

Zwischenbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 22835 N/2

Thema

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

Berichtszeitraum

01.04.2023 - 31.12.2023

Forschungsvereinigung

3-D MID e.V.

Forschungseinrichtung(en)

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), wbk Institut für Produktionstechnik

Friedrich-Alexander-Universität, FAPS Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik

Gefördert durch:

1. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse im Berichtszeitraum

1.1. AP1: Design des Technologiedemonstrators & Materialauswahl

▪ Durchgeführte Arbeiten

Zu Beginn des Designs des Technologiedemonstrators wurde gemäß der Antragstellung zu bereits bestehenden innovativen Packaging-Ansätzen recherchiert, die die Wärmeabfuhr im Leistungsmodul optimieren. Davon ausgehend wurden FEM-Simulationen zu verschiedenen neuartigen Packaging-Aufbauten entworfen, die auf innovative Weise die Vorzüge der additiven Fertigungsverfahren (VPP-LED-Verfahren zur Herstellung des keramischen Grundkörpers, mit und ohne eingebettete Kupferlagen, und PBF-LB/M-Verfahren zur Aufbringung oberseitiger Kupferlagen) nutzen und dadurch den steigenden Anforderungen an leistungselektronische Module genügen. Die FEM-Simulationen wurden einerseits hinsichtlich der thermischen Performance der verschiedenen Aufbauten (thermische Impedanzen Z_{th}) gegenübergestellt und andererseits bezüglich thermomechanischer Spannungen infolge von Temperaturschocktests untersucht. Darauf basierend soll das hinsichtlich der zu erwartenden Zuverlässigkeit, Fertigbarkeit und Performancezugewinn vielversprechendste Design, auch unter Gesichtspunkten der Wirtschaftlichkeit, ausgewählt werden. In einem statistischen Versuchsplan zur Erarbeitung vereinfachter, optimierter Designs wurden folgende Parameter systematisch variiert:

- Variationen für die Geometrie des Chip-unterseitigen Lotpads:
 - L1 = 10,5 * 10,5 * 0,15 mm
 - L2 = 10,5 * 10,5 * 0,08 mm
- Variationen für die Geometrie der Chip-unterseitigen Kupferlage:
 - Cu1 = 20 * 20 * 0,15 mm
 - Cu2 = 20 * 20 * 0,45 mm
- Variationen für das Material des Kühlkörpers:
 - KM1 = Al₂O₃
 - KM2 = AlN
 - KM31 = Al₂O₃ inkl. Cu-Layer (15 * 15 * 0,15 mm)
 - KM32 = Al₂O₃ inkl. Cu-Layer (15 * 15 * 0,45 mm)
 - KM41 = AlN inkl. Cu-Layer (15 * 15 * 0,15 mm)
 - KM42 = AlN inkl. Cu-Layer (15 * 15 * 0,45 mm)
- Variationen für die Geometrie des Kühlkörpers:
 - KG1 = 30 * 30 * 3 mm
 - KG2 = 30 * 30 * 1 mm
 - KG3 = 20 * 40 * 3 mm
 - KG4 = 20 * 40 * 1 mm

(FAPS)

Zum Aufbau von Multi-Material-Bauteilen, bestehend aus einem keramischen Grundkörper und metallischen Leiterbahnen, ist eine geeignete Keramik-Leiterbahnkombination essenziell. Dazu wurden unterschiedliche Keramiken und Metalle basierend auf ihren technischen Eigenschaften durch eine umfassende Literaturrecherche bewertet und auf dieser Basis für den im Projekt betrachteten Technologieträger ausgewählt. (wbk)

Da die badbasierte Photopolymerisation (engl. Vat Photopolymerization, VPP) auf der Aushärtung von Schlickern, die unter anderem aus einer Mischung von Monomeren, Photoinitiatoren, Additiven und Feststoffpartikeln bestehen, durch Lichteinwirkung basiert, führt die Verarbeitung von dunklen Materialien in Kombination mit einer hohen Dichte des Pulvers zu

Herausforderungen. Die Farbe der Feststoffpartikel beeinflusst das Lichtübertragungsverhalten und die Aushärtungsfähigkeit. Daher erfolgt die finale Festlegung der zu verarbeitenden Materialkombinationen durch den VPP-Prozess auf Basis der durchzuführenden Arbeiten zur Entwicklung von Schlickern für den VPP-Prozess sowie der letztlich zu realisierenden Funktionen der gedruckten Bauteile. Zusammenfassend sollen jedoch Voruntersuchungen zu allen in den erzielten Ergebnissen genannten Materialien durchgeführt werden. (wbk)

