

Effiziente SiC-Leistungsmodule – Herausforderungen und Lösungsansätze zum großflächigen Silber-Sintern von „Active Metal Brazed“-Substraten auf Aluminium-Bodenplatten

Sebastian Fritzsche, Katja Stenger, Felix Koser, Noah Glaab, Benjamin Fabian, Florian Seifert; Heraeus Electronics GmbH & Co. KG, Heraeusstraße 12-14, D-63450 Hanau, Deutschland

SiC-Leistungsmodule ermöglichen eine deutliche Steigerung der Energieeffizienz aufgrund ihrer höheren Betriebstemperatur der SiC-Halbleiter von über 175 °C, höheren Schaltfrequenzen und gesteigerten Leistungsdichten. Neben dem bereits breit etablierten Silbersintern von SiC-Halbleitern auf Metall-Keramik-Substraten stellt die Optimierung der thermischen Anbindung von AMBs auf Bodenplatten – bezeichnet als „Large Area Sintering“ (LAS) - eine weitere Herausforderung dar.

Heraeus Electronics hat dazu die Silber-Sinterpasten der mAgic® PE360 Serie als zuverlässigere Alternative zu bisherigen gelöteten Leistungsmodulen in den Markt gebracht, wobei „Active Metal Brazed“-Substrate (AMB's) auf Kupfer-Bodenplatten gesintert werden können. Neben der Zuverlässigkeit stellen jedoch Kosten und Gewicht entscheidende Aspekte für den breiten Einsatz der LAS-Technologie dar. Der Ersatz von Kupfer-Bodenplatten durch bisher schwer sinterbare Aluminium-Bodenplatten könnte dazu entscheidende Beiträge liefern. Heraeus Electronics untersucht deshalb im Rahmen des EU-Projektes „FastLane“ wie Silber-Sinterpasten die Verbindung von AMB-Substraten mit Aluminium-Baseplates kostengünstig ermöglichen können. Das Ziel der Arbeit besteht darin, die Drucksinter-Ergebnisse der Silberpasten mAgic® PE 360 Serie zwischen AMBs und verschiedenen Bodenplatten-Varianten wie versilberten Kupfer- und Aluminium-Bodenplatten sowie vernickelte und verkupferte Aluminium-Bodenplatten in leistungselektronischen Modulen zu bewerten und weiterzuentwickeln. Dazu wurden Langzeitzuverlässigkeitsversuche in Form von passiven Temperaturwechseltests durchgeführt. Die Ergebnisse der großflächigen Sinterverbindung wurden mittels SAM-Aufnahmen auf die Delamination sowie die Anbindung der Sinterpaste untersucht.

1 Motivation

Die globale Elektronikindustrie befindet sich in einem tiefgreifenden Wandel, getrieben durch die Nachfrage nach höherer Effizienz, ökologischer Nachhaltigkeit und strategischer Autonomie. In diesem sich entwickelnden Umfeld hat Siliziumkarbid (SiC) sich als entscheidender Wegbereiter für Anwendungen der nächsten Generation in der Leistungselektronik herausgestellt. Um sein volles Potenzial auszuschöpfen, unterstützt das 2024 gestartete europäische FastLane-Projekt die Unabhängigkeit der EU bei kritischen Rohstoffen, entwickelt eine eigenständige Lieferkette für SiC-Rohmaterialien und -Bauelemente und erweitert die Funktionalitäten von SiC, um bestehende Einschränkungen zu überwinden.

FastLane ist eine dreijährige Initiative, die von der Europäischen Union kofinanziert wird und 29 Partner aus sieben Ländern zusammenführt, darunter führende Forschungseinrichtungen, spezialisierte KMU und große Industrieunternehmen. Unter der Koordination von Valeo verfolgt das Konsortium das Ziel, die Energieeffizienz zu steigern und den CO₂-Fußabdruck der Leistungselektronik zu verringern, indem eine robuste, unabhängige SiC-Lieferkette aufgebaut wird – von den Rohmaterialien bis hin zu Systemdemonstratoren. Durch die Nutzung von Skaleneffekten treibt FastLane kosteneffiziente Anwendungen zur Energieumwandlung voran und stärkt Europas technologische und wirtschaftliche Widerstandsfähigkeit im Bereich der Leistungselektronik.

