KoKo-Power

Gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung

Abschlussbericht

zum Teilvorhaben:

Thermomechanische Compliance von Hochleistungskühlern für FEV

im Verbundprojekt:

Korrosionskompatible Aufbau- und Verbindungstechnik für Antriebselektronik

-

KoKo-Power

Zuwendungsempfänger / Förderkennzeichen:

Fraunhofer Institut für Elektronische Nanosysteme (ENAS) / 16ME0372

Förderzeitraum:

01.05.2021 bis 30.04.2024

Berichtszeitraum:

01.05.2021 bis 30.04.2024

Ansprechpartner:
Anu Mathew, Susana Oliveira Richter-Trummer
Fraunhofer Institut für Elektronische Nanosysteme (ENAS)
Technologie-Campus 3
09126 Chemnitz
Tel. : +49 371 45001 627
Email : anu.mathew@enas.fraunhofer.de

Inhaltsverzeichnis

1 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse und andere wesentliche Ereignisse 3
1.1 Definition der Anforderungen für thermomechanische Compliance von Hochleistungskühlern für FEV 3
2 Ergebnisse 4
2.1 Finite Elemente Simulationen 4
2.1.1 Thermomechanische Simulation 5
2.1.2 Design of Experiment (DoE) - Untersuchung des Demonstrators auf Substratebene 7
2.1.3 Numerische Simulation am Demonstrator mit Temperaturwechseltest 9
2.2 Materialcharakterisierung 12
2.3 Thermomechanische Wechselbelastung 16
2.4 Zerstörende und zerstörungsfreie Fehleranalysen 17
2.4.1 Zerstörungsfreie Fehleranalyse 17
2.4.2 Zerstörende Fehleranalyse 20
3 Verwertung 22
4 Zusammenfassung und Ausblick 22
5 Veröffentlichungen 22
6 Literatur 22

1 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse und andere wesentliche Ereignisse

Im Rahmen des Projektes "KoKo-Power" (Kurzform für Korrosions-kompatible Antriebselektronik für elektrische Fahrzeuge und industrielle Leistungsmodule) wird die Erforschung korrosionsbeständiger Werkstoffe für den Einsatz im Automobilbereich vorgenommen. Leistungsstarke elektronische Antriebsmodule in Elektrofahrzeugen und industriellen Anwendungen wie medizinischen Großgeräten werden mit einem Glykol-Wasser-Gemisch gekühlt. Klassische Materialien in der Elektronik sind jedoch nicht ausreichend gegen Korrosion geschützt, um einem langjährigen Einsatz in einem Flüssigkeitskreislauf standzuhalten. Ein Elektromotor zum Beispiel ist ebenfalls wassergekühlt und besteht aus Aluminium. Würde man zur Kühlung des Antriebsmoduls das klassische Elektronikmaterial Kupfer verwenden, wäre das Aluminium des Elektromotors die Opferanode und würde durch wassergetriebene Bimetallkorrosion schnell zerstört werden. Dies würde unweigerlich zum Ausfall der kostenintensivsten Baugruppen (E-Maschine und Motorantrieb) führen.

Das Hauptziel des Projekts bestand darin, verschiedene Kühlkörpermaterialien zu untersuchen, mit denen die Probleme des Korrosionsversagens wirksam gelöst werden können. Aus diesem Grund wurden drei verschiedene Materialien wie Kupfer (Cu), Aluminium (Al) und Stahl für diese Untersuchungen in Betracht gezogen. Ein weiteres Ziel dieses Projekts war die Befestigung des Keramiksubstrats auf dem Kühlkörper durch gesintertes Silbermaterial. Darüber hinaus wurden die Möglichkeiten einer großflächigen Silbersinterung zwischen Kühlkörper und Substrat untersucht. Es wurden Demonstratoren auf der Basis von Cu-Kühlkörpern und Al-Kühlkörpern entwickelt, deren Zuverlässigkeit auf dem Automobilstand AQG 324 [1] untersucht wurde.

In diesem Projekt hat sich das Fraunhofer ENAS mit der Zuverlässigkeitsanalyse von Demonstratoren durch thermomechanische Simulation, passive Temperaturzyklustests, Materialcharakterisierung und Fehleranalyse beschäftigt. Die Ergebnisse der thermomechanischen Simulation haben gezeigt, dass der Demonstrator mit Stahlkühlkörper eine geringere zyklische äquivalente plastische Dehnung in der gesinterten Silberschicht aufweist als der Demonstrator mit Cu- und Al-Kühlkörper. Die numerische Simulation und das Experiment zeigten auch, dass der Demonstrator mit Cu-Kühlkörper weniger Dehnungsaufbau in der gesinterten Silberschicht und weniger Delamination als der Demonstrator mit Al-Kühlkörper aufweist. Die mikrostrukturelle Analyse des gesinterten Silbers ergab, dass die Porosität der Schicht vom Sinterdruck abhängt, d.h. je höher der Sinterdruck, desto geringer die Porosität.

1.1 Definition der Anforderungen für thermomechanische Compliance von Hochleistungskühlern für FEV

Die Analyse der Anforderungen an korrosionskompatible Antriebselektronik für elektrische Fahrzeuge und industrielle Leistungsmodule wurde in verschiedenen Arbeitspaketen durchgeführt. Im Rahmen dieses Projekt sind die Anforderungen für die thermomechanische Simulation, den Test und die Evaluierung von Monitorstrukturen definiert worden. Die nachfolgende Untersuchung der Fehlerphysik erfordert vier wesentliche Bestandteile:

1. Finite Elemente (FE) Simulationen
    - FE-Simulationen stellen eine wichtige Schnittstelle zwischen Experiment und Metamodellen dar und liefern Unterstützung bei der Entwicklung von Hypothesen zu den Ursachen von beobachteten lokalen Schädigungen durch Korrelation zum Experiment. Im Einzelnen:
        - FE-Simulation der PoF (Physics of Failure)

- FE- Design of Experiment Studie zur Untersuchung des Einflusses von Werkstoff- und Geometrieparametern auf die Lebensdauer des Leistungsmoduls
- FE-Simulationen relevanter Regionen des Demonstrators

2. Mikrostrukturanalysen
   - Diese Analysen dienen der Klärung der Ausfallursachen bei der beschleunigten Alterung und Unterscheidung zwischen einzelnen Fehlermechanismen wie Silber-Sinter-Degradation, Delamination usw. Dazu müssen der Ausgangszustand sowie beprobte Teile aus bestimmten Entnahmestufen untersucht werden.
3. Thermomechanische Wechselbelastung (TCT):
   - Hier sind beschleunigte Temperaturwechsel (TCT) am Demonstrator und unter Überlagerung mit äußerer mechanischer Last durchzuführen. Letztere kann erwartungsgemäß Fehlermechanismen weiter beschleunigen und stellt ggf. eine realitätsnahe Belastung des Produkts dar
4. Zerstörende und zerstörungsfreie Fehleranalysen:
   - Zur Bewertung der Delaminationszone in der gesinterten Silberschicht zwischen dem Kühlkörper und dem DCB (Direct Copper Bonding) -Substrat wurde eine zerstörungsfreie Fehleranalyse mit dem akustischen Rastermikroskop (SAM) durchgeführt. Die SAM-Ergebnisse werden mit den IR-Thermographieergebnissen verglichen, um den Materialverschleiß im Demonstrator zu bestätigen.

2 Ergebnisse

2.1 Finite Elemente Simulationen

Die Finite-Elemente-Analyse (FEA) wurde mit der FE-Software ABAQUS und der Software OptisLang durchgeführt. [2]. Das 3D-FE-Modell ist auf der Grundlage des Demonstrators modelliert worden. Eine Erhöhung der Effizienz der numerischen Berechnungen zu erhöhen, wurde für die numerische Simulation ein viertelsymmetrisches Modell gewählt. Abbildung 1a zeigt den Demonstrator und das dazugehörige Viertel-FE-Modell (Abbildung 1b) für die thermomechanische Analyse. Das FE-Modell wurde für verschiedene Kühlkörpermaterialien erstellt.

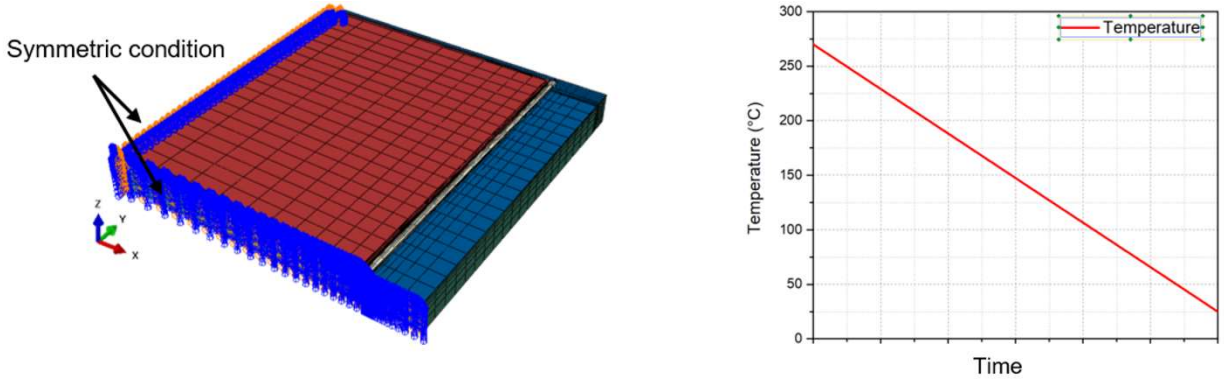
- Al- und Stahlkühlkörper mit genickelter Schicht
- Cu-Kühlkörper ohne genickelte Schicht
- Al_2O_3- and Si_3N_4-Substrat für alle Kühlkörper

(a) Demonstrator (b) FE-Modell

Abbildung 1: (a) Demonstrator (b) FE - 3D - Modell für die numerische Simulation

2.1.1 Thermomechanische Simulation

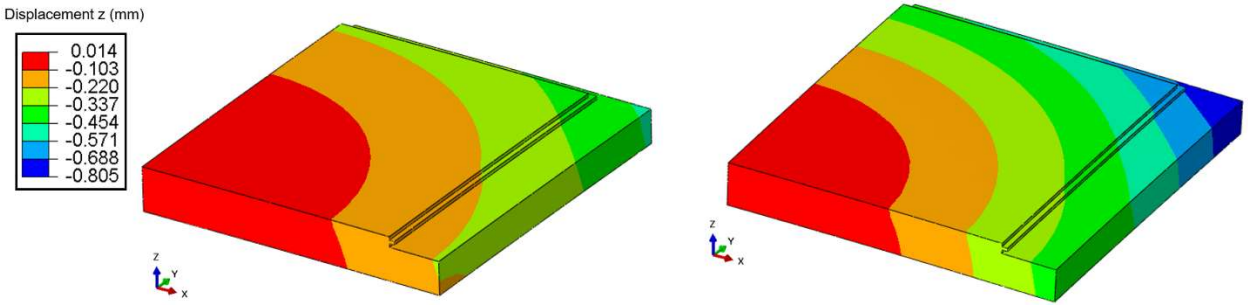
Die thermomechanische Simulation ist am Substrat des Demonstrators durchgeführt worden. Zunächst wurden das Sintertemperaturprofil und die entsprechenden mechanischen Verformungen am FE-Modell analysiert. Dem viertelsymmetrischen Modell werden während der numerischen Simulation Symmetrierandbedingen zugewiesen (Abbildung 2a). Abbildung 2b zeigt das Temperaturprofil, das für die thermomechanische Analyse verwendet wurde.



(a) Randbedingung (b) Temperaturprofil

Abbildung 2: (a) Randbedingung, (b) Temperaturprofil für die numerische Simulation

Die erste Analyse der Verformung des Demonstrators zeigt, dass der Demonstrator mit Si_3N_4-Keramik eine größere Verformung aufweist als der Demonstrator mit Al_2O_3-Keramik, was auf eine größere Differenz der thermischen Ausdehnungskoeffizienten (CTE) zwischen den Schichten zurückzuführen ist, wie aus Abbildung 3 ersichtlich ist.