- Erzielte Ergebnisse

Mit entsprechenden Materialwerten und einer angenommenen Chip-Leistung von 100 W für alle Aufbauten, ergibt sich für den Referenzaufbau eine thermische Impedanz von $Z_{th} = 0,43 \text{ K/W}$. Geringere Werte bedeuten eine bessere Wärmeabfuhr, was somit anzustreben ist. Während manche der innovativen Aufbauten höhere Werte aufwiesen, konnten auch Aufbauten mit reduziertem Z_{th} -Wert identifiziert werden. Insbesondere führte die AlN-Keramik mit eingebetteten Kupferlagen als Kühlkörpermaterial bei einer quadratischen Kühlkörpergeometrie und geringer Lotpad-Höhe sowie hoher Kupferschicht-Höhe (vgl. Abb. 1) zum besten Ergebnis von $Z_{th} = 0,36 \text{ K/W}$. (FAPS)

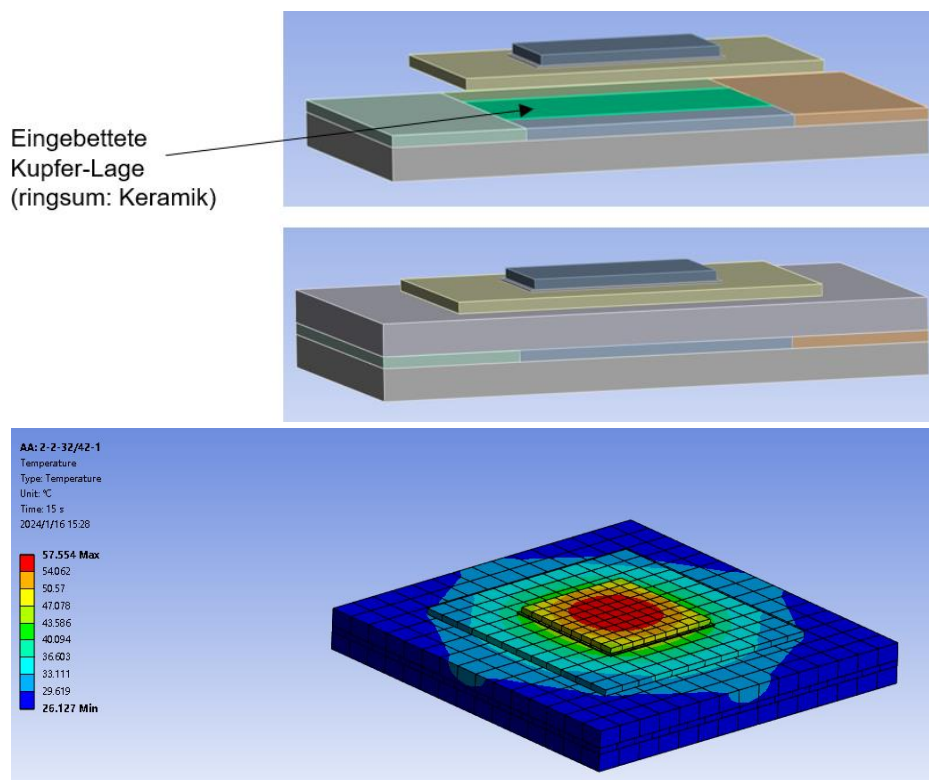


Abbildung 1: Ergebnisse der FEM-Simulation zur thermischen Performance innovativer Leistungsmodul-Aufbauten

Die Auswertung mit der Statistik-Software Minitab zeigte, dass insbesondere die eingebetteten Kupferlagen im Keramik Kühlkörper die thermische Impedanz entscheidend senken (vgl. Abb. 2). Durch die Einfügung einer zweiten eingebetteten Kupferlage (Schichthöhe = 0,75 mm) konnte der Z_{th} -Wert erneut gesenkt werden auf 0,32 K/W. (FAPS)

