



# Zwischenbericht vom 15.03.2025

zum IGF-Vorhaben **22835 N/2**

## Thema

Kundenindividuelle Herstellung hochintegrierter elektronischer 3D-Leistungsmodule mittels badbasierter Multimaterial-Photopolymerisation, pulverbett-basiertem Laserstrahlschmelzen und selektiver Piezojet-Metallisierung (MultiPower)

## Berichtszeitraum

01.01.2024 – 31.12.2024

## Forschungsvereinigung

3-D MID e.V.  
Fürther Strasse 246b  
90429 Nürnberg

## Forschungseinrichtung(en)

wbk Institut für Produktionstechnik  
Kaiserstraße 12  
76133 Karlsruhe

FAPS Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik  
Schlossplatz 4  
91054 Erlangen

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse im Berichtszeitraum</b> .....	<b>3</b>
1.1	Haben sich die Aussichten für die Erreichung der Ziele des Vorhabens innerhalb des angegebenen Ausgabenzeitraums gegenüber dem ursprünglichen Antrag geändert (Begründung)?.....	3
1.2	Arbeitspaket 2 und 3.1: Schlicker- und Prozessentwicklung der VPP-Multimaterial-Anlage .....	3
1.3	Arbeitspaket 3.2: Prozessentwicklung PBF-LB mit Kupfer .....	5
1.4	Arbeitspaket 4: Qualifizierung der Metall-Keramik-Verbindungen .....	6
1.5	Arbeitspaket 5.1: Designoptimierung in Bezug auf thermische Spannungen .....	7
1.6	Arbeitspaket 5.2: Designoptimierung mittels Piezojet zur 3D-Metallisierung.....	7
<b>2</b>	<b>Verwendung der Zuwendung</b> .....	<b>9</b>
<b>3</b>	<b>Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit</b> .....	<b>9</b>
<b>4</b>	<b>Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft</b> .....	<b>10</b>
4.1	Durchgeführte Transfermaßnahmen (von Projektbeginn bis 31.12.2024).....	10
4.2	Geplante Transfermaßnahmen (auch nach Projektende) .....	10

# 1 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse im Berichtszeitraum

## 1.1 Haben sich die Aussichten für die Erreichung der Ziele des Vorhabens innerhalb des angegebenen Ausgabenzeitraums gegenüber dem ursprünglichen Antrag geändert (Begründung)?

Innerhalb des Ausgabenzeitraums traten Herausforderungen auf, die die Projektziele beeinflussen könnten. Besonders die Wärmebehandlungsschritte nach dem Multimaterial-Prozess stellen eine Hürde dar. Bereits beim ersten Schritt, dem Entbindern, lösen sich filigrane Leiterbahnstrukturen vom Substratmaterial. Dies beeinträchtigt sowohl die Qualität als auch die Funktionalität der Verbindungen. Zusätzliche Schwierigkeiten entstehen beim gemeinsamen Sintern der  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Cu-Verbindungen. Während Aluminiumoxid bei 1450 °C bis 1800 °C in Luft gesintert wird, erfordert Kupfer 700 °C bis 1100 °C unter Schutzgasatmosphäre. Diese unterschiedlichen Sinterbedingungen erschweren die simultane Verarbeitung erheblich. Weitere Untersuchungen zur Optimierung der thermischen Nachbehandlung sind erforderlich, einschließlich Anpassungen im Prozessablauf oder zusätzlicher Maßnahmen zur Stabilisierung der Materialverbindungen, die in diesem Projekt nicht vollständig behandelt werden können.

## 1.2 Arbeitspaket 2 und 3.1: Schlicker- und Prozessentwicklung der VPP-Multimaterial-Anlage

- Durchgeführte Arbeiten

Auf Basis der Materialauswahl in AP1 wurden Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) und Aluminiumnitrid ( $\text{AlN}$ ) als Substrate sowie Kupfer (Cu) und Silber als Leiterbahnen aufgrund ihrer anwendungsgerechten Werkstoffeigenschaften ausgewählt. Daraus resultierend wurden spezifische Schlicker für die badbasierte Photopolymerisation (engl. vat photopolymerization, VPP) entwickelt, und die zugehörigen Pulver sowie Schlicker umfassend charakterisiert. Die Bindemittelmatrix setzt sich aus photoreaktiven Acrylatmonomeren, rheologischen Additiven und einem Photoinitiator zusammen. Zur Optimierung des Fertigungsprozesses wurden der Misch- und monolithische Druckprozess angepasst.