Die umfassende Struktur des Projekts erstreckt sich über mehrere Arbeitspakete und kooperative Maßnahmen, die die gesamte Wertschöpfungskette der SiC-Leistungselektronik abdecken. Dazu gehören die Materialentwicklung, die Bauelementfertigung, Innovationen im Packaging sowie die abschließende Systemintegration. Um das Projektziel von FastLane – eine höhere Effizienz von Leistungsmodulen – zu erreichen, ermöglichen SiC-Chips im Vergleich zu konventionellen Si-Halbleitern den Betrieb bei erhöhten Betriebstemperaturen von über 200°C, mit gleichzeitig gesteigerter Leistungsdichte, höheren Schaltfrequenzen und verbesserter Energieeffizienz (siehe **Bild 1**) [1].

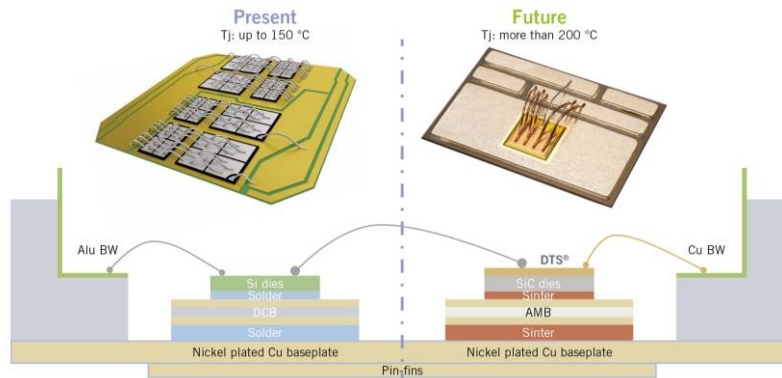


Bild 1: Materialinnovationen von Silizium- zu SiC-Leistungsmodulen. [1]

Ihre effektive Umsetzung erfordert den Einsatz fortschrittlicher Verpackungsmaterialien. Heraeus Electronics untersucht im Rahmen von FastLane unter anderem Ag-Sinterpasten, die die Anbindung von Active-Metal-Brazed-(AMB)-Substraten ohne Edelmetalloberflächen auf Bodenplatten ermöglichen.

2 Verwendete Materialien, Prozesse und Aufbauten

2.1 Silber-Sinterpaste und Drucksinter-Prozess

Heraeus Electronics hat bereits vor einigen Jahren die Silber-Sinterpaste mAgic® PE360P für das großflächige Sintern (LAS) von Metallkeramiksubstraten, insb. von Si_3N_4 -isolierten AMBs, auf Kupfer-Bodenplatten entwickelt [1]. Dazu wird ein Drucksintern-Prozess verwendet, welcher im **Bild 2** schematisch skizziert ist.



Bild 2: Prozessfluss-Empfehlungen für LAS-Drucksinterpaste mAgic® PE360P.

Bei den Sinterversuchen konnte festgestellt werden, dass die Silber-Sinterpaste mAgic® PE360P grundsätzlich sehr gut für die großflächige Sinterverbindung (LAS) von verschiedenen Bodenplatten geeignet ist. Die optimalen Sinterparameter, womit eine initiale Haftung auf allen drei Varianten erzielt werden konnte, liegen bei einer Sintertemperatur von 240 °C, einem Sinterdruck von 20 MPa sowie einer Sinterzeit von 300 s.

2.2 Bodenplatten und AMB-Substrate

Um durch den weiteren Ersatz des Bodenplatten-Materials von Kupfer durch Aluminium sowohl Kosten als auch Gewicht im Packaging von SiC-Leistungsmodulen zu reduzieren, untersucht diese Studie die Anbindung von Active-Metal-Brazed-(AMB)-Substraten mit Silber-Sinterpasten an Aluminium-Bodenplatten. Bei erfolgreicher Implementierung von Aluminium-Bodenplatten würde diese Innovation im Vergleich zu Kupfer-Bodenplatten insbesondere folgende Vorteile bieten:

- Bis zu 70 % Gewichtsreduktion sowie
- Kosteneinsparungen von bis zu 91 % im Vergleich zu Kupfer-Bodenplatten.

Vorversuche für das großflächige Sintern von AMBs auf nicht metallisierten Aluminium-Bodenplatten zeigten allerdings, dass bereits die initiale Haftung nicht ausreichend ist, so dass dafür verschiedene Metallisierungen mittels Silber, Nickel oder Kupfer nötig sind, um eine ausreichende Haftung zu garantieren. Ziel dieser Studie war es deshalb, Aufbauten von gesinterten AMBs auf verschiedene metallisierte Bodenplatten initial und nach Temperaturwechseltests (TCT) miteinander zu vergleichen (siehe **Bild 3**).