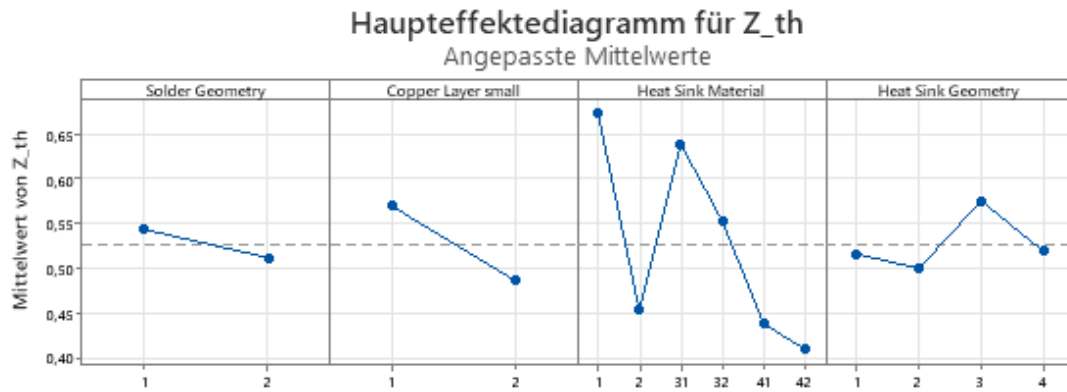


Abbildung 2: Haupteffekte-Diagramm für Z_{th} zur Identifizierung der einflussreichsten Parameterwerte für bestmögliche thermische Performance

Zur Abschätzung der Lebensdauer wurde eine Alterung in die FEM-Simulation integriert, indem Temperaturschocktests mit Wechseln zwischen -40°C und $+125^{\circ}\text{C}$ (blauer Graph Abb. 3) bzw. $+250^{\circ}\text{C}$ (orangener Graph Abb. 3) bei bis zu 1000 Zyklen nachgestellt wurden (vgl. Abb. 3). Während die Vergleichsdehnung kontinuierlich mit steigender Zyklenzahl zunimmt, erreicht die Vergleichsspannung bereits bei 250 Zyklen ihr Maximum (im orangenen Graph Abb. 3). Dies kann als Maximum der zu ertragenden Spannung im konkreten Materialverbund angesehen werden. (FAPS)

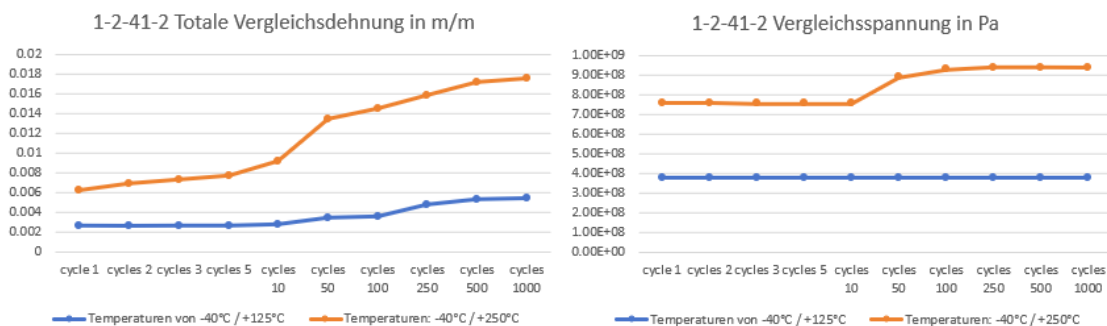


Abbildung 3: Verlauf von Vergleichsdehnung und Vergleichsspannung bei zwei unterschiedlichen TST-Settings

Bemerkenswert ist die Auswertung der Vergleichsspannung von Mises aller Layouts nach 500 Zyklen (vgl. Abb. 4). Obwohl Kühlkörper mit eingebetteten Kupferlagen in der thermischen Performance am besten abgeschnitten haben (s.o.), weisen sie beim TST nach 500 Zyklen höhere Spannungswerte als nicht-eingebettete Layouts auf (Abb. 4: Spalte „Heat Sink Material“, Punkte „41“ und „42“). Dies ist durch den erhöhten CTE-Mismatch zu erklären, der sich durch die gesteigerte Anzahl an Kupfer-Keramik-Grenzflächen ergibt. Dies muss in der späteren realen Umsetzung der Baugruppen berücksichtigt werden. (FAPS)

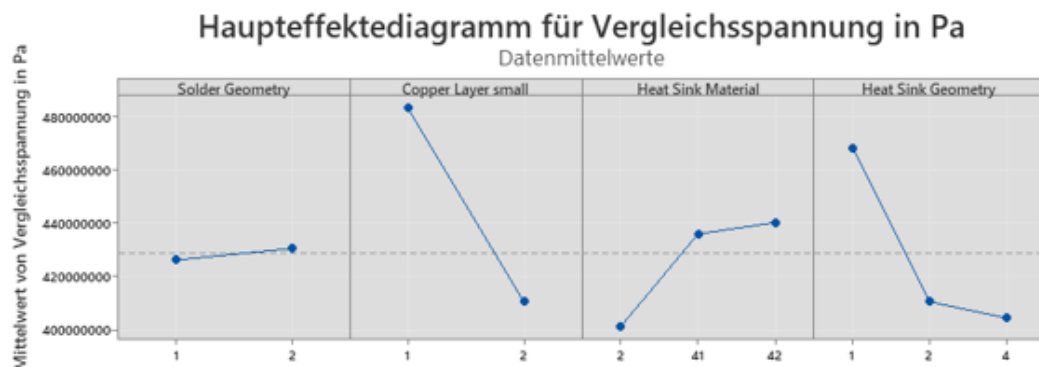


Abbildung 4: Haupteffekte-Diagramm für von Mises Vergleichsspannung zur Identifizierung der einflussreichsten Parameterwerte für Langzeitstabilität