Unter Verwendung des Multimaterial-Prozesses an der Anlage Lithoz 2M30 wurden Grünteile in den Bauweisen  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Cu sowie  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Cu- $\text{Al}_2\text{O}_3$  hergestellt. Im weiteren Verlauf wurden die thermischen Nachbehandlungsschritte beim Entbindern und Sintern der Multimaterial- sowie monolithischen Bauteile untersucht, wobei Temperatur, Atmosphäre und Haltezeit variiert wurden, um optimale Prozessbedingungen zu ermitteln.

- Erzielte Ergebnisse

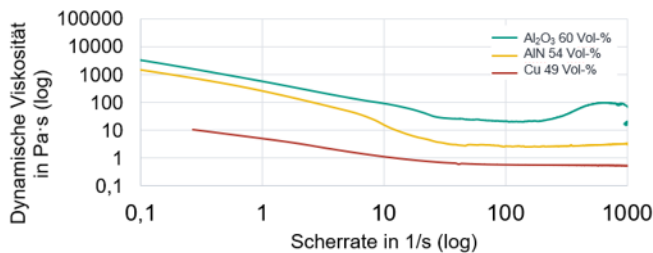
Das Bindersystem für den späteren Schlicker wurde für jedes Material aus den gleichen Rohstoffen in unterschiedlichen Verhältnissen zusammengesetzt. Ziel war es, den Feststoffgehalt an keramischen oder metallischen Pulvern zu maximieren, um eine geringe Schrumpfung beim Sintern zu erreichen. Die maximal zumischbare Pulvermenge hängt von den Material- sowie Pulvereigenschaften ab. Die Zusammensetzungen der Schlicker sind entsprechend mit dem Ziel der Maximierung des Feststoffgehalts in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Zusammensetzung der selbstentwickelten Schlicker in Vol-%

	Aluminiumoxid-Schlicker	Aluminiumnitrid-Schlicker	Kupfer-Schlicker
Aluminiumoxid	58 Vol-%	0 Vol-%	0 Vol-%
Aluminiumnitrid	0 Vol-%	54 Vol-%	0 Vol-%
Kupfer	0 Vol-%	0 Vol-%	44 Vol-%
Additiv	4 Vol-%	4 Vol-%	4 Vol-%
Monomere	26 Vol-%	28 Vol-%	27 Vol-%
Photoinitiator	8 Vol-%	10 Vol-%	16,5 Vol-%
Co-Photoinitiator	4 Vol-%	4 Vol-%	8,5 Vol-%

Voruntersuchungen am Rheometer, bei denen die Viskosität und das Aushärteverhalten mithilfe von Rotations- und Oszillationsmessungen untersucht wurden, haben gezeigt, dass alle drei Schlickerformulierungen als verarbeitbar für die VPP-Anlage gelten. Dies wurde durch die Rheometer-Daten bestätigt, wie in Abbildung 1 dargestellt.

#### Untersuchung der Rheologie:



#### Untersuchung des Aushärteverhaltens:

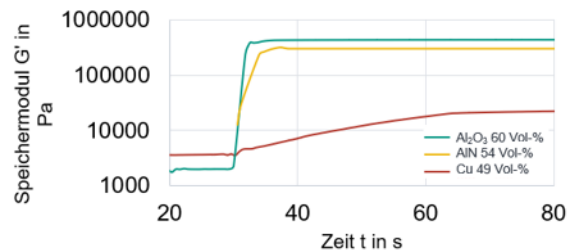


Abbildung 1: Vergleich der Viskosität sowie des Aushärteverhaltens der selbst entwickelten Schlicker

