förderinitiative „Miniaturisierte optische Systeme hoher Integrationsdichte“ gefördert wird, behandelt die produktionstechnischen Fragestellungen der Integration gedruckter optischer Lichtwellenleiter in Leiterplattensystemen. Der Transfer optischer Übertragungssysteme von diskreten Freistahl- und faserbasierten Lösungen in vollintegrierte Systeme ermöglicht eine steigende Funktionsdichte und Miniaturisierung komplexer optischer Lösungen. Innerhalb dieses Vorhabens werden insbesondere die Herstellung integrierter optischer Systeme mittels durchsatzstarker Druckverfahren (Flexo-, Sieb- und Tiefdruck) sowie die Integration der drucktechnisch erzeugten Lichtwellenleiter in elektronische Leiterplattensysteme untersucht. Um diese Fragestellungen zu erforschen, finden folgende Konsortialpartner im Verbundvorhaben „OptiK-Net“ zusammen:

- Hotoprint Elektronik GmbH & Co. KG, Lamspringe: Leiterplatten- und Elektronikherstellung, Projektleitung
- Leibniz Universität Hannover, Institut für Transport- und Automatisierungstechnik, Garbsen: Universitäre Forschungseinrichtung mit Kenntnissen in der flexographischen Herstellung und Charakterisierung von optronischen Systemen
- ContiTech Elastomer-Beschichtungen GmbH, Northeim: Herstellung von Plattformtechnologien gummituchbasierter Druckplatten für den Flexodruck
- Jänecke + Schneemann Druckfarben GmbH, Sehnde: Druckfarbenherstellung für kommerzielle und funktionale Drucklacke für verschiedene Druckverfahren
- Janoschka Deutschland GmbH, Kippenheim: Druckformherstellung und Gravur für Tiefdruckzylinder
- ficonTEC Service GmbH, Achim: Sondermaschinenbau für optische Aufbau- und Verbindungstechnik
- Siemens AG, Erlangen (assoziiertes Mitglied): Anwendung von galvanisch getrennten Schaltkreisen
- Gallus Ferd. Ruesch AG, St. Gallen (assoziiertes Mitglied): Anlagenbau für Druckmaschinen mit Fokus auf rotativem Siebdruck
- Continental Automotive GmbH, Hannover (assoziiertes Mitglied): Anwendung von optischer Datenübertragung in der E-Mobilität

Das Ziel des Gesamtvorhabens ist die Umsetzung einer Technologiekette zur Herstellung kostengünstiger und hochintegrierter elektrooptischer Leiterplatten, bei der die gesamte

Prozesskette exemplarisch abgebildet wird. Hierzu werden verschiedene rotative Druckverfahren bezüglich ihrer Eignung für den Druck von Lichtwellenleitern bewertet und die optische sowie physische Anbindung von Lichtwellenleitern an Leiterplatten evaluiert. Projektergebnis sind zwei Demonstratorkonzepte, die verschiedene Möglichkeiten zur Umsetzung und Anbindung von gedruckten Lichtwellenleitern als Kommunikationsverbindung in elektronischen Systemen darstellen.

Das Teilvorhabensziel des ITA ist die drucktechnische Umsetzung von optischen Lichtwellenleitern, die für eine Integration in Starr-Flex Platinen geeignet sind. Dazu wird am ITA primär der Flexodruck als Herstellungsverfahren eingesetzt und weiterentwickelt. Um geeignete Wellenleiterstrukturen für Datenübertragungen herzustellen, ist die Reduktion ungewünschter Materialanhäufungen im Druckprozess gefordert. Für den Einsatz als Datenübertragungsstrecke ist das Ziel eine Datenrate von 2 Gbit/s zu erreichen. Hierfür werden Übertragungsverluste auf einer Ziellänge von 15 cm von weniger als 1 dB/cm benötigt. Weiterhin wird die Effizienzsteigerung beim Druck von Lichtwellenleitern angestrebt, wozu in Zusammenarbeit mit dem Projektkonsortium die Druckverfahren Sieb- und Tiefdruck bezüglich höheren Materialübertrags überprüft werden.

Innerhalb der Projektlaufzeit wird ein Demonstrator konzipiert und entwickelt, der eine optische NRZ-Datenübertragung über wenige Zentimeter ermöglicht. Hierzu wird der Wellenleiter flexographisch auf PMMA hergestellt und mithilfe adaptiver Justageprozesse relativ zur Diodenposition appliziert. Beim Betrieb des Demonstrators können Datenraten über 1 Gbit/s festgestellt werden. Für die Umsetzung eines zweiten Demonstrators, der eine Vollintegration eines Lichtwellenleiters in die Leiterplatte umsetzt, können im Rahmen dieses Vorhabens Teillösungen erzielt werden. Hierzu können vollgemantelte Lichtwellenleiter drucktechnisch umgesetzt werden, die den Anforderungen eines Laminationsprozesses entsprechen. Teillösungen zur optischen Anbindung der Lichtwellenleiter in einer Leiterplatte zeigen Potential für mögliche industrielle Umsetzungen und Anwendungen.

Die Ergebnisse dieses Projektes weisen Potentiale für eine kommerzielle Umsetzung von gedruckten optischen Strukturen in elektrooptischen Leiterplatten auf. Auf Basis dessen können in Zukunft in hochintegrierten elektronischen Systemen Teilfunktionen durch optische Datenübertragung ersetzt werden sowie die Übertragungsstabilität bei hohen Spannungsdifferenzen erhöht werden. Für eine finale industrielle Umsetzung sind dahingehend produktionstechnische Qualifizierungsmaßnahmen für gesicherte Produktqualität sowie weitere Miniaturisierung als auch Schnittstellenstandardisierung der einzelnen Komponenten notwendig.

## 2 Zielsetzung

Die Trends zu mehr Sensoranwendungen, höheren Integrationsdichten und elektromagnetisch belasteten Kommunikationsumgebungen in der Elektromobilität erfordern optische Kommunikationslösungen auf Leiterplattenebene. Die galvanische Trennung mehrerer Elektroniksegmente mit hohen Spannungsdifferenzen stellt dahingehend eine Kernanwendung dar. Faserbasierte Lösungen für flexible optische Baugruppen ermöglichen nur eine limitierte Integrationsdichte und weisen hohe Justagekosten auf. Somit folgt die Umsetzung optischer Kommunikation direkt in der Leiterplatte, welche als elektro-optische Leiterplatte eingesetzt werden kann. Für diese Größenordnung prägen lithographisch hergestellte sowie dünnglasbasierte Lichtwellenleiter den Markt, welche jedoch Nachteile in der Produktivität der Herstellungsprozesse aufweisen. Der in diesem Vorhaben verfolgte Ansatz Drucktechnik als massentaugliches Produktionsverfahren für Lichtwellenleiter

einzusetzen, erlaubt kostengünstige Herstellung und niederschwellige Prozessintegration in kommerzielle Leiterplattensysteme.

Übergeordnetes Ziel des Verbundvorhabens ist die Befähigung hochintegrierter gedruckter optischer Wellenleiternetzwerke zur Datenübertragung über kurze Distanzen innerhalb von Leiterplatten. In einer elektro-optischen Flex-Baugruppe sollen sowohl gedruckte optische Wellenleiter als auch gedruckte elektronische Leiterbahnen integriert werden, die je nach Anforderung und Umgebungssituation zur Kommunikation genutzt werden können. Zur Integration und Anbindung der Wellenleiter werden dazu zwei Ansätze untersucht: Eine Ankopplung des optischen Substrats im Randbereich der Leiterplatte (Montage durch ficonTEC) sowie die vollflächige Lamination und anschließende Freilegung der Lichtwellenleiter (Hotoprint).

Konkrete Ziele für die Demonstratoren ist die bidirektionale Datenübertragung über die gedruckten und integrierten Polymerlichtwellenleiter mit einer Datenübertragungsrate von mindestens 2,0 Gbit/s pro Kanal über eine Strecke von mindestens 15 cm. Basierend auf diesem Gesamtziel werden Anforderungen an die jeweiligen Teillösungen sowie Produktionsprozesse abgeleitet. Um dieses Ziel zu erreichen, muss das Problem der Integration hochintegrierter optischer Wellenleiternetzwerke aus Polymeren gelöst werden. Diese Aufgabe besteht aus drei Teilproblemen:

1. Drucktechnische Realisierung der elektro-optischen Flex-Baugruppe mit hinreichend kleinen optischen Übertragungsverlusten (< 1 dB/cm @ 650 nm)
2. Vereinzelung der Substrate und Präparation der Lichtwellenleiter-Stirnflächen in optischer Qualität (quadratischer Mittenrauwert  $R_q < 65,0 \text{ nm}$ )
3. Montage der Flex-Baugruppen mit elektrischer, optischer und mechanischer Ankopplung an elektrische Leiterplatten

Entsprechend leiten sich die Teilziele für das ITA aus den Gesamtzielen des Vorhabens ab. So ist die Umsetzung von Lichtwellenleitern mit hinreichend geringer Dämpfung zur Erreichung der Datenraten sowie Übertragungstrecke primäres Ziel. Damit einher geht die Optimierung des Herstellungsprozesses hin zu einer geringeren Anzahl an Druckdurchgängen, wofür verschiedene Druckprozesse untersucht werden sollen. Weiterhin ist die Optimierung des Drucks von Netzwerkelementen Teilziel des Vorhabens, um optisch-dämpfende Materialanhäufungen zu reduzieren und die Konturtreue zu verbessern. Im Verlauf des Vorhabens ergeben sich für das ITA weitere Teilziele, die entsprechend den Anforderungen der Integration erforderlich werden. Hierzu gehört die Umsetzung von laminationsfähigen Lichtwellenleitern, wozu die drucktechnische Umsetzung von Mantelstrukturen für eine zuverlässige Lichtleitung erforderlich ist. Zusätzlich ist das Erreichen einer hinreichenden Positionspräzision des Druckbildes notwendig, sodass die vollflächige Lamination und optische Einkopplung mit konventionellen Methoden vorgenommen werden kann.

### **3 Ergebnisse und Arbeiten zu den einzelnen Arbeitspaketen**

#### **AP 0: Projektmanagement und Öffentlichkeitsarbeit**

Im Rahmen dieses AP steht das ITA bei der Organisation und Durchführung von Projekttreffen Hotoprint unterstützend zur Seite. Weiterhin werden in Zusammenarbeit mit dem Projektkonsortium mehrere nationale und internationale Konferenzbeiträge (SPIE Optics&Photonics, SPIE Photonics West, Deutsche Gesellschaft für angewandte Optik (DGaO Proceedings), Produktionstechnik Hannover informiert (phi)) verfasst und veröffentlicht.

Darüber hinaus werden durch den Besuch verschiedener Messen und Tagungen (LOPEC München, SPS Nürnberg, SpaceTechExpo Bremen, Aachen Polymer Optic Days) Anbieter von Teillösungen für den Fortschritt des Vorhabens sowie potentielle Partner für Folgeprojekte und Anwender für Vorhabensergebnisse angesprochen.

## AP 1: Gesamtkonzept und Lastenheft

### AP 1.1: Festlegung der funktionalen Anforderungen an das Gesamtsystem

Für verschiedene Integrationsstufen werden zwei Demonstratorkonzepte erforscht und die funktionalen Anforderungen spezifiziert: Demonstrator 1 umfasst die Nutzung von kantenemittierenden Laserdioden (EEL) und oberflächig applizierten Wellenleitern auf PMMA Substrat. Demonstrator 2 umfasst die Nutzung von Oberflächenaktiven Dioden (VCSEL) und gemantelten einlaminierten Wellenleitern. Die resultierenden Anforderungen werden in einem Lastenheft festgehalten und mit entsprechenden Leistungsparametern und Prioritäten für die Umsetzung versehen.

Als Anforderungen an die Wellenleiter ergeben sich für Demonstrator 1 eine Dämpfung von 1 dB/cm sowie Stirnflächenrauheiten unterhalb von 60 nm. Aufgrund der oberflächigen Justage auf der Leiterplatte wirkt keine Temperaturbelastung auf die Wellenleiter im Herstellungsprozess ein, wodurch eine direkte Applikation des Wellenleiterkerns auf PMMA-Substrat möglich wird. Für Demonstrator 2 sind die Grundanforderungen analog, zusätzlich ergibt sich wegen der Vollintegration des Wellenleiters in den Leiterplattenverbund die Anforderung einen vollgemantelten Wellenleiterkern umzusetzen. Eine Lichtleitung ist aufgrund des nicht erfüllten Brechungsindex sowie Transmissivität gängiger Leiterplattenmaterialien alternativ nicht möglich. Im Rahmen des Laminationsprozesses werden die Substrate über 3 h bis zu 180 °C erhitzt, woraus die Anforderung an das Substrat sowie die Druckpolymere folgt, keine thermische Degradation aufzuweisen.

