

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 20202 N

Thema

Schnelle und flexible Erzeugung von Leiterstrukturen zur Herstellung großflächiger mechatronischer Bauteile durch laserunterstützten Direkt-Druck - LaDi-Print

Berichtszeitraum

01.07.2018 - 31.10.2020 (inkl. 4 Monate kostenneutrale Verlängerung)

Forschungsvereinigung

Räumliche Elektronische Baugruppen 3-D MID e.V.

Forschungseinrichtung(en)

1. Bayerisches Laserzentrum GmbH (blz); Projektleiter: Dr.-Ing. Stephan Roth
2. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS); Projektleiter: M.Sc. Alexander Hensel

Erlangen, 27.01.2021

Dr. Stephan Roth

M.Sc. Alexander Hensel

Ort, Datum

Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und Projektleiter der
Forschungseinrichtung(en)

Gefördert durch:

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung und Bewertung des Forschungsprojekts.....	4
2	Problemstellung und Motivation.....	6
3	Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisdarstellung	7
3.1	AP1: Direkt-Druck von Leiterstrukturen (FAPS).....	7
3.1.1	Materialien	7
3.1.2	Druckprozesse	10
3.1.3	Geometrie und Druckparameter	14
3.2	AP2: Laserbestrahlung von mittels Direkt-Druck erzeugten Strukturen (blz).....	16
3.2.1	Ermittlung der optischen Eigenschaften von Substrat- und Tintenwerkstoffen.....	17
3.2.2	Einstellung des Strahlprofils mittels räumlichem Lichtmodulator (SLM)	19
3.3	AP3: Charakterisierung der erzeugten Leiterbahnstrukturen	20
3.3.1	Charakterisierung der geometrischen Gestalt und Qualität des Leiterbilds (FAPS) 20	
3.3.2	Ermittlung der elektrischen Eigenschaften der Leiterstrukturen (blz)	20
3.3.3	Prozessgrenzen bei der Laserbearbeitung des verwendeten Tintenwerkstoffes von Paru (blz).....	26
3.3.4	Beurteilung des Lasersintervorgangs mittels Rasterelektronenmikroskop (blz) ...	28
3.3.5	Ermittlung der Haftfestigkeit der Leiterstrukturen (blz)	31
3.3.6	Oberflächenbehandlung zur Verbesserung der erzielbaren Haftfestigkeit und Benetzungseigenschaft (blz, FAPS)	35
3.3.7	Untersuchungen zur Langzeitzuverlässigkeit im Umwelttest (blz)	37
3.4	AP4: Thermische Prozessanalyse des laserunterstützten Leiterbahnsinterns (blz)	38
3.4.1	Thermische Analyse der Substratwerkstoffe mittels DSC.....	38
3.4.2	Thermische Prozessanalyse anhand kalibrierter Thermoelemente.....	39
3.5	AP5: Konzeption eines laserunterstützten Direkt-Druck-Bearbeitungskopfes (blz, FAPS)42	
3.5.1	Materialien	43
3.5.2	Druckprozesse	43
3.5.3	Sinterprozesse	44
3.6	AP6: Wirtschaftliche und technische Bewertung der Prozess- und Bauteilfähigkeit anhand von Demonstratorbauteilen (blz, FAPS)	45
3.6.1	Bewertung der 3D-Fähigkeit des Prozesses.....	46
3.6.2	Laserstrahllöten und Leitkleben von Bauelementen und Charakterisierung der Kontaktierungen (blz)	47

4	Wissenschaftlicher Ausblick und zukünftiges wissenschaftlich-technisches Vorgehen	51
5	Verwendung der Zuwendung	52
5.1	Durchführende Forschungsstellen.....	52
5.2	Personaleinsatz.....	52
6	Erläuterung der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	53
7	Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft	54
7.1	Durchgeführte Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit.....	54
7.2	Transfermaßnahmen nach Projektabschluss.....	54
7.3	Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts	55
7.4	Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU	55
7.4.1	Innovativer Beitrag	55
7.4.2	Industrielle Anwendungsmöglichkeiten.....	55
8	LITERATUR	56

1 Zusammenfassung und Bewertung des Forschungsprojekts

Im Forschungsprojekt „Schnelle und flexible Erzeugung von Leiterstrukturen zur Herstellung großflächiger mechatronischer Bauteile durch laserunterstützten Direkt-Druck - LaDi-Print“ wurden Silbernanopartikelintinten und Silbermikropartikelpasten mit den digitalen Druckverfahren Aerosol-Jet und Dispensersystem auf spritzgegossene Polymere gedruckt und der Einfluss der Laserbestrahlung als photonisches Sinterverfahren untersucht. Schwerpunkt lag hierbei auf der elektrischen Leitfähigkeit und der Haftfestigkeit als wesentliche Zielkriterien. Ziel war es, mittels Laserbestrahlung eine im Vergleich zum Ofenprozess vergleichbare oder bessere elektrische Leitfähigkeit bei guter Haftfestigkeit sowie deutlich reduzierter Sinterdauer für alle untersuchten Substratarten zu erreichen, wobei das Sintern auf thermisch empfindlichen Substraten wie ABS und PC-ABS von besonderem Interesse war.

Zusammen mit dem Projektbegleitenden Ausschuss wurde die Verwendung von drei unterschiedlichen Substratmaterialien und drei verschiedenen Pasten- und Tintenwerkstoffen beschlossen. Für die Versuche wurde Glas als Referenzsubstratmaterial betrachtet, Hauptaugenmerk lag jedoch auf den temperaturempfindlichen Polymeren Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) und einem Gemisch aus Polycarbonat und Acrylnitril-Butadien-Styrol (PC-ABS). Für die Druckversuche mit dem Dispensersystem wurden eine Silbermikropartikelpaste der Firma Henkel (WIK20487-36A) und eine Core-Shell-Paste (VP 71529/G) der Firma Eckart verwendet. Mit dem Aerosol-Jet Verfahren wurde die Silbernanopartikelintinte PARU PG-007 der Firma Paru benutzt. Mittels Laserbestrahlung konnte auf Glas mit der Silbermikropartikelpaste eine elektrische Leitfähigkeit von 9 MS/m erzielt werden. Auf ABS wurden 11 MS/m und auf PC-ABS 15 MS/m erreicht. Dies entspricht ca. 14 - 25 % der spezifischen Leitfähigkeit von Bulk-Silber. Damit konnten die Ergebnisse der Ofensinterung, welche zwischen 2 und 3 MS/m betragen (3 – 5 % von Bulk-Silber), deutlich übertroffen werden. Vergleichbare Ergebnisse wurden mit der Silbernanopartikelintinte und Laserbestrahlung erzielt. Hier wurden auf Glas eine elektrische Leitfähigkeit von 14 MS/m erzielt sowie 21 MS/m auf ABS und 23 MS/m auf PC-ABS. Dies entspricht wiederum etwa zwischen 23 – 38 % der spezifischen Leitfähigkeit von Bulk-Silber. Auch bei diesen Versuchen wurde die Leitfähigkeit, welche mit dem konventionellen Sinterprozess erreicht wurde und zwischen 7 – 15 MS/m lag (11 – 25 % von Bulk-Silber), erreicht bzw. übertroffen. Die Sinterdauer, die für die Sinterung einer Leiterfläche mit einer Größe von 100 x 100 mm benötigt wird, wurde hierbei von einer Stunde auf wenige Sekunden reduziert. Eine Laserbestrahlung der Core-Shell-Paste führte aufgrund der Oxidation des Kupferwerkstoffs zu keinen aussagekräftigen Ergebnissen.

Anhand von Rasterelektronenmikroskopaufnahmen (REM-Aufnahmen) photonisch gesinterter Proben konnte zudem der Einfluss der Laserbearbeitungsparameter auf den Sintergrad der Leiterstrukturen ermittelt werden. Die durchgeführten Haftfestigkeitsuntersuchungen mittels Gitterschnitt und Stirnabzugsversuche zeigen Haftfestigkeiten zwischen 0 - 2 nach DIN EN ISO 2409 für die Silbermikropartikelpaste und zwischen 1 - 3 für die Silbernanopartikelintinte. Die schlechtesten Ergebnisse wurden hierbei auf Glas aufgrund der ideal glatten Oberfläche erzielt. Die im Ofen gesinterten Referenzproben bewegen sich zwischen 1 – 2 für die Henkel-Paste und 2 – 5 für die Paru-Tinte. Durch eine Plasmavorbereitung konnte die Haftfestigkeit gesteigert werden. Anhand von Zuverlässigkeitsuntersuchungen im Temperaturschockschrank bei -40°C und +100°C wurde ein Anstieg des elektrischen Widerstandes bis 500 Zyklen um 54 % ermittelt, was auf entstehende Mikrorisse zurückzuführen ist.

Zur Analyse und Beurteilung der Energieeinbringung mittels Laserstrahlung wurde das Sintern der Leiterbahnen mittels Thermografie prozessbegleitend analysiert. Somit konnten Prozessbedingungen gefunden werden, bei denen keine Schädigung der temperaturempfindlichen Substrate auftrat. Anhand der thermischen Prozessanalyse konnten die Bestrahlungsparameter gezielt den thermischen Eigenschaften der Substratwerkstoffe angepasst werden. Die höchste elektrische Leitfähigkeit konnte mit der Henkel-Paste auf ABS und PC-ABS bei einer Streckenenergie von 24 J/m und einer Überfahrt des Laserstrahls erzielt werden, ohne eine thermische Schädigung des Substrates zu bewirken. Durch eine Erhöhung der Anzahl der Überfahrten bis auf die thermische Belastungsgrenze der Substrate konnte der Sintergrad und dadurch die elektrische Leitfähigkeit zusätzlich erhöht werden. Mit der Paru-Tinte wurde bei einer Streckenenergie von 24 J/m auf ABS und 16 J/m auf PC-ABS bei einer Überfahrt die höchste elektrische Leitfähigkeit ermittelt, ohne eine thermische Schädigung des Substrates zu bewirken. Auch hier konnte durch eine Erhöhung der Anzahl an Überfahrten der Wert der elektrischen Leitfähigkeit zusätzlich erhöht werden. Insgesamt ist die photonische Sinterung über Laserstrahlung sehr gut geeignet, um auf temperaturempfindlichen Substraten hohe Leitfähigkeiten bei gleichzeitig hohen Haftfestigkeiten erzielen zu können.

2 Problemstellung und Motivation

Die Verdichtung und Sinterung gedruckter Elektronik ist in den letzten Jahren immer mehr in den Mittelpunkt der Forschung gerückt. Zum Zeitpunkt der Antragsstellung zeigte die durchgeführte Literaturrecherche, dass die Sinterung von digital verdruckten Silbernanopartikelinten mit dem konventionellen Ofenprozess bei Temperaturen von mindestens 150° C und einer Zeitdauer von mindestens 30 Minuten durchgeführt wird. Diese hohen Temperaturen machen den Einsatz von kostengünstigen polymeren Substraten wie ABS oder PET kaum möglich. Zudem lag der Fokus auf der Erzielung einer sehr hohen elektrischen Leitfähigkeit, während Wechselwirkungen und Auswirkungen auf die Haftfestigkeit kaum untersucht wurden. Alternative photonische Sinterverfahren, wie extrem kurze gepulste Lichtblitze, zielen darauf ab, das Substrat aufgrund des sehr hohen Energieeintrags in wenigen μ s-Bereich kaum zu erwärmen. Nachteil ist jedoch hierbei, dass nur planare Proben vollständig gesintert werden können, da es sonst zu Abschattungseffekten kommen kann. Damit geht ein wesentlicher Vorteil der digitalen Druckverfahren, ihre Gestaltungsfreiheit bzgl. 3D-Oberflächen, verloren. Das photonische Sintern mittels Laser-Scannersystem, welches zusätzlich auf einem Roboterarm montiert werden könnte, ermöglicht die flexible und selektive Sinterung gedruckter Strukturen auch auf 3D-Oberflächen. Für das Forschungsprojekt LaDi-Print ergeben sich somit die folgenden Motivationspunkte:

1. Besseres Prozessverständnis über die Wechselwirkung beim Sintern mit Laserstrahlung auf temperaturempfindlichen Substraten mit unterschiedlichen Absorptionsspektren mit dem Ziel der Entwicklung eines robusten und flexiblen Prozesses zur Herstellung großflächiger MID-Bauteile
2. Reduktion der Sinterzeit auf wenige Sekunden bei vergleichbaren oder besseren elektrischen und mechanischen Eigenschaften, wie mit dem Standard-Konvektionsprozess erzielt werden.
3. Untersuchung und Gegenüberstellung einer Silbernanopartikelinte und einer kostengünstigen Silbermikropartikel- bzw. Core-Shell-Paste hinsichtlich der erzielbaren elektrischen und mechanischen Eigenschaften der Leiterstrukturen
4. Durchführung von Zuverlässigkeitsuntersuchungen und Identifikation von Wechselwirkungen zwischen Sinterung und Langzeitverhalten

3 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisdarstellung

Im Rahmen des durchgeführten Forschungsprojekts wurde die Sinterung mittels Laserbestrahlung gedruckter Strukturen untersucht. Hierbei wurden mit dem Aerosol-Jet Verfahren und einem Dispensersystem Silbernanopartikelintinten und Silbermikropartikelpasten verdruckt. Als Alternative wurden zusätzlich Versuche mit einer kostengünstigen Core-Shell Paste durchgeführt. Beim Aerosol-Jet Verfahren werden niedrigviskose sowie hochviskose Tinten bis 2500 mPas mit einem Arbeitsabstand zwischen Düse und Substrat von bis zu 10 mm auf das Substrat aufgebracht. Somit ist dieses Verfahren sehr gut geeignet, um Leiterbilder bzw. Flächen auf räumlichen Schaltungsträgern zu erzeugen. Beim Dispensverfahren handelt es sich um ein berührendes Verfahren, bei welchem hochviskose Pasten verdruckt werden können. Als alternative Verdichtungsmethode wurde die Laserbestrahlung untersucht. Der Schwerpunkt lag hierbei auf der erzielten spezifischen Leitfähigkeit sowie der Haftfestigkeit. Die genaue Vorgehensweise und die Beziehungen zwischen den einzelnen Arbeitspaketen sind in Abbildung 1 dargestellt. Die Arbeitspakete 3 und 4 finden hierbei immer parallel zum Arbeitspaket 2 statt. Die Charakterisierung der erzeugten Leiterstrukturen sowie die thermische Prozessbetrachtung sind essentiell zur Findung der geeigneten Laserparameter. Im Folgenden werden die im Rahmen der Arbeitspakete durchgeführten Arbeiten und Versuche sowie die eingesetzten Materialien, Messtechniken und Systeme detailliert beschrieben.

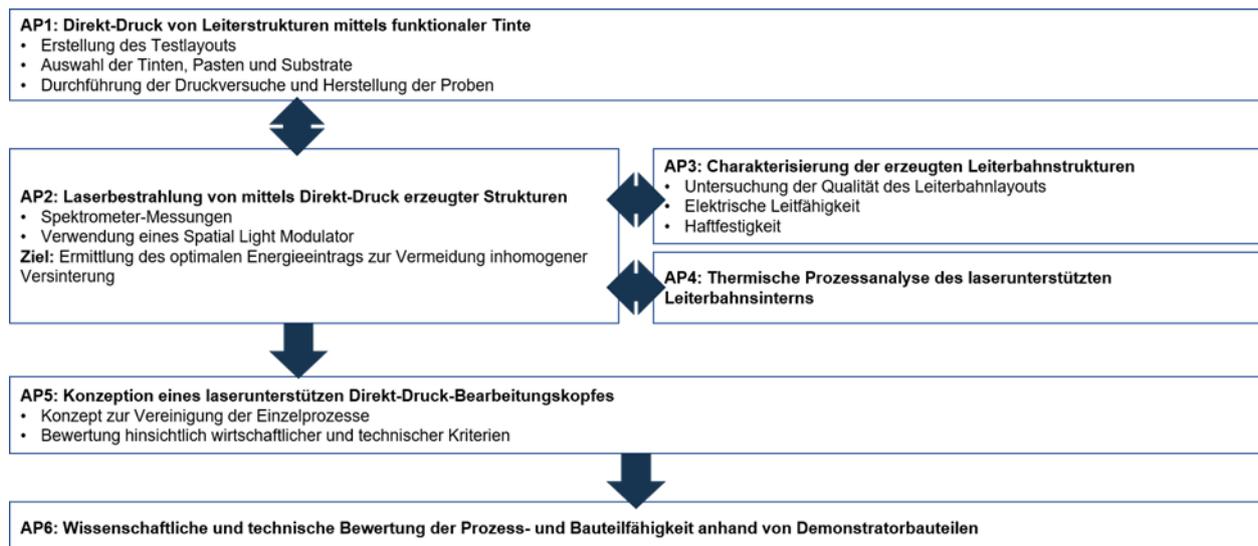


Abbildung 1: Arbeitsplan und Vernetzung der Arbeitspakete

3.1 AP1: Direkt-Druck von Leiterstrukturen (FAPS)

Ziele:

Materialauswahl und Definition der Druckstrukturen sowie Druck mittels digitaler Druckverfahren Aerosol-Jet und Dispensersystem

3.1.1 Materialien

Die Materialauswahl fand gemeinsam mit dem Projektbegleitenden Ausschuss beim Kick-Off Meeting am 07.12.2018 am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS) statt. Hauptkriterien für die Auswahl der Substrate war neben der Branchenrelevanz für die gedruckte Elektronik auch unterschiedliche Temperaturbeständigkeiten und

Absorptionsspektren um den Einfluss der Laserbestrahlung auf das Substrat genauer analysieren zu können. Zur Ermittlung der Absorptionsspektren wurden in AP 2 die ausgewählten Substrate und Tinten- bzw. Pastenwerkstoffe mittels UV-NIR-Spektroskopie untersucht. Die spritzgegossenen Substratmaterialien wurden extern bei der Firma Röchling beschafft und auf 60 mm x 60 mm große Platten zugeschnitten. Bei der Silbermikropartikelpaste und der Silbernanopartikel-tinte handelt es sich um die am Lehrstuhl FAPS hauptsächlich verwendeten Druckmaterialien. Eine kostengünstige Core-Shell-Paste wurde von der Firma Eckart GmbH zur Verfügung gestellt. Im Folgenden werden die chemischen Eigenschaften der verwendeten Materialien noch genauer erläutert.

Silbermikropartikelpaste WIK20487-36A der Firma Henkel

Die verwendete Dispenspaste wird bei der Firma Henkel unter der Bezeichnung „WIK20487-36A“ vertrieben. Bei dieser Paste handelt es sich um eine elektrisch leitfähige Paste, deren gute elektrische Eigenschaften auf einem hohen Silberanteil beruhen. Die Silberpartikel sind zusammen mit Lösungsmitteln in eine Thermoplastmatrix eingebettet, sodass eine hochviskose Masse vorliegt. Die Paste eignet sich sowohl für die Versinterung mittels Heißluftofen als auch für die Verdichtung durch infrarote Strahlung. Zur Versinterung gedruckter Strukturen im Heißluftofen werden die Proben, ab einer Schichtdicke von mehr als 20 µm, jeweils für 10 Minuten zuerst bei 60 °C und anschließend bei 110 °C gelagert. Eine Aufschlüsselung der relevanten Herstellerangaben wird in Tabelle 1 gegeben.

Tabelle 1: Materialeigenschaften der Silbermikropartikelpaste WIK20487-36A der Firma Henkel

	Viskosität in Pas	Festkörperanteil in %	Flächenwiderstand in mOhm/sq/mil
Wert	26	≈ 75	15 - 16

Silbernanopartikel-tinte PG-007 der Firma Paru

Für die Aerosol-Jet Druckversuche wurde die Silbernanopartikel-tinte PG-007 der Firma Paru verwendet. Für den optimalen Einsatz im Aerosol-Jet werden hierfür zwei Tinten im Verhältnis 3:1 vermischt. MOP mit einer Viskosität von 51 mPas. und EG mit 40 mPas. Insgesamt enthält die verwendete Tintenmischung einen Silberanteil von 40 – 80 wt. %, einen Lösemittelanteil aus Ethylene glycol und 1-Methoxy-2-propanol von jeweils 5 – 40 wt. % und Binder von 0,1 – 10 wt. %. Eine weitere Auflistung relevanter Parameter ist in Tabelle 2 zu finden.

Tabelle 2: Materialeigenschaften der Silbernanopartikel-tinte Paru PG-007

	Flächenwiderstand in mOhm/sq/mil 10 min @ 150°C	Haftfestigkeit nach DIN EN ISO 2409	Viskosität in mPas
MOP	6,9	Gt 0	51
EG	3,5	Gt 0	40

Core-Shell-Paste VP 71529/G der Firma Eckart GmbH

Neben der Silbermikropartikelpaste wurde für Versuche eine kostengünstigere Core-Shell-Paste der Firma Eckart GmbH verwendet. Ebenso wie bei der Silberpaste sind die silberummantelten Kupferpartikel zusammen mit Lösungsmitteln in einer Thermoplastmatrix eingebettet, um eine

höhere Viskosität zu erzielen. Die Paste enthält einen Kupferanteil zwischen $\geq 50 - \leq 100$ wt. %, 1-Butoxy-2-propanol $\geq 10 - <20$ wt. % und einem Silberanteil von $\geq 10 - <20$ wt. % Da es sich hierbei um eine Versuchspaste handelt, liegen keine offiziellen Werte hinsichtlich der erzielbaren elektrischen Leitfähigkeit sowie Haftfestigkeit vor. Zur Sinterung empfiehlt der Hersteller die Wärmeeinbringung mittels Konvektion für mindestens 10 Minuten.

Substratmaterial ABS matt der Firma Röchling

Der Werkstoff „ABS“ oder auch vollständig Acrylnitril-Butadien-Styrol genannt, ist ein Vertreter der Thermoplaste und im speziellen der Terpolymere [1]. ABS besteht aus der Mischung des Polymers SAN und einer Zumischung von Butadien-Kautschuk. Der Kautschukanteil im ABS führt bei geringen Temperaturen zu ausgeprägtem zähen, und bei hohen Temperaturen zu verbleibendem steifen Materialverhalten [2]. Jedoch verliert der Kunststoff aufgrund des Kautschuks in der Regel seine Transparenz und muss somit eingefärbt werden. ABS bietet ein weitreichendes Einsatzspektrum, da durch verschiedene Mischungsverhältnisse der enthaltenen Bestandteile die Werkstoffeigenschaften stark beeinflusst werden können [1]. Verwendung findet der technische Thermoplast unter anderem bei der Herstellung von Sichtbauteilen im Fahrzeuginnenraum [3]. Als thermoplastischer Werkstoff eignet sich ABS für die Verarbeitung mittels Spritzgießen oder durch Extrusionsformen, was in beiden Fällen eine kostengünstige Großserienproduktion ermöglicht. Die Verarbeitungsmöglichkeiten und der hohe elektrische Oberflächenwiderstand machen ABS zu einem vielversprechenden Werkstoff, um kostengünstig gedruckte Elektronik darauf zu applizieren.

Substratmaterial PC-ABS der Firma Röchling

Der Werkstoff „PC-ABS“ ist ein Gemisch - auch Blend genannt - aus den beiden Werkstoffen Polycarbonat und Acrylnitril-Butadien-Styrol. Dieser Werkstoff kombiniert, je nach Mischungsverhältnis unterschiedlich ausgeprägt, eine Reihe von Eigenschaften, welche bereits die beiden Grundwerkstoffe auszeichnen. So hat Polycarbonat gute mechanische Eigenschaften wie Formsteifigkeit, Warmformbeständigkeit und hohe Schlagzähigkeit in einem großen Temperaturbereich sowohl ober- als auch unterhalb der Raumtemperatur [2]. Acrylnitril-Butadien-Styrol zeichnen aus, dass sich die Oberfläche galvanisieren lässt und dass eine hohe Verträglichkeit mit vielen verfügbaren Thermoplasten besteht [3]. Die Mischung der beiden Werkstoffe ergibt einen Werkstoff mit hoher Zähigkeit und Warmformbeständigkeit, der sich aufgrund seiner geringen Schmelzviskosität sehr gut verarbeiten lässt. Der thermoplastische Werkstoff wird größtenteils mittels Spritzgussverfahren und in Sonderfällen auch durch Extrusion verarbeitet [3]. Hauptanwendung des Werkstoffes sind Sichtbauteile innerhalb des Fahrzeuginnenraums, aber der Werkstoff findet auch als Gehäusewerkstoff von Geräten der Informationstechnologie Verwendung. PC-ABS eignet sich aufgrund seiner thermischen Eigenschaften besonders für den Einsatz bei hohen oder tiefen Temperaturen [1].

Glas Borosilikat (Fensterglas)

Bei dem verwendeten Glas handelt es sich um ein sogenanntes Borosilikatglas. Dieses Werkstoffmaterial zeichnet sich insbesondere durch seine herausragende chemische und thermische Beständigkeit aus. Die chemische Beständigkeit gegenüber Säuren, schwachen Laugen und organischen Lösungsmitteln ist auf die Wechselwirkung dieser Flüssigkeiten mit dem Glasnetzwerk zurückzuführen. Bestandteile der Flüssigkeit tauschen sich in der Kontaktschicht mit dem Glas aus und es bildet sich eine Kieselgelschicht, welche den chemischen Angriff bremst oder ganz aufhält. Die gute thermische Beständigkeit beruht insbesondere auf der

vergleichsweise geringen thermischen Ausdehnung des Glases. Dies kommt vor allem bei einem Temperaturgradienten innerhalb des Materials zum Tragen, da sich im Werkstoff nur geringe Eigenspannungen aufgrund des Temperaturunterschieds ausbilden. Aufgrund der idealen Oberfläche wurde Glas für die ersten Druckversuche als Substratmaterial eingesetzt. Hauptaugenmerk für die Lasersinterung liegt jedoch auf den temperaturempfindlichen Substraten ABS und PC-ABS.

3.1.2 Druckprozesse

Im Folgenden werden die beiden am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik verwendeten Druckverfahren, der Aerosol-Jet Prozess und der Dispensprozess erläutert und die verwendeten Anlagen der Firma Neotech-AMT und Musashi genau vorgestellt.

Aerosol-Jet

Der technische Aufbau des Aerosol-Jets, wie in Abbildung 2 dargestellt, untergliedert sich in vier Funktionseinheiten: dem Tintenbehälter, dem Atomizer, dem Virtual Impactor und dem Druckkopf. Im Atomizer werden die Aerosolpartikel erzeugt, indem ein beschleunigtes Trägergas (Stickstoff) über ein Rohr des Tintenbehälters geleitet wird. Es entsteht ein Sog, der Tinte aus dem Tintenbehälter über ein Steigrohr entlang, nach oben fließen und in bis 5 µm große Tröpfchen zerstäuben lässt. Zu große Partikel fallen in den Tintenbehälter zurück und die restlichen, noch im Trägergas dispergierten Partikel, werden zum Virtual Impactor geleitet. Dieses Verfahren, das pneumatische Zerstäuben, wird für hochviskose Tinten genutzt. Für Tinten geringer Viskosität (bis 30 mPas) wird auf einen Ultraschallzerstäuber zurückgegriffen [4].

