



Additive4Industry

Printed electronics on 3D-substrates (PE3D)

Teilvorhaben B

Schlussbericht – Teil I: Kurzbericht

Förderkennzeichnung: 03INT709BB

Laufzeit des Vorhabens: 01.06.2020 – 30.11.2023

Unternehmen: Conti Temic microelectronic GmbH
Ringlerstraße 17, 85057 Ingolstadt

Kontakt: Dr. Hüseyin Erdogan
hueseyin.erdogan@continental-corporation.com
+49 841 881 2249

Autor: Sonja Wächter
sonja.waechter@continental-corporation.com
+49 841 881 1673

Im PE3D-Projekt wurde die vollständig additive Herstellung dreidimensionaler elektronischer Baugruppen insbesondere unter Verwendung keramischer Substratmaterialien erfolgreich untersucht. Die additive Fertigung komplexen 3D-Bauteilen aus Keramik mit elektrischer Funktionalisierung konnte verwirklicht werden durch umfangreiche Parameterstudien und optimierte Einstellung der Einflussparameter entlang der gesamten Prozesskette. Insbesondere für Anwendungen in heißer Umgebung oder in aggressiven Medien, bei denen Kunststoffe gegenüber Keramiken schneller versagen, werden die erforschten Ansätze zur Optimierung räumlicher elektronischer Baugruppen zukünftig einen entscheidenden Mehrwert generieren.

Mit zunehmender Leistungsfähigkeit elektronischer Systeme sowie erhöhten Anforderungen an Design-Freiheit und funktionaler Integration, steigen auch die Anforderungen an thermische Beständigkeit und elektrische Isolation. Dagegen bietet sowohl die Verwendung additiver 3D-Digitaldruck-Verfahren als auch der Einsatz keramischer Werkstoffe für die Substrate Potential in prozesstechnischer, wie materialbezogener Hinsicht (höhere Sintertemperaturen und längere Sinterzeiten eingesetzt werden konnten, ohne dass das Substratmaterial Schaden nimmt).

Als Startphase im PE3D-Projekt wurden umfangreiche Parameterstudien mit diversen 3D-Drucktechnologien wie FDM- Fused Deposition Modeling, SLA- Stereolithografie und SLM- pulverbettbasiertes Laser-Schmelzverfahren sowie diversen 3D-Druckmaterialien, wie ABS, PLA, PC und speziellen Kunstharzen mit unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften wie ESD oder Hochtemperaturbeständigkeit durchgeführt.

Es wurden kontinuierlich mechanische und materialographische Analysen der additiv gefertigten Bauteile und anschließend ebenso der gesinterten Tinten durchgeführt. Hierbei kamen unterschiedlichste Analyseverfahren zu Einsatz:

- Visuelle Beurteilung durch Stereo- und Digitalmikroskopie
- Beurteilung der Oberflächengüte mittels Rasterelektronenmikroskopie
- Materialanalyse mittels Energiedispersive Röntgenspektroskopie (Line Scan, Punktmessungen, Mapping)
- Mikroschliffanalysen zur Darstellung der Gefügestrukturen
- taktile Rauheitsmessung nach ISO1997
- optische Rauheitsmessung
- 4-Punkt Biegeversuche nach DIN EN 843-1
- Zugfestigkeit und E-Modul-Bestimmung nach DIN EN ISO 6892-1
- Scher- und Zugfestigkeit nach DIN EN 62137-1-2 und EN 13144
- Härtemessung nach Vickers (ISO 6507)
- Nanoidentermessungen
- Maßhaltigkeitsprüfung über 3D-Scan
- Differential Scanning Kalorimetrie

Die Analyseergebnisse wurden in die Entwicklung der Druckprozesse kontinuierlich zurückgespielt, sodass eine geeignete Prozessoptimierung und Qualitätsverbesserung der Demonstrator Aufbauten stattfinden konnte.

Das Hauptaugenmerk lag auf der Bauteilstabilität, Temperaturbeständigkeit und der erzeugten Oberflächenqualität, die für die weitere Verarbeitung wichtig sind. Eine perfekte Verbindung der jeweiligen Schichten ist eine unabdingbare Voraussetzung für nachfolgende Tinten-Auftragsprozesse. Auch hier wurden umfangreiche Parameterstudien sowie ausgiebige Untersuchungen der resultierenden spezifischen elektrischen Leitfähigkeit sowie der mechanischen Haftfestigkeit durchgeführt. Es zeigten sich Leitfähigkeiten um die 20 MS/m, was im Vergleich zu anderen mittels Piezojet erzeugten Strukturen gut ist, und im Pull-Test ermittelte Haftfestigkeiten > 10 MPa, was deutlich höher ist als gedruckte Leiterbahnen auf Polymersubstraten.

Es wurden geeignete elektrisch leitfähige Tinten und Pasten für die Metallisierung der gedruckten Keramiksubstrate untersucht. Neben dem Einsatz kommerziell verfügbarer Tinten als Referenz wurden neu entwickelte Silbernanopartikel-Tintenformulierungen unterschiedlicher Zusammensetzung und Viskositäten getestet und iterativ optimiert. Durch einen erstmals auf additiv gefertigte Keramiken angewandte Two-Step-Sintering Ansatz konnte insbesondere die Druckfestigkeit signifikant gesteigert werden.

Die additiv gefertigten Proben wurden zudem in Bezug auf ihre Weiterverarbeitbarkeit in verschiedenen Aufbau- und Verbindungstechniken wie bspw. unter Einfluss gängiger Temperaturlotprofile getestet. In für den Automotivbereich ausgelegten Umwelttests konnte die Zuverlässigkeit der generierten Materialverbunde geprüft werden; die Langzeitstabilität erwies sich dabei als stark tintenabhängig. Schließlich wurden dreidimensionale Aluminiumoxid-Keramiken, mit Leiterbahnen selektiv funktionalisiert, mittels Leitleber und entsprechender SMD-Bauelemente bestückt, um die Machbarkeit der Herstellung funktionaler 3D-Systeme auf Keramikbasis zu zeigen.

Zusammenfassend konnte das Forschungsprojekt „Additive4Industry – Printed electronics on 3D substrates“ wichtige Erkenntnisse für die Zukunft der 3D-gedruckten Elektronik erarbeiten. So wurde gezeigt, dass keramische Materialien mit kostengünstigem 3D-Druck zu Substraten für elektronische Baugruppen mit hinreichend geringer Oberflächenrauheit verarbeitet werden können. Geeignete leitfähige Tinten konnten identifiziert und entwickelt sowie entsprechende Piezojet-Druckprozesse zur Anwendung angepasst werden. Co-Sintering konnte durch den Einsatz von LTCC-Keramiken umgesetzt und die mechanischen und elektrischen Eigenschaften der generierten Schaltungsträger in Abhängigkeit diverser Sinterprogramme umfangreich analysiert werden. Insbesondere für Anwendungen in heißer Umgebung oder in aggressiven Medien, bei denen Kunststoffe gegenüber Keramiken schneller versagen, dürfte der in diesem Projekt erforschte Ansatz zur Optimierung räumlicher elektronischer Baugruppen zukünftig an Bedeutung gewinnen.