Zur Quantifizierung von Anforderungen an die optische Justage wird ein optisches Modell von gemantelten und ungemantelten Wellenleitern erzeugt, sodass mithilfe von Raytracing-Simulationen Kopplungsszenarien analysiert werden können. Hierfür wird die relative Position der jeweiligen Dioden in drei Raumrichtungen variiert, sodass die entsprechende Dämpfung der jeweiligen Positionsabweichungen ermittelt wird. Hierbei ergeben sich für die jeweiligen Demonstratoraufbauten unterschiedlich große Akzeptanzbereiche und eine höhere Grunddämpfung des Demonstrator 2 aufgrund des geringen Brechungsindexsprungs zwischen Wellenleiterkern und -mantel (siehe Abbildung 1). Insgesamt ergibt sich für die Justagetechnik beider Konzepte eine maximale tolerierbare Gesamtabweichung zwischen Dioden und Wellenleiter in y-Richtung von weniger als 90 µm und 20 µm in x-Richtung. Die Abweichung in z-Richtung ist bei den gewählten Dioden weniger kritisch, da beide einen geringen Konvergenzwinkel (<25°) aufweisen.

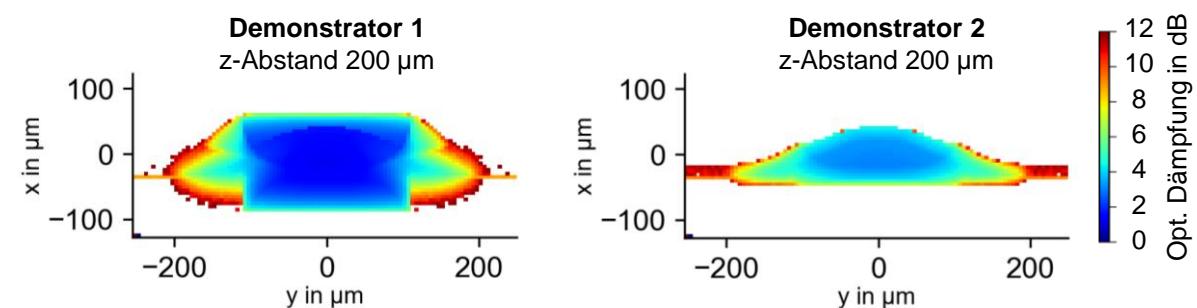


Abbildung 1: Exemplarische Ergebnisse (bei 200 µm z-Abstand) der Raytracing-Simulation von

Kopplungsverlusten durch Positionierunterschiede zwischen Wellenleiter und Laserdiode, Modellbildung anhand Brechungsindizes aus Vorarbeiten ( $n_{\text{PMMA}} = 1,49$ ,  $n_{\text{Kern}} = 1,516$ ,  $n_{\text{Mantel}} = 1,512$ ,  $n_{\text{Luft}} = 1$ ), Auswahl der Laserdioden gemäß Absprache des Projektkonsortium (EEL: Chip-980-P50 von Roithner Lasertechnik, VCSEL: ULM850 von Trumpf)

#### AP 1.2: Definition der Schnittstellen sowie der Lastenhefte für Demonstratoren

Die Schnittstellen für die Einbindung von Wellenleitern in den verschiedenen Demonstratorstufen werden anhand einer Toleranzkettenanalyse aller beteiligten Prozesse umgesetzt. Hierbei liegt besonderer Fokus auf den fertigungsbedingten Geometrieabweichungen der Integrationsbauteile, die für die optische Ankopplung der Lichtwellenleiter benötigt werden. Verschiedene Prozessabfolgen werden betrachtet und Prozessabläufe konzipiert, die den in AP 1.1 abgeleiteten Kopplungsanforderungen entsprechen. Das Konzept für Demonstrator 1 sieht eine passive Justage des Wellenleiters in einer Vertiefung auf der Leiterplattenoberfläche sowie die optische Erkennung der Position der vorher bestückten Dioden vor. Dieser Prozess wird bei ficonTEC entwickelt, wobei die Wellenleiterpräparation vom ITA untersucht wird. Hier werden die Wellenleiter mittels CO2-Laser vereinzelt sowie rückseitig perforiert. Entlang dieser Sollbruchstelle können die PMMA-Substrate gebogen werden, sodass durch die Bruchfortpflanzung der Wellenleiter entlang der Substratkante bricht. Die bei diesem Prozess entstehende Abweichung zur Sollgeometrie beträgt  $390 \pm 50 \mu\text{m}$ . Auf Basis dieser Erkenntnis kann der Laserprozess mit einem Offset durchgeführt werden, sodass eine hinreichende Substratgeometrieabweichung von  $50 \mu\text{m}$  erreicht wird.

Demonstrator 2 erfordert keine individuelle Bestückung der Wellenleiter, sondern die vollflächige Lamination eines Substrats als Leiterplattenzwischenlage. Um das zu realisieren, ist eine komplexe Prozessabfolge (siehe Abbildung 2) notwendig, entlang dieser Registrierungen in verschiedenen Prozessen erkannt werden müssen. Vorversuche bei denen vorher eingebrachte Registrierungsbohrungen in den Folien in der Drucktechnik erfasst werden müssen, konnten keinen Erfolg zeigen. Eine ganzheitliche Betrachtung der notwendigen Prozesse führt zum Ergebnis, dass für eine erfolgreiche optische Kopplung mit passiven Bestückungsmethoden, Registrierungsmarken im optischen Layout erkannt werden müssen. Hierzu werden auf den Druckformen Referenzmarken vorgesehen, die mithilfe von Kamerasystemen des Bohrplotters erkannt werden können. Da transparente Strukturen automatisiert nur schwer erkennbar sind, wird eine Messreihe durchgeführt, die die Positionsabweichung verschiedener nacheinander gedruckter Layouts betrachtet, sodass ein Druck mit einem farbigen Lack ermöglicht wird. Die am ITA verwendete Druckmaschine Heidelberger Speedmaster weist hier Positionsabweichungen bis  $50 \mu\text{m}$  auf, woraus sich ein Optimierungspotential bzw. die Notwendigkeit einer präziseren Anlage ableitet. In Folge wird im Verlaufe des Projekts die Druckmaschine Challenger 173 von Schläfli für positionsgenauen Druck beschafft, wozu eine geeignete UV-Härtungseinheit aus Projektmitteln finanziert wird.

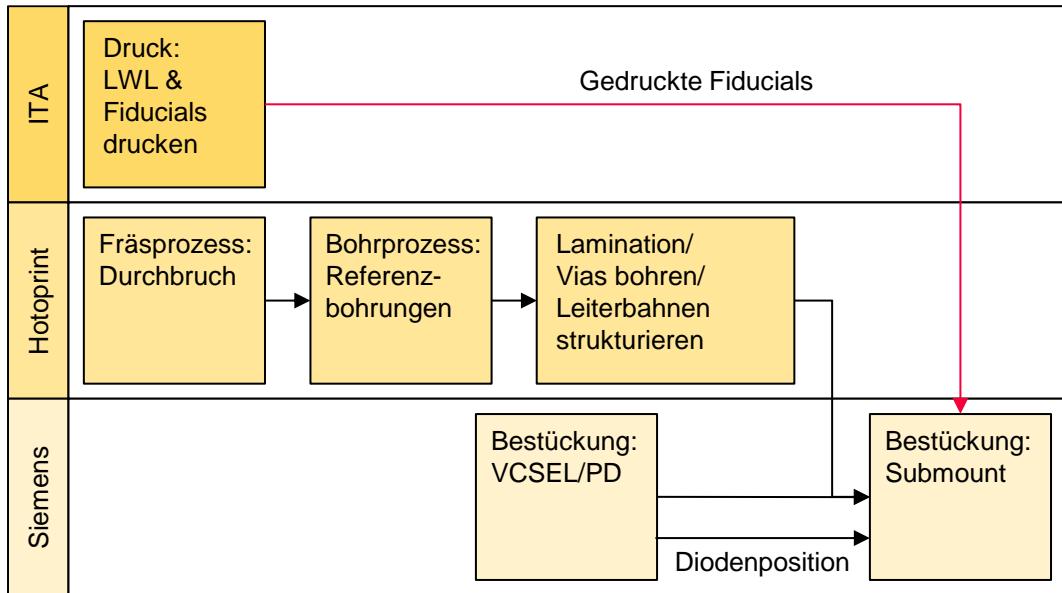


Abbildung 2: Prozessabfolge der involvierten Prozesse zur Erfüllung der notwendigen Layouttoleranzen. In Rot dargestellt: die direkte Vererbung von Referenzmarken zum Bestückungsprozess, da eine Fortpflanzung durch mehrere Leiterplattenprozesse die benötigte Toleranz nicht erfüllen würde.

Neben der Toleranzbetrachtung wird der Aufbau der jeweils eingesetzten Wellenleiter definiert (siehe Abbildung 3). Der Aufbau der jeweiligen Wellenleiter umfasst unterschiedliche Substrate, da im Fall von Demonstrator 1 PMMA als optischer Mantel genutzt werden kann. Weiterhin werden für Demonstrator 2 optische Mäntel notwendig, die ebenfalls drucktechnisch additiv umzusetzen sind. Anforderungen an die jeweiligen Mantellagen sind eine vollständige Benetzung (geschlossene Oberfläche) bzw. vollständige Abdeckung des Kerns mit minimaler Rauheit und Welligkeit. Da Polyimid (PI) ein verbreitetes Substrat in der Leiterplattentechnik ist, werden Vorversuche mit Substraten verschiedener Hersteller durchgeführt. Reine PI-Substrate ohne Kupferkaschierung fallen hierbei sehr kostenintensiv auf und sind für die Verarbeitung auf der Speedmaster Druckmaschine nicht stabil genug. Alternativ weisen Substrate mit Kupferkaschierung geringere Kosten und höhere Stabilität auf. Weiterhin werden die Wellenleiterdimensionen festgelegt, wobei Sollbreiten von 300 µm und Höhen von mindestens 70 µm bei einer Länge von 15 cm das Ziel für geeignete Demonstratorvarianten sind.

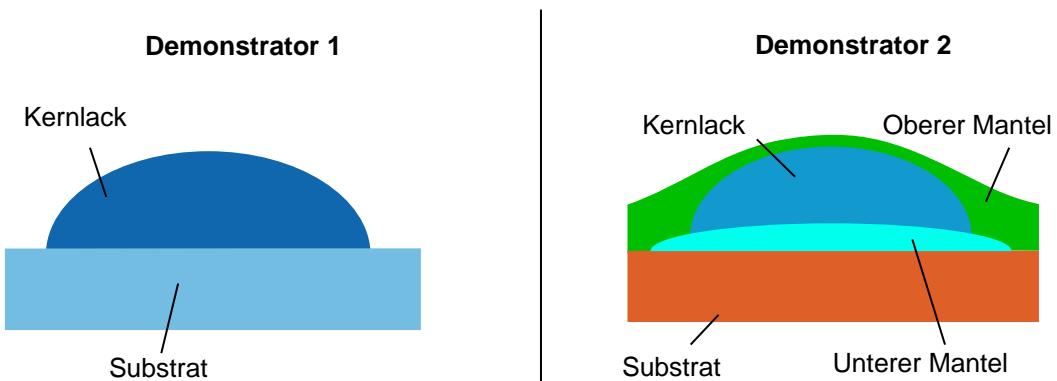


Abbildung 3: Aufbau der verschiedenen Wellenleiter für die jeweiligen Demonstratoren

## AP 2: Untersuchung und Funktionalisierung der Druckwerkzeuge

### AP 2.1: Funktionalisierung von Flexodruckformen

Gemäß den Anforderungen aus AP 1 werden Druckformen entwickelt, die zunächst Druckversuche mit der Heidelberger Speedmaster 52 ermöglichen. Die primären Druckversuche verfolgen das Ziel Wellenleiter für Demonstrator 1 herzustellen. Hierfür wird der Materialauftrag geradliniger Strukturen bei verschiedenen Drucklagen untersucht, sodass Erkenntnisse bezüglich Druckeinstellungen (Druck- und Rasterwalzenzustellung) und Druckformen ermittelt werden. Gegenüber dem Stand der Technik (Photopolymerdruckformen) werden die Gummidruckformen von ContiTech zur Verfügung gestellt. Mit dem Ziel die Druckformen für höheren Materialauftrag pro Lage zu funktionalisieren, werden weitere Druckformen aus verschiedenen Gummimaterialien sowie unterschiedlichen Oberflächenqualitäten (geschliffen, ungeschliffen) analysiert (siehe Abbildung 4). Drucktechnische Untersuchungen von mikrostrukturierten Druckformen finden aufgrund von Investitionsstopps durch die angespannte Corona-Situation nicht statt. Alternativ dazu werden Druckversuche bezüglich Materialauftrag durchgeführt, bei denen die Druckstempelgeometrie variiert wird (vgl. ContiTech Abschlussbericht).