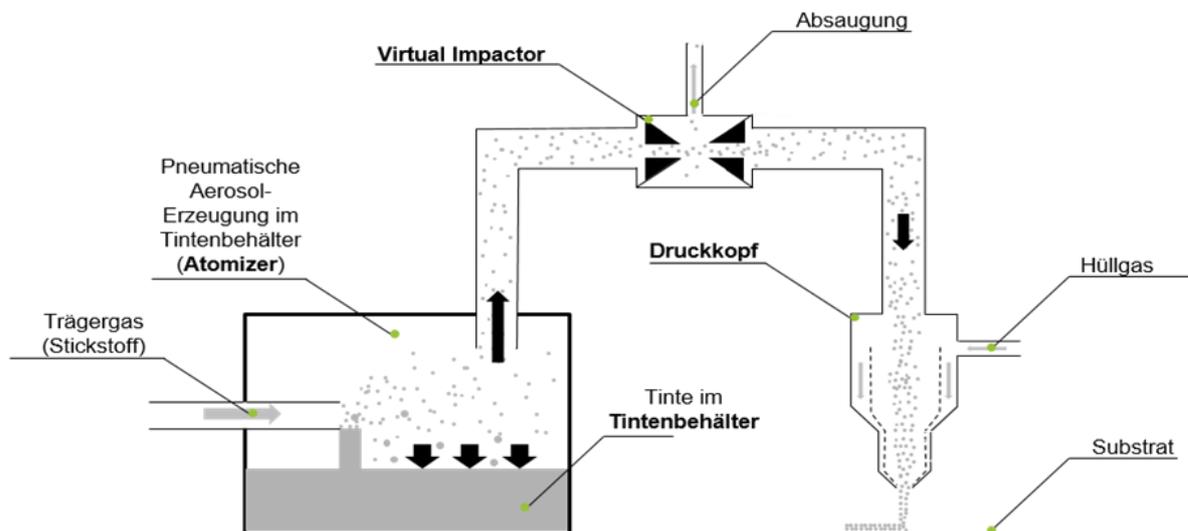


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Aerosol-Jet Druckprozesses nach [8]

Der Virtual Impactor fungiert als Absaugeinrichtung, welches überschüssiges Trägergas extrahiert. Der zum Virtual Impactor zuströmende Gasstrom wird durch die erste Verengung geleitet und dadurch beschleunigt. Im Spalt zwischen den beiden Verengungen wird durch Unterdruck das überschüssige Trägergas abgeführt. Auch zu kleine Partikel gelangen in die Absaugung, wenn deren Impuls nicht ausreicht, um auf der verengten Bahn zu bleiben. Nach

dem Virtual Impactor wird das homogene Aerosol mit Tröpfchen zwischen 3 μm und 4 μm zum Druckkopf weitergeleitet. Im Druckkopf wird durch Hinzuführung eines Schutzgases der Tintenstrahl beschleunigt und fokussiert. Außerdem reduziert das Schutzgas die Verschmutzung der Düse. Der aus der Düse entweichende Tintenstrahl kann durch einen Shutter unterbrochen werden. Durch einen möglichen Arbeitsabstand von bis zu 10 mm handelt es sich somit um ein kontaktloses Verfahren [5–8].

An dieser Stelle soll kurz auf die wesentlichen Einflussfaktoren des Aerosol-Jet Prozesses eingegangen werden. Das Substrat gibt maßgebliche Rahmenbedingungen für das spätere Aushärten der gedruckten Struktur vor. Aus dem Ausdehnungskoeffizienten (CTE) und der Wärmeformbeständigkeit ergibt sich die maximale Aushärtetemperatur durch Konvektion. Für die Qualität des Druckbildes spielen im Substrat-Tinten-Verhältnis vor allem die Oberflächeneigenschaften des Substrates und die Tinteneigenschaften eine große Rolle. Durch die Prozessführung kann das Endergebnis optimiert werden. Steuergrößen sind die Schichtanzahl, das Drucklayout, die Aushärtebedingungen, der Abstand der Düse zum Substrat und etwaige Oberflächenbehandlungen. Möglichst konstante Umgebungsbedingungen stellen die Grundlage dafür da. Im Aerosol-Jet System kann durch die Prozesssteuereinheit (PCM) und die Geometrie der Düse, die Breite des austretenden Aerosolstrahls definiert werden. Hierfür sind die Gasströme aus Zerstäuber, Absaugung und Schutzgas im Verhältnis zu betrachten. Das Handhabungssystem nimmt hauptsächlich durch die Verfahrensgeschwindigkeit und Verfahstrategie Einfluss auf die Druckqualität. Im Gesamtzusammenhang beeinflussen alle fünf Einflussfaktoren die elektrische Leitfähigkeit und die Haftfestigkeit der gedruckten Strukturen. Ferner ist jedoch festzuhalten, dass teilweise unbekannte Wechselwirkungen zwischen den Einflussparametern und dem Prozessergebnis die Komplexität des Druckprozesses erhöht [9, 10].

Am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik wird für das Projektvorhaben das Aerosol-Jet Verfahren der Firma Optomec genutzt. Hierfür steht die Anlage AJ 15XE, wie in Abbildung 3 gezeigt, des Projektpartners Neotech AMT zur Verfügung. Die Anlage verfügt über ein 5-Ach-System, welches einen dreidimensionalen Druck ermöglicht. Der maximale Verfahrweg umfasst einen Raum von 650 mm – 450 mm – 250 mm (X-Y-Z-Achse).



Abbildung 3: 5-Achs System AJ15XE der Firma Neotech mit Aerosol-Jet Einheit der Firma Optomec

Dispensersystem

Unter den Drucktechniken nimmt das Dispensdruckverfahren eine bedeutende Stellung ein, da dieses Verfahren die Verarbeitung von leitfähigen Pasten und hochviskosen Materialien ermöglicht [11]. In Abbildung 4 ist der schematische Aufbau und Ablauf eines Dispensprozesses dargestellt.

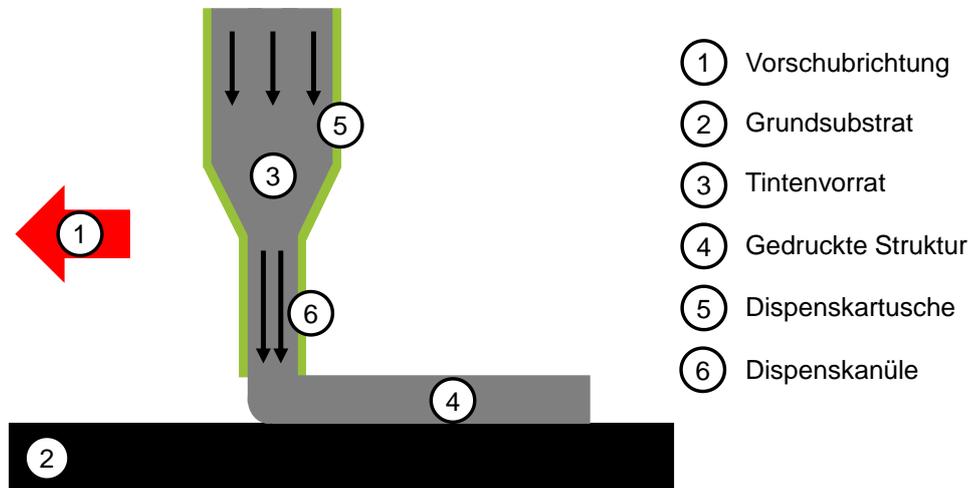


Abbildung 4: Schematischer Aufbau und Darstellung des Dispensprozesses

Beim Dispensdruckverfahren handelt es sich um einen direkten Druckprozess, bei welchem die leitfähige Tinte unmittelbar an den Stellen aufgetragen wird, wo diese benötigt wird. [12] Die Tinte befindet sich in einer Kartusche, die als Materialdepot fungiert. An der Kartusche ist an einem Ende eine pneumatische beziehungsweise eine mechanische Fördereinrichtung für die Tinte befestigt. An der gegenüberliegenden Kartuschenseite befindet sich die Dispenskanüle, durch welche die leitfähige Paste gefördert wird. Dispenskanülen gibt es mit diversen unterschiedlichen Innendurchmessern und auch Längen am Markt zu erwerben, um eine optimale Anpassung des Druckprozesses erreichen zu können. Dabei muss beachtet werden, dass mehr Material gefördert wird, wenn der Innendurchmesser größer, beziehungsweise wenn die Kanülenlänge kürzer gewählt wird. Einen weiteren maßgeblichen Einfluss auf den Druckvorgang hat der Abstand zwischen Kanülenende und Substratoberfläche. Dieser muss beim Drucken immer konstant gehalten werden, um ein Abheben der Tinte bei zu großem Abstand oder eine Kollision der Kanüle mit dem Grundsubstrat bei zu kleinem Abstand zu vermeiden. Um klar definierte und reproduzierbare Strukturen drucken zu können, ist es notwendig, neben der Vorschubgeschwindigkeit des Dispensdruckers auch das verdruckte Tintenvolumen anzupassen. Das geförderte Tintenvolumen kann neben der Wahl der jeweiligen Dispenskanülengeometrie zusätzlich durch Veränderung des Pneumatikdrucks oder der Spindeldrehzahl der Fördereinrichtung beeinflusst werden. Das Dispensdruckverfahren ermöglicht ein schnelles Aufbringen der gewünschten Strukturen, ohne dass eine Druckschablone angefertigt werden muss [13]. Im Gegensatz zum Inkjetverfahren können mittels Dispensdruck neben planaren und flexiblen Materialien auch dreidimensional geformte Bauteile mit einer gedruckten Struktur versehen werden. Die zu fertigenden Strukturen werden in Vektorpfade zerlegt, die anschließend mit der auf einem Dreiachsportalroboter befestigten Dispenskanüle abgefahren werden [13]. Um eine höhere Leitfähigkeit der gedruckten Struktur zu realisieren, besteht die Möglichkeit eine Struktur mehrfach zu dispensen, um dadurch eine höhere Tintenmenge zu applizieren. Am Lehrstuhl FAPS werden sowohl die Silbermikropartikelpaste als auch die Core-Shell-Paste mittels

des Präzisionsdispensersystem Musashi „Shotmaster 300“ auf das Substrat aufgetragen. Diese Anlage ist ein sogenanntes Portaldispensersystem mit drei Achsen, bei dem der Dispenskopf in X- und Z-Richtung verfahren werden kann. Die Bewegung entlang der Y-Richtung wird vom beweglichen Werkstücktisch ausgeführt. Insgesamt umfasst der Arbeitsraum, den diese Maschine abdecken kann, einem Quader mit den Kantenlängen 300 mm x 300 mm x 80 mm (X/Y/Z). Für den Dispensprozess kann die Vorschubgeschwindigkeit im Bereich zwischen 1 mm/s bis 99 mm/s je nach Bedarf frei gewählt werden. In Abbildung 5 ist das verwendete Präzisionsdispensersystem Musashi "Shotmaster 300" mit allen relevanten Bauteilen zu sehen.

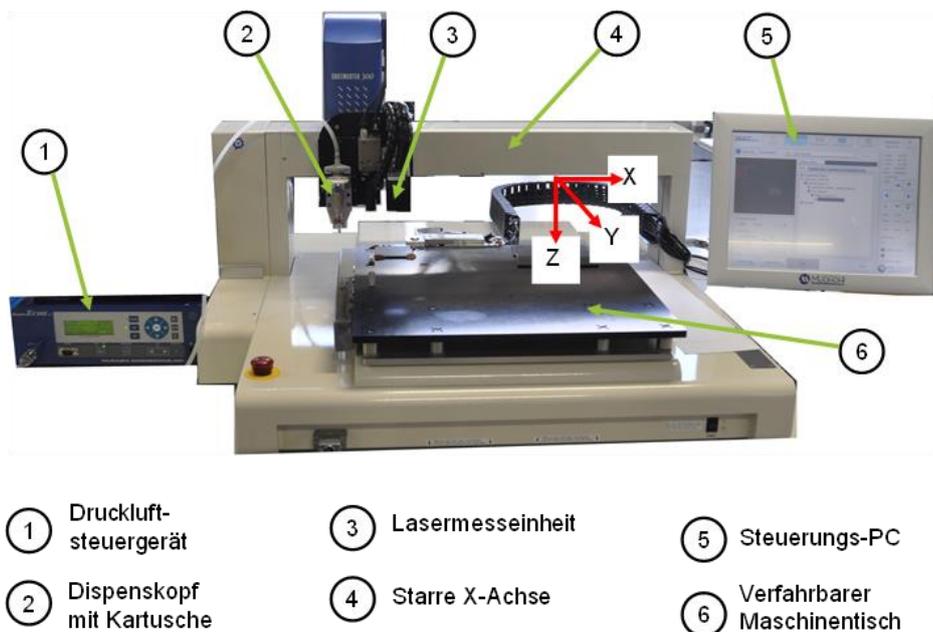


Abbildung 5: Präzisionsdispensersystem Musashi Shotmaster 300

Um die Paste in der montierten Dispenskartusche in Richtung Substrat fördern zu können, verfügt die Maschine über ein Druckluftsteuergerät. Mittels dieses Steuergeräts werden Druckimpulse erzeugt, welche am Pastenvorrat angelegt werden. Der Überdruck bewirkt die Förderbewegung der Paste durch die Dispensnadel auf das Grundsubstrat. Wird bei der Verfahrbewegung an entsprechender Stelle Material auf dem Substrat benötigt, so wird ein zuvor festgelegter Druck in die Kartusche eingeleitet, andernfalls wird der Druck unterbrochen. Der einstellbare Druck am Druckluftsteuergerät kann zwischen 30 kPa und 400 kPa gewählt werden. Für sehr niedrigviskose Materialien besteht zusätzlich die Möglichkeit, mittels Unterdrucks ein Austreten aus der Dispensnadel zu hindern, wenn keine Bedruckung erforderlich ist. Um die Position der auf die Kartusche aufgeschraubten Dispensnadel bezüglich deren exakter Lage und Höhe bestimmen zu können, verfügt das Präzisionsdispensersystem über eine entsprechende Messeinrichtung. Die zu realisierenden Druckstrukturen werden mittels der herstellereigenen CAD-Software „MuCAD“ erstellt, welche die Geometriedaten anschließend in ein maschinenlesbares Programm umwandelt. Die Geometrierstellung erfolgt entweder über Abrufen von vorhandenen Zyklen oder durch inkrementelle Programmierung von Linien und Kurven. Für die Programmerstellung sind neben den Geometriedaten auch Parameterangaben zum Werkstücknullpunkt, zur Verfahrgeschwindigkeit und zum Arbeitsabstand zwischen Dispensnadel und Substrat zu machen. Zur Detektion von Höhenabweichungen am zu bedruckenden Grundsubstrat ist das Präzisionsdispensersystem mit einer Lasermesseinheit

ausgestattet. Die Lasermesseinheit ist fest am Dispenskopf befestigt und ermöglicht das Vermessen der tatsächlichen Geometrie des Grundsubstrats bezüglich Höhenabweichungen der Substratoberfläche. Dazu wird das Werkstück vor dem Druckprozess entlang der zu druckenden Struktur abgefahren und Abweichungen werden entsprechend in das Druckprogramm übernommen. Entfällt diese Vermessung trotz vorhandener Höhenabweichungen, wird der Druckprozess maßgeblich durch den inkonstanten Abstand zwischen Dispensnadel und Werkstückoberfläche beeinflusst. Bei zu großem Abstand kommt es zum Abheben und im Extremfall zu einer Unterbrechung der gedruckten Bahn. Im Falle eines zu kleinen Abstandes kann es zu einer Kollision von Dispensnadel und Substratoberfläche kommen, die zur Beschädigung von Werkstück oder auch der Maschine führen kann.

3.1.3 Geometrie und Druckparameter

Zur Eigenschaftsvalidierung der mechanischen Haftfestigkeit und der elektrischen Leitfähigkeit werden unterschiedliche Anforderungen an die gedruckte Struktur gestellt. Die Leitfähigkeit wird an dünnen Liniengeometrien und die Haftfestigkeit an flächigen Strukturen ermittelt. Hierfür ist es unabdingbar, zwei Varianten an Druckgeometrien zu entwerfen und diese anschließend zu beurteilen. Um die Eigenschaften mit den am Lehrstuhl FAPS zur Verfügung stehenden Messmitteln hinreichend validieren zu können, müssen Mindestdimensionen der gedruckten Struktur erreicht werden. Da die zur Verfügung stehenden Substrate eine Abmessung von 60 x 60 mm aufweisen, ist es notwendig, die zwei verschiedenen Druckgeometrien auf getrennten Proben aufzubringen. Die Leitfähigkeit der gedruckten Struktur kann nicht direkt gemessen werden, sondern lässt sich mit Hilfe einer Vierpunktmessung im Vierleiteraufbau ermitteln. Dabei wird die Leitfähigkeit aus Messstreckenlänge, Linienwiderstand und Linienquerschnitt errechnet. Für die Vierpunktmessung wird eine Liniengeometrie mit einer Länge von mindestens 20 mm benötigt. Des Weiteren lässt sich die Querschnittsfläche an der Linienstruktur durch ein Konfokalmikroskop vermessen. Die vorher festgelegte Struktur weist eine Linienlänge von 30 mm auf und wird an beiden Linienenden jeweils durch eine 3 x 3 mm große Rechteckgeometrie begrenzt. Um die Möglichkeit von nachträglichen Messungen zu haben, werden auf jedes Substrat jeweils vier identische Strukturen aufgebracht, an denen die Messung der Leitfähigkeit möglich ist. Die weitere Eruiierung der Haftfestigkeit der gedruckten Struktur auf dem Grundsubstrat erfolgt durch die Beurteilung mittels Gitterschnitttests nach DIN EN ISO 2409 [14]. In dieser Norm wird beschrieben, dass in Abhängigkeit der Strukturschichtdicke, ein Mehrschneidenmesser mit exakt festgelegtem Schneidenabstand verwendet werden muss. Das Mehrschneidenmesser wird zweimal um 90 ° versetzt über die Prüfstelle gefahren und an der Stelle, an der sich die Schnitte kreuzen, erfolgt die Auswertung. Die Kraft, mit der die Schneiden über die gedruckte Struktur bewegt werden, muss so hoch sein, dass die Struktur vollständig durchdrungen und auch das Grundsubstrat leicht angeritzt wird. Aufgrund der versetzten Schnitte und des vorliegenden Schneidenabstands am Mehrschneidenmesser wird eine Strukturgeometrie in Form eines Rechtecks benötigt, welches sehr dünn auf das Grundsubstrat appliziert wird. Die Maße für die Rechteckgeometrie werden mit einer Länge von 15 x 15 mm vereinbart und auf jede angefertigte Probe werden vier dieser Rechteckgeometrien aufgebracht. Die beiden Geometrien, welche zum Drucken am Dispensersystem festgelegt worden sind, sind in Abbildung 6 zu sehen.

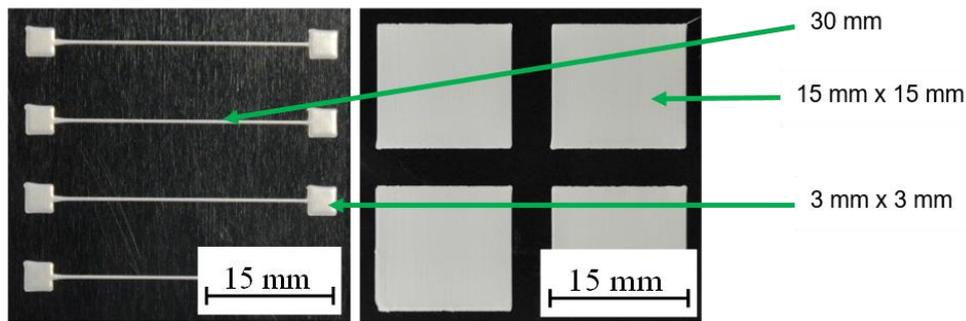


Abbildung 6: Finales Drucklayout für den Dispensprozess mit Linien zur Messung der Leitfähigkeit und Geometrie (links) und Flächen für Haftfestigkeitsuntersuchungen (rechts)

Zur Beurteilung der Qualität des Druckbildes wird abermals die Liniengeometrie herangezogen, welche bereits der Leitfähigkeitsuntersuchung dient. Da die Linie mittels einer einfachen Verfahrbewegung des Dispenserssystems aufgebracht wird, lassen sich Abweichungen der Druckqualität in Form von Höhen- und Breitenschwankungen leicht beurteilen. Um die Variationsmöglichkeiten zu reduzieren, werden vorab die Dispensnadel und die Wahl der Vorschubgeschwindigkeit anhand der Erfahrung vorangegangener Projekte und im Projektantrag definierten Leiterbahnbreiten zwischen 250 μm und 750 μm festgelegt. Die gewählte Dispensnadel „DPN-25G-1“ hat eine Länge von 12,7 mm bei einem Außendurchmesser von 0,51 mm. Der entsprechende Innendurchmesser der Dispensnadel beträgt 0,25 mm, was zu einer empfohlenen Distanz von 0,125 mm zwischen dem Nadelende und der Substratoberfläche führt. Nach Angaben des Dispensdruckerherstellers soll diese Distanz in etwa die Hälfte des Innendurchmessers der Dispensnadel betragen, um gute Druckergebnisse zu erzielen. Um den Arbeitsabstand während der gesamten Bearbeitung konstant zu halten, wird die Höhe des Grundsubstrats vor dem Bedrucken mittels eines Lasers vermessen und ermittelte Höhenabweichungen werden in der Maschinensteuerung korrigiert. Für die Druckversuche ist eine Vorschubgeschwindigkeit von 7 mm/s festgelegt worden, um die Druckzeit möglichst gering zu halten aber gleichzeitig eine hohe Druckgenauigkeit zu erzielen. Für die Silbermikropartikelpaste „WIK20487-36A“ wurde aufgrund der sehr hohen Viskosität ein Dispensdruck von 390 kPa gewählt und der Arbeitsabstand auf 0,115 mm verringert. Für die Core-Shell-Paste wurden die Parameter aufgrund der niedrigeren Viskosität deutlich angepasst. Anhand einer Parameterstudie ergaben sich bei gleicher Druckgeschwindigkeit und Dispensnadel ein Dispensdruck von 185 kPas und ein Arbeitsabstand von 0,130 mm. Die Werte, mit denen für die Silbermikropartikelpaste und Core-Shell-Paste eine stabile und qualitativ hochwertige Herstellung von Strukturen möglich ist, sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3: Verwendete Druckparameter mit dem Dispensersystem Musashi Shotmaster 300

	Dispensdruck in kPas	Dispensvakuum in kPas	Druckgeschwindigkeit in mm/s	Arbeitsabstand in mm
Silbermikropartikelpaste	390	0	7	0,115
Core-Shell-Paste	185	0	7	0,130

Das Layout für die Aerosol-Jet Versuche weicht minimal von den erzeugten Leiterstrukturen mit dem Dispensersystem ab. Hintergrund ist die deutlich längere Druckzeit aufgrund schmalere Strukturen mit dem Aerosol-Jet. Die Leiterbahnen haben hier eine Länge von 10 mm mit

1,5 mm x 2 mm Anschlusspads. Für den Tape-Test wurden Flächen mit einer Größe von 2 mm x 2 mm gedruckt. In Abbildung 7 ist das Layout für den Aerosol-Jet Druck dargestellt.

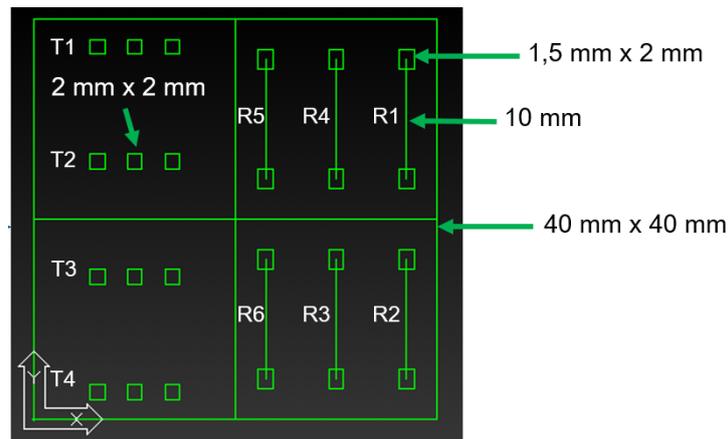


Abbildung 7: Finales Drucklayout für den Aerosol-Jet Prozess

Anhand vorliegender Erfahrungen mit der Silbernanopartikelintinte von Paru wurden folgende Parametereinstellungen an der Aerosol-Jet Anlage verwendet:

- Atomizer Gas: 880 sccm; Exhaust Gas: 1600 sccm
- VI: 1600 sccm; Sheath Gas: 370 sccm
- Düsendurchmesser: 0,635 mm

3.2 AP2: Laserbestrahlung von mittels Direkt-Druck erzeugten Strukturen (blz)

Das Laserstrahlintern wird mit einem Yb-dotierten Faserlasersystem mit einer Nennleistung von 200 W durchgeführt. Das System emittiert Laserstrahlung mit einer Wellenlänge von 1.070 nm im Dauerstrichbetrieb. Die Laserstrahlung besitzt ein gaußförmig verteiltes Intensitätsprofil. Über das Scannersystem intelliSCAN20 der Fa. Scanlab GmbH lässt sich der Laserstrahl unter Variation der Scangeschwindigkeit flexibel auf die Oberfläche der Proben umlenken. Der verwendete Versuchsstand inklusive des verwendeten Faserlasers mit der Bezeichnung YLR-200-SM-WC ist in Abbildung 8 dargestellt.