Aluminiumoxid wird aufgrund seiner sehr guten elektrischen Isolierung, hohen mechanischen Festigkeit, mäßigen Wärmeleitfähigkeit, geringen Dichte, zulässigen Betriebstemperaturen ohne mechanische Belastung über 100°C sowie hohen Korrosions- und Verschleißbeständigkeit zum Aufbau des keramischen Grundkörpers näher betrachtet. Auch Aluminiumnitrid soll aufgrund der hervorragenden Wärmeleitfähigkeit, des niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten und guten Biegefestigkeit betrachtet werden. Weitergehend kommt Siliziumnitrid, das sich durch seine hohe Zähigkeit und Festigkeit bei hohen Temperaturen, ausgezeichneten Temperaturwechselbeständigkeit, guten chemischen Beständigkeit und Wärmeleitfähigkeit, Wärme-, Oxidations- und Korrosionsbeständigkeit, hohen Bruch- und Biegefestigkeit sowie hohen Härte und Verschleißfestigkeit auszeichnet, als keramisches Substrat in Frage. Als Leiterbahnmaterialien wurden insbesondere Kupfer, das hohe thermische und elektrische Leitfähigkeiten, eine ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit und einen relativ niedrigen Preis aufweist, sowie Silber, aufgrund seiner sehr hohen Leitfähigkeit, gelegt. Die niedrige Schmelztemperatur der metallischen Komponenten des Multi-Material-Bauteils im Vergleich zu den Sintertemperaturen von Keramiken wie Aluminiumoxid stellt eine Herausforderung für Multi-Material-Bauteile aus dem VPP-Prozess dar. Aus diesem Grund sollte die Materialauswahl durch Low Temperature Cofired Ceramics (LTCC) erweitert werden. Dadurch sollte ein Aufschmelzen des metallischen Parts des Multi-Material-Bauteils vermieden werden. Wird es zum Prozessschritt des Sinterns kommen, sollte eine Qualifizierung hinsichtlich elektrischer Leitfähigkeit der Leiterbahnen durchgeführt werden, um die Auswirkungen der Wärmebehandlung auf die technischen Gegebenheiten abschätzen zu können. (wbk)

1.2. AP2: Leiterbahn-Schlickerentwicklung

▪ Durchgeführte Arbeiten

In den Vorversuchen für dieses Projekt sind am KIT bereits einige Schlickerentwicklungen mit verschiedenen Oxidkeramiken durchgeführt worden. Diese Schlicker bestehen im Allgemeinen aus keramischem Feinpulver, mono- sowie multifunktionalen Monomeren und einem Dispergiermittel bzw. Additiven. Additive eignen sich hierbei zur Herabsetzung der Viskosität und Reduzierung der Sedimentation. Das auch im Schlicker hinzugemischte Initiatorsystem setzt sich aus einem Photoinitiator, dessen Absorptionsspektrums mit der Wellenlänge von 460 nm der VPP-Maschine übereinstimmt, und einem Co-Initiator zur Verstärkung der Aushärtung zusammen. Für eine Verarbeitbarkeit im VPP-Prozess sollten dabei die Anforderungen an eine geringe Viskosität, schnelle Aushärtbarkeit, ausreichende Aushärtetiefe und einer hohen Auflösung erfüllt werden. Auf Basis der bestehenden Schlicker, wurden diese im Hinblick auf den Binder für Aluminiumoxid weiter angepasst, indem seine Bestandteile