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Additive4Industry

Printed electronics on 3D-substrates (PE3D)

Teilvorhaben B

Schlussbericht – **Teil II: eingehende Darstellung**

Förderkennzeichnung: 03INT709BB

Laufzeit des Vorhabens: 01.06.2020 – 30.11.2023

Unternehmen: Conti Temic microelectronic GmbH
Ringlerstraße 17, 85057 Ingolstadt

Kontakt: Dr. Hüseyin Erdogan
hueseyin.erdogan@continental-corporation.com
+49 841 881 2249

Autor: Sonja Wächter
sonja.waechter@continental-corporation.com
+49 841 881 1673

Inhalt

1. DARSTELLUNG DER ERZIELTEN ERGEBNISSE	3
AP 2: 3D-DRUCK VON POLYMERSUBSTRATEN	4
AP 4: QUALIFIZIERUNG DER EIGENSCHAFTEN DER KERAMISCHEN / POLYMEREN SUBSTRATE	5
AP 7: MATERIALOGRAFISCHE QUALIFIZIERUNG VON GESINTERTEN TINTEN AUF KERAMISCHEN / POLYMEREN SUBSTRATEN	7
AP 8: ELEKTRISCHE UND MECHANISCHE QUALIFIZIERUNG SOWIE UMWELTSIMULATIONSTESTS VON GESINTERTEN / VERDICHETEN TINTEN AUF KERAMISCHEN / POLYMEREN SUBSTRATEN	9
AP 9: AUFBAU- UND VERBINDUNGSTECHNIK SOWIE QUALIFIZIERUNG VON FUNKTIONALISIERTEN KERAMISCHEN / POLYMEREN SUBSTRATEN	11
AP 10: HERSTELLUNG EINES DEMONSTRATORS	12
2. VERÖFFENTLICHUNGEN	14

1. Darstellung der erzielten Ergebnisse

Das Gesamtziel des PE3D-Forschungsvorhabens ist die additive Fertigung einer funktionsfähigen elektronischen Baugruppe für Sensor- oder Hochfrequenzanwendungen. Zur Orientierung wurde als realer Use Case ein Radar-Sensor der 6ten Generation von Continental ausgewählt. Sowohl die Leiterplatte als auch die Antenne bilden ideale Demonstrator Bauteile für die Erprobung der PE3D-Projektarbeiten und deren anschließende Validierung.

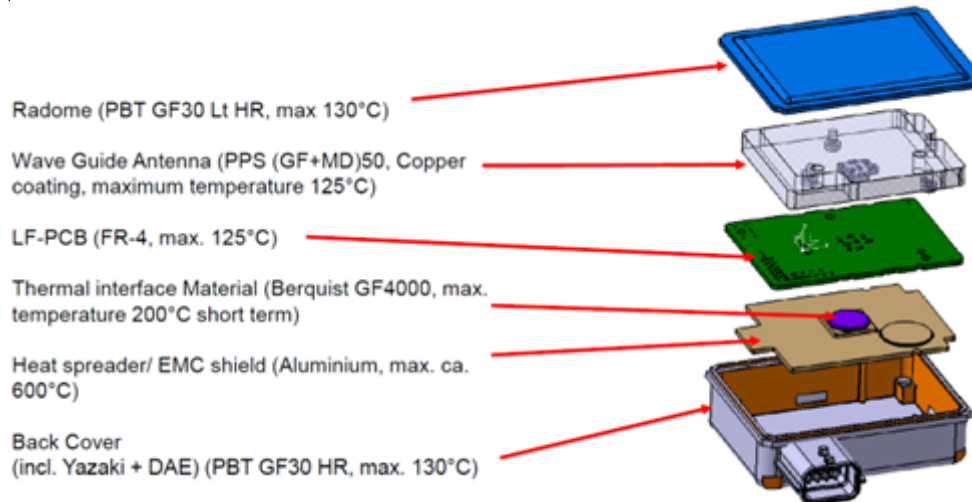


Abbildung 1: Explosionsdarstellung eines Radar-Sensors der Generation 6

Für die additive Fertigung kommen unterschiedliche Verfahren wie Dispensen, Fused Filament Fabrication, Selectives Laserschweißen und Stereolithografie zur Substratherstellung sowie Drucktechnologien wie Aerosol-Jet- und Piezo-Jet-Druck für additive Metallisierungen zum Einsatz. Additiv hergestellte Keramikssubstrate werden nach dem Druckprozess in thermischen Behandlungen gesintert, bevor sie funktionalisiert werden können. Auf dem Substrat aufgebrachte Leiterbahnen werden in nachfolgenden thermischen Prozessen wie konventionellen Ofenprozessen und UV-Härtung behandelt, um eine Verdichtung der Leiterbahn für optimale elektrische Leitfähigkeit zu erreichen. Die additiv hergestellten und metallisierten Substrate werden anschließend unter Verwendung konventioneller Aufbau- und Verbindungstechniken wie Löten, Sintern und Kleben zu einem Demonstrator funktionalisiert. Der Projektfokus von Continental liegt auf der Qualifizierung sowie der Aufbau- und Verbindungstechnik der hergestellten Muster. Hierzu gehören unter anderem Qualifizierungsmaßnahmen wie mechanische und materialografische Analysen der Proben.

Das PE3D-Projekt gliederte sich in 10 Arbeitspakete:

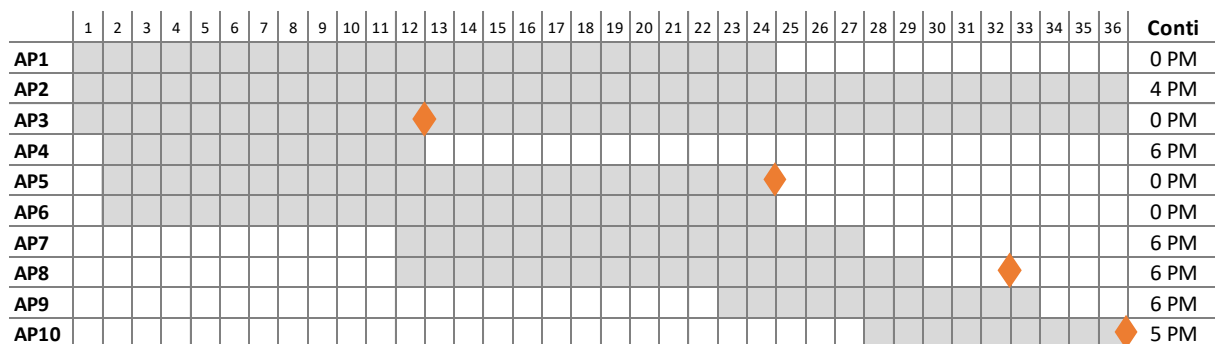


Abbildung 2: Projektplan des PE3D-Projekts mit Meilensteinen nach Projektmonaten

In den Arbeitspaketen 1, 3, 5 und 6 hat Continental planmäßig keine Aktivitäten. Nachfolgend sind die für die Conti Temic microelectronic GmbH betreffenden Ziele und die entstandenen Ergebnisse dieser Arbeitspakete näher spezifiziert.

AP 2: 3D-Druck von Polymersubstraten

Das zweite Arbeitspaket beinhaltet die additive Fertigung von Keramik- und Polymersubstraten. In Form einer Technologie-, Material- und Parameterstudie werden geeignete Herstellungsprozesse zur Verwendung im Projekt evaluiert. Bei Continental kam das Fused Deposition Modeling (FDM)-Verfahren zum Einsatz, bei dem thermoplastische Materialien mittels Extruder schichtweise auf eine beheizte Bauplattform aufgebracht werden. Es wurde ein Ultimaker3+ Extendet (Dual-Extruder) mit individuell auf die Materialien ausgelegte Parameter und Extruder Düsen verwendet. Zudem wurden diverse Tests mit Selektiven Laserschmelzen, ein pulverbettbasiertes Laser-Schmelzverfahren, mit dem TruPrint3000 durchgeführt. Außerdem wurde bei Continental das Stereolithografie (SLA)-Verfahren eingeführt, bei dem flüssiger Kunststoff durch Lichtimpulse schichtweise ausgehärtet wird. Hierfür kam ein Formlabs 3L zum Einsatz.