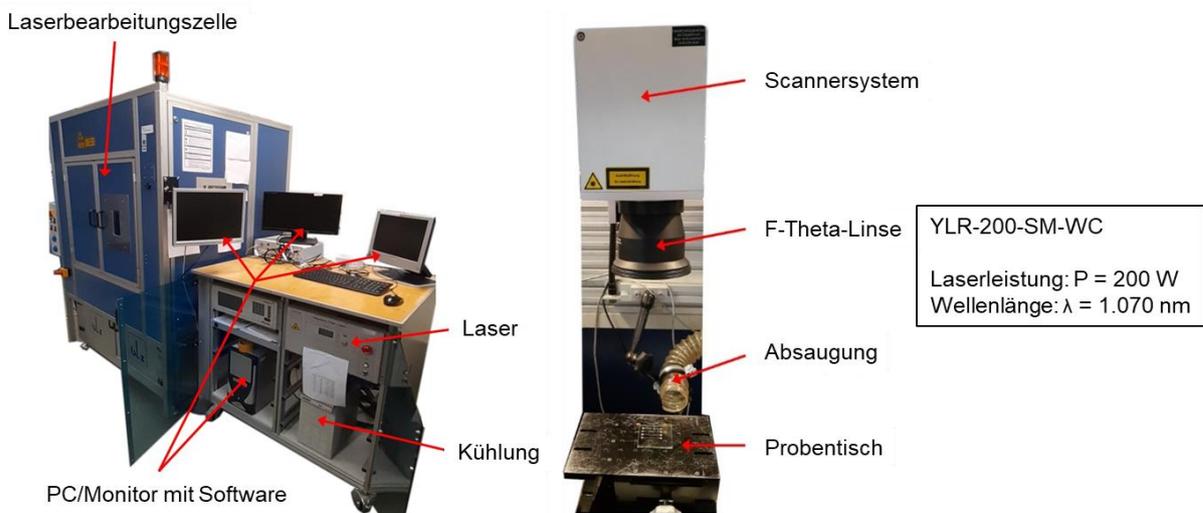


Abbildung 8: Faserlaser YLR 200 SM WC

3.2.1 Ermittlung der optischen Eigenschaften von Substrat- und Tintenwerkstoffen

Beim laserbasierten Sintern der silberpartikelhaltigen Tinten werden Teile der Laserstrahlung gestreut und transmittiert und treffen auf die Oberfläche des Substratmaterials. Abhängig von den optischen Eigenschaften des Substrats wird das Material unterschiedlich stark erhitzt, was wiederum das Sinterverhalten der leitenden Schichten beeinflusst. Zur Ermittlung der optischen Eigenschaften der Substrate ABS, PC-ABS und Glas wurden Spektrometer-Messungen im Wellenlängenbereich von 200 nm bis 1800 nm durchgeführt. Die Messungen wurden mit dem Spektrophotometer Lambda 9 der Fa. Perkin Elmer durchgeführt. Die Ergebnisse der Messungen zeigen einen Absorptionsgrad von ca. 15 % für ABS und ca. 95 % für PC-ABS bei Wellenlängen im nahen Infrarotbereich (940 nm bis 1070 nm), siehe Abbildung 9. Aufgrund der großen Probendicke der Werkstoffe wurde entlang des gesamten gemessenen Wellenlängenspektrums keine transmittierende Strahlung bei den polymeren Substraten detektiert. Das Referenzsubstratmaterial Glas transmittiert die Strahlung im gesamten gemessenen Spektrum relativ konstant bei ca. 95 %.

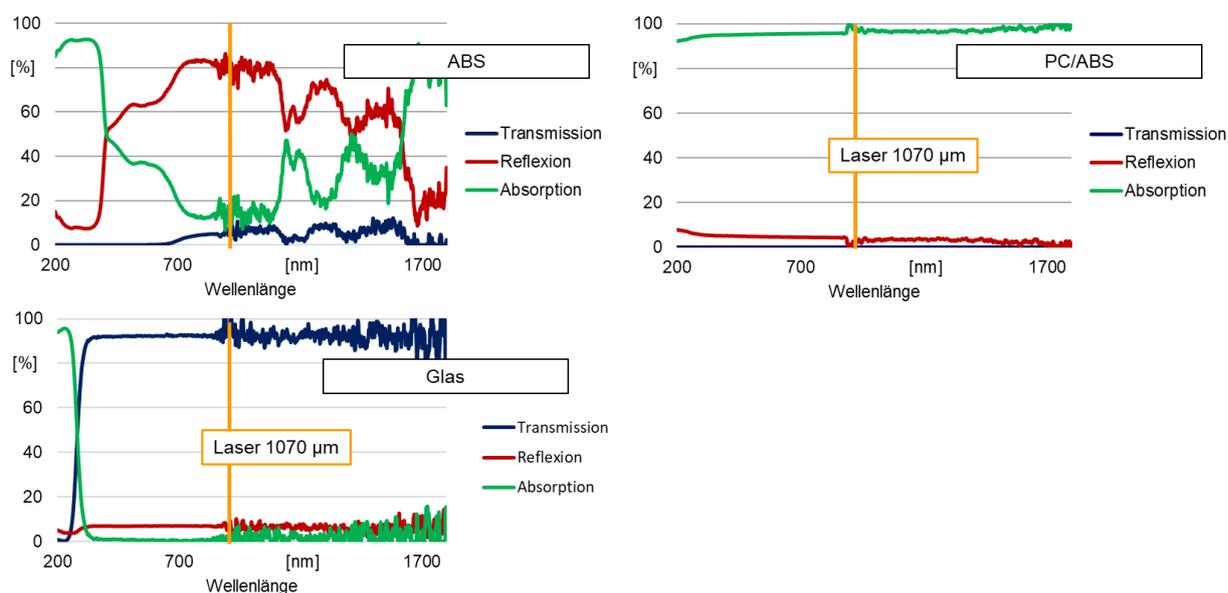


Abbildung 9: Spektrometer-Messungen der Substrate ABS (oben), PC-ABS (mitte) und Glas (unten)

Zur Ermittlung der optischen Eigenschaften der silberpartikelhaltigen Tinten- und Pastenwerkstoffe wurden Spektrometer-Messungen im Wellenlängenbereich von 200 nm bis 1800 nm mit einer Probendicke von je ca. 50 µm durchgeführt. Hierfür wurden die Tinten zunächst im getrockneten, ungesinterten Zustand optisch charakterisiert. Anschließend wurde eine Verdichtung und Sinterung der Tinten mittels Laserstrahlung durchgeführt und erneut hinsichtlich ihrer optischen Eigenschaften untersucht. Aus den Versuchen zur Charakterisierung der optischen Eigenschaften stehen die Ergebnisse der genannten silberpartikelhaltigen Werkstoffe zur Verfügung, siehe Abbildung 10.

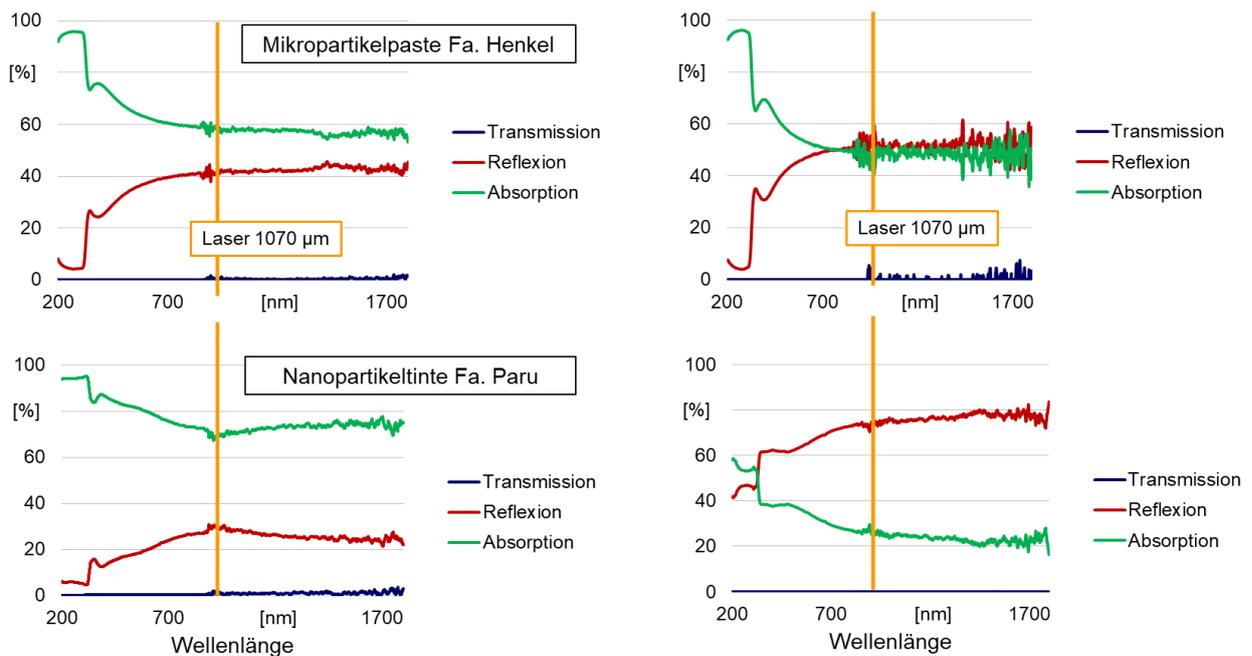


Abbildung 10: Spektrometer-Messungen der Silbermikropartikelpaste WIK20487 (oben) und Silbernanopartikeltinte Paru PG-007 (unten) im ungesinterten (links) und gesinterten (rechts) Zustand

Die Messung der optischen Eigenschaften der Silbermikropartikelpaste der Fa. Henkel zeigt einen Absorptionspeak von ca. 75 Prozent bei einer Wellenlänge von 355 nm sowie eine Reduzierung der Absorption um ca. 25 Prozent und eine Erhöhung der Reflexion um ebenfalls 25 Prozent mit steigenden Wellenlängen bis 1800 nm. Aufgrund der großen Probendicke konnte entlang des gesamten gemessenen Wellenlängenspektrums keine transmittierende Strahlung detektiert werden. Die Ergebnisse der Messungen der Nanopartikeltinte zeigen einen Absorptionsgrad von ca. 85 % bei einer Wellenlänge von 355 nm sowie eine Reduzierung der Absorption um ca. 25 Prozent und eine Erhöhung der Reflexion um ebenfalls 25 Prozent mit steigenden Wellenlängen bis 1800 nm.

Die Verwendung von Laserstrahlung mit Wellenlängen im nahen Infrarotbereich (940 nm bis 1070 nm) hat sich bei der Sinterung von silberpartikelhaltigen Tinten als effektiv erwiesen, da die geringere Absorption der silberpartikelhaltigen Tinten im Vergleich zur Laserstrahlung im sichtbaren Bereich (532 nm) einen gleichmäßigen Energieeintrag über die gesamte Dicke ermöglicht. Dies führt zu einer geringeren Porosität und einer höheren Leitfähigkeit der gesinterten Leiter. Ein vergleichbarer Effekt konnte bei Untersuchungen mittels silberpartikelhaltiger Tinten bestätigt werden [15]. Um eine thermische Schädigung des Partikelwerkstoffs zu verhindern und eine kontrollierte Sinterung mittels Laserstrahlung zu ermöglichen, wurde auf Grund der geringeren Absorption der Paste im IR-Wellenlängenbereich für die Bestrahlungsversuche ein Faserlaser mit einer Wellenlänge von 1070 nm ausgewählt.

Nach der Bestrahlung der Tinten mittels eines fokussierten Laserstrahls mit einem Fokusdurchmesser von 300 μm , 3 W Leistung am Werkstück und 150 mm/s Scangeschwindigkeit wurden erneut Spektrometer-Messungen durchgeführt und eine Abnahme der Absorption um ca. 10 % für die Mikropartikelpaste, sowie um ca. 60 % für die Nanopartikeltinte bei einer Wellenlänge von 1070 nm ermittelt, wie in Abbildung 10 dargestellt ist. Die Abnahme der Absorption bzw. Zunahme der Reflexion der Tinte während der Bearbeitung mittels Laserstrahl führt zu einer verringerten Energieeinbringung in die Leiterstruktur bei mehreren Überfahrten des Laserstrahls. Dementsprechend erfolgen bei einer quasi-simultanen (über die

Wegstrecke hinweg gleichen) Bestrahlung der Leiterstruktur die in den Tinten ablaufenden Sinterprozesse, wie beispielsweise die Bildung von Sinterbrücken, mit einer reduzierten Geschwindigkeit. Durch eine Anpassung der Bestrahlungsparameter, beispielsweise durch eine Erhöhung der Leistung oder Verringerung der Scangeschwindigkeit des Laserstrahls, konnte die Änderungen des Absorptionsverhaltens der Tinten während der Bearbeitung berücksichtigt werden.

3.2.2 Einstellung des Strahlprofils mittels räumlichem Lichtmodulator (SLM)

Zur flexiblen Einstellung der Intensitätsverteilung des Laserstrahls über den Querschnitt wurde ein räumlicher Lichtmodulator (SLM) vom Typ X13139-09 in den Strahlengang integriert. Dadurch konnten neben einem gaußförmig verteilten Intensitätsprofil, welches in der Mitte des Strahlquerschnitts eine deutlich höhere Intensität aufweist und dadurch zu einer ungleichmäßigen Energieeinbringung führt, unterschiedliche Strahlprofile hinsichtlich der Auswirkungen auf die Leiterstrukturen untersucht werden, siehe Abbildung 11.

Anhand der verwendeten Strahlprofile wurden die Ergebnisse ausgewertet und die Leiterstrukturen charakterisiert. Trotz der flexiblen Einstellung des Strahlprofils konnte jedoch kein wirkortgerechter Energieeintrag in die Leiterbahn ermöglicht werden, da der Fokusedurchmesser nicht auf die Größe der Leiterbahnbreite reduziert werden konnte. Der Grund hierfür ist auf die Divergenz des Laserstrahls und den zusätzlichen Lichtweg zurückzuführen, den der Laserstrahl aufgrund des SLM zurücklegen muss. Aufgrund des Fokusedurchmessers mit einer Größe >1 mm und der geringen Reflektion des Laserstrahls kam es bereits vorzeitig zu Substratschädigungen in den Randbereichen der Leiterstrukturen. Weiterhin kam es zu Einschränkungen bei der Beugung des einfallenden Laserstrahls in der ersten Beugungsordnung (sog. Beugungseffizienz), mit welcher das vorgegebene Strahlprofil abgebildet wird. Aufgrund der geringen Beugungseffizienz, die auf die Beschichtung des SLM zurückzuführen ist, kam es zu Limitationen bei der Auflösungsgrenze der Strahlprofile.

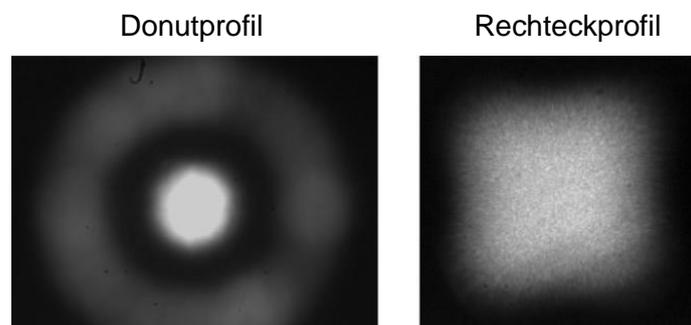


Abbildung 11: Verwendete Strahlprofile mit unterschiedlicher Intensitätsverteilung (a.u.)

Dennoch konnte der Einfluss der verwendeten Strahlprofile auf die Haftfestigkeit zwischen Tinte und Substrat untersucht werden. Aufgrund der größeren Querschnittsfläche des fokussierten Laserstrahls im Vergleich zur Querschnittsfläche des gaußförmigen Strahlprofils wurde die Konturgeometrie, die der Laserstrahl auf der Leiterfläche bestrahlt, angepasst. Dadurch konnte eine hinsichtlich der Intensitätsverteilung homogene Bestrahlung der Leiterflächen gewährleistet werden. Die Auswertung der Ergebnisse ist in Abschnitt 3.3 dargestellt. Hinsichtlich der hohen Anschaffungskosten war im Rahmen des Forschungsprojektes der Zukauf eines geeigneten, auf die Wellenlänge des Lasers abgestimmten SLM nicht sinnvoll.

3.3 AP3: Charakterisierung der erzeugten Leiterbahnstrukturen

3.3.1 Charakterisierung der geometrischen Gestalt und Qualität des Leiterbilds (FAPS)

Die Vermessung der Strukturen bezüglich deren geometrischer Dimensionen erfolgt durch das konfokale Laserscanning-Mikroskop „VK-X1000“ der Firma Keyence. Das Mikroskop verfügt über eine konfokale Lochblendenoptik mit zusätzlicher Fokusvariation [16]. Bei den vier verbauten Objektiven handelt es sich um Objektive mit einer jeweils 5-fachen, 10-fachen, 20-fachen und 50-fachen Vergrößerung. Neben der Optik des Mikroskops befindet sich an der Maschine ein elektrisch gesteuerter Objektstisch und ein Steuerungs-PC, der während der Messung die Bilddaten aufnimmt und den Messprozess steuert. Der Objektstisch kann sowohl in X-/ als auch in Y-Richtung um 100 mm verfahren werden. Entlang der Z-Achse kann die Messoptik in einen Höhenbereich von 0,7 Millionen Stufen verfahren werden bei einer Anzeigeauflösung von 0,5 nm. Dadurch werden hochgenaue Messungen von Geometrien bezüglich Strukturlänge und -höhe, aber auch der Oberflächenrauheit möglich. Neben dem Laserstrahl mit einer Wellenlänge von $\lambda = 404 \text{ nm}$ zum Bestimmen von Höheninformationen der Strukturen, gibt es noch eine Koaxialbeleuchtung und eine Ringbeleuchtung um hochauflösende Farbbilder der Struktur erzeugen zu können.

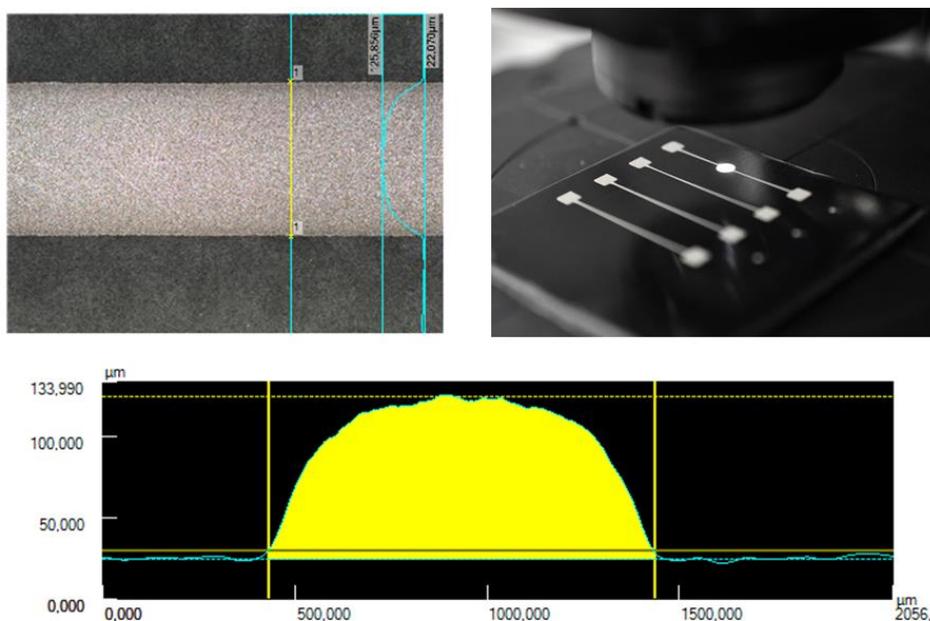


Abbildung 12: Exemplarischer Querschnitt einer erzeugten Leiterbahn (unten); Draufsicht der erzeugten Struktur (links oben) und Vermessung mit dem konfokalen Lasermikroskop Keyence VK-X1000 (rechts oben)

In Abbildung 12 ist exemplarisch der Querschnitt einer gedruckten Leitung dargestellt. Die Leiterbahnbreiten schwanken bei der Silbermikropartikelpaste zwischen $380 \mu\text{m}$ und $405 \mu\text{m}$ bei einer durchschnittlichen Höhe von $32 \mu\text{m}$. Mit dem Aerosol-Jet Verfahren und der Silbernanopartikelteinte werden Linienbreiten zwischen $360 \mu\text{m}$ und $420 \mu\text{m}$ bei einer durchschnittlichen Höhe von $10 \mu\text{m}$ erzielt. Die Schwankungen sind auf die unterschiedliche Rauheit und Oberflächenbeschaffenheit der Substrate zurückzuführen.

3.3.2 Ermittlung der elektrischen Eigenschaften der Leiterstrukturen (blz)

Zur Ermittlung des Ohm'schen Widerstandes der gesinterten Leiterbahn wird das digitale Nano-Ohmmeter 20024 der Fa. Pedranti Elio mit einer Vierpunktmessung eingesetzt, siehe Abbildung

13. Bei der Vierleiter-Messanordnung ist die Stromversorgung von der Widerstandsmessung durch Spannungsabfall getrennt. Der Spannungsabfall kann damit bei konstant eingebrachtem Stromfluss annähernd stromlos und somit größtenteils unabhängig von Kontakt- und Leitungswiderständen gemessen werden, wodurch eine genaue Ermittlung des Widerstandes R möglich ist. Der Widerstand R ergibt sich dabei als Quotient aus der Spannung U und der angelegten Stromstärke I . Die Messgenauigkeit des Geräts beträgt $\pm 0,06\%$ [17]. Durch Einbeziehung der dazugehörigen Querschnittsfläche der Leiterbahn ergibt sich die elektrische Leitfähigkeit.



Abbildung 13: Vierleitermessgerät Nano-Ohmmeter 20024 [17]

Der Ohm'sche Widerstand R eines metallischen Leiters ergibt sich aus dem spezifischen Widerstand ρ des Werkstoffes, der Länge l des Leiters und dem Querschnitt A zu:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad \text{Gleichung 1}$$

Die hierfür benötigte Querschnittsfläche wurde mit dem konfokalen Lasermikroskop VK der Firma Keyence ermittelt. Die Länge des Leiters ist durch den Abstand der beiden innenliegenden Messspitzen mit 3 mm vorgegeben.

Durch die laserbasierte Bestrahlung der Tinten- und Pastenwerkstoffe konnten für die verwendeten Substratwerkstoffe geeignete Bestrahlungsparameter zur Herstellung von elektrisch leitfähigen Strukturen ermittelt werden. Zur Ermittlung des elektrischen Widerstands der gedruckten und gesinterten Strukturen wurden Vierleiter-Messungen durchgeführt, um den Einfluss der Fehleranteile aus den Zuleitungen oder den Kontaktübergängen minimal zu halten. Der elektrische Widerstand wurde in Abhängigkeit des Leiterbahnquerschnitts und der Bestrahlungsparameter für die verwendete Mikropartikelpaste der Fa. Henkel, die Nanopartikelintinte der Fa. Paru und eine Core-Shell-Paste der Fa. Eckart GmbH untersucht.

Bei der Charakterisierung der elektrischen Eigenschaften der gedruckten Strukturen wurden zunächst die signifikanten Bearbeitungsparameter ermittelt. Dabei wurden die Laserleistung, die Scangeschwindigkeit, der Fokusbereich sowie die Anzahl der Überfahrten variiert, siehe Tabelle 4. Zur Ermittlung der Laserleistung am Werkstück wird das Thermosäulen-Laserleistungsmessgerät LM-10 der Fa. Coherent verwendet [18].

Tabelle 4: Bearbeitungsparameter zur Sinterung silberpartikelhaltiger Tinten

Parameter	Wert	Einheit
Laserleistung am Werkstück (P_L)	1; 2; 3	W

Parameter	Wert	Einheit
Scangeschwindigkeit (v)	20; 125; 250	mm/s
Fokusbildungsdurchmesser (d)	100; 175; 300	µm
Anzahl Überfahrten (n)	1; 4; 7	-

Um den Einfluss der verwendeten Parameter auf die Zielgrößen der elektrischen Leitfähigkeit zu bestimmen, wurde die Analyseverfahren der multiplen linearen Regression (MLR) angewandt. Die MLR erlaubt es, eine abhängige Variable (Zielgröße) durch mehrere unabhängige Variablen (Einflussgrößen) anhand eines mathematischen Modells auszudrücken. Mit Hilfe des Modells kann somit der Zusammenhang zwischen Einflussgrößen und Zielgröße für die gesamte Variation der Parameter dargestellt werden. Mit dem Bestimmtheitsmaß R^2 wird die Vorhersagegenauigkeit des Modells angegeben, das zur Beurteilung der Anpassungsgüte der Regression verwendet wird. Das Bestimmtheitsmaß gibt an, wie gut die Messwerte zu dem Modell passen und nimmt Werte zwischen 0 - 1 bzw. 0 - 100 % an. Dabei konnten für die Mikropartikelpaste der Fa. Henkel ein Bestimmtheitsmaß R^2 von 92,7 % und für die Nanopartikelteinte der Fa. Paru ein Bestimmtheitsmaß R^2 von 95,8 % ermittelt werden. Die signifikanten Einflussfaktoren der Bearbeitungsparameter auf die elektrische Leitfähigkeit sind in Abbildung 14 dargestellt.

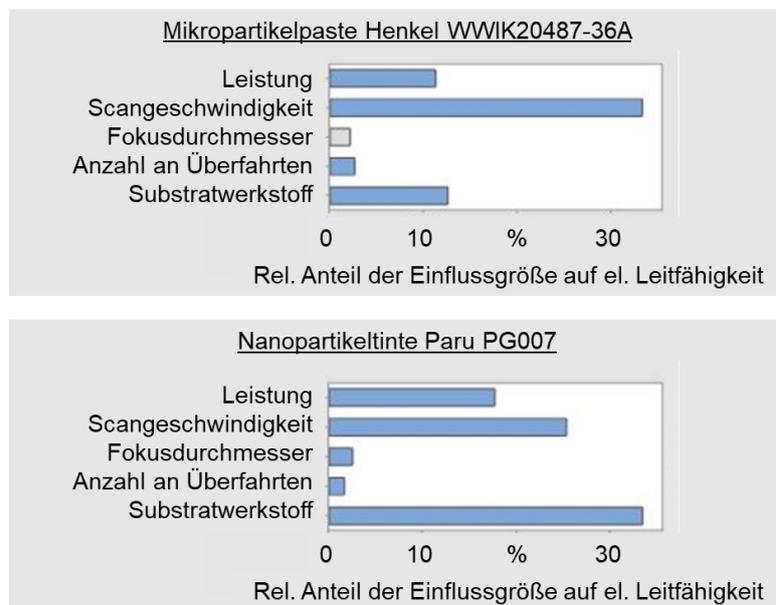


Abbildung 14: Signifikanz der Bearbeitungsparameter auf die elektrische Leitfähigkeit der Strukturen

Als signifikante Einflussfaktoren auf die elektrischen Eigenschaften der gedruckten Strukturen wurden die Laserleistung, die Scangeschwindigkeit und der Absorptionsgrad des Substratwerkstoffes im Wellenlängenbereich des Laserstrahls ermittelt. Mit zunehmendem Energieeintrag des Laserstrahls steigen die resultierenden Temperaturen im Tinten- bzw. Pastenwerkstoff und beschleunigen den Diffusionsprozess und damit die Sinterung der Mikrostruktur. Im Vergleich dazu haben die Intensitätsverteilung über den Strahlquerschnitt sowie die Anzahl der Überfahrten des Laserstrahls einen geringen Einfluss auf die elektrische Leitfähigkeit der Strukturen. Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Werkstoffkombinationen wird in den folgenden Versuchsreihen der Einfluss der

Bearbeitungsparameter auf die elektrische Leitfähigkeit (als Kehrwert des spezifischen Widerstandes) der Strukturen dargestellt.