iterativ variiert wurden, um primär den Feststoffgehalt zu maximieren und so im späteren Sinterschritt eine geringere Schrumpfung zu erreichen. Damit sinkt auch das Risiko von Bauteildefekten. Die Mischung der Schlicker wurde in einem Planeten-Zentrifugalmischer durchgeführt. Nach dem Mischprozess konnten größere Agglomerate in der Suspension erkannt werden, weswegen der Schlicker in einem darauffolgenden Prozessschritt in einem Dreiwalzwerk homogenisiert wurde. Im Dreiwalzwerk wird der Schlicker zwischen verschiedenen rotierenden Walzen hindurchbewegt, deren Abstand angepasst werden kann. Dabei wurde ein Spaltabstand der Walzen von unter 10 µm gewählt. Vor dem Starten eines Druckjobs wurde der Schlicker hinsichtlich seiner Viskosität und seinem Aushärtungsverhalten mithilfe eines Rheometers mit Belichtungseinheit charakterisiert, da sich diese Kenngrößen als essenzielle Verarbeitungseigenschaften im Druck erweisen. Um die benötigte minimale Schichtdicke für den Aufbau des Bauteils an der Anlage zu bewerkstelligen, wurde eine Versuchsreihe zur Aushärtetiefe durchgeführt, indem eine hinreichend dicke Schicht des Schlickers auf eine Glasplatte aufgetragen und mit unterschiedlichen Belichtungsparametern ausgehärtet wurde. Die ausgehärtete Schicht wurde mithilfe einer Bügelmessschraube vermessen. Diese Erkenntnisse wurden neben den Vorversuchen hinzugezogen, um Aufschlüsse über die notwendige Zusammensetzung und mögliche Anpassungen des Schlickers zu erhalten. Das gleiche Vorgehen wie bei Aluminiumoxid, wurde für einen Schlicker mit Aluminiumnitrid als keramischen Werkstoff wiederholt. Auf Basis des Aluminiumoxid-Schlickers wurde der Binder für Aluminiumnitrid adaptiert und iterativ optimiert, sodass ein mischbarer Schlicker hergestellt werden konnte. Durch ein homogenes Erscheinungsbild der Suspension, auch unter dem Mikroskop, ist ein zusätzlicher Prozessschritt zur Homogenisierung der Suspension in diesem Fall nicht nötig. Basierend auf den gesammelten Erkenntnissen, wurde für Aluminiumoxid sowie Aluminiumnitrid iterativ eine geeignete Kombination an Belichtungsparametern an der VPP-Anlage ermittelt, um den schichtweisen Aufbau von monolithischen Bauteilen zu gewährleisten. Für Aluminiumoxid wurden durch die Wahl geeigneter Belichtungsparameter Plättchen gedruckt und in den auf den Druckprozess nachfolgenden thermischen Verfahrensschritten entbindert und gesintert. Auch für Aluminiumnitrid konnten erste Bauteile aufgebaut werden. (wbk)

Um einen Schlicker mit schweren Pulverpartikeln zu stabilisieren, muss gewährleistet sein, dass das Absinken der Metallpartikel in der Flüssigkeit deutlich verlangsamt oder komplett verhindert wird. Somit soll eine Abtrennung von Binder zu darin eigentlich homogen gemischten Feststoffpartikeln vermieden werden. In Anlehnung an die Zusammensetzung des Aluminiumoxid-Schlickers, wurde ein Schlicker mit Kupfer angemischt, der jedoch kein stabiles Verhalten aufwies. Es war eine klare Trennung von Binder und darin enthaltenen Kupferpartikeln zu erkennen. Außerdem konnte keine Aushärtung des Schlickers bei Belichtung erzielt werden. Durch die Wahl anderer Monomere und eines anderen Additivs, konnte ein hinsichtlich der Sedimentation stabilerer Schlicker erzielt werden, der gute Viskositäts- und Aushärteeigenschaften aufweist. (wbk)

- Erzielte Ergebnisse

Durch die iterative Anpassung der Binderzusammensetzung des Aluminiumoxid-Schlickers, konnte ein Feststoffgehalt von 56 Vol-% Keramik erzielt werden. Die zugehörigen Rotations- und Oszillationsmessungen am Rheometer sind aus Abbildung 5 ersichtlich. Es konnte ein Vergleich des eigenen Schlickers mit 56 Vol-% Feststoffgehalt zu einem kommerziell verfügbaren Schlicker mit 49 Vol-% Feststoffgehalt durchgeführt werden. Anhand der

aufgenommenen Daten kann festgehalten werden, dass der eigene Schlicker bessere Eigenschaften aufweist. (wbk)

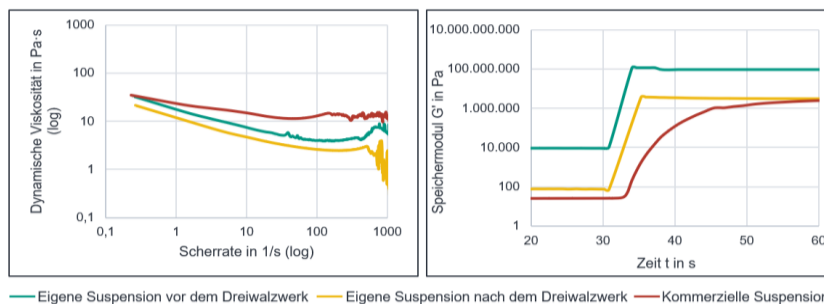


Abbildung 5: Vergleich der Viskosität sowie des Aushärteverhaltens eines selbst entwickelten Aluminiumoxid-Schlickers mit einem Füllstoffgehalt von 56 Vol-% und einem kommerziellen Schlicker mit 49 Vol-% Füllstoffgehalt