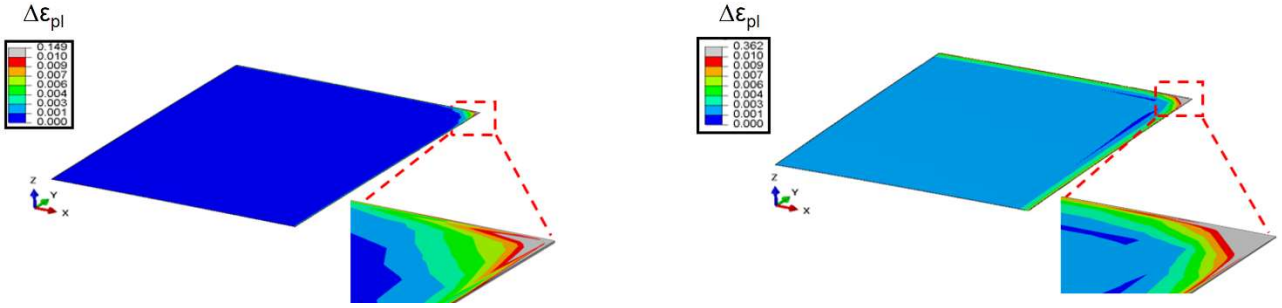


(a) Al_2O_3 (b) Si_3N_4

Abbildung 3: Out-of-plane-Verschiebungen der Al_2O_3- und Si_3N_4-Substrate mit Cu-Kühlkörper

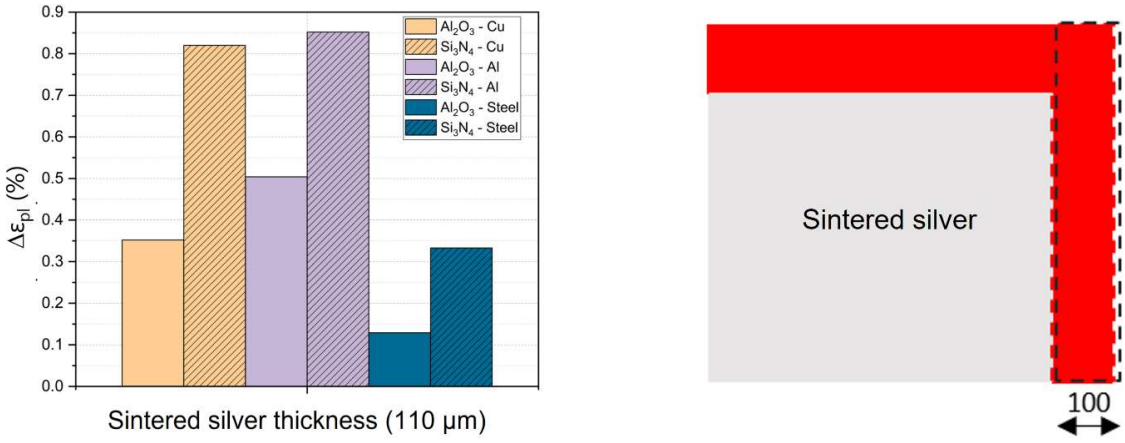
Die Ergebnisse der numerischen Simulation beziehen sich auf die physikbasierte Versagensanalyse, die zur Vorhersage des Versagens von Werkstoffen und Strukturen unter Anwendung physikalischer und ingenieurwissenschaftlicher Prinzipien eingesetzt wird. Diese Methode hilft bei der Analyse von Versagensmechanismen wie Ermüdung, Bruch oder Materialabbau. Bei der physikalischen Versagensanalyse spielen Werkstoffmechanik, Thermodynamik und Werkstoffkunde eine wichtige Rolle. In dieser Studie wird die zyklische äquivalente plastische Dehnung als Ausgangsparameter für die numerische Simulation betrachtet. Die plastische Dehnung gibt die bleibende Verformung an, die im Werkstoff bei zyklischer Beanspruchung auftritt. Daher wurde die zyklische äquivalente plastische Dehnung der gesinterten Silberschicht beobachtet, bei der eine Materialschädigung auftreten und zum Versagen des Systems führen kann.

Frühere Forschungen zu Sintersilberverbindungen haben gezeigt, dass bei passiven Temperaturzyklustests die Delaminierung des Sintersilbers an der äußeren Peripherie beginnt [3]. Die thermomechanische Simulation ergab, dass sich die höhere zyklische äquivalente plastische Dehnung im Eckbereich der gesinterten Silberschicht ansammelt, wo die Materialdegradation beginnen könnte (siehe Abbildung 4). Bei den Experimenten wurde beobachtet, dass sich die gesinterte Silberschicht von den Eckbereichen ablöst und sich in Richtung des mittleren Bereiches der gesinterten Schicht ausbreitet, was im folgenden Abschnitt erläutert wird. 2.3 und 2.4. Die konsolidierten Ergebnisse basierend auf der zyklischen plastischen Dehnung aller Kühlkörper verdeutlichen, dass das Si_3N_4-Substratmodell eine höhere zyklische plastische Dehnung aufweist als das Al_2O_3-Keramiksubstrat. Es konnte auch festgestellt werden, dass der Kühlkörper aus Stahl eine niedrigere zyklische äquivalente plastische Dehnung aufweist als die Kühlkörper aus Cu und Al, wie in der Abbildung 5 dargestellt ist.



(a) Al_2O_3 (b) Si_3N_4

Abbildung 4: Äquivalente plastische Dehnung (PEEQ) in der gesinterter Silberschicht für das Modell mit Al_2O_3- und Si_3N_4-Substrat auf Cu-Kühlkörper



(a) Äquivalente plastische Dehnung bei verschiedenen Modellen (b) Der bei den Untersuchungen betrachtete Bereich

Abbildung 5: Vergleich der konsolidierten Ergebnisse der verschiedenen Kombinationen des Modells mit unterschiedlichen Kühlkörpern und Substraten

2.1.2 Design of Experiment (DoE) - Untersuchung des Demonstrators auf Substratebene

Die DoE-Analyse wurde mit Hilfe der Software OptisLang durchgeführt. Diese Sensitivitätsstudie untersucht den Einfluss verschiedener Parameter wie Materialeigenschaften und geometrische Parameter, die einen großen Einfluss auf die Zuverlässigkeit des Demonstrators haben. Der Arbeitsablauf der Sensitivitätsanalyse ist in Abbildung 6 dargestellt. Während der Sensitivitätsanalyse werden verschiedene Materialeigenschaften und geometrische Parameter (siehe Tabelle 1) variiert und die entsprechende zyklische äquivalente plastische Dehnung als Ausgangsparameter beobachtet. Die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass die Materialeigenschaften und geometrischen Parameter einen größeren Einfluss auf die Akkumulation der zyklischen äquivalenten plastischen Dehnung in der gesinterten Silberschicht haben.

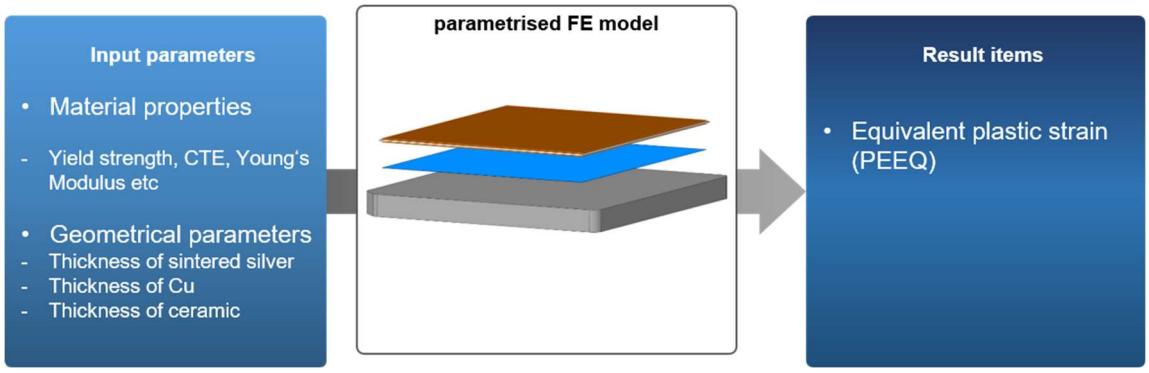


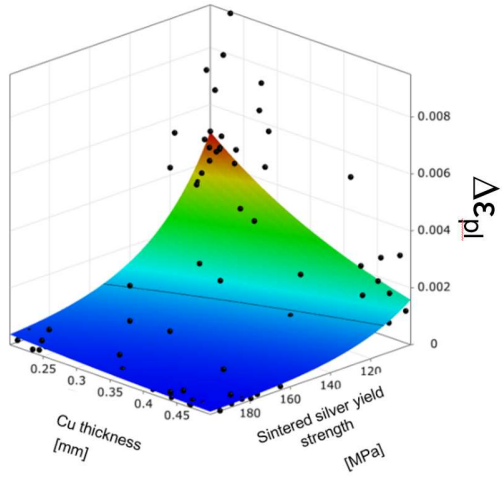
Abbildung 6: Arbeitsablauf bei der DoE-Studie

		Geometry		Material		
Layer	**Material**	**Thickness [µm]**	**CTE [1e-6 1/K]**	**Young's Modulus [MPa]**	**Yield Strength [MPa]**	**Tangent Modulus [MPa]**
Top copper layer	Cu-OFHC	200 – 500	15 – 19	118,000-138,000	80 – 300	1,000 – 10,000
Dielectric layer	Al2O3 SiN	200 – 400	6.8 2.5			
Bottom copper layer	Cu-OFHC	200 – 500	15 – 19	118,000-138,000	80 – 300	1,000 – 10,000
Sinter layer	Ag	25 – 100	17 – 20	50,000 – 70,000	100 - 200	1,000 – 10,000
Nickel layer	Ni	constant	12.5			
Heatsink plate	Aluminium Steel (1.4404) Copper	constant	20 - 26 14 - 18 15 - 19			

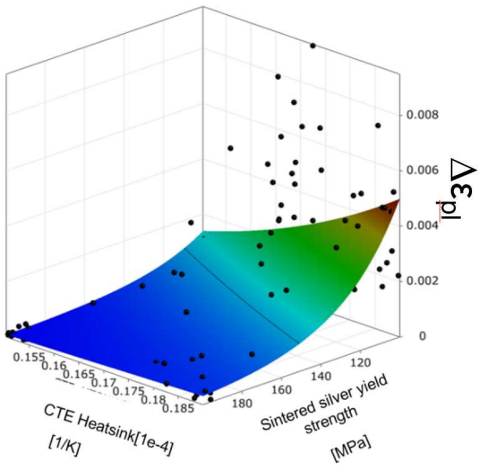
Tabelle 1: DoE-Studie basierend auf verschiedenen Material- und Geometrieparametern

Die Streckgrenze und der Tangentenmodul des gesinterten Silbers, sowie der CTE des Kühlkörpers sind die wichtigsten Materialeigenschaften, die die Dehnungsakkumulation beeinflussen. Die Dicke des Kup-

fers auf der Keramik als geometrischer Parameter hat ebenfalls einen größeren Einfluss auf die Dehnungsakkumulation. Eine gleichmäßige plastische Dehnung wurde in verschiedenen Bereichen der Sinter-Silberschicht beobachtet und es konnte geschlussfolgert werden, dass die Dehnungsakkumulation mit zunehmender Cu-Dicke auf der Keramik abnimmt und die Streckgrenze des Sinter-Silbers steigt. (siehe Abbildung 7a). Die Untersuchung zeigte auch, dass die plastische Dehnung mit abnehmendem CTE des Kühlkörpers und zunehmender Streckgrenze des gesinterten Silbers abnimmt (siehe Abbildung 7b).



(a) Dehnungsakkumulation auf der Grundlage der Cu-Dicke und der Streckgrenze des gesinterten Silbers



(b) Dehnungsakkumulation auf der Grundlage des CTEs des-Kühlkörpers und der Streckgrenze des gesinterten Silbers

Abbildung 7: Akkumulation der äquivalenten plastischen Dehnung ($\Delta\varepsilon_{pl}$) in einer gesinterten Silberschicht auf der Grundlage von Material- und geometrischen Eigenschaften

Tabelle 2 zeigt die konsolidierten Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse des Demonstrators auf der Basis von Cu, Al und Stahlkühlkörpern. Tabelle 2 verdeutlicht die wichtigsten Einflussparameter, die zu einer höheren plastischen Dehnungsakkumulation in der gesinterten Silberschicht führen. Beim Demonstrator mit Kupferkühlkörper hat die Streckgrenze der gesinterten Silberschicht einen größeren Einfluss auf die zyklische äquivalente plastische Dehnung in der gesinterten Silberschicht und zwar mehr als 40 %. Die gelbe Markierung zeigt einen Einflussfaktor zwischen 30% und 40%, die blaue Markierung einen Einflussfaktor zwischen 20% und 30% und die grüne Markierung einen Einflussfaktor von weniger als 20% an.

Parameters	Cu - Kühlkörper		Al - Kühlkörper		Steel - Kühlkörper	
	Al_2O_3	Si_3N_4	Al_2O_3	Si_3N_4	Al_2O_3	Si_3N_4
Sintered silver – yield strength	×	×	×	×	×	×
Sintered silver – tangent modulus	×	×	×	×	×	×
CTE - Heatsink	×	×	×	×	×	×
Cu - thickness	×	×	×	×	×	×

× > 40%
× < 40% > 30%
× < 30% > 20%
× < 20 %

Tabelle 2: Einflussparameter für die Akkumulation äquivalenter plastischer Dehnungen

2.1.3 Numerische Simulation am Demonstrator mit Temperaturwechseltest

Passive Temperaturwechselprüfungen werden durch numerische Simulation und Experimente an Proben durchgeführt. Bei der Untersuchung sind verschiedene Proben mit unterschiedlichen Dicken der gesinterten Silberschicht genutzt worden. Der für die thermomechanische FE-Analyse verwendete Temperaturbereich liegt zwischen -40°C und 125°C. Während des passiven Temperaturzyklustests wird zunächst eine spannungsfreie Temperatur von 270°C berücksichtigt. Die Simulationen wurden an Proben mit Al- und Cu-Kühlkörpern mit Al_2O_3- und Si_3N_4-Substraten durchgeführt. Im Rahmen dieser Untersuchung werden reale Proben nur für Al und Cu Kühlkörper mit Si_3N_4 entwickelt. In dieser Analyse wurde die Coffin-Manson-Gleichung (1) zur Abschätzung der Lebensdauer verwendet [4], wobei die äquivalente plastische Dehnung die Hauptkomponente für die Vorhersage der Lebensdauer ist und aus der numerischen Simulation bestimmt wird. Bei der thermomechanischen Simulation sind zwei thermische Zyklen berechnet worden. Es konnte festgestellt werden, dass nach zwei thermischen Zyklen eine Sättigung der äquivalenten plastischen Dehnung eintritt, wie aus Abbildung 8 ersichtlich ist. Eine DoE erfolgte auch auf der Basis eines passiven Temperaturzyklustests für einen Demonstrator mit Al- und Cu-Kühlkörper (siehe dazu Tabelle 3). Die Coffin-Manson-Koeffizienten für die Lebensdauerabschätzung wurden aus einem vorangegangenen Sinter-Projekt übernommen, welche auf einem aktiven Leistungszyklus-Test basiert [1]. Diese Parameter sollten mit dem aktuellen Probensatz und seinen Testbedingungen optimiert werden. C_1 und C_2 sind die Coffin-Manson-Koeffizienten.

$$N_f = C_1 * (\Delta\varepsilon_{pl})^{-C_2} \quad (1)$$

Layer	Material	Dicke
Interconnect (53 mm x 63 mm)	Sintered Ag	25, 50, 110, 200, 400, 800 [µm]
Substrate	Al_2O_3 and Si_3N_4	0.3 and 0.25 [mm]
Kühlkörper (60 mm x 65 mm)	Al and Cu	1, 3, 6 [mm]

Tabelle 3: DoE-Studie auf der Grundlage eines passiven Temperaturzyklus-Tests

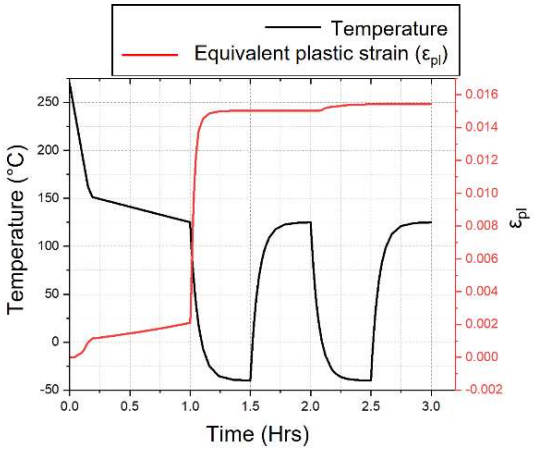


Abbildung 8: Passives Temperaturprofil und äquivalente plastische Dehnung in der gesinterten Silberschicht

Die Verschiebung aus der Ebene wurde auf Si_3N_4-Substraten mit einem Al-Kühlkörper mit einer gesinterten Silberschicht von 110 µm Dicke bei einer Delta-Temperatur von 165 K untersucht. Die thermome-

chanische Analyse zeigt, dass die Verformung des gesamten Moduls für alle in der Abbildung 9 gezeigten Kombinationen von Al-Kühlkörpern in konkaver Richtung verläuft. Die Verformung des gesamten Modells entlang seiner Diagonale ist in der Abbildung 9b dargestellt. Es wurde beobachtet, dass die Verformung aus der Ebene mit zunehmender Dicke der Kühlkörper abnimmt, was durch die Biegesteifigkeit erklärt werden kann. Dies deutet darauf hin, dass ein dickerer Kühlkörper eine höhere Biegesteifigkeit aufweist, was aus der geringeren Verformung des Modells mit dem dickeren Kühlkörper geschlussfolgert werden kann (Abbildung 9b).

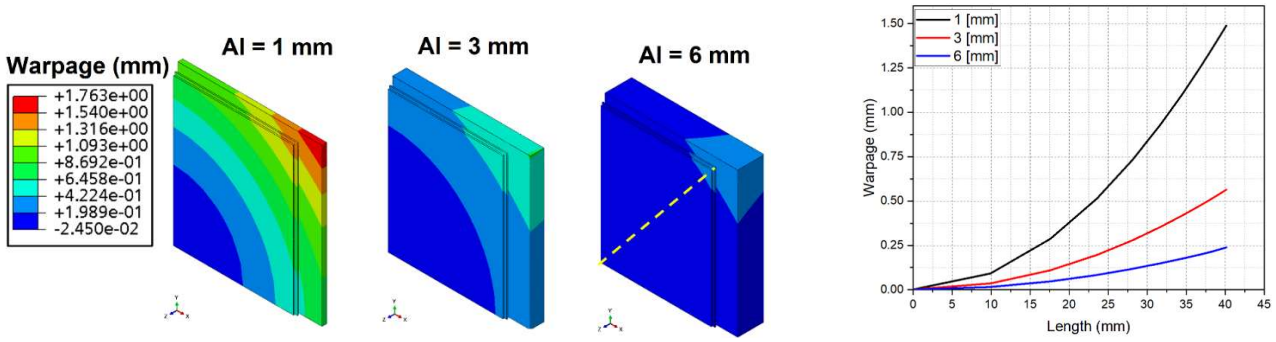


Abbildung 9: (a) Verschiebung auf Si_3N_4-Substraten mit Al-Kühlkörper für verschiedene Kühlkörperdicken. (b) Verformung über die Diagonale des Substrats

Die zyklische äquivalente plastische Dehnungsakkumulation in der gesinterten Silberschicht ist in der numerischen Simulation beobachtet worden, wobei festgestellt werden konnte, dass eine höhere Dehnungsakkumulation an der äußeren Peripherie der gesinterten Schicht bei allen in Abbildung 10 dargestellten Modellen auftritt. Zu beobachten war, dass mit zunehmender Dicke des Kühlkörpers auch die Akkumulation der zyklischen äquivalenten plastischen Dehnung im gesinterten Silber zunimmt. Das Modul mit einem dickeren Kühlkörper weist eine geringere Verformung auf, was zu einer höheren Schubspannung im gesinterten Silber führt. Die höhere Schubspannung führt zu einer höheren Dehnungsakkumulation in der Sinterschicht und verursacht eine Materialschädigung in den Eckbereichen. Bei dünneren Kühlkörpern verformt sich das Modul aufgrund der geringeren Biegesteifigkeit stärker, was zu Zugspannungen in der gesinterten Silberschicht führt. Die Zugspannungsverteilung auf dem Modul bewirkt eine geringere Dehnungsakkumulation in der gesinterten Silberschicht. Die Akkumulation plastischer Dehnungen in der gesinterten Silberschicht deutet darauf hin, dass die Delamination der gesinterten Silberschicht wahrscheinlich von den Eckbereichen zur Mitte der gesinterten Schicht hin fortschreitet. Der rote Pfeil in Abbildung 10 zeigt die Tendenz zur Delamination in der gesinterten Silberschicht. Eine ähnliche Untersuchung wurde auch an Proben mit einem Cu-Kühlkörper durchgeführt, wobei ein ähnlicher Trend wie beim Modul mit Al-Kühlkörper beobachtet wurde.

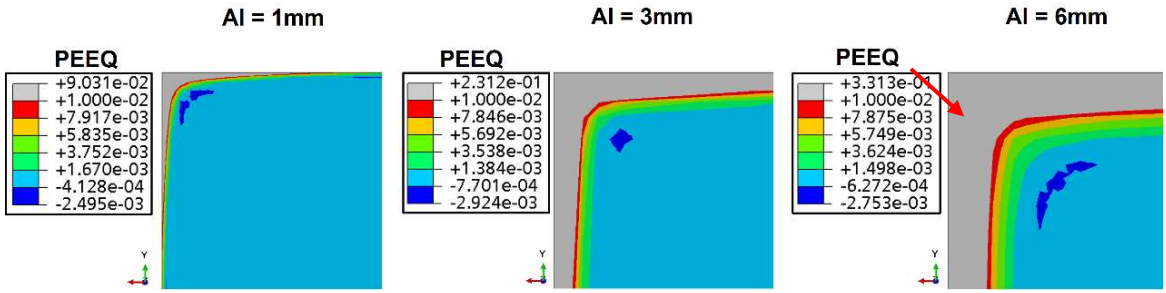
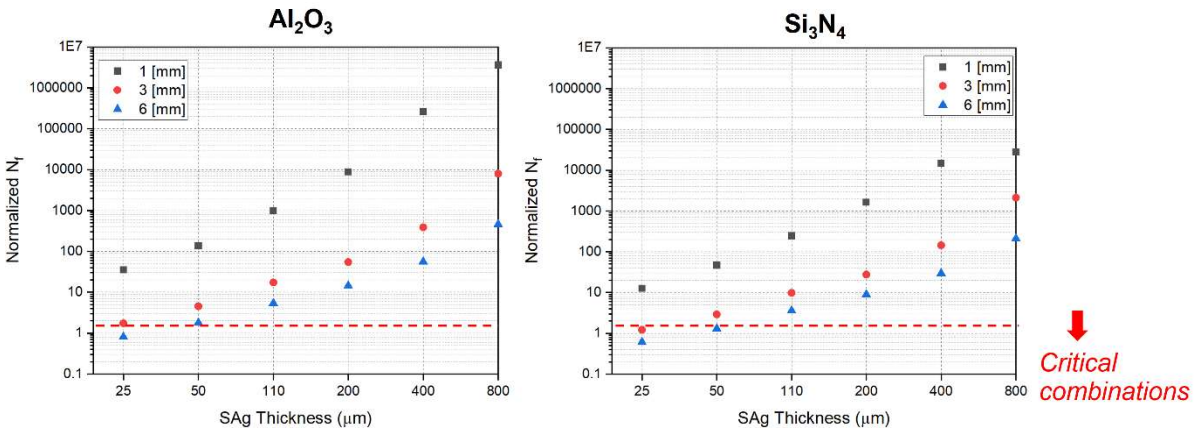
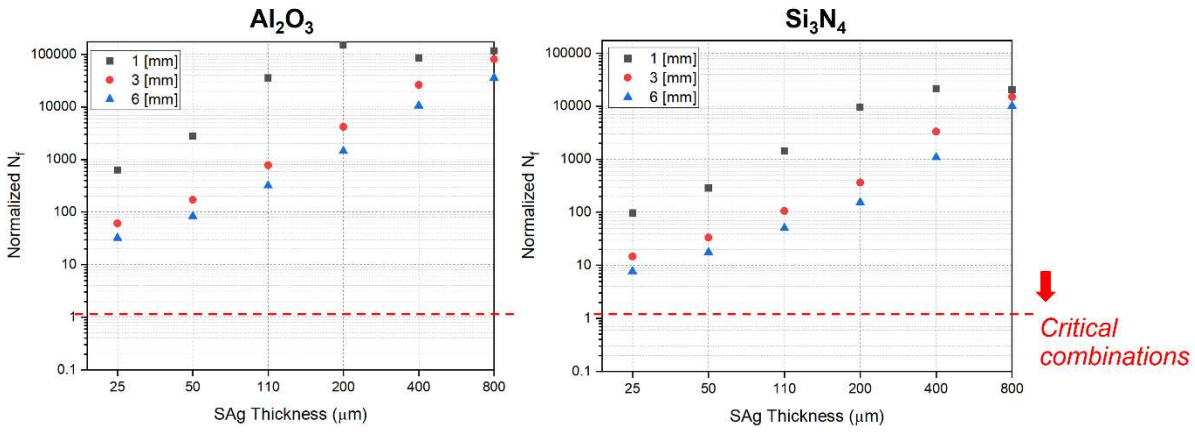


Abbildung 10: Äquivalente plastische Dehnung (PEEQ) auf gesinterter Silberschicht für das Modell mit Si_3N_4-Substrat auf Al-Kühlkörper

Die konsolidierten Ergebnisse für alle Kombinationen von Kühlkörpern (Cu und Al) mit verschiedenen Substraten (Al_2O_3 und Si_3N_4) sind in Abbildung 11 dargestellt. Die Abschätzung der Lebensdauer der Module erfolgt auf der Grundlage des Coffin-Manson-Gesetzes, wobei die zyklische äquivalente plastische Dehnung aus der numerischen Simulation extrahiert wird. Während dieser Untersuchung wurde festgestellt, dass das Al_2O_3-Substrat eine höhere Lebensdauer als das Si_3N_4-Substrat aufweist. Es wurde auch ersichtlich, dass die Lebensdauer mit zunehmender Dicke des gesinterten Silbers zunimmt. Diese Untersuchung lässt den Schluss zu, dass die Dicke des Kühlkörpers ebenfalls einen Einfluss auf die Lebensdauer des Moduls hat. Diese Untersuchung gibt Aufschluss über die Beziehung zwischen der Dicke des Kühlkörpers und der Dicke der gesinterten Silberschicht und der Lebensdauer des Leistungsmoduls. Wenn ein Prozessingenieur eine höhere Kühlkörperdicke verwenden möchte, dann sollte eine höhere Sintersilberdicke für eine höhere Lebensdauer des Moduls in Betracht gezogen werden. Kritische Kombinationen von Designparametern werden für Si_3N_4-Substrate mit Al-Kühlkörpern beobachtet (Abbildung 11a), während für Cu-Kühlkörper keine kritischen Kombinationen beobachtet werden (Abbildung 11b). Die kritische Kombination ist in der Grafik als rote Linie dargestellt. Die Skala des Diagramms ist auf der y-Achse auf 1 = 1000 Zyklen normiert. Daher haben Module mit Cu-Kühlkörpern eine höhere Lebensdauer als Al-Kühlkörper.



(a)



(b)

Abbildung 11: Vergleich der konsolidierten Ergebnisse der verschiedenen Kombinationen des Modells mit unterschiedlichen Kühlkörpern und Substraten. (a) Substrate auf Al-Kühlkörpern. (b) Substrate auf Cu-Kühlkörpern.

2.2 Materialcharakterisierung

Es erfolgte eine Analyse der Mikrostruktur von Silbersinterproben, die mit unterschiedlichem Drücken hergestellt wurden. Der Einfluss des Sinterdrucks auf die Porosität, die Korngröße und die Kornorientierung wurde in Abhängigkeit vom Sinterdruck untersucht. Die Proben sind von zwei Projektpartnern (FH Kiel und Nano-Join GmbH) zur Verfügung gestellt worden.

Für die Herstellung der Querschliffe wurden zwei Methoden genutzt: Focused Ion Beam (FIB) und ein Dreifach-Ionenstrahl-Ätzsystem. Abbildung 12 a) zeigt einen Querschnitt, der mit dem FIB und Abbildung 12 b) einen Querschnitt, der mit dem Ionenstrahl-System erzeugt wurde. Da die letztgenannte Methode die Präparation einer großen Fläche in kürzerer Zeit ermöglicht, wurde sie als Methode der Wahl für die Herstellung der Querschliffe ausgewählt.

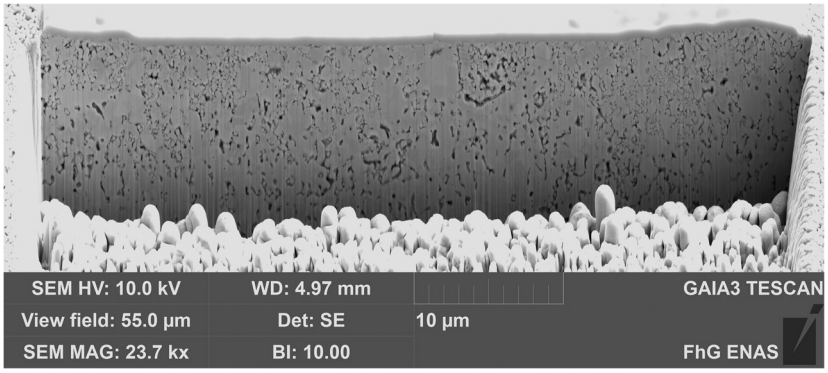
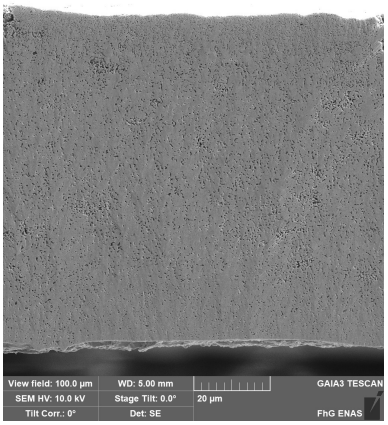


Abbildung 12: (a) Querschnitt einer Probe hergestellt mit FIB



(b) Querschnitt einer Probe hergestellt mit einem Ionenstrahl-System

2.2.1 Porosität

Die 2D-Porosität wurde durch eine bildgebende Analyse bestimmt, bei der Bilder des Probenquerschnitts mit einem Rasterelektronenmikroskop (REM) aufgenommen wurden. Das erhaltene Bild wurde in ein Schwarzweißbild umgewandelt, wobei die schwarzen Pixel den Poren entsprechen. Die Porosität ist als Quotient aus der Anzahl der schwarzen Pixel und der Gesamtzahl der Pixel berechnet worden. Abbildung 13 zeigt das angewandte Verfahren.

Die 3D-Porosität wurde ebenfalls mit der FIB-Tomographie bestimmt. Dazu wurden nacheinander verschiedene Querschnitte mit dem FIB erstellt und nach jedem Querschnitt die verbleibende Oberfläche abgebildet. Die Bilder sind dann in einer Bildbearbeitungssoftware analysiert, ein 3D-Modell der Probe erstellt und die Porosität berechnet worden Abbildung 14 zeigt die 3D-Darstellung der Probenporosität. Da diese Methode sehr zeitaufwendig ist, ist nur eine Probe verwendet worden, um die Unterschiede zwischen einer 2D- und einer 3D-Analyse zu verstehen. Für die gleiche Probe ergab die 2D-Analyse eine Porosität von 7,3 %. Aus der 3D Analyse resultierte eine Porosität zwischen 6.3% und 7.2% abhängig von den verwendeten Thresholdwerten. Da die Unterschiede zwischen der 2D- und der 3D-Porosität relativ gering sind, wurde entschieden, die 2D-Methode zu verwenden, um die Porosität in den übrigen Proben zu bestimmen.

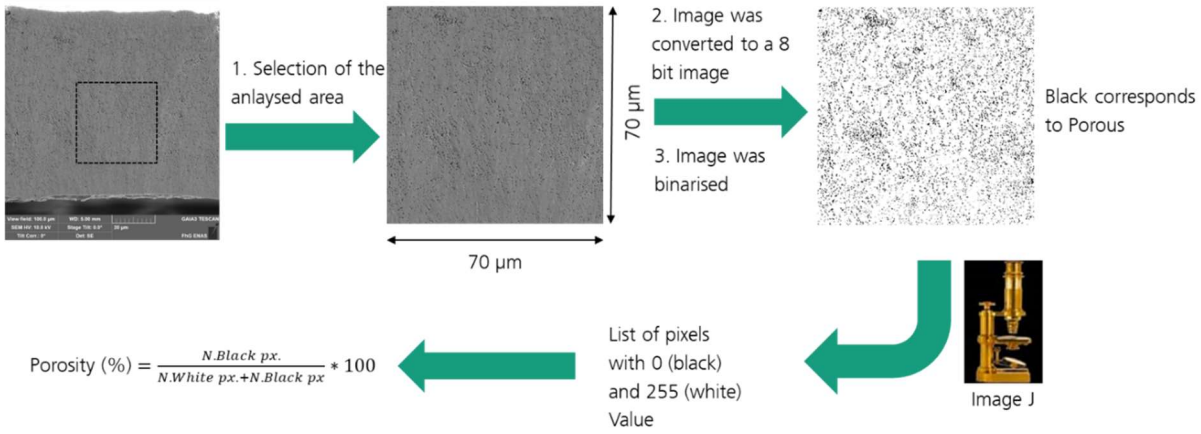


Abbildung 13: 2D Methode zur Bestimmung der Porosität.

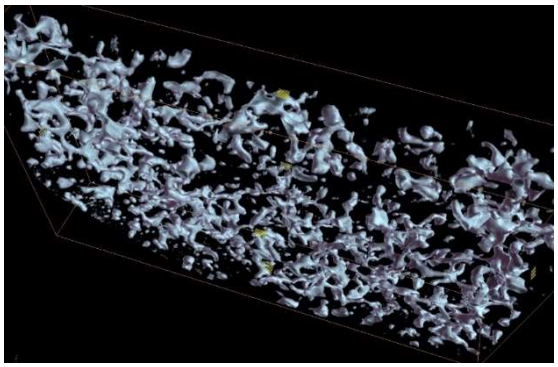


Abbildung 14: 3D-Darstellung der Probenporosität.

Im Rahmen des Projektes sind verschiedene gesinterte Silber-Proben unter Variation des Drucks (5MPa, 10 MPa, 15 MPa, 20 MPa) hergestellt worden. Für jeden Sinterdruck wurden drei Proben analysiert, wobei die Analyse jeder Probe in fünf verschiedenen Regionen erfolgte. Die 2D-Porosität wurde mittels der in Abbildung 13 beschriebenen Methode bestimmt und ist in Abbildung 15 dargestellt. Die Resultate der Porositätsanalyse legen nahe, dass mit steigendem Sinterdruck eine Verringerung der Porosität einhergeht. Zudem lässt sich eine Zunahme der Porositätsabweichung bei geringem Druck beobachten.

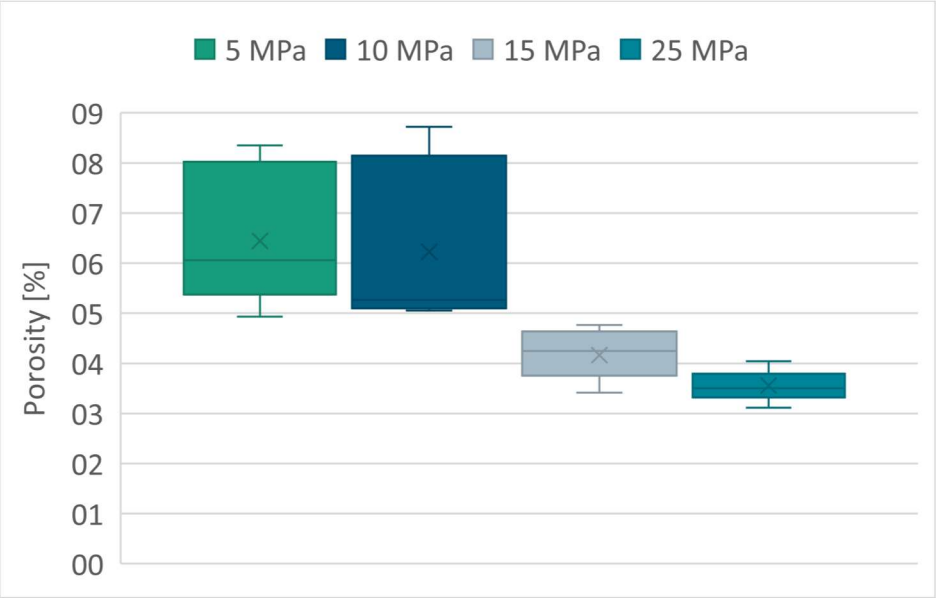


Abbildung 15: Porosität der gesinterten Silberproben in Abhängigkeit vom Sinterdruck.

2.2.2. Kristallstruktur

Um den Einfluss des Sinterdrucks auf die Kristallstruktur der Proben zu untersuchen, wurden Elektronenrückstreubeugungsmessungen (EBSD) durchgeführt. Alle untersuchten Proben zeigen keine bevorzugte Kornorientierung (keine Textur), d.h. die Kornorientierung wird durch den Sinterdruck nicht beeinflusst. In Abbildung 16 sind die inversen Pol-Figuren einer Probe in X- und Y-Richtung dargestellt, die bei einem Druck von 5 MPa gesintert wurde.

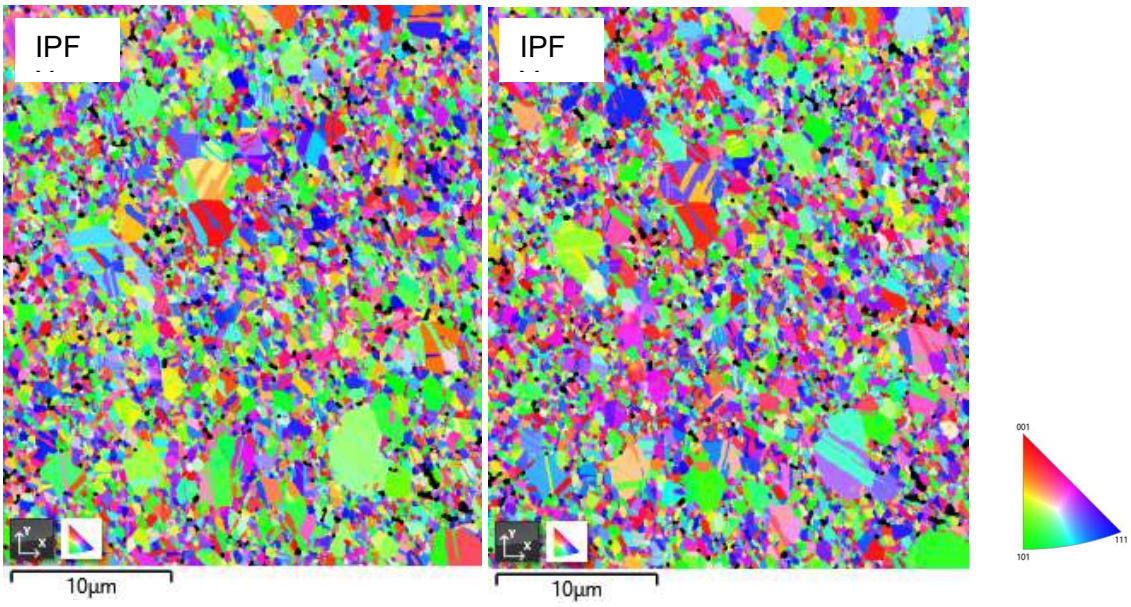


Abbildung 16: Inverse Pol-Figur einer Probe in X- und Y-Richtung, die bei einem Druck von 5 MPa gesintert wurde

Hinsichtlich der Korngröße wurde festgestellt, dass die Proben inhomogene Korngrößen aufwiesen (große und kleine Körner waren vorhanden), wie aus Abbildung 17 ersichtlich ist. Des Weiteren konnte beobachtet werden, dass die Körner bei steigendem Druck eine Verringerung ihrer Größe aufwiesen.

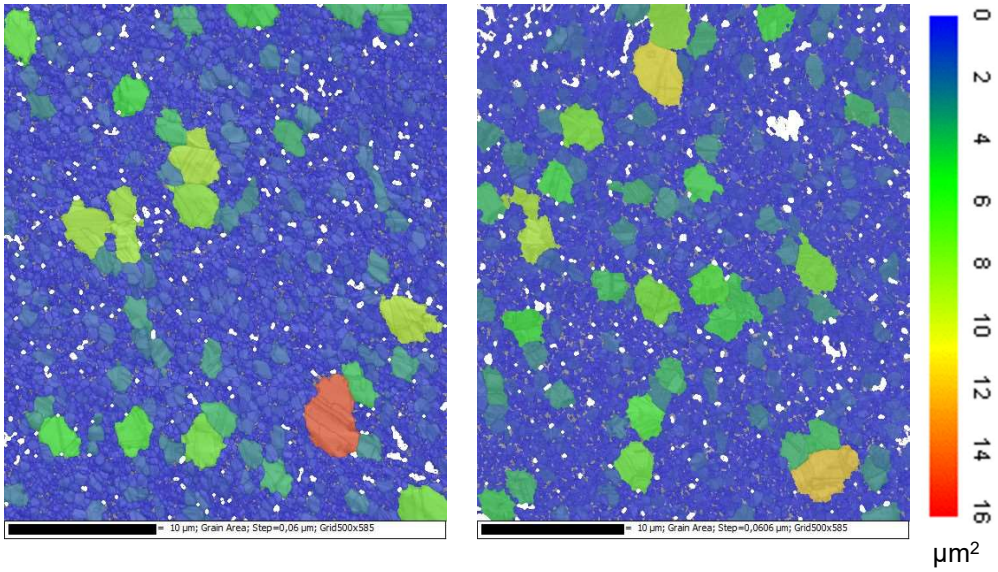


Abbildung 17: Inverse Pol-Figur einer Probe in X- und Y-Richtung, die bei einem Druck von 5 MPa gesintert wurde

Bezüglich der Kornfehlorientierung konnte festgestellt werden, dass die Proben unabhängig vom Druck eine identische Verteilung der Kornfehlorientierung aufwiesen (Abbildung 18). In allen untersuchten Proben konnten unabhängig vom Druck drei Peaks beobachtet werden, die eine Orientierung von 1,5°, 39,5° und 60° aufwiesen. Die Fehlausrichtung von 60° entspricht einer Sigma 3 Korngrenze, während 39,5° einer Sigma 9 Korngrenze entspricht. Bei Betrachtung der 3 Peaks fällt auf, dass der Anteil der Sigma 3 Korngrenze mit steigendem Sinterdruck leicht abnimmt (Abbildung 18). Für die Sigma 9 Grenzen wurde kein Trend festgestellt.

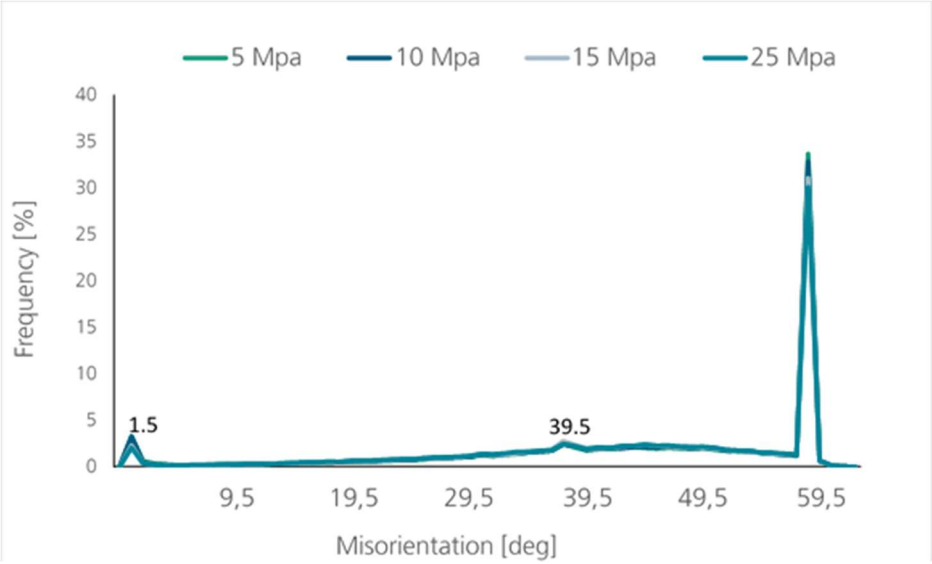


Abbildung 18: Missorientierungen der Korngrenzen

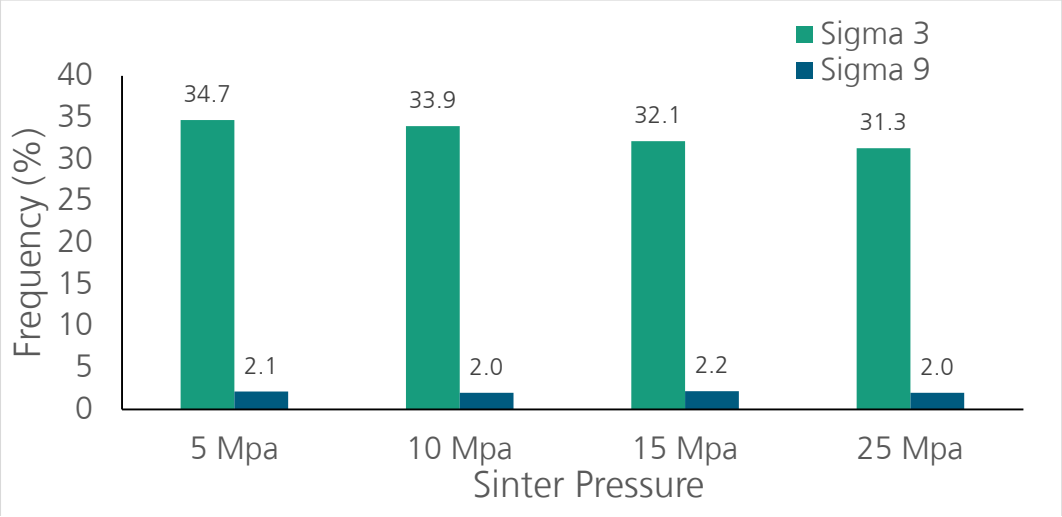
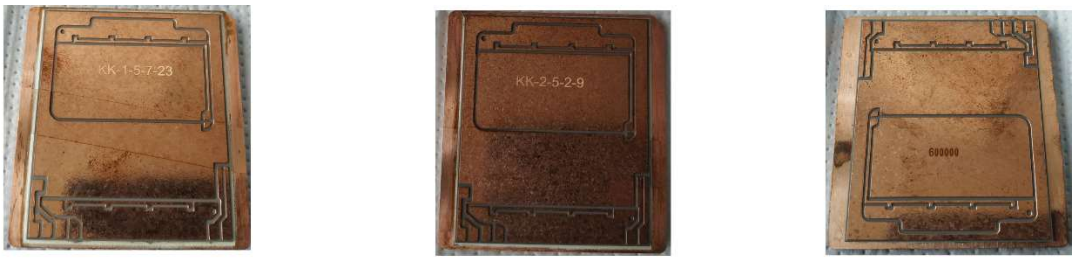


Abbildung 12: Häufigkeit der Korngrenzen Sigma 3 und Sigma 9 in Abhängigkeit vom Sinterdruck

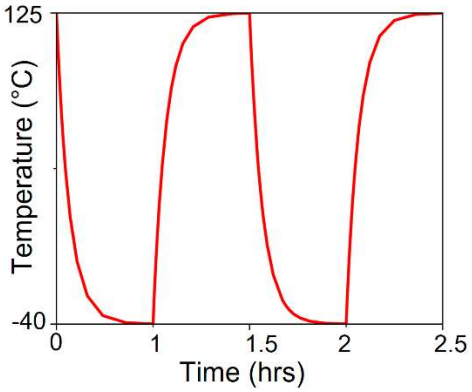
2.3 Thermomechanische Wechselbelastung

Von den Projektpartners entwickelte Proben wurden zur Prüfung an das ENAS geliefert. Sie bestanden aus gesinterten Silbermodulen mit unterschiedlichen Dicken (100 µm, 200 µm) und aus gelöteten Proben (250 µm), wie in der Abbildung 12a dargestellt wird. Die Dicke der gesinterten Silberschicht ist im nassen Zustand vor dem Sintern gemessen worden. Die Schichtdicke des gesinterten Silbers beträgt 20 bzw. 65 µm und 150µm bei gelöteten Proben. An diesen Proben sind thermische Wechselbelastungstest mit einem Temperaturprofil von -40 °C / 125° C bis zu 1000 Zyklen durchgeführt worden (siehe Abbildung 12c). Die Delamination der gesinterten Silberschicht wurde mit dem akustischen Rastermikroskop (SAM) gemessen, was bereits im Abschnitt 2.4 beschrieben wurde.



(a)

(b)



(c)

Abbildung 20: (a) Proben für die Prüfung. (b) Thermoschock-Prüfkammer. (c) Temperaturprofil

2.4 Zerstörende und zerstörungsfreie Fehleranalysen

Die Fehleranalyse an dem Proben ist mit dem akustischen Rastermikroskop (SAM) [5] und mittels REM anhand von Querschnitten durchgeführt worden. Die Proben wurden mit zwei verschiedenen Sinterdrücken hergestellt, d.h. mit 25 MPa und 12,5 MPa auf einem Cu-Kühlkörper aufgebracht.

2.4.1 Zerstörungsfreie Fehleranalyse

Die Analyse mit dem SAM ist an den Proben im Ausgangszustand und nach einem Intervall von 200 Zyklen durchgeführt worden. Bei den gesinterten Silberproben wurde im Ausgangszustand keine Delamination beobachtet, während bei den gelöteten Proben im Ausgangszustand eine höhere Porosität festgestellt wurde. Nach 200 thermischen Zyklen ist festgestellt worden, dass die Delamination der gesinterten Silberschicht in den Eckbereichen begonnen hatte und sich zur Mitte der gesinterten Silberschicht hin ausbreitete. Die Delaminationsfläche wurde mit der Bildverarbeitungssoftware ImageJ [6] abgeschätzt und die entsprechenden Delaminationsflächen der Proben analysiert. Die gelöteten Proben wiesen Delaminationen auf, wobei die Porosität einen größeren Einfluss auf die Delaminationsergebnisse hatte. Abbildung 13 zeigt die Delaminationsanalyse von gesinterten und gelöteten Silberproben mit unterschiedlichen Dicken der gesinterten Silberpaste im feuchten Zustand nach bis zu 1000 Zyklen. Die rote Farbe in den Abbildungen zeigt den Bereich, in dem die Delamination aufgetreten ist. Es wurde festgestellt, dass die Delamination mit zunehmender Anzahl von Temperaturzyklen zunimmt. Im Rahmen dieser Untersuchung sind 8 -Proben mit 100µm feuchter Sinterpaste einem thermischen Zyklus unterzogen und es ist festgestellt worden, dass 5 Proben eine geringere Delamination (<10% der Fläche) aufwiesen, während die anderen Proben eine größere Delamination von mehr als 10% der Fläche zeigten. Die geringere und die größere Delamination der gesinterten Silberschicht sind in Abbildung 13a und Abbildung 13b dargestellt. Es wurde auch festgestellt, dass bei den gelöteten Proben die Länge der Poren in der gelöteten Schicht mit der Anzahl der Temperaturzyklen zunimmt (siehe Abbildung 13b). Die experimentellen Ergebnisse weisen eine gute Übereinstimmung mit der numerischen Simulation auf, d.h. die Delamination tritt an der äußeren Peripherie auf, wo die zyklische äquivalente plastische Dehnung am größten ist, wie die numerische Simulation in Abschnitt 2.1.3 zeigt.

Initial / Final	Initial state	200 cycles	400 cycles	600 cycles	800 cycles	1000 cycles
Sintered silver: 100 µm / 20 µm	0.63	1.23	1.86	2.74	2.90	4.35
Sintered silver: 200 µm / 65 µm	0.25	0.45	1.35	2.25	2.33	2.56
Sintered silver: 300 µm / ~100 µm	0.04	0.77	1.22	1.48	1.94	2.69
Solder(SAC): 250 µm / 200 µm	7.66	11.44	12.88	14.21	16.03	17.57

(a) Proben mit geringerer Delamination (%) in gesinterten und gelöteten Modulen mit unterschiedlichem Dicken (µm)

Initial / Final	Initial state	200 cycles	400 cycles	600 cycles	800 cycles	1000 cycles
Sintered silver: 100 µm / 20 µm	0.56	2.60	5.99	7.33	7.53	12.67
Sintered silver: 200 µm / 65 µm	0.0	2.58	6.80	8.63	9.09	12.86
Sintered silver: 300 µm / ~100 µm	0.07	2.05	3.51	6.09	10.31	13.31
Solder(SAC): 250 µm / 200 µm	7.75	13.35	15.56	16.55	18.85	20.88

(b) Proben mit stärkerer Delamination (%) in gesinterten und gelöteten Modulen unterschiedlicher Dicke (µm)

Abbildung 13: Gesinterte Silberproben mit einem Sinterdruck von 25 MPa und gelötete Proben auf einem Kupferkühlkörper und deren Delaminationsbereich in Prozent. (a) Proben mit weniger Delamination. (b) Proben mit stärkerer Delamination.

Die Proben, die mit einem niedrigen Sinterdruck (12,5 MPa) gesintert wurden, wiesen eine höhere Delamination auf als die Proben, die mit einem höheren Sinterdruck (25 MPa) gesintert wurden, wie in Abbildung 14 zu sehen ist. Somit ist auch der Sinterdruck ein Einflussparameter für die Zuverlässigkeit der aus Silber gesinterten Leistungsmodule. Es ist auch festgestellt worden, dass die Proben mit niedrigerem

Sinterdruck eine höhere Porosität aufweisen als die Proben mit höherem Sinterdruck, wie im vorherigen Abschnitt erwähnt. Diese höhere Porosität führt zu einer größeren Delamination in der gesinterten Silberschicht der Proben, die mit niedrigerem Sinterdruck bearbeitet wurden.

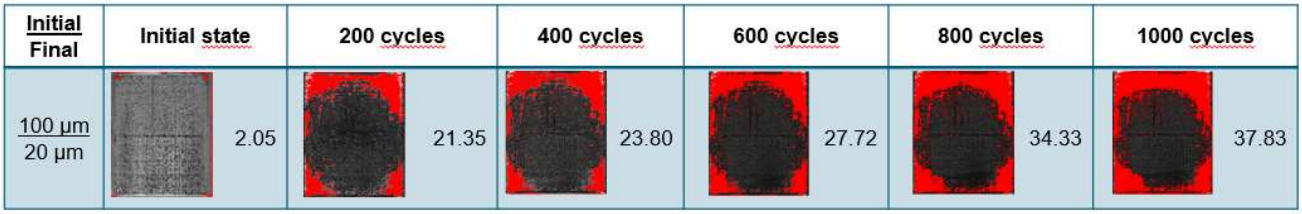


Abbildung 14: Gesinterte Silberproben mit einem Sinterdruck von 12,5 MPa auf einem Kupferkühlkörper und die Fläche der Delamination in Prozent.

Die Delamination von gesinterten und gelöteten Proben ist in Abbildung 15 ersichtlich. Aus dem Diagramm geht hervor, dass die gesinterten Proben, die mit einem Sinterdruck von 25 MPa hergestellt wurden, eine kleinere Delaminationsfläche aufweisen als die gelöteten Proben, die mit einem niedrigeren Sinterdruck hergestellt wurden. Bei gelöteten Proben sind im Ausgangszustand größere Porositäten zu beobachten, die zu einem Porositätswachstum und schließlich zur Materialzersetzung führen.

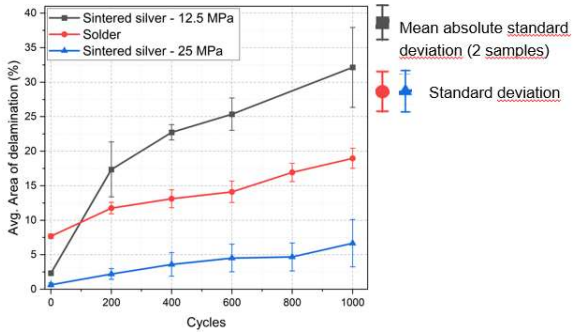


Abbildung 15: Vergleich der mittleren Delaminationsfläche von gesinterten und gelöteten Proben

Die SAM-Analyse wurde auch an Al-Kühlkörperproben mit unterschiedlichen Dicken der gesinterten Silberschicht im feuchten Zustand (100 µm und 200 µm) durchgeführt. Es ist festgestellt worden, dass die Delamination der gesinterten Silberschicht, die an den Ecken der gesinterten Schicht beginnt und sich mit den Temperaturzyklen zur Mitte hin ausbreitet, zunimmt (siehe Abbildung 16). Für die Proben mit Al-Kühlkörper ist eine Prozessoptimierung erforderlich, um die Delamination der gesinterten Silberschicht zu reduzieren.

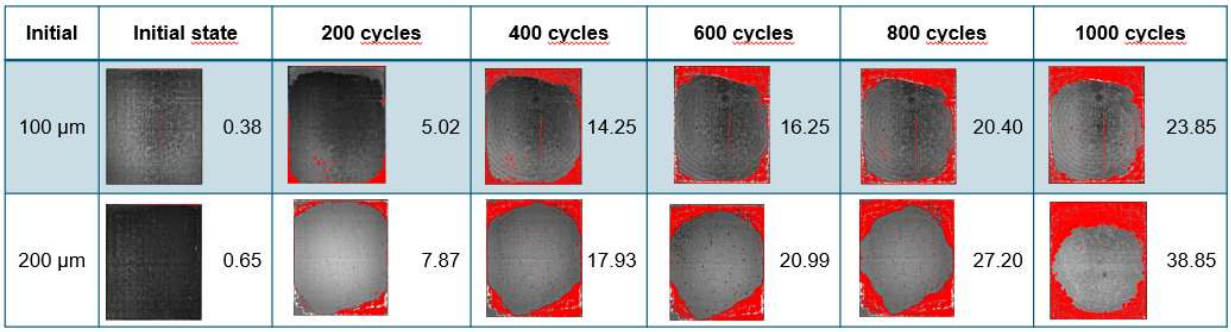
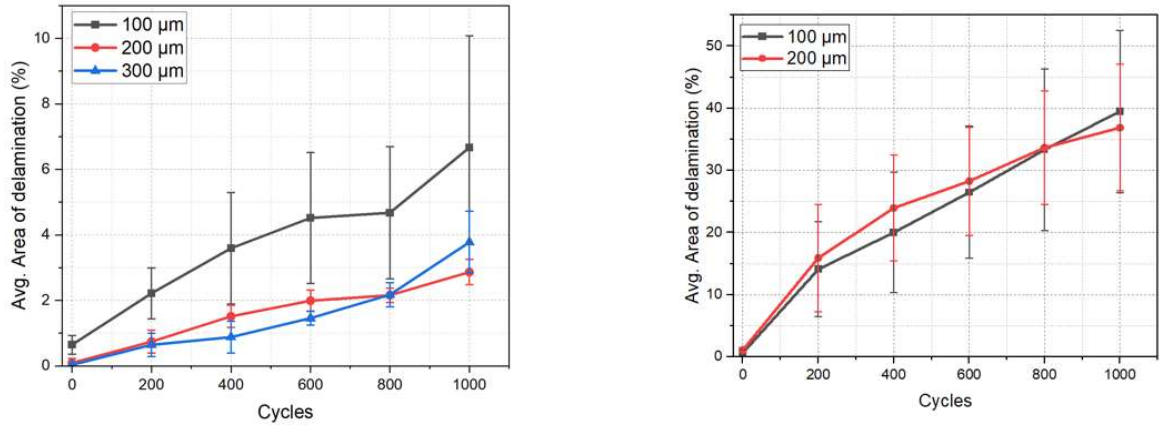


Abbildung 16: Gesinterte Silberproben mit einem Sinterdruck von 25 MPa auf Al-Kühlkörpern und deren Delamination in Prozent.

Ein Vergleich der Delaminationsanalyse von Modulen mit Cu-Kühlkörpern und Al-Kühlkörpern wurde im Rahmen dieser Untersuchung erfolgreich durchgeführt und ist in Abbildung 17a bzw Abbildung 17b dargestellt. Für den Vergleich ist die durchschnittliche Delaminationsfläche betrachtet worden. Es hat sich herausgestellt, dass Proben mit Cu-Kühlkörpern eine geringere Delamination aufweisen als Proben mit Al-Kühlkörpern. Für den Vergleich werden unterschiedliche Maßstäbe verwendet, da die durchschnittliche Delaminationsfläche bei Al-Kühlkörpern zehnmal größer ist als bei Cu-Kühlkörpern.