Ergebnisse der Mikropartikelpaste WIK20487-36A

Die Bestimmung von Referenzwerten der elektrischen Leitfähigkeit der Mikropartikelpaste für ABS, PC-ABS und Glas erfolgt durch das Versintern der gedruckten Strukturen im Heißluftofen für jeweils für 10 Minuten zuerst bei 60 °C und anschließend bei 110 °C nach den Vorgaben aus dem Datenblatt der Fa. Henkel. Auf dem Glassubstrat konnte eine Leitfähigkeit von 3,0 MS/m gemessen werden, die gleichzeitig den höchsten Wert darstellt, der durch Ofensinterung mit der Henkel-Paste erreicht worden ist. Die Standardabweichung der ofengesinterten Glasproben beträgt 1,7 % um den Mittelwert der Leitfähigkeit. An ABS wurde mit 2,6 MS/m der zweithöchste Wert für die Leitfähigkeit bei den ofengesinterten Strukturen ermittelt. Die zugehörige Standardabweichung beträgt 3,9 %. Somit ist die Streuung um den Mittelwert bei ABS mehr als doppelt so groß wie bei den Glassubstraten. Dies lässt sich auf die unterschiedlichen Oberflächeneigenschaften der Substrate zurückführen. Die Untersuchung der auf PC-ABS gedruckten Strukturen ergibt eine Leitfähigkeit von 2,1 MS/m und damit den geringsten Wert aller im Ofen gesinterten Proben in Kombination mit der Paste. Die Leitfähigkeit ist somit auf PC-ABS um 29,1 % geringer als auf den Glassubstraten. Mit 3,9 % rangiert die zugehörige Standardabweichung bei dem PC-ABS Substrat auf einem ähnlichen Niveau wie auf dem Polymerwerkstoff ABS.

Die Ergebnisse der Leitfähigkeitsuntersuchungen beim Lasersintern der Mikropartikelpaste sind in Abbildung 15 dargestellt. Somit konnten mit der Mikropartikelpaste auf Glas Leiterstrukturen mit einer elektrischen Leitfähigkeit >8 MS/m, auf ABS >10 MS/m und auf PC-ABS >14 MS/m hergestellt werden. Im Vergleich zu den Ergebnissen der Referenzmessungen im Heißluftofen werden je nach Substratwerkstoff für den spezifischen Widerstand der erzeugten Leiterbahnen 1,7 bis 5,6-fach höhere Werte erzielt.

Vergleicht man die elektrische Leitfähigkeit auf ABS und PC-ABS, so lassen sich auf PC-ABS Leiterbahnen mit ca. 36 % höheren Werten erzeugen. Die Ursache für die höheren elektrischen Leitfähigkeitswerte auf PC-ABS lässt sich auf die höhere Absorption der Laserstrahlung an der Oberfläche des Substrates zurückführen (Vgl. Abbildung 9). Beim Sintern der Henkel-Paste werden Teile der Laserstrahlung gestreut und transmittiert und treffen auf die Oberfläche des Substratmaterials. Abhängig von der Absorption des Materials wird dabei die Substratoberfläche unterschiedlich stark erhitzt, wodurch der Wärmeabtransport aus der Leiterbahn verhindert und der Sinterprozess der Paste beschleunigt wird. Für das ABS-Substrat wurde eine Absorption von 15 - 20 % im NIR-Bereich gemessen. Für das mit Rußpartikeln gefüllte PC-ABS-Substrat werden 95 - 100 % der Laserstrahlung absorbiert.

Ergänzend zu den dargestellten Untersuchungen wurde ein Vergleich zu reinem Silber mit einer elektrischen Leitfähigkeit von 61 MS/m hergestellt. Der höchste erzielbare Wert mit der Henkel-Paste war 11 MS/m auf ABS, 15 MS/m auf PC-ABS und 9 MS/m auf Glas. Dies entspricht etwa zwischen 14 – 25 % der spezifischen Leitfähigkeit von Silbervollmaterial. Im Gegensatz dazu erreichen die Ergebnisse der elektrischen Leitfähigkeiten, die durch einen Ofenprozess erzielt wurden, lediglich etwa 5 % der spezifischen Leitfähigkeit von Silbervollmaterial. Folglich ist für die Silbermikropartikelpaste mittels laserbasierter Sinterung auf den Substratwerkstoffen ABS und PC-ABS eine höhere Leitfähigkeit realisierbar im Vergleich zu einer Sinterung mittels Ofenprozess.

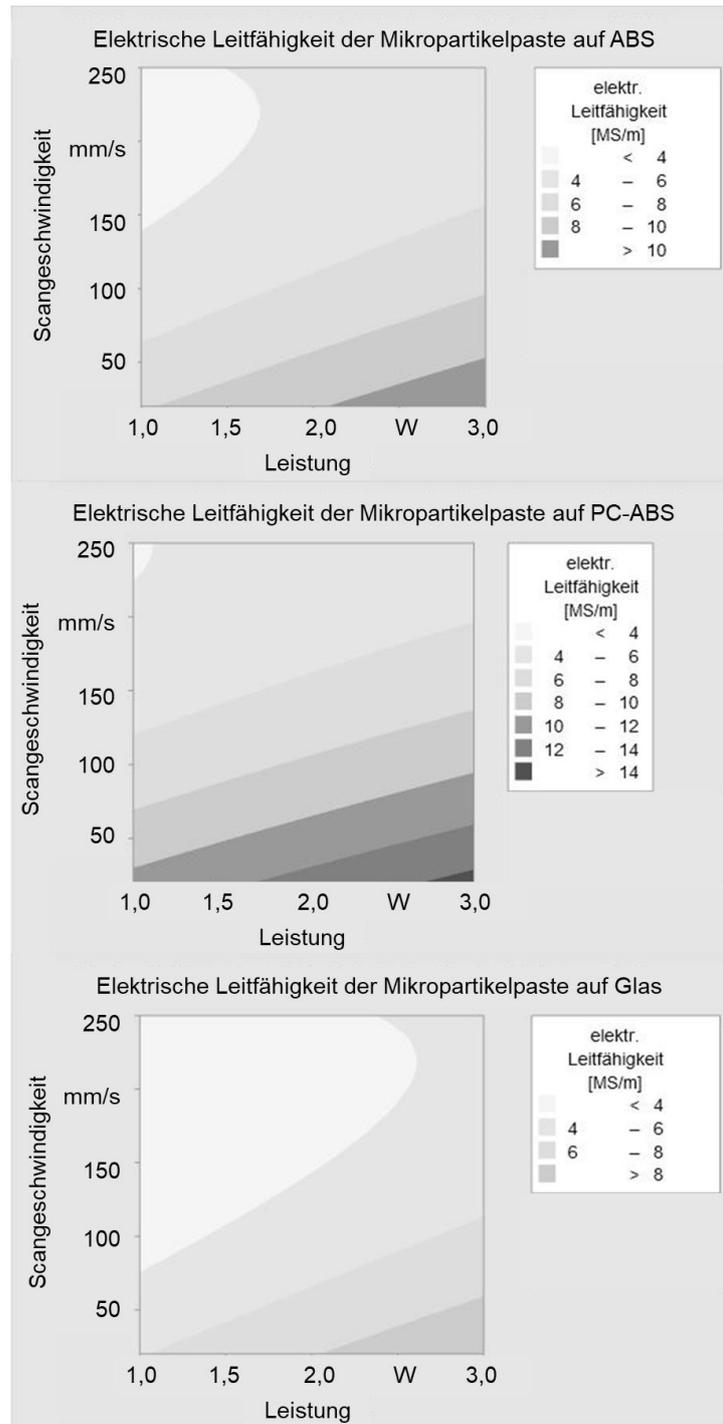


Abbildung 15: Einfluss der Laserleistung und Scangeschwindigkeit auf die elektrische Leitfähigkeit von Strukturen auf ABS, PC-ABS und Glas

Ergebnisse der Nanopartikelintinte Paru PG-007

Für die Paru-Tinte ergeben sich nach einer Sinterzeit von 1 h bei 150 °C im Heißluftofen eine elektrische Leitfähigkeit von 15 MS/m auf ABS, 7 MS/m auf PC-ABS und 14 MS/m auf Glas, die als Referenzwerte dienen. Im Vergleich dazu können durch das Sintern der Paru-Tinte mittels Laserstrahlung Leiterstrukturen mit einer elektrischen Leitfähigkeit 14 MS/m auf Glas, 21 MS/m auf ABS und 23 MS/m auf PC-ABS hergestellt werden. Die Konturdiagramme sind in Abbildung

16 dargestellt. Damit können die Ergebnisse der elektrischen Leitfähigkeiten, die durch eine Ofensinterung der Nanopartikelntinte je nach Substratwerkstoff erreicht bzw. übertroffen werden.

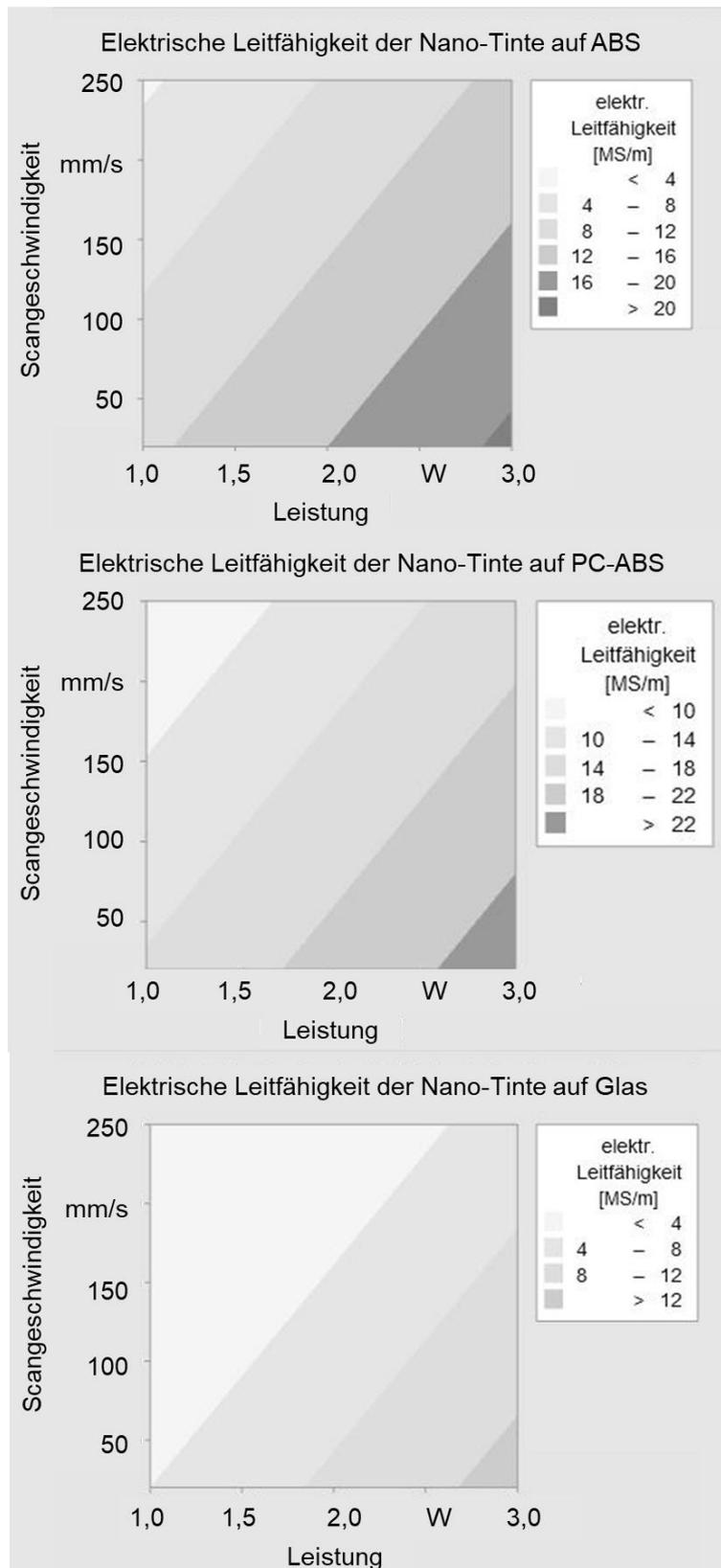


Abbildung 16: Einfluss der Laserleistung und Scangeschwindigkeit auf die elektrische Leitfähigkeit der Paru-Tinte PG007 auf ABS, PC-ABS und Glas

Auch für die Paru-Tinte konnten unterschiedliche Werte bezüglich des spezifischen Widerstands bzw. der elektrischen Leitfähigkeit zwischen ABS und PC-ABS festgestellt werden. So wurden auf PC-ABS Leiterbahnen mit ca. 10 % höheren Werten erzeugt. Die Ursache für die höheren elektrischen Leitfähigkeitswerte auf PC-ABS lässt sich auch hier auf die höhere Absorption der Laserstrahlung an der Oberfläche des Substrates zurückführen. Im Vergleich zu den Ergebnissen der elektrischen Leitfähigkeit der Henkel-Paste sorgt die höhere Absorption der Paru-Tinte im Wellenlängenbereich des Laserstrahls für einen geringeren Energieeintrag in das Substrat und damit eine geringere Wärmeübertragung zwischen Substrat und Tinte (Vgl. Abschnitt 3.2.1).

Core-Shell-Paste

Der gemessene elektrische Widerstand der Core-Shell-Paste nach einer Sinterzeit von 10 Minuten bewegte sich im M Ω -Bereich, weshalb eine Ermittlung der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit als nicht zielführend erachtet wurde. Als Ursache für die hohen elektrischen Widerstände der Tinte wurde die Oxidation des Kupferwerkstoffes an der Partikeloberfläche vermutet, die durch Röntgenphotoelektronenspektroskopie (XPS) nachgewiesen werden kann. Da für die Sinterung der Core-Shell-Paste im Vergleich zu einer reinen Silberpartikelntinte aufgrund der höheren Schmelztemperatur des Kupfers vergleichsweise höhere Temperaturen zur Steigerung der elektrischen Eigenschaften erforderlich sind, wurde im Hinblick auf die Verwendung von temperaturempfindlichen Substraten eine Untersuchung mittels XPS nicht durchgeführt [19]. Weiterhin wurden Inhomogenitäten des Leiterbilds sowie Einfallstellen nach Lasersinterung der Strukturen festgestellt, die auf eine inhomogene Intensitätsverteilung bei der Bestrahlung hindeutet, siehe Abbildung 17.

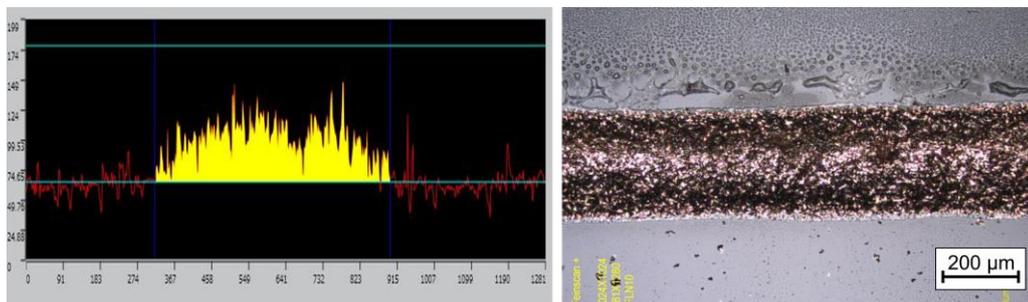


Abbildung 17: Querschnitt der Leiterstruktur der Core-Shell-Paste (links) und mikroskopische Aufsicht auf Leiterbahn (rechts), gesintert bei einer Laserleistung von 2 W und einer Scangeschwindigkeit 125 mm/s

3.3.3 Prozessgrenzen bei der Laserbearbeitung des verwendeten Tintenwerkstoffes von Paru (blz)

Das lasergestützte Sintern von Metallnanopartikelschichten führt zu einer Verdichtung der Mikrostruktur und ist der wichtigste Einflussfaktor bei der Bildung von Poren und Kanälen im Leiterwerkstoff (Vgl. Abschnitt 3.3.4). Bei einer zu hohen Energiedichte der Laserstrahlung kann sich die thermische Belastung des Tintenwerkstoffes jedoch negativ auf die Qualität des Leiterbilds auswirken. Gründe dafür sind die Lösungsmittel und organischen Zusätze in der Tinte, die sich infolge des hohen Energieeintrags mittels Laserstrahlung zersetzen und verdampfen [20]. Infolge des schnellen Verdampfens der Tintenzusätze und Lösungsmittel und des gleichzeitigen Sinterns der festen Bestandteile kann es zu einer Deformation bzw. Delamination der Leiterbahn kommen, da eine Diffusion der Gase durch die gehärtete Schicht nicht mehr möglich ist.

Übersteigt die Verdampfungsrate der Tintenzusätze einen bestimmten Schwellenwert, ist eine Diffusion der Gase durch die oberen, bereits verdichteten Schichten nicht mehr möglich und es kommt zu einer Ausgasung der organischen Stoffe zwischen dem Substrat und der metallischen Schicht. Aufgrund des Gasdrucks kann es dabei zu einem Ablösen der Silbertinte vom Substrat kommen. Abbildung 18 veranschaulicht dieses Verhalten.

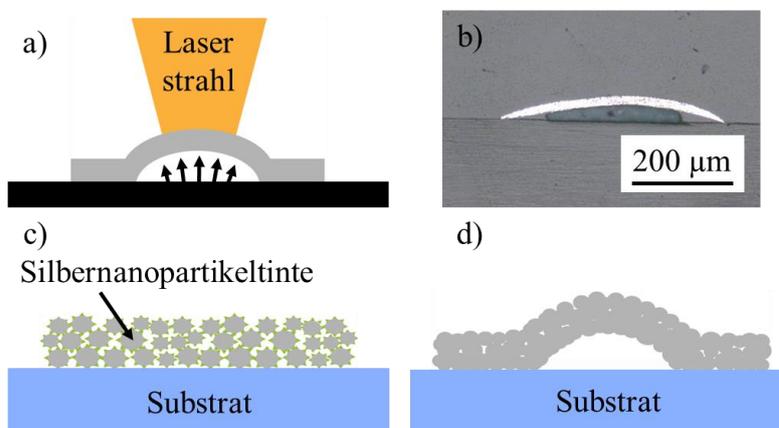


Abbildung 18: a) Skizze des Delaminierungseffekts; b) Querschnitt des Leiters auf ABS; c) - d) Mechanismus der Delaminierung des Leiters

Die Delamination der Leiterstrukturen führt nicht zwangsläufig zu einer Abnahme der elektrischen Leitfähigkeit, muss jedoch im Hinblick auf die mechanische Belastbarkeit und Qualität des Leiterbilds berücksichtigt werden. Bei einer Betrachtung der Leiterquerschnitte konnte der Einfluss der Bearbeitungsparameter des Lasers auf das Ablösen der Paru-Tinte PG007 ermittelt werden. Als wesentlicher Parameter zur Beeinflussung des Effekts hat sich die Streckenenergie des Laserstrahls herausgestellt, die sich als Quotient der Laserleistung und der Scangeschwindigkeit ergibt. Beim Sintern der gedruckten Strukturen werden Streckenenergien zwischen 4 J/m und 150 J/m aufgebracht, wobei die Laserleistung zwischen 1 W und 3 W und die Scangeschwindigkeit zwischen 20 mm/s und 250 mm/s variiert. Abbildung 19 zeigt die elektrische Leitfähigkeit in Abhängigkeit von der Streckenenergie auf ABS und PC-ABS.

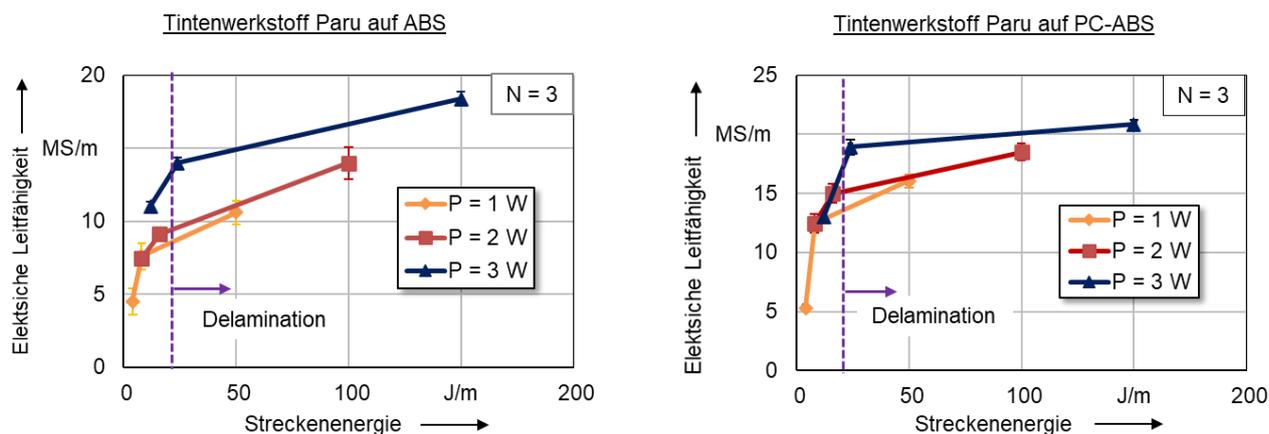


Abbildung 19: Elektrische Leitfähigkeit der Paru-Tinte PG007 auf ABS und PC-ABS in Abhängigkeit der Streckenenergie

Die Analyse der Querschnittsfläche hat ein Ablösen der metallischen Schicht bei Streckenenergien über 20 J/m auf ABS und PC-ABS gezeigt. Das Ablösen der leitfähigen Schicht bewirkt eine Verringerung der Haftfestigkeit aufgrund einer verringerten Kontaktfläche zwischen Substrat und Tinte. Durch iteratives Vorgehen konnten geeignete Bearbeitungsparameter für die jeweilige Paarung aus Substrat- und Tintenwerkstoff gefunden werden. Bei einer Laserleistung von 3 W und einer Scangeschwindigkeit von 125 mm/s ($EI = 24 \text{ J/m}$) wird auf ABS eine elektrische Leitfähigkeit von 13,2 MS/m ohne Delaminierung der leitfähigen Schicht erzielt. Auf PC-ABS konnte bei einer Laserleistung von 2 W und einer Scangeschwindigkeit von 125 mm/s ($EI = 16 \text{ J/m}$) eine elektrische Leitfähigkeit von 15,2 MS/m ohne Delaminierung der leitfähigen Schicht erzielt werden.

3.3.4 Beurteilung des Lasersintervorgangs mittels Rasterelektronenmikroskop (blz)

Zur Beurteilung des Zusammenhangs zwischen den eingebrachten Energiemengen und in den Tinten ablaufenden Sinterprozessen, wie beispielsweise der Bildung von Sinterbrücken, wurden ausgewählte Leiterbahnen hinsichtlich ihrer Gefügestruktur mit einem Raster-Elektronen-Mikroskop (REM) mit AsB-Detektor (Angle Selective Backscatter Detector) charakterisiert. Die Analyse der Leiterstrukturen wurde anhand von Querschliffen entlang des Leiterbahnquerschnitts durchgeführt. Die Untersuchungen mittels REM wurden für die Mikropartikelpaste der Fa. Henkel sowie die Nanopartikeltinte der Fa. Paru, die unter Variation der Laserparameter gesintert wurden, durchgeführt.

Ergebnisse REM-Aufnahmen der Mikropartikelpaste Fa. Henkel

Anhand der REM-Aufnahmen wurde der Einfluss der Scangeschwindigkeit auf den Sintergrad der Henkel-Paste untersucht. Abbildung 20 zeigt die REM-Aufnahmen der mikroskopischen Querschliffe der Leiterbahnen mit 1.500-facher, 10.000-facher und 50.000-facher Vergrößerungen auf ABS. Bei hohen Scangeschwindigkeiten zeigt sich, dass Mikropartikel meist einzeln vorliegen und vollständig von der Pastenmatrix umgeben sind. Nach dem Sintern mit geringeren Scangeschwindigkeiten bzw. höheren Streckenenergien ist zu erkennen, dass sich viele Partikel zu größeren Agglomeraten angesammelt haben und versintert sind. Dabei konnte eine Bildung von Sinterbrücken bzw. eine Zunahme von Sinterhälsen zwischen den Partikeln beobachtet werden. Die Ergebnisse der elektrischen Charakterisierung in Abschnitt 3.3.2 bestätigen die Aufnahmen durch eine höhere resultierende Leitfähigkeit. Anhand der Aufnahmen konnte der Einfluss der Scangeschwindigkeit auf den Sintergrad der Leiterstrukturen bestimmt werden.

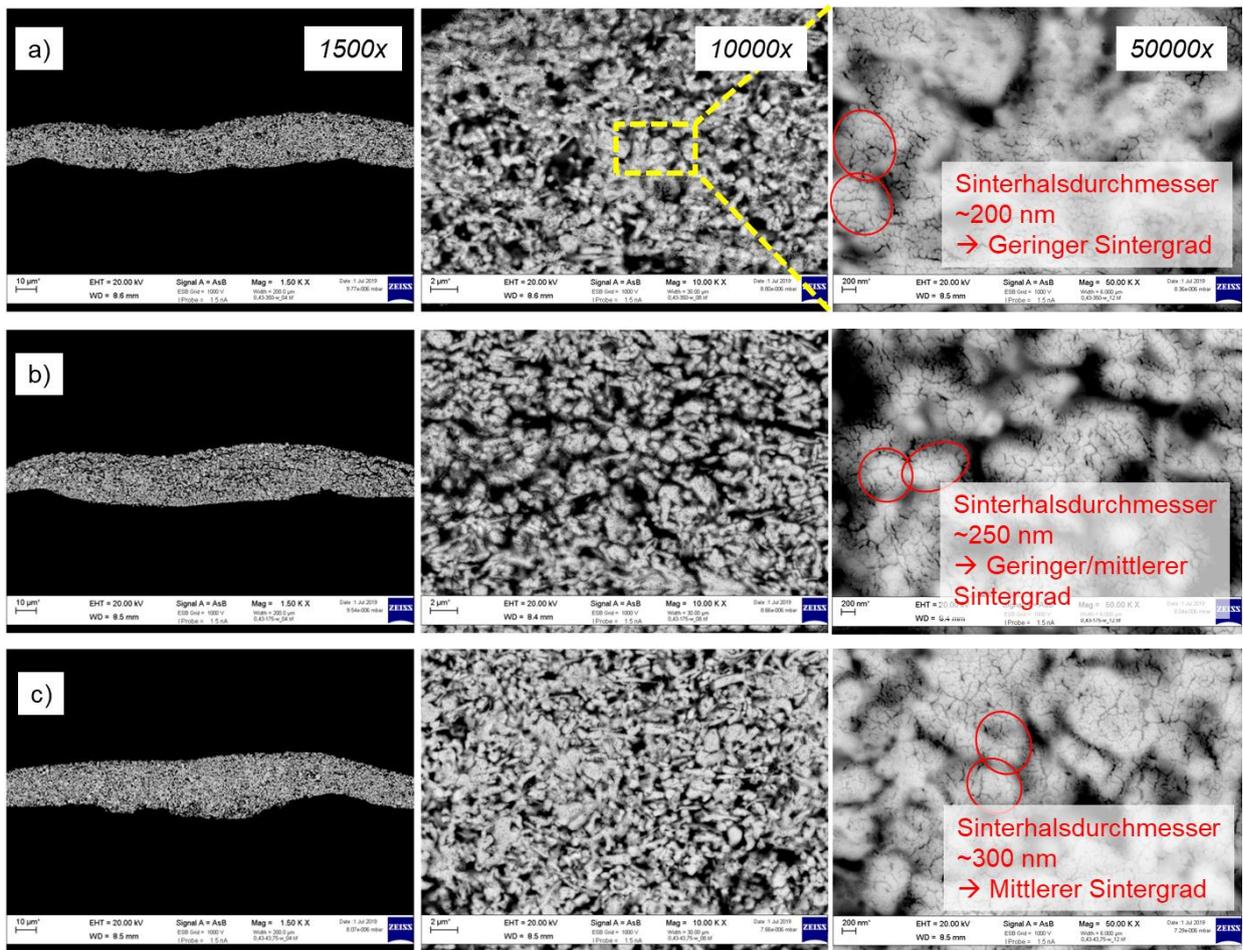


Abbildung 20: Gefügestruktur der Mikropartikelpaste auf ABS, gesintert bei einer Laserleistung von 2 W und einer Scangeschwindigkeit von a) 250 mm/s; b) 125 mm/s und c) 20 mm/s

Die REM-Aufnahmen der mikroskopischen Querschliffe der Henkel-Paste auf PC-ABS sind in Abbildung 21 in drei Vergrößerungen dargestellt. Bei einer Zunahme der Streckenenergie bzw. einer Abnahme der Scangeschwindigkeit konnte ebenfalls eine Bildung von Sinterbrücken bzw. ein Wachstum von Sinterhälsen zwischen den Partikeln beobachtet werden. Im Vergleich zu den Ergebnissen mit ABS konnte ein vergleichsweise höherer Sintergrad bei ansonsten gleichbleibenden Parametern erzielt werden. Die Ursache hierfür lässt sich auf die Absorption der Laserstrahlung von ca. 95 % des Substrates zurückführen, wodurch die Oberfläche zusätzlich erhitzt wird.