Für den eigens entwickelten Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Schlicker wurden als Belichtungsparameter eine Energie von 75 mJ/cm<sup>2</sup>, eine Intensität von 90,56 mW/cm<sup>2</sup> und eine Schichtdicke von 25 µm festgelegt. Das eigentliche Entbindern erfolgte bis 455 °C und das Vorsintern im Schritt des Entbinderns zur besseren Braunteilstabilität bis 1100 °C in Luft. Das abschließende Sintern wurde bei 1650 °C in Luft durchgeführt. Die Archimedes-Dichtemessung ergab für die Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Keramiken eine Dichte von 3,76 g/cm<sup>3</sup>, wobei der theoretische Wert bei 3,99 g/cm<sup>3</sup> liegt. Für den AlN-Schlicker wurden die Belichtungsparameter auf eine Energie von 200 mJ/cm<sup>2</sup>, eine Intensität von 90,56 mW/cm<sup>2</sup> und eine Schichtdicke von 25 µm festgelegt. Das Entbindern erfolgte ebenfalls bis 455 °C, das Vorsintern bis 1100 °C in Luft und das abschließende Sintern bei 1600 °C in Stickstoff. Die Dichte der AlN-Keramiken wurde mit 2,62 g/cm<sup>3</sup> ermittelt, während der theoretische Wert bei 3,26 g/cm<sup>3</sup> liegt.

Für den entwickelten Cu-Schlicker wurden als Belichtungsparameter eine Energie von 3000 mJ/cm<sup>2</sup>, eine Intensität von 90,56 mW/cm<sup>2</sup> sowie Schichtdicken von 10 µm und 25 µm festgelegt. Das Entbindern erfolgte bis 455 °C, das Vorsintern bis 1000 °C in Luft und das abschließende Sintern bei 1070 °C in einem Argon/Wasserstoff-Gemisch. Bei dem Gasgemisch wurde für Wasserstoff eine Durchflussrate von 60 l/h und für Argon eine Rate von 140 l/h gewählt. Die Archimedes-Dichtemessung ergab für die Kupfer-Keramiken eine Dichte von 7,71 g/cm<sup>3</sup>, wobei der theoretische Wert bei 8,96 g/cm<sup>3</sup> liegt.

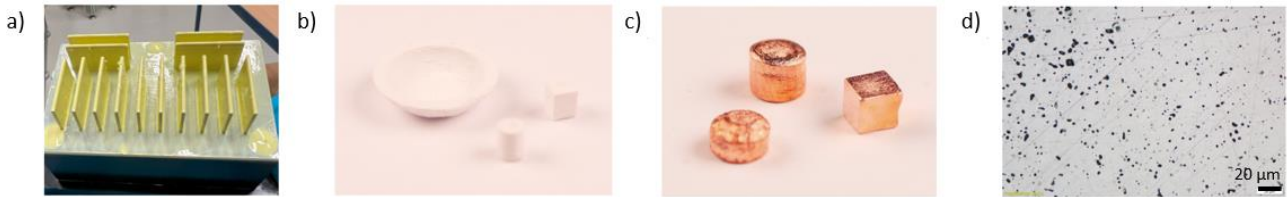


Abbildung 2: a) Aluminiumoxid-Platten (40 x 40 x 1 mm) für die anschließende Metallisierung, b) Aluminiumnitrid-Bauteile, c) Kupferbauteile und das dazugehörige d) metallografische Schlibbild

Der Multimaterial-Prozess mit der Anlage Lithoz 2M30 ermöglicht, wie in Abb. 3 a) zu sehen, die Fertigung von Grünteilen mit verschiedenen Multimaterial-Verbindungen, wie  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cu}$  und  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cu-Al}_2\text{O}_3$ . Um eine saubere Trennung der Materialien zu gewährleisten, Kreuzkontaminationen zu vermeiden und eine kontinuierliche Überwachung des Prozesses sicherzustellen.