In Versuchen konnte nachgewiesen werden, dass die in der VPP-Anlage minimal notwendige Aushärtetiefe von 10 μm zuverlässig erzielt werden kann. Somit konnte auch der Aufbau von in Abbildung 6 zu sehenden monolithischen Bauteilen mit einer Intensität von 90 mW/cm^2 und einer Energie von 75 mJ/cm^2 mit einer Schichtdicke von 25 μm gewährleistet werden. Durch das Entbindern und Sintern konnten rissfreie Keramikplatten für die anschließende Metallisierung mittels PBF-LB generiert werden. (wbk)

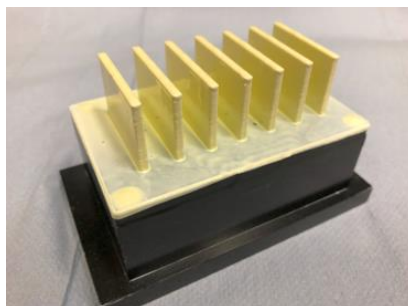


Abbildung 6: Auf der Bauplattform gedruckte Grünteile aus dem selbst entwickelten Aluminiumoxid-Schlicker mit einem Füllstoffgehalt von 56 Vol-%

Bei Aluminiumnitrid ergaben die Voruntersuchungen am Rheometer, dass ein Schlicker mit einem Feststoffgehalt von 54,5 Vol-% geeignet für die Verarbeitung in der VPP-Anlage ist, zu sehen anhand der aufgenommenen Kurven in Abbildung 7. (wbk)

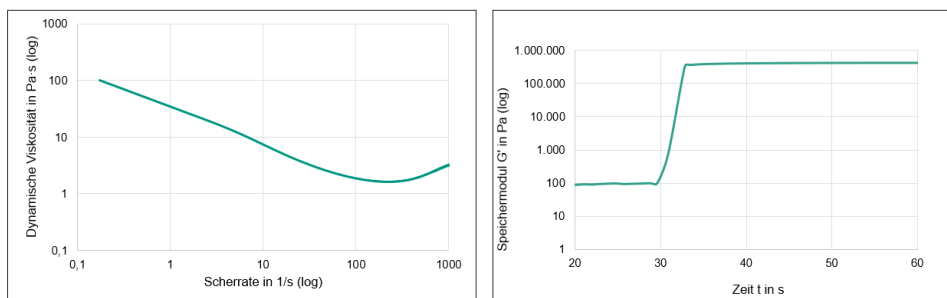


Abbildung 7: Untersuchung der Rheologie sowie des Aushärteverhaltens eines selbstentwickelten Aluminiumnitrid-Schlickers mit einem Füllstoffgehalt von 54,5 Vol-%

Durch eine optimierte Kombination der Belichtungsparameter, bestehend aus einer Intensität von 90 mW/cm^2 und einer Energie von 250 mJ/cm^2 , konnten Grünteile gedruckt werden. Es zeigte sich, dass durch die dunklere Farbe der Suspension höhere Belichtungsparameter nötig sind, um einen Schichtverbund zu gewährleisten. (wbk)

Durch die Änderung der Zusammensetzung des Binders, indem Monomere variiert und ein weiteres Additiv hinzugefügt wurden, konnte ein homogener Schlicker mit 34 Vol-% Kupferpartikel erhalten werden, der eine passende Viskosität und ein hinreichend gutes Aushärtungsverhalten aufweist (vgl. Abb. 8). (wbk)

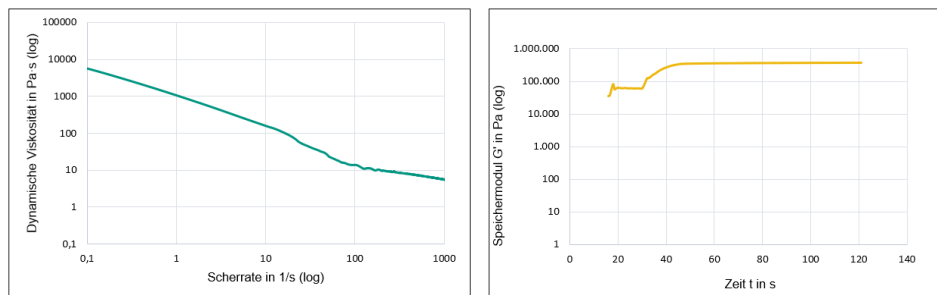


Abbildung 8: Untersuchung der Rheologie sowie des Aushärteverhaltens eines selbstentwickelten Kupfer-Schlickers mit einem Füllstoffgehalt von 34 Vol-%

Die Zusammensetzungen aller selbstentwickelten Schlicker sind in Tabelle 1 aufgeführt. (wbk)

Tabelle 1: Zusammensetzung der selbstentwickelten Schlicker in Vol-%

	Aluminiumoxid-Schlicker	Aluminiumnitrid-Schlicker	Kupfer-Schlicker
Aluminiumoxid	56 Vol-%	0 Vol-%	0 Vol-%
Aluminiumnitrid	0 Vol-%	54,5 Vol-%	0 Vol-%
Kupfer	0 Vol-%	0 Vol-%	34 Vol-%
Additiv	3 Vol-%	1 Vol-%	9 Vol-%
Monomere	37 Vol-%	35 Vol-%	42 Vol-%
Photoinitiator	3 Vol-%	6,4 Vol-%	11,5 Vol-%
Co-Photoinitiator	1 Vol-%	3,1 Vol-%	5,5 Vol-%

1.3. AP3.2: Prozessentwicklung PBF-LB

▪ Durchgeführte Arbeiten

Ziel des Arbeitspaketes ist die Erforschung und Beherrschbarkeit des PBF-LB-Prozesses auf additiv gefertigten VPP-Keramiken. Zunächst wurde eine Sensitivitätsanalyse für die Laserleistung (Werte zwischen 25 W und 55 W) und die Scangeschwindigkeit (Werte zwischen 50 mm/s und 500 mm/s) durchgeführt, während der Hatch-Abstand mit $55 \mu\text{m}$ und die Schichtdicke mit $30 \mu\text{m}$ konstant gehalten wurden. Für den Fokussdurchmesser wurde zunächst $48 \mu\text{m}$ verwendet, später dann $35 \mu\text{m}$. Diese Parameterauswahl orientierte sich an den verwendeten Konfigurationen in der Dissertation von Thomas Stoll. Die Bewertung der Druckergebnisse erfolgte zunächst mit Sichtprüfung, wird aber zeitnah durch detaillierte mikroskopische Analysen verfeinert. Hierbei wurden als Referenz konventionelle Al_2O_3 -Substrate, die wie auch das Kupferpulver aus dem projektbegleitenden Ausschuss zur Verfügung gestellt wurden, eingesetzt. Weiterhin wurde auch eine Vorheizung mit 450°C

eingesetzt, um den thermischen Schock durch die Laseranwendung in der Keramik zu reduzieren. (FAPS)

▪ Erzielte Ergebnisse

Bei zu hoher Energiedichte des Lasers, die insbesondere bei 35 W und 50 mm/s auftrat, kam es zu Zerstörungen der Keramiksubstrate. Die kritische Energiedichte liegt den bisherigen Untersuchungen zufolge bei einer Laserleistung von 35 W und einer Scangeschwindigkeit von 50 mm/s. Bei einer Laserleistung von 55 W wird die Keramik auch schon bei einer Scangeschwindigkeit von 150 mm/s zerstört. In den bisherigen Versuchen wurde die Keramik öfter gerade dann während des Prozesses zerstört, wenn eine Vorheizung der Substrate eingesetzt wurde. Jedoch wurde ein positiver Einfluss des Vorheizens auf eine gleichmäßige Verteilung des Kupferpulvers auf der Keramik während des Prozesses festgestellt, da die Werkstück-Aufnahme auf eine erhöhte Temperatur ausgelegt ist. Eine Übersicht der bisherigen Sensitivitätsanalyse zentraler Parameter ist in Tabelle 2 dargestellt. Der kleinere Fokusbereich von 35 µm hat keinen offensichtlichen Einfluss auf den Prozess. (FAPS)

Tabelle 2: Übersicht der bisherigen Sensitivitätsanalyse zentraler Parameter im PBF-LB-Prozess

Laserleistung [W]	Scangeschwindigkeit [mm/s]	Vorheiztemperatur [°C]	Zustand Keramik
25	50/100/150/200	keine	intakt
35	50	keine	zerstört
35	50	450	zerstört
35	150/200/250	Keine	intakt
35	150/200/250	450	intakt
45	50	Keine	zerstört
45	150/200/250	keine	intakt
55	150	keine	zerstört
55	200/250/400/450/500	Keine	intakt

Weiterhin wurden im Berichtszeitraum auch bereits VPP-gefertigte Al₂O₃-Substrate vom Projektpartner wbk zur Verfügung gestellt (siehe Abb. 9). Hier wurde Kupferpulver mit den Parametern 35 W Leistung, 200 mm/s Scangeschwindigkeit und ohne Vorheizung bearbeitet. Diese Einstellungen führten zu einem zerstörungsfreien Kupferauftrag auf die Keramik. Die Querschliff-Erzeugung und genauere Auswertung steht noch aus und wird zeitnah durchgeführt. (FAPS)

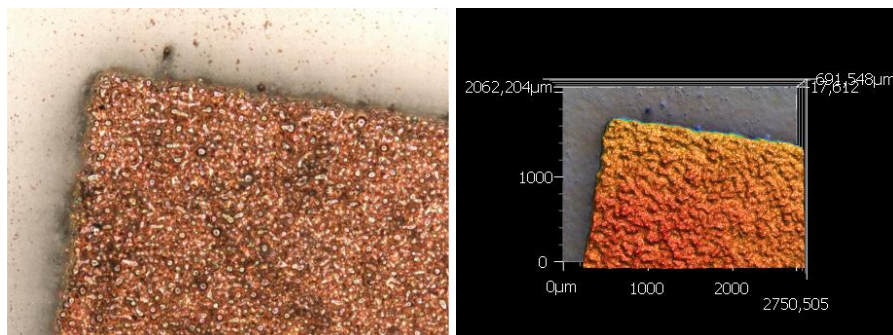


Abbildung 5: Aufnahmen mit dem Laserscanning-Mikroskop von Kupferstrukturen, mittels PBF-LB auf vom wbk hergestellten VPP-Keramiken (Li350) aufgebracht

2. Verwendung der Zuwendung

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

AP 1-7	Q1			Q2			Q3		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Personal wbk geplant									
1 wiss. MA (HPA-A)	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 Hilfskraft (HPA-F)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Personal wbk tatsächlich									
1 wiss. MA (HPA-A)	0	0	0	0	0	0,5	1	1	1
1 techn. MA (HPA-C)	0	0	0	0	0	0	1	1	1
1 Hilfskraft (HPA-F)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Personal FAPS geplant									
1 wiss. MA (HPA-A)	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 Hilfskraft (HPA-F)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Personal FAPS tatsächlich									
1 wiss. MA (HPA-A)	0	0	1	1	1	1	1	1	1
1 techn. MA (HPA-C)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1 Hilfskraft (HPA-F)	0	0	0	0	0	0	0	0	0

- Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans)

Nichtzutreffend.

- Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans)

Nichtzutreffend.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Der VPP-Prozess zeichnet sich durch seine Mehrstufigkeit aus, indem nach dem Drucken der Bauteile ein Entbindern sowie Sintern notwendig sind. Aus Vorarbeiten hat sich gezeigt, dass Keramiken bei sehr hohen Temperaturen gesintert werden müssen, um eine hohe Dichte und somit die gewünschten Eigenschaften der Bauteile am Ende der Prozesskette zu erhalten. Die für den Verwendungszweck einzusetzenden Metalle weisen im Vergleich dazu eine niedrige Schmelztemperatur auf. Um den Übergang des Metalls in eine Schmelze bei der thermischen Behandlung zu vermeiden, stellen LTCC-Keramiken eine gute Möglichkeit dar, genau dies zu vermeiden. LTCC-Keramiken werden dabei bei niedrigeren Temperaturen gesintert, die sich auch unter dem Schmelzpunkt der ausgewählten Metalle befinden.

4. Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

▪ Durchgeführte Transfermaßnahmen (von Projektbeginn bis heute)

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
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 2023, Amberg (wbk, FAPS)	06.2023
		Projektvorstellung formnext-Messe	11.2023
		Poster LOPEC-Messe	03.2024
Veröffentlichungen in Fachzeitschriften	Veröffentlichung der Ergebnisse interdisziplinär	Veröffentlichung in Ceramic Applications, Göller Verlag GmbH (wbk)	23.10.2023
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

▪ Geplante Transfermaßnahmen (auch nach Projektende)

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/Zeitraum
Sitzungen des PbAs	Förderung der Lösungssuche durch kooperative Arbeit und Austausch		Anfang Juli 2024
Fachvorträge auf Fachkonferenzen von Industrieverbänden	Ergebnistransfer und Erweiterung des Nutzerkreises	3D-MID Summit	23-24 Oktober
Veröffentlichungen in Fachzeitschriften	Veröffentlichung der Ergebnisse interdisziplinär	Open ceramics, Journal of the European ceramic society	Mitte 2024