Bei sehr geringen Scangeschwindigkeiten ($v = 20 \text{ mm/s}$) wurden bei der Lasersinterung der Henkel-Paste auf PC-ABS jedoch Mikrorisse innerhalb der Leiterbahn detektiert. Als Ursache für die Rissbildung konnten Lufteinschlüsse identifiziert werden, die sich infolge der schnellen Zersetzung und Verdampfung der Pastenbestandteile und des gleichzeitigen Sinterns der festen Bestandteile in oberflächennahen Schichten der Leiterbahnen bildeten, da eine Diffusion der Gase durch die gehärtete Schicht nicht mehr möglich ist.

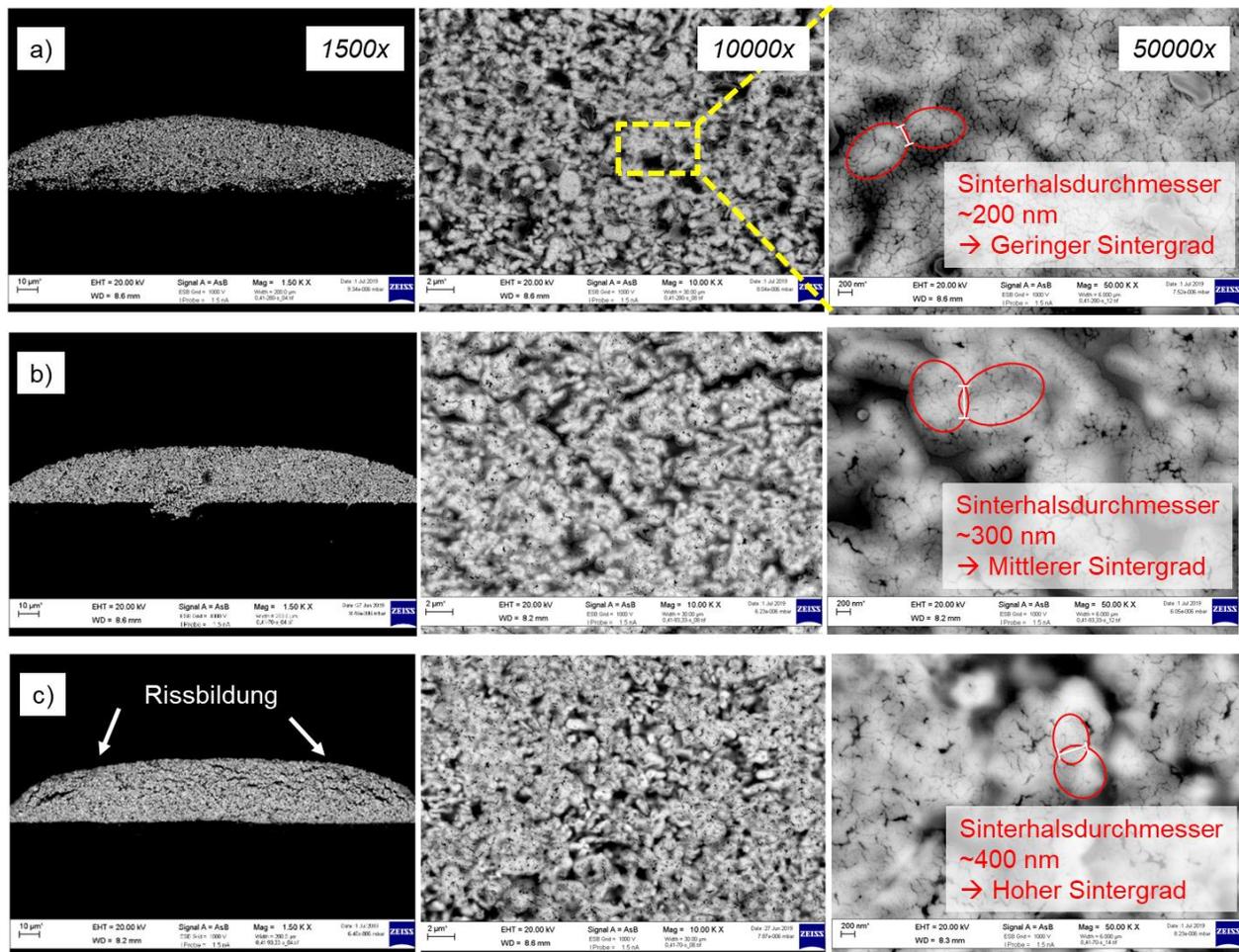


Abbildung 21: Gefügestruktur der Mikropartikelpaste auf PC-ABS, gesintert bei einer Laserleistung von 2 W und einer Scangeschwindigkeit von a) 250 mm/s; b) 125 mm/s und c) 20 mm/s

REM-Aufnahmen der Nanopartikeltinte der Fa. Paru

Beim Sintern der Nanopartikeltinte müssen die organischen und lösungsmittelhaltigen Bestandteile der Tinte, die eine Agglomeration der Partikel vor dem eigentlichen Sinterprozess verhindern, zersetzt und verdampft werden. Die in den Tinten ablaufenden Sinterprozesse, wie beispielsweise der Bildung von Sinterbrücken oder das Metallkornwachstum tragen zum Grad der elektrischen Leitfähigkeit der Struktur bei. Die Untersuchung des gesinterten Tintenwerkstoffes zeigt in Abhängigkeit von den eingesetzten Laserenergien eine unterschiedliche Mikrostruktur und einen unterschiedlichen Sintergrad.

Anhand von REM-Aufnahmen der leitfähigen Strukturen wurde der Einfluss der eingebrachten Laserenergie auf den in der Nanopartikeltinte ablaufenden Sintervorgang bestimmt. Dabei konnte die Verdichtung der Silberstruktur mit zunehmender Streckenenergie erhöht werden, siehe Abbildung 22. Dies zeigt sich in einem Rückgang an Poren und Kanälen, die sich in der leitfähigen Struktur ausbilden, und einer höheren Anzahl von Kontaktpunkten zwischen den einzelnen Partikeln.

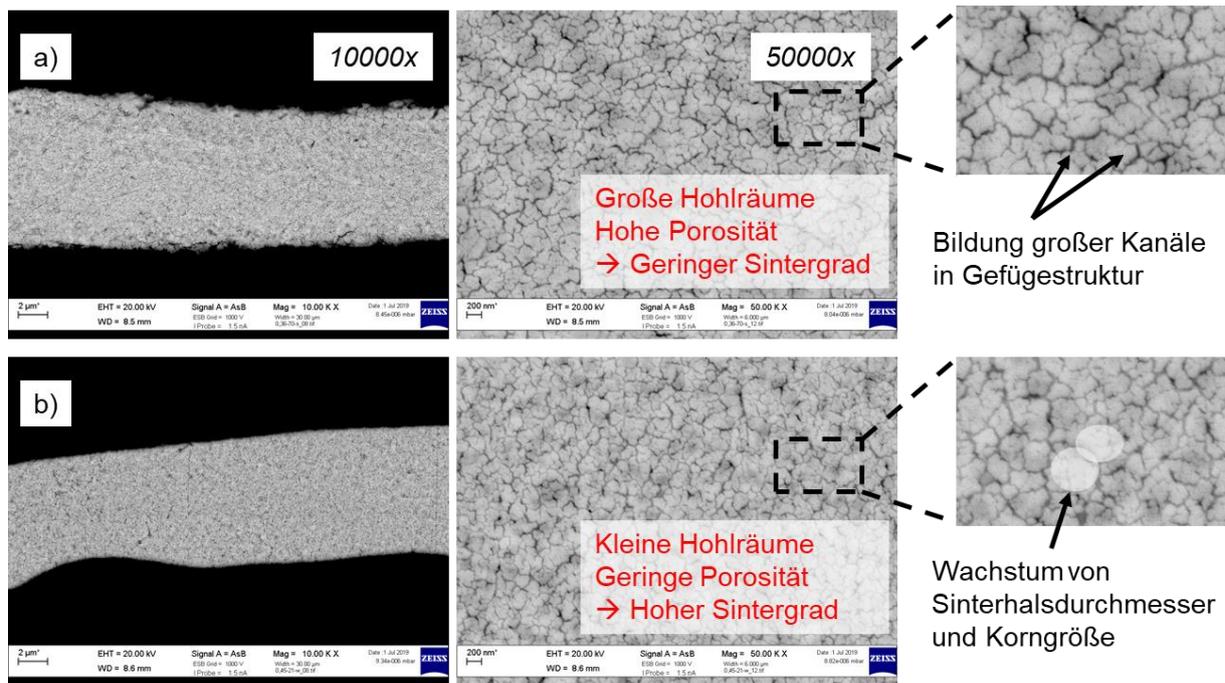


Abbildung 22: Gefügestruktur der Nanopartikelntinte auf PC-ABS, gesintert bei einer Laserleistung von 2 W und einer Scangeschwindigkeit von a) 250 mm/s und; b) 125 mm/s

Aufgrund der im Vergleich zu Mikropartikeln höheren Oberflächenenergie führt das lasergestützte Sintern von Metallnanopartikelschichten zu großen morphologischen Veränderungen der Mikrostruktur, die eng mit dem spezifischen Widerstand zusammenhängen. Bei einer Laserleistung von 2 W und einer hohen Scangeschwindigkeit von 250 mm/s ($E_l = 4 \text{ J/mm}$) bilden sich große Kanäle und eine hohe Porosität der Mikrostruktur. Gründe dafür sind zurückbleibende organische Zusätze in der Tinte, die den Sinterprozess behindern und gleichzeitig den gemessenen spezifischen Widerstand erhöhen. Durch eine Reduktion der Scangeschwindigkeit des Laserstrahls auf 125 mm/s lässt sich die Porosität der Mikrostruktur verringern, infolgedessen der Widerstand der Struktur abnimmt.

3.3.5 Ermittlung der Haftfestigkeit der Leiterstrukturen (blz)

Die Haftfestigkeit wurde mittels Gitterschnitttest nach DIN EN ISO 2409 und Stirnabzugsprüfung nach DIN EN 582 untersucht. Der Stirnabzug ermöglicht quantifizierbare Aussagen, wohingegen bei der Gitterschnittprüfung nur eine rein qualitative Analyse möglich ist.

Ergebnisse des Gitterschnitttests nach DIN EN ISO 2409

Bei der Gitterschnittprüfung wurden die erzeugten Gitterschnittflächen visuell beurteilt und mit einer Referenztafel ausgewertet. Dadurch kann jedem Schnittmuster ein Kennwert von Gt 0 (Schnittkanten vollkommen glatt) bis Gt 5 (> 65 % abgeplatzt) zugeordnet werden, vgl. Abbildung 23. In der Literatur finden sich keine eindeutigen Aussagen, bis zu welchem Kennwert die Haftfestigkeit als „gut“ eingestuft werden kann, da es meist von der Anwendung abhängt. Deshalb wird bei den Untersuchungen die Haftfestigkeit bis zu einer abgeplatzten Fläche von 15 % inklusive Standardabweichung entsprechend der Norm als „gut“ (Gt ≤ 1) eingestuft [14]. Anhand der Untersuchungen mittels Gitterschnitt konnten die Haftfestigkeiten der Mikropartikelpaste und Nanopartikelntinte für die Substrate ABS, PC-ABS und Glas ermittelt werden. Die qualitativen Tests zeigen, dass die Haftfestigkeit sehr stark von den Eigenschaften der zu bedruckenden Oberfläche, wie der Oberflächenrauheit und Oberflächenenergie, abhängig ist. Eine geringere

Oberflächenrauheit weist im Allgemeinen eine geringere Haftfestigkeit auf. Demnach wurde auf Glas aufgrund der geringen Oberflächenrauheit die geringsten Haftfestigkeiten erzielt. Die Mikropartikelpaste der Fa. Henkel zeigt im Vergleich zur Nanopartikelinte die besseren Ergebnisse hinsichtlich der Haftfestigkeit auf allen Substratwerkstoffen, vgl. Tabelle 5.

Gitterschnitt-Kennwert	Beschreibung	Aussehen der Oberfläche im Bereich des Gitterschnittes, an der Abplatzung aufgetreten ist ^a (Beispiel für sechs parallele Schnitte)
0	Die Schnittländer sind vollkommen glatt; keines der Quadrate des Gitters ist abgeplatzt.	
1	An den Schnittpunkten der Gitterlinien sind kleine Splitter der Beschichtung abgeplatzt. Abgeplatzte Fläche nicht größer als 5 % der Gitterschnittfläche.	
2	Die Beschichtung ist längs der Schnittländer und/oder an den Schnittpunkten der Gitterlinien abgeplatzt. Abgeplatzte Fläche größer als 5 %, aber nicht größer als 15 % der Gitterschnittfläche.	
3	Die Beschichtung ist längs der Schnittländer teilweise oder ganz in breiten Streifen abgeplatzt, und/oder einige Quadrate sind teilweise oder ganz abgeplatzt. Abgeplatzte Fläche größer als 15 %, aber nicht größer als 35 % der Gitterschnittfläche.	
4	Die Beschichtung ist längs der Schnittländer in breiten Streifen abgeplatzt, und/oder einige Quadrate sind ganz oder teilweise abgeplatzt. Abgeplatzte Fläche größer als 35 %, aber nicht größer als 65 % der Gitterschnittfläche.	
5	Jedes Abplatzen, das nicht mehr als Gitterschnitt-Kennwert 4 eingestuft werden kann.	—

^a Die Bilder sind Beispiele für einen Gitterschnitt innerhalb der Kennwertstufe. Die Prozentangaben beruhen auf dem durch die Bilder vermittelten visuellen Eindruck, und dieselben Prozentangaben werden mittels digitaler Bildanalyse nicht unbedingt wiedergegeben.

Abbildung 23: Vergleichstabelle Gitterschnitttest nach DIN EN ISO 2409 [14]

Anhand der Versuchsreihe mittels SLM konnte der Einfluss der Intensitätsverteilung des Strahlprofils auf die Haftfestigkeit zwischen Tinte und Substrat ermittelt werden. Für die Untersuchungen wurde ein rechteckiges Strahlprofil mit einer Kantenlänge von 500 x 500 µm verwendet. Als Vergleich wurde eine gaußförmige Intensitätsverteilung des Strahlprofils mit einem Fokussdurchmesser von 300 µm verwendet. Durch iteratives Vorgehen bei der Parameterwahl der Versuche konnte die Bestrahlungsstrategie hinsichtlich der Haftfestigkeit der Metallschichten angepasst werden. Tabelle 5 zeigt die Ergebnisse der Gitterschnitttests.

Im Vergleich zu den Ergebnissen, die mit einem gaußförmigen Strahlprofil realisiert wurden, konnten anhand der Flat-Top-Intensitätsverteilung auf den Substraten ABS und PC-ABS teilweise höhere Haftfestigkeiten erzielt werden. Der Grund hierfür lässt sich auf die homogene Intensitätsverteilung der Laserstrahlung zurückführen, die eine annähernd homogene Erwärmung des Leiterflächenquerschnitts ermöglicht.

Tabelle 5: Qualitative Bestimmung der Haftfestigkeit der verwendeten Pasten- und Tintenwerkstoffe auf unterschiedlichen Substratoberflächen im Gitterschnitttest

Bewertung nach DIN EN ISO 2409	Pastenwerkstoff Fa. Henkel			Tintenwerkstoff Fa. Paru		
	ABS	PC-ABS	Glas	ABS	PC-ABS	Glas
Gesintert mittels Laserstrahlung (gauß'sche Intensitätsverteilung)*	Gt 0	Gt 1	Gt 2	Gt 1	Gt 2	Gt 3
Gesintert mittels Laserstrahlung (Flat-Top-Intensitätsverteilung)*	Gt 0	Gt 0	Gt 2	Gt 0	Gt 1	Gt 3
Gesintert im Ofen**	Gt 1	Gt 1	Gt 2,25	Gt 2	Gt 2	Gt 5

*Bei einer Laserleistung von 2W und einer Scangeschwindigkeit von 125 mm/s

**Bei einer Verweildauer von 10 min bei 60°C plus anschließend 10 min bei 110°C

Die Sinterung der Silbermikropartikelpaste der Fa. Henkel im Heißluftofen dient auch für die Haftfestigkeitsuntersuchungen als Referenz. In Bezug auf die ermittelten Werte wurden die Auswirkungen der alternativen Sinterverfahren auf die Haftung validiert. Das ofengesinterte Glassubstrat weist in Folge der Untersuchungen mit dem Gitterschnitt einen Wert von 2,25 mit einer zugehörigen Standardabweichung von 0,43 auf. Das bedeutet, dass auf der untersuchten Fläche Abplatzungen von mehr als 15 % vorhanden sind, die aber einen Wert von 35 % nicht überschritten haben. Die beiden Polymerwerkstoffe ABS und PC-ABS haben identische Werte beim erreichten Gitterschnittkennwert und von diesem gab es auch keine Abweichungen. Der Gitterschnittkennwert an beiden Werkstoffen beträgt 1, was einer Abplatzung von weniger als 5 % der Gitterschnittfläche entspricht. Da die untersuchten Flächen alle ein einheitliches Resultat lieferten, entsprach die Standardabweichung Null.

Ergebnisse der Stirnabzugsprüfung nach DIN EN 582

Bei der Stirnabzugsprüfung wird die Haftfestigkeit von Metallschichten nach DIN EN 582 quantitativ bestimmt. Die Zugprüfungen werden mit einem Nordson DAGE 4000 HBP durchgeführt, Abbildung 24 zeigt den Versuchsaufbau. Hierfür wurden im 2D-Testlayout kleine Pads der Schichtwerkstoffe mit einer Abmessung von 2 x 2 mm auf die Substrate aufgetragen. Die Testpads wurden im Dispenser- bzw. Aerosol Jet-Verfahren mit einer durchschnittlichen Schichtdicke von $12 \pm 1 \mu\text{m}$ erzeugt.

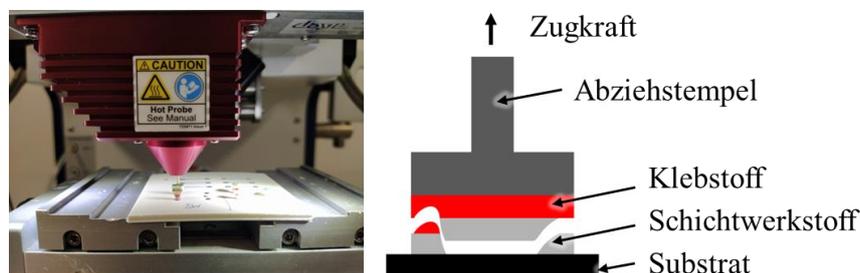


Abbildung 24: Zugprüfung nach DIN EN 582 zur Bestimmung der Haftfestigkeit

Die Prüfung wird mit einem Abziehstempel durchgeführt, der auf die Pads aufgeklebt wird. Die Klebeverbindung wird mit Heraeus PD 955 M als lösungsmittelfreiem Polymerklebstoff mit einer Aushärtungstemperatur von 100 °C für 15 Minuten im Trockenofen erzeugt. Durch Erhöhung der

Abzugskraft des Stempels wird die silberpartikelhaltige Tinte vom Substrat getrennt. Die Zugfestigkeit der gedruckten Strukturen ergibt sich aus dem Quotienten der maximalen Abzugskraft und der Bruchfläche auf dem Substrat.

Zur Bestimmung der Bruchflächen wurden mikroskopische Aufnahmen des Stempels bzw. Substrats erzeugt. Dabei wurden sowohl Adhäsionsbrüche als auch Mischbrüche betrachtet, Abbildung 25 zeigt die Bruchfläche nach Stirnabzugsprüfung.

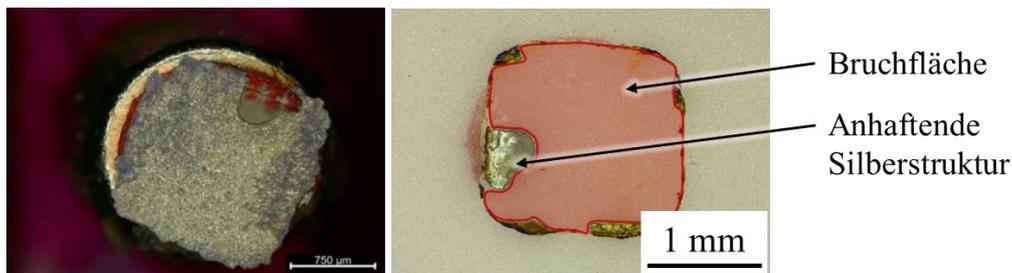


Abbildung 25: Bestimmung der Haftfestigkeit im Stirnabzugstest, links: Stempel bei Mischbruch, rechts: Substrat bei Mischbruch

Die Bewertung des Einflusses der Laserbearbeitungsparameter auf die Haftfestigkeit der Silberstrukturen wurde anhand quantitativer Messungen mittels Stirnabzugsprüfung auf ABS und PC-ABS untersucht. Die quantitative Bestimmung der Haftfestigkeit bestätigte die Ergebnisse der Gitterschnittprüfung. Die Messungen für die Henkel-Paste haben bei einer Streckenenergie von 10 J/m eine Haftfestigkeit von ca. 3,4 N/mm² auf ABS und ca. 4,8 N/mm² auf PC-ABS ergeben, vgl. Abbildung 26. Bei Erhöhung der Streckenenergie wird eine Abnahme der Zugkräfte des Stempels auf PC-ABS festgestellt. Die Abnahme der Haftfestigkeit zwischen Paste und PC-ABS im Vergleich zu ABS lässt sich auf die Eigenschaften der Rußpartikel zurückführen. Beim Auftreffen des Laserstrahls auf PC-ABS wird 95 % der Strahlung vom Substrat absorbiert. Mit zunehmender Streckenenergie kommt es aufgrund der hohen Absorption zu einem Anstieg der resultierenden Temperaturen und zu einem oberflächlichen Erweichen bzw. Aufschmelzen der Substratoberfläche, wodurch die Haftfestigkeit der Metallschicht abnimmt.

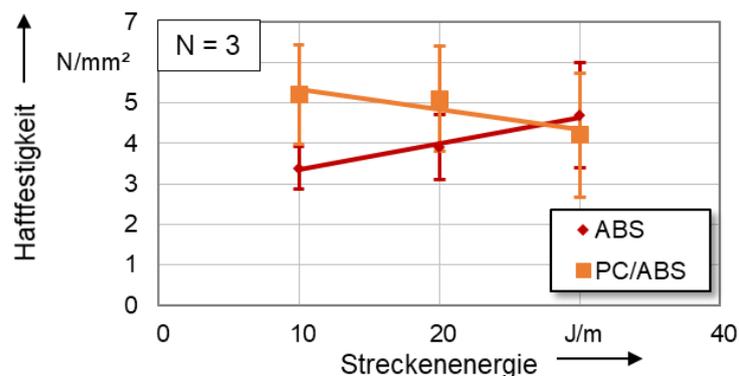


Abbildung 26: Einfluss der Streckenenergie auf die Haftfestigkeit der Henkel-Paste auf ABS und PC-ABS

Die Nanopartikel-tinte PG-007 von Paru hat bei einer Streckenenergie von 10 J/m eine Haftfestigkeit von ca. 3,4 N/mm² auf ABS und ca. 4,6 N/mm² auf PC-ABS. Die Ergebnisse der

Messungen mittels Stirnabzugstest sind in Abbildung 27 dargestellt. Bei höheren Streckenenergien wird eine Abnahme der Zugkräfte des Stempels festgestellt. Die Abnahme der Haftfestigkeit zwischen Tinte und Substrat lässt sich auf die Lösungsmittel und organischen Zusätze in der Tinte, die sich infolge des hohen Energieeintrags mittels Laserstrahlung zersetzen und verdampfen, zurückführen. Aufgrund der schnellen Verdampfung der Tintenzusätze kommt es zu Delaminationen zwischen Tinte und Substrat, vgl. dazu Abschnitt 3.3.3. Die erzielten Haftfestigkeiten der Silberstrukturen fallen im Vergleich zu den Haftfestigkeiten, die mit der Silbernanopartikel-tinte CSD-66 der Fa. Cabot auf dem Substrat Accura Bluestone erreicht wurden und Werte zwischen 7,5 – 10,0 N/mm² erzielt haben, etwas geringer aus [9]. Jedoch stellt diese Verbindung aufgrund der relativ langen Aushärtezeiten im Ofen keine sinnvolle Alternative dar. Ein weiterer Einflussfaktor auf die Haftfestigkeit ist die Plasmabehandlung der Substratoberfläche, mit der die Benetzungseigenschaften und die Oberflächenspannung modifiziert werden können (siehe Abschnitt 3.3.6).