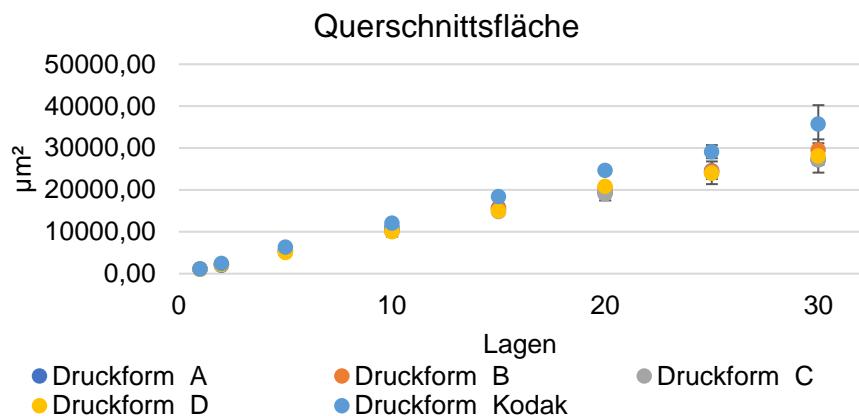


Abbildung 4: Querschnittsfläche der jeweiligen Druckformen alle 5 Drucklagen gemessen, Stempelbreite 200 µm (Zuordnungen der jeweiligen Druckformen im ContiTECH Abschlussbericht)

In Abhängigkeit der ausgelegten Wellenleiterstrukturen werden FEM-Simulationen bezüglich des Verhaltens der Druckformen während des Druckvorgangs durchgeführt. Zunächst wird das mechanische Verhalten der Druckform bei Kontakt mit dem Substrat und wachsenden gedruckten Strukturen untersucht. Hierzu wird ein FEM-Modell aufgebaut, welches das Abrollen eines einzelnen Stempels auf starrem Substrat bzw. starren Wellenleitern iterativ abbildet (siehe Abbildung 5). Hierbei kann gezeigt werden, dass die Druckstempel ohne Nachstellung während des Druckprozess ausbeulen und somit Material zu den Seiten verdrängen. Zum Erreichen eines möglichst hohen Aspektverhältnisses sowie einer geringen Anzahl an Lagen zum Erreichen weniger Druckdurchläufe muss der Druckprozess somit kontinuierlich nachgestellt werden, um im Kissprinting-Bereich zu bleiben. Weiterhin wird der Druck von Splittergeometrien analog simuliert. Hierbei zeigt sich ebenfalls, dass die Stempelflanken ausbeulen, wodurch die jeweiligen Linien in der Verzweigungszone mit sich selbst in Kontakt stehen (siehe Abbildung 6). Daraus kann abgeleitet werden, dass bei Verzweigungen ein größerer Druckbereich im Kontakt mit dem Substrat steht und das an den Flanken angesammelte Material herausgedrückt wird, wodurch Materialanhäufungen im Scheitelbereich entstehen können.

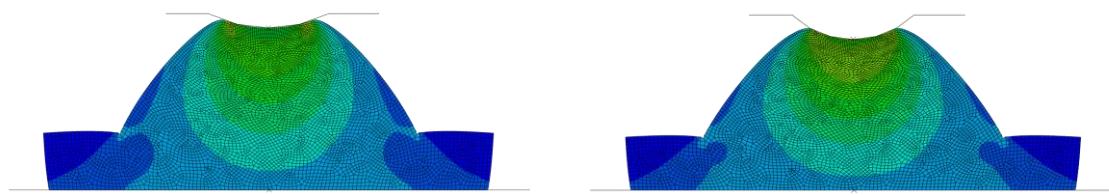


Abbildung 5: FEM-Simulation der Druckstempel bei gleichbleibender Zustellung und wachsendem gedruckten Lichtwellenleiter. Die Seitliche Ausbeulung der Druckform steigt an, der Anteil an Oberflächenkontakt zum Wellenleiter sinkt.

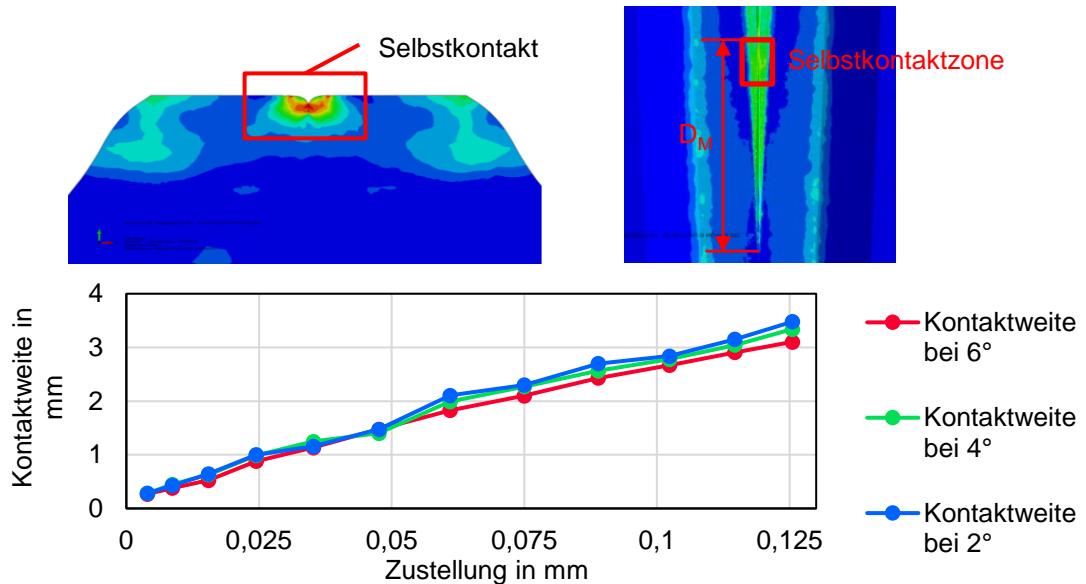


Abbildung 6 FEM-Simulation zeigen Selbstkontakt zwischen Druckstempel einer Splitterdruckform. Der Selbstkontakt steigt mit zunehmender Zustellung linear.

Weiterhin wird das fluiddynamische Verhalten bei idealisierter Stempelgeometrie innerhalb einer 3D-CFD Simulation untersucht. Hierzu wird die Simulationsumgebung anhand idealer Druckbedingungen (keine Stempelverformung) auf PMMA Substrat erstellt. Als Ergebnis (Abbildung 7) kann die Lackübertragung bei geradlinigen Wellenleiterstrukturen visualisiert werden. Es wird sichtbar, dass sich durch Verdrängen des Polymers von der Stempelfläche Material an den Flanken der Druckform ansammelt, das für die Materialübertragung nicht mehr zur Verfügung steht. Der sich im Wendepunkt einstellende Meniskus an der Druckformflanke (Bild 4/5) ist zudem für die Breite der gedruckten Linie verantwortlich. Bei der anschließenden Farbspaltung zwischen Substrat und Druckform bilden sich zwei Fluidlamellen, an denen der fluide Kontakt abreißt.

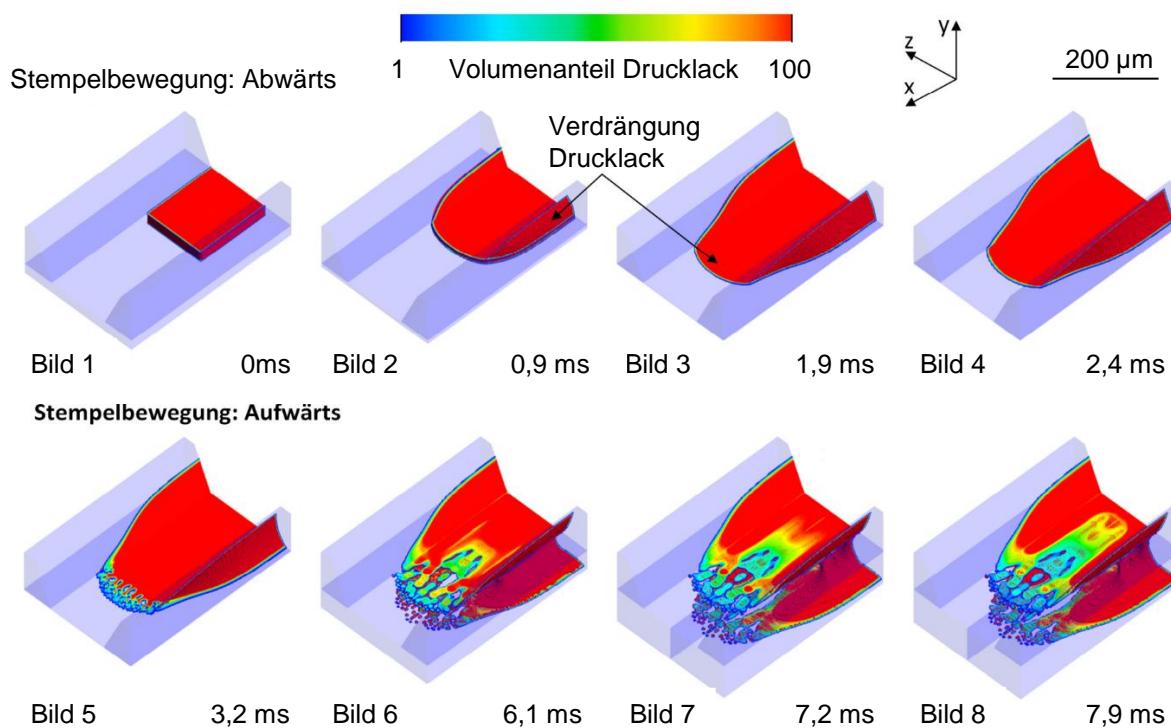


Abbildung 7: CFD Resultate. Durch den Kontakt mit dem Substrat wird Material an die Stempelflanken verdrängt. Ein wesentlicher Teil des Lackes bleibt am Stempel haften, wobei gleichzeitig der Meniskus die Breite der ersten Lage auf dem Substrat definiert.

Entsprechend der Simulationsergebnisse werden experimentelle Untersuchungen durchgeführt, die gezielt die Materialanhäufung im Scheitelbereich von Splittern reduzieren sollen. Hierzu werden Druckformen für PMMA-basierte Wellenleiter so ausgelegt, dass durch verschiedene Aussparungsformen im Scheitelbereich weniger Material übertragen werden soll bzw. die Selbstkontakteierung vermieden werden soll. Die verschiedenen Varianten sind in Abbildung 8 dargestellt und werden in verschiedenen Winkelauflösungen sowie Linienstärken untersucht (siehe AP 3.1).

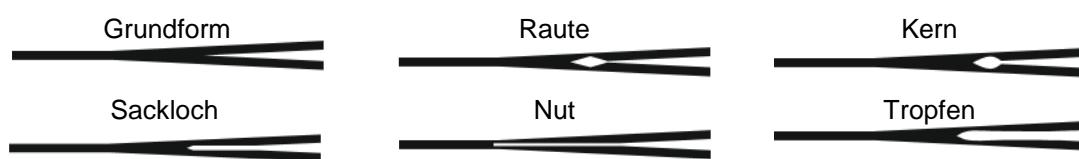


Abbildung 8: Verschiedene Varianten von Splittern zur Vermeidung von Materialanhäufungen

#### AP 2.2: Untersuchung und Adaption von Bebilderungsverfahren für Tiefdruckzyylinder

Parallel zu den Untersuchungen zu Flexodruckformen am ITA finden Tiefdruckversuche, mit dem Ziel Wellenleiter mit weniger Lagen als im Flexodruck herzustellen, bei Janoschka statt. Das ITA unterstützt diese Untersuchungen mit der Vorcharakterisierung von PMMA-Substraten und der anschließenden topographischen und optischen Analyse der Druckergebnisse (vgl. Abschlussbericht Janoschka). Die Variationsparameter bei Janoschka sind hierbei der Einsatz verschiedener Gravuren, angepasste Drucklacke sowie verschiedene Druckrichtungen geradliniger Strukturen.

#### AP 2.3: Untersuchung und Adaption von Siebdruckwerken

Die Untersuchung des Siebdrucks als Druckverfahren für Lichtwellenleiter wird aufgrund organisatorischer Wechsel bei Gallus nicht rotativ durchgeführt. Dahingegen steht am ITA eine

Flachsiebdruckmaschine zur Verfügung, die im späteren Projektverlauf für den Auftrag von oberem Mantelmaterial eingesetzt wird. Da die Siebdruckmaschine über keine Härtungsmöglichkeit verfügt, ist der Einsatz eng an die neu beschaffte UV-Quelle für die Challenger 173 Druckmaschine gebunden. Aufgrund der dadurch entstandene Verzögerung werden keine Prozessparameter für den Druck von Wellenleiterkernen untersucht. Jedoch wird im Vergleich zum Flexodruck eine wesentlich bessere Eignung für den Auftrag von oberem Mantel festgestellt (vgl. AP 3.3). Hierfür wird ein Siebdrucklack, der äquivalent zum Flexodrucklack entwickelt wird, charakterisiert und auf seine Eignung als Mantelmaterial validiert.

### AP 3: Analyse und Entwicklung der Druckprozesse

#### AP 3.1: Prozessanalyse Flexodruck

Ziel dieses AP ist die prozesseitige Erforschung der Umsetzung der jeweiligen Wellenleiter für die zwei Demonstratorstufen sowie die Untersuchung der Druckformen von ContiTech bezüglich ihrer Druckfähigkeit von Lichtwellenleitern auf PMMA. Besondere Herausforderung liegt hierbei in der Umsetzung gemantelter Wellenleiter mittels Flexodrucks. Entsprechend der Anforderungen der jeweiligen Demonstratoren sind für die primäre Aufbau- und Verbindungstechnik geradlinige Wellenleiterstrukturen ohne Verzweigungen gefordert, um die Freiheitsgrade des Bestückungsprozesses zu reduzieren. Daher werden für die Integration in beide Demonstratorstufen zunächst geradlinige Wellenleiter mit einer Länge von bis zu 15 cm gedruckt, wohingegen der grundsätzliche Druck von Splitterstrukturen experimentell gemäß den Vorlagen aus AP 2.1 untersucht wird.