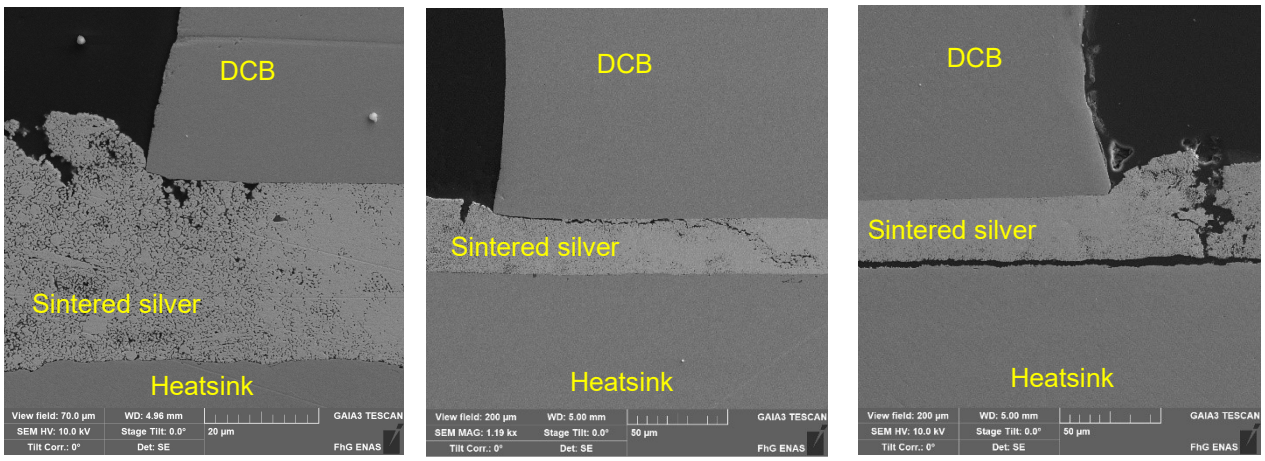


(a) Cu kühlkörper (b) Al kühlkörper

Abbildung 17: Vergleich der mittleren Delaminationsfläche von Cu- und Al-Kühlkörperproben

2.4.2 Zerstörende Fehleranalyse

In Ergänzung zur zerstörungsfreien Fehleranalyse wurden Querschliffe angefertigt, um die Proben nach einer vorgegebenen Anzahl von Zyklen (0, 400 und 1000) im REM zu analysieren. Diese Methode wurde bei Proben mit einer Sinterschicht von ca. 100 µm angewandt. Es ist zu beachten, dass aufgrund der Probengröße nur ein kleiner Teil der Proben im REM untersucht worden ist. Für den Querschliff wurde immer ein Teil der Probenecke entnommen. Die Abbildung 18 präsentiert REM-Aufnahmen, welche nach einer unterschiedlichen Anzahl von Zyklen erstellt wurden. Es ist zu erkennen, dass die Probe an den Ecken eine höhere Porosität aufweist.



(a) vor TCT (b) nach 400 Zykeln (c) nach 1000 Zykeln

Abbildung 18: REM Aufnahmen von gesinterten Proben nach verschiedener Anzahl von Zyklen.

Die Abbildung 18b zeigt eine REM-Aufnahme der Probe nach 400 Zyklen. Es lässt sich beobachten, dass die Delamination an der Schnittstelle zwischen DCB-Cu und gesintertem Silber zu einer Rissausbreitung innerhalb des gesinterten Silbers führt, welche sich in Richtung Kühlkörper bewegt. Bevor der Riss die Grenzfläche mit dem Cu-Kühlkörper erreicht, ändert er seine Richtung und beginnt, sich seitlich auszubreiten. Die Abbildung 18c zeigt eine REM-Aufnahme einer Probe nach 1000 Zyklen. Hier ist eine Delamination zwischen dem Kühlkörper und dem gesinterten Silber zu erkennen.

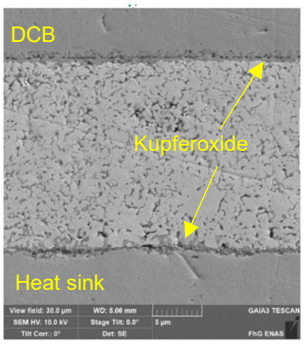
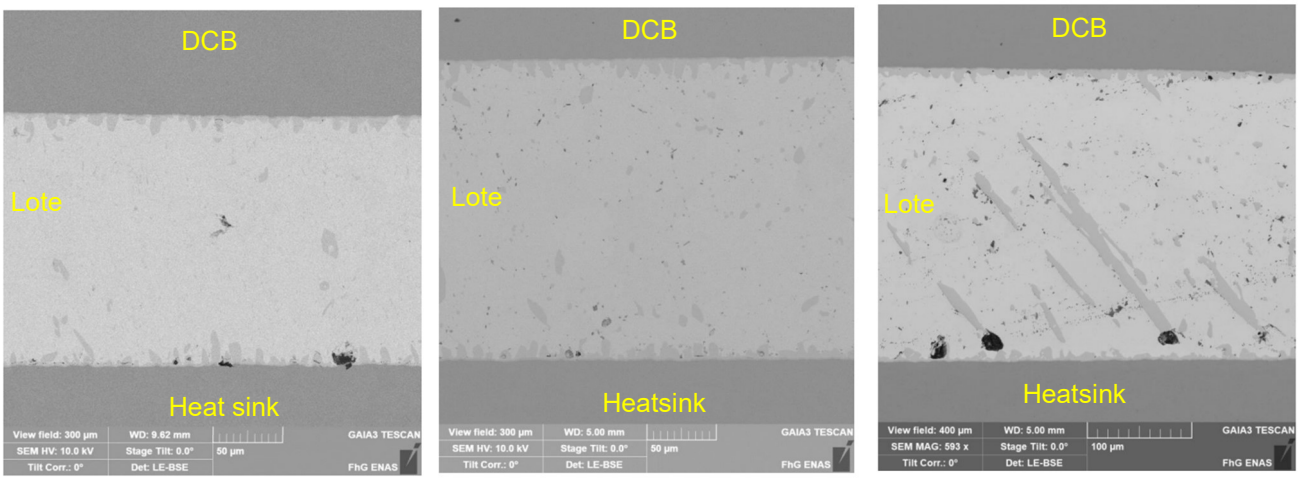


Abbildung 19: REM-Aufnahme nach 1000 Zyklen zur Darstellung der Kupferoxid-Schicht.

Außerdem ist eine Schicht zwischen dem Cu-DCB und dem gesinterten Silber sowie zwischen dem gesinterten Silber und dem Cu-Kühlkörper zu sehen (Abbildung 19). Die EDX-Analyse hat bestätigt, dass es sich um eine Kupferoxidschicht handelt. Die Dicke dieser Schicht variiert stark über der Probe.

Des Weiteren wurden auch Proben untersucht, bei denen Lote als Verbindungswerkstoff verwendet wurden. Die Abbildung 20 präsentiert REM-Aufnahmen, welche nach unterschiedlicher Anzahl von Zyklen erstellt wurden. Es lässt sich beobachten, dass sich unterschiedliche intermetallische Phasen gebildet haben und alle Proben große Voids aufweisen. Nach 1000 Zyklen (Abbildung 20c) kann festgestellt werden, dass die intermetallischen Phasen am Zentrum der Lot-Verbindung gewachsen sind und eine Needle-Form entwickelt haben. Des Weiteren ist die Bildung kleiner Poren in der Lot-Verbindung nach 1.000 Zyklen zu erkennen.



(a) vor TCT (b) nach 400 Zykeln (c) nach1000 Zykeln

Abbildung 20: REM Aufnahmen von geloteten Proben nach verschieden Anzahl von Zyklen

3 Verwertung

In dieser Studie führte das Fraunhofer ENAS eine physikalisch basierte Zuverlässigkeitsanalyse von gesinterten Silbermodulen mit Hilfe von numerischen Simulationen und Experimenten durch. Dabei wurden die Schlüsselparameter identifiziert, die die Zuverlässigkeit des Moduls beeinflussen. Die im Rahmen des Projekts durchgeführte Sensitivitätsanalyse zeigte, welche geometrischen Faktoren bei der Produktentwicklung, insbesondere in der Automobilindustrie, berücksichtigt werden müssen. Darüber hinaus zeigten die Simulationsergebnisse, dass Stahlkühlkörper im Vergleich zu Aluminium- und Kupferkühlkörpern eine höhere Zuverlässigkeit aufweisen.

Die Entwicklung des Demonstrators sowie die gewonnenen Erkenntnisse und Präsentationen auf Messen (PCIM, Productronica, Nafems, Metallographie-Tagung) und Konferenzen haben zu einem Anstieg von Anfragen potenzieller Kunden aus dem Bereich der Leistungselektronik geführt. Darüber hinaus können die Ergebnisse genutzt werden, um Ausfallmechanismen in Leistungsmodulen zu untersuchen und ein Lebensdauermodell für gesinterte Silbermodule zu entwickeln.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Hohe Leistungsdichten und elektronische Antriebsmodule in Elektrofahrzeugen und industriellen Anwendungen erfordern effiziente Flüssigkeitskühllösungen. Um eine kostengünstige und langfristig zuverlässige Produktion zu erreichen, sind neue Materialien, Strukturierungstechniken und Montageprozesse entscheidend. Diese wurden im Rahmen des Projekts KoKo-Power untersucht, zu dem das Fraunhofer ENAS mit thermomechanischen Zuverlässigkeitsanalysen von Leistungsmodulen mittels numerischer Simulationen und Experimenten beigetragen hat. Diese Arbeiten beinhalteten eine Sensitivitätsanalyse verschiedener geometrischer und materieller Parameter, die die Zuverlässigkeit der Leistungsmodule beeinflussen. Die Ergebnisse der Materialcharakterisierung und der Fehleranalyse zeigten, dass die Zuverlässigkeit der Leistungsmodule vom Sinterprozess abhängt. Darüber hinaus ist in zukünftigen Projekten die Untersuchung des Risswachstums und der Rissausbreitung in der gesinterten Silberschicht des Leistungsmoduls geplant.

5 Veröffentlichungen

1. T. Petzold, R. Eisele, M. Bast, A. Hindel, B. Lorbeer, K. Gripp, S. Panahandeh, C. Grosse-Kockert, D. May, M. Abo Ras, A. Mathew, S. Richter-Trummer, R. Eichhorn, S. Rzepka, Corrosion-Compatible Drive Electronics for Electric Vehicles and Industrial Power Modules, PCIM Europe 2024 (Internationale Fachmesse und Konferenz für Leistungselektronik, Intelligente Antriebstechnik, Erneuerbare Energie und Energiemanagement), Nürnberg, 11.-13.06.2024
2. A.Mathew et.al “Assessment of Reliability Issues in a Microelectronics Device by a Simulation-driven Sensitivity Study” Nafems world congress 2023.
3. Richter-Trummer, S. (V)[1]; Eichhorn, R.[1]; Mathew, A.[1] “Metallographic preparation of very thin sintered layers ” 58th . Metallographie-Tagung - Materialographie 2024

6 Literatur

[1] AQG, ECPE Guideline. "324—Qualification of Power Modules for Use in Power Electronics Converter Units in Motor Vehicles." ECPE European Center for Power Electronics eV: Nürnberg, Germany (2021).

[2] SIMULIA (ABAQUS) Manuals (V. 62.6), Dassault Systemes Simula Corp., Providence, RI, USA, 2023

[3] Mathew *et al.*, "Lifetime modelling of sintered silver interconnected power devices by FEM and experiment," *2021 22nd International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE)*, St. Julian, Malta, 2021, pp. 1-9, doi: 10.1109/EuroSimE52062.2021.9410877.