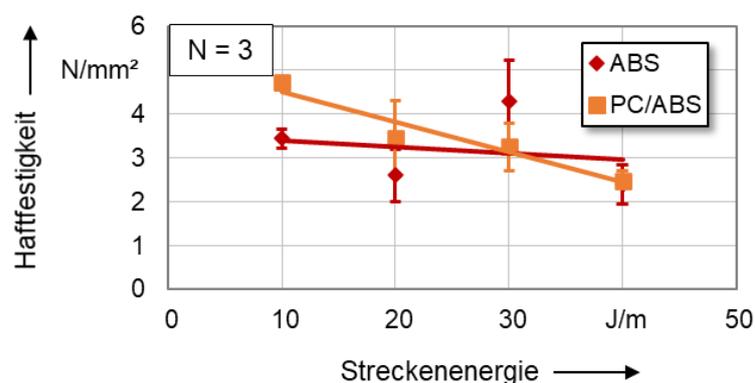


Abbildung 27: Einfluss der Streckenenergie auf die Haftfestigkeit der Paru-Tinte auf ABS und PC-ABS

3.3.6 Oberflächenbehandlung zur Verbesserung der erzielbaren Haftfestigkeit und Benetzungseigenschaft (blz, FAPS)

Für die Substratwerkstoffe ABS, PC-ABS und Glas wurde untersucht, ob Vorbehandlungsprozesse zu einer Optimierung des Druck- und Haftungsergebnisses führen. Aufgrund der Empfehlung des Projektpartners Plasmatrete wurde als Vorbehandlung eine Plasmabehandlung mit Luft als Prozessgas festgelegt. Die Bewertung der Vorbehandlung erfolgt nach den Kriterien Geometrie der Druckstruktur bzw. Abweichung dieser zur Sollstruktur des Layouts, elektrischer Widerstand sowie erzielte Haftfestigkeit. Die Plasmaversuche wurden beim Projektpartner Plasmatrete GmbH mit der Plasma Rotationsdüse RD1004 durchgeführt. Hierbei wird unter Atmosphärendruck Plasma mit einer niedrigen Gesamttemperatur (sog. kaltes Plasma) erzeugt, weshalb sich diese Düse besonders für Substratwerkstoffe mit einer geringen Schmelztemperatur eignet. Die Bearbeitungsbreite des Plasmas betrug 25 mm, was ein mäandrierendes Abfahren der Substratoberfläche notwendig macht. Gereinigt wurden die Substrate mit Isopropanol, um grobe Verunreinigungen zu beseitigen. Der Kontaktwinkel und die Oberflächenenergie des Substrats dienen als Messgrößen zur Evaluierung der Plasmabehandlung und beeinflussen die Benetzungseigenschaften und damit die Haftung sowie die resultierende Geometrie des Leiterbahnquerschnitts. Für ABS wurde ein Kontaktwinkel vor der Vorbehandlung von $94^\circ \pm 2^\circ$ sowie eine daraus resultierende Oberflächenenergie von 47 mN/m erreicht. PC-ABS wies einen Kontaktwinkel von $98^\circ \pm 2^\circ$ und eine Oberflächenenergie von 48 mN/m auf. Als Ionisationsgas wurde Luft mit einem Durchfluss von 41 l/min und einem Staudruck von 54 mbar verwendet. In Tabelle 6 werden die erzielten Ergebnisse aufgelistet.

Durch die erzielten Ergebnisse der Substratvorbehandlung konnte die Haftfestigkeit der Mikropartikelpaste zwischen Tinte und Substrat für beide Substratwerkstoffe erhöht werden.

Tabelle 6: Ergebnisse der Substratvorbehandlungen mittels Plasma (Ausgangsleistung 1000 VA)

Substrat	Abstand zw. Düse und Substrat in mm	Kontaktwinkel in °	Oberflächenenergie in mN/m
ABS	10	32	69
nach 24 h	-	42	65
PC-ABS	10	39	66
nach 24 h	-	44	64
Glas	6	-	-
nach 24 h	-	22	74

Anhand der Auswertung der Ergebnisse der Substratvorbehandlung konnte der Einfluss der Plasmabehandlung auf die Haftfestigkeit der Mikropartikelpaste zwischen Paste und Substrat ermittelt werden. Tabelle 7 zeigt den Effekt der Plasmavorbehandlung auf die Ergebnisse der Haftfestigkeitsuntersuchungen in Abhängigkeit von der Leistung und Scangeschwindigkeit des Laserstrahls für ABS und PC-ABS. Innerhalb der Versuchsreihe konnten in Abhängigkeit der verwendeten Bestrahlungsparameter die Haftfestigkeiten zwischen der Mikropartikelpaste und ABS geringfügig erhöht werden. Auf PC-ABS konnte die Haftfestigkeit durch die Plasmavorbehandlung für hohe Streckenenergien deutlich erhöht werden.

Tabelle 7: Ergebnisse der Gitterschnittprüfung zur qualitativen Bestimmung der Haftfestigkeit auf ABS und PC-ABS mit und ohne Plasmavorbehandlung

Leistung	Scangesch w.	ABS		PC-ABS	
		Gt / ohne Vorbehandlung	Gt / Plasmavorbehandelt	Gt / ohne Vorbehandlung	Gt / Plasmavorbehandelt
3,0 W	230 mm/s	0	0	0	0
3,0 W	175 mm/s	1	1	1	0
3,0 W	115 mm/s	4	3	3	1
3,0 W	45 mm/s	5	5	4	1

Die Wirkung der Plasmavorbehandlung ist von der Substrat-Tinten-Kombination abhängig und beeinflusst insbesondere die Benetzungseigenschaften der Tinten. Bei Substrat-Tinten-Kombinationen, die bereits ohne Vorbehandlung einen geringen Kontaktwinkel bzw. eine gute Benetzbarkeit aufweisen, muss berücksichtigt werden, dass es durch eine zusätzliche

Behandlung der Oberfläche zu ungewünschtem Verlaufen der Tinte und einer Vergrößerung der minimalen Leiterbahnbreite führen kann. Der Einsatz einer Plasmavorbereitung muss demnach für jede Werkstoffkombination individuell abgestimmt werden.

3.3.7 Untersuchungen zur Langzeitzuverlässigkeit im Umwelttest (blz)

Für die Bewertung der Zuverlässigkeit der gedruckten Leiterstrukturen wurden die Langzeiteigenschaften der Strukturen ermittelt. Hierbei wurden in Abstimmung mit dem pbA die Strukturen einer Temperaturschockprüfung unterzogen. Zur Durchführung der Klimaschockversuche wird der Klimaprüfschrank der Firma Weiss vom Typ „TS 130“ verwendet. Der Klimaprüfschrank bietet einen nutzbaren Innenraum von 130 Litern, welcher sich aus den Maßen 420 mm x 450 mm x 550 mm (H x B x T) ergibt. Das Gerät besitzt zwei getrennte Klimakammern, wovon eine der Kammern im Bereich von + 60 °C bis + 220 °C und die andere im Bereich von – 10 °C bis – 80 °C temperiert werden kann. Ein automatischer Wechsel des Werkstückträgers zwischen den beiden Kammern ist innerhalb von 10 Sekunden möglich. Die eingestellte Temperatur kann in einem Bereich von ± 1 °K konstant gehalten werden. Durch den Klimaschocktest werden Schwachstellen in der Haftfestigkeit zwischen gedruckter Struktur und Grundsubstrat insgesamt oder in Teilbereichen innerhalb kürzester Zeit identifiziert. Ausschlaggebend sind die unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten, die innerhalb des Materials zu einem abweichenden Ausdehnungsverhalten bei abrupten Temperaturwechseln führen.

Folgende Parameter wurden für die Durchführung der Zuverlässigkeitsuntersuchung ausgewählt:

- 20 Minuten bei -40 °C
- 20 Minuten bei +100 °C

Der Zuverlässigkeitstest erfolgte zunächst für die gesinterte Mikropartikelpaste über 500 Zyklen bei -40 °C/ +100 °C. Eine Messung des Durchgangswiderstands erfolgte jeweils vor dem Test sowie nach 100 und 500 Zyklen. Für die Erstellung der Strukturen wurde die Laserleistung konstant bei 2 W und die Scangeschwindigkeit konstant bei 100 mm/s gewählt. Die Ergebnisse für die Henkel-Paste sind in Abbildung 29 für die Substratwerkstoffe ABS und PC-ABS dargestellt.

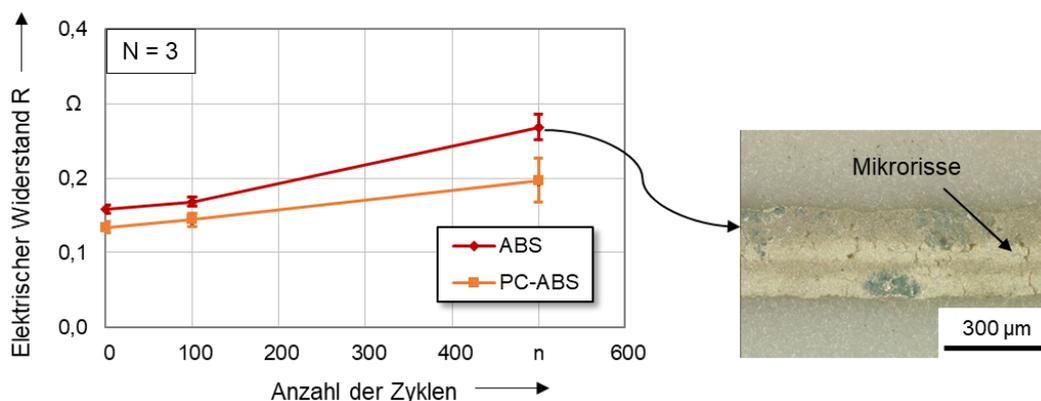


Abbildung 28: Leiterbahnwiderstand der Henkel-Paste nach beschleunigter Alterung im Temperaturschocktest

Vor Beginn des Temperaturschocktests liegt der elektrische Widerstand der leitfähigen Strukturen zwischen $0,16 \Omega$ auf ABS und $0,13 \Omega$ auf PC-ABS. Nach Durchlaufen von 500 Zyklen steigt der elektrische Widerstand um 69 % bzw. 54 % an. Die Tests zur Bestimmung der Langzeitbeständigkeit führen insgesamt zu einer Verringerung der elektrischen Leitfähigkeit der Strukturen. Gründe für den Anstieg des elektrischen Widerstandes lassen sich auf die unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten zwischen ABS bzw. PC-ABS und der Tinte zurückführen. Die unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten führen zu mechanischen Spannungen und zur Bildung von Mikrorissen innerhalb der leitenden Matrix, die den elektrischen Widerstand erhöhen.

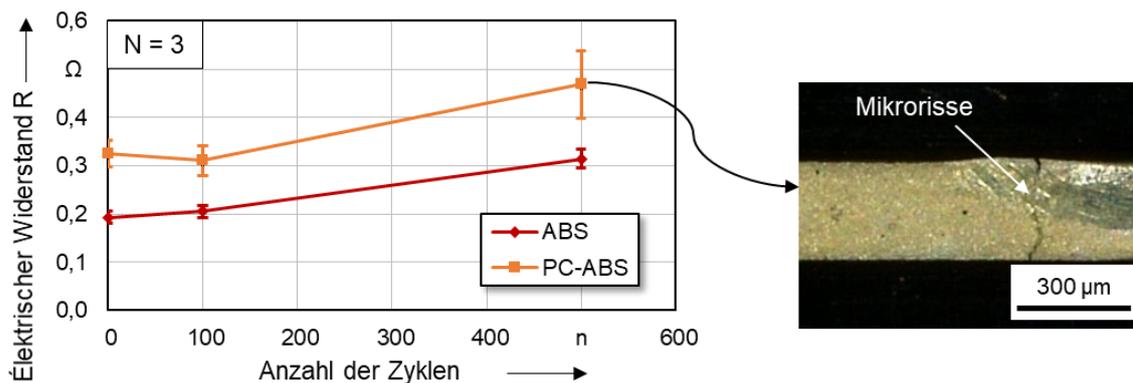


Abbildung 29: Leiterbahnwiderstand nach beschleunigter Alterung im Temperaturschocktest

Bei der Paru-Tinte PG-007 liegen vor Beginn der Langzeitmessungen elektrische Widerstände zwischen $0,19 \Omega$ auf ABS und $0,33 \Omega$ auf PC-ABS vor. Nach Durchlaufen von 500 Zyklen steigt der elektrische Widerstand um 62 % bzw. 44 % an. Auch hierbei lassen sich die Gründe für den Anstieg des elektrischen Widerstandes auf die unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten zwischen ABS bzw. PC-ABS und der Tinte zurückführen. Die Abnahme der elektrischen Eigenschaften der leitfähigen Strukturen kann auf die Bildung von Mikrorissen innerhalb der leitfähigen Matrix zurückgeführt werden. Die Leiterstrukturen sind nach dem Temperaturschocktest dennoch voll funktionsfähig und es werden die Vorgaben und Anforderungen nach DIN EN 60068 erfüllt.

3.4 AP4: Thermische Prozessanalyse des laserunterstützten Leiterbahnsinterns (blz)

Zur Analyse und Beurteilung der Energieeinbringung mittels Laserstrahlung und der resultierenden Temperaturfelder wurde das Sintern der Leiterbahnen mittels Thermografie prozessbegleitend analysiert. Hierfür wurde zunächst eine thermische Charakterisierung der Substratmaterialien mittels DSC durchgeführt. In Folge dessen konnten die reale thermische Belastung der Substratwerkstoffe annähernd ermittelt und die Prozessparameter gezielt den thermischen Eigenschaften der Kunststoffe angepasst werden.

3.4.1 Thermische Analyse der Substratwerkstoffe mittels DSC

Um eine thermische Schädigung des Substrates durch die Energieeinbringung mittels Laserstrahlung zu vermeiden, darf die Temperatur, die während des Sintervorgangs an der Oberfläche des Substrats auftritt, die Schmelztemperaturen der Substrate nicht überschreiten. In diesem Zusammenhang wurde eine thermische Charakterisierung der polymeren Substratmaterialien mittels Differential Scanning Calorimetry (DSC) durchgeführt, um

Rückschlüsse auf die Schmelz- bzw. Glasübergangstemperaturen der Substrate ziehen zu können. Für die genannten Substratwerkstoffe wurden die charakteristischen thermischen Kennwerte ermittelt, welche zur Einstellung der geeigneten Laserparameter notwendig sind. Die DSC-Messungen wurden mit einer Aufheiz- und Abkühlrate von 10 °C/min durchgeführt.

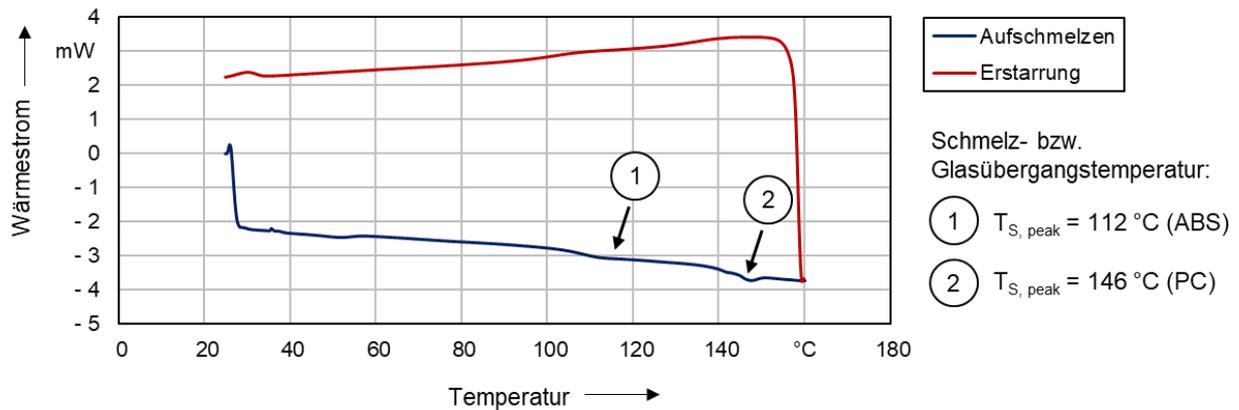


Abbildung 30: Thermische Analyse von PC-ABS mittels DSC-Verfahren

Die DSC-Messung einer PC-ABS Probe zeigt eine nahezu lineare Änderung des Wärmestroms beim Aufschmelzen und Abkühlen, da es hierbei zu keiner bzw. nur sehr geringer Kristallisationswärme kommt, siehe Abbildung 30. Der lineare Verlauf beim Aufschmelzen der Probe ist auf die amorphe Struktur der Thermoplaste zurückzuführen. Am Verlauf des Wärmestroms lassen sich zwei Schmelz- bzw. Glasübergangsbereiche bei einer Temperatur von ca. 112 °C (ABS, peak) und ca. 146 °C (PC, peak) identifizieren. Für den Substratwerkstoff ABS konnten nahezu identische Kurvenverläufe beim Aufschmelzen und Erstarren der Proben ermittelt werden. Ein Schmelzbereich zeichnete sich bei ca. 112 °C (peak) ab. Die Zersetzungstemperaturen liegen für beide Proben bei Temperaturen >160 °C.

Die Mikrosilberpartikelpaste zeichnet sich insbesondere durch zwei Vernetzungsreaktionen im Temperaturbereich von ca. 90 °C bis 130 °C (Peak) und von ca. 170 °C bis 173 °C (Peak) aus. Somit kommt es innerhalb der Erwärmungsphase zu zwei Aushärtereaktionen des Harzsystems, die die Festigkeit bzw. die Kohäsion der Leiterstruktur beeinflussen.

3.4.2 Thermische Prozessanalyse anhand kalibrierter Thermoelemente

Zur Ermittlung der Temperatur, die während der Bearbeitung mittels Laserstrahl nahe der Grenzfläche zwischen Substrat und Leiterbahn erreicht wird, wurden kalibrierte Thermoelemente des Typ K auf die Probekörper aufgebracht. Durch Anbringen und Überdrücken der Thermoelemente mittels Leitkleber kann die Oberflächentemperatur des Substrates am Wirkungsort der bestrahlten Leiterbahn während des Prozessablaufs gemessen werden. Abbildung 31 zeigt die Versuchsanordnung. Mit Hilfe der kalibrierten Thermoelemente konnten die Oberflächentemperatur des Substrats an der Grenzfläche zwischen Substrat und Leiterstruktur gemessen und die Prozessparameter gezielt angepasst werden.

Aufgrund der hohen Viskosität der Silbermikropartikelpaste von 26 Pas konnten die Thermoelemente überdrückt und eine durchgängige Leiterbahn erzeugt werden. Die Versuche wurden mittels PC-ABS durchgeführt. PC-ABS weist eine hohe Strahlungsabsorption (90 – 95 %) im Wellenlängenbereich des Lasers auf, und es ist dadurch mit einer höheren thermischen Belastung des Substrats im Vergleich zu ABS zu rechnen.

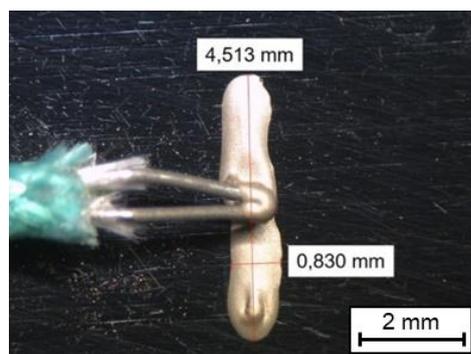


Abbildung 31: Thermoelement (Typ-K) mit aufgetragener Mikropartikelpaste zur Messung der Temperatur auf der Substratoberfläche

Mit Hilfe der in Abschnitt 3.2 gewonnenen Erkenntnisse aus der laserbasierten Sinterung bzw. Härtung der Leiterbahnstrukturen wurden aus den ausgewählten Bearbeitungsparametern Rückschlüsse auf die thermische Belastung des Substrats gezogen. Die verwendeten Bearbeitungsparameter sind in Tabelle 8 zusammengefasst. Die Signale des Thermoelements wurden mit Hilfe eines Datenloggers und einer Abtastrate von >40 Hz ausgewertet.

Tabelle 8: Bearbeitungsparameter für die Untersuchung mittels kalibrierter Thermoelemente

Parameter	Wert	Einheit
Laserleistung (P_L)	1; 2; 3	W
Scangeschwindigkeit (v)	20; 125; 250	mm/s
Streckenenergie (E_s)	4; 8; 12; 16; 24; 50; 100; 150	J/m
Anzahl Überfahrten (n)	1; 4; 7	(-)
Fokusbereich (d)	300	μm
Abtastrate (s)	>40	Hz

Bei Variation der Bestrahlungsparameter konnten große Unterschiede der Temperaturen an der Grenzfläche zwischen Substrat und Leiterbahn festgestellt werden. *Abbildung 32* zeigt den Einfluss der Bearbeitungsparameter auf die Temperatur an der Grenzfläche zwischen Substrat und Leiterbahn. Bei einer Streckenenergie von 50 J/m konnte bei einzelner Überfahrt eine Temperatur von 90 °C ermittelt werden. Durch eine Erhöhung der Anzahl auf vier Überfahrten bei sonst gleichbleibenden Parametern wurde ein Anstieg der Temperatur auf ~175 °C ermittelt. Infolge der hohen Temperatur wurde ein Aufschmelzen des Substrates und eine Bildung von Luftblasen an der Oberfläche festgestellt, die zu einer Verformung des Kunststoffes unterhalb der gedruckten Struktur geführt hat. Weiterhin lässt sich anhand des Temperaturprofils erkennen, dass es bei der verwendeten Vorschubgeschwindigkeit und mehrfacher Überfahrt zu einem Rückgang der Temperatur zwischen den einzelnen Überfahrten kommt und somit keine quasi-simultane Erwärmung der Leiterstruktur erreicht wird.

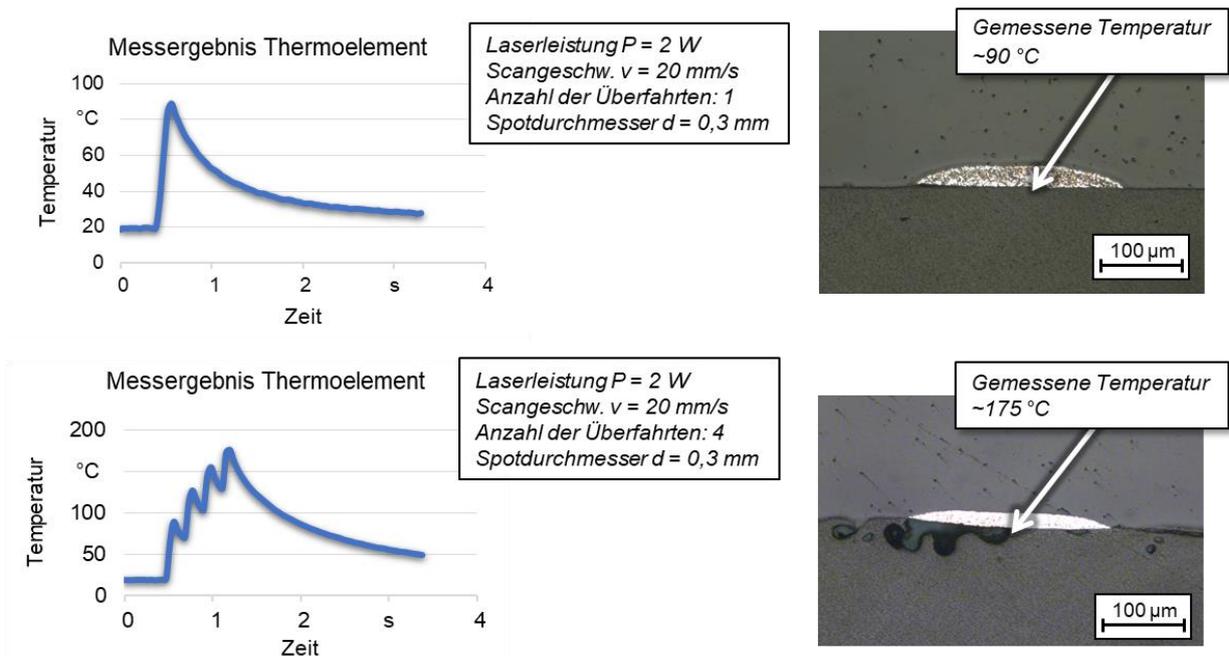


Abbildung 32: Temperatur-Messergebnisse der Thermoelemente (links) an der Grenzfläche zwischen der Henkel-Paste und PC-ABS mit zugehörigem Querschnitt entlang der Leiterbahn (rechts)

Abbildung 33 zeigt den Einfluss der Bearbeitungsparameter auf die Temperatur zwischen Substrat und Leiterbahn. Bei einer Streckenenergie von 12 J/m konnte bei einzelner Überfahrt eine Temperatur von 65 °C ermittelt werden. Durch eine Erhöhung der Anzahl auf sieben Überfahrten bei sonst gleichbleibenden Parametern wurde ein Anstieg der Temperatur auf $\sim 75 \text{ °C}$ ermittelt. Mit der verwendeten Abtastrate konnten mehrere Messpunkte zwischen zwei Überfahrten des Laserstrahls erfasst werden. Im Umkehrschluss dazu konnte anhand des Temperaturprofils erkannt werden, dass bei der verwendeten Vorschubgeschwindigkeit und mehrfacher Überfahrt eine quasi-simultane Erwärmung der Leiterstruktur vorliegt. Bei einer Streckenenergie von 24 J/m je Überfahrt wurden Temperaturen im Bereich von $90 - 155 \text{ °C}$ durch eine Variation der Anzahl an Überfahrten gemessen. Bei einer Anzahl von drei oder mehr Überfahrten wurde infolge der hohen Temperaturen an der Grenzfläche zwischen Leiterbahn und Substrat eine thermische Schädigung festgestellt.

Anhand der thermischen Prozessanalyse konnten die Bestrahlungsparameter gezielt den thermischen Eigenschaften der Substratwerkstoffe angepasst werden. Die höchste elektrische Leitfähigkeit mit einem Wert von $8,0 \text{ MS/m}$ konnte mit der Henkel-Paste auf ABS bei einer Streckenenergie von 24 J/m erzielt werden, ohne eine thermische Schädigung des Substrates zu bewirken. Durch eine Erhöhung der Anzahl der Überfahrten auf drei konnte der Wert auf $9,4 \text{ MS/m}$ erhöht werden. Auf PC-ABS konnte als höchster Wert eine elektrische Leitfähigkeit von $10,1 \text{ MS/m}$ mit der Henkel-Paste Streckenenergie von 24 J/m erzielt werden, ohne eine thermische Schädigung des Substrates zu bewirken. Durch eine Erhöhung der Anzahl an Überfahrten auf zwei konnte der Wert auf $11,7 \text{ MS/m}$ erhöht werden.