Um für die jeweiligen Demonstratoren Druckprozesse zu designen, werden breit angelegte Materialuntersuchungen durchgeführt, insbesondere um geeignete Materialien für den mehrlagigen Druck gemantelter Wellenleiter zu bestimmen. Dazu stehen im Vordergrund die p(siehe Abbildung 9), die für die Funktionalität als Wellenleiter gegeben sein müssen. Weiterhin spielen die drucktechnischen Eigenschaften eine entscheidende Rolle für die Umsetzung gemantelter und flexographisch gedruckter Wellenleiter. Hierzu werden die Substrate (PMMA, PI) und die jeweiligen Drucklacke, die überdruckt werden, bezüglich ihrer Oberflächenenergie, sowie der Kontaktwinkel der konsekutiven Lacke untersucht. Abgeleitet von den Materialuntersuchungen werden zwei Materialkombinationen (vgl. Ergebnisbericht) ausgewählt, die für die weiteren Versuche zum Druck des Demonstrator 2 untersucht werden.

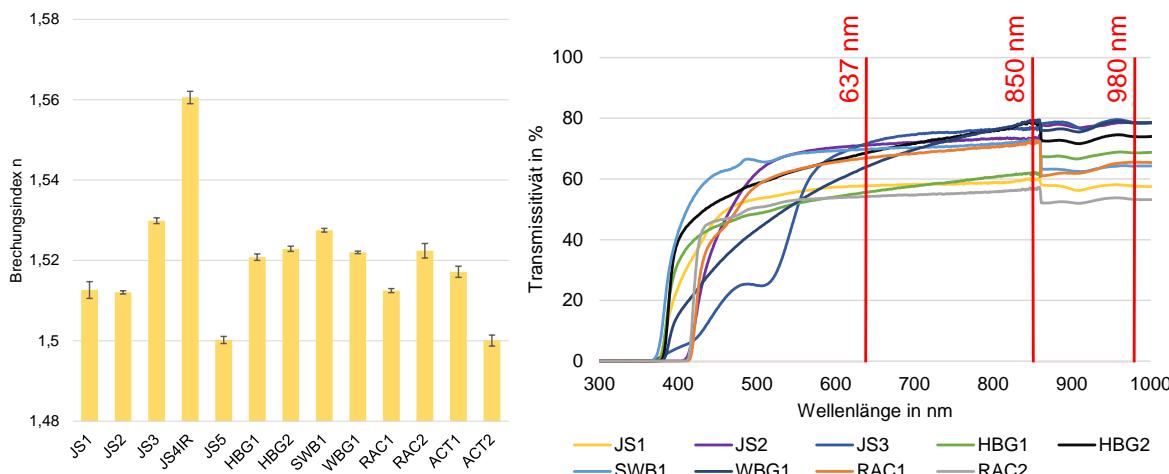


Abbildung 9: Brechungsindex- und Transmissionsmessungen verschiedener Lackkandidaten

Die geradlinige Herstellung von Lichtwellenleitern für Demonstrator 1 erfolgt auf PMMA mit

JS1 Drucklack. Bei dieser Materialkombination sind die Brechungsindizes der jeweiligen Materialien bekannt, allerdings tritt unzureichende Lichtleitung beim Druck dieses Materials auf der Challenger 173 Druckmaschine auf. In Folge dessen wird eine Messreihe bezüglich der Strahlungsdosis beim Aushärten und dem daraus resultierenden Brechungsindex durchgeführt. Das Ergebnis (siehe Abbildung 10) zeigt, dass der Brechungsindex bei höheren UV-Härtungseinstellungen zunimmt, woraus sich eine verbesserte Lichtleitung ergibt.

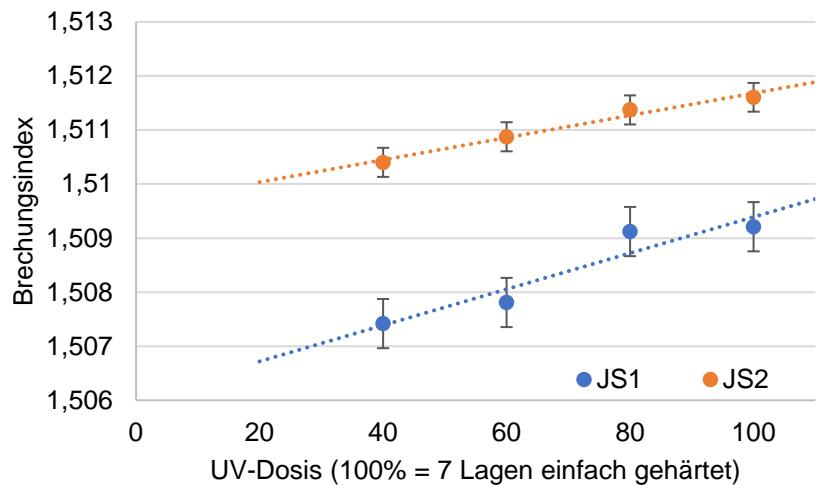


Abbildung 10: Ansteigender Brechungsindex abhängig von der jeweils eingesetzt UV-Härtungsdosis der Höhle Jetcure (100% = 6000 mW/cm<sup>2</sup>)

Geradlinige Wellenleiterstrukturen werden so am ITA hergestellt, sodass ficonTEC für Justageversuche zur Verfügung gestellt. Weiterhin werden Gummidruckformen speziell für den Druck von Lichtwellenleitern untersucht und mit Photopolymerplatten verglichen. Hier zeigt sich, dass mit konventionellen Gummidruckplatten (CSC) geringere Aspektverhältnisse der gedruckten Strukturen erreicht werden, aber gleichzeitig eine wesentlich höhere optische Dämpfung von 5,3 dB/cm (gegenüber 1,8 dB/cm mit Flexcel NX).

Für den Druck von Wellenleitern für Demonstrator 2 werden gemantelte Wellenleiterkerne gefordert, sodass eine Lamination in eine Leiterplatte ermöglicht wird. Basierend auf den zur Verfügung stehenden Materialkombinationen werden Versuche durchgeführt, die den Druck eines unteren optischen Mantels (Primer), des Wellenleiterkerns sowie eines oberen optischen Mantels (Cover) untersuchen. Die jeweiligen Schichten erfordern unterschiedliche Anforderungen (wie in Tabelle 1 dargestellt). Primäres Ziel hier ist es ausschließlich mittels Flexodrucks alle Funktionslagen übereinander zu drucken und die entsprechenden Anforderungen zu erfüllen (siehe Abbildung 3, Tabelle 1).

Tabelle 1: Anforderungen an die jeweiligen Druckelemente

Schicht	Anforderung (Pflicht)	Anforderung (Wunsch)
<b>Unterer Mantel (Primer)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flächige Benetzung des Substrats</li> <li>• Keine Fehlbenetzungen</li> <li>• Minimale Dicke 5 µm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geringe Rauheit</li> <li>• Geringe Welligkeit</li> <li>• Symmetrischer Aufbau</li> <li>• Wenig Drucklagen</li> <li>• Gute Benetzbarkeit</li> </ul>
<b>Kern</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mindesthöhe 70 µm</li> <li>• Mindestbreite 200 µm</li> <li>• Maximale Breite 500 µm</li> <li>• Keine Unterbrechungen</li> <li>• Keine Einschnürungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geringe Kantenwelligkeit</li> <li>• Hohes Aspektverhältnis</li> </ul>
<b>Oberer Mantel (Abdecklack)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vollständige Benetzung des Kerns</li> <li>• Mindestdicke 5 µm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geringe Drucklagen</li> </ul> <p>Anzahl</p>

In einer ersten Messreihe wird der untere Mantel im Verhältnis zum Kern gedruckt und die Justagegenauigkeit der Heidelberger-Druckmaschine am ITA überprüft. Hier ist erkennbar, dass durch die hohe Anzahl an Drucklagen des Kerns die Breite stetig ansteigt, sodass der untere Mantel wesentlich breiter ausgelegt sein muss. Folgende experimentelle Untersuchungen finden daher mit einer Manteldruckform mit einer Linienbreite von 2 mm sowie einer Kerndruckform mit Linienbreite 200 µm statt. Weiterhin treten aufgrund der hohen Anzahl an Drucklagen an den polymeren Folien bzw. der Kupferkaschierung des Pls Schrumpfung bzw. thermische Spannung in der Folie auf, die Ungenauigkeiten über die Wellenleiterfolie verursachen. Um diese Effekte detaillierter zu untersuchen wird daher am ITA eine Labordruckmaschine (Schläfli Challenger 173) beschafft, bei der eine präzisere Substratführung und gesteuerte Härtung (Beschaffung Hönle JetCure) ermöglicht wird.

Auf Basis dieser Vorversuche werden die Druckeinstellungen anhand der definierten Kriterien untersucht. Es zeigt sich, dass eine vollständige Benetzung mit ausreichender Höhe des unteren Mantels erst mit zwei Druckdurchgängen zu erreichen ist. Für eine zuverlässige Benetzung werden von da an drei Lagen unterer Mantel gedruckt, um potentielle Fehlbenetzungen auszugleichen. Bei Zustellung der Rasterwalzer zur Druckwalze kann eine Steigerung der statistischen Welligkeit ermittelt werden, weshalb dieser Parameter für die gezielte Reduzierung der Welligkeit ausgeschlossen wird. Die wesentliche Stellgröße für eine glatte und gleichmäßige Oberfläche ist die Druckwalenzustellung zum Substrat. Hier wird gezeigt, dass eine Druckwalenzustellung zwischen 40 und 100 µm zu glatten und gleichmäßigen Strukturen führt (siehe Abbildung 11). Hierbei entstehen neben der primär gedruckten Linie Quetschränder, die für die Funktion der unteren Mantelstruktur jedoch unerheblich sind.

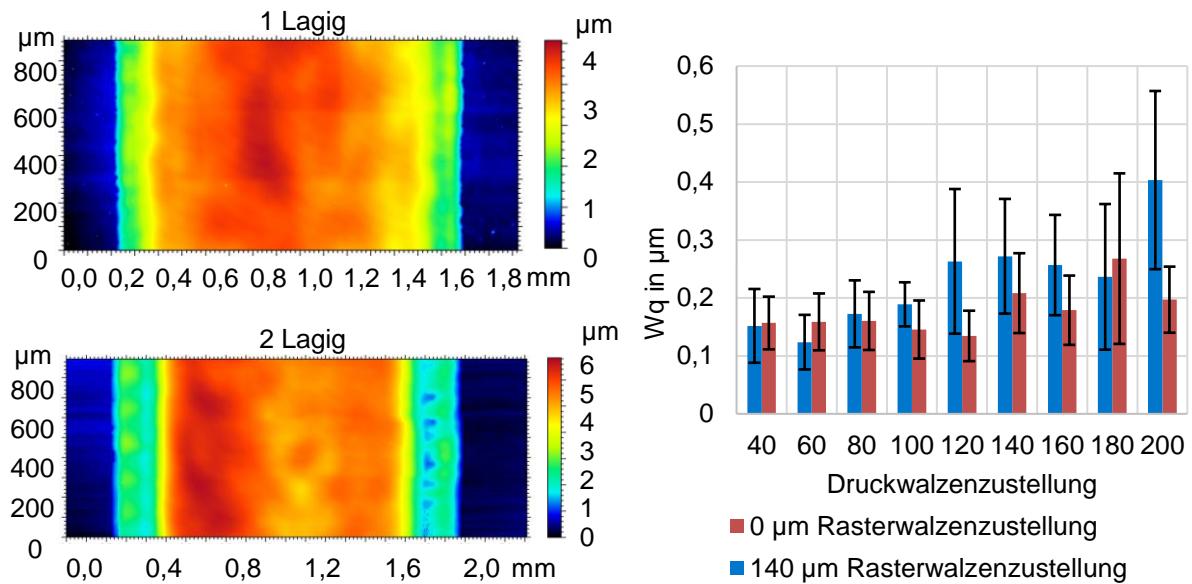


Abbildung 11: Parameterstudie zum Flexodruck von unterem Mantel

Analog zur Herstellung der Lichtwellenleiter für Demonstrator 1 zeigt sich der Druck des Kerns auf dem Mantel per Kiss-Printing als am gezieltesten. Hierzu werden Versuchsreihen durchgeführt, bei denen die Druckzustellung der Druckwalze stufenweise variiert wird, bis ein gleichbleibendes Druckbild der ersten Lage über die gesamte Folienfläche entsteht. Unter Nutzung idealer Druckparameter wird sichtbar, dass die unterste Kernlage die Welligkeit des unteren Mantels verfüllt und dadurch geringere Konturschärfe aufweist als direkt auf PMMA gedruckte Strukturen. Durch den 20-fachen Druck derselben Struktur wird diese Ungenauigkeit allerdings ausgeglichen, sodass dennoch konturscharfe Wellenleiterkerne entstehen (vgl. Abbildung 12). Diese Versuche werden sowohl auf der SM52 als auch auf der Challenger 173 Druckmaschine durchgeführt. Um das Kiss-Printing bei wachsender Wellenleitergeometrie beizubehalten, wird die sequentielle Variation der Zustellung zwischen den einzelnen Drucklagen untersucht. Eine wesentliche Veränderung der Wellenleiterhöhe und -breite kann hier nicht erkannt werden, jedoch ist bei einer Anhebung des Druckwerks alle 5 Lagen um 10  $\mu\text{m}$  eine Verbesserung der Kantenschärfe sichtbar, weshalb diese Einstellung für weitere Versuche angewandt wird.