[4] Dornic, Nausicaa, et al. "Stress-based model for lifetime estimation of bond wire contacts using power cycling tests and finite-element modeling." IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics 7.3 (2019): 1659-1667.
[5] PVA TePla Scanning Acoustic Microscopy, "https://www.pvatepla-sam.com/produkte/sam-premium-line/," PVA TePla SAM, 11 10 2023. [Online]. Available: https://www.pvatepla-sam.com/produkte/sam-premium-line/. [Accessed 11 10 2023].
[6] https://imagej.net/ij/docs/guide/user-guide.pdf

Förderkennzeichen 16ME0372

KoKo-Power

Zusammenfassung

zum Teilvorhaben des Fraunhofer ENAS

Korrosionskompatible Aufbau- und Verbindungstechnik für Antriebselektronik

Im BMBF-Verbundprojekt **KoKo-Power**

Im Rahmen des Projektes "KoKo-Power" (Kurzform für Korrosions-kompatible Antriebselektronik für elektrische Fahrzeuge und industrielle Leistungsmodule) wird die Erforschung korrosionsbeständiger Werkstoffe für den Einsatz im Automobilbereich vorgenommen. Leistungsstarke elektronische Antriebsmodule in Elektrofahrzeugen und industriellen Anwendungen wie medizinischen Großgeräten werden mit einem Glykol-Wasser-Gemisch gekühlt. Klassische Materialien in der Elektronik sind jedoch nicht ausreichend gegen Korrosion geschützt, um einem langjährigen Einsatz in einem Flüssigkeitskreislauf standzuhalten. Ein Elektromotor zum Beispiel ist ebenfalls wassergekühlt und besteht aus Aluminium. Würde zur Kühlung des Antriebsmoduls das klassische Elektronikmaterial Kupfer verwenden werden, dann wäre das Aluminium des Elektromotors die Opferanode und eine schnelle Zerstörung durch wassergetriebene Bimetallkorrosion die Folge. Dies würde unweigerlich zum Ausfall der kostenintensivsten Baugruppen (E-Maschine und Motorantrieb) führen.

Das Hauptziel des Projekts bestand darin, verschiedene Kühlkörpermaterialien zu untersuchen, mit denen die Probleme des Korrosionsversagens wirksam gelöst werden können. Aus diesem Grund wurden drei verschiedene Materialien, Kupfer (Cu), Aluminium (Al) und Stahl, für diese Untersuchungen in Betracht gezogen. Ein weiteres Ziel dieses Projekts war die Befestigung des Keramiksubstrats auf dem Kühlkörper durch gesintertes Silbermaterial. Darüber hinaus wurden die Möglichkeiten einer großflächigen Silbersinterung zwischen Kühlkörper und Substrat untersucht. Es wurden Demonstratoren auf der Basis von Cu-Kühlkörpern und Al-Kühlkörpern entwickelt, deren Zuverlässigkeit auf dem Automobilstand AQG 324 [1] untersucht wurde.

In diesem Projekt hat sich das Fraunhofer ENAS an der Zuverlässigkeitsanalyse von Demonstratoren durch thermomechanische Simulation, passive Temperaturzyklustests, Materialcharakterisierung und Fehleranalyse gearbeitet. Das Design von Simulationsexperimenten (DoSE) wurde mit OPSTISLANG für verschiedene Parameter wie Materialeigenschaften, geometrische Parameter und Kühlkörpermaterialien durchgeführt. Bei der thermomechanischen Simulation kam die Finite Elemente (FE) Software ABAQUS [2] zur Anwendung. Für die thermomechanische Analyse wurde ein quasisymmetrisches FE-Modell erstellt, um die Recheneffizienz zu verbessern (siehe Abbildung 1). Eine höhere plastische Dehnungsakkumulation in der gesinterten Silberschicht kann zu einer Schädigung des Materials führen [3]. Daher wird die zyklische äquivalente plastische Dehnung als Ausgangsparameter für die numerische Simulation verwendet. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass eine höhere zyklische äquivalente plastische Dehnung im Eckbereich der gesinterten Schicht auftritt, wodurch das Material beginnt zu degradieren (siehe Abbildung 2). Die graue Fläche und der rote Pfeil in Abbildung 2 zeigen den Bereich, in dem die zyklische äquivalente plastische Dehnung größer als 1 % ist und eine Delamination der gesinterten Silberschicht zur Folge hat. Es wurde auch festgestellt, dass die gesinterte Silberschicht auf dem Stahlkühlkörper eine geringere Akkumulation der zyklischen äquivalenten plastischen Dehnung aufwies als der in Abbildung 3 gezeigte Kühlkörper aus Cu und Al. Das Spannungsverteilungsmuster zeigt ähnliche Tendenzen, wobei die höhere Spannungsverteilung beim gesinterten Silber am äußeren Rand der Schicht zu beobachten ist. Die plastische Dehnung an der gesinterten Grenzfläche wurde berechnet, allerdings hängt die Lebensdauerabschätzung von der Grenzflächenfestigkeit des Materials ab. Für den Demonstrator wurde eine thermomechanische Simulation basierend auf einem passiven Temperaturzyklustest (-40°C/125°C) durchgeführt. Die DoSE-Untersuchung, basierend auf unterschiedlichen Dicken der gesinterten Silberschicht und des Kühlkörpers, zeigt, dass die zyklische äquivalente plastische Dehnung mit zunehmender Dicke der gesinterten Schicht abnimmt. Die numerische Simulation verdeutlichen auch, dass die zyklische äquivalente plastische Dehnung mit zunehmender Dicke des Kühlkörpers zunimmt (siehe Abbildungen 4 und 5). Module mit einem Kühlkörper aus Aluminium weisen eine höhere Akkumulation der zyklischen äquivalenten plastischen Dehnung auf als das Modell mit einem Kühlkörper aus Kupfer, was in den Abbildungen 4 und 5 dargestellt ist.

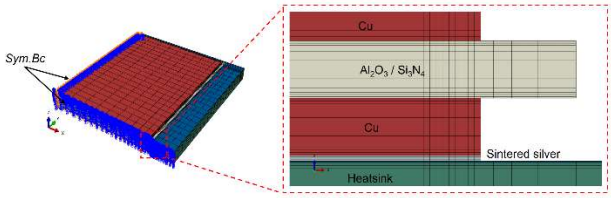


Abb. 1: FE-Modell des Demonstrators (Viertelmodel) mit Materialaufbau

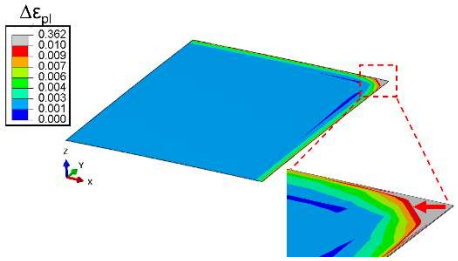


Abb. 2: Zyklische äquivalente plastische Dehnung in der gesinterten Silberschicht

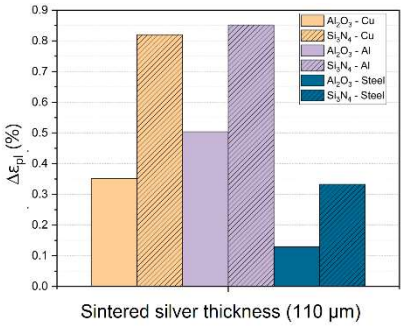


Abb. 3: Zyklische äquivalente plastische Dehnung in einer gesinterten Silberschicht für einen Kühlkörper aus Cu, Al und Stahl auf einem Keramiksubstrat aus Al_2O_3 und Si_3N_4

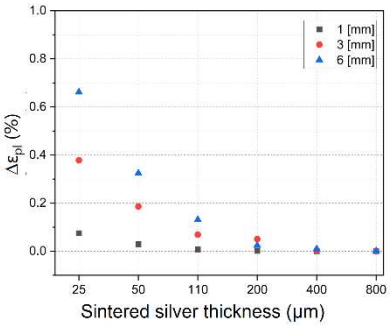


Abb. 4: Zyklische äquivalente plastische Dehnung in gesinterter Silberschicht für Cu-Kühlkörper auf Si_3N_4 Keramiksubstrat

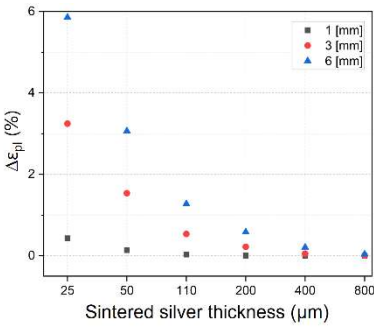


Abb. 5: Zyklische äquivalente plastische Dehnung in gesinterter Silberschicht für Al-Kühlkörper auf Si_3N_4 Keramiksubstrat

Der Demonstrator wurde einem passiven Temperaturzyklustest (-40°C/125°C) bis zu 1000 Zyklen unterzogen. Die Fehleranalyse der Proben erfolgte mit einem akustischen Mikroskop (SAM) [4] in Intervallen von 200 Zyklen. Es wurde festgestellt, dass mit den thermischen Zyklen eine Delamination in der gesinterten Silberschicht auftritt. Die Degradation des Materials beginnt an den Ecken und schreitet bis zur Mitte der gesinterten Silberschicht fort (siehe Abbildung 6). Der rote Bereich zeigt den prozentualen Anteil der delaminierten Fläche im Verhältnis zu den Temperaturzyklen.

Heatsink sintering pressure	Initial state	200 cycles	400 cycles	600 cycles	800 cycles	1000 cycles
Cu - heatsink 25 MPa	0.63 %	1.23 %	1.86 %	2.74 %	2.90 %	4.35 %
Al 25MPa	0.5 %	13.68 %	19.88 %	29.09 %	45.22 %	52.03 %
Cu 12.5 MPa	2.05 %	21.35 %	23.84 %	27.72 %	34.33 %	37.83 %

Abb. 6: Delamination der Probe mit Cu- und Al-Kühlkörper mit 25 MPa und 12,5 MPa Sinterdruck. Der rote Bereich zeigt die Delamination des gesinterten Silberbereichs zwischen Kühlkörper und Keramiksubstrat (Si_3N_4).

Mikrostrukturanalyse

Die Mikrostrukturanalyse erfolgte an gesinterten Silberstreifen mit unterschiedlichem Drücken durchgeführt (siehe Abbildung 7). Sie besteht aus einer Porositätsanalyse mittels REM und der Bildverarbeitungssoftware ImageJ [5, 6]. Es wurde festgestellt, dass die Porosität des gesinterten Silbers mit steigendem Sinterdruck abnimmt. Die kristallographischen Eigenschaften des gesinterten Silbers ist mittels Elektronenrückstreuung (EBSD) analysiert worden[7]. Die Mikrostrukturanalyse ergab, dass bei allen untersuchten Proben keine bevorzugte Kornorientierung (keine Textur) vorliegt, wie aus Abbildung 8 hervorgeht.

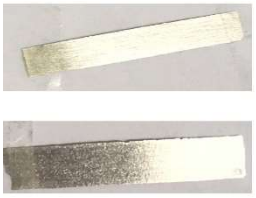


Abb. 7: Gesinterte Streifen

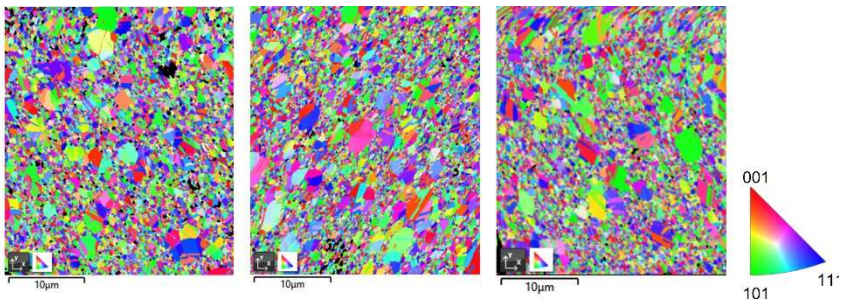


Abb. 8: Inverse Polfigur in Y-Richtung für Sinterdruck von 10, 15 bzw. 25 MPa

Referenz

[1] AQG, ECPE Guideline. "324—Qualification of Power Modules for Use in Power Electronics Converter Units in Motor Vehicles." *ECPE European Center for Power Electronics eV: Nürnberg, Germany* (2021).

[2] SIMULIA (ABAQUS) Manuals (V. 62.6), Dassault Systemes Simula Corp., Providence, RI, USA, 2023

[3] Mathew, Anu, et al. "Lifetime modelling of sintered silver interconnected power devices by FEM and experiment." *2021 22nd International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE)*. IEEE, 2021.

[4] PVA TePla Scanning Acoustic Microscopy, "https://www.pvatepla-sam.com/produkte/sam-premium-line/," PVA TePla SAM, 11 10 2023. [Online]. Available: https://www.pvatepla-sam.com/produkte/sam-premium-line/. [Accessed 11 10 2023].

[5] Lord, Jerry, et al. "A good practice guide for measuring residual stresses using FIB-DIC." (2018).

[6] https://imagej.net/ij/docs/guide/user-guide.pdf

[7] Marro, James, et al. "Defect and microstructural evolution in thermally cycled Cu through-silicon vias." Microelectronics Reliability 54.11 (2014): 2586-2593.