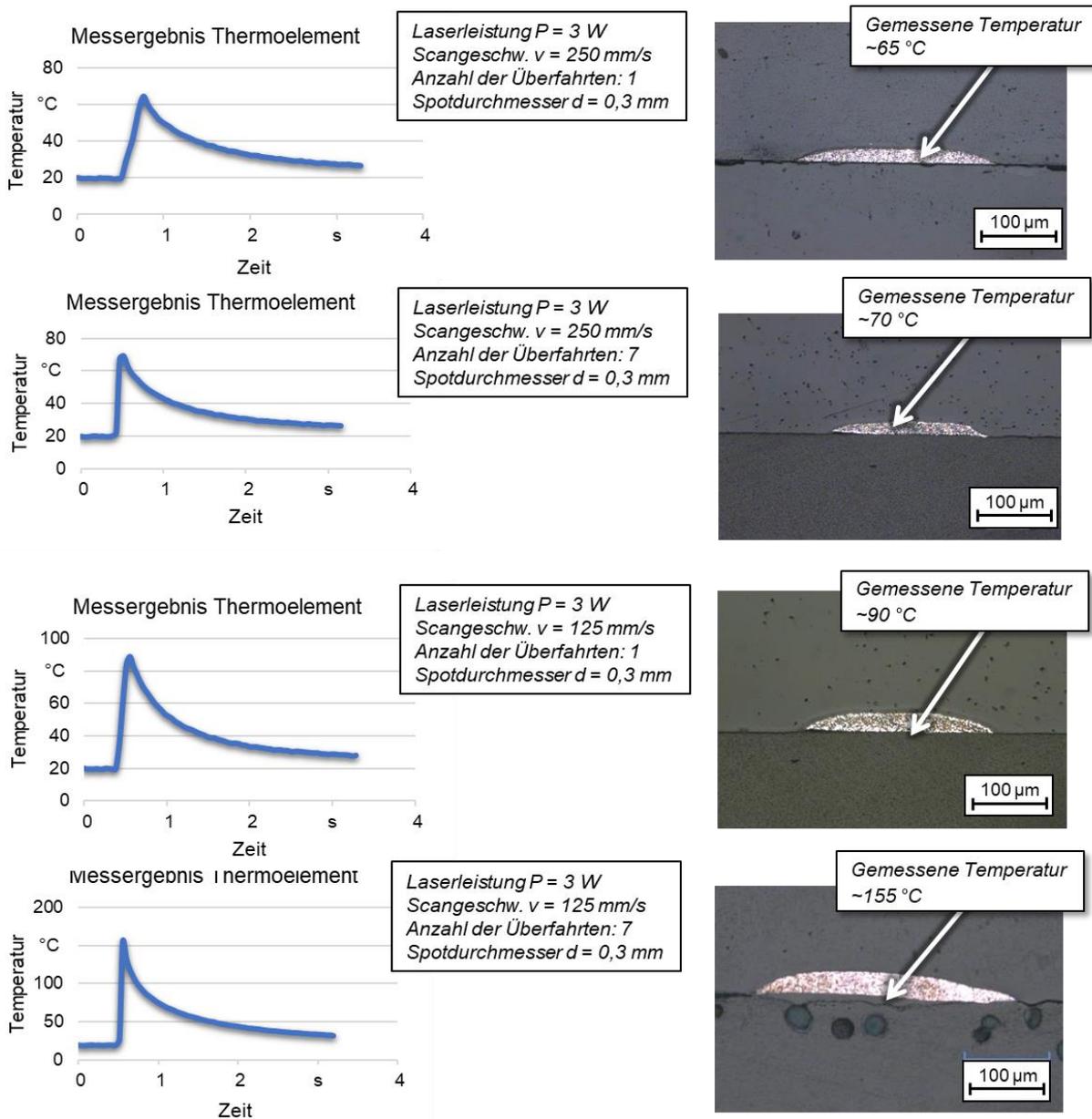


Abbildung 33: Temperatur-Messergebnisse der Thermoelemente (links) an der Grenzfläche zwischen der Henkel-Paste und PC-ABS mit zugehörigem Querschnitt entlang der Leiterbahn (rechts)

3.5 AP5: Konzeption eines laserunterstützten Direkt-Druck-Bearbeitungskopfes (blz, FAPS)

Für die Konzeption eines laserunterstützten Direkt-Druck-Bearbeitungskopfes werden in einem ersten Schritt die Materialien und Einzelprozesse bzgl. ihrer technischen Vorteile und Wirtschaftlichkeit bewertet und mit möglichen Alternativen verglichen. In einem zweiten Schritt findet die Bewertung der Kombination der Einzelprozesse statt. Das AP 5 im Forschungsvorhaben LaDi-Print fokussiert sich, in Abstimmung mit dem Projektbegleitenden Ausschuss, auf den Vergleich der unterschiedlichen Druck- und Sintertechnologien und die theoretische Erarbeitung eines Konzepts und nicht in der tatsächlichen Umsetzung.

3.5.1 Materialien

Für die wirtschaftliche und technische Analyse werden die am meisten eingesetzten Tinten- und Pastenwerkstoffe analysiert. Anhand der Kriterien, Kosten, mögliche erzielbare elektrische Leitfähigkeit, Haftfestigkeit und Trocknungs- bzw. Sinterdauer werden die Silbernanopartikel-tinte, Silbermikropartikel-paste und die Core-Shell-Paste gegenübergestellt. Entscheidend hierbei ist, dass sich eine Betrachtung der Materialien ohne eine konkrete Anwendung als schwierig erweist. Je nach Anwendung und eingesetztem Druckprozess werden unterschiedliche Viskositäten und Geometrien gefordert. Auch je nach Substrat werden spezielle Tinten- und Pastenformulierungen eingesetzt. In Tabelle 9 werden die Druckmaterialien hinsichtlich ausgewählter Parameter gegenübergestellt. Basierend auf den Untersuchungen ergeben sich folgende wirtschaftlich-technische Zielwerte, die bei der Herstellung von MID-Bauteilen als besonders relevant eingeschätzt wurden:

- Leitfähigkeit relativ zu Bulk-Ag in %
 - Kosten pro kg
 - Verarbeitbarkeit
 - Trocknungs- bzw. Sinterdauer
-

Tabelle 9: Vergleich der Druckmaterialien anhand ausgewählter Parameter

	Silbernanopartikel-tinten	Silbermikropartikel-pasten/ Kleber	Core-Shell Pasten
Elektrische Leitfähigkeit aufgrund der zugefügten Zusatzstoffe	Bis zu 50 % rel. zu Bulk-Ag	Bis zu 20 % rel. zu Bulk-Ag	k.A.
Kosten in €	1500 pro 150 ml	800 pro 250 g	600 pro 250 g
Verarbeitbarkeit hinsichtlich Oxidation	Sehr gut	Sehr gut	Sehr gut
Trocknungs- bzw. Sinterdauer	Mindestens 120 °C und 30 Minuten	15 Minuten @ Raumtemperatur	15 Minuten @ 100 °C
Viskosität	bis 60 mPas	ab 10 Pas	k.A.
Druckverfahren	Ink-Jet, Aerosol-Jet, Nano-Jet	Dispenser, Siebdruck	Piezo-Jet, Dispenser, Piezo-Jet, Siebdruck

3.5.2 Druckprozesse

Für die Konzeption werden die am häufigsten in der gedruckten Elektronik eingesetzten Druckverfahren analysiert. Hierfür werden das Ink-Jet Verfahren, Aerosol-Jet Verfahren, Dispensersystem und das Piezo-Jet Verfahren gegenübergestellt. Die Hauptkriterien sind hierbei Kosten der Druckanlage, Designfreiheit, Bandbreite verarbeitbarer Druckmaterialien, Reproduzierbarkeit und Qualität des Druckbilds. Hieraus ergeben sich die folgenden Zielwerte, die betrachtet und in einem Radardiagramm zusammengefasst werden:

- Kosten der Druckanlage
 - Bandbreite verarbeitbarer Druckmaterialien
 - Reproduzierbarkeit
 - Qualität des Druckbilds
 - Designfreiheit
-

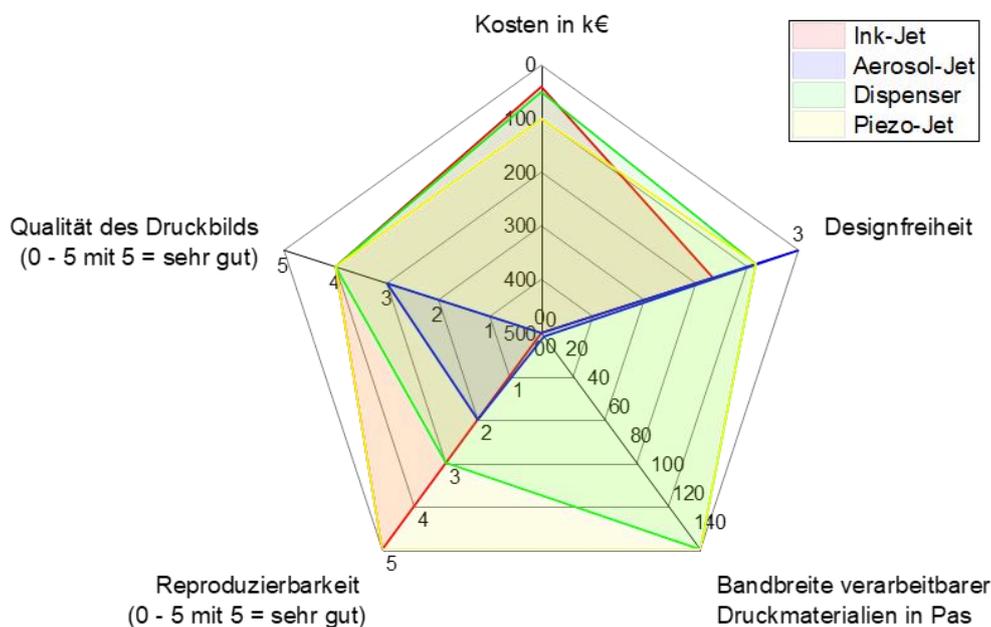


Abbildung 34: Radardiagramm zum Vergleich vier verschiedener Druckprozesse hinsichtlich Kosten, Designfreiheit, Bandbreite verarbeitbarer Druckmaterialien, Reproduzierbarkeit und Qualität der erzeugten Druckbilds

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass eine Kombination aus Piezo-Jet und Aerosol-Jet Verfahren zielführend ist. Somit kann eine breite Bandbreite an Druckmaterialien eingesetzt werden und ebenso dreidimensionale Substrate verwendet werden. Während mit dem Piezo-Jet Verfahren Strukturbreiten ab 250 µm und Schichtdicken ab 10 µm erzeugt werden können, sind mit dem Aerosol-Jet Verfahren Schichtbreiten von nur 20 µm und Schichtdicken von 5 µm möglich.

3.5.3 Sinterprozesse

Für die Trocknungs- und Verdichtungsmethoden werden hier neben dem Referenzprozess Ofen auch die photonischen Sinterverfahren UV, NIR und Laserbestrahlung zur Sinterung gedruckter Strukturen betrachtet. Die entscheidenden Kriterien für die Auswahl des richtigen Sinterprozesses sind jedoch stark abhängig von der Tinten- bzw. Pasten- und Substratkombination. An dieser Stelle soll deshalb versucht werden, die Sinterprozesse unabhängig davon zu vergleichen. Die Hauptkriterien für die Betrachtung sind die Kosten der Sinteranlage, Maschinenintegration, Sicherheitsbestimmungen, Designfreiheit hinsichtlich 3D Substraten und die Sinterdauer. Hieraus ergeben sich die folgenden Zielwerte:

- Maschinenintegration
- Sinterdauer
- Sicherheitsbestimmungen
- Kosten der Sinteranlage
- Designfreiheit 3D-Fähigkeit



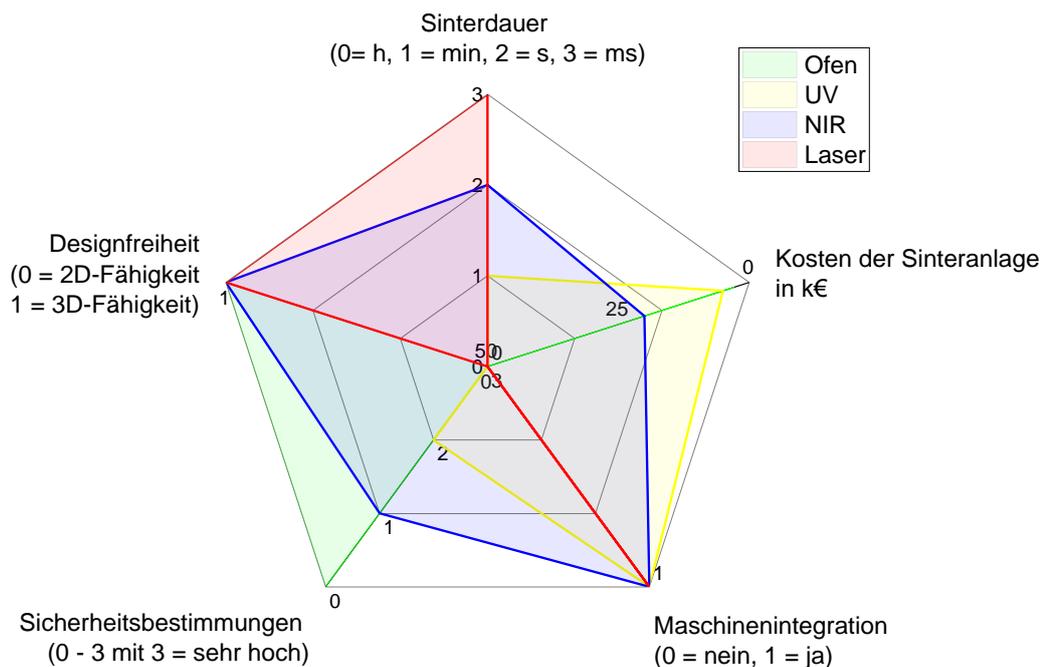


Abbildung 35: Radardiagramm zum Vergleich unterschiedlicher Sinterverfahren hinsichtlich Maschinenintegration, Sicherheitsbestimmungen, Designfreiheit, Sinterdauer und Kosten der Sinteranlage

Der Einsatz der Laserbestrahlung in einem Direkt-Druck-Bearbeitungskopf bringt wesentliche Vorteile im Bereich der Designfreiheit, Maschinenintegration und Sinterdauer. Die Sinterung mittels Laserstrahlung umfasst wenige ms, während der Referenzprozess Ofen und die photonischen Vergleichssinterverfahren sich im Stunden und Sekundenbereich bewegen. Ebenso ist der Einsatz des Lasers bei dreidimensionalen Substraten möglich, wenn dieser beispielsweise auf einem Roboterarm montiert wird. Als entscheidender Nachteil der Laserbestrahlung sind spezielle Sicherheitsbestimmungen und die Kosten hierfür zu sehen.

Wie bereits in den vorangegangenen Versuchen gezeigt, ist die Sinterung gedruckter Strukturen mittels Laserbestrahlung möglich, jedoch muss aufgrund der hohen Kosten und Sicherheitsbestimmungen geprüft werden ob der Einsatz in einem Bearbeitungskopf wirtschaftlich sinnvoll ist.

3.6 AP6: Wirtschaftliche und technische Bewertung der Prozess- und Bauteilfähigkeit anhand von Demonstratorbauteilen (blz, FAPS)

Die im Rahmen des Projektes erreichten Meilensteine zur schnellen und flexiblen Herstellung funktionaler Schaltungsträger haben das Potential der Verfahrenskombination von Direkt-Druck-Technologien und Lasersinterverfahren aufgezeigt. Um die Vorteile der neuartigen Verfahrenskombination deutlich zu machen und diese auch einem Fachpublikum auf Messen und Konferenzen zu präsentieren, wurde ein Demonstrator konzeptioniert, entwickelt und realisiert. Die Konzeptionierung des Demonstrators erfolgte zunächst anhand von CAD-Modellen. Abbildung 36 zeigt die entwickelte CAD-Baugruppe und den zugehörigen Schaltkreis inklusive der verwendeten Bauelemente.

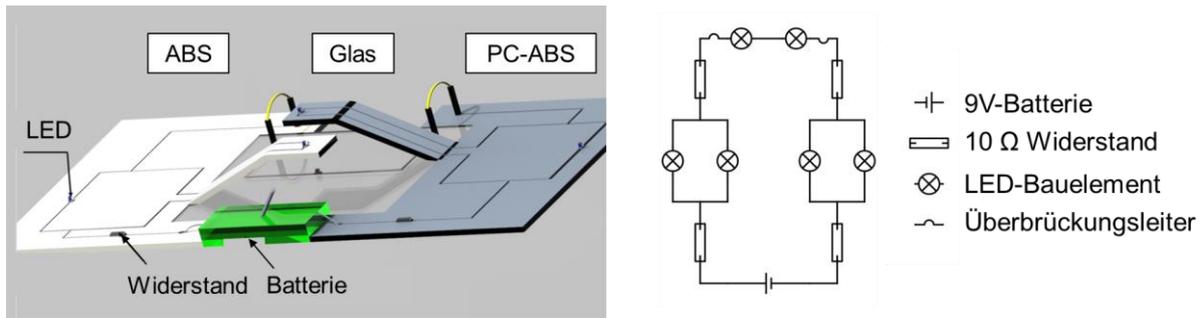


Abbildung 36: CAD-Baugruppe des dreiteiligen, funktionellen Demonstrators und integrierter Schaltkreis mit Bauelementen

Der Demonstrator wurde auf Basis der Ergebnisse der vorangegangenen Arbeitspakete und in Abstimmung mit dem projektbegleitenden Ausschuss realisiert. Als Demonstrator wurde ein im Vergleich zu typischen MID-Bauteilen großflächiger Kunststoffträger bestehend aus drei miteinander verbundenen Teilen mit einer Kantenlänge >20 cm erzeugt, siehe Abbildung 37. Die Grundkörper bestehen aus ABS, PC-ABS und Glas. Die elektrische Funktionalisierung erfolgte durch Aufbringen der Silbermikropartikelpaste der Fa. Henkel auf das Substrat und die anschließende Versinterung mittels Laserstrahlung. Zusätzlich wurden elektronische Bauelemente bestückt und kontaktiert. Die Kontaktierung der Bauelemente auf dem Demonstrator wurde mittels Laserstrahllöten und Leitkleben realisiert. Zur Charakterisierung der Kontaktierungen wurden Schertests durchgeführt und Schliffbilder erstellt.

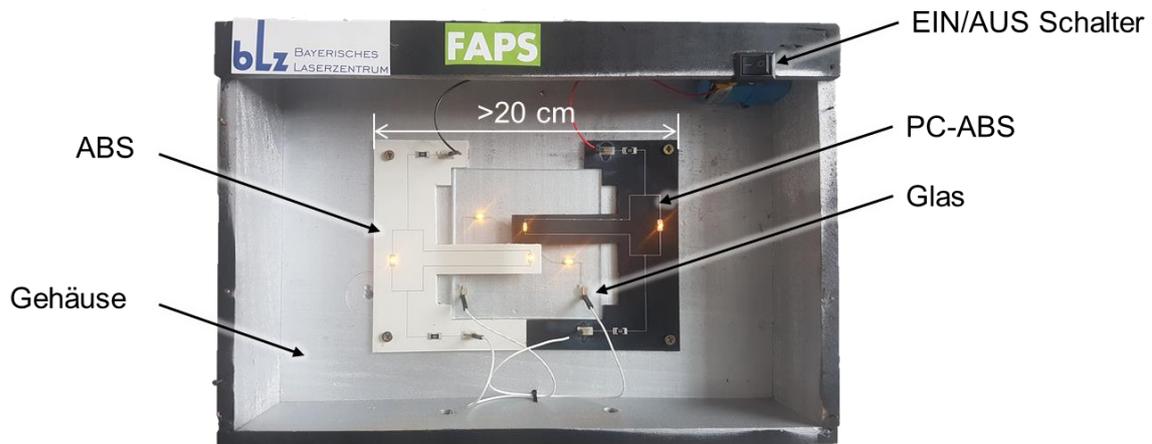


Abbildung 37: Fertiger dreiteiliger Demonstrator

3.6.1 Bewertung der 3D-Fähigkeit des Prozesses

Die am Lehrstuhl FAPS aufgebaute Dispensersystem ermöglicht es, mit einem 3-Achs-System Leiterbahnstrukturen auf 2D bzw. 3D Formkörper zu drucken. Im Hinblick auf den im Projekt herzustellenden Demonstrator wurden hierzu das Bedrucken von Schrägen mit einem 3-Achs-System näher betrachtet.

Zur Bewertung der 3D-Fähigkeit des Prozesses wurde der Einfluss des Anstellwinkels zwischen Flächennormale und Dispensernadel für verschiedene Winkel untersucht. Abbildung 38 zeigt Einfluss des Anstellwinkels auf die Qualität des Druckbilds der Leiterbahn. Bei einer Schräge >35° wurden wellige Leiterbahnen erzeugt, die auf eine inhomogene Benetzung des Substrats

zurückzuführen sind. Bis zu einer Schräge von 25° lassen sich gerade Leiterbahnen mit einer konstanten Leiterquerschnittsfläche drucken.

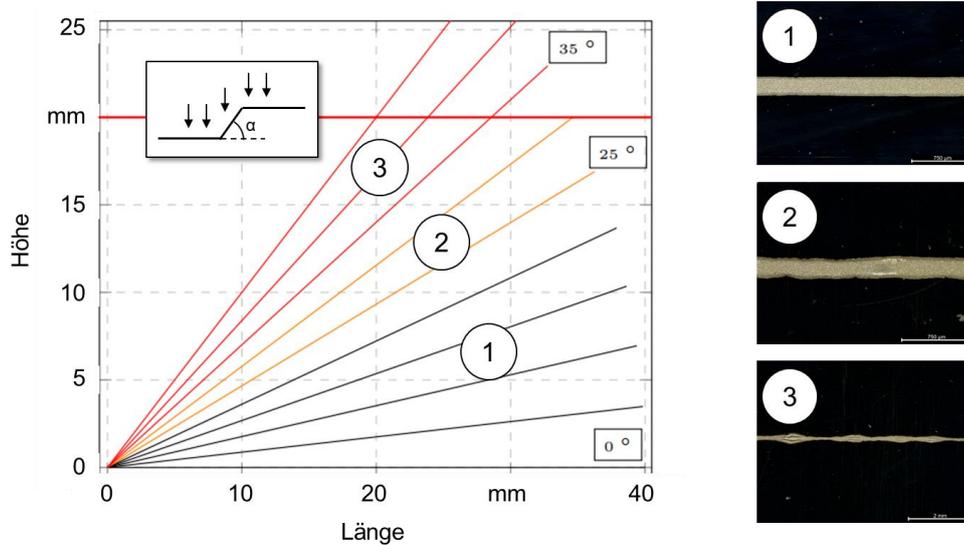


Abbildung 38: Einfluss des Anstellwinkels zwischen Flächennormale und Düse auf die Druckqualität der Leiterbahn

Mit dem verwendeten Dispensersystem und dem scannerbasierten Lasersystem konnte eine 3D-Demonstratorbaugruppe hergestellt werden. Auf Basis der Ergebnisse der vorangegangenen Arbeitspakete konnte die Prozess- und Bauteilfähigkeit anhand des Demonstrators für ABS, PC-ABS und Glas durch eine Bauelementebestückung und elektrische Funktionalisierung aufgezeigt werden. Die Möglichkeit zur Herstellung komplexer dreidimensionaler Bauteile ist durch das verwendete Dispensersystem sowie das Lasersystem zur Sinterung der gedruckten Strukturen nur eingeschränkt gegeben. Die Strukturierung komplexer dreidimensionaler Geometrien erfordert den Zukauf eines Mehr-Achs-Systems, das für die Bewertung der Arbeiten jedoch als nicht zielführend erachtet wurde. Zudem war die Anschaffung eines Mehr-Achs-Systems aufgrund der hohen Anschaffungskosten im Rahmen des Forschungsprojektes nicht möglich.

3.6.2 Laserstrahllöten und Leitkleben von Bauelementen und Charakterisierung der Kontaktierungen (blz)

Die Prozesse bei der Montage der Bauelemente sind an die Prozesskette der MID-Serienfertigung angelehnt. Dabei können Fügeverfahren wie Dampfphasenlöten, Laserlöten oder Leitkleben zum Einsatz kommen. Im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit des Prozesses und die Umsetzung der Einzelprozesse in einem gemeinsamen Bearbeitungskopf wurden neben dem Versintern der Leiterstrukturen auch die Herstellung der Fügeverbindung mittels Laserstrahlung untersucht.

Zur Bestimmung der Haftfestigkeit der verwendeten Bauelemente wurde die Ermüdung der Kontaktierung durch mechanische Scherbeanspruchung nach DIN EN ISO 62137-1-5:2009 geprüft. Die Anlage sowie der Versuchsaufbau zur Durchführung der Schertests ist in Abbildung 39 dargestellt. Die Kontaktierungen der Bauelemente wurden mittels selektivem Laserstrahllöten hergestellt. Dabei wurden die Kontaktierungen sowohl mit als auch ohne Lot realisiert. Eine umfangreiche Parameteroptimierung wurde für das Laserstrahllöten nicht vorgenommen. Bei den durchgeführten Experimenten wurde die Laserleistung konstant bei 2 W gehalten und die

Bestrahlungsdauer des Lasers zwischen $t = 1,0 \text{ s}$ und $t = 3,0 \text{ s}$ variiert. Die Verfahrensgeschwindigkeit des Schermeißels wurde auf $0,001 \text{ mm/s}$ konstant gehalten.

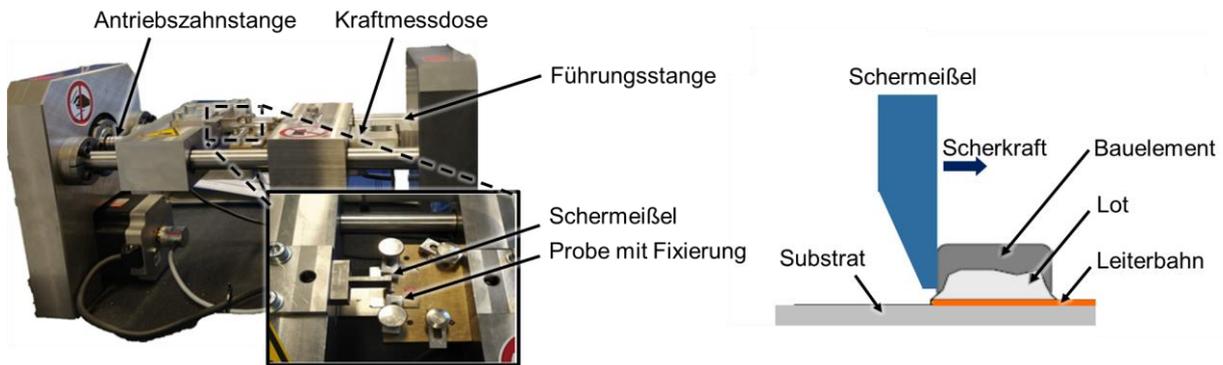


Abbildung 39: Anlage und Versuchsaufbau zur Prüfung der Scherfestigkeiten der Bauteile

Die in Abbildung 40b dargestellten Ergebnisse der mechanischen Scherkräftemessung beziehen sich auf die Kontaktierung von Bauelementen ohne den Einsatz von Lötmitteln. Die Bauelemente wurden hierfür direkt im Anschluss an den Dispenserprozess auf dem Leitkleber fixiert. Als Leitkleber wurde die Mikropartikelpaste der Fa. Henkel verwendet.

Die Werte der Scherkraft im Bereich $5 - 7 \text{ N}$ bei einer Bestrahlungsdauer von $t = 1 \text{ s}$ sind für das LED-Bauelement LHR974 der Fa. Osram relativ gering im Vergleich zu Bauelementen mit ca. $12 - 20 \text{ N}$. Das Versagen tritt meist zwischen Leitkleber und Bauelement auf, wobei es nur in Ausnahmefällen zu einem Ablösen der Silberpaste vom Substrat kommt. Bei einer Aushärtedauer von $t = 3 \text{ s}$ zeigt sich ein deutlicher Anstieg der Scherkräfte auf Werte zwischen 16 und 17 N . Bei einer Betrachtung der Bruchflächen fällt zudem auf, dass bei höheren Aushärtedauern meist ein Versagen zwischen Substrat und Silberstruktur vorliegt. Dies lässt den Rückschluss zu, dass die für eine Bestrahlungsdauer von $t = 3,0 \text{ s}$ erreichte Scherkraft von $16,5 \text{ N}$ im Bereich der maximal erreichbaren Scherkraft für die erzeugte Silberstruktur liegt. Die erzielte Scherkraft ist im Vergleich zu FR4-Leiterplatten geringer, jedoch ausreichend hoch für MID-Applikationen.

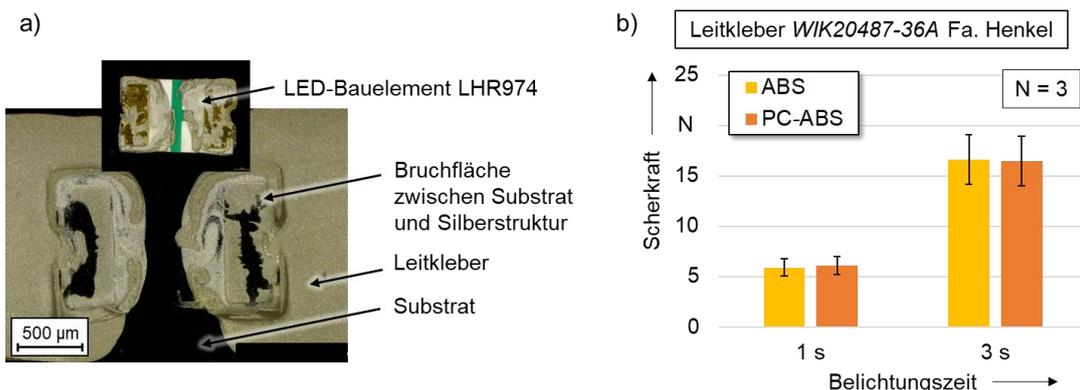


Abbildung 40: a) Aufsicht auf eine mittels Leitkleber kontaktierte PC-ABS-Probe nach dem Schertest; b) Scherkräfte lasergelöteter Bauelemente auf ABS und PC-ABS

Des Weiteren wurden Kontaktierungen mit Zuhilfenahme eines Lötmittels hergestellt, um die auf den spritzgegossenen Substraten erzeugten Leiterbahnen mit Bauelementen zu bestücken. Als Lötmedium wurde das Weichlot M705 der Fa. Senju Metal Industry verwendet. Die Partikel des bleifreien Weichlots besitzen einen Durchmesser von ca. $30 \mu\text{m}$ und setzen sich aus einem Anteil

von 96,5 % Zinn, 3,0 % Silber und 0,5 % Kupfer zusammen. Das Lötmedium kann Tangentialkräften von bis zu 60 N standhalten und besitzt eine Schmelztemperatur von 222 °C.

Eine Bestimmung der Scherkräfte erfolgte auf ABS und PC-ABS. Die Ermittlung der mechanischen Scherkräfte wurde bei einer Bestrahlungsdauer von $t = 1$ s und $t = 3$ s durchgeführt, wobei die Laserleistung konstant bei 2 W gehalten wurde. Bei einer Bestrahlungsdauer von $t = 1$ s zeigen sich für das LED-Bauelement LHR974 der Fa. Osram geringe Scherkräfte mit Werten im Bereich 2 – 4 N, vgl. Abbildung 41. Die geringen Werte sind auf das unvollständige Aufschmelzen des Weichlots zurückzuführen, das ein Versagen im Lot verursacht. Bei einer Bestrahlungsdauer von $t = 3$ s zeigt sich ein deutlicher Anstieg der Scherkräfte auf Werte zwischen 19 und 21 N. Bei einer Betrachtung der Bruchflächen fällt auf, dass bei hohen Bestrahlungsdauern das Lot an der Kontaktfläche zum Bauelement vollständig aufgeschmolzen ist und ein Versagen an der Grenzfläche zwischen Substrat und Silberstruktur vorliegt. Im Vergleich zu Bauelementen, die mittels Leitleber kontaktiert wurden, konnten Kontaktierungen mittels Laserstrahlloten demnach mit ca. 24 % höheren erreichbaren Scherkräften hergestellt werden.

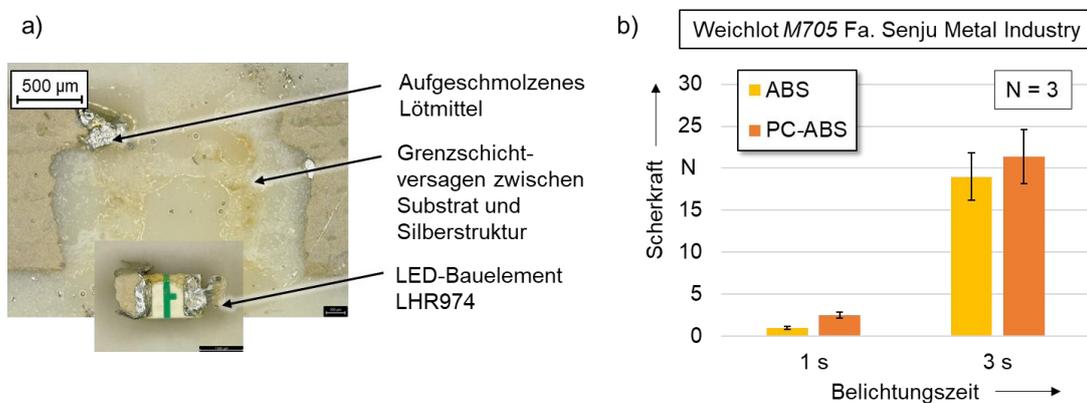


Abbildung 41: a) Aufsicht auf eine lasergelötete ABS-Probe nach dem Schertest; b) Scherkräfte lasergelöteter Bauelemente auf ABS und PC-ABS

Entscheidend für hohe erreichbare Scherkräfte ist u. a. die Größe der Bauelemente und der Kontaktflächen zum Substrat. Da sich der Bruch in diesem Bereich ereignet, können Bauelemente mit einer flächenmäßig größeren Haftung an dem Kontaktpad höhere Scherkräfte aufnehmen. Die Gehäuseabmessung der verwendeten LED-Bauelemente ist mit 2,0 mm x 1,25 mm sehr klein. Bei der Verwendung größerer SMD-Bauelemente ist demnach mit höheren maximal erzielbaren Scherkräften zu rechnen. Eine weitere Verbesserung der Scherkräfte kann durch eine optimierte Auswahl von Leitleber bzw. Lötmedium erfolgen. Zusätzlich ist für eine qualitativ hochwertige Verbindungsstelle u. a. die Größe der Bauelemente und Kontaktpads wichtig. Speziell bei der Verwendung von Lotpaste kann es durch unterschiedlich große Pads zu einer Inhomogenität der Verbindungsstellen kommen. Dies kann negative Auswirkungen auf die Zuverlässigkeit der Baugruppe haben.

Für die Kontaktierung der hergestellten Leiterbahnen mit elektrischen Bauelementen wurde gemeinsam mit dem Projektpartner Eutech GmbH das Wellenlötverfahren als konventionelles Masselötverfahren hinsichtlich der Herstellbarkeit der Kontaktierung untersucht. Durch das Miniatur-Wellenlötverfahren war es hierbei möglich, die Bauteile selektiv mit den Anschluss pads zu kontaktieren. Die Ergebnisse der Kontaktierung zeigen jedoch ein partielles Ablösen der Anschluss pads während des Lötprozesses, welches auf die hohe Temperatur des flüssigen,

bleifreien Lots von 270 °C zurückzuführen ist. Dadurch wurde eine Bestimmung der Scherkräfte der Bauteile als nicht zielführend erachtet. Abbildung 42 zeigt die Kontaktierung des LED-Bauelements LHR974 auf ABS nach einer Lötdauer von $t = 0,1$ s. Um einem Ablösen der Anschluss pads entgegenzuwirken, kann eine Silber-Palladium-Schicht im Bereich der Kontaktflächen auf das Substrat aufgebracht werden, die als Haftvermittler zwischen Substrat und Leiterstruktur bzw. Lot dient, jedoch aufgrund des zusätzlichen Prozessschritts im Rahmen dieses Forschungsvorhabens nicht weiterverfolgt wurde.

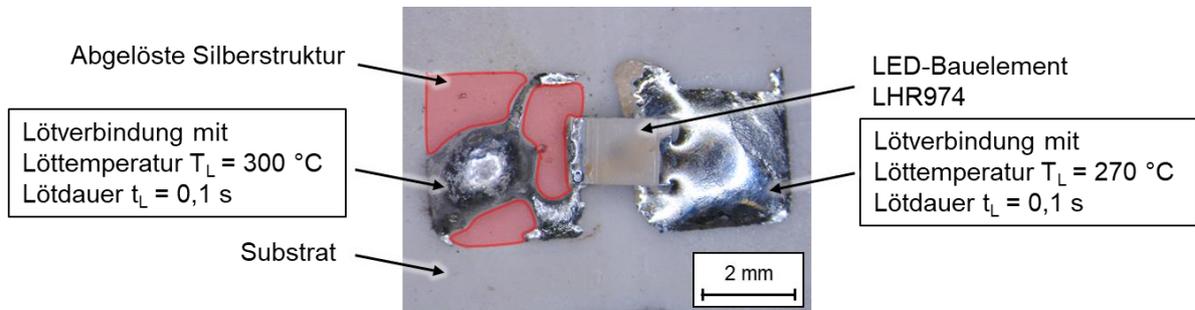


Abbildung 42: Aufsicht auf eine Miniwellen-Lötverbindung zwischen LED-Bauelement und Anschlusspad auf ABS

4 Wissenschaftlicher Ausblick und zukünftiges wissenschaftlich-technisches Vorgehen

Die im Rahmen des Forschungsprojekts LaDi-Print erzielten Ergebnisse haben gezeigt, dass das Lasersintern im Vergleich zum herkömmlichen Ofenprozess deutlich besser geeignet ist, um auf temperaturempfindlichen Substraten leitfähige Strukturen zu realisieren. Hierbei werden um mindestens 100 % höhere elektrische Leitfähigkeiten erzielt, bei gleichzeitiger Reduktion der Sinterdauer auf wenige Millisekunden. Insgesamt wurden eine Silbernanopartikelntinte, eine Silbermikropartikelpaste und eine Kupferpartikelpaste untersucht und auf zwei unterschiedliche temperaturempfindliche Substrate mittels Dispensersystem und Aerosol-Jet Verfahren aufgebracht. Durch die Spektrometermessungen der Tinten lassen sich Rückschlüsse auf das Absorptionsverhalten der Druckmaterialien ziehen. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass nicht nur das thermische Sintern und die Absorption der Tinten entscheidend sind. So ist davon auszugehen, dass neben den Lösungsmitteln die Partikelgröße, die Partikelgrößenverteilung sowieso die Ummantelung und Funktionalisierung der Silber- bzw. Kupferpartikel einen starken Einfluss auf das Sinterergebnis haben. Diese Aspekte, wie die Anpassung der Partikelgröße, der Lösemittel und der Partikelform, sollten in weiteren Forschungsvorhaben mit Tinten- und Pastenherstellern untersucht werden. Durch die optimale Tintenformulierung, welche auf die Oberflächenenergie des Substrates und auf den Druck- sowie Sinterprozess angepasst ist, können schneller leitfähige Strukturen erzeugt und die Absorption der Partikel effizienter eingesetzt werden.

Ein weiterer Aspekt ist die Betrachtung der Laserbestrahlung nicht nur als Nachbehandlungsmethode, sondern auch mit Blick auf die Oberflächeneigenschaften zur Vorbehandlung der Substrate. Die durch ein Direkt-Druck-Verfahren (z. B. Aerosol-Jet, Ink-Jet) erzeugbaren filigranen Leiterbahnen lassen sich nicht ohne Einschränkungen auf additiv hergestellte Bauteile aufbringen, da deren Oberflächen verfahrensbedingt rau und defektbehaftet sind. Um eine hochauflösende Aufbringung von Leiterbahnen mittels Direkt-Druck-Verfahren dennoch zu ermöglichen, kann ein laserbasierter Glättungs- oder Ablationsprozess angewandt werden. Dadurch können vor allem im Bereich 3D-Druck (z. B. FDM, SLA) elementare Fortschritte bei der Funktionalisierung erzielt werden.

Ein weiterer wissenschaftlich interessanter Aspekt ist, neben der Untersuchung weiterer Tinten- und Druckmaterialien, die Untersuchung der Anwendung von maschinellen Lernverfahren (ML), um die Prozessparameter der Laserbestrahlung, wie Intensität und Scangeschwindigkeit, automatisch an das zu druckende Layout anzupassen. Wie sich im laufenden Projekt gezeigt hat, variieren die verwendeten Parameter je nach bedruckter Größe bzw. Geometrie des Tinten- bzw. Pastenauftrags. Einfache Leiterbahnen benötigen hierbei einen geringeren Energieeintrag zur Sinterung, während auf Flächen, aufgrund der zu sinternden Materialmenge, vergleichsweise höhere Intensitäten oder längere Bestrahlungszeiten erforderlich sind. ML würde eine Einstellung der richtigen Parameter in situ ermöglichen, was vorteilhaft für eine zügige Umsetzung des Druckverfahrens in industriellen Anwendungen wäre.

5 Verwendung der Zuwendung

5.1 Durchführende Forschungsstellen

Forschungsstelle 1 (federführend):

Bayerisches Laserzentrum GmbH (blz)
Konrad-Zuse-Straße 2
91052 Erlangen

Leiter der Forschungsstelle: Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt
Projektleiter: Dr.-Ing. Stephan Roth
Email: s.roth@blz.org
Tel.: +49 9131 97790-13

Forschungsstelle 2:

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS)
Fürther Straße 246b
90429 Nürnberg

Leiter der Forschungsstelle: Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke
Projektleiter: M.Sc. Alexander Hensel
M.Sc. Simone Neermann
Email: simone.neermann@faps.fau.de
Tel.: +49 911 5302 9088

5.2 Personaleinsatz

Forschungsstelle 1:

Wissenschaftlich-technisches Personal:

2018: 6 Monate wiss. Personal + 3 Monate techn. Personal
2019: 12 Monate wiss. Personal + 7 Monate techn. Personal
2020: 6 Monate wiss. Personal

Forschungsstelle 2:

Wissenschaftlich-technisches Personal:

2018: 6 Monate wiss. Personal
2019: 12 Monate wiss. Personal + 10 Monate techn. Personal
2020: 6 Monate wiss. Personal

6 Erläuterung der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die im aktuellen Projektplan aufgezeigten durchgeführten Forschungsergebnisse waren notwendig und angemessen zur Erreichung der angestrebten Forschungsziele. Das Wissen um die physikalischen und chemischen Eigenschaften beim Trocknen und Verdichten der gedruckten Strukturen mittels Laserstrahlung wurde im Projekt erarbeitet. Der eingesetzte Aufwand ist auf Grund des umfangreichen Versuchsplans angemessen. Aufgrund der Corona-Pandemie und des damit einhergehenden Lockdowns im April und Mai 2020 kam es zu einer verzögerten Durchführung der Druck- und Sinterversuche. Dadurch kam es zu einer Verzögerung bei der Bearbeitung des Projekts, was zu einer kostenneutralen Verlängerung des Projekts um 4 Monate führte. Alle erforderlichen Tätigkeiten wurden im Rahmen des Vorhabens zum 31.10.2020 abgeschlossen.

7 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

7.1 Durchgeführte Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/Zeitraum
Beratung des Projektbegleitenden Ausschuss (pbA)	Kick-Off Meeting: Vorstellung der ersten Ergebnisse und Diskussion des weiteren Vorgehens	Lehrstuhl FAPS, Nürnberg	Dezember 2018
	Vorstellung der Zwischenergebnisse und Diskussion über das weitere Vorgehen	Lehrstuhl FAPS, Nürnberg	Juli 2019
	Vorstellung der Zwischenergebnisse und Diskussion über das weitere Vorgehen	Lehrstuhl FAPS, Nürnberg	April 2020
	Abschlussmeeting: Vorstellung der erreichten Ergebnisse und Zusammenfassung des Projekts	Lehrstuhl FAPS, Nürnberg	Oktober 2020
Transfer der Projektergebnisse	Präsentation der Zwischenergebnisse, Diskussion und Einbringung weiterer Ideen	Mitgliederversammlung 3-D MID e.V., Würzburg	September 2018
	Fachvortrag der Ergebnisse bei LEF (Laser in der Elektronikproduktion & Feinwerktechnik)	LEF, Fürth	Februar 2019
	Präsentation der Projektergebnisse beim WGP-Seminar „Mechatronische Funktionalisierung durch 3D-Druckverfahren“	FAPS, Nürnberg	April 2019
	Präsentation der Projektergebnisse; Diskussion und Einbringung weiterer Ideen	Summit 3-D MID e.V., Nürnberg	Mai 2019
Veröffentlichung der Projektergebnisse	Wissenschaftliche Publikation bei einer nationalen Konferenz	MID-Kongress, Würzburg	September 2018
	Wissenschaftliche Publikation bei einer internationalen Konferenz	SMTA Pan Pacific, Hawaii	Februar 2020
Durchführung von studentischen Arbeiten	Projekt- und Abschlussarbeiten von Studenten verschiedener Studienrichtungen	FAPS/blz, Nürnberg/Erlangen	2018, seit Projektbeginn

7.2 Transfermaßnahmen nach Projektabschluss

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/Zeitraum
Beratung des Projektbegleitenden Ausschuss (PA)	Abschlussbericht und alle erzielten Projektergebnisse werden dem pbA zur Verfügung gestellt		4. Quartal 2020
Transfer der Projektergebnisse	Präsentation der Projektergebnisse	Mitgliederversammlung 3-D MID e.V.	4. Quartal 2020
	Fachvortrag der Ergebnisse bei LEF (Laser in der Elektronikproduktion & Feinwerktechnik)	LEF, Fürth	1. Halbjahr 2021
	Präsentation der Projektergebnisse beim WGP-Seminar „Mechatronische Funktionalisierung durch 3D-Druckverfahren“	FAPS, Nürnberg	April 2021
Veröffentlichung der Projektergebnisse	Wissenschaftliche Publikation der Ergebnisse bei einer nationalen Konferenz	MID-Kongress, Amberg	Februar 2021

7.3 Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts

Um allen Interessensgruppen gerecht zu werden, werden die bereits durchgeführten Transfermaßnahmen als auch die nach dem Projektabschluss noch geplanten Maßnahmen als sehr geeignet angesehen. Das aktuelle Transferkonzept entspricht überwiegend dem ursprünglich vorgeschlagenen Konzept und musste aufgrund der Corona-Situation nur an manchen Stellen für das Jahr 2020 angepasst werden. Durch den Ergebnistransfer zum projektbegleitenden Ausschuss und der vielfältigen Maßnahmen der Veröffentlichung auf nationalen sowie internationalen Konferenzen und Messen wird der breiten Öffentlichkeit ein hervorragender Zugang zu den Forschungsergebnissen gewährt.

7.4 Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU

7.4.1 Innovativer Beitrag

Die gedruckte Elektronik bietet aufgrund ihrer hervorragenden Designfreiheit sowie der Möglichkeit der kostengünstigen Produktion von Elektronikkomponenten im Roll-to-Roll Verfahren neue Potenziale in verschiedenen Industriefeldern. Hauptaugenmerk liegt hierbei im Bereich Consumer Electronics sowie dem Automobilsektor, was auch das immer weiter steigende Marktvolumen widerspiegelt. Zur Erweiterung des Substratspektrums und dem Einsatz auch großflächiger Bauteile werden alternative Sintermethoden benötigt, um den effizienten Einsatz gedruckter Elektronik zu ermöglichen. Forschungsaktivitäten in diesem Themengebiet finden vor allem zeit- und kostenintensiv in kleinen und mittleren Unternehmen statt, weshalb vor allem diese von den erzielten Forschungsergebnissen profitieren. Konkret wurde in diesem Vorhaben die Eignung der Laser-Bestrahlung zur selektiven Sinterung digital gedruckter Leiterstrukturen auf verschiedenen temperaturempfindlichen Substraten untersucht und hinsichtlich ihrer spezifischen elektrischen Leitfähigkeit sowie Zuverlässigkeit bewertet. Die identifizierten Wirkmechanismen können für die weitere Prozessautomatisierung aufgegriffen werden und auch den Werkstoffherstellern bei der Entwicklung von angepassten Rezepturen behilflich sein.

7.4.2 Industrielle Anwendungsmöglichkeiten

In Deutschland ist die Elektronik-Branche überwiegend von zahlreichen KMU geprägt, welche als Zulieferer für verschiedenen Branchen fungieren. Besonders für sie ist der Einsatz gedruckter Elektronik aufgrund des kleinen Anlagenparks, der hierfür notwendig ist, von Interesse. Einfache Sensorstrukturen oder Antennen werden meist mit zwei Anlagen realisiert (Digitale Druckanlage wie beispielsweise Dispensersystem, Aerosol-Jet, Ink-Jet und Sinteranlagen/Ofen). Mit Hilfe der gewonnenen Erkenntnisse zur effizienten Sinterung gedruckter Strukturen mittels Laserstrahlung bietet sich die Möglichkeit, die Prozesse in einer gemeinsamen Anlage umzusetzen, und ermöglicht den Herstellern, im Bereich Elektronikproduktion ihr Produkt- und Maschinenportfolio zu erweitern. Darüber hinaus können konkretere Handhabungsrichtlinien von den Tinten- und Pastenherstellern definiert und an ihre Kunden weitergegeben werden. Eine weitere industrielle Anwendungsmöglichkeit ist der Einsatz gedruckter Strukturen im Bereich der Hochfrequenztechnik bei der Radar- und Antennenherstellung aufgrund der enormen geometrischen Freiheiten. Dies gilt gerade im Kontext mit dem 5G-Standard, welcher nicht nur für die Mobiltelefonie eingesetzt werden soll, sondern auch im Bereich der Vernetzung von industriellen Anlagen im Hinblick auf das Themengebiet der Industrie 4.0. Selektive Sinterverfahren haben einen deutlichen Einfluss auf die Oberflächenrauheit gedruckter Strukturen, welche einen signifikanten Einfluss auf die Hochfrequenzeigenschaften hat.

8 LITERATUR

- [1] Baur, E.; Brinkmann, S.; Osswald, T.A. et al.: Saechtling Kunststoff Taschenbuch. München: Hanser, 2013
- [2] Bargel, H.-J.; Schulze, G.: Werkstoffkunde. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012
- [3] Abts, G.: Kunststoff-Wissen für Einsteiger. München: Hanser, 2016
- [4] http://www.optomec.com/wp-content/uploads/2014/04/Optomec_Aerosol_Jet_Direct_Write_Printing_for_Mil_Aero_Electronic_Apps.pdf; 20.08.2020
- [5] Werner, C.; Godlinski, D.; Zöllmer, V. et al.: Morphological influences on the electrical sintering process of Aerosol Jet and Ink Jet printed silver microstructures. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 24 (2013) Nr. 11, S. 4367–4377
- [6] Optomec Inc. (Hrsg.): Aerosol Jet Deposition System Manual (9000038). Albuquerque, 2006
- [7] Secor, E.B.: Principles of aerosol jet printing 3 (2018) Nr. 3, S. 1–12
- [8] Franke, J.: Räumliche elektronische Baugruppen (3D-MID). Werkstoffe, Herstellung, Montage und Anwendungen für spritzgegossene Schaltungsträger. München: Hanser, 2013
- [9] Goth, C.: Analyse und Optimierung der Entwicklung und Zuverlässigkeit räumlicher Schaltungsträger (3D-MID). Bamberg: Meisenbach, 2013
- [10] Seifert, T.; Sowade, E.; Roscher, F. et al.: Additive Manufacturing Technologies Compared: Morphology of Deposits of Silver Ink Using Inkjet and Aerosol Jet Printing. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 54 (2015) Nr. 2, S. 769–779
- [11] Abt, M.; Roch, A.; Qayyum, J.A. et al.: Aerosol-Printed Highly Conductive Ag Transmission Lines for Flexible Electronic Devices. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology* 8 (2018) Nr. 10, S. 1838–1844
- [12] Ahmed, Z.; Torah, R.; Tudor, J.: Optimisation of a novel direct-write dispenser printer technique for improving printed smart fabric device performance. In: Charlot, B. (Hrsg.): 2015 Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS (DTIP). 27 - 30 April 2015, Montpellier, France. 2015 Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS (DTIP), Montpellier, France, 4/27/2015 - 4/30/2015, S. 1–5. Piscataway, NJ: IEEE, 2015
- [13] Godlinski, D.; Zichner, R.; Zöllmer, V. et al.: Printing technologies for the manufacturing of passive microwave components: antennas. *IET Microwaves, Antennas & Propagation* 11 Nr. 14, S. 2010–2015
- [14] DIN EN ISO 2409:2013-06 „Beschichtungsstoffe“
- [15] Maekawa, K.; Yamasaki, K.; Niizeki, T. et al.: Influence of wavelength on laser sintering characteristics of Ag nanoparticles. In: 2009 59th Electronic Components and Technology Conference. 2009 IEEE 59th Electronic Components and Technology Conference (ECTC 2009), San Diego, CA, USA, 26.05.2009 - 29.05.2009, S. 1579–1584. IEEE, 2009 - 2009
- [16] KEYENCE: Konfokales 3D Laserscanning-Mikroskop. Modellreihe VK-X1000
- [17] PEDRANTI ELIO: DIGITAL NANO-OHMMETER 20024. Cardano al Campo; 07.07.2008
- [18] Coherent, Inc.: EnergyMax-USB-RS-Sensors-Guide_FORMFIRST (2011)

- [19] Tian, Y.; Jiang, Z.; Wang, C. et al.: Sintering mechanism of the Cu–Ag core–shell nanoparticle paste at low temperature in ambient air. *RSC Advances* 6 (2016) Nr. 94, S. 91783–91790
- [20] Ermak, O.; Zenou, M.; Toker, G.B. et al.: Rapid laser sintering of metal nano-particles inks. *Nanotechnology* 27 (2016) Nr. 38, S. 385201