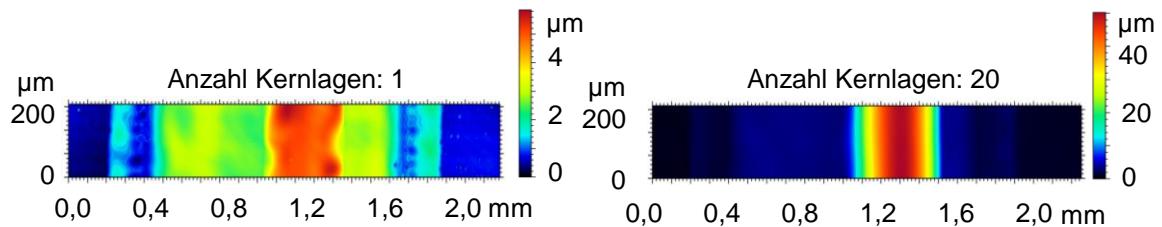


Abbildung 12: Links: Benetzung einer einzelnen Kernlage auf unterem Mantel, Verfüllen der Mantelwelligkeit ist sichtbar. Rechts: 20 Lagen gedruckter Kern auf unterem Mantel, klare Kantengeometrie durch fluide Ausgleichsprozesse entstehen.

Der Druck der oberen Mantelstrukturen im Flexodruck wird zunächst mit Druckformen für den unteren Mantel sowie dem entsprechend gleichen Materialsystem durchgeführt. Hier zeigt sich der meisten Lackübertrag über die gesamte Wellenleiterbreite bei hohen Druckzustellungen ( $>200 \mu\text{m}$ ). Die Anzahl der Lagen des oberen Mantels wird ebenfalls variiert und zeigt anhand von Schliffbildern und konfokalen Profilmessungen (siehe Abbildung 13) einen geringen Materialaufbau auf der Wellenleiterspitze, an der dadurch keine zuverlässige Benetzung

erzeugt werden kann. Als Folge werden weiterhin alternative Verfahren für die Umsetzung des oberen Mantels untersucht. Hier kommt insbesondere der Siebdruck (siehe AP 3.3 und 3.4) in Betracht, da Tiefdruck aufgrund seines hohen Drucks die Wellenleiterstruktur schädigen kann.

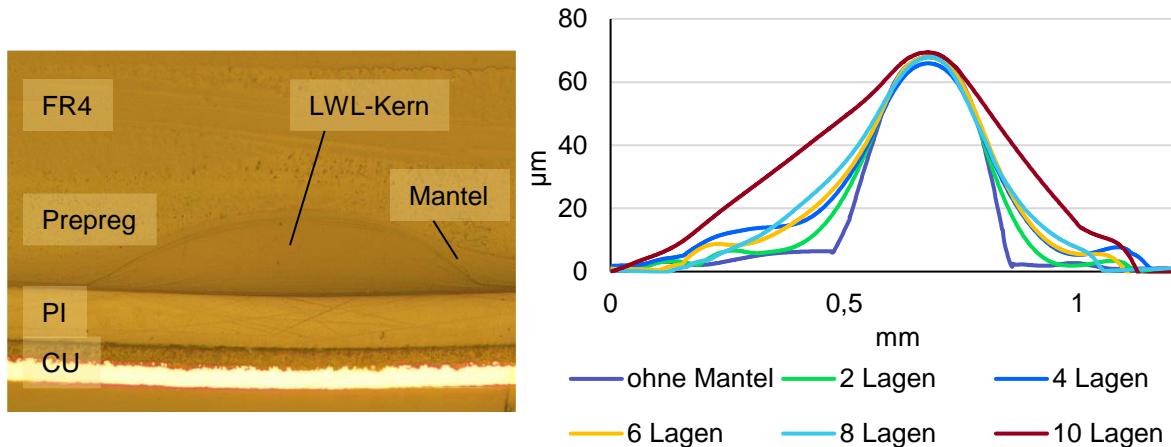


Abbildung 13: Aufbau oberer Mantel mit Flexodruck bei mehreren Druckdurchgängen, links: Schliffbild von gemanteltem einlaminiertem Wellenleiter, rechts: Querschnittprofile verschiedener Lagenanzahlen

Weiterhin werden die in AP 2.1 ausgelegten Splitterstrukturen drucktechnisch realisiert, die durch gezieltes Druckformdesign Materialanhäufungen im Scheitelpunkt reduzieren sollen. Beim Druck der jeweiligen Splittergeometrien erweisen sich drei von sechs Strukturen als ungeeignet, da hier Fehlbenetzungen bzw. nicht-druckende Bereiche an ungewollten Stellen entstehen (siehe Abbildung 14). Der mehrlagige Druck von den übrigen Strukturen (siehe Abbildung 15) zeigt eine Reduzierung der Lackanhäufung im Scheitelpunkt. Insbesondere die „Sackloch“ Variante zeigt einen wesentlich gleichmäßigeren Materialauftrag im Vergleich zur Grundform.

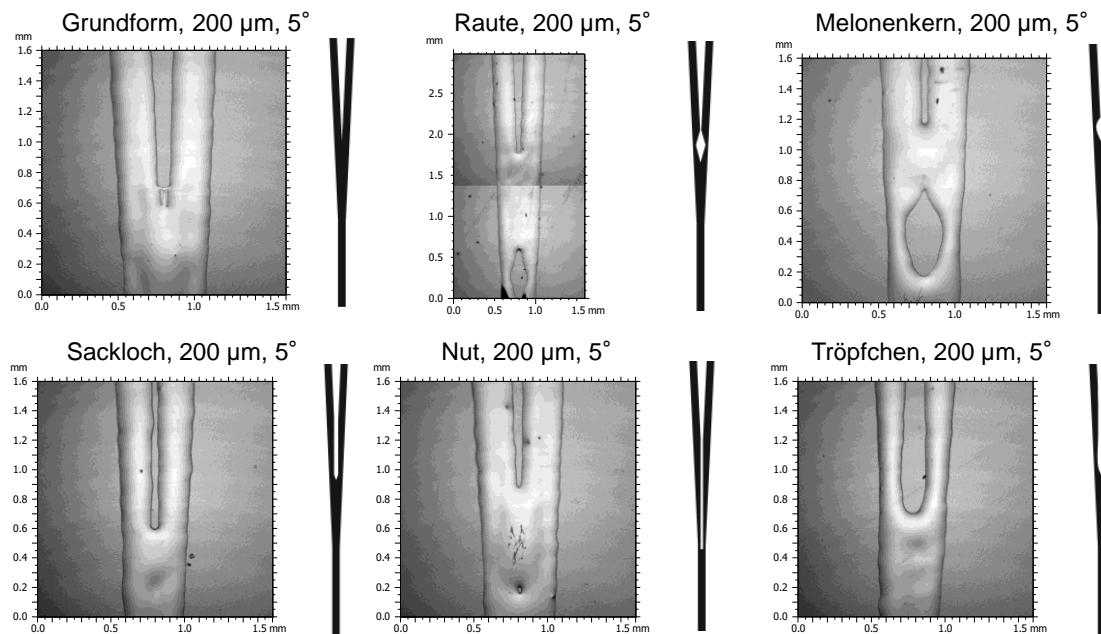


Abbildung 14: Druckbild nach einfachem Druck verschiedener Splittergeometrien

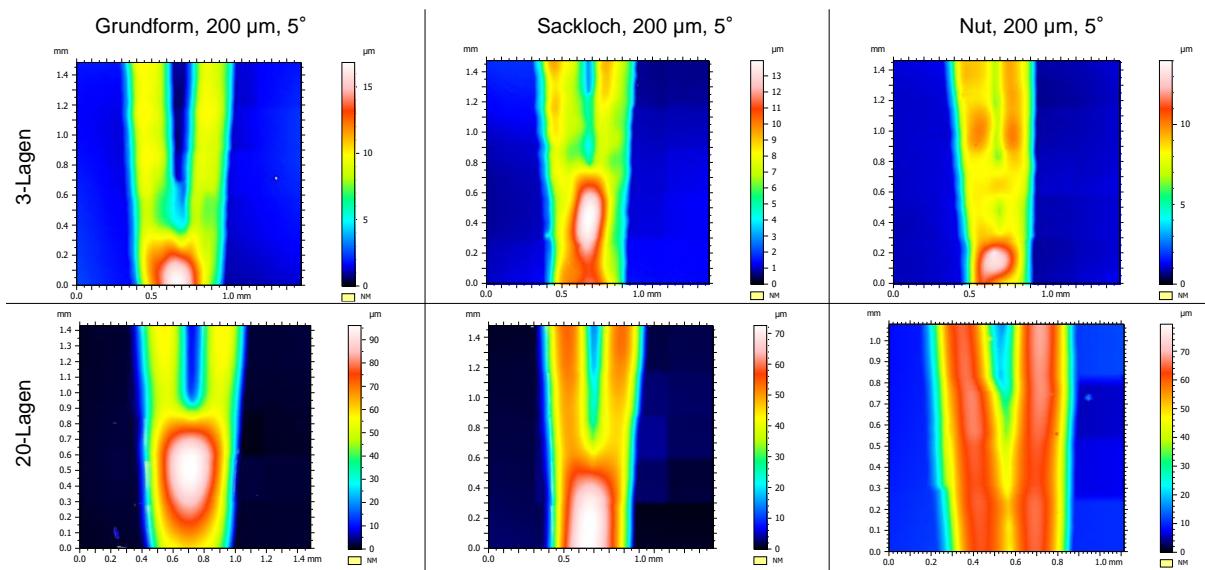


Abbildung 15: Auswahl von Splittervarianten als topographische Aufnahme

### AP 3.2: Prozessanalyse Tiefdruck

Im Rahmen dieses AP unterstützt das ITA Janoschka bei der Untersuchung des Tiefdrucks für die Lichtwellenleiterproduktion direkt auf PMMA. Hier werden vorrangig Proben, die bei Janoschka selbst gedruckt wurden, konfokal untersucht und eingeordnet. Da mit den zur Verfügung stehenden Maschinen kein positionsgenauer Mehrfachdruck möglich ist, wird im Rahmen der Beschaffung der Labordruckmaschine Challenger 173 am ITA zusätzlich auch ein Tiefdruckwerk integriert. Mit diesem Tiefdruckwerk werden im Verlauf des Projektes weiterhin Materialübertragsuntersuchungen durchgeführt, die den mehrlagigen Tiefdruck untersuchen (siehe Abschlussbericht Janoschka). Es kann ein höherer Materialübertrag als im Flexodruck realisiert werden, allerdings zeigen die Strukturen eine geringe Kantenschärfe auf und der gleichmäßige Übertrag erweist sich als extrem abhängig von der Druckrichtung. Als Ergebnis können hier funktionale Wellenleiter auf PMMA hergestellt werden, die bis zu halb so viele Überdruckvorgänge benötigen wie analoge flexographisch gedruckte Strukturen. Für 10-lagig hergestellte Lichtwellenleiter (200 μm Breite, 50 μm Höhe) kann so eine mittlere optische Dämpfung von  $3,15 \pm 0,3$  dB/cm gemessen werden.

### AP 3.3: Prozessanalyse Siebdruck

Seitens ITA wird innerhalb dieses Vorhabens der Siebdruck für die Herstellung eines oberen Mantels untersucht. Hierzu wird eine Flachbett-siebdruckmaschine Atma PA45 eingesetzt mit einer Siebdruckplatte die 4 mm breite Linienstrukturen erzeugt (Siebdichte 100 L/cm). Der entsprechende Drucklack entspricht der Siebdruckanpassung des in AP 3.1 eingesetzten Flexodrucklacks. Innerhalb von Mikroskopieuntersuchungen (siehe Abbildung 16) kann gezeigt werden, dass Siebdruck aufgrund des höheren Materialübertrags eine vollständige Benetzung des Wellenleiterkerns mit minimal 2 Lagen ermöglicht, insofern der Kernlack eine Oberflächenenergie oberhalb von 40 mN aufweist.