Die auf den Multimaterial-Prozess nachfolgenden Wärmebehandlungsschritte stellen eine Herausforderung dar, insbesondere beim ersten Wärmebehandlungsschritt, dem Entbindern. Bereits hier sind Ablösungen der filigranen Leiterbahnstrukturen vom Substratmaterial erkennbar (Abb. 3 b)). Beim darauffolgenden gemeinsamen Sintern von  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cu}$ -Verbindungen können zusätzliche Schwierigkeiten ausfindig gemacht werden, da  $\text{Al}_2\text{O}_3$  typischerweise bei Temperaturen zwischen 1450 °C und 1800 °C in Luft gesintert wird, während Cu bei Temperaturen zwischen 700 °C und 1100 °C unter Schutzgasatmosphären wie Wasserstoff oder Stickstoff gesintert wird. Diese Diskrepanz zwischen den geforderten Sinterbedingungen erschwert die gleichzeitige Verarbeitung der Materialien und muss durch weitere Untersuchung bei den thermischen Nachbehandlungsschritten angegangen werden.

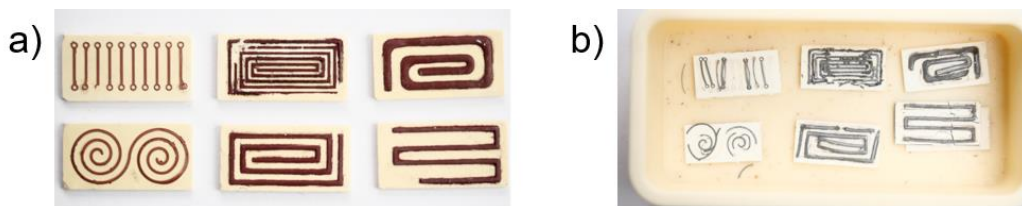


Abbildung 3: a) Kupfer-Leiterbahnen auf einem Aluminiumoxid-Substrat als Grünteil und b) nach dem Entbindern

### 1.3 Arbeitspaket 3.2: Prozessentwicklung PBF-LB mit Kupfer

- Durchgeführte Arbeiten

Ziel von AP3.2 ist die Erforschung des PBF-LB-Prozesses auf Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) und Aluminiumnitrid ( $\text{AlN}$ ), welches mittels VPP additiv gefertigt wird. Als Referenz wird der Prozess auf konventionell gefertigten Substraten durchgeführt, was im Fall des  $\text{AlN}$  ebenfalls innovativ ist und einen Forschungsgegenstand darstellt. Die konventionellen Substrate sowie das Kupferpulver wurden vom projektbegleitenden Ausschuss bereitgestellt, die VPP-Keramiken vom Projektpartner wbk. Systematische Parameterstudien wurden durchgeführt, um den geeignetsten Energieeintrag zur Erreichung höchstmöglicher Haftfestigkeit des Kupfers auf der Keramik und zugleich höchstmöglicher elektrischer Leitfähigkeit der Kupferstrukturen zu identifizieren. Ziel der Untersuchungen sind sowohl hohe Haftfestigkeit als auch hohe elektrische Leitfähigkeit des Kupfers. Es wird angenommen, dass die unteren Kupferschichten maßgeblich die Haftfestigkeit auf der Keramik beeinflussen, die oberen Schichten maßgeblich die elektrische Leitfähigkeit. Dementsprechend werden die Parameter für die oberen Schichten angepasst.

- Erzielte Ergebnisse

Die optimierten Prozessfenster für die betrachteten Keramiken sind in Tabelle 2 dargestellt und beinhalten die verwendete Laserleistung, die Scan-Geschwindigkeit des Lasers im Prozess, die Vorheiztemperatur der Bauplattform sowie die Höhe der ersten Kupferschicht auf dem Keramiksubstrat.