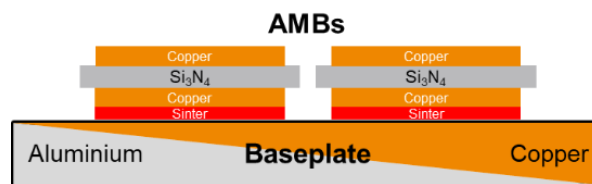


Bild 3: Aufbauten von gesinterten AMBs auf verschiedene Bodenplatten.

Als AMB-Substrate wurden unstrukturierte Singleunits mit beidseitig 0,3 mm dicken Kupferlagen sowie einer 0,38 mm dicken Si₃N₄-Keramik in einer Größe von 27 mm x 38 mm verwendet. Der Bonding-Mechanismus dieser Condura®.ultra Substrate nutzt ein Silber-freies Aktivlot, wodurch Kostenvorteile auch bei den Metall-Keramik-Substraten erzielt werden. Der Einfachheit halber werden diese Substrate hier trotzdem als AMBs bezeichnet.

Als Bodenplatten wurden eine einheitliche Geometrie mit den Abmaßen 105,6 mm (L) x 59,60 (B) mm x 3,36 mm (D) genutzt. Die Metallisierung der Bodenplatten erfolgte je nach Variante über Galvanik bzw. Pulverbeschichtung, so dass für die Untersuchungen folgende Kombinationen genutzt werden konnten:

- Galvanisch **versilberten Kupfer-Bodenplatten** – im Folgenden bezeichnet als **Ag(Cu)**,
- Galvanisch **versilberten Aluminium-Bodenplatten** – im Folgenden bezeichnet als **Ag(Al)**,
- Galvanisch **vernickelte Aluminium-Bodenplatten** – im Folgenden bezeichnet als **Ni(Al)** sowie
- Pulverbeschichtete **verkupferte Aluminium-Bodenplatten** – im Folgenden bezeichnet als **Cu(Al)**.

Aufgrund der unterschiedlichen Beschichtungsverfahren weichen Rauigkeit und Dicke der Bodenplatten-Metallisierungen voneinander ab. Für die Aussagen dieser Machbarkeitsstudie für das Sintern auf metallisiertem Aluminium sehen wir diese Unterschiede jedoch als nicht entscheidend an.

3 TCT-Zuverlässigkeit von Silber-gesinterten AMBs auf Bodenplatten

3.1 TCT-Ergebnisse von AMBs auf Nickel-beschichteten Aluminium-Bodenplatten

3.1.1 SAM-Ergebnisse

Zunächst wurden Aufbauten hergestellt aus mit der Silber-Sinterpaste mAgic® PE360P druckgesinterten AMBs auf Nickel-beschichteten Aluminium-Bodenplatten mit analogen Aufbauten auf versilberten Kupfer- und Aluminium-Bodenplatten in TCT-Zuverlässigkeitsversuchen verglichen. Als Testbedingungen wurden passive Temperaturwechseltests (20 Minuten bei -55 °C und 20 Minuten bei +150 °C) verwendet. Zur Bewertung der Ergebnisse der großflächigen Sinterverbindung (LAS) wurden die Delamination von Condura®.ultra-Substraten auf den verschiedenen metallisierten Bodenplatten sowie die Anbindung der Sinterpaste untersucht. Scherwerte von AMBs konnten nicht bestimmt werden, da diese für das vorhandene Prüfverfahren zu hoch sind. In **Bild 4** sind die „Scanning Acoustic Microscopy“-Analysen (SAM) der gesinterten AMB-Substrate auf verschiedenen metallisierten Bodenplatten zu sehen:

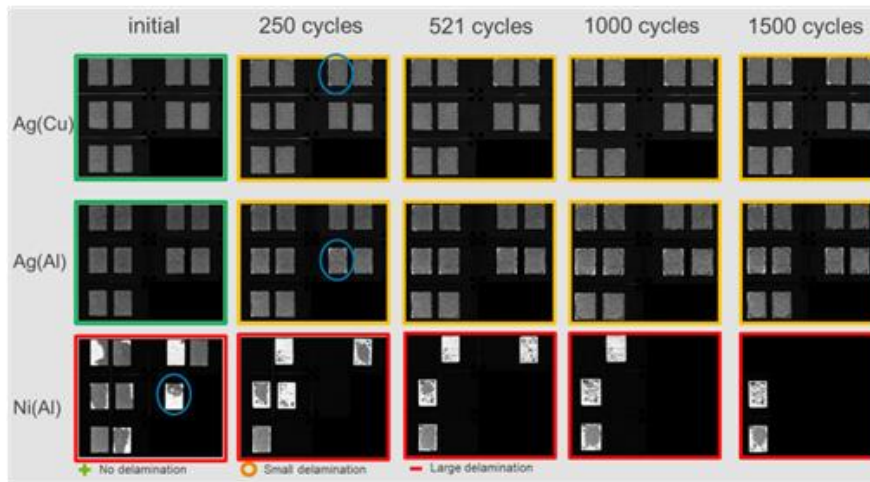


Bild 4: SAM-Analysen von gesinterten AMB-Substraten auf verschiedenen Bodenplatten - initial und nach TCT.

In **Tabelle 1** ist die dazugehörige statistische Betrachtung der SAM-Delaminations-Auswertung von jeweils bis zu 10 AMB-Singleunits dargestellt:

Tabelle 1: SAM-Auswertung der LAS AMB-Aufbauten initial & nach TCT (Mittelwert / Standardabweichung)

Metallisierung & (Kern) der Bodenplatten	Initial	250 Zyklen	521 Zyklen	1000 Zyklen	1500 Zyklen
Ag (Cu)	0,05% / +/- 0,03%	0,18% / +/- 0,12%	0,30% / +/- 0,21%	0,63% / +/- 0,36%	0,69% / +/- 0,29%
Ag (Al)	0,07% / +/- 0,09%	2,30% / +/- 1,34%	3,39% / +/- 1,91%	4,40% / +/- 2,60%	4,97% / +/- 2,62%
Ni (Al)	33,7% / +/- 34,7%	75,1% / +/- 30,1%	81,4% / +/- 26,3%	86,5% / +/- 22,3%	90,1% / +/- 20,2%

Während sich die initiale Delamination auf versilberten Aluminium- und Kupfer-Bodenplatten nur geringfügig voneinander unterscheiden, kommt es auf der vernickelten Aluminium-Bodenplatte bereits zu einer sehr starken Delamination im initialen Zustand. Somit beträgt die durchschnittliche Delamination im initialen Zustand bereits 33,7 %, was deutlich über dem kritischen Wert von 5 % liegt. Diese Beobachtung lässt sich auch nach 250, 521, 1000 und 1500 Zyklen beobachten. Es kommt zur weiteren Ablösung einzelner Condura®.ultra-Substrate, sodass am Ende des Langzeitzuverlässigkeitstest sich lediglich noch 1/5 der Substrate auf der Bodenplatte befinden. Die durchschnittliche Delamination erreicht zum Schluss somit einen Wert von 90,1 %. Auf den versilberten Oberflächen ist die Delamination deutlich geringer ausgeprägt. Nach 1500 Zyklen beträgt sie bei den versilberten Aluminium-Bodenplatten 4,97 %, was knapp unter dem Grenzwert von 5 % liegt. Bei den versilberten Kupferbodenplatten hingegen erreicht die Delamination am Ende lediglich 0,69 %, was einen ausgezeichneten Wert darstellt.

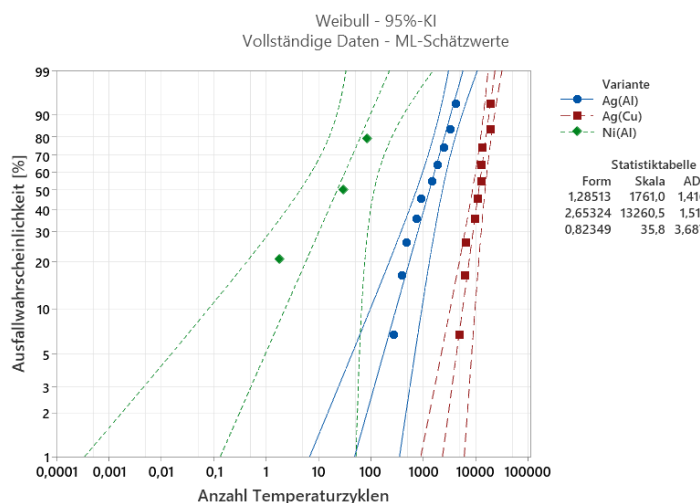


Bild 5: Bewertung der TCT-Lebensdauer (Ausfallwahrscheinlichkeit) für gesinterte AMB-Substrate auf verschiedenen Bodenplatten.

Im Zuge einer Weibull-Analyse der Lebensdauer, wobei ein Zyklus 40 Minuten entspricht, wurde für **Ni(Al)** eine charakteristische Lebensdauer von ca. 35 Temperaturzyklen bestimmt. Für **Ag(Al)** konnte eine charakteristische Lebensdauer von ca. 1800 Zyklen und für **Ag(Cu)** eine charakteristische Lebensdauer von ca. 13.000 Zyklen bestimmt werden.

3.1.2 Schliff-Ergebnisse

Initiale Schliffbilder vor Temperaturwechseltests

In **Bild 6** ist die Aufnahme der gesamten Sinterverbindung sowie die Nahaufnahme der Sinterschicht an zwei ausgewählten Stellen einer versilberten Kupfer-Bodenplatte gezeigt, welche jeweils mit unterschiedlichen Rahmen gekennzeichnet sind. Zu erkennen ist, dass im initialen Zustand eine sehr gute Anbindung der Paste sowohl an das AMB-Substrat als auch an die versilberte Kupferbodenplatte erfolgt ist – ohne sichtbare Risse oder Delaminationen.

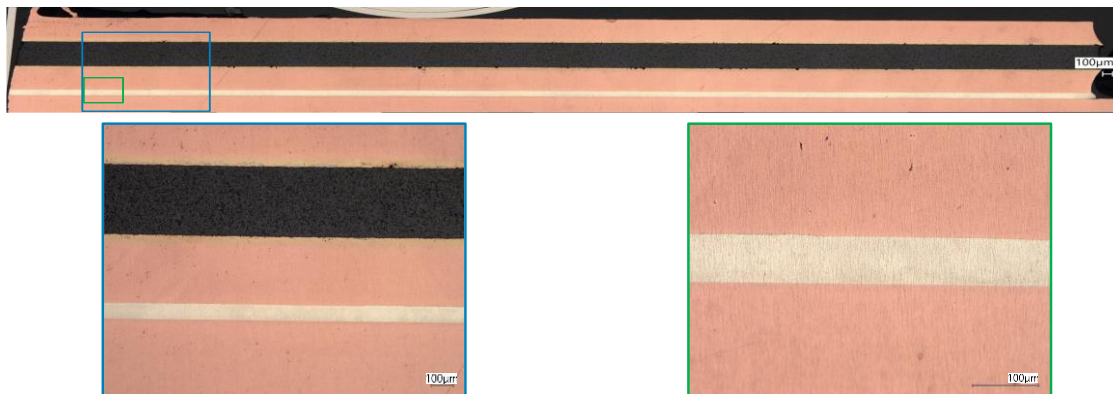


Bild 6: Sinterverbindung zwischen einer versilberten Kupfer-Bodenplatte und einem AMB-Substrat im initialen Zustand.

Bei der Betrachtung der Sinterverbindung zwischen den versilberten Aluminium-Bodenplatten und den AMB-Substraten im initialen Zustand (**Bild 7**) ist zu erkennen, dass auch auf den versilberten Aluminium-Bodenplatten die Sinterpaste mAgic® PE 360P eine sehr gute Anbindung besitzt. Die Sinterverbindung weist keinerlei Delamination und Risse auf.

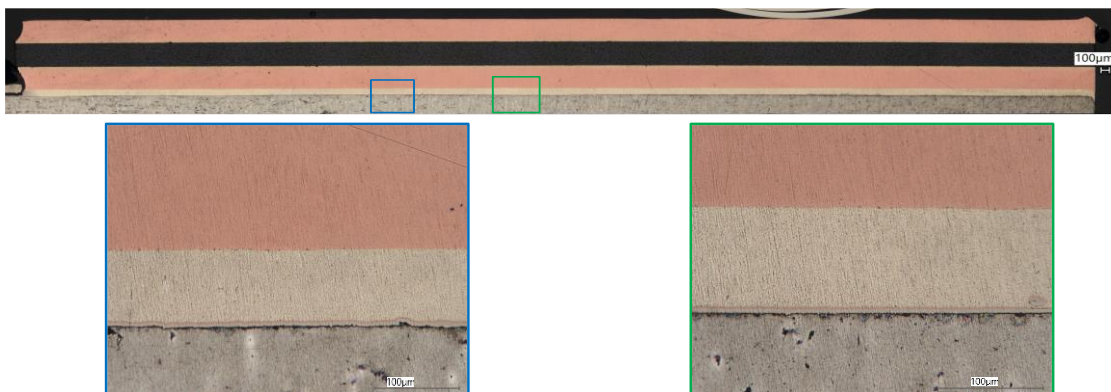


Bild 7: Sinterverbindung zwischen einer versilberten Aluminium-Bodenplatte und einem AMB-Substrat im initialen Zustand.

Bei der Betrachtung der Sinterverbindung zwischen der vernickelten Aluminium-Bodenplatte und dem AMB-Substrat (**Bild 8**) ist zu erkennen, dass die Anbindung der Sinterpaste auf der Bodenplatte an einzelnen Stellen unterschiedlich ausfällt. Der rechte Bereich zeigt eine gute Haftung der Sinterpaste auf der vernickelten Aluminium-Bodenplatte. Im Gegensatz dazu ist im linken Bereich bereits im initialen Zustand eine ausgeprägte Delamination erkennbar, was auf eine unzureichende Sinterqualität hindeutet.

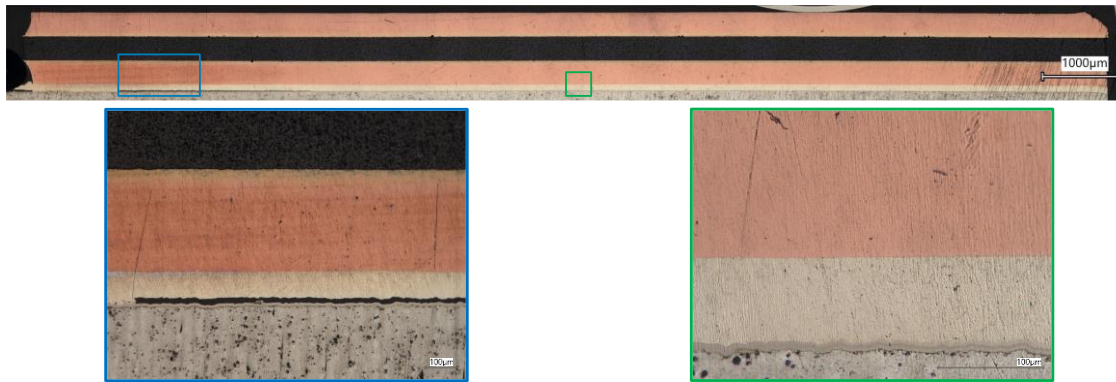


Bild 8: Sinterverbindung zwischen einer vernickelten Aluminium-Bodenplatte und einem AMB-Substrat im initialen Zustand.

Schliffbilder nach 1500 Temperaturwechselzyklen

Nach einer Dauer von 1500 Zyklen bei $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ besitzen die Sinterschichten zwischen der versilberten Kupfer-Bodenplatte bzw. der versilberten Aluminium-Bodenplatte und dem Condura®.ultra-Substrat weiterhin eine gute Anbindung, was auch durch Querschliffe belegt werden konnte. Allerdings konnte aufgrund der schlechten Haftung der gesinterten AMBs auf vernickelten Aluminium-Bodenplatte nach TCT-Alterung dort keine Querschliffe angefertigt werden.



Bild 9: Sinterverbindung zwischen einer versilberten Kupfer-Bodenplatte und einem AMB-Substrat nach 1500 Zyklen.

Auf der versilberten Kupfer-Bodenplatte ist im Querschliff kaum Verformungen ersichtlich (**Bild 9**). Allerdings sind Delamination und Rissbildung am Rand sichtbar.

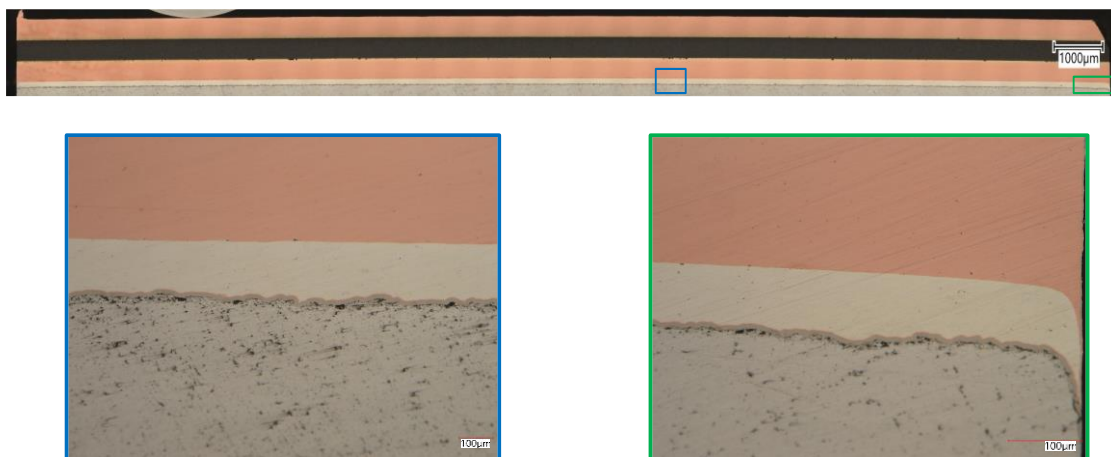


Bild 10: Sinterverbindung zwischen einer versilberten Aluminium-Bodenplatte und einem AMB-Substrat nach 1500 Zyklen.

Beim Condura®.ultra-Substrat und der versilberten Aluminium-Bodenplatte ist im Querschliff zu erkennen, dass es aufgrund des höheren CTE-Unterschieds zwischen AMB-Substrate und Aluminium zu einer deutlich sichtbaren Verformung des Aluminiums kommt (**Bild 10**).

3.2 Sinterergebnisse von AMBs auf Kupfer-beschichteten Aluminium-Bodenplatten

Nachdem die Haftung von gesinterten AMBs auf mit Nickel beschichteten Aluminium-Bodenplatten nicht ausreichend erfolgreich waren - insbesondere nach Temperaturwechseltests, konzentrieren sich die weiteren Arbeiten auf die Optimierung des Silbersinterns auf Aluminium-Bodenplatten mit zwei verschiedenen Varianten von kupferhaltigen Beschichtungen – im Folgenden bezeichnet als Typ 1 und Typ 2.

3.2.1 SAM-Ergebnisse nach TCT

Erste Ergebnisse von AMBs gesintert mittels mAgic® PE360P auf Kupfer-beschichteten Aluminium-Bodenplatten zeigen eine robuste AMB-Haftung und minimale Delamination (<5 %) auch nach 750 Temperaturzyklen (-55 °C/+150 °C, siehe **Bild 11**), vergleichbar mit der Delamination ähnlich versilberter Aluminium-Bodenplatten und im Gegensatz zu Nickel-beschichtete Aluminium-Bodenplatten (>80 %).

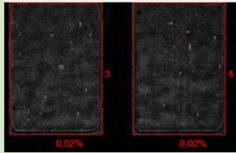
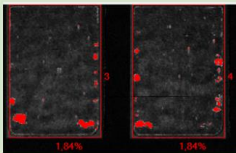
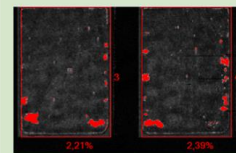
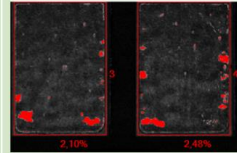
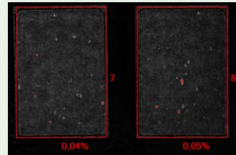
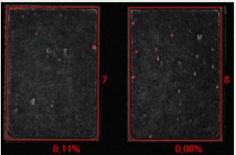
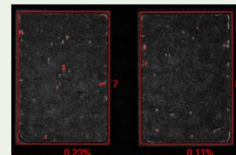
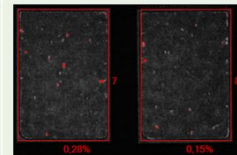
Name	Initial	250 cycles TCT	500 cycles TCT	750 cycles TCT
Cu (Al), Typ 1, #1.2.8				
Cu (Al), Typ 2, #1.4.10				

Bild 11: SAM-Analysen von gesinterten AMB-Substrate auf Kupfer-metallisierten Aluminium-Bodenplatten - initial und nach TCT.