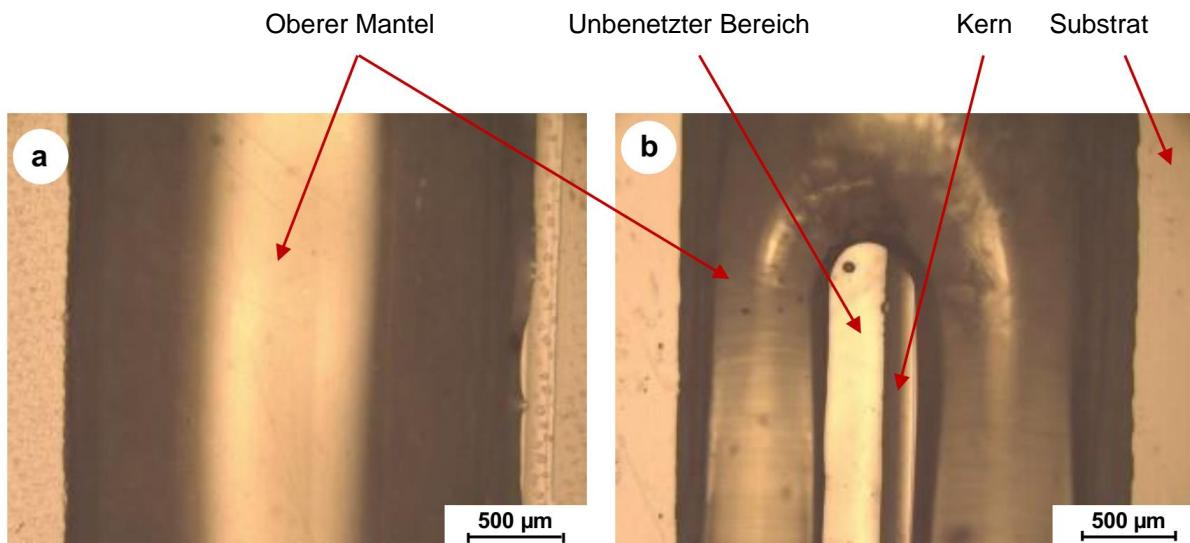


Abbildung 16: a: Benetzungsfehler bei oberem Mantel mit Flexodruck, b: vollständige Benetzung bei Siebdruck

#### AP 3.4: Bündelung und Validierung des Drucks von Lichtwellenleitern

Aufgrund von organisatorischen Veränderungen der Zuständigkeiten werden innerhalb der Projektlaufzeit keine Versuche auf einer Demonstratorprozessanlage durchgeführt. Der Ansatz innerhalb einer Anlage alle Prozesse positionsgenau umzusetzen, wird nicht durchgeführt. Die erfolgreiche Bewilligung der Challenger 650 Druckanlage im Rahmen von PhoenixD ermöglicht jedoch ab Q3 2023 die Realisierung einer solchen Prozesskette zur vollständig justierten Umsetzung eines Demonstratorsystems innerhalb einer Anlage.

Durch die, während der Projektlaufzeit erfolgten, Neuinvestition der Challenger 173 werden am ITA exemplarisch die erfolgsversprechenden Prozesse Flexo- und Tiefdruck auf einer Anlage zusammengefasst. Jedoch können die Druckwerke hier nicht gleichzeitig integriert werden, sodass der absolut positionsgleiche Druck der jeweiligen Mantel- und Kernstrukturen nicht umsetzbar ist. Die Realisierung des Siebdrucks zur Herstellung eines oberen Mantels erfolgt auf einer separat stehenden Anlage. Mit diesem Setup wird exemplarisch die Verkettung zweier Flexodruckstufen und einer Siebdruckstufe zur Umsetzung vollgemantelter Wellenleiter umgesetzt. Die so hergestellten vollgemantelten Lichtwellenleiter werden daraufhin bezüglich ihrer optischen Dämpfung mit dem Cut-Back Verfahren vermessen. Die resultierende Dämpfung bis zu 12 cm Probenlänge wird mit 3,89 dB/cm ermittelt bei einer festen Stirnflächendämpfung von 5,63 dB (siehe Abbildung 17-18). Somit kann eine Lichtleitung über eine Kurzstrecke mit vollständig gedruckten integrationsfähigen Lichtwellenleiter dargestellt werden.

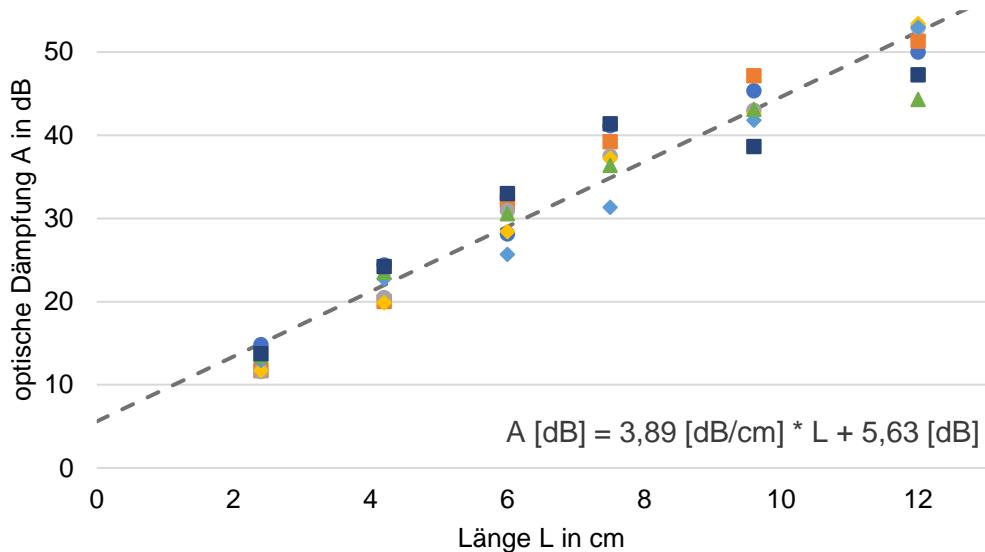
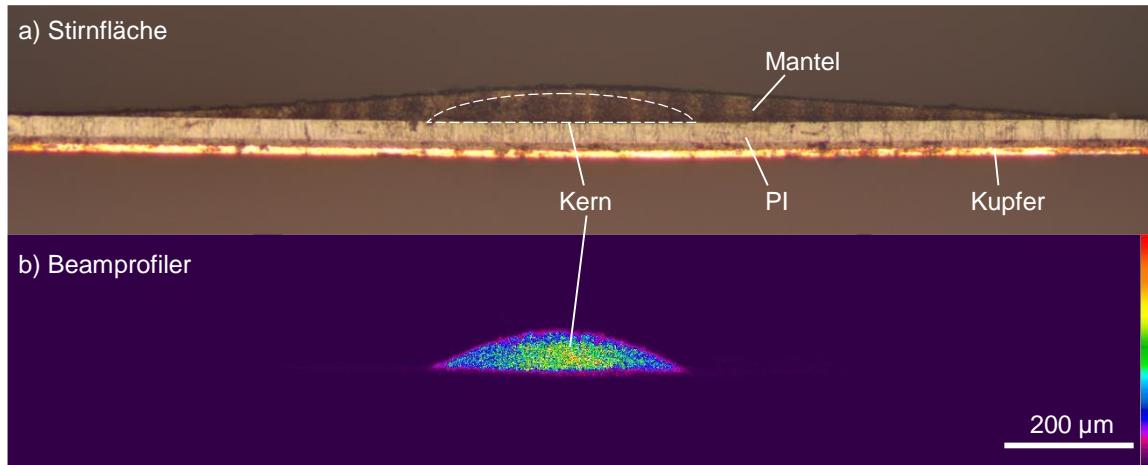


Abbildung 18: Dämpfungsmessung vollgemantelter Wellenleiter (WBG1)

#### AP 4: Integration des Gesamtsystems

##### AP 4.1: Vereinzeln und Präparieren der Lichtwellenleiter

Die Vereinzelung der Wellenleiter für Demonstrator 1 wird seitens ITA mittels CO<sub>2</sub>-Laserseparierprozess durchgeführt. Hierzu wird das PMMA Substrat rückseitig zerschnitten sowie entlang der designierten Bruchlinien mit geringerer Schneidleistung perforiert. Somit werden die Wellenleiter anschließend entlang der Sollbruchstellen gebrochen, wodurch Stirnflächen mit Rauheiten unterhalb  $R_q = 60 \text{ nm}$  entstehen.

Für Demonstrator 2 ist das mechanische Brechen aufgrund der Leiterplattenintegration nicht geeignet. Hier werden in Zusammenarbeit mit Hotoprint Vorversuche zur mechanischen Bearbeitung durchgeführt, indem verschiedene Fräswerkzeuge und Schneidwerkzeuge (HSS, VHM, MKD, Scheren, Schneiden, Brechen) exemplarisch untersucht werden. Als erfolgsversprechend stellt sich nur das einschneidige monokristalline Diamantfräsen (MKD) heraus. Im Vergleich zu anderen Prozessen lösen sich die Wellenleiter hier nicht vom Substrat ab und Stirnflächenrauheiten von  $R_q = 60 \text{ nm}$  können mit hoher Fräserdrehzahl und geringem Vorschub erreicht werden. Auf Basis dieser Stirnflächenpräparation kann in Abbildung 18 die

Basisdämpfung (y-Achsenabschnitt) der Stirnflächenqualität zugeordnet werden, woraus sich eine Dämpfung durch Stirnflächenrauheit von 5,63 dB ableitet. Diese Ergebnisse führen zu der Entwicklung eines angepassten Fräsvorganges bei Hotoprint, der zusätzlich Eingriffe in FR4 ermöglicht. Die von Hotoprint laminierten und präparierten Wellenleiter werden am ITA mikroskopisch vermessen und bewertet (vgl. Abschlussbericht Hotoprint).

#### AP 4.2: Entwicklung einer Handhabungstechnik für flexible Wellenleiter

Das ITA unterstützt ficonTEC bei Justageversuchen mit PMMA-basierten Wellenleitern. Hierzu werden die Wellenleiter vom ITA hergestellt und gemäß AP 4.1 konfektioniert, sodass Kopplungsversuche auf der Demonstrator 1-Leiterplatte möglich sind. Für die ausschließliche Vermessung der optischen Lichtleitung des Wellenleiterkerns, werden die PMMA-basierten Wellenleiter mit oberem Mantel (per Dispensierprozess) und zusätzlich beidseitig mit absorbierender Beschichtung versehen, sodass auftretende Mantelmoden eliminiert werden.

#### AP 4.3: Entwicklung der mechanischen Anbindung

Im Rahmen dieses APs finden Vorversuche zur Klebstoffauswahl und Evaluation der von Hotoprint erzeugten Kavität, die gemäß AP 5.1 notwendig ist, statt. Zur Ermittlung eines geeigneten Klebstoffs werden verschiedene Klebstoffe mit verschiedenen Aushärtezeiten und Viskositäten exemplarisch auf FR4 aufgebracht und unter Aufbringung von gleichmäßigen Kräften die Schichtdicke des Klebstoffs evaluiert. Weiterhin wird die planare Ausbreitung sowie die Tiefe der Kavitäten von Hotoprint konfokal charakterisiert, sodass iterativ ein Verfahren für zuverlässige Kavitäten ermittelt wird (vgl. Veröffentlichung SPIE Photonics West).

### **AP 5: Integrationsarbeiten und Gesamtvalidierung**

#### AP 5.1: Aufbau Demonstrator Stufe 1

Im Rahmen dieses APs wird am ITA das vertikale Aufbaukonzept entwickelt, welches unter Nutzung von Kantenemittern (Chip-980-P50 von Roithner Lasertechnik) und kantenaktiven Photodioden (KPEIMC-100) eine direkte Positionierung der PMMA-basierten Wellenleiter vor den Dioden ermöglicht (siehe Abbildung 19). Wesentliche Herausforderungen sind hierbei die Materialstärke (175 µm) des eingesetzten PMMA, die für die Stirnflächenpräparation und die Stabilität im Druckprozess notwendig ist, sowie die unterschiedlichen Positionen der aktiven Fläche der Photo- und Laserdiode. Als Folge wird eine Kavität in der Leiterplatte benötigt, die eine Platzierung des Wellenleiters ermöglicht, der mithilfe von Klebstoff an beiden Seiten in unterschiedlicher Höhe bestückt wird.

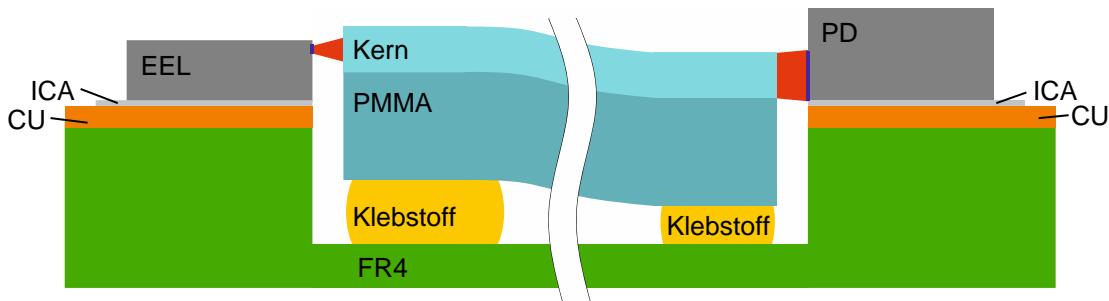


Abbildung 19: Vertikales Aufbaukonzept für Demonstrator 1. Kavität in Leiterplatte mit ausreichend Tiefe, um unterschiedlich hohe optoelektronische Bauteile zu kontaktieren.