Tabelle 2: Parameter-Einstellungen für die betrachteten Keramiksubstrate im PBF-LB-Prozess

Keramik	Laserleistung [W]	Scan-Geschwindigkeit [mm/s]	Vorheiztemperatur [°C]	Höhe erste Schicht [µm]
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (konv., VPP)	35 – 55	200 – 300	0 – 250	30 – 80
AlN (konv.)	65 – 85	200 – 300	0 – 250	30 – 80
AlN (VPP)	25 – 35	200 – 300	0 – 250	30 – 80

Aus der Tabelle wird ersichtlich, dass für die Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Keramiken, unabhängig von ihrer Herstellungstechnologie, dieselben Parametereinstellungen verwendet werden konnten. Beim konventionellen AlN wurde die Laserleistung erhöht, da AlN eine höhere thermische Leitfähigkeit (170 W/m\*K) als Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (22 W/m\*K) besitzt und daher den Energieeintrag des Lasers besser ableitet. Beim VPP-AlN wurde die Laserleistung jedoch verringert, da sonst Schäden an der Keramik auftraten. Dies ist vermutlich auf die geringere Dichte des additiv gefertigten VPP-AlN gegenüber dem konventionellen AlN zurückzuführen, da diese die thermische Leitfähigkeit herabsetzt. Zur Erzielung einer hohen elektrischen Leitfähigkeit wurde die Laserleistung bei den konventionellen Substraten bis zu 65 W beim Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> und bis zu 120 W beim AlN erhöht.

#### 1.4 Arbeitspaket 4: Qualifizierung der Metall-Keramik-Verbindungen

- Durchgeführte Arbeiten

Ziel des AP4 ist die materialografische, mechanische und elektrische Qualifizierung der erzeugten Kupferstrukturen auf den diversen Keramiksubstraten. Hierzu standen entsprechende Anlagen zur Schlifferzeugung, ein Laserscanning-Mikroskop zur optischen Analyse sowie ein Schertester zur Ermittlung der mechanischen Haftfestigkeit und eine Vorrichtung für die Messung des elektrischen Widerstands mittels Vier-Punkt-Methode zur Verfügung. Beim Schertest wurden mittels PBF-LB erzeugte Kupferpads (3x3x0,36 mm) abgeschert. Die Leiterbahnen zur Vier-Punkt-Messung hatten folgende Abmessungen (LxBxH): 25x1x0,36 mm. Die Analysen erfolgten iterativ in AP3.2.

- Erzielte Ergebnisse

Die höchsten ermittelten Werte der Haftfestigkeit beim konventionellen wie auch beim mittels VPP hergestellten Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> betragen 215 N (bei einer Fläche von 9 mm<sup>2</sup> entspricht das 23,89 N/mm<sup>2</sup>). Dies stellte die Obergrenze des Schertesters dar. Die Laserleistung betrug jeweils 55 W. Beim konventionellen Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> traten Kohäsionsbrüche auf, beim VPP- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> auch Mischbrüche. Insgesamt sind die gemessenen Werte aber als Mindestwerte zu sehen. Beim konventionellen AlN wurden die höchsten Werte mit einer Laserleistung von 65 W erzielt, die maximal erreichte Haftfestigkeit war aber, verglichen mit Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, geringer (15,08 N/mm<sup>2</sup>). Eine mögliche Erklärung könnten die Mikroskopaufnahmen der Querschliffe zeigen, die in Abbildung 4 zu sehen sind. Oben, beim Kupfer auf Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Substrat, sind Bearbeitungsspuren des Lasers sichtbar, die für ein Interface mit Reaktionszone zwischen Kupfer und Keramik sprechen, was die gute Haftfestigkeit begründet. Unten, beim Kupfer auf AlN-Substrat, fehlen diese Bearbeitungsspuren fast vollständig. Möglicherweise

koppelt der Laser also nicht richtig ein aufgrund der höheren Härte und höheren thermischen Leitfähigkeit von AlN gegenüber Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Dies wird zeitnah näher untersucht werden.