Hauptbestandteil dieses Arbeitspaketes sind Parameterstudien der variablen Einstellungen des Druckprozesses, wie Schichtdicke, Düsendeschwindigkeit, Material, Vorheiztemperatur und weitere.

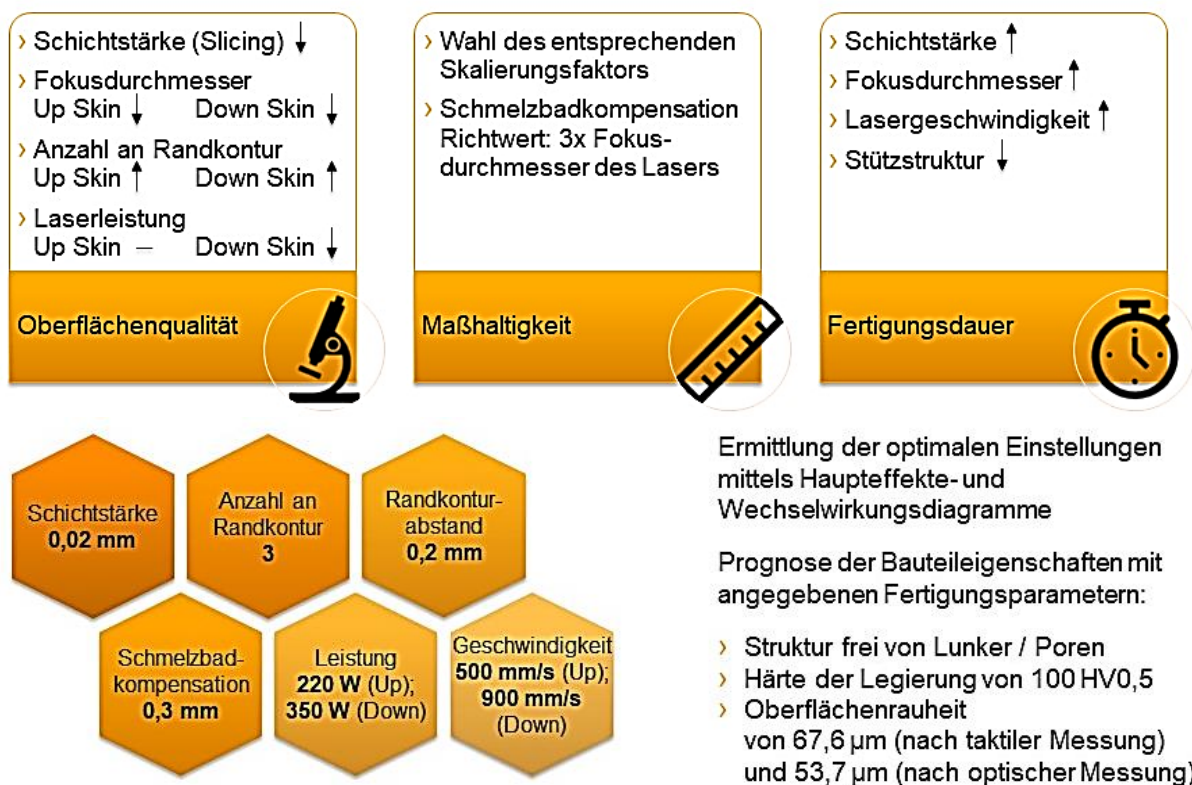


Abbildung 3: Auszug Parameterstudie zu Druckprozess

Die Kunststoff-3D-Drucke erfolgten mit unterschiedlichen Materialien wie ABS, PLA, PC und speziellen Kunstharzen mit unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften wie ESD oder Hochtemperaturbeständigkeit. Das Hauptaugenmerk des Polymer-3D-Drucks liegt auf der Bauteilstabilität, Temperaturbeständigkeit und der erzeugten Oberflächenqualität, die für die weitere Verarbeitung wichtig sind. Eine perfekte Verbindung der jeweiligen Schichten ist eine unabdingbare Voraussetzung für nachfolgende Tinten-Auftragsprozesse.

Die, mit den verschiedenen Technologien, gedruckten Substrate wurden im Projektkonsortium ausgetauscht und für weitere Metallisierungsprozesse verwendet. Favorit im Konsortium war letztendlich PA6-GF30 (Glasfaser-verstärktes Polyamid 6) mit guten thermischen Eigenschaften und einer optimierter Oberflächenqualität, bei folgenden Parametern:

- Druckbetttemperatur: 70°C
- Düsentemperatur: 265°C
- Druckgeschwindigkeit: 20 mm/s umfasste.
- Extrusionsbreite / Infill: 0,22 mm

AP 4: Qualifizierung der Eigenschaften der keramischen / polymeren Substrate

Das vierte Arbeitspaket beinhaltet die Qualifizierung der in AP 2 und AP 3 hergestellten Substrate. Diese werden hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften analysiert und bewertet. Eine permanente Rückspeisung der Ergebnisse zu AP 2 und AP 3 sorgt für eine kontinuierliche Optimierung der hergestellten Keramiken und Polymere. In diesem Arbeitspaket werden unterschiedliche Materialeigenschaften des gleichen Materials, hergestellt mit unterschiedlichen Technologien, mit einem Austausch von Substraten sowie Testergebnissen innerhalb der Projektpartner untersucht.

Continental konnte die Qualifizierung von additive gefertigten Keramik- und Polymer-Substraten planmäßig durchführen. Es wurden diverse Analysen, sowohl an den bei Continental gefertigten additiven Probekörpern durchgeführt als auch an additiven Probekörpern die von den Projektpartnern bereitgestellt wurden.



Abbildung 4: Übersicht der bei Continental im PE3D-Projekt verwendeten Analyseverfahren

Zum einen wurde bei Continental eine Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften von additiv gefertigten Keramik-Substraten mittels 4-Punkt Biegeversuche nach DIN EN 843-1, an Testmuster der FAPS (aufgebaut mit unterschiedlichen Druckparametern), durchgeführt. Durch Auswertung der Biegefestigkeit und der Bruchbilder, konnten die Druckparameter validiert werden.

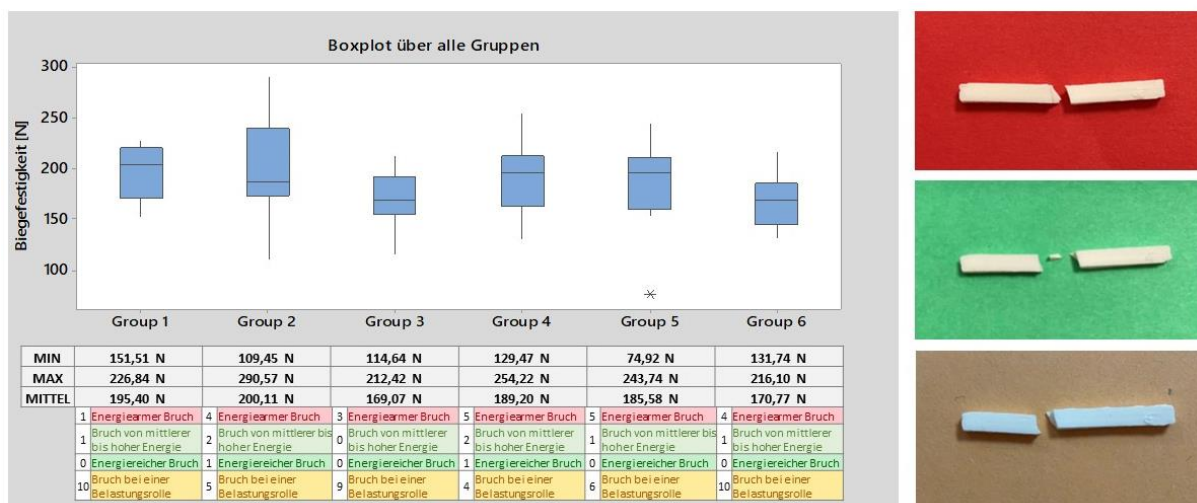


Abbildung 5: Ergebnisse des 4-Punkt Biegeversuch nach DIN EN843-1 an Keramikproben