Für den Aufbau des Demonstrator 1 werden weiterhin Wellenleiter am ITA konfektioniert und präpariert, sodass sowohl die aktive als auch die passive Bestückung bei ficonTEC durchgeführt werden kann. In diesem Rahmen wird die Präparationspräzision mittels Lasercutter untersucht, sodass mithilfe visueller Registrierung des Wellenleiters feste PMMA

Überstände umgesetzt werden können, um einen direkten Anschlag an die Kavitätsskanten für passive Justage nutzen zu können. Hier ist das Ergebnis, dass die mit dem am ITA zur Verfügung stehenden Epilog CO2-Laser zuverlässige Schnittpräzision mit weniger als 50 µm Abweichung umgesetzt werden kann, allerdings ist eine dauerhafte Registrierung der Wellenleiter aufgrund der transparenten Struktur nur bedingt umsetzbar. Hinzu kommen die Positionsabweichungen beim Druck mit der Heidelberger SM52 Druckmaschine, die keine gleichbleibende Vereinzelung zulassen.

#### AP 5.2: Validierung Demonstrator Stufe 1

Ziel dieses APs ist die Darstellung einer optischen Datenübertragung mittels des Demonstrator 1 Aufbaus. Hierzu werden am ITA an exemplarisch aufgebauten und mikroskopisch-validiert bestückten Dioden Übertragungsversuche durchgeführt. Die Laserdiode wird direkt durch einen Signalgenerator mit einem Rechtecksignal betrieben. Gleichzeitig wird auf Seiten der Photodiode der Diodenstrom gemessen (siehe Abbildung 20). Hier kann eine Signalübertragung im niedrigen Megahertzbereich gezeigt werden.

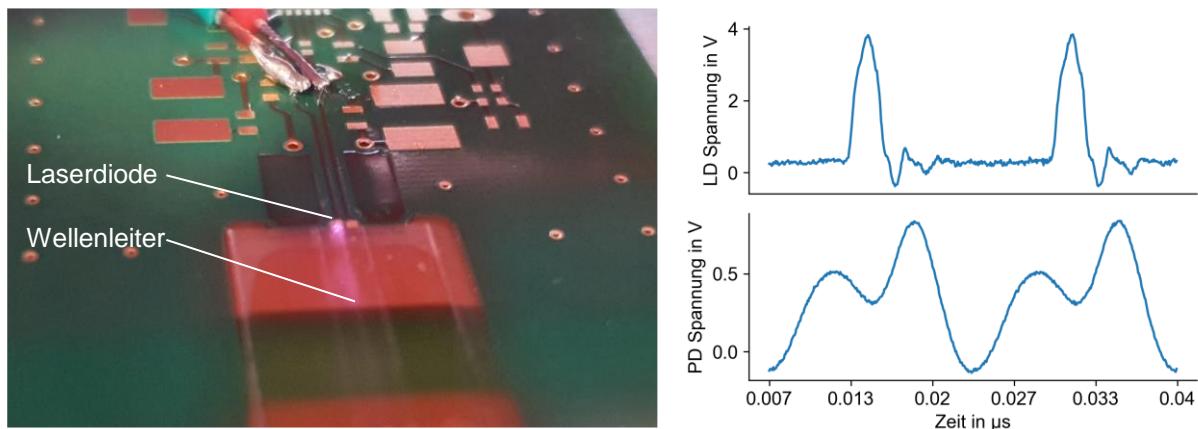


Abbildung 20: Exemplarische Validierungsversuche des Demonstrator 1 Aufbaus

Parallel zur Überprüfung der unbestückten Demonstrator 1 Aufbauten werden Varianten von Hotoprint aufgebaut, die vollständig mit Signalübertragungselektronik bestückt sind. Die Applikation des Wellenleiters erfolgt hier seitens ficonTEC, sodass am ITA in Zusammenarbeit mit Siemens die Funktionsvalidierung durchgeführt werden kann. Hierzu werden Medienkonverter und Raspberry Pi Mikrocomputer eingesetzt, um ein Ethernetsignal zu übertragen. Über den Medienkonverter kann keine Signalübertragung festgestellt werden. Zur weiteren Untersuchung wird ein Bandbreitenmessplatz aufgebaut (siehe Abbildung 21), der die Bitfehlerrate der optischen Signalübertragung bestimmen soll. Dieser Messplatz stellt die wesentlichen Investitionen des ITA im Rahmen dieses Vorhabens dar. Im Zuge dessen werden Frequenz- und Signalgeneratoren (Adsantec PRBS45 & FS8151), fasergekoppelte Photo- und Laserdioden (VI Systems V25-850M & D30-850M), sowie ein geeignetes Samplingscope (Tektronix DSA8300) und weitere Elektronikkomponenten (Bias-Tee, HF-Verstärker, Dämpfungsglieder) für die HF-Untersuchungen sowie optischen Mechanikkomponenten (manuelle Justagestages, Halterungszubehör etc.) beschafft. Bei weiteren Untersuchungen des Demonstrators mittels eines Bitfehlerprüfstandes von Siemens und der TH Nürnberg kann jedoch unter Vernachlässigung der bestückten Signalverarbeitungselektronik eine Datenrate von 1,25 Gbit/s nachgewiesen werden.

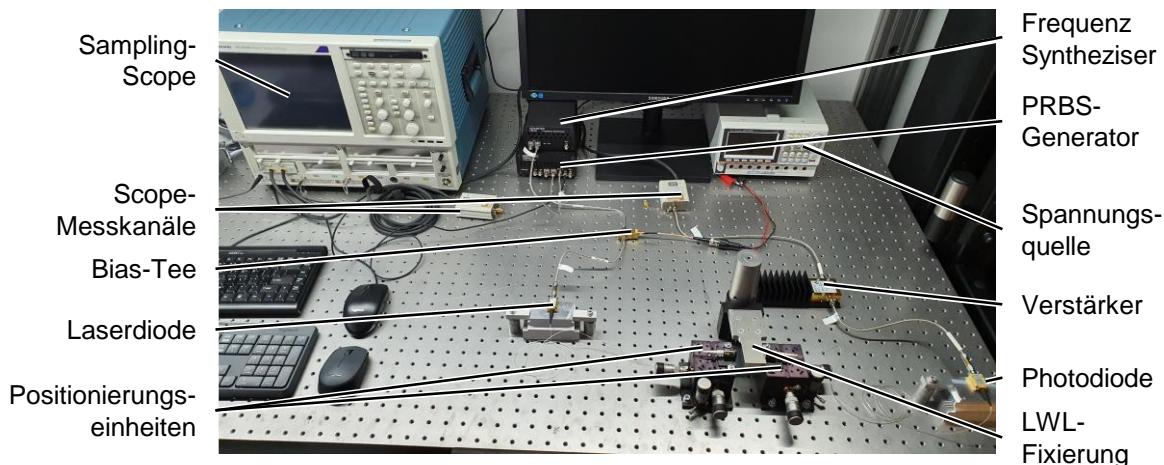


Abbildung 21: Aufbau des Bandbreitenmessplatzes am ITA

### AP 5.3: Aufbau Demonstrator Stufe 2

Für die vollständige Validierung des Demonstrator 2 werden im Rahmen des Vorhabens die innovativen Teillösungen zur vollständigen Realisierung separat umgesetzt und implementiert. Hierzu zählt die Konzipierung einer Kopplungslösung für oberflächenemittierende Dioden, sowie der Druck von vollgemantelten Lichtwellenleitern (vgl. AP 3) und die die Auslegung/Optimierung der Toleranzkette. Im Rahmen der Kopplungskonzipierung wird eine Prozesskette entwickelt, mit der mittels eines leiterplattenbasierten Submounts der Winkelversatz zwischen optischem und elektronischem Layout, sowie der Höhenversatz der integrierten Lichtwellenleiter ausgeglichen werden kann. Die finale Ausgestaltung dieses Konzepts umfasst Toleranzen die bei den Laminierprozessen vorkommen, sowie die aktuellsten Erkenntnisse zu Stirnflächenpräparation (notwendiger Fräserdurchmesser und -prozess). In Abbildung 22 ist das CAD-Modell des finalen Konzepts dargestellt, welches alle Anforderungen der Fertigungsprozesse erfüllt. Gemäß der in AP 1.2 untersuchten Toleranzkette ist eine erfolgreiche Umsetzung der Kopplung nur möglich, wenn eine direkte Referenzierung des Bestückungsprozess an den Lichtwellenleitern erfolgt. Das finale Konzept umfasst daher eine Aussparung der Leiterplatte, sodass gedruckte Fiducials dem Bestückungsprozess zur Verfügung gestellt werden können. Diese Fiducials werden zusammen mit den Lichtwellenleitern auf PI-Substrat gedruckt. Die bedruckten Folien werden anschließend partiell in Coverlayer (PI und Epoxy Folie) einlaminiert, um einen Flexabschnitt zu ermöglichen und gleichzeitig die Registrierungsmarken freizustellen. Anschließend erfolgt die Lamination in die Leiterplatte selbst, wobei durch gezielte Freistellung der Prepregs die Registrierungsmarken sowie die Kopplungsstellen ausgefräst werden können. Parallel dazu werden die Submounts gefertigt mit Baredie-Dioden bestückt und elektrisch kontaktiert. Zuletzt erfolgt die industrielle Bestückung auf seriellen Bestückungsautomaten, die sich an der freiliegenden gedruckten Registrierungsmarke orientieren, sodass die Kopplung anhand der Wellenleiter durchgeführt werden kann.

Weiterhin werden die erforderlichen Wellenleiter für den Aufbau des Demonstrators hergestellt und funktional validiert. Hierfür werden die Druckformen an die entsprechenden Gegebenheiten in der Demonstratorplatine angepasst, sodass die räumlichen Positionen übereinstimmen mit dem elektronischen Leiterplattenlayout. Hierzu wird die geometrische Toleranz der Wellenleiterposition auf dem Substrat exemplarisch vermessen, wobei eine Abweichung von +/- 20 µm zur Sollposition in x/y-Richtung ergibt.

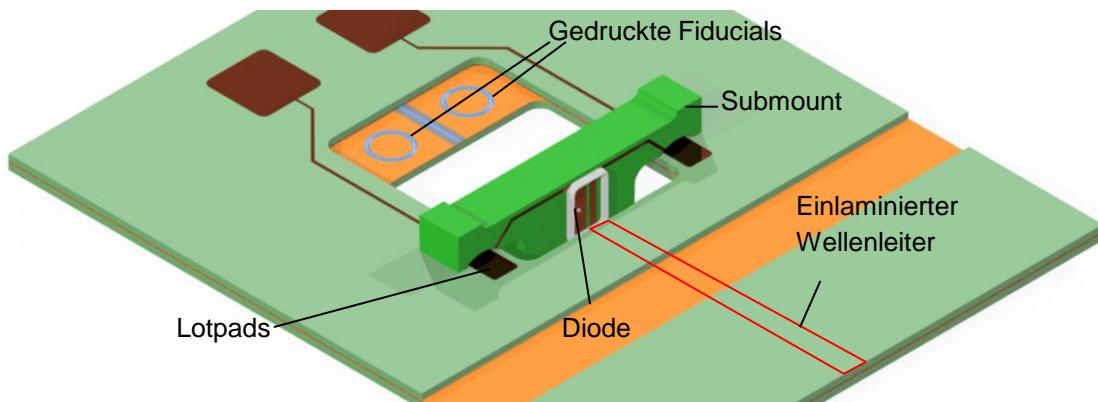


Abbildung 22: Finale Ausgestaltung der Koppelstelle von Demonstrator 2. Entsprechend der Erkenntnisse zur Stirnflächenpräparation ist der Durchbruch und Submount ausgelegt, sodass die entsprechenden Fräserradien genutzt werden können.

#### AP 5.4: Validierung Demonstrator Stufe 2

Im Rahmen dieses AP ist der Betrieb des Demonstrators 2 das Ziel. Aufgrund der eingeschränkten Arbeitsbedingungen während der Corona-Pandemie sowie Lieferengpässe, ist der Aufbau eines kompletten Demonstrators unter industriellen Maßstäben nicht möglich. Teillösungen können jedoch gezeigt werden, die im Anschluss des Vorhabens zusammengeführt werden können.

Seitens des ITA besteht die Teillösungen in der Umsetzung einlaminierten Lichtwellenleiter und der Validierung dieser. Hierzu werden die im Rahmen von AP 5.3 gefertigten und bei Hotprint laminierten Lichtwellenleiter bezüglich Schädigung durch den Laminationsprozess sowie optischen Leitfähigkeit evaluiert. Aufgrund des mehrlagigen Aufbaus der designierten Leiterplatte wird ein mehrstufiger Laminationsprozess angewandt, welcher die Lichtwellenleiter teilweise verformt; ihre grundsätzlichen Formparameter bleiben jedoch erhalten (siehe Abbildung 13 links). Es kann dennoch eine Lichtleitung über 6 cm Länge gezeigt werden. Weiterhin werden die übrigen leiterplattenbasierten Komponenten vermessen, sodass die Toleranzkette seitens Hotprint erfüllt werden kann. Für den vollständigen Aufbau fehlt dahingehend der Zugang zu einer industriellen Bestückungsanlage sowie der erforderlichen Signalverarbeitungskomponenten.

## 4 Ausblick

Im direkten Anschluss an die Projektlaufzeit werden Arbeitspakete, die nicht vollständig bearbeitet werden konnten im Rahmen von Folgearbeiten umgesetzt. Hierzu zählen insbesondere die Anpassung und Feinkalibrierung des Bandbreitenmessplatzes am ITA sowie die Kombination der für Demonstrator 2 erarbeiteten Teillösungen zu einem funktionalen System. Somit ist in naher Zukunft ein voll funktionsfähiges und qualifiziertes optoelektronisches System mit integriertem Wellenleiter zu erwarten. Aufbauend auf dieser Grundlage kann eine Industrialisierung der eingesetzten Prozesse stattfinden und die Qualifizierung des Demonstratoraufbaus für kommerzielle Standards erfolgen. Die interdisziplinären Prozessabfolge stellen darüber hinaus Grundlage für vielseitige Anwendungsfelder gedruckter optischer Lichtwellenleiter wie z.B. dem Einsatz als planare integrierte Lichtschranke für verformungssensitive Bauteile im E-mobility Batteriumfeld. Auf Basis dieser Ergebnisse werden Folgeprojekte am ITA beantragt, die auf der funktionalen Drucktechnologie und der einhergehenden Aufbau- und Verbindungstechnik aufbauen.

Darüber hinaus ist durch die neuerliche Bewilligung des Großgeräts Schläfli Challenger 650

die Möglichkeit am ITA vorhanden die Demonstrationsprozesskette des Vorhabens nachträglich nachzustellen. Mit dieser Anlage ist es möglich unter hoher Positionsgenauigkeit mehrschichtig optische Strukturen zu drucken und erforschen. Da der Druck eines oberen Mantels ein großes Problem innerhalb des Vorhabens darstellt, können auf der Challenger 650 weitere Verfahren wie Slot-Die Coating eingesetzt werden. Die bessere Registrierungspräzision der Drucklayouts erfolgt durch Kameratechnik, sodass die Toleranzkette zur Wellenleiterintegration an farblich kontrastierten Druckmarken entlang aller Prozesse erfolgen kann. Projektanträge die auf dieser Technik aufbauen beinhalten zusätzlich die Idee zur Nutzung eines in-situ AOI-Systems, welches zwischen den einzelnen Drucklagen die Struktur der Lichtwellenleiter als Digitalen Zwilling erfassen und evaluieren soll. Ein weiterer Ansatz ist der direkte Druck auf fertige Leiterplatten, der durch die Möglichkeit zur starren Substratführung ermöglicht wird. Somit können die Laminationsprozesse vermieden werden und die damit einhergehende Temperatur- und Druckbelastung der Wellenleiter wird umgangen. Somit können die eingesetzten Druckprozesse weiterentwickelt und durch Kombination mit neuartigen Prozessen wie der Lasernachbearbeitung die Qualität und Einsatzgebiete von gedruckten Lichtwellenleitern erweitert werden. Technische Anwendungen in Kombination mit gedruckter Elektronik, sowie optische Sensor oder Beleuchtungsanwendungen sind ebenso möglich.

## Anhang

### Im Rahmen des Verbundprojekts entstandenen Publikationen:

- A. Evertz, G.-A. Hoffmann, E. Olsen, L. Overmeyer, "Industrial processing for printed polymer optical waveguides," Proc. SPIE 11815, Novel Optical Systems, Methods, and Applications XXIV, 118150A (7 September 2021)
- A. Evertz, B. Reitz, E. Olsen, U. Wetzel, R. Ghane-Mothlagh, I. Sengünes, S. Döhrmann, M. Seyfried, A. Oppermann, N. Tolle, L. Overmeyer, "Fast ethernet operation of a printed optical transmission path using industrial integration technologies," Proc. SPIE 12007, Optical Interconnects XXII, 120070C (5 March 2022);
- A. Evertz, G.-A. Hoffmann, L. Overmeyer „Integration of Printed Optical Waveguides in Printed Curcuit Boards”, DGaO Processings 2020

## Kurzbericht

**zum Teilvorhaben** Direktdruck und Integration von optischen Kurzstreckennetzwerken (OptiK-Net), LUH - ITA

**des Verbundprojektes** Miniaturisierte optische Systeme hoher Integrationsdichte

Laufzeit des Verbundprojekts: 01.10.2019 – 31.03.2023

Im Rahmen der Ausschreibung „Miniaturisierte optische Systeme hoher Integrationsdichte“ findet sich der Verbund OptiK-Net, dessen Ziel der Einsatz gedruckter optischer Übertragungsstrecken in Leiterplattensysteme ist. Dazu sollen Druckverfahren, die vorrangig aus dem graphischen Druck stammen, genutzt werden, um optische polymere Lichtwellenleiter auf Polymersubstrat zu erzeugen. Die Lichtwellenleiter werden anschließend in Leiterplattensysteme integriert und optisch angebunden, sodass eine galvanisch getrennte optische Datenübertragung etabliert werden kann. Mit den Forschungsergebnissen dieses Vorhabens soll der Bedarf an hochleistungsfähigen Datenübertragungslösungen im EMV-belasteten Kurzstreckenbereich adressiert werden. Das Forschungskonsortium setzt sich dazu aus Unternehmen der Druck- und Elektroindustrie zusammen, sodass die gesamte Prozesskette zur Umsetzung von funktionalen elektrooptischen Leiterplatten abgebildet werden kann.

Im Rahmen des Gesamtprojekts ist das Ziel die Umsetzung von zwei Demonstratoren, bei denen verschiedene Ansätze zur Integration der Lichtwellenleiter erforscht werden. Für Demonstrator 1 soll die Integration eines Wellenleiters durch einen passiven Bestückungsprozess auf einer Leiterplatte erfolgen. Der Wellenleiter wird oberflächig appliziert, sodass keine thermischen Belastungen durch den Leiterplattenproduktionsprozess auf ihn einwirken. Für den Demonstrator 2 ist das Ziel die Lichtwellenleiter in eine Zwischenlage der Leiterplatte einzufügen, wozu eine vollständige optische Mantelung sowie thermische Resistenz gegenüber Laminationsprozessen benötigt wird. Die optische Kopplung erfolgt hier durch nachträgliche Bestückung der Sender- bzw. Empfängerelemente, welche adaptiv zur Wellenleiterposition erfolgen muss.

Forschungsergebnisse aus vorherigen Projekten zeigen, dass Lichtwellenleiter mithilfe des Flexodrucks drucktechnisch auf PMMA Substrat erzeugt werden können. Diese Wellenleiter nutzen das Substrat und die Umgebungsluft als Mantelmaterialien für die innere Totalreflexion. Wesentlichen Einfluss auf die optische Übertragungsqualität der Lichtwellenleiter zeigen die Konturgenauigkeit der gedruckten Strukturen, die Rauheit der Stirnfläche und Verschmutzungen bzw. Fremdkörper im Wellenleiter, die im Produktionsprozess eingebracht werden. Beim Druck von optischen Netzwerkstrukturen wie Splittern und Combinern bilden sich im Flexodruck Materialanhäufungen im Scheitelpunkt, wodurch die optische Dämpfung dieser Elemente zusätzlich erhöht wird. Die Teilvorhabensziele des ITA stellen die Anpassung der Lichtwellenleiter zur Integration in Leiterplatten sowie die Untersuchung alternativer Drucktechniken zur Herstellung von Lichtwellenleitern dar. Für die Integration in Zwischenlagen von Leiterplatten ist die Nutzung von PI-Substrat erforderlich, da dieses Temperaturresistenz im Laminationsprozess aufweist und als Leiterplattenbasismaterial qualifiziert ist. Um die optische Funktionalität weiterhin zu gewährleisten, ist eine untere Mantelung der Wellenleiter notwendig, die drucktechnisch realisiert werden soll. Da im Flexodruck bis zu 30 Lagen übereinander gedruckt werden, um eine nutzbare Strukturhöhe von 70 – 80 µm zu erreichen, werden als Alternative die Druckverfahren Sieb- und Tiefdruck in Zusammenarbeit mit Janoschka und Gallus untersucht. Diese versprechen höheren Materialübertrag pro Druckdurchgang und somit ein höheres Maß an Industrialisierung. Weiterhin soll der Druck optischer Netzwerkstrukturen untersucht werden, indem in Verzweigungsstellen das sich anhäufende Volumen reduziert werden soll. Dazu werden Anpassungen des Materialsystems in Zusammenarbeit mit Jänecke&Schneemann sowie eine Strukturierung der Druckform zusammen mit ContiTech vorgesehen.

Im Ablauf des Projekts wird systematisch der Flexodruck ungemannter und gemantelter Wellenleiter für die jeweiligen Demonstratorversionen untersucht. Dazu werden zuerst Zielsysteme modelliert, anhand derer Anforderungsprofile für die jeweiligen Komponenten und Integrationsschritte abgeleitet werden. Zum Demonstrator 1 wird dazu eine oberflächige Direktjustage eines Wellenleiters in eine Kavität auf der Leiterplatte vorgesehen. Da die Wellenleiter nach dem Laminationsprozess appliziert werden, wird keine Temperaturresistenz sowie Mantelung der Wellenleiter benötigt. Somit können für diesen Demonstrator flexographisch auf PMMA gedruckten Wellenleiter eingesetzt und die benötigte Vereinzelung und Präparation erforscht werden. Um ein passives Bestücken zu ermöglichen werden kontinuierliche Wellenleitergeometrien sowie hochwertige Stirnflächen erfordert. Diese können durch einen CO<sub>2</sub>-Laserschneidprozess umgesetzt werden, der das Substrat mit einer Sollbruchstelle versieht. Bei Biegung des Substrats setzt sich so der Riss in den Wellenleiter fort, wodurch eine Stirnfläche mit niedriger Rauheit entsteht. Die flexographische Wellenleiterherstellung und -präparation wird auf tief- und siebgedruckten Wellenleiter transferiert, sodass die Eignung der Druckverfahren verglichen werden kann. Hierfür werden die im Flexodruck etablierten Lacksysteme an die jeweiligen Druckverfahren angepasst und bezüglich ihrer optischen und drucktechnischen Eigenschaften untersucht. Auf Basis eines Schaltungslayouts von Siemens und aktiver Montage seitens ficonTEC werden PMMA-basierte Wellenleiter in Demonstrator 1 umgesetzt und eine Datenübertragung von 1,25 Gbit/s erreicht.

Für die Umsetzung von Demonstrator 2 erfordern die Wellenleiter, aufgrund des Laminationsprozess während der Leiterplattenintegration, den Druck auf PI-Substrat, sowie den Druck einer unteren und oberen Mantelstruktur, die als Grenzfläche für die Totalreflexion dient. Die drucktechnische Umsetzung dieses Wellenleiterystems stellt eine wesentliche Herausforderung an die Material- und Drucktechnik dar. Hierzu werden zunächst Klarlacke verschiedener Hersteller anhand ihrer optischen, fluidodynamischen und drucktechnischen Eigenschaften charakterisiert, sodass anhand der Materialmodelle eine Vorauswahl für Druckversuche getroffen werden kann. Ein geeignetes Lacksystem für den unteren Mantel (bzw. Primer) gewährleistet die Haftung auf PI-Substrat, ist transparent und ermöglicht Überdrucken (hohe Oberflächenenergie). Wesentliche Eigenschaften des Kernmaterials sind hohe positive Brechungsindexdifferenz zu mit den angrenzenden Materialien, hohe Transmissivität sowie gute Benetzungsfähigkeit. Der obere Mantel muss in der Lage sein mit wenigen Druckstufen den Kern komplett mit einer Schichtdicke von mindestens 5 µm zu bedecken. Mit dem Ziel einen Druckaufbau aus drei verschiedenen Materialien umzusetzen, der die optische Mantelung des Wellenleiterkerns ermöglicht, wird systematisch der Druck der drei Funktionsschichten mit verschiedenen Druckverfahren untersucht. Hierbei liegen die produktionstechnischen Erkenntnisse in der Eignung des jeweils geeigneten Verfahrens für jede Funktionsschicht, den jeweiligen Druckeinstellungen sowie der Anzahl an Lagen pro Funktionsschicht. Beim Flexodruck kann keine vollständige Benetzung mit oberem Mantel erreicht werden. Siebdruck eignet sich für die Herstellung des oberen Mantels aufgrund des höheren Materialübertrags und höheren Viskositäten besser, sodass ein vollgemantelter Wellenleiter mit 2,3 dB/cm hergestellt werden kann. In Zusammenarbeit mit Hotprint wird dieser Wellenleiter in ein Leiterplattensystem einlaminiert, wodurch zunehmende Verluste bei der Lichtleitung festgestellt werden. Aufgrund des Multimaterialaufbaus eines leiterplattenintegrierten Wellenleiter können die Stirnflächen der Wellenleiter nicht analog zu Demonstrator 1 umgesetzt werden, sodass zusätzliche Präparationsverfahren nötig sind, welche Stirnflächen mit hohen Oberflächengüten erzeugen. Hierzu wird das Fräsen mithilfe eines Polierfräzers auf Seiten von Hotprint und mithilfe UV-Laser und MKD-Fräswerkzeug auf Seiten ITA als geeignet ermittelt. Weiterhin werden für den zweiten Demonstrator Konzepte erarbeitet, die Teillösungen für die industrielle Umsetzung darstellen. Hierfür wird eine FR4-basierte Submount-Lösung in Zusammenarbeit mit Hotprint und Siemens konzeptioniert, welche die Nutzung von VCSEL mit einlaminierten Wellenleitern ermöglicht. Das Konzept ermöglicht den Höhenversatz zum Wellenleiter und Nutzung von VCSEL als Sendeeinheit, sodass eine direkte Einkopplung ohne Justage des Wellenleiters ermöglicht wird.