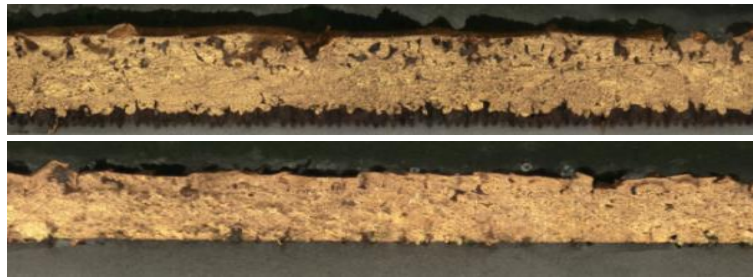


Abbildung 4: Oben: Schlibbild von gedrucktem Kupfer auf Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Substrat. Unten: Schlibbild von gedrucktem Kupfer auf AlN-Substrat

Beim VPP-AlN wurden wiederum geringere Haftfestigkeiten ermittelt (max. 5,71 N/mm<sup>2</sup>), was insbesondere auf die geringe Energieintensität bei der Laserbearbeitung zurückzuführen ist. Hier sind sowohl materialeitig als auch prozesseitig Verbesserungen nötig.

Die spezifische elektrische Leitfähigkeit wurde bislang nur für Kupfer-Leiterbahnen auf konventionellen Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>- und AlN-Substraten überprüft. Mit den in AP3.2 erhöhten Laserleistungen wurden für Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Werte von bis zu 16,5 MS/m erreicht. Ein nachfolgendes Auslagern im Rohofen für 10 h bei 850 °C unter Stickstoffatmosphäre reduzierte die Porosität und erhöhte die Leitfähigkeit auf 25,0 MS/m. Ähnliches wurde beim AlN beobachtet: Erhöhte Laserleistung in den oberen Schichten führte bis zu 18,2 MS/m; das Auslagern ermöglichte 31,3 MS/m. In der Fachliteratur finden sich Werte von über 30 MS/m für PBF-LB-gedrucktem Kupfer auf Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, allerdings bei einer Metallisierungsdicke von 600 µm. Die in diesem Projekt bislang erreichten Werte werden also als gut eingestuft.

Im Projekt wird weiterhin die Verwendung eines alternativen Kupferpulvers, das auch aus dem projektbegleitenden Ausschuss zur Verfügung gestellt wurde, untersucht. Im Gegensatz zum bisherigen Pulver sind beim neuen die kleinsten Partikel im Herstellungsprozess eliminiert worden (Partikelgröße: 15 – 45 µm statt 0 – 45 µm). Beim AlN führt die Verwendung des neuen Pulvers mit denselben Parametern im PBF-LB-Prozess zu einer Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit, beim Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> zu einer Verringerung, sodass im letzteren Fall die Prozessparameter angepasst werden müssen. Diese Unterschiede lassen sich vermutlich auf die bessere Wärmeleitfähigkeit des neuen Pulvers infolge eines geringeren Sauerstoffanteils während der Herstellung zurückführen. Diese macht einen erhöhten Energieeintrag zur effizienten Verarbeitung nötig, der bei den bisherigen Parametereinstellungen eher beim AlN als beim Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> gegeben ist.

### 1.5 Arbeitspaket 5.1: Designoptimierung in Bezug auf thermische Spannungen

Das AP5.1 wurde bereits in Zusammenarbeit mit AP1 iterativ bearbeitet (siehe Zwischenbericht 1).

### 1.6 Arbeitspaket 5.2: Designoptimierung mittels Piezojet zur 3D-Metallisierung

- Durchgeführte Arbeiten

Im AP5.2 wird der Piezojet-Druck zum Einbringen metallischer Strukturen ins Leistungsmodul genutzt, um temperaturabhängige Widerstandsmessungen durchführen und somit die Temperaturentwicklung überwachen zu können. Vom projektbegleitenden Ausschuss wurde eine Silbernanopartikelintinte bereitgestellt. So wurden Messtrukturen auf Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Keramiks substrate gedruckt und anschließend für 40 min bei 240 °C im

Konvektionsofen gesintert. Anschließend wurde inkrementell Strom in die Leiterbahn eingebracht und sowohl der elektrische Widerstand im Leiter als auch die Temperatur am Prüfling gemessen (siehe Messaufbau in Abb. 5). Die Kupferlitzen wurden mittels Leitkleber auf den gedruckten Pads befestigt.