Zum anderen erfolgte eine materialographische Analyse additive gefertigten Keramik-Testmuster mittels Digital- und Rasterelektronenmikroskopie zur Beurteilung der

Oberflächenstruktur der Probekörper sowie eine Energiedispersiver Röntgenspektroskopie zur Materialbestimmung und Mikrostrukturanalysen durch Anfertigung von Mikroschliffen. Es konnten deutliche Unterschiede in der Gefügestruktur sichtbar gemacht werden, nicht nur bei den verschiedenen Materialien, sondern auch beim selben Material mit unterschiedlichen Druckparametern.

Mechanische Qualifizierung additiv gefertigter Keramik

Mikrostrukturanalyse durch Schriffe

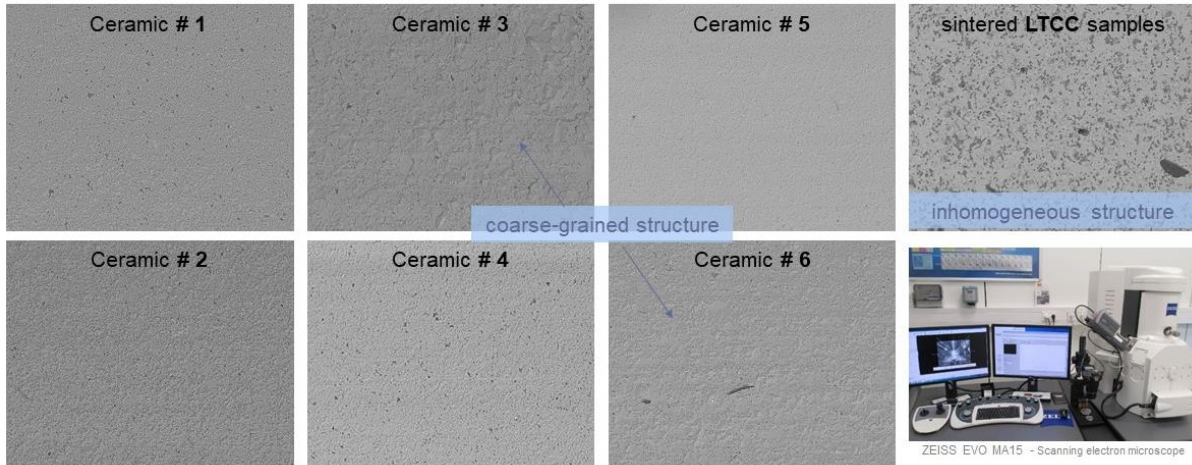


Abbildung 6: Strukturanalyse mittels Rasterelektronenmikroskopie an geschliffenen Druckproben

Unter anderem wurde zudem die Zugfestigkeit von bei Continental im SLM-Verfahren gefertigte Zugproben ermittelt und deren E-Modul bestimmt. Diese Werte wurden mit vergleichbaren Materialien aus einer konventionellen Fertigung verglichen. Die Zugfestigkeit lag zwar unter den Standardanforderungen, erreichte jedoch für den Anwendungsfall ausreichend gute Werte. Das E-Modul erzielte gute Werte und erfüllte die Standardanforderungen. Die Tests bestätigen, dass die richtige Wahl der Druckparameter für die Qualität der additiven Materialien entscheidend ist.

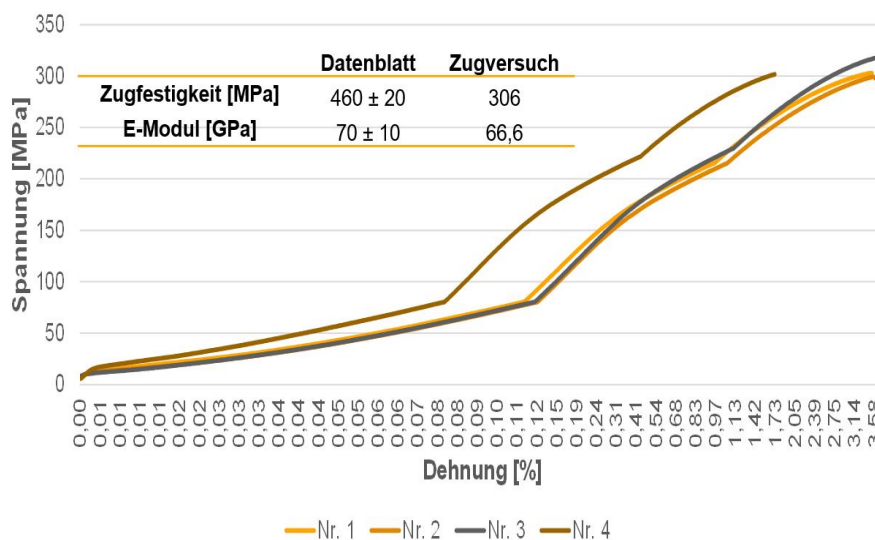


Abbildung 7: Zugversuche an additiv gefertigten Zugproben

AP 7: Materialografische Qualifizierung von gesinterten Tinten auf keramischen / polymeren Substraten

Im siebten Arbeitspaket werden die gesinterten/verdichteten Leiterbahnen materialografischen Untersuchungen unterzogen. Dabei werden die Proben hinsichtlich verschiedener Aspekte analysiert, wie etwa Dichte der Leiterbahn, Haftkontakt auf Polymersubstraten, Oxidation der Metallisierung und Bildung einer Reaktionsschicht bei Verwendung von Titanadditiven auf Keramiksubstraten. Die in diesem Arbeitspaket gewonnenen Erkenntnisse haben einen wesentlichen Einfluss auf die sukzessive Optimierung der Prozessparameter in AP 6.

Bei Continental wurden diverse Analysen von additiv applizierten Leiterbahnen an unterschiedlichen Proben von GSB-Wahl (SI Ink V002 with higher viscosity) und FAPS (Titanium-containing ink) durchgeführt. Für die materialographische Qualifizierung von Sintertinte auf additiv gefertigten Keramiksubstraten wurden zum einen Mikroskopische Analysen (Keyence VHX5000 und Zeiss Smartzoom5) durchgeführt, um die Tintenoberfläche zu Beurteilen und Breitenmessung der Tintenraupe vorzunehmen. Es lassen sich deutliche Unterschiede zwischen den beiden Tinten bezüglich ihrer Breite und Formbeständigkeit erkennen. Bereits in den Mikroskopaufnahmen werden die teilweise vorhandenen Tintenabrissse und Tintenspritzer deutlich (Abbildung 8).

Analyse von gedruckten Leiterbahnen

Digitalmikroskopische Begutachtung

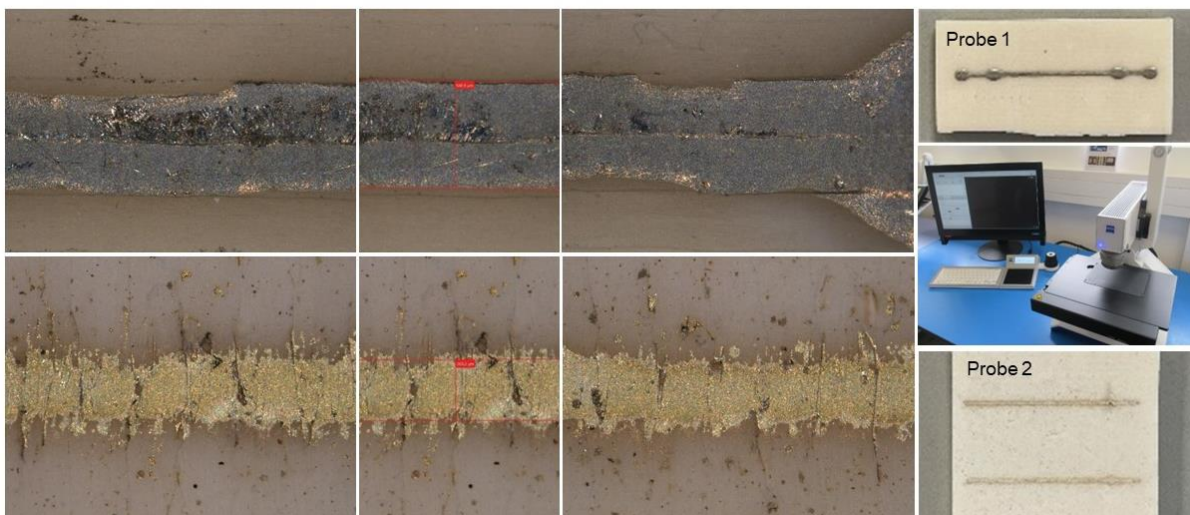


Abbildung 8: Mikroskopie der auf Keramiksubstrat aufgetragenen Tinten

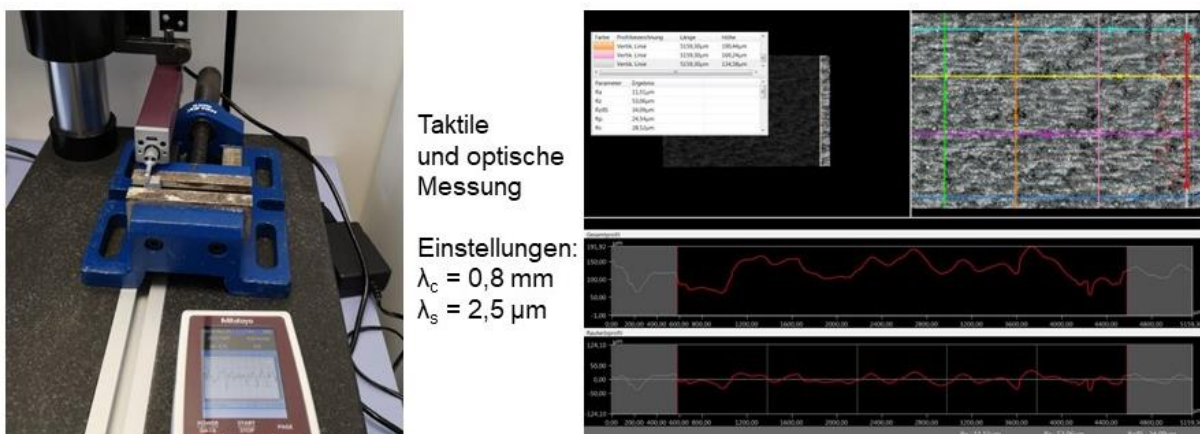


Abbildung 9: Darstellung taktile und optische Rauheitsmessung der Keramiksubstrate

Eine Herausforderung bei der Tintenauftragung stellte der Overspray dar (Entstehung von Spritzern rund um das Druckbild während des Druckvorgangs, ersichtlich in Abbildung 11, linke Seite), der wasserbasierten Tinten auf der Keramik. Um diesen zu verringern, wurden angepasste Druckparameter, eine Verringerung des Düsendurchmessers sowie eine Erhöhung der Tintenviskosität geprüft. Schließlich konnten ausreichend gute Haftfestigkeiten erreicht werden. Spezifische elektrische Leitfähigkeiten zwischen 17 und 20 MS/m sind für gedruckte Elektronik ebenfalls Werte, die sich sehen lassen können.

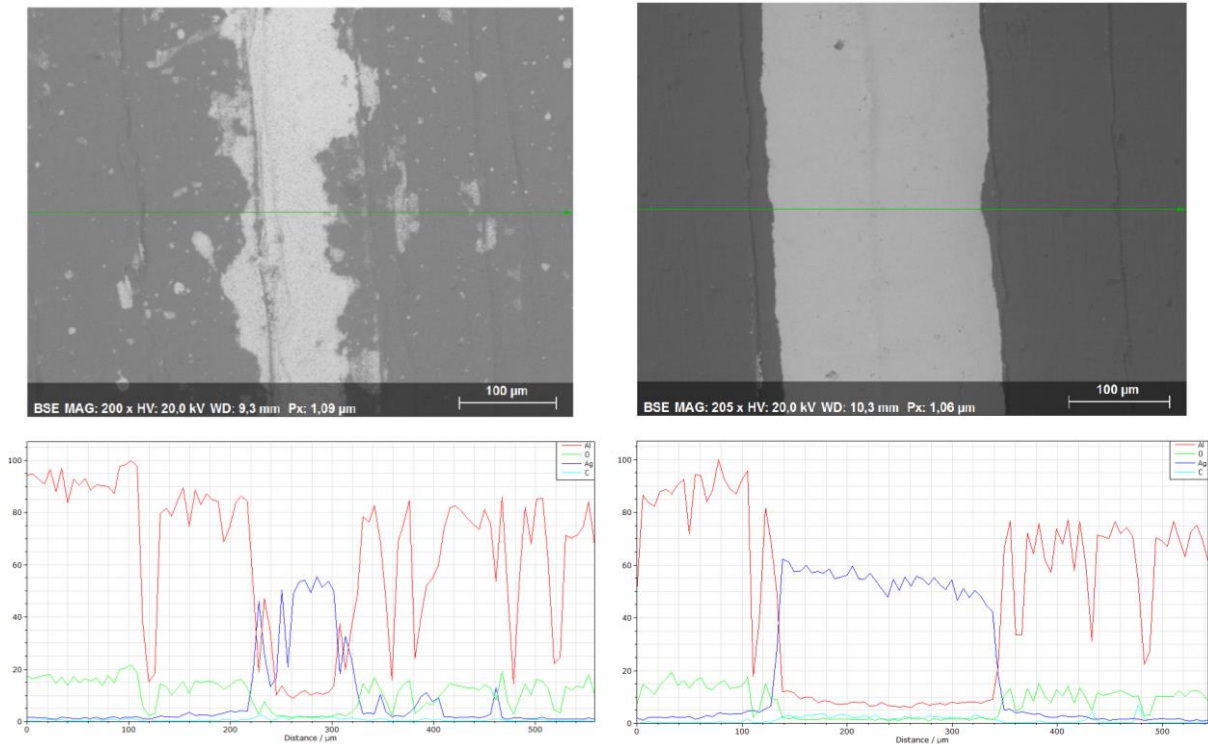


Abbildung 12: Energiedispersive Röntgenspektroskopie -Line Scan über der Tintenraupe

AP 8: Elektrische und mechanische Qualifizierung sowie Umweltsimulationstests von gesinterten / verdichteten Tinten auf keramischen / polymeren Substraten

Die im siebten Arbeitspaket hergestellten Proben werden hinsichtlich elektrischer und mechanischer Eigenschaften qualifiziert. Die elektrische Leitfähigkeit wird ermittelt und mit Werten von Massivkupfer verglichen, um die Herstellungsprozesse kontinuierlich optimieren zu können. Des Weiteren werden Strombelastbarkeitsprüfungen nach EN 60512-5-2:2002 durchgeführt, um die maximale Strombelastbarkeit für industrielle Anwendungen zu testen. Mechanische Kennwerte wie Scher- und Zugfestigkeit werden nach den Prüfnormen DIN EN 62137-1-2 und EN 13144 durchgeführt. Ergänzend werden Umweltsimulationsprüfungen nach DIN EN 600 68-2-14 nach definierten Lastzyklen durchgeführt.

Bei Continental lag der Fokus auf der mechanischen Qualifizierung. Unter anderem wurden Materialhärte- und Gefügestruktur-Analysen in Form von Nanoidenter- und Härtemessungen durchgeführt. In Abbildung 13 ist eine beispielhafte Nanoidentermessreihe von Keramiksubstraten dargestellt. Die Proben 1-3 zeigten absteigende Festigkeitswerte und E-Module von 1 - 3. Bei den Proben 4 - 6 sind die Messungen sehr niedrig ausgefallen, was auf viele Poren oder allgemein schlechtes Sintering hindeutet. Die Proben weisen lokal recht unterschiedliche Eigenschaften auf, was die hohe Streuung und zum Teil nicht durchführbare Messungen erklärt.

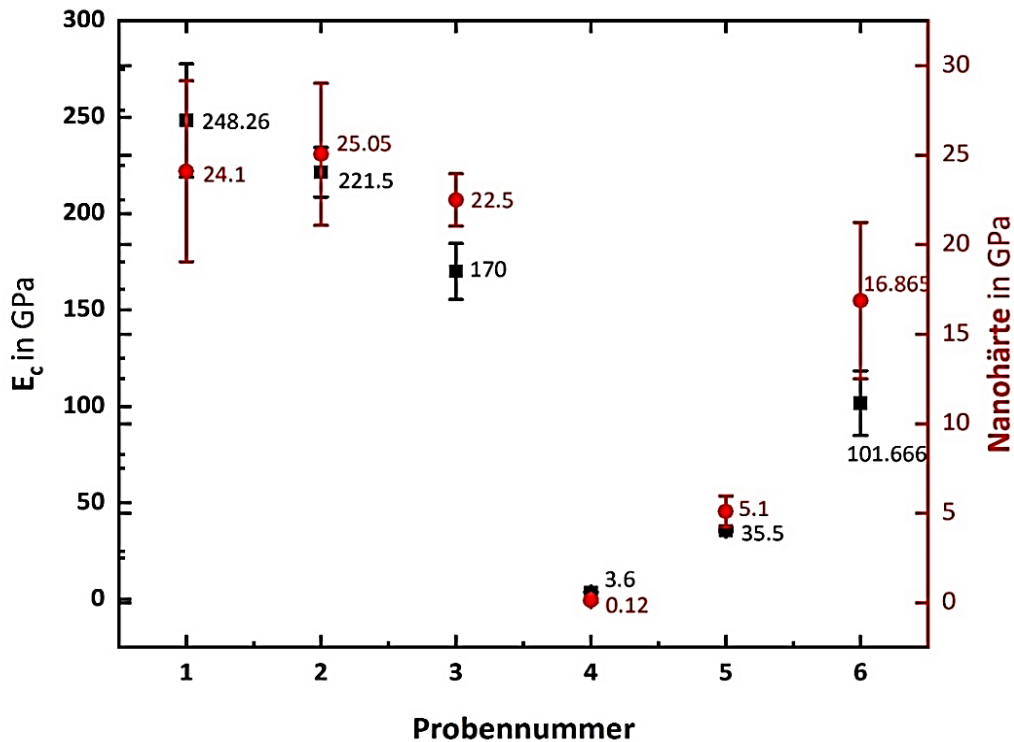


Abbildung 13: Ergebnisse der Nanoindentermessungen

Des Weiteren wurde Härtemessungen an den bei Continental im SLM-Verfahren gefertigten Proben durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass die Materialhärte an Oberflächen mit Lunkern geringer ausfällt. Die Härte liegt im Bereich von 90,2 - 99,9 HV0,5.

Analyse der additiv gefertigten Probekörper Mikroschliffe und Härtemessung

Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Ø HV0,5
1	96,7	90,6	87,9	94,3	96,9	101,7	93,8	95,0	94,5	94,6
2	97,2	86,6	85,4	89,0	92,9	85,3	93,9	98,6	92,1	91,2
3	100,5	95,5	93,4	94,9	96,3	97,7	103,4	98,3	96,5	97,4
4	100,9	91,7	95,3	94,7	94,5	101,5	95,8	96,8	94,4	96,2
5	99,1	91,9	89,9	93,0	98,2	103,2	105,6	95,7	94,2	96,8
6	90,4	75,5	90,5	90,2	95,5	100,0	100,2	94,2	75,3	90,2
7	103,3	96,7	92,4	96,3	103,3	110,3	107,0	95,7	93,7	99,9
8	100,4	94,5	94,3	78,0	94,3	98,4	97,4	98,4	84,7	93,4
9	98,1	96,0	95,0	95,8	99,1	103,2	98,8	98,1	101,8	98,4
10	96,7	95,3	89,4	87,9	89,9	100,7	95,4	93,8	92,5	93,5
11	105,1	98,9	92,8	94,8	97,2	108,8	104,1	99,8	95,3	99,7
12	97,0	97,7	83,9	96,7	103,1	100,0	96,8	72,4	89,4	93,0
13	101,3	93,2	91,4	96,7	100,2	102,6	107,4	101,8	97,5	99,1
14	92,3	90,8	90,8	83,1	95,3	87,2	88,5	96,9	91,8	90,7
15	105,5	95,5	91,3	100,0	97,0	104,9	105,3	98,7	96,2	99,4
16	103,7	95,2	93,5	94,5	91,4	100,9	103,2	89,8	93,6	96,2

Abbildung 14: Härtemessung

Die Untersuchungen der gedruckten leitfähigen Strukturen auf den Keramiken konzentrierten sich im Wesentlichen auf die Evaluierung der Haftfestigkeit. Eine abschließende Mikroschliffanalyse diente bei Continental somit als ergänzende Methode zur Darstellung der Verbindung der Tintenraupe zum additiv gefertigten Keramiksubstrat. Bei den ersten Versuchsmustern besaß die Tinte noch eine geringe Haftung zum Substrat und konnte den niedrigen mechanischen Belastungen des Schleifprozesses nicht standhalten (Tintenabriss ersichtlich in EDX-Analyse in Abbildung 15).

Cross Section

EDX-mapping from Ink paste area

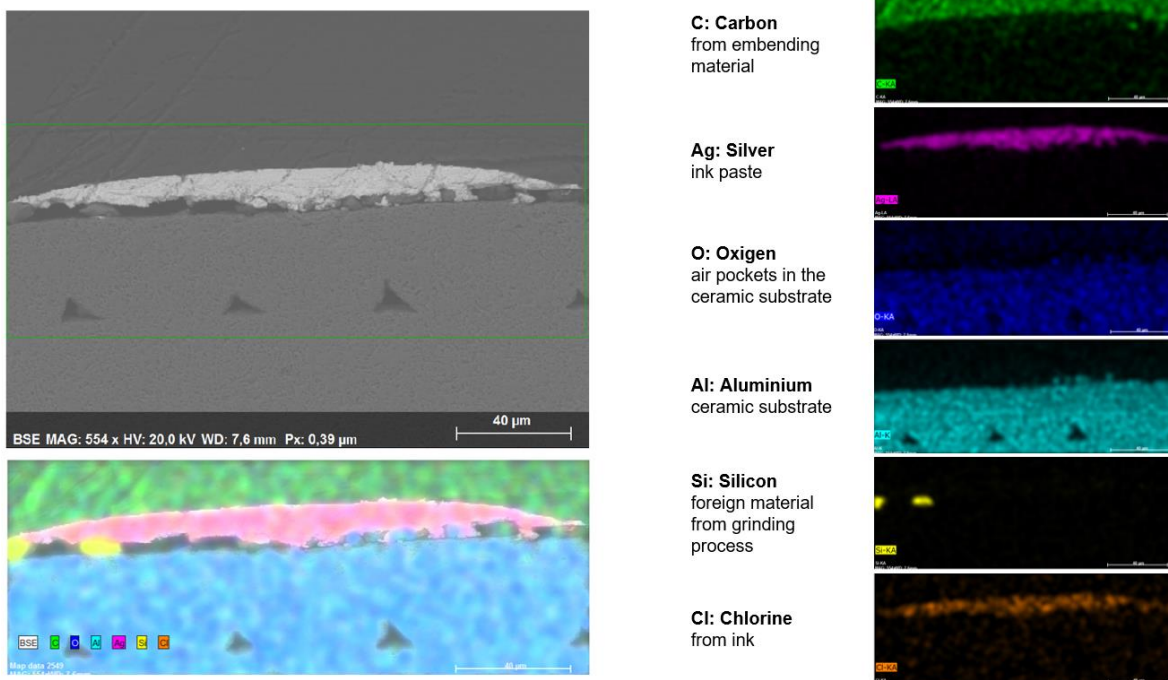
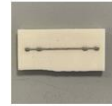


Abbildung 15: EDX-Analyse eines Mikroschliffs einer aufgetragten Tinte

Die Herstellung der Prüfkörper erfolgt durch Einbetten der Proben in eine Kunstharzmischung. Dafür werden die Probe mit UV-härtendem Kleber in einer Einbettform fixiert. Die Aushärtung des Klebers erfolgt für 1 Minute mit UV-Licht. Anschließend wird die Einbettform mit Technovit 4006 (Mischungsverhältnis: 1/3 flüssig und 2/3 Pulver) befüllt. Das Kunstharz härtet für 20 Minuten in einem Überdrucktopf bei 2 bar aus. Die anschließende Bearbeitung des Prüfkörpers startet mit der Entgratung des Prüfkörpers an einem Bandschleifer. Anschließend werden die Keramiksubstrate in der Kunstharzmischung schrittweise, in den Körnungsstufen: 80, 180, 320, 600, 1200 angeschliffen. Die abschließende 2-stufige Polierung mit dem Poliermittel Eposil M an einer automatischen Poliermaschine sorgt für eine kratzerfreie Oberfläche des Prüflings, die eine REM/EDX-Analyse ermöglicht.

AP 9: Aufbau- und Verbindungstechnik sowie Qualifizierung von funktionalisierten keramischen / polymeren Substraten

Das neunte Arbeitspaket beinhaltet die Aufbau- und Verbindungstechnik, um die Proben abschließend zu einem elektrischen Funktionsmodul zu verarbeiten. Dabei wird insbesondere die Verarbeitbarkeit gedruckter Strukturen mit gängigen Weichloten (SAC-Lote) und die Bondfähigkeit auf gedruckten Strukturen geprüft. Die Weichlotverarbeitung erfolgt mit herkömmlichen Lötverfahren wie Konvektions- und Kondensationslötverfahren, wobei die elektrische Kontaktierung mittels Bonddrähten mit dem Ultraschallbondverfahren qualifiziert wird. Um die Qualität der hergestellten Verbindungen zu qualifizieren, werden zusätzlich Umweltsimulationstests in Kombination mit einem mechanischen Qualitätstest durchgeführt. Als beschleunigter Alterungstest wurde Temperaturschocktests mit Bedingungen von -40°C und $+125^{\circ}\text{C}$ (Spezifiziert für den Einsatz im Automotivumfeld entsprechend dem als Use Case definierten Continental Radar-Sensor) an den Proben durchgeführt. Das gewonnene Know-how soll in AP 10, der Entwicklung eines Demonstrators, einfließen, um eine voll funktionsfähige Baugruppe herstellen zu können.

Continental fokussierte sich auf die Herstellung und Tests zur Temperaturbeständigkeit von Antennen-Druckmustern sowie der Qualifizierung der aufgebauten Demonstratoren von funktionalisierten keramischen und polymeren Substraten.

Die bei Continental im SLA-Verfahren gedruckten Antennendemonstratoren wurden bezüglich der bei der weiteren Sensormontage erforderlichen Aufbau- und Verbindungstechniken qualifiziert. Im ersten Schritt wurden die gedruckten Antennen in einem UV-Prozess nachgehärtet. Anschließend wurden die UV-ausgehärteten 3D-Druck Antennen für die spätere Verlötlung metallisiert. Durch eine PVD-Beschichtung (physical vapor deposition) im Sputterverfahren werden dazu mehrere Metallschichten aufgebracht und die Schichtdicken vermessen. Anschließend durchliefen die Antennen typische Temperaturprofile. Es wurde zum einen das gängige Standard-Lötprofil von Continental gewählt und zum anderen ein Lotprofil für niedrigschmelzende Lote, um die Temperaturbelastungen zu reduzieren.

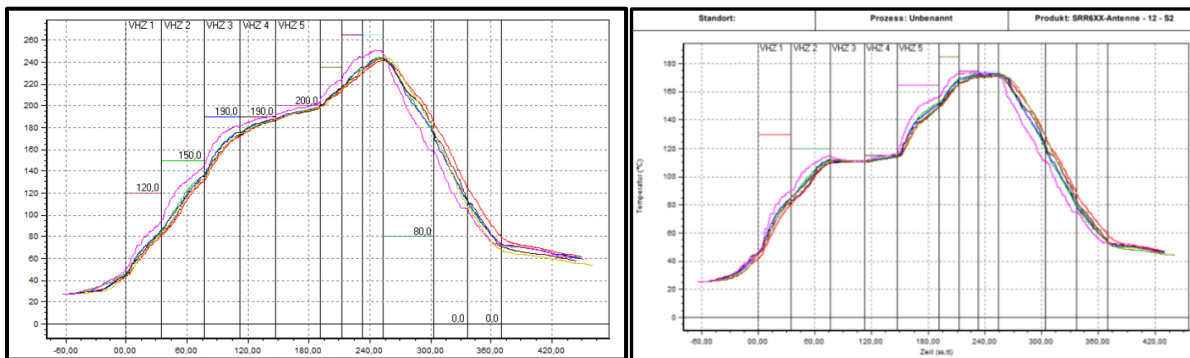


Abbildung 16: Temperaturlotprofile (links: Standardprofil / rechts: niedrigschmelzendes Lotprofil)

Die Maßhaltigkeit des Antennendrucks wurde jeweils nach den einzelnen Prozessschritten mit einem 3D-Scan überprüft. Mit einer max. Abweichungen zum CAD-Modell auf den Lötfläche zwischen +0,1 mm und -0,25 mm, erzielt der Druck im ersten Schritt verhältnismäßig gute Werte. Nach der UV-Nachhärtung verbessern sich diese Werte sogar auf eine max. Abweichungen auf der Lötfläche zwischen +0,03 mm und -0,06 mm.

AP 10: Herstellung eines Demonstrators

Zur Herstellung des Demonstrators werden die Forschungsergebnisse der vorangegangenen Arbeitspakete herangezogen. Die bereits gewonnenen Erkenntnisse zur Erzeugung elektrisch leitfähiger Strukturen auf Keramik- und Polymersubstraten ermöglichen eine optimierte Prozessführung zur Herstellung des Demonstrators. Hergestellte Schaltungsträger werden zur Kontaktierung mittels Aufbau- und Verbindungstechnik wie Löten und Sintern von aktiven und passiven Bauelementen sowie anschließendem Drahtbonden bearbeitet. Somit kann die Möglichkeit der Anwendung von Aufbau- und Verbindungstechnologien auf additiv gefertigten Schaltungsträgern anhand einer funktionsfähigen Baugruppe demonstriert werden. Im zehnten Arbeitspaket wird somit die Realisierbarkeit der entwickelten Technologien anhand von mehreren Demonstratoren gezeigt.

Bei Continental wurde mit der Antennenstackstruktur eines neuartigen Short Range Radar Sensors von Continental ein möglicher Use Case für eine reale additive Anwendung im Elektronikbereich definiert. Die Auswahl erfolgte anhand einer Potential- und Machbarkeitsanalyse. Die funktionalen Anforderungen wurden dafür ausgearbeitet. Unterschiedliche Designkonzepte wurden konstruiert und für die additive Fertigung angepasst und unter Berücksichtigung

- der Beibehaltung der Sensor-Funktionalität
- von Miniaturisierung und Gewichtseinsparung des Sensors
- der Wärmeleitfähigkeit im späteren Sensorbetrieb
- des Materialverbrauchs (Ressourcen schonende Fertigung)

Die ersten konstruierten Modelle wurden im SLM-Verfahren additive gefertigt und deren Druckqualität mit unterschiedlichen Analyseverfahren wie Mikroschliffe, Härteprüfung, Rasterelektronenmikroskopie, etc. analysiert. Anschließend wurde die Herstellung über FDM-Verfahren erprobt. 3D-Probendrucke mit FDM-Verfahren in Kombination mit Kunststoff und Metall (unterschiedliche Materialkombinationen z.B. mit Kupfer, Eisen, Nickel, etc.) wurden erstellt, zur Optimierung der Druckparameter und anschließenden Bewertung der Druckqualität. Letztendlich erfolgte die Herstellung im SLA-Verfahren mit einem hochtemperaturbeständigem Kunstharz (Abbildung 17) und anschließender Nachhärtung und Metallisierung.

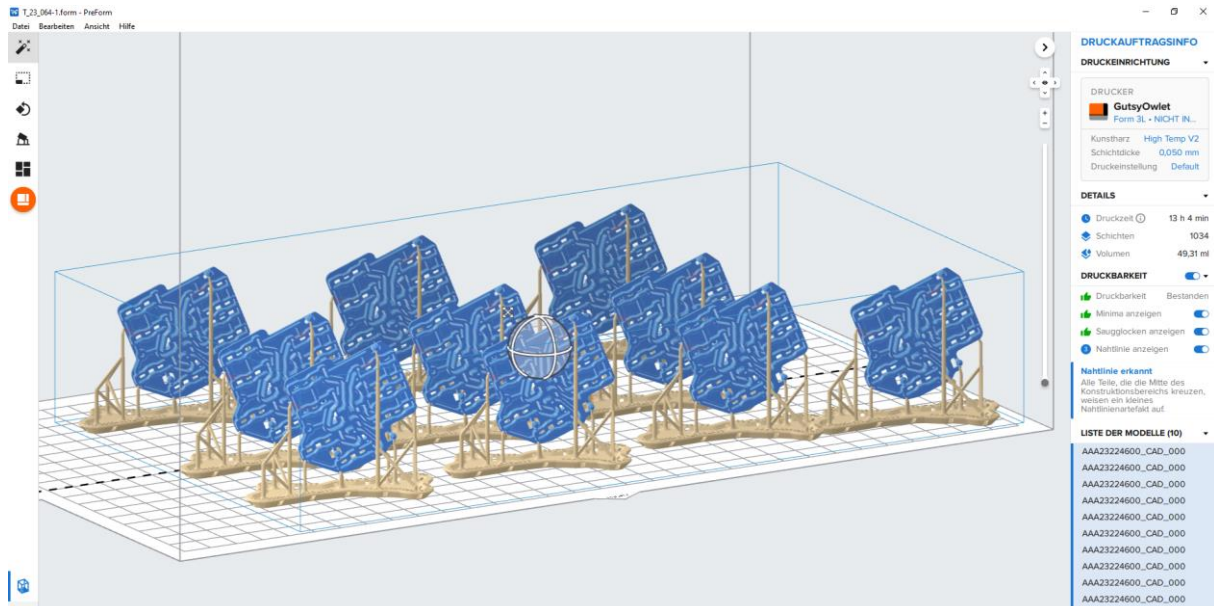


Abbildung 17: Formlabs L3 Bauplattform mit Antennen-Demonstratoren

Die durchgeführte Qualifizierung zeigt, dass die am Form 3L additiv gefertigten Antennen PVD-beschichtbar (physical vapor deposition) sind. Im Sputterverfahren wurden mehrere Metallschichten (Nickel-Chrom / Kupfer / Nickel-Chrom / Zinn) aufgebracht. Die vermessenen Schichtdicken weichen nur marginal von den Werten, der im Spritzgußverfahren gefertigten Antennen aus PPS-GF60, ab. Die Möglichkeiten des vorhandenen 3D-Druckers Form 3L, welcher nach dem SLA-Verfahren arbeitet, sind jedoch begrenzt bzgl. Maßhaltigkeit und Formstabilität. Durch die thermische Belastung im Reflow Ofen haben sich die Baugruppen trotz der hohen Wärmeformbeständigkeit des High Temp Resin stark verformt. Eine flächige Verbindung zwischen PCB und Antenne kann nur hergestellt werden, wenn die Antenne die spezifizierte Planaritätsanforderung von 100 µm über die gesamte anzulötende Fläche aufweist.

Im Gesamtkonsortium wurden zudem weitere Antennen hergestellt deren Konzeptionierung und Design von den Projektpartnern Conti, Neotech und FAPS gemeinsam durchgeführt wurde, in Anlehnung an die geltenden Automotivanforderungen. Ein Bauteil mit komplexer Oberfläche im Falle der Antenne (innenseitige Metallisierung des U-Profiles mit kleinen Abmaßen) konnte bedruckt werden und die Machbarkeit der additiven Herstellung und anschließenden Bestückung eines 3D-Bauteils aus Keramik konnte nachgewiesen werden.

2. Veröffentlichungen

Veranstaltungen:

Am 26.07.2023 gestalteten die GSB-Wahl GmbH, Conti und Neotech gemeinsam ein vom Cluster mechatronik & automation organisiertes Präsenz-Seminar in den Räumlichkeiten des TCW Nördlingen zu Inhalten aus dem Projekt, was ebenfalls großen Anklang fand.

An 28.11.2023 fand das Abschlusstreffen im Rahmen eines Clustertreffs statt, organisiert vom Cluster mechatronik & automation

Technikbericht:

UTSCH, D., M. PFEFFER, J. WAHL und H. ERDOGAN. Additive4Industry – Printed electronics on 3D substrates [online]. Die Zukunft von 3D-gedruckter Elektronik, 2024. Verfügbar unter: <https://www.bayern-innovativ.de/de/netzwerke-und-thinknet/uebersicht-material-und-produktion/cluster-mechatronik-automation/seite/die-zukunft-von-3d-gedruckter-elektronik>