Wie die dazugehörige statistische Betrachtung der SAM-Delaminations-Auswertung in **Tabelle 2** zeigt, gibt es bei den zwei Varianten von Kupferhaltige Beschichtungen geringe Unterschiede in der Delaminationsneigung. Die Einflüsse der Kupferpulver-Typen noch nicht genau verstanden sind, so dass dafür weiteren Untersuchungen notwendig sind.

Tabelle 2: SAM-Auswertung der LAS AMB-Aufbauten initial & nach TCT(Mittelwert / Standardabweichung)

Metallisierung & (Kern) der Bodenplatten	Kupferpulver-Beschichtung	Initial	250 Zyklen	500 Zyklen	750 Zyklen
Cu (Al)	Typ 1	0,08% +/- 0,06%	1,36% +/- 0,55%	1,67% +/- 0,68%	1,69% +/- 0,65%
Cu (Al)	Typ 2	0,05% +/- 0,02%	0,13% +/- 0,05%	0,15% +/- 0,05%	0,17% +/- 0,06%

4 Zusammenfassung und Ausblick

Es konnte gezeigt werden, dass großflächiges Drucksintern (LAS) von Metall-Keramik-Substraten mit der Ag-Paste mAgic® PE360P auch auf metallisierten Aluminium-Bodenplatten möglich ist. Nach 750 Zyklen bei Temperaturwechseltests von 55 °C bis +150 °C ist bei Kupfer-metallisierten Aluminium-Bodenplatten die Delamination von darauf Silber-gesinterten AMBs (<2 %) vergleichbar mit der Delamination von versilberten Aluminium-Bodenplatten (<4 %) und nur leicht schlechter als von versilberten Kupfer-Bodenplatten (<1 %).

Damit ist es nun möglich die LAS-Sinterpaste mAgic® PE360P für eine zuverlässige Anbindung von AMBs auf entsprechend Nichtedelmetall-metallisierte Aluminium-Bodenplatten als Ersatz für konventionelle Kupfer-Bodenplatten für den Aufbau von leistungsstarken SiC-Modulen zu verwenden. Durch diese Innovation können durch den Einsatz von Aluminium-Bodenplatten erheblichen Vorteile wie mögliche eine Gewichtsreduktion bis zu 70 % sowie Kosteneinsparungen von bis zu 91 % im Vergleich zu Kupfer-Bodenplatten nutzbar gemacht werden. Allerdings sind dabei die zusätzlichen Kosten für die entsprechende Nichtedelmetall-Beschichtung noch nicht berücksichtigt.

Aus diesem Grund werden dazu bis Juni 2027 weitere Untersuchungen im europäischen Verbundvorhaben FastLane fortgeführt, mit dem Ziel, die Zuverlässigkeit, Energie- und Kosteneffizienz sowie die Leistungsdichte von SiC-Leistungsmodulen im Rahmen der gesamten europäischen Wertschöpfungskette zu steigern. Die Beiträge von Heraeus sowie der anderen 28 FastLane-Partner ermöglichen so die Entwicklung von SiC-Leistungsmodul-Demonstratoren, die auf spezifische Endanwenderanwendungen in der E-Mobilität oder für Energiesysteme wie Elektrolyseure oder Batteriespeicher zugeschnitten sind. Gemeinsam zielen diese Bemühungen darauf ab, Europas führende Stellung in der nachhaltigen und hochleistungsfähiger Leistungselektronik weiter zu stärken.

Danksagung

Das Projekt FastLane wird gefördert von Chips Joint Undertaking (Chips JU) der Europäischen Union sowie ihrer Mitgliedsländer unter dem Förderkennzeichen #101139788 sowie zusätzlich unterstützt durch Deutschland, Frankreich, Österreich, Rumänien, Slowakei. In Deutschland ist das Projekt co-finanziert durch das Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (Förderkennzeichen #16MEE0415).

Schrifttum

- [1] A. Schwöbel, F. Ugolini, F. Belponer, A. Greci, „Large-Area Sintering for High-Performance Power Module Packaging“, Power Electronic News, 2024: <https://www.powerelectronicsnews.com/large-area-sintering-for-high-performance-power-module-packaging>, abgerufen am 11.12.2025
- [2] Heraeus Electronics, „mAgic® Drucksinterpasten für die Leistungselektronik“, <https://www.heraeus-electronics.com/de/products-and-solutions/sinter-materials/pressure-sinter-materials> , abgerufen am 11.12.2025