▪ Erzielte Ergebnisse

Die Ergebnisse sind in Abb. 6 zu sehen. Bei konstantem Stromanstieg erhöhen sich auch der gemessene elektrische Widerstand sowie die Temperatur in der Leiterbahn. Dies ist plausibel, da eine erhöhte Temperatur im Metall zu verstärkten Gitterschwingungen der Ionenrümpfe führt, was wiederum die Beweglichkeit der Elektronen und damit die elektrische Leitfähigkeit beeinträchtigt. Wie in Abbildung 6 rechts zu sehen, konnte ein weitgehend linearer Verlauf des temperaturabhängigen Widerstands in der betrachteten Leiterbahn festgestellt werden. Somit ist in zukünftigen Anwendungen die Integration einer Temperaturüberwachung mittels additiv gefertigter Messstruktur möglich, indem über entsprechende Kontaktierungen der elektrische Widerstand des gedruckten Layouts gemessen wird.

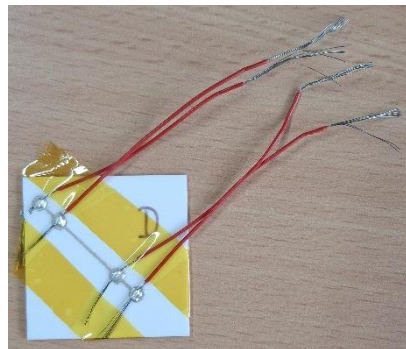
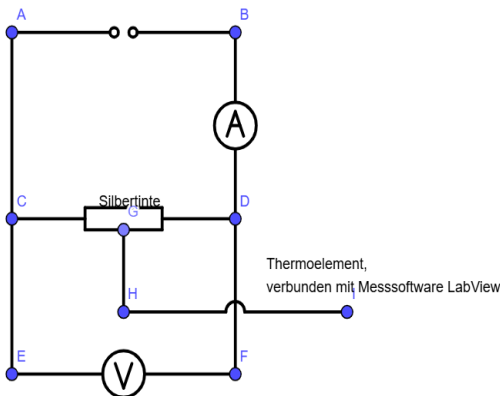


Abbildung 5: Aufbau zur temperaturabhängigen Widerstandsmessung. A-B: Stromquelle; B-D: Strommessgerät; C-D: gedruckte Leiterbahn; G-I: Thermoelement; E-F: Spannungsmessgerät. Rechts: Foto eines Prüflings

I [A]	U [V]	R [Ω]	T [°C]	σ [MS/m]
0,11	0,38	3,50	25,5	7,45
0,21	0,73	3,51	29	7,43
0,41	1,50	3,67	47	7,11
0,61	2,35	3,86	73	6,77
0,81	3,40	4,20	118	6,22
1,01	4,73	4,69	181	5,57
1,11	5,43	4,91	230	5,31

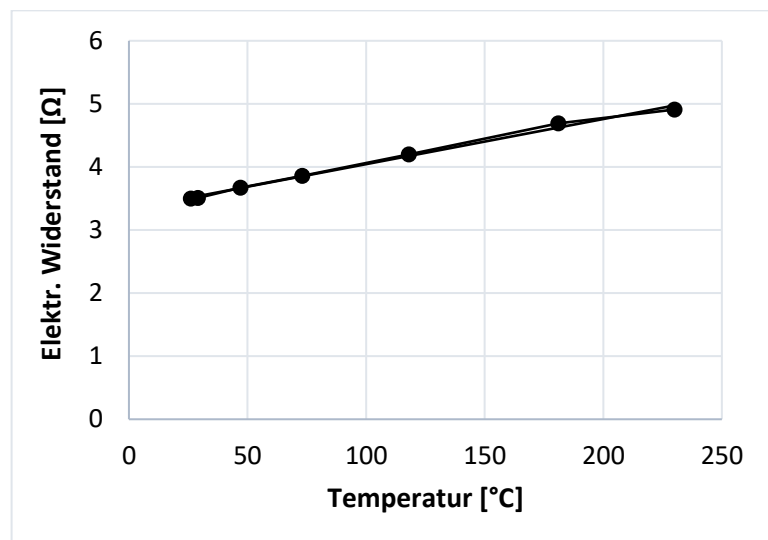


Abbildung 6: Links: Gemessene Werte der elektrischen Spannung U und der Leiterbahn-Temperatur T bei beaufschlagtem Strom I; daraus resultierender elektrischer Widerstand R und spezifische elektrische Leitfähigkeit σ. Rechts: Zusammenhang von Temperatur und elektrischem Widerstand in der betrachteten Leiterbahn

## 2 Verwendung der Zuwendung

- wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)

AP 1-7	Q1			Q2			Q3			Q4		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
wbk geplant												
1 wiss. MA (HPA-A)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1 techn. MA (HPA-C)	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3
1 Hilfskraft (HPA-F)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
wbk tatsächlich												
1 wiss. MA (HPA-A)	1,5	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1 techn. MA (HPA-C)	0,59	0,75	0,75	0,75	1,75	1,75	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
1 Hilfskraft (HPA-F)	0,76	0,88	0,73	0,73	0,55	0,37	0,37	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24
FAPS geplant												
1 wiss. MA (HPA-A)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1 techn. MA (HPA-C)	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3
1 Hilfskraft (HPA-F)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
FAPS tatsächlich												
1 wiss. MA (HPA-A)	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0,5
1 techn. MA (HPA-C)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,5	1,5
1 Hilfskraft (HPA-F)	0	0	0	1	1	2	2	3	3	4	4	3

- Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans)

Nicht zutreffend.

- Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans)

Nicht zutreffend.

## 3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Der VPP-Prozess erzielt vielversprechende Erfolge bis zur Grünteilfertigung von Multimaterial-Bauteilen, doch die thermische Nachbehandlung bleibt herausfordernd. Variierende thermische Ausdehnungskoeffizienten und Unterschiede in der Ausgangszusammensetzung, etwa im Feststoffgehalt der Schlicker, verursachen Delamination an den Grenzflächen und beeinträchtigen die Funktionalität. Zur Optimierung der Grenzflächenanbindung sind detaillierte Untersuchungen des Entbinder- und Sinterprozesses erforderlich. Zudem soll der monolithische Druck zur Reduktion der Porosität weiter verbessert werden.

## 4 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

### 4.1 Durchgeführte Transfermaßnahmen (von Projektbeginn bis 31.12.2024)

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/Zeitraum
Sitzungen des PbAs	Förderung der Lösungssuche durch kooperative Arbeit und Austausch	wbk, Karlsruhe	26.05.2023
	Förderung der Lösungssuche durch kooperative Arbeit und Austausch	FAPS, Nürnberg	17.01.2024 12.02.2025
Newsletter Publikationen der Institute	Ansprache von Unternehmen außerhalb des PbAs	Online, LinkedIn	26.05.2023
		Online, LinkedIn	17.01.2024
Präsentationen auf Messen und Konferenzen	Bekanntmachung der Forschungsergebnisse	Poster beim 15th Internationaler MID-Kongress – Mechatronic Integrated Discourse	06.2023
		Projektvorstellung formnext-Messe	11.2023
		Poster LOPEC-Messe	03.2024
		Poster beim MID Summit und MID Workshop	23. – 24.10.2024
Veröffentlichungen in Fachzeitschriften	Veröffentlichung der Ergebnisse interdisziplinär	Veröffentlichung in Ceramic Applications, Göller Verlag GmbH	23.10.2023
		Open ceramics, Journal of the European ceramic society	12/2024
Bereitstellung der aktuellen Ergebnisse auf den Internetseiten von wbk und FAPS	Breite Streuung der Ergebnisse über den bisherigen Nutzerkreis hinaus	Internetseiten des wbks	Während des gesamten Vorhabens

### 4.2 Geplante Transfermaßnahmen (auch nach Projektende)

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/Zeitraum
Sitzungen des PbAs	Förderung der Lösungssuche durch kooperative Arbeit und Austausch		Ende Juni 2025
Fachvorträge auf Fachkonferenzen von Industrieverbänden	Ergebnistransfer und Erweiterung des Nutzerkreises	16. International Mechatronic Integration Discourse	02. – 03.07.2025