

Abschlussbericht zum Projekt

[Entwicklung und Qualifizierung von Interconnects für miniaturisierte LEDs (IQLED)]

der Technischen Hochschule Ingolstadt

Zuwendungsempfänger: Technische Hochschule Ingolstadt
Forschungsförderung, -transfer und –controlling (FORTEC)
Esplanade 10
85049 Ingolstadt

Projektpartner: Osram Opto Semiconductors GmbH

Förderkennzeichen: 13FH044PX8

Projektleitung: Prof. Dr. Gordon Elger
0841/9348-2840
gordon.elger@thi.de

Projektlaufzeit: 01.07.2019 – 31.12.2022

Inhalt

I.	Kurzdarstellung	7
1.	<i>Aufgabenstellung</i>	<i>7</i>
2-1.1	<i>Gepulste und stochastische TTA zur thermischen Charakterisierung</i>	<i>38</i>
2-1.2	<i>Integration in TTA Tester</i>	<i>46</i>
2.1.3	<i>Validierung</i>	<i>47</i>
2.	<i>Voraussetzungen/Ausgangslage</i>	<i>63</i>
3.	<i>Planung und Ablauf des Vorhabens</i>	<i>64</i>
II.	Eingehende Darstellung	64
1.	<i>Soll-Ist-Vergleich der geplanten und erzielten Ergebnisse sowie der eingesetzten Mittel</i>	<i>64</i>
2.	<i>Erläuterung der wichtigsten Positionen im zahlenmäßigen Nachweis</i>	<i>66</i>
3.	<i>Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit</i>	<i>67</i>
4.	<i>Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses (Fortschreibung des Verwertungsplanes)</i>	<i>67</i>
5.	<i>Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen während der Durchführung</i>	<i>68</i>
6.	<i>Geplante und erfolgte Veröffentlichungen im Rahmen des Vorhabens</i>	<i>68</i>
III.	Erfolgskontrollbericht	68
IV.	Kurzfassung/Berichtsblatt	68

B. Abbildungen

Abbildung 1 - Ergebnisse des selektiven Ätzens des Legierungselements aus den Cu-Legierungspartikeln. (a) selektives Ätzen von Sn aus Bronzekugeln und (b) selektives Ätzen von Zn aus Messingflakes.	9
Abbildung 2 - Schematische Darstellung und Details des nasschemischen Ätzverfahrens zur Herstellung von nanoporösen Partikeln.	10
Abbildung 3 - μ -Kupfer Partikel mit organischer Beschichtung aus Osaka Universität. .	11
Abbildung 4 - REM-Analyse der gesinterten Verbindungen (a) bimodale Kombination aus Osaka-Mikropartikeln und Nanopartikeln, (b) bimodale Kombination aus Osaka-Mikropartikeln und geätzten Messingflakes und (c) geätzte Paste auf Messingflakesbasis.	11
Abbildung 5 - Original (a) Referenzkupfer und (b-d) Metallpigmentflakes aus Messing	12
Abbildung 6 - Thermische Zersetzung von kommerziell beschafften Kupfer(II)-Formiatpartikeln, die zur Entwicklung von Kupfer-Nanopartikeln führt.	15
Abbildung 7 – TGA-DSC-Analyse des reinen Bindemittels und der Sinterpasten.	17
Abbildung 8- Während des Projekts verwendetes Standard-Sinterverfahren.	19
Abbildung 9 - Unterschiede in der Schablonentrennung zwischen den verschiedenen untersuchten Pasten und der Verschmutzungseffekt auf der Schablone.	20
Abbildung 10 - (von links nach rechts): Lichtmikroskopische Aufnahme des Druckdepots einer auf reinen Cu-Flakes basierenden Paste, 0,3 Gew.-% Zn, 3 Gew.-% Zn und 6,4 Gew.-% Zn geätzte Messingflakes, geätzten Messingflakes und Cu-Komplex Paste und Paste auf Basis von Cu-Formiat.	20
Abbildung 11 – Röntgenanalyse der gebondeten Proben nach dem Standard-Hot-in/Hot-out-Verfahren, die die Entstehung großer Voiding zeigt.	21
Abbildung 12 - Optisches Mikroskopiebild der schergeprüften Proben, das die im Röntgenbild beobachteten Voids und Kanalverformungen zeigt.	22
Abbildung 13 - Die REM-Aufnahme der gesinterten Mikrostruktur der NanoJoin-Silbersinterpaste zeigt das Vorhandensein von lokalisierten Partikelagglomeraten, wie sie auch im Röntgenbild zu sehen sind, was auf die inhomogene Verteilung und thermische Zersetzung des Ag-Salzes hinweist.	22
Abbildung 14 - Röntgenanalyse des gesinterten Gefüges nach dem verbesserten Sinterprofil, einschließlich eines Vortrocknungsschritts.	23
Abbildung 15 - Vergleich der Scherfestigkeit zwischen dem Lot SAC 305, der Ag-Sinterung unter Druck und den drucklosen Ag-Sinter-Pasten DOWA und NanoJoin. ...	23
Abbildung 16 - Vergleich der Scherfestigkeit in Abhängigkeit von den Temperaturschockbedingungen.	24
Abbildung 17 - REM-Aufnahme des ionenstrahlgefrästen Querschnitts von (a) Heraeus Ag-Sinterpaste auf Mikroflakesbasis, (b) vergrößertes Bild der gesinterten Verbindung, (c) in-house entwickelte geätzte Sinterpaste auf Messingflakesbasis mit 3 Gew.-% Rest-Zn und (d) vergrößertes Bild der gesinterten Verbindung, das eine vergleichbare gesinterte Mikrostruktur mit einer flakesartigen Morphologie zeigt. In beiden Fällen wurde die Sinterung unter 20 MPa Bonddruck für 5 Minuten bei 275°C in einer offenen Kammer unter 3L/min Stickstofffluss durchgeführt.	25
Abbildung 18 - Gesintertes Gefüge von (a) Ref-Cu-Paste, (b) Paste A, (c) Paste B und (d) Paste C, gesintert unter 10 MPa Bindungsdruck bei 275 °C für 5 min.	26
Abbildung 19 – SAM-Abbildung einer Array-gebundenen Probe mit 25 Si_3N_4 -Chips mit einem Footprint von 2,5 mm ² , die auf ein Keramiksubstrat von Osram gesintert wurden. Gelbe Pfeile zeigen die Bereiche mit hoher Porosität und rote Pfeile zeigen Delaminationen. Der gestrichelte gelbe Kasten zeigt den Umriss des Si_3N_4 -Chips.	27
Abbildung 20 - REM-Analyse einer Reihe von gesinterten Verbindungen unter 25 Chips, die in einem 5x5-Array unter Drucksintern gesintert wurden. Die gelben Kästchen zeigen die inhomogen gesinterten Bereiche, die von (1) hochporösen Bereichen bis zu (4,5)	

nahezu massiven gesinterten Verbindungen unter den gleichen Sinterbedingungen reichen.....	28
Abbildung 21 - Schematische Darstellung des Sinter Prozesses und des DUT Aufbaus.	29
Abbildung 22 - TTA und Akustik Mikroskopie Analyse von Ref Cu Paste nach dem Array Bonding verfahren.	29
Abbildung 23 – Integrierte Bild Korrelationssystem und Kriechtester.	30
Abbildung 24 - (inset) - SAM-Analyse der gesinterten Silberverbindung und die Kriechverformungskurve der gesinterten Verbindung, die unter einer konstanten Last von 350N bei Raumtemperatur getestet wurde. Die Kurve ist in 6 Bereiche unterteilt, die entsprechend nummeriert sind.	31
Abbildung 25 - μ -Raman-Analyse der Si-Chips	33
Abbildung 26 - μ -Raman-Analyse der gesinterten Proben mit Kupfersinterpaste auf Mikroflakes-Basis.	34
Abbildung 27 - Spannungsentwicklung in der Ebene als Funktion der Zeit nach dem Sintern.	35
Abbildung 28 - SAM- und μ -Raman-Analyse der gesinterten Verbindung.....	36
Abbildung 29 - SAM-Analyse der gesinterten Verbindungen im gesinterten Zustand und nach Thermoschock.	37
Abbildung 30 - Relative Raman-Verschiebung in Abhängigkeit von den Thermoschockzyklen.....	37
Abbildung 31 - μ -Raman-Analyse der gesinterten Proben mit Silbersinterpaste auf nanopartikel-Basis	38
Abbildung 32 – Schema der Standard TTA Messmethode mit Schaltstörungen a) Lagen- und Foster-Modell des Halbleitermoduls, b) Heiz- und Messphase mit gleichzeitiger Messung der Vorwärtsspannungsänderung, c) zeitaufgelöste störungsbehaftete thermische Impedanz.	39
Abbildung 33 – a) LTТА Messmethode mit defokussiertem Laserstrahl b) orts aufgelöste LTТА Messmethode mit ortsveränderlichem fokussierten Laserstrahl.	40
Abbildung 34 - Normalisierte thermisch transiente Impedanz a) Standard TTA vs. LTТА mit defokussiertem Laser b) orts aufgelöste LTТА mit Positionsveränderung des fokussierten Lasers.	41
Abbildung 35 – DPA TTA Sequenz aus den Teilen DP Sequenz mit n kurzen Heiz- und Mess-Phasen mit der Länge t_{DP} und Standard TTA Sequenz, t_{Heiz} und t_{Mess} sind dabei deutlich länger als t_{DP-Sq}	43
Abbildung 36 – Temperaturverlauf aufgrund des Superpositionsprinzips während der Deterministischen Puls Sequenz mit (a) Leistungsverlauf aus den ersten fünf Leistungssprüngen und (b) resultierendem Temperaturverlauf und -antworten auf einzelne Leistungssprünge.....	44
Abbildung 37 - Ablaufdiagramm des Deterministischen Puls Algorithmus: Die Antwort des Bauteils auf die DPA TTA Sequenz wird in DP Sequenz Antworten und Standard TTA Sequenz Sprungantwort aufgeteilt. Letztere wird durch einen Tiefpass gefiltert und anschließen zur Berechnung der Offsets und $Z_{th}(t > t_{DP})$ genutzt. Die DP Sequenz Antworten werden durch Offsets in Sprungantworten umgerechnet und gemittelt um $Z_{th}(t > t_{DP})$ zu bestimmen und die Ergebnisse zusammenzusetzen	45
Abbildung 38 – LTТА Setup a) Stand vom dritten Zwischenbericht b) aktueller Stand mit neuer Optik, Ulbrichtkugel und thermisch stabilisiertem DUT	46
Abbildung 39 – Ablaufdiagramm des Deterministischen Puls Algorithmus: Die Antwort des Bauteils auf die DPA TTA Sequenz wird in DP Sequenz Antworten und Standard TTA Sequenz Sprungantwort aufgeteilt. Letztere wird durch einen Tiefpass gefiltert und anschließen zur Berechnung der Offsets und $Z_{th}(t > t_{DP})$ genutzt. Die DP Sequenz	

Antworten werden durch Offsets in Sprungantworten umgerechnet und gemittelt um $Z_{th}(t > t_{DP})$ zu bestimmen und die Ergebnisse zusammensetzen.	47
Abbildung 40 – Transiente Thermische Impedanz bestimmt durch die LTTA und Standard TTA Methode initial (grün) und nach 100 Temperaturzyklen (rot) für a) Osram Oscon Compact, b) Dominant NagaJo und c) Lumileds Luxeon F	48
Abbildung 41 – Zusammengesetzte $Z_{th}(t)$ des DPA im Vergleich zu den Standard TTA Rohdaten. Die $Z_{th}(t)$ -Abschnitte sind farblich getrennt. (a) zeigt einen identischen Verlauf über den gesamten Zeitbereich und damit die Funktion des DPA für experimentelle Daten. Um die Rauschreduktion zu verdeutlichen, ist in (b) der rot markierte Bereich aus (a) dargestellt.....	49
Abbildung 42 – Teststand zur elektro-thermischen und elektro-optischen Vermessung	50
Abbildung 43 – a) Vermessenes Optisches Spektrum einer weißen High-Power LED auf Basis einer blauen LED mit Phosphor Konverter b) Temperaturabhängige Effizienz der LED	50
Abbildung 44 – Einzelheiten zu den beiden im Projekt untersuchten Verkapselungsmitteln und die schematische Darstellung des Aufbaus für die TTA-Analyse.	51
Abbildung 45 - Schematische Darstellung des Sinter Prozesses und die DUT Aufbau.	52
Abbildung 46 - TTA und Akustik Mikroskopie Analyse von Ref Cu Paste nach dem Array Bonding verfahren.	53
Abbildung 47 – SAM- und TTA-Analyse des gesinterten Interconnects. Die rot eingekreisten LEDs waren die Funktionsfähige LEDs nach dem Drahtbonden.....	54
Abbildung 48 - SAM-Analyse der gesinterten Ag-Proben nach Thermoschockbedingungen von -40/+150°C. (Links) gesintert mit 10 MPa Bindungsdruck und (rechts) gesintert mit 20 MPa Sinterdruck. Die Sinterzeit und die Temperatur wurden konstant bei 5 Minuten bzw. 275 °C gehalten.....	56
Abbildung 49 - SAM-Analyse der gesinterten Cu-Proben nach Thermoschock von -40/+150°C. Sinterparameter 10MPa, 5min, 275°C.....	57
Abbildung 51 - Vergleich der Degradation in der gesinterten Verbindung zwischen der robusten und der degradierenden Probe (oben) SAM Bilder und (unten) TTA- Messungen	59
Abbildung 51 – REM-Querschnitt des auf Ag-Mikroflakes basierenden Interconnect nach 1000 Thermoschockzyklen. Der Maßstab im Lichtmikroskopie-Bild in der Mitte bezieht sich auf 100 µm. Grüne Pfeile zeigen die beobachteten Delaminationen entlang der Kanten und wie erwartet an der Chipschnittstelle.....	60
Abbildung 52 - REM-Querschnitt des auf reinen Cu-Mikroflakes basierenden Interconnects nach 1000 Thermoschockzyklen. Der Maßstab im Lichtmikroskopie-Bild in der Mitte bezieht sich auf 100 µm. Grüne Pfeile stellen die beobachteten Delaminationen entlang der Kanten und an der linken Schnittstelle auf der linken Seite und der Substratschnittstelle auf der rechten Seite dar.	60
Abbildung 53 - REM-Querschnitt der geätzten Messing-Mikroflakes (0,3 Gew.-% Zn) auf Basis der Verbindung nach 1000 Thermoschockzyklen. Der Maßstab im Lichtmikroskopie-Bild in der Mitte bezieht sich auf 100 µm. Die grünen Pfeile stellen die beobachteten Delaminationen entlang der Kanten und an der linken Grenzfläche auf der linken Seite und an der Substratgrenzfläche auf der rechten Seite dar.	60
Abbildung 54 - REM-Querschnitt der geätzten Messing-Mikroflakes (3 Gew.-% Zn) auf Basis der Verbindung nach 1000 Thermoschockzyklen. Der Maßstab im Lichtmikroskopie-Bild in der Mitte bezieht sich auf 100 µm. Grüne Pfeile zeigen die beobachteten Delaminationen entlang der Kanten und wie erwartet an der Chipschnittstelle.	60
Abbildung 55 - REM-Querschnitt der geätzten Messing-Mikroflakes (6,4 Gew.-% Zn) auf Basis der Verbindung nach 1000 Thermoschockzyklen. Der Maßstab im Lichtmikroskopie-Bild in der Mitte bezieht sich auf 100 µm. Grüne Pfeile zeigen die	

beobachteten Delaminationen entlang der Kanten und wie erwartet an der Chipschnittstelle.	61
Abbildung 56 - REM-Querschnitt der auf reinem Kupferformiat basierenden Verbindung nach 1000 Thermoschockzyklen. Der Maßstab im Lichtmikroskopie-Bild in der Mitte bezieht sich auf 100 µm. Die grünen Pfeile zeigen die beobachtete Rissausbreitung in der interconnect bulk.	61
Abbildung 57 - REM-Querschnitt der geätzten Messing-Mikroflakes (0,3 Gew.-% Zn) + Verbindung auf Kupferkomplexbasis nach 1000 Thermoschockzyklen. Der Maßstab im Lichtmikroskopie-Bild in der Mitte bezieht sich auf 100 µm. Grüne Pfeile zeigen die beobachteten Rissbildungen entlang der Kanten.	61
Abbildung 58 – REM-Analyse der gesinterten Verbindungen, die deutlich den Unterschied in der Bondliniendicke zwischen den verschiedenen untersuchten Sinterpasten zeigt.	62

C. Tabellen

Tabelle 1 - Übersicht über die Kupfersalze, ihre thermische Zersetzungstemperatur und die Nebenprodukte der thermischen Zersetzung.	15
Tabelle 2 - Pasten Formulierung aus geätzten Messingflakes	16
Tabelle 3 - Untersuchte Pasten und die jeweiligen Vortrocknungs- und Sinterparameter.	24
Tabelle 4 - Test Sample Gruppe zur Validierung der LTTA Methode	47
Tabelle 5 – Zusammenfassung der untersuchten Pasten, der TTA-Analyse, der Scherfestigkeit und der Leistung unter Thermoschockbedingungen.	55

I. Kurzdarstellung

Im Projekt IQLED der Technischen Hochschule Ingolstadt (THI) sollen Materialien und Prozesse zum Sintern von miniaturisierten Interconnects für die Optoelektronik entwickelt werden, welche für High-Power-Bauteile wie LEDs und Laser eingesetzt werden können, und die hohen automotive Zuverlässigkeitsanforderungen erfüllen. Die Eigenschaften der metallischen Gefüge der Interconnects sollen ermittelt werden, um sie in Lebensdauermodellen verwenden zu können. Um eine schnelle, zerstörungsfreie Qualitätskontrolle der Interconnects nach dem Aufbau und in beschleunigten Zuverlässigkeitstest zu ermöglichen, wird im Projekt IQLED die Messtechnik der transienten thermischen Analyse (TTA) weiterentwickelt, mit welcher über den thermischen Widerstand die Güte des Interconnects bestimmt werden kann. Durch stochastische gepulste Anregung soll über eine erhöhte Zeitauflösung die Messgenauigkeit verbessert und die Messzeit reduziert werden. Dadurch sollen viele kleine Bauteile hochgenau vermessen werden können. Ziel ist es, das Messverfahren in einen neuen In-Situ Tester für die beschleunigte Alterung der optoelektronischen Module zu integrieren, und so schneller umfangreichere Daten zur Lebensdauervorhersage aufzunehmen. Um die Möglichkeiten der Prozessentwicklung an der THI zu erweitern, soll in dem Projekt IQLED in einen flexiblen hochgenauen halbautomatischen Bonder zum Sintern investiert werden.

1. Aufgabenstellung

Das Projekt ist in **drei Arbeitspakete** unterteilt.

Das Arbeitspaket WP1 beschäftigt sich mit der Entwicklung des Sintermaterials, des Prozesses und der Charakterisierung des metallischen Gefüges. Im Arbeitspaket WP2 wird die stochastische TTA-Messtechnik für die Vermessung von kleinen optoelektronischen Pixel-Lichtquellen von WiMi 1 entwickelt und ein Zuverlässigkeitsprüfstand aufgebaut.

In WP3 werden beschleunigte Zuverlässigkeitstests für ausgewählte Sintermaterialien und Prozesse aus WP1 durchgeführt.

WP1: Sinterprozess und Materialentwicklung

WP1-1 Sinter-Pasten.

1-1.1 Metallpulvermodifikationen:

1-1.2 Binderentwicklung:

1-1.3 Metallsalze als Quelle atomaren Metalls:

1-1.4 Pastenherstellung, Sinterprozess und Testen des Interconnects:

1-1.5 Pastenapplikation und Sinterprozessloop:

WP1-2 Design of Experiments (DOE) Sinterprozess für Interconnects:

1-2.1 *Prozess-/Material-Screening*

1-2.2 Prozess DOE: Auf das Screening aufbauend werden weitere prozessoptimierende DOEs durchgeführt. Analyse:

1-2.3 Arraysintern:

WP1-3 Interconnect Charakterisierung und Anpassung Material und Prozess

1-3.1 *Messung Scherkriechen*

1-3.2 *Stressmessungen durch RAMAN-Spektroskopie*

1-3.3 *Anpassung von Material und Prozessparametern (Designoptimierung)*

WP2: Qualifikation der Interconnects durch TTA/R_{th}-Messungen

WP2-1 Gepulste und stochastische TTA

2-1.1 *Entwicklung gepulste/stochastische TTA*

2-1.2 *Integration in TTA-Tester*: Integration der Stromquelle/Laser in den Tester und Realisierung der Auswertesoftware im Messprogram in C#.

2-1.3 *Validierung*: Anwendung der gepulsten TTA an einem Batch an LEDs und Durchführung einer Zuverlässigkeitsmessreihe zu Validierung.

WP2-2 In-Situ-Teststand: Aufbau eines kombinierten beschleunigten Teststandes mit In-Situ Messung der elektrooptischen und elektro-thermischen Eigenschaften der gesinterten Bauteile.

2-2.1 *Integration optischer Messung*.

2-2.2 *Integration der Testkammer*

2-2.3 *Validierung*

WP3: Zuverlässigkeit

WP3-1 Lot und Underfill/Verkapselung Prozess

3-1.1 Prozessanpassung der Lotprozesse als Referenz und Benchmark (AuSn und SAC).

3-1.2 Underfill- und Verkapselungsprozessentwicklung.

3-1.3 Analyse zur 0-Stunden-Qualitätssicherung und Zuverlässigkeits-Screenen.

WP3-2 DOE Zuverlässigkeit und Zuverlässigkeitstesten

3-2.1 *Aufbau der Proben und 0-Stundenanalyse*.

3-2.2 *Zuverlässigkeitstesten, Fehleranalyse und Auswertung*

WP3-3 Transfer von ausgewählten Sinterprozessen

WP1: Sinterprozess und Materialentwicklung

WP1-1 Sinter-Pasten: In diesem Arbeitspaket werden die oberflächenaktivierten Metallpartikel (Au, Ag, Cu) realisiert und geeignete Binder und Aktivatoren für die Sinterprozesse untersucht

• Metallpulvermodifikationen

Im Gegensatz zu den geplanten Aktivitäten des Projekts wurde der Schwerpunkt sehr früh auf Kupfer- und Kupferlegierungspulver gelegt, da diese ein hohes Potenzial aufweisen, so dass Gold-Nanopulver nicht untersucht wurden. Im Falle von Silberpartikeln wurden kommerziell erhältliche Pasten ausgewählt, die ein breites Spektrum an Partikelbasis bieten, nämlich DOWA (Ag-Paste auf Nanopartikelbasis), NanoJoin (Paste auf Nanopartikel- und Silbersalzbasis) und Heraeus (Silbersinterpasten auf Basis mikroskaliger Flakes).

- **Ag Sinter Pasten:** Dowa und NanoJoin boten druckfreie Sinterpasten an, während die Pasten von Heraeus in erster Linie auf das Drucksintern ausgerichtet waren. Die Wahl fiel auf DOWA, da es das Standardmaterial in der Serienproduktion bei Osram für eine breite Palette von optoelektronischen Produkten ist.
- **Kupfer und Kupferlegierung basierte Sinter Pasten:** Messingflakes und Bronzepartikel (kugelförmig) wurden beschafft, um einen selektiven Ätzprozess zur Erzeugung nanoporöser Partikel im eigenen Haus durchzuführen (Abbildung 2). Die nanoporösen Oberflächenmodifikationen wurden durch Ätzen der Partikel in Salzsäure realisiert. Die detaillierte Analyse der Auswirkungen des Ätzens auf die Oberfläche der Flocken und die daraus resultierenden Sinterfähigkeiten der Flakes ist Teil der Doktorarbeit von Sri Krishna Bhogaraju, einem der wissenschaftlichen Mitarbeiter des Projekts.
- Darüber hinaus wurden auch Kupfer Mikropartikel, wie sie von Prof. Nishikawa an der Universität Osaka für den Oxidations-Reduktions-Bindungsprozess untersucht wurden, beschafft und im Projekt untersucht (Abbildung 3).

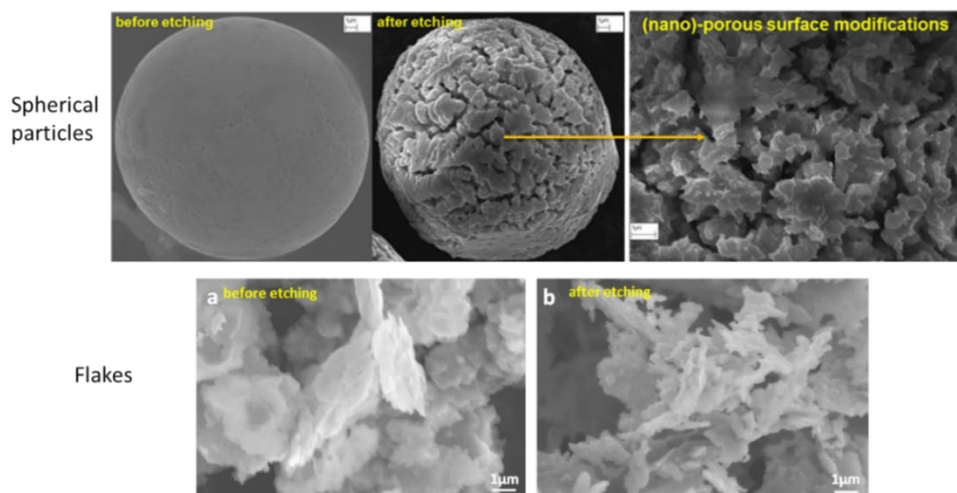


Abbildung 1 - Ergebnisse des selektiven Ätzens des Legierungselements aus den Cu-Legierungspartikeln. (a) selektives Ätzen von Sn aus Bronzekugeln und (b) selektives Ätzen von Zn aus Messingflakes.

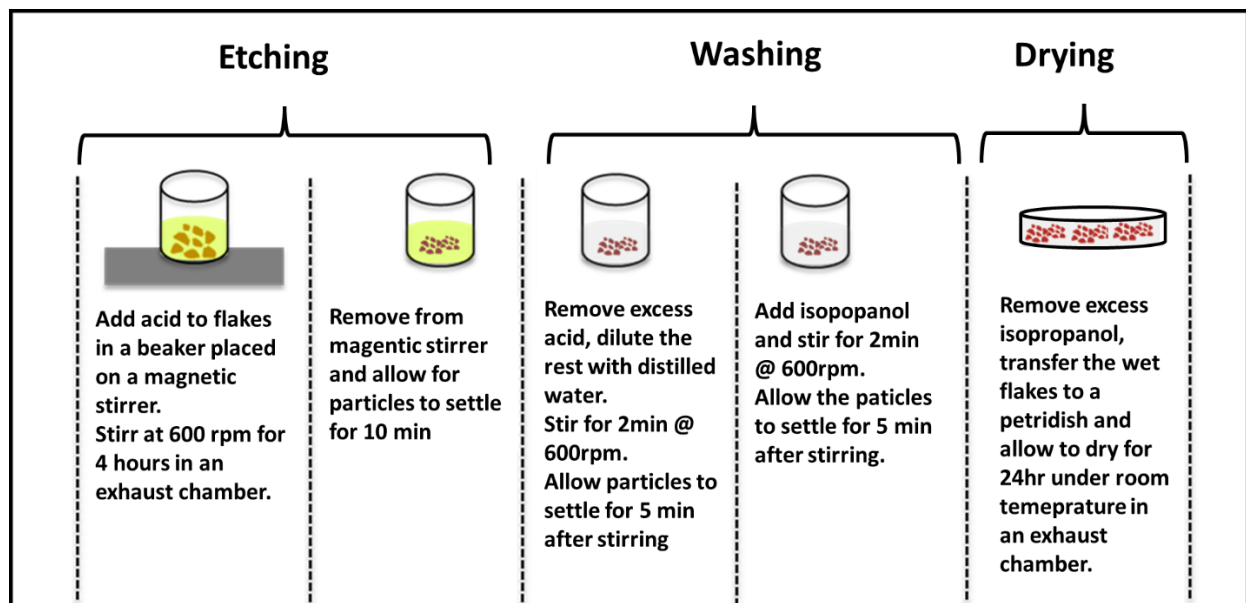
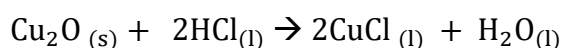
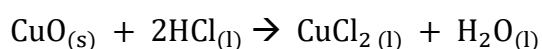
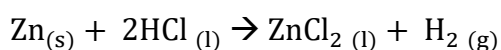


Abbildung 2 - Schematische Darstellung und Details des nasschemischen Ätzverfahrens zur Herstellung von nanoporösen Partikeln.

Abbildung 2 zeigt eine schematische Darstellung des Ätzprozesses. Das Verhältnis von Flakes zu Säure von 10g:100ml wird verwendet, um ein effizientes Rühren zu gewährleisten. Die besten Ergebnisse werden erzielt, wenn das Rühren mit der Säure im Becherglas begonnen wird und die Flakes nach und nach zugegeben werden. Dies verhindert die Koagulation der Metallpigmentplättchen zu Beginn des Ätzvorgangs. Übermäßiges Waschen führt zur Bildung von $\text{Cu}(\text{OH})_2$, was durch die Blaufärbung der Lösung während des Waschvorgangs angezeigt wird. Die nachstehenden Gleichungen beschreiben die chemischen Reaktionen, die während des Ätzprozesses ablaufen, nämlich: Selektives Ätzen von Zn aus den Messingflakes und Ätzen von Cu-Oxiden aus den Cu-Flakes. Aufgrund der Reduktionspotentiale reagiert Cu nicht mit HCl. Nach dem Ätzen wurden die Flakes zunächst 5 Mal in destilliertem Wasser und dann 2 mal in Isopropanol gründlich gespült, um alle Spuren von Chlor zu entfernen. ZnCl_2 und CuCl_2 sind mit einer Löslichkeit von 432 g/100 ml bzw. 70,6 g/100 ml gut in Wasser löslich. CuCl ist in Wasser kaum löslich (0,0062 g/100 ml), in konzentrierter HCl jedoch gut löslich. Das Vorhandensein von Cu-Chloriden und Cu-Oxiden in den Flocken nach dem Ätzen ist beim Sintern unerwünscht, da Cu-Oxide Diffusionsbarrieren darstellen und Cu-Chloride einen hohen Schmelzpunkt von über 400 °C haben und sich während des Niedrigtemperatur-Sinterprozesses nicht wie gewünscht zersetzen.



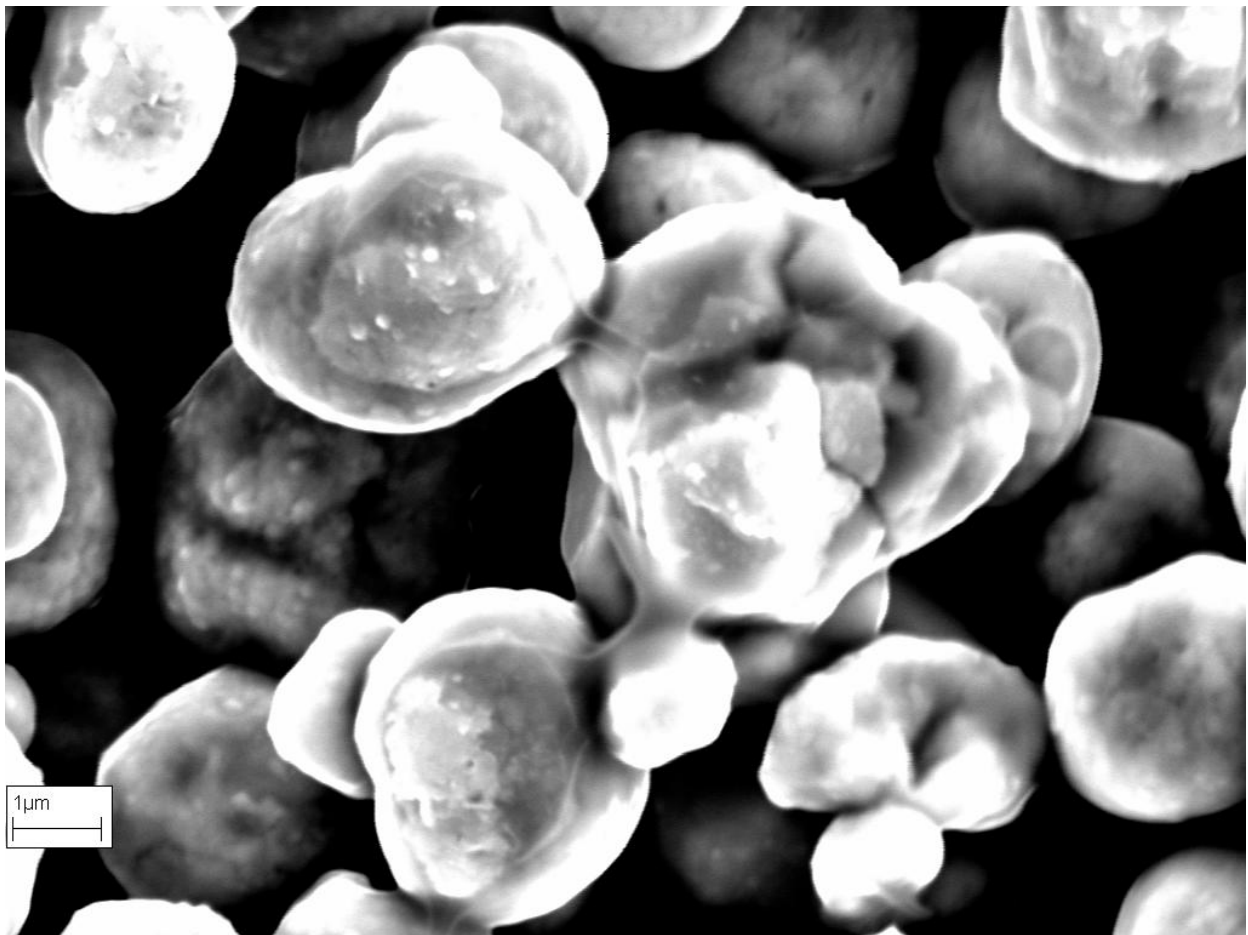


Abbildung 3 - μ -Kupfer Partikel mit organischer Beschichtung aus Osaka Universität.

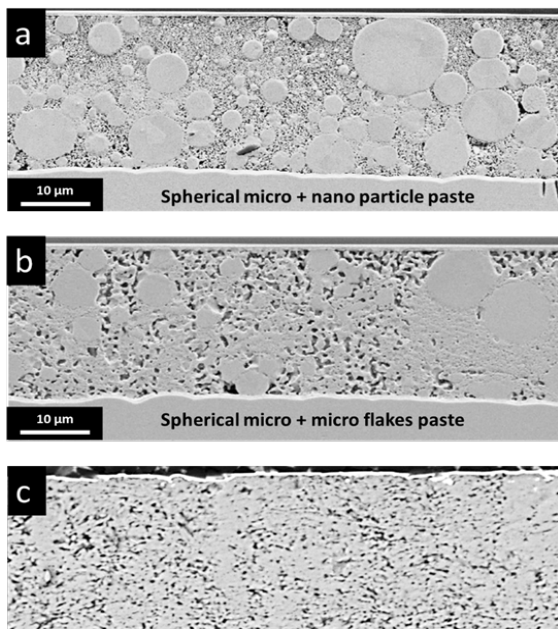


Abbildung 4 - REM-Analyse der gesinterten Verbindungen (a) bimodale Kombination aus Osaka-Mikropartikeln und Nanopartikeln, (b) bimodale Kombination aus Osaka-Mikropartikeln und geätzten Messingflakes und (c) geätzte Paste auf Messingflakesbasis.

Die Wahl der Partikel spielt beim Sintern eine wichtige Rolle. Der Stand der Technik zeigt, wie bereits erwähnt, eine breite Palette von Möglichkeiten, wobei kugelförmige Partikel die häufigsten sind. Dazu gehören mikroskalige Partikel, nanoskalige Partikel oder bimodale Partikel. Im Falle der Ag-Sinterung wurden sogar trimodale Partikelkombinationen untersucht. Die Oberflächenenergie ist der treibende Faktor für den Beginn der Sinterung. Daher ist die Erzielung von Partikeln mit hoher spezifischer Oberfläche der Schlüssel für eine schnelle Sinterung.

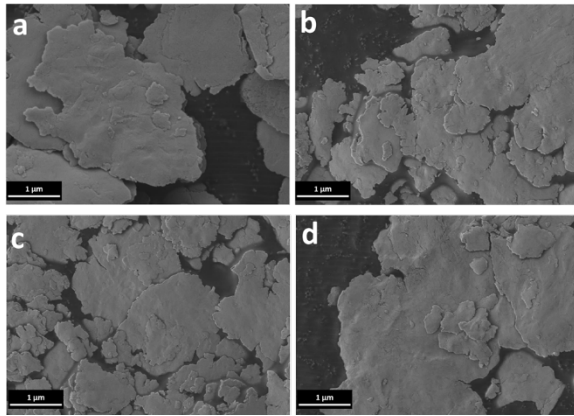


Abbildung 5 - Original (a) Referenzkupfer und (b-d) Metallpigmentflakes aus Messing

Voruntersuchungen wurden mit drei verschiedenen Partikeln und deren Kombinationen durchgeführt: kugelförmige Partikel im Mikrobereich (3-10 µm Durchmesser), kugelförmige Partikel im Nanobereich (100 nm Durchmesser) und mikroskalige Flakes (3-5 µm lateraler Durchmesser und 200 nm Dicke). Von allen Kombinationen zeigten Pasten auf der Basis reiner Flocken die besten Ergebnisse bei der Erzielung einer homogenen gesinterten Verbindung, und zwar aufgrund ihrer großen Oberfläche, ihrer Fähigkeit,

sich übereinander zu stapeln, und ihres ausgezeichneten Aspektverhältnisses, das dem Verhältnis von Oberfläche zu Volumen ähnelt, das üblicherweise verwendet wird, um die verbesserten Sinterfähigkeiten von Nanopartikeln festzustellen. Daher wurden Flakes als Material für alle weiteren Untersuchungen gewählt. Es werden Metallpigmentflakes beschafft (Abbildung 5), deren Einzelheiten nachstehend aufgeführt sind. Die Flakes haben eine hohe spezifische Oberfläche von 3,5m²/g und sind ~200nm dick. Die im Datenblatt des Lieferanten angegebene D50-Größenverteilung beträgt 5µm. Dadurch bieten sie ein hohes Aspektverhältnis, das für die Sinterung von Vorteil ist. Es wurden drei verschiedene Messingflakes mit einem Zn-Gehalt von 3, 8 und 26 Gew.-% beschafft. Daher lagen alle Flakes im α-Messing-Bereich.

• Binderentwicklung

Ausgehend von der Literaturübersicht über den Stand der Technik beim Kupfersintern wurde der Gruppe klar, dass die Pasten Formulierungen ein multifunktionales Bindemittelsystem enthalten müssen, wobei ein Bindemittel in erster Linie für die richtige Rheologie und die thixotropen Eigenschaften der Pasten sorgen muss, um den Schablonen-/Siebdruck und/oder die Dosierung zu ermöglichen, und ein anderes funktionelles Bindemittel die Kupferoxide in-Situ reduziert und/oder das Kupfer während des Sinterprozesses vor Oxidation schützt.

Ein wichtiger Faktor bei der Wahl des Bindemittels war, eine Pastenformulierung zu ermöglichen, die unter ähnlichen Bedingungen wie handelsübliche Silbersinterpasten sintert und somit die Verwendung der gleichen Geräte wie für das Silbersintern ermöglicht. Es war wichtig, dass das Bindemittel keine korrosiven Auswirkungen auf die Substrate hat und keine unerwünschten organischen Rückstände hinterlässt, die Prozesse wie das Drahtbünden beeinträchtigen würden. α -Terpineol ($C_{10}H_{18}O$) ist ein Monoterpenoid, d. h. ein Terpen, das durch das Hinzufügen einer funktionellen Gruppe, in diesem Fall eines Alkohols, modifiziert ist. Es hat einen Siedepunkt von $\approx 218^{\circ}C$ und eine Wasserlöslichkeit von 2,4 g/l. Es sieht wie eine farblose Flüssigkeit aus, hat aber einen starken, angenehmen Geruch und ist daher ein häufiger Bestandteil von Parfüms, Kosmetika und aromatischen Düften. Die Rolle von α -Terpineol in der Pastenformulierung besteht darin, (i) ein geeignetes polares Lösungsmittel für die vollständige Auflösung von PEG600 bereitzustellen, (ii) ein Lösungsmittel, das einen zweistufigen Sinterprozess ermöglicht, der eine effiziente Vortrocknung bei Temperaturen $< 130^{\circ}C$ erlaubt, und (iii) die vollständige Entfernung aus dem System vor der Aktivierung von PEG600, was eine effektive Reduktion von Cu- und Ag-Oxiden ermöglicht. Ein zusätzlicher Vorteil von α -Terpineol besteht darin, dass es während oder nach dem Sinterprozess keine unerwünschten Rückstände hinterlässt oder Verfärbungen auf dem Substrat oder den Chips verursacht.

Polyethylenglykol (PEG) ist eine klare und farblose Flüssigkeit bis zu einem Molekulargewicht von 600, danach ist es fest und von weißer Farbe. Es gilt als wenig toxisch, ist nicht brennbar oder ätzend und stellt eine kostengünstige Alternative zu flüchtigen oder halogenierten organischen Lösungsmitteln dar. PEG ist vollständig in Wasser löslich. Die Polyetherstruktur wird jedoch in Gegenwart von Sauerstoff bei erhöhter Temperatur ($> 70^{\circ}C$) sehr leicht thermisch oxidativ abgebaut, wobei PEG-Peroxide entstehen. Dies führt zu einer zufälligen Kettenspaltung, bei der als Nebenprodukt ein komplexes Gemisch aus vielen sauerstoffhaltigen niedermolekularen PEG entsteht. Es handelt sich um ein azyklisches Analogon der Kronenether, das Berichten zufolge einzigartige Eigenschaften in Bezug auf seine Fähigkeit zur Komplexbildung von Kationen aufweist. Es wird berichtet, dass es aufgrund der flexiblen helikalen Konformation Metallkationen verschiedener Größen koordiniert. PEG wird häufig bei der Synthese von Metallnanopartikeln durch die Polyolmethode verwendet. Das Polyol fungiert nicht nur als Reaktionslösungsmittel, sondern auch als Reduktionsmittel und Stabilisator, wodurch das Wachstum und die Agglomeration der Partikel sowie das Sintern unterdrückt werden. Der

vorgeschlagene Reaktionsmechanismus ist daher eine Redoxreaktion mit gleichzeitiger Reduktion des Metalloxids und Oxidation von PEG. Daher ist Restsauerstoff in der Sinteratmosphäre von Vorteil. Das Sintern in einer inerten Atmosphäre würde sich für Pastenformulierungen mit PEG als nachteilig erweisen. Eine Herausforderung bei PEG ist das Risiko von Rückständen aufgrund der Oxidation von PEG während des Sinterprozesses, was zu schwarzen, rußähnlichen Rückständen führen kann, die einen zusätzlichen Reinigungsprozess erforderlich machen.

Reine Pasten auf α -Terpineol Basis hatten nicht die gewünschte reduzierende Wirkung auf Cu-Oxide und daher eine sehr schlechte Sinterung in einer offenen Bindungskammer. Außerdem war die Paste sehr instabil und wies eine reduzierte Standzeit bei Raumtemperatur, ein hohes Ausbluten und eine unzureichende Klebrigkeit selbst nach einem kurzen Vortrocknungsprozess auf. Die Paste musste außerdem gekühlt werden. Reine Pasten auf PEG600-Basis weisen dagegen sehr hohe Scherfestigkeiten und ein ausgezeichnetes In-situ-Reduktionsvermögen von Cu- und Ag-Oxiden auf, selbst beim Sintern in einer offenen Bondkammer. Die hohe Menge an PEG600 bedeutete jedoch eine sehr hohe Entgasung bei den Sintertemperaturen, so dass die Chips erst nach Erreichen der Sintertemperatur positioniert werden mussten, um eine hohe Voiding zu vermeiden. Außerdem blieb eine beträchtliche Menge an PEG600-Resten im gesinterten Gefüge zurück, und an den Außenkanten wurde eine starke Verunreinigung durch die Oxidation von PEG600 festgestellt.

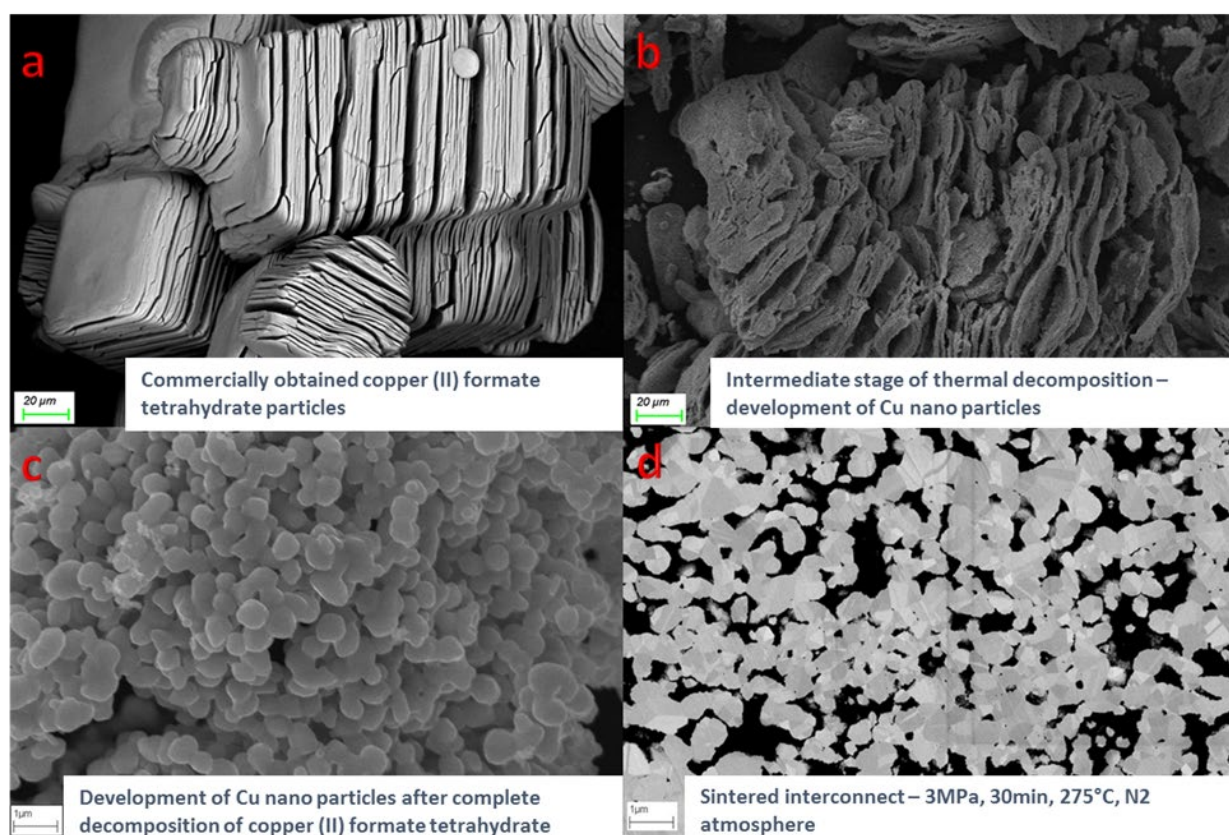
Deswegen wurde zur Formulierung der Paste ein Bindemittelgemisch aus α -Terpineol und PEG600 verwendet, um einen zweistufigen Sinterprozess zu ermöglichen und eine Paste mit ausgezeichneten Druckeigenschaften herzustellen. Der Gewichtsprozentsatz von 80:20 zwischen α -Terpineol und PEG600 wurde auf der Grundlage sorgfältiger Überlegungen zum Verhalten von reinem PEG600 und α -Terpineol-basierten Pasten gewählt.

• Metallsalze als Quelle atomaren Metalls

Kupfersalze bieten eine prospektive Lösung für die-attach Anwendungen, da sie in ihrem nativen Zustand nicht zur Oxidation neigen und Kupferpartikel während des Sinterprozesses in-situ realisiert werden können. Die Nebenprodukte der Zersetzung dieser Salze und die Zersetzungstemperatur sind jedoch die bestimmenden Faktoren für die-attach Anwendungen (Tabelle 1). Daher wird unter allen Kupfersalzen das Kupferformiat aufgrund seiner niedrigen Zersetzungstemperatur ($<225^{\circ}\text{C}$) bevorzugt. Außerdem erzeugt die thermische Zersetzung des Salzes keine unerwünschten Nebenprodukte, die möglicherweise einen Rückstand zurücklassen könnten. Es wurde sowohl die Komplexierung von Kupferformiat als auch die direkte Einbringung von Kupferformiat als Pulver in die Paste untersucht, einschließlich des thermischen Zersetzungsverhaltens von Kupferformiat-Tetrahydrat.

Tabelle 1 - Übersicht über die Kupfersalze, ihre thermische Zersetzungstemperatur und die Nebenprodukte der thermischen Zersetzung.

Cu-Salz	Summenformel	Beginnende Zersetzung in °C	Zersetzungsprodukte
Cu(II)-Formiat	$\text{Cu}(\text{HCO}_2)_2$	~180	$\text{Cu} + \text{H}_2 + 2 \text{CO}_2$
Cu-Maleat	$\text{CuC}_4\text{H}_2\text{O}_4$	~285	$\text{Cu} + \text{C}_x\text{H}_y + \text{CO}_2 + \text{CO}$
Cu-Fumarat	$\text{CuC}_4\text{H}_2\text{O}_4$	~344	$\text{Cu} + \text{C}_x\text{H}_y + \text{CO}_2 + \text{CO}$
Cu-Nicotinat	$\text{Cu}(\text{NC}_5\text{H}_4\text{CO}_2)_2$	~278	$\text{Cu} + \text{CO}_2 + \text{NC}_5\text{H}_5 + \text{N}_2 + \text{C}$; feste Rückstände aus Kohlenstoff
Cu-Isonicotinat	$\text{Cu}(\text{NC}_5\text{H}_4\text{CO}_2)_2$	~280	$\text{Cu} + \text{CO}_2 + \text{NC}_5\text{H}_5 + \text{N}_2 + \text{C}$; feste Rückstände aus Kohlenstoff
Cu-Oxalat	CuC_2O_4	~242	$\text{Cu} + \text{CO}_2 + \text{CO}$
Cu-Quadratrat	CuC_4O_4	~357	$\text{Cu} + \text{CO}_2 + \text{CO} + \text{C}$; feste Rückstände aus Kohlenstoff
Cu-Malonat	$\text{CuC}_3\text{H}_2\text{O}_4$	~300	$\text{CuO} + \text{C}_2\text{H}_2 + \text{CO}_2 + \text{CO}$
Cu-Mellitat	$\text{Cu}_3\text{C}_6(\text{CO}_2)_6$	~197	$[\text{Cu}_3\text{C}_6,5\text{O}_{1,0}] + \text{CO}_2 + \text{CO}$; Hinweise auf weitere Cu-Reduktion; feste Rückstände aus Kohlenstoff
Cu-Acetat	$\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2$	~220	$\text{CuO} + \text{Cu}_2\text{O} + (\text{CH}_3)_2\text{CO} + \text{C}_2\text{H}_4\text{O} + \text{CO}_2 + \text{CO}$
Cu-Adipat	$\text{Cu}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COO})_2$	~210	$\text{CuO} +$ andere nicht spezifizierte
Cu-Tartrat	$\text{CuC}_4\text{H}_4\text{O}_6$	~227	$\text{Cu} + \text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6 +$ andere nicht spezifizierte
Cu-Benzooat	$\text{Cu}(\text{C}_6\text{H}_5\text{OO})_2$	~132	$\text{CuO} +$ andere nicht spezifizierte
Cu-Salicylaldoximat	$\text{Cu}(\text{C}_7\text{H}_6\text{O}_2\text{N})_2$	~218	$\text{CuO} +$ andere nicht spezifizierte
Cu(II)-Indolcarboxylat	$\text{Cu}(\text{C}_9\text{H}_6\text{O}_2\text{N})_2$	~218	$\text{CuO} +$ andere nicht spezifizierte

**Abbildung 6** - Thermische Zersetzung von kommerziell beschafften Kupfer(II)-Formiatpartikeln, die zur Entwicklung von Kupfer-Nanopartikeln führt.

Kommerziell erhältliches Kupferformiat-Tetrahydrat sorgt dafür, dass bei der thermischen Entmischung Kupfer-Nanopartikel in-situ entstehen und keine unerwünschten Rückstände zurückbleiben (Abbildung 6). Ob eine solche dünne Bondline eine zuverlässige Verbindung bietet, die hohen thermomechanischen Belastungen standhalten kann, und daher ein gewisses Maß an Porosität und/oder eine größere Bondlinestärke erforderlich ist, wird untersucht.

• Pastenherstellung, Sinterprozess und Testen des Interconnects

Das Pastenmischverfahren wurde in Anlehnung an die industrialisierten Prozesse und Anlagen für Löt- und Sinterpasten entwickelt. Das optimale Mischprofil unter Verwendung eines Planetenmischers wurde realisiert und verfolgt. Die optimalen Druckparameter, insbesondere für den Schablonendruck, wurden untersucht und festgelegt. Das optimale Mischprofil für die Paste ist demnach 4 Minuten bei 1000 U/min, gefolgt von 5 Minuten bei 500 U/min. Das Profil wurde auf der Grundlage des Standardmischprofils für Lotpasten mit vergleichbarer Viskosität gewählt. Es gewährleistete auch eine homogene Durchmischung der Paste, ohne das Risiko einer Überhitzung der Pasten, insbesondere beim Mischen großer Mengen, z. B. 150 g.

Als Beispiel wird hier die TGA-DSC-Analyse von drei der sechs untersuchten Sinterpasten vorgestellt. Es wird eine direkte Korrelation zwischen dem Verhalten des reinen Bindemittels und den Pasten auf der Basis von geätzten Messingpartikeln hergestellt.

Die Pasten A, B und C basieren auf geätzten Messingflakes mit 0,3 Gew.-%, 3 Gew.-% bzw. 6,4 Gew.-% Restzink. Das reine Bindemittel ist, wie bereits erwähnt, eine Kombination aus Alpha-Terpineol und PEG600 im Gewichtsverhältnis von 80:20.

Tabelle 2 - Pasten Formulierung aus geätzten Messingflakes

Sinter Paste	Zn (wt%)		Pasten formulierung (wt%)
	Original flakes	Nach dem Ätzen in 12M HCl	Binder:flakes
Paste A	2.5	0.7	65:35
Paste B	7.7	3.0	63:37
Paste C	25.7	6.4	64:36

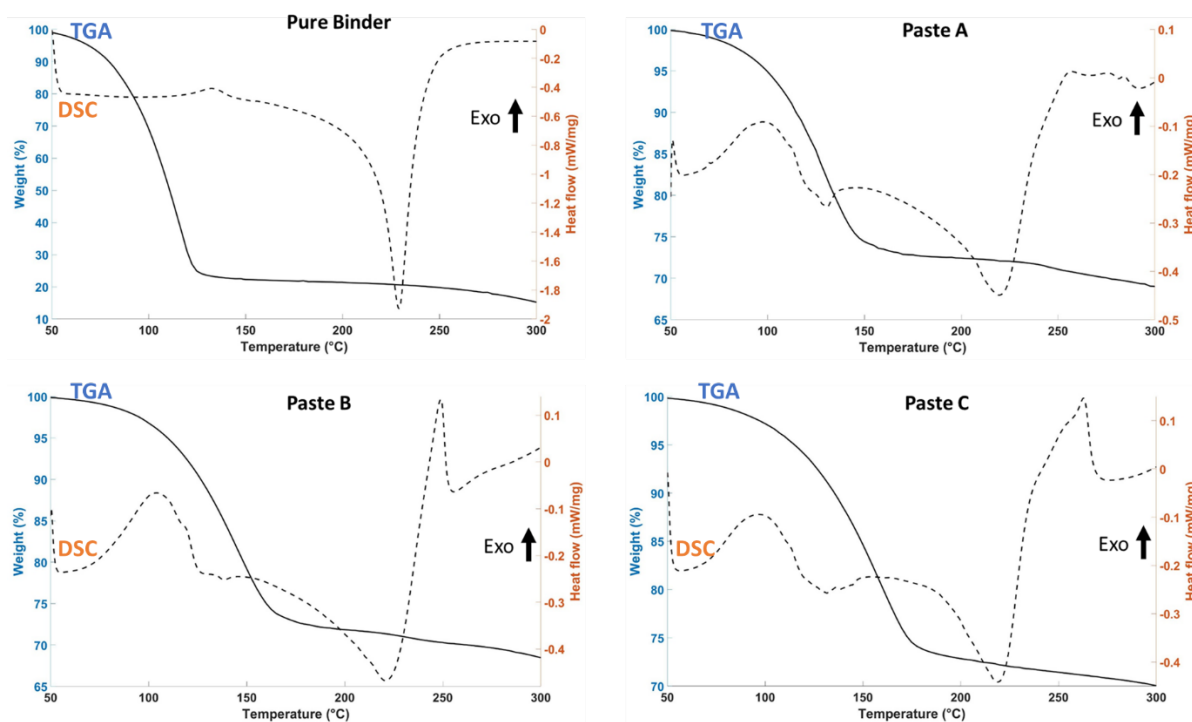


Abbildung 7 – TGA-DSC-Analyse des reinen Bindemittels und der Sinterpasten.

Die thermische Charakterisierung der Pasten erfolgt durch die TGA-Analyse unter Stickstoff. Die TGA-Kurven zeigen, dass alle drei Pasten unterhalb von 180 °C ~30 % der Masse verlieren. Eine Erhöhung der Temperatur auf 300 °C ergab einen weiteren Verlust von nur 5 %. In Anbetracht der ursprünglichen Zusammensetzung der Pasten bedeutet dies, dass bei 275 °C noch ~6 Gew.-% des Bindemittels vorhanden sind. Die verbleibende Menge an PEG600 ist vorteilhaft, da sie die Reduktion unterstützt und die Bildung von Cu-Oxiden während des Sinterprozesses verhindert, wie in den Experimenten beobachtet wurde. In ähnlicher Weise wurde auch über das Sintern von Ag berichtet, wo beobachtet wurde, dass Restmengen von PEG die Bildung von nativen Oxidschichten an den Grenzflächen im Verlauf des Sinterprozesses reduziert haben. Ein steigender Zn-Anteil in den Flakes führt zu einer höheren Zersetzungstemperatur. Dieses Phänomen lässt sich auf die Adsorption von PEG600 an Zn- und Cu-Oxidoberflächen durch Wasserstoffbrückenbindungen zurückführen, was zu einer verbesserten Stabilität der Paste führt und somit mehr Energie zum Aufbrechen der H-Bindungen erfordert. Ähnliche Beobachtungen wurden bei Pasten gemacht, die mit Kupferkomplexen auf der Basis von Kupfer(II)-formiat und Terpineol und PEG600 als Bindemittel hergestellt wurden, wobei beobachtet wurde, dass die Wasserstoffbrückenbindung die Stabilität des Komplexes verbessert und dadurch die thermische Zersetzungstemperatur erhöht. Dies führt zu einer höheren Enthalpie während der Zersetzung und wird in der unten beschriebenen DSC-Analyse beobachtet. Die DSC-Analyse der Pasten zeigt ebenfalls diesen deutlichen Unterschied im Zersetzungsverhalten des Bindemittels in den Pasten. Ein deutliches Merkmal, das zwischen dem reinen Bindemittel und den Pasten beobachtet wurde, ist der anfängliche exotherme Peak. Während dieser Peak beim reinen

Bindemittel bei $\sim 140^{\circ}\text{C}$ zu beobachten ist, verschiebt er sich bei den Pasten auf $\sim 100^{\circ}\text{C}$. In ähnlicher Weise verschiebt sich auch der endotherme Peak nach links, beim reinen Bindemittel auf $\sim 235^{\circ}\text{C}$, bei den Pasten auf $\sim 220^{\circ}\text{C}$. Dies ist ein klarer Hinweis auf die Wechselwirkung zwischen dem Bindemittel und den Flakes und scheint bei allen Pasten ähnlich zu sein. Da keine weiteren Hilfsmittel wie z. B. eine Massenspektroskopie zur Verfügung standen, konnte der genaue Grund für dieses Verhalten nicht experimentell ermittelt werden. Die Intensität der exothermen Peaks in der Nähe der Sintertemperatur variiert bei jeder der Pasten deutlich. Bei dem reinen Bindemittel wird kein solcher exothermer Peak beobachtet. Daher kann der Schluss gezogen werden, dass der exotherme Peak nicht durch die thermische Zersetzung von PEG600 entsteht. Der endotherme Peak bei $\sim 220^{\circ}\text{C}$ entspricht einem Enthalpie Wert von -193 J/g für das reine Bindemittel und -65 J/g , -47 J/g bzw. -39 J/g für Paste A, B und C. Im Falle des reinen Bindemittels und der Paste A sind keine weiteren exothermen Peaks zu beobachten. Bei der Paste B wird jedoch ein exothermer Peak bei 250°C mit einer Enthalpie von 12 J/g beobachtet. In Paste C werden zwei exotherme Peaks beobachtet: Ein Peak bei 250°C , der sich teilweise mit dem Hauptpeak bei 263°C überschneidet, was zu einer Gesamtenthalpie von 27 J/g führt. Diese exothermen Peaks werden auf die reduzierende Wirkung von PEG600 auf Cu-Oxide zurückgeführt. Eine ähnliche Analyse wurde auch für die Silbersinterpasten und die auf reinen Kupferflocken basierenden Pasten durchgeführt, die jedoch in diesem Abschlussbericht nicht im Detail behandelt werden.

• Pastenapplikation und Sinterprozessloop

Im Rahmen des Projekts wurde in erster Linie der Schablonendruck als Pastenauftragsverfahren untersucht. Das industrialisierte Silbersinterverfahren unter Druck wurde als Grundlage und Maßstab für die Entwicklung der Kupfersinterpaste und des entsprechenden Sinterverfahrens verwendet, um eine einfache Bewertung und Integration in die Industrie zu ermöglichen.

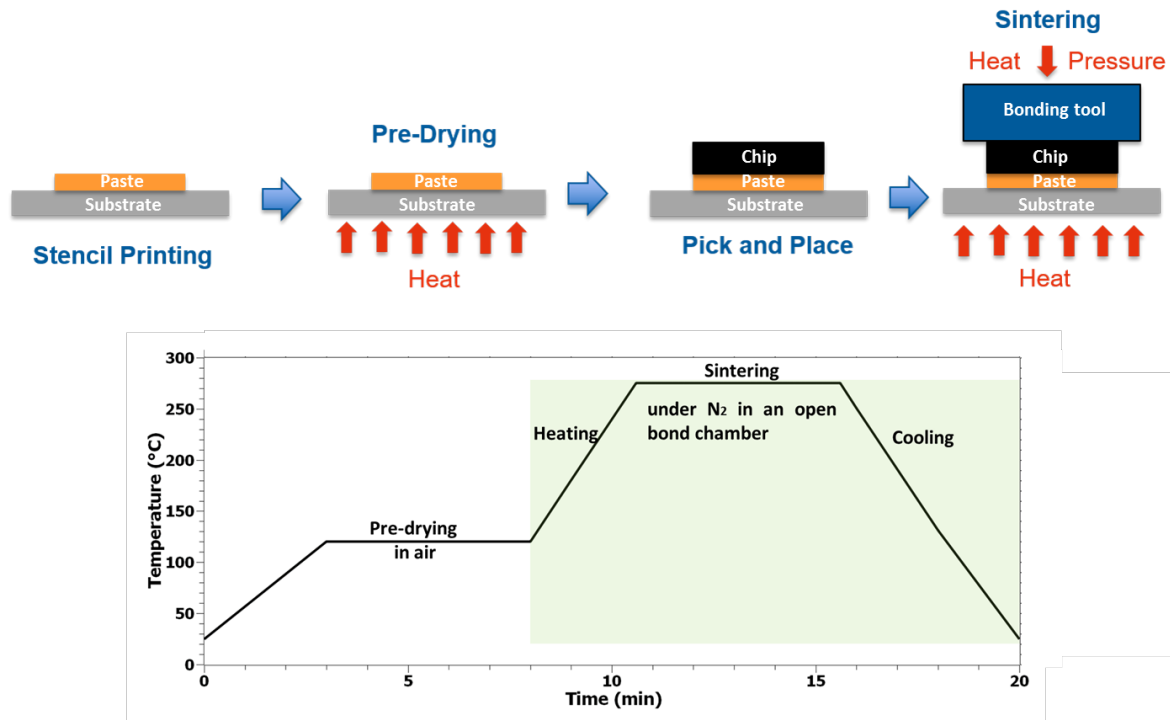


Abbildung 8- Während des Projekts verwendetes Standard-Sinterverfahren.

Der Druck der Paste erfolgt mit einem halbautomatischen Schablonendrucker (PBT, Go3v) mit einer motorisierten Doppelrakel und einer Schablonendicke von 75 µm. Eine Rakelgeschwindigkeit zwischen 13 und 90 mm/s, ein Rakeldruck von 20 N und ein Schablonenabstand von 2,3 mm/s erwiesen sich als die besten Parameter für die Pasten. Wie in Abbildung 9 dargestellt, zeigen die untersuchten Pasten ein sehr unterschiedliches Druckverhalten. Sie zeigen jedoch alle eine gute Schablonentrennung und keine Verschmutzung der Schablone während und nach dem Druck. Von allen Pasten zeigen die auf reinem Kupferformat basierenden Pasten das schlechteste Druckverhalten in Bezug auf die Formhaftung, die geätzten Messingplättchen weisen einen hohen Grad an Agglomeration auf und die auf reinen Kupferflakes basierenden Pasten zeigen die beste Leistung, allerdings mit einer höheren Tendenz zum Ausbluten als die anderen Pasten (Abbildung 10).

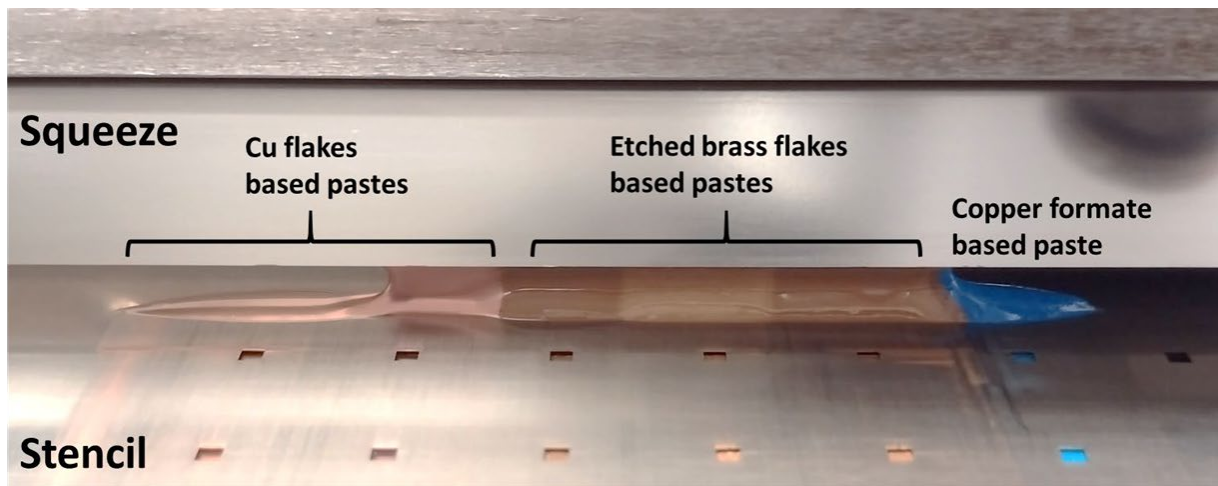


Abbildung 9 - Unterschiede in der Schablonentrennung zwischen den verschiedenen untersuchten Pasten und der Verschmutzungseffekt auf der Schablone.

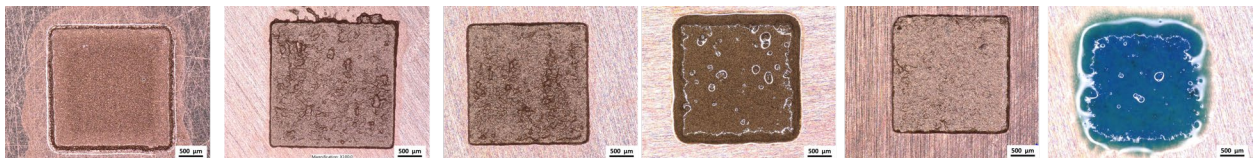


Abbildung 10 - (von links nach rechts): Lichtmikroskopische Aufnahme des Druckdepots einer auf reinen Cu-Flakes basierenden Paste, 0,3 Gew.-% Zn, 3 Gew.-% Zn und 6,4 Gew.-% Zn geätzte Messingflakes, geätzten Messingflakes und Cu-Komplex Paste und Paste auf Basis von Cu-Formiat.

WP1-2 Design of Experiments (DOE) Sinterprozess für Interconnects

• Prozess-/Material-Screening

In den ersten Versuchen wurden die kommerziellen Silbersinterpasten nach den bei Osram üblichen Sinterprofilen getestet, d.h. einem Hot-in/Hot-out-Profil (Sintern von 1mm² OSRAM-LEDs mit Au-Endmetallisierung auf Al-IMS-Substraten mit Au-Endmetallisierung bei 200°C für 60 Minuten). Dies wurde durchgeführt, um eine Grundlage für die Leistung und Zuverlässigkeit von drucklos gesinterten Verbindungen im Vergleich zu kommerziellen Silbersinterpasten für das Drucksintern zu schaffen.

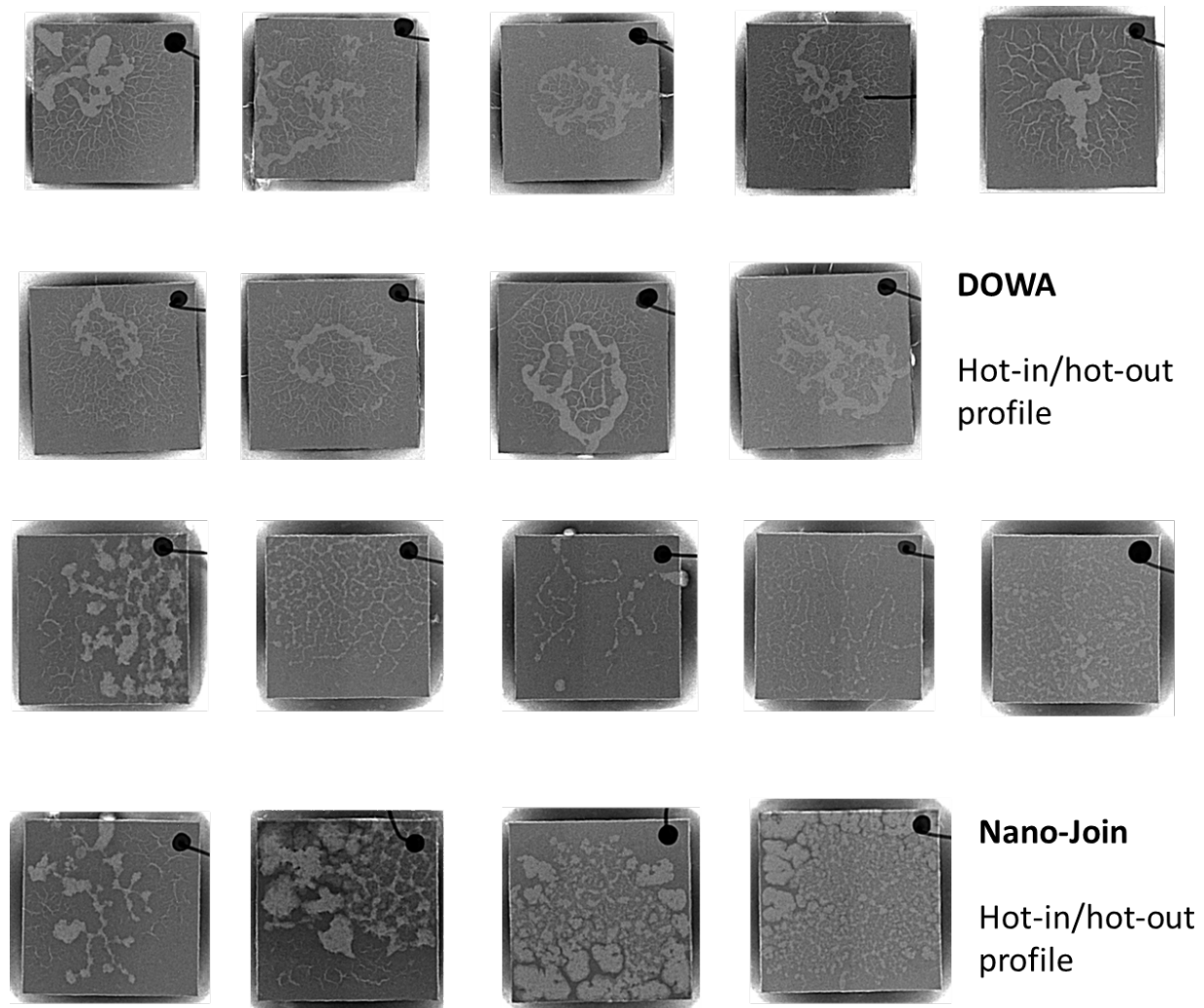


Abbildung 11 – Röntgenanalyse der gebondeten Proben nach dem Standard-Hot-in/Hot-out-Verfahren, die die Entstehung großer Voiding zeigt.

Wie aus den Röntgenbildern hervorgeht, sind sowohl in der reinen DOWA-Sinterpaste auf Nanopartikelbasis als auch in der NanoJoin-Paste auf Nanopartikel- und Salzbasis große Voiding zu erkennen (Abbildung 11). Die Voiding unterscheiden sich jedoch zwischen den Pasten. Während es sich bei DOWA um einen typischen Kanaleffekt handelt, der durch die Entgasung der organischen Bestandteile und die Schrumpfung nach dem Sintern beobachtet wird, ist bei NanoJoin großes Voiding zu sehen, das auf eine inhomogene Verteilung des Silbersalzes in der Paste hinweist, was zu einer umfangreichen lokalen Entgasung führt (Abbildung 13).

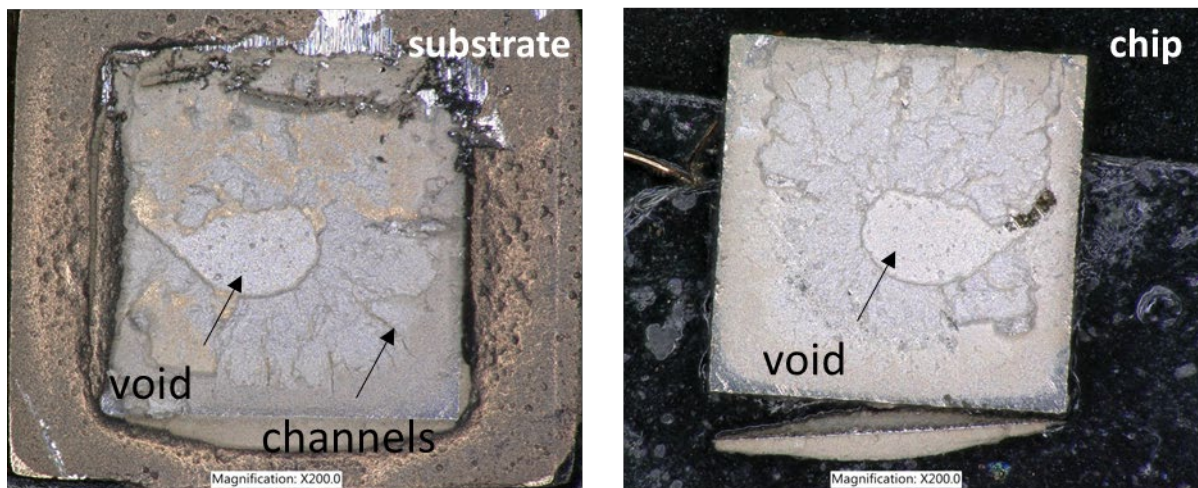


Abbildung 12 - Optisches Mikroskopiebild der schergeprüften Proben, das die im Röntgenbild beobachteten Voids und Kanalverformungen zeigt.

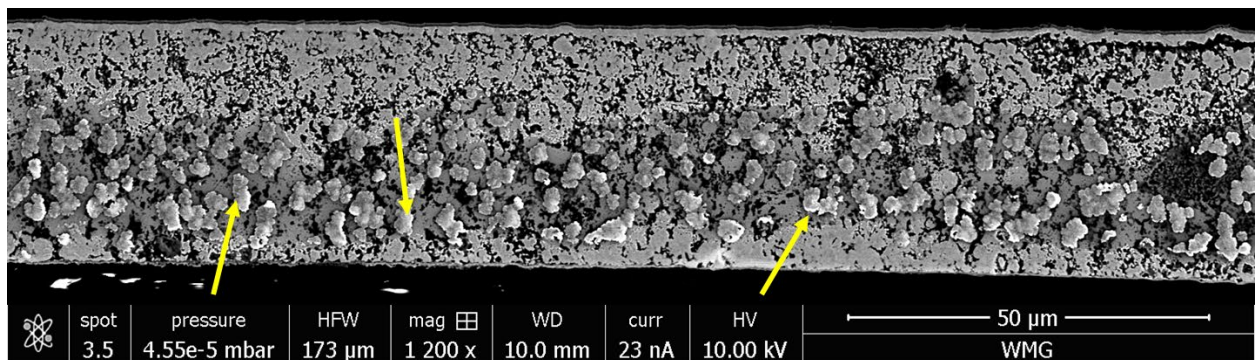


Abbildung 13 - Die REM-Aufnahme der gesinterten Mikrostruktur der NanoJoin-Silbersinterpaste zeigt das Vorhandensein von lokalisierten Partikelagglomeraten, wie sie auch im Röntgenbild zu sehen sind, was auf die inhomogene Verteilung und thermische Zersetzung des Ag-Salzes hinweist.

Um diese Probleme zu lösen, wurde das Sinterprofil für beide Pasten optimiert. Anstelle eines Hot-in/Hot-out-Profiles wurde ein 10-minütiger Vortrocknungsschritt bei 100 °C eingeführt, um die Entgasung der organischen Bestandteile in der Paste zu ermöglichen. Wie aus der Röntgenanalyse in Abbildung 14 hervorgeht, haben sich die Voids in der NanoJoin-Silberpaste drastisch verringert, und auch bei der DOWA-Paste wurde eine Verbesserung im Vergleich zum Standardprozess festgestellt, obwohl immer noch Voids zu beobachten sind.

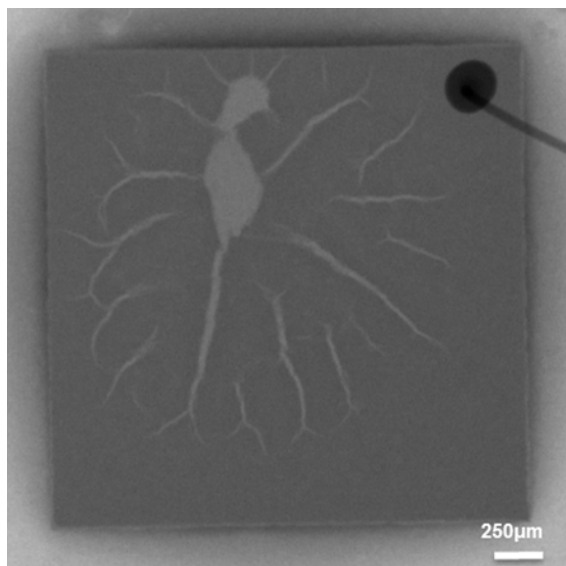
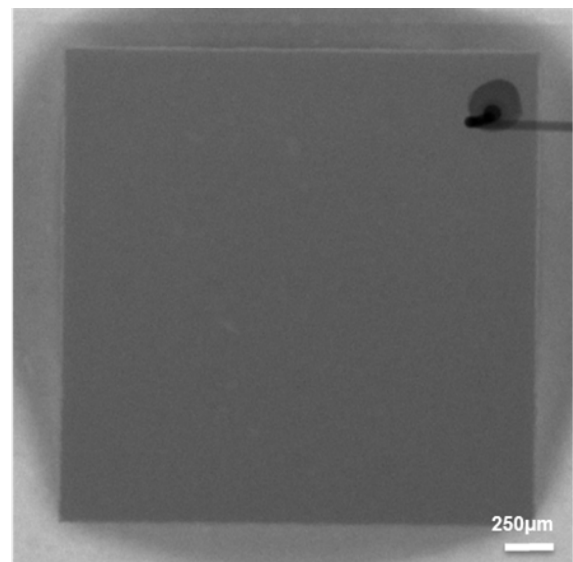
**DOWA – PL-HT-3002L****NanoJoin**

Abbildung 14 - Röntgenanalyse des gesinterten Gefüges nach dem verbesserten Sinterprofil, einschließlich eines Vortrocknungsschritts.

Trotz der in der DOWA-Sinterpaste beobachteten Porenbildung wies die Paste im gesinterten Zustand eine höhere Scherfestigkeit auf als die NanoJoin-Silbersinterpaste. Verglichen mit der auf Mikroflakes basierenden Silbersinterpaste von Heraeus, die unter 15 MPa Bindungsdruck bei 275°C für 5 Minuten an der Luft gesintert wurde, war die Scherfestigkeit der DOWA- und NanoJoin-Sinterpasten um 35 % bzw. 60 % geringer (Abbildung 15).

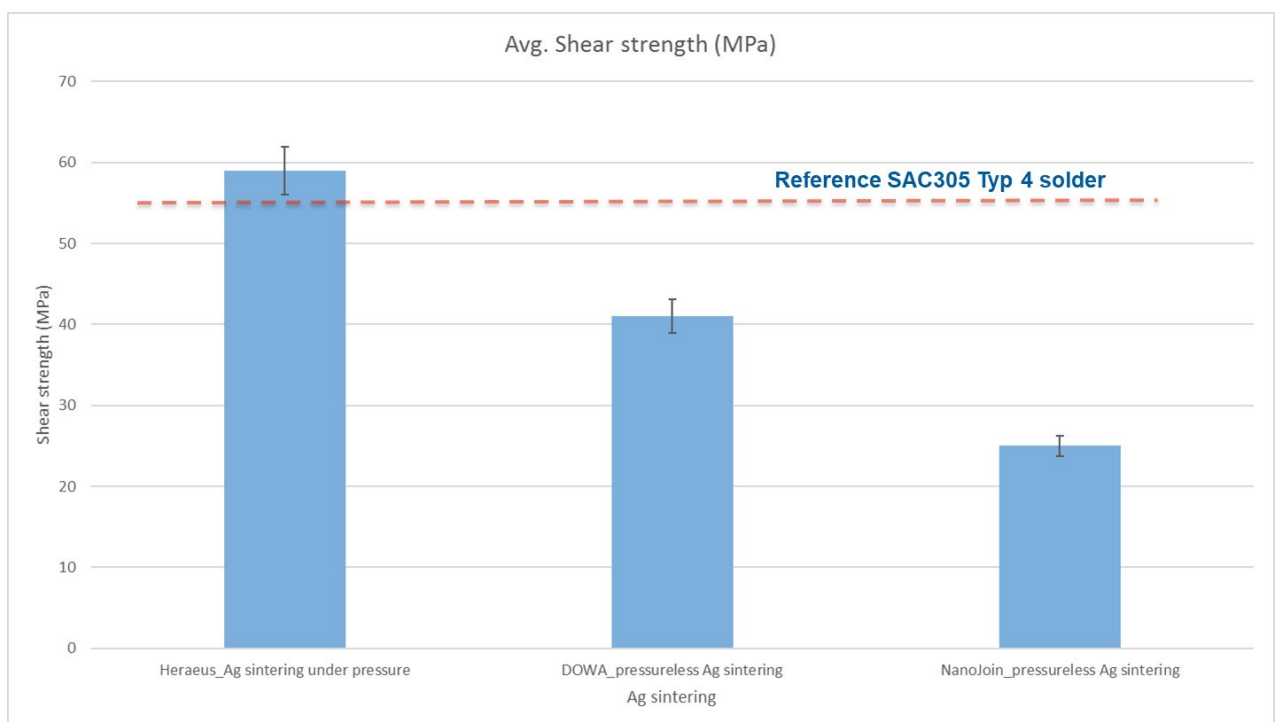


Abbildung 15 - Vergleich der Scherfestigkeit zwischen dem Lot SAC 305, der Ag-Sinterung unter Druck und den drucklosen Ag-Sinter-Pasten DOWA und NanoJoin.

Die Sinterpasten von DOWA und Heraeus wurden für die erste Zuverlässigkeitsanalyse ausgewählt und einem Thermoschock mit dem Profil +125/-40°C mit einer Verweilzeit von 30 Minuten, Luft-Luft, ausgesetzt. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die drucklos gesinterten Proben im Vergleich zu den unter Druck gesinterten Proben drastisch verschlechterten, wie in Abbildung 16 dargestellt.

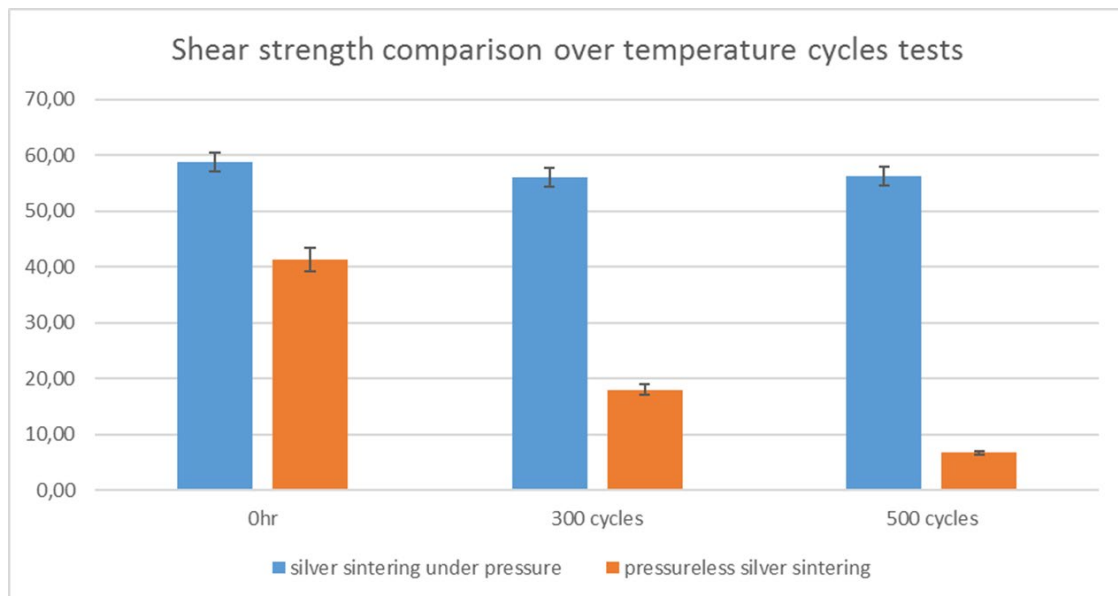


Abbildung 16 - Vergleich der Scherfestigkeit in Abhängigkeit von den Temperaturschockbedingungen

In diesem Zusammenhang wurden sechs verschiedene, an der THI entwickelte Sinterpasten auf der Basis von Kupfer-/geätzten Messingflakes und eine kommerziell erhältliche Silbersinterpaste auf der Basis von Mikroflakes für den Testaufbau in Betracht gezogen (Tabelle 3).

Tabelle 3 - Untersuchte Pasten und die jeweiligen Vortrocknungs- und Sinterparameter.

Sl.No	Paste	Pre-drying	Sintering paramaters
1	Ag microflakes	140°C – 20 min – air	275°C_5 min_ 10/20MPa_nitrogen
2	Original Cu	100°C – 5 min - air	275°C_5 min_ 10MPa_nitrogen
3	0.3 wt % Zn		
4	3 wt% Zn		
5	6.4 wt% Zn		
6	0.3 wt% Zn + Cu formate A2P complex	140°C- 10 min- formic acid enriched nitrogen	250 °C_ 5 min_20MPa_formic acid enriched Nitrogen
7	Copper formate	100°C – 5 min - air	250°C_5min_20MPa bonding pressure

Der REM-Querschnitt durch die verschiedenen oben genannten Pasten zeigt die Unterschiede im Sintergefüge. Die auf Flakes basierenden Pasten weisen selbst beim Sintern unter gleichen Bedingungen ein sehr unterschiedliches Sintergefüge auf, was auf den Einfluss von Oberflächenmodifikationen und des Restzinks in den Flakes auf die Sinterfähigkeit hinweist (Abbildung 17). Dies war das Thema der Doktorarbeit von Herrn Sri Krishna Bhogaraju, der im Projekt IQLED an der Entwicklung und Charakterisierung der Kupfersinterpasten gearbeitet hat.

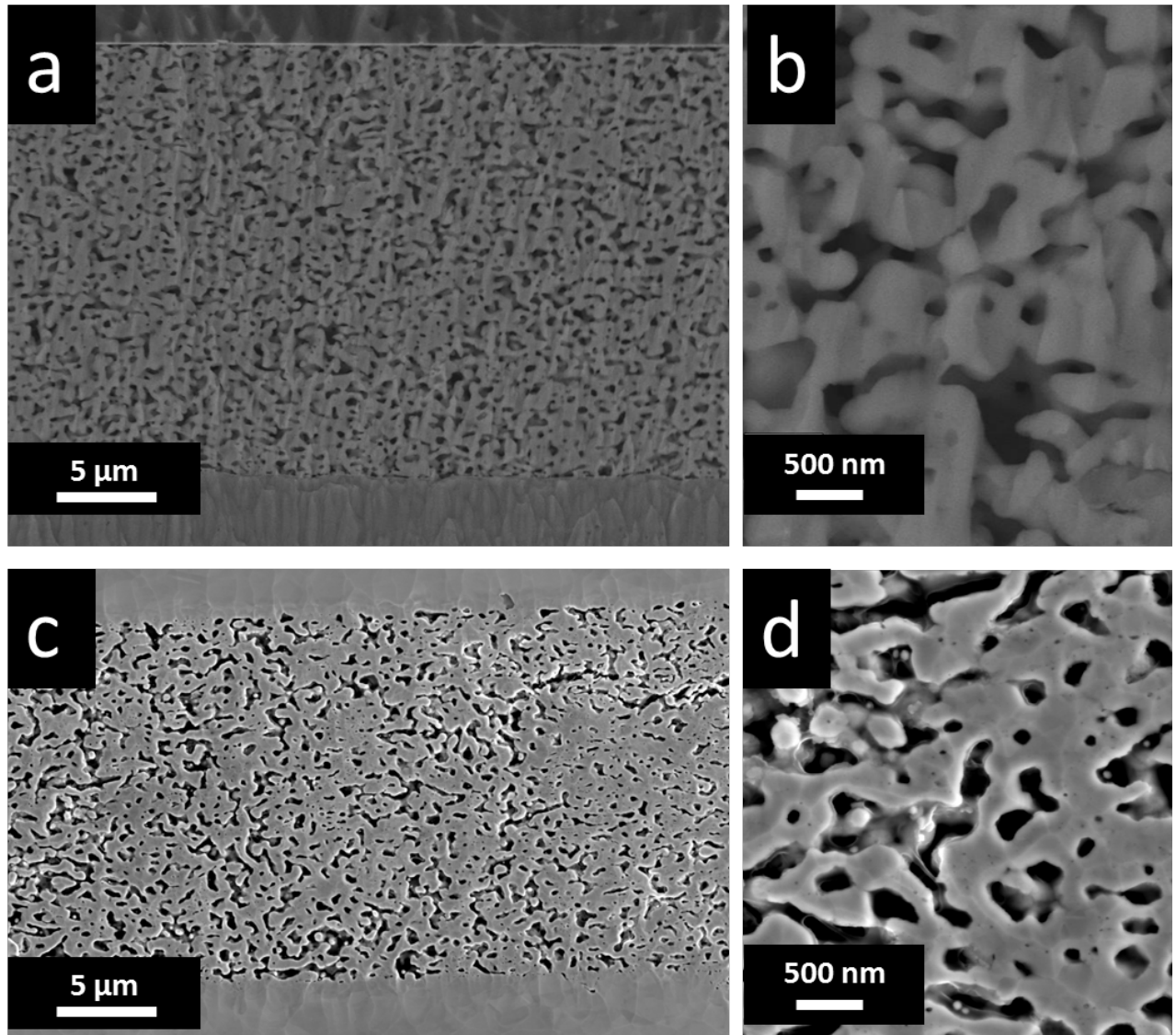


Abbildung 17 - REM-Aufnahme des ionenstrahlgeschliffenen Querschnitts von (a) Heraeus Ag-Sinterpaste auf Mikroflakesbasis, (b) vergrößertes Bild der gesinterten Verbindung, (c) in-house entwickelte geätzte Sinterpaste auf Messingflakesbasis mit 3 Gew.-% Rest-Zn und (d) vergrößertes Bild der gesinterten Verbindung, das eine vergleichbare gesinterte Mikrostruktur mit einer flakesartigen Morphologie zeigt. In beiden Fällen wurde die Sinterung unter 20 MPa Bonddruck für 5 Minuten bei 275°C in einer offenen Kammer unter 3L/min Stickstofffluss durchgeführt.

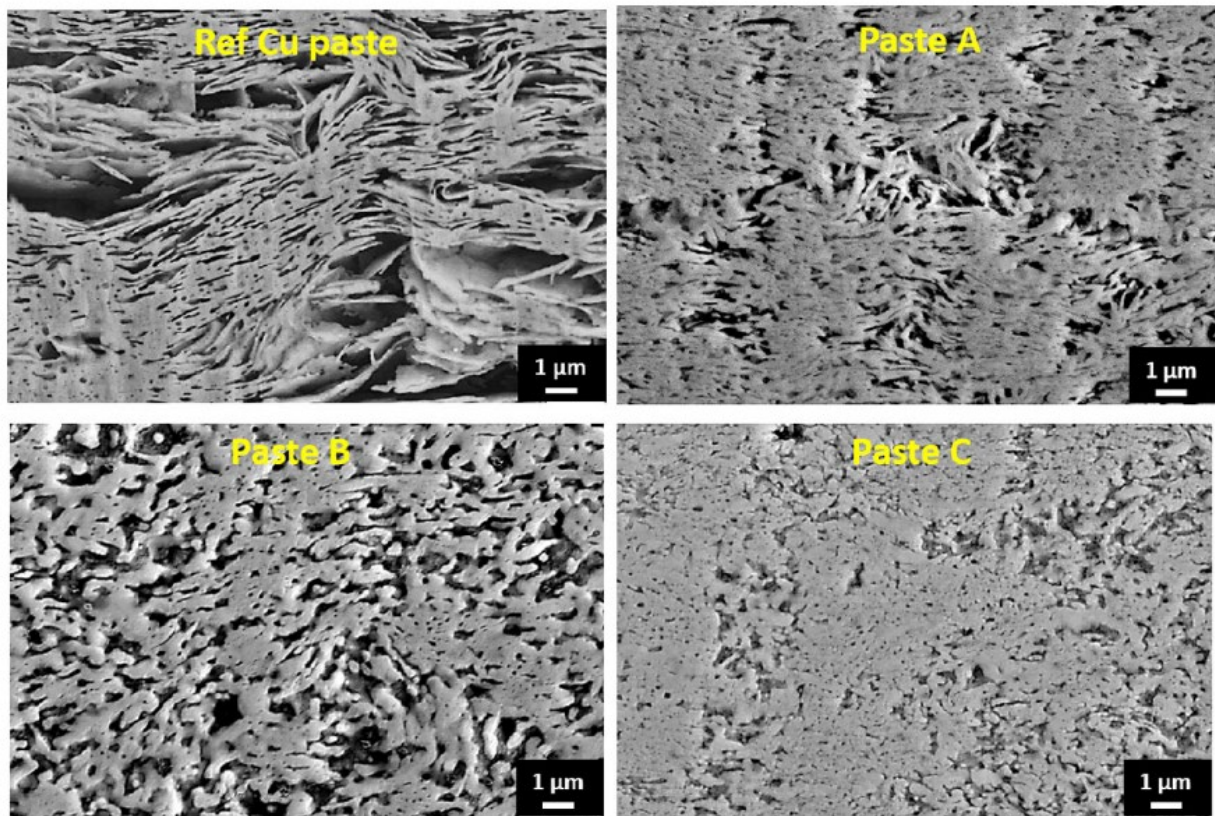


Abbildung 18 - Gesintertes Gefüge von (a) Ref-Cu-Paste, (b) Paste A, (c) Paste B und (d) Paste C, gesintert unter 10 MPa Bindungsdruck bei 275 °C für 5 min.

Wie aus Abbildung 18 hervorgeht, wiesen die verschiedenen Werkstoffe unter den gleichen Sinterbedingungen ein einzigartiges und unterschiedliches Sintergefüge auf. Die Paste C mit dem höchsten Rest Zn-Gehalt wies den höchsten Verdichtungsgrad aller Pasten auf. Die reinen Kupferflakes zeigten ein einzigartiges Verhalten, indem sie sich übereinanderstapelten, jedoch wurde beim Sintern mit 10 MPa Bonddruck große Porosität/Voiding beobachtet.

• Arraysintern

Der Array-Bonding-Prozess wurde in zwei verschiedenen Versuchsaufbauten durchgeführt.

Bei der ersten wurden Dummy-Testchips mit einem Footprint von $2,5 \text{ mm}^2$ und 25 Chips in einem 5×5 -Array gesintert. Der zweite Aufbau umfasste aktive Chips, 1 mm^2 große LEDs von Osram, die in einer 3×3 -Matrix angeordnet waren, d. h. insgesamt 9 LEDs, wie in Abbildung 21 gezeigt.

Die Ergebnisse werden im Folgenden erläutert. Das Array-Sintern erfolgt mit Hilfe eines speziellen, für den Fineplacer Sigma entwickelten Bonding-Tools. Dieses Werkzeug mit einer Abmessung von $16,5 \text{ mm} \times 16,5 \text{ mm}$ ermöglicht das Sintern von bis zu 25 Si_3N_4 -Chips mit einem Footprint von je $2,5 \text{ mm}^2$ auf ein Subtrat und das gleichzeitige Sintern unter Druck (Abbildung 19).

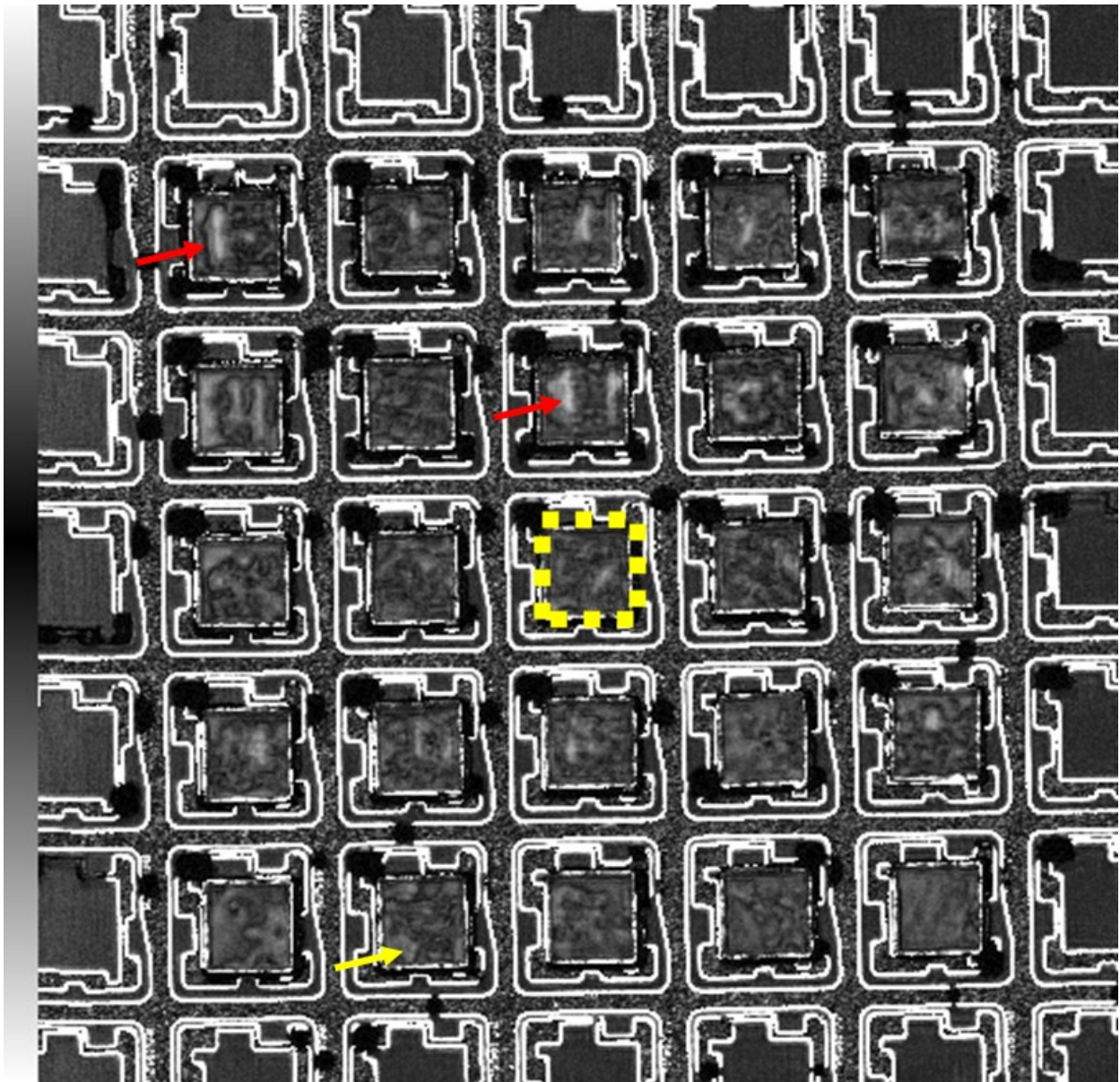


Abbildung 19 – SAM-Abbildung einer Array-gebundenen Probe mit 25 Si_3N_4 -Chips mit einem Footprint von $2,5 \text{ mm}^2$, die auf ein Keramiksubstrat von Osram gesintert wurden. Gelbe Pfeile zeigen die Bereiche mit hoher Porosität und rote Pfeile zeigen Delaminationen. Der gestrichelte gelbe Kasten zeigt den Umriss des Si_3N_4 -Chips.

Das Array-Bonden ist jedoch eine Herausforderung, wenn die Druckqualität des Pastendepots nicht einheitlich ist. In einem solchen Fall ist die Werkzeugspitze nicht in der Lage, die Schwankungen in den Bondliniendicken auszugleichen, selbst bei Verwendung einer Druckausgleichsschicht in Form einer Teflon/Polyimid-Folie. Im Laufe des Projekts war es jedoch nicht möglich, die Kompensationsgrenze für den Sigma-Bonder zu ermitteln, anders als bei den standardmäßigen Sinterdrücken in der Industrie. Typischerweise können jedoch bei industrialisierten Sinterpressen wie Budatec oder AMX bei Verwendung einer 1 mm dicken Teflonfolie Dickenschwankungen bis zu 100 µm kompensiert werden. Dies ist beim Sigma Bonder aufgrund der Begrenzung des Z-Verfahrwegs des Bondtisches nicht möglich. Mit einer besseren Kontrolle des Drucks mit dem halbautomatischen Drucker an der THI wurden 25 Chips gesintert und 5 von ihnen in einer Reihe quer geschnitten, um die Effektivität des Array-Bondens zu verstehen. Wie in Abbildung 20 - REM-Analyse einer Reihe von gesinterten Verbindungen unter 25 Chips, die in einem 5x5-Array unter Drucksintern gesintert wurden. Die gelben Kästchen zeigen die inhomogen gesinterten Bereiche, die von (1) hochporösen Bereichen bis zu (4,5) nahezu massiven gesinterten Verbindungen unter den gleichen Sinterbedingungen reichen. Zu sehen ist, ist die Dicke der Bondlinie sehr gleichmäßig. Die gelb hervorgehobenen Bereiche mit hoher Porosität, die auf den REM-Bildern im Detail zu sehen sind, sind eine Anomalie, die auf die Pastenformulierung und das Verhalten selbst und nicht auf das Verfahren zurückzuführen ist. Diese Tests wurden mit der neu entwickelten Paste durchgeführt, die eine Kombination aus Kupferkomplexen und geätzten Messingflakes ist, und die ungleichmäßige Verteilung des Komplexes und/oder die ungleichmäßige thermische Zersetzung desselben kann zu solchen Hohlräumen oder schlecht gesinterten Bereichen führen.

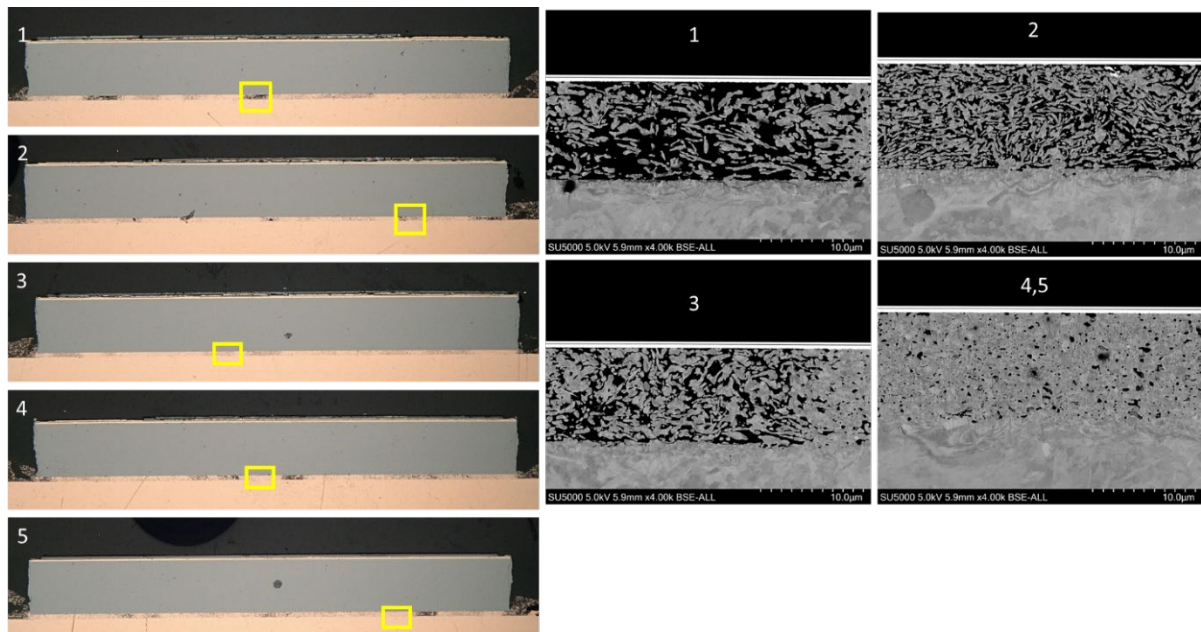


Abbildung 20 - REM-Analyse einer Reihe von gesinterten Verbindungen unter 25 Chips, die in einem 5x5-Array unter Drucksintern gesintert wurden. Die gelben Kästchen zeigen die inhomogen gesinterten Bereiche, die von (1) hochporösen Bereichen bis zu (4,5) nahezu massiven gesinterten Verbindungen unter den gleichen Sinterbedingungen reichen.

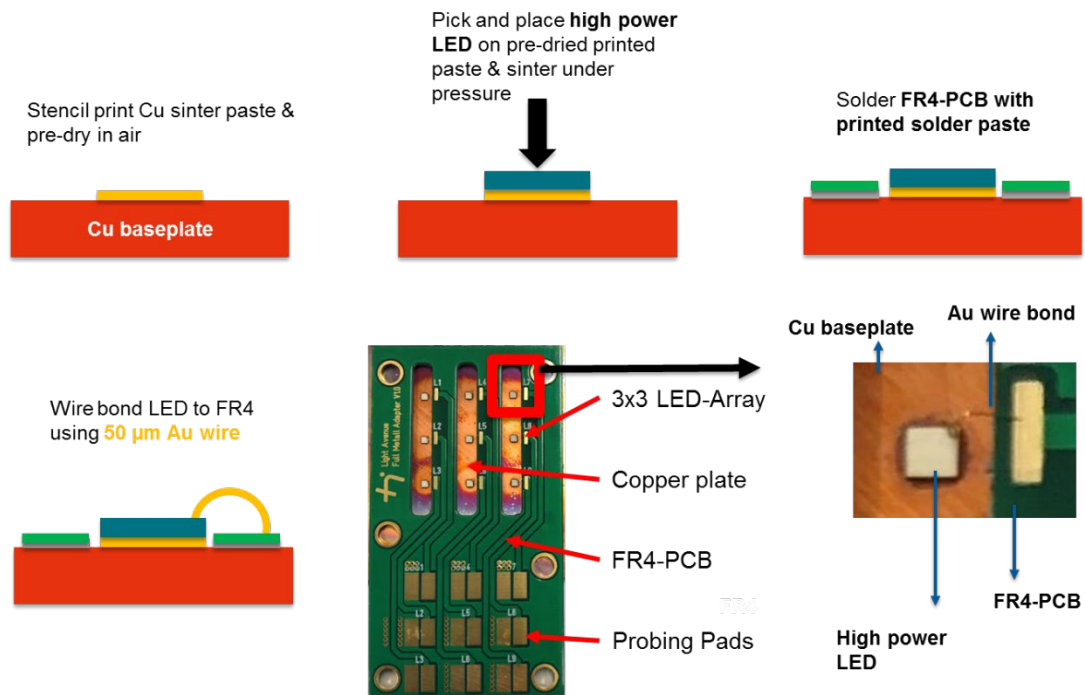
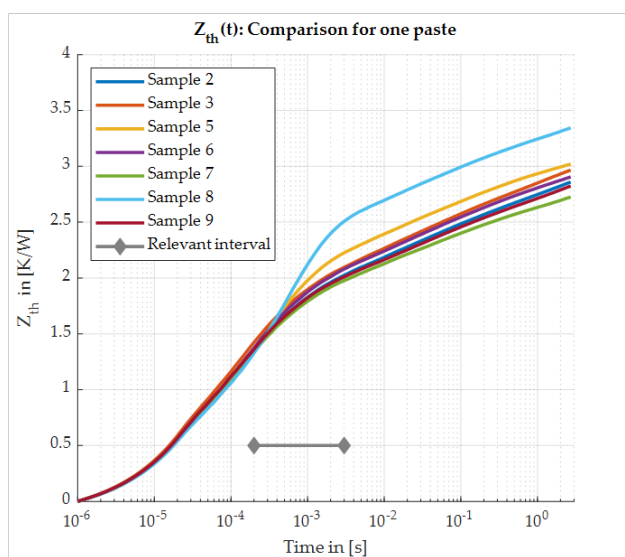


Abbildung 21 - Schematische Darstellung des Sinter Prozesses und des DUT Aufbaus.

Measured $Z_{th}(t)$:



SAM:

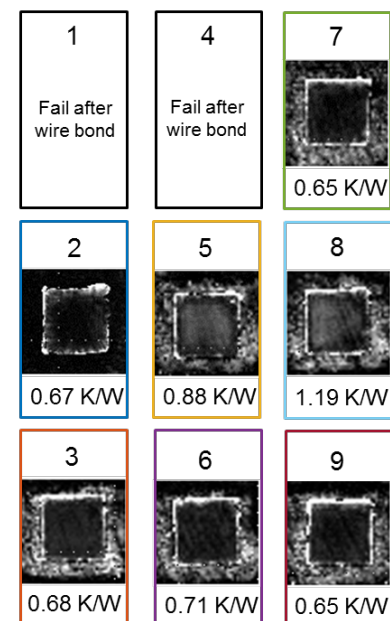


Abbildung 22 - TTA und Akustik Mikroskopie Analyse von Ref Cu Paste nach dem Array Bonding verfahren.

Die ersten 0-Stunden-Messungen der TTA nach dem Array-Bonding (Abbildung 22) zeigten, dass der Prozess weitgehend stabil blieb. Mit Ausnahme von 2 LEDs an den Positionen 5 und 8 zeigten alle anderen LEDs eine vergleichbare Leistung. Aus der SAM-Analyse ging hervor, dass die LEDs 5 und 8 im Vergleich zu den anderen einen höheren Porositätsgrad aufweisen.

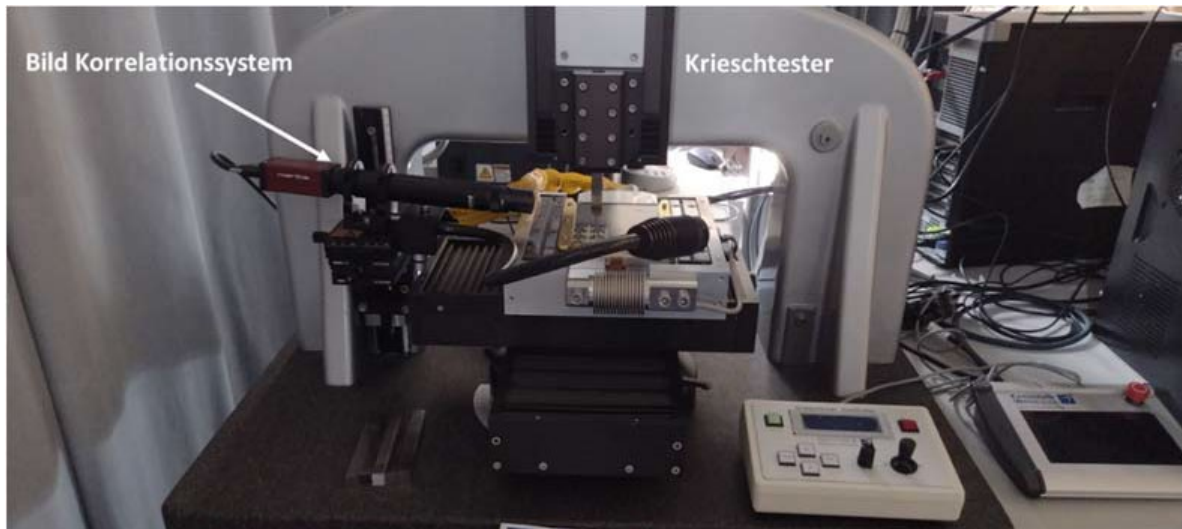
WP1-3 Interconnect Charakterisierung und Anpassung Material und Prozess**• Messung Scherkriechen**

Abbildung 23 – Integrierte Bild Korrelationssystem und Kriechtester.

Dabei wird eine Kraft mit einem vorher eingestellten Kraftanstieg (N/Sekunde) auf das zu prüfende Objekt aufgebracht, nachdem es auf die gleiche Weise angefahren wurde, und von PC nach Erreichen eines Sollwerts konstant gehalten. Es entsteht ein "Plateau" bis zu dem Moment, in dem sich die Probe vom Untergrund zu lösen beginnt. An diesem Punkt nimmt die Geschwindigkeit wieder zu, bis zu dem vom Bediener zugelassenen Höchstwert. Die Kurve der Verformung über die Zeit bis zum vollständigen Versagen des Bauteils gibt Aufschluss über die Kriechverformung des Bauteils.

Mikro-Flakes basierende Silberverbindung würde mit 15 MPa für 5 Minuten bei 275°C gesintert. Die Kriechversuche wurden mit einer konstanten Kraft von 350N bei Raumtemperatur

durchgeführt. Die Belastung wurde mit 1N/s erreicht und von der Maschine mit einer Toleranz von ± 1 N konstant gehalten.

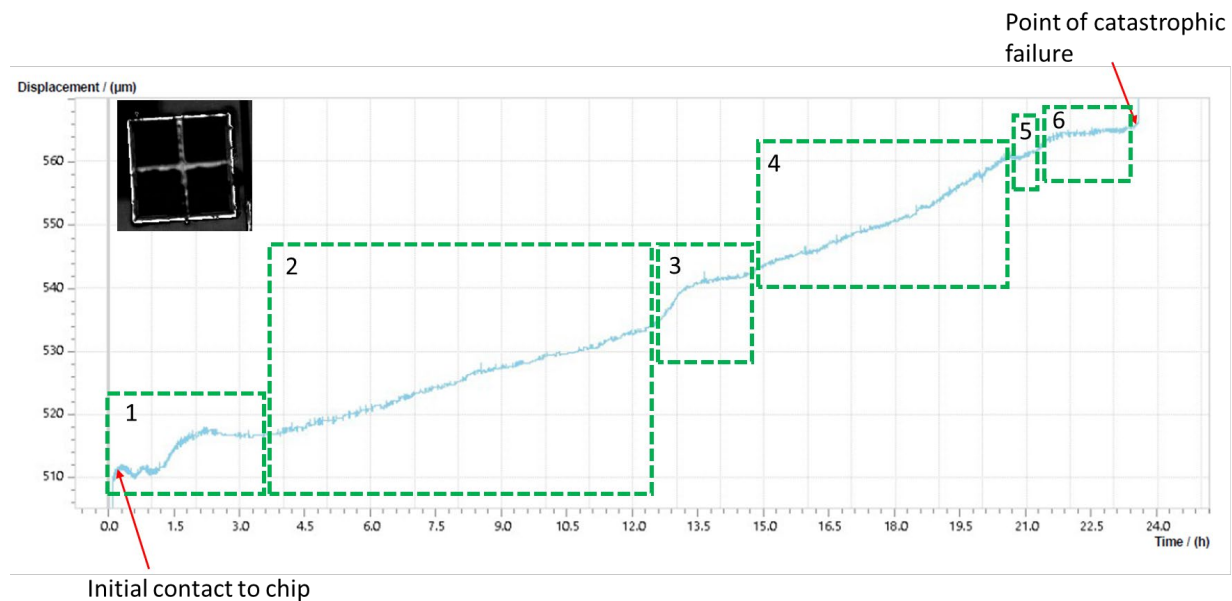


Abbildung 24 - (inset) - SAM-Analyse der gesinterten Silberverbindung und die Kriechverformungskurve der gesinterten Verbindung, die unter einer konstanten Last von 350N bei Raumtemperatur getestet wurde. Die Kurve ist in 6 Bereiche unterteilt, die entsprechend nummeriert sind.

Die Kriechverformungskurve ist in Abbildung 24 dargestellt. Die Kurve ist in 6 verschiedene Bereiche unterteilt, die die Veränderung der Kriechverformung in Abhängigkeit von der Zeit zeigen. Der anfängliche Kontaktpunkt und der Punkt des katastrophalen Versagens der Probe sind durch die roten Pfeile dargestellt. Für diese Messungen wurden 5mmx5mm große SiC-Bauteile mit Au-Endmetallisierung betrachtet, die auf Cu-Substrate mit Au-Endmetallisierung gesintert wurden. Im ersten Segment wurde über einen Zeitraum von ~3,5 Stunden eine Kriechverformung von ~6,74 μm gemessen. In Segment 2 wurde über einen Zeitraum von ~9 Stunden eine Kriechverformung von ~17,3 μm , in Segment 3 über einen Zeitraum von ~2,5 Stunden eine Kriechverformung von ~8,5 μm , in Segment 4 über einen Zeitraum von ~6 Stunden eine Kriechverformung von ~18,5 μm , in Segment 5 über einen Zeitraum von 1 Stunde eine Kriechverformung von ~3 μm und schließlich in Segment 6 vor dem katastrophalen Versagen eine Kriechverformung von ~2 μm über einen Zeitraum von 2 Stunden gemessen. Es muss darauf hingewiesen werden, dass es sich hierbei um eine manuelle Segmentierung und Extrapolation der Daten handelt und dass weitere Untersuchungen und Versuchsreihen durchgeführt werden, um das Gerät, seine Fähigkeiten und die Interpretation der Daten besser zu verstehen.

Bei der mit Silber gesinterten Verbindung kam es nach 24 Stunden zu einem Totalausfall. Die bei Raumtemperatur durchgeführten Tests ergaben eine Gesamtkriechverformung von ~56 μm in der Verbindung unter einer konstanten Last von 350N über einen Zeitraum von 24 Stunden.

Das Arbeitspaket konnte nicht in vollem Umfang wie im Projekt gewünscht abgeschlossen werden und es konnten keine Aktivitäten des Kriechtesters zusammen mit dem

Bildkorrelationssystem durchgeführt werden. Die ersten Experimente, die jetzt abgeschlossen sind, sind jedoch vielversprechend und bieten eine Grundlage für eine detaillierte Untersuchung der verschiedenen Sinterpasten und ihrer Abhängigkeit von den Sinterprozessparametern und der Prüfumgebung (Temperatur), um ein detailliertes Verständnis der Kriechverformung in der gesinterten Verbindung zu entwickeln.

• Stressmessungen durch RAMAN-Spektroskopie

Die ungebondeten Si-Testchips von Osram mit einer Grundfläche von 1,5x1,6mm und einer Dicke von 120µm wurden im Anlieferungszustand gemessen, um die Spannung im ungebondeten Chip zu bestimmen. 5 Chips wurden zufällig aus den verschiedenen Teilen des Wafers ausgewählt und über zwei Diagonalen D1 und D2 gemessen, wie in Abbildung 25 dargestellt. Die Ergebnisse zeigten eine Druckspannung in der Mitte und eine asymmetrische Spannungsverteilung. Eine maximale Spannungsdifferenz entlang der Diagonale von 108 ± 14 MPa wurde im Ausgangszustand aufgezeichnet, um die Spannung im unverbundenen Chip zu bestimmen.

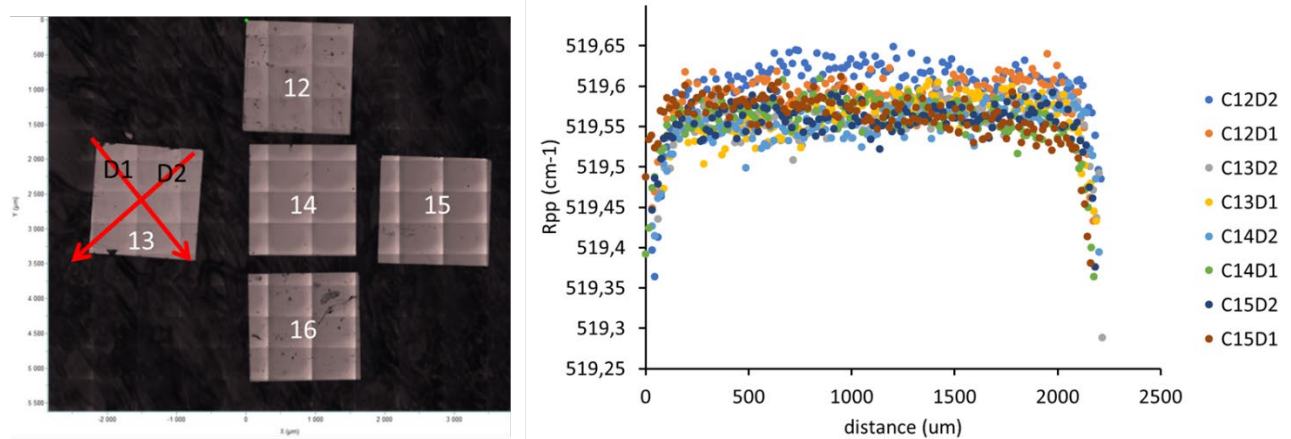


Abbildung 25 - µ-Raman-Analyse der Si-Chips

Nach den ersten Spannungsmessungen wurden die Chips mit zwei Kupfersinterpasten auf Flakebasis geklebt. Die Bondbedingungen waren 15 MPa für 5 Minuten bei 275°C in einer offenen Bondkammer auf dem Sigma-Bonder. Die Ergebnisse zeigten Spannungen im Bereich von 560-651 MPa (Abbildung 26). Zwei verschiedene Probensätze wurden für die folgenden Tests vorbereitet.

Probensatz 1 - Verständnis des Kriechverhaltens bei Lagerung bei Raumtemperatur

Probensatz 2 - Verständnis des Kriechverhaltens unter Temperaturschockbedingungen

Results of Raman – direct after sintering

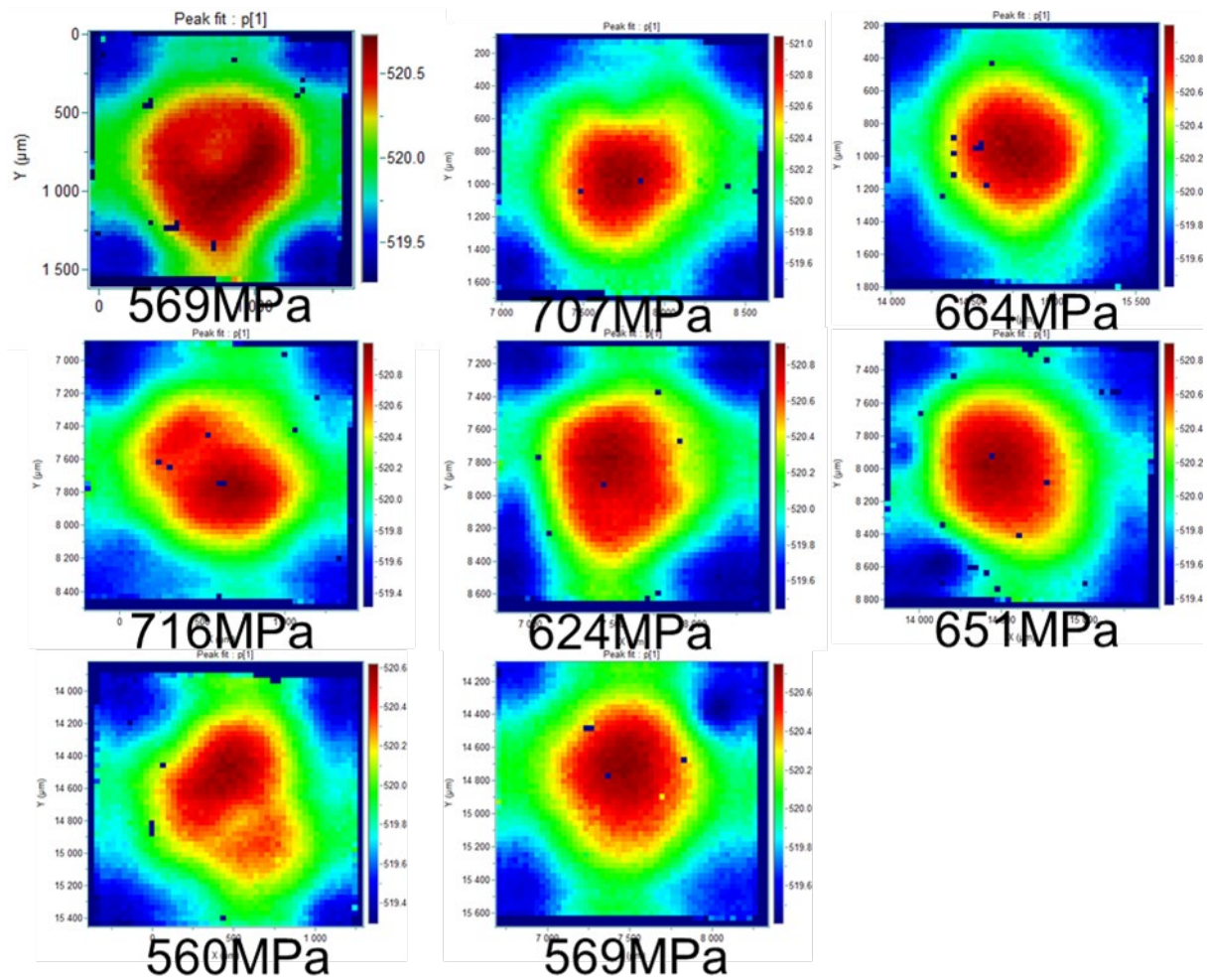


Abbildung 26 - μ -Raman-Analyse der gesinterten Proben mit Kupfersinterpaste auf Mikroflakes-Basis.

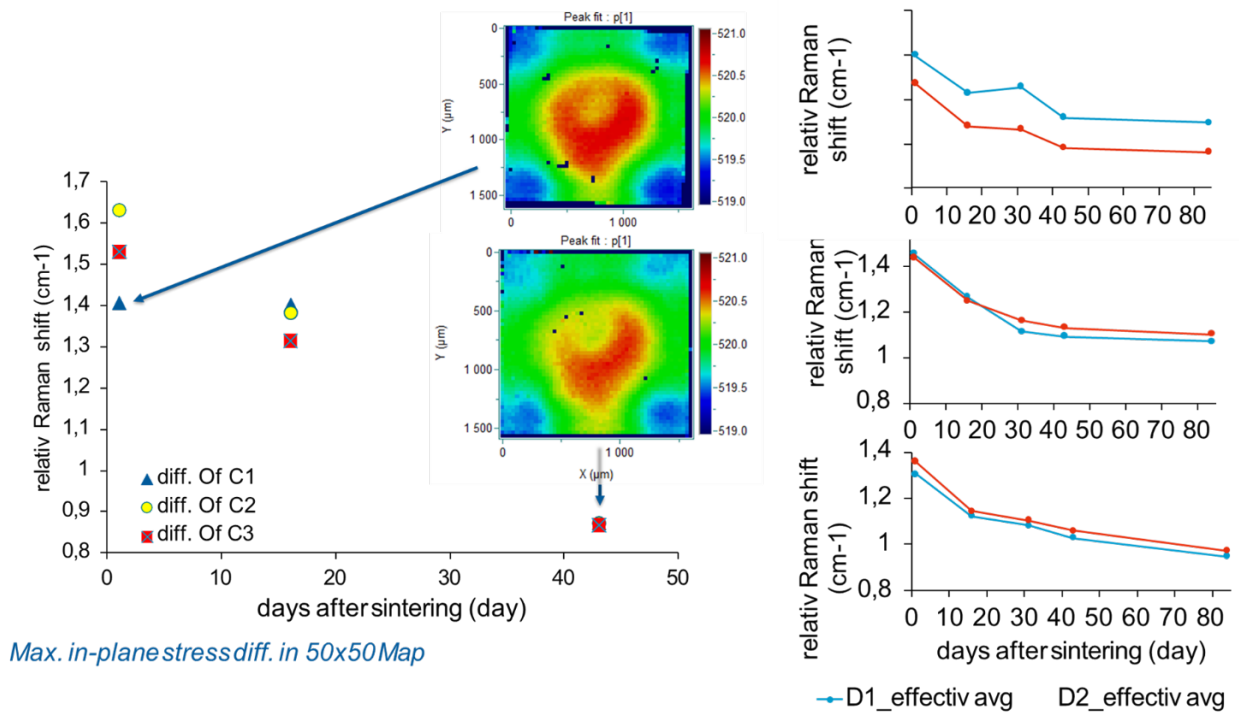


Abbildung 27 - Spannungsentwicklung in der Ebene als Funktion der Zeit nach dem Sintern.

Nach den Messungen im Ist-Zustand wurden die Spannungen in der Ebene bei Raumtemperatur über einen Zeitraum von 84 Tagen für die gesinterte Kupferverbindung auf Flake Basis überwacht, die durch 5-minütiges Sintern bei 275 °C unter einem Bonddruck von 15 MPa auf dem Sigma-Bonder in einer offenen Bondkammer mit einem Stickstofffluss von 3 l/min hergestellt wurde. Die Probe bestand aus Si-Chips, die auf 1,5 mm dicke blanke Kupfersubstrate in einer 3x3-Anordnung gesintert wurden. Es ist zu beobachten, dass die gesinterte Verbindung selbst bei Raumtemperatur über den gesamten Testzeitraum ein Kriechen zeigt, was durch die Abnahme der gemessenen relativen Raman-Verschiebung über die beiden Diagonalen angezeigt wird (Abbildung 28).

Die SAM-Analyse des gesinterten Interconnects zeigt das Vorhandensein von vereinzelten Voids, aber im Allgemeinen eine akzeptable Sinterqualität und Homogenität über das 3x3-Array. Die Probe C9, die einen großen Defekt entlang der Kante aufweist, wurde für die Messungen nicht

berücksichtigt. Die effektive Verschiebung über die Diagonalen entlang der Proben ist auf der rechten Seite dargestellt.

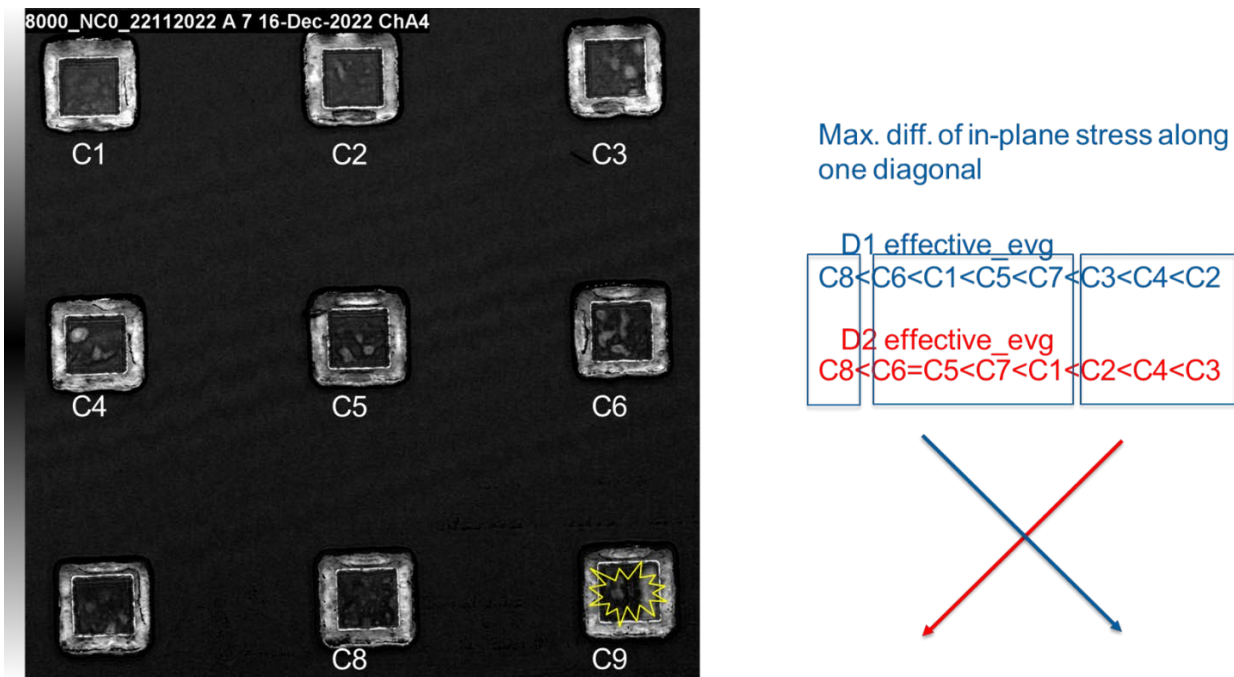


Abbildung 28 - SAM- und μ -Raman-Analyse der gesinterten Verbindung.

Zusätzlich zu der oben erwähnten Probe wurde eine weitere Probe mit den gleichen Klebparametern und der gleichen Kupfersinterpaste hergestellt, um Temperaturschocktests durchzuführen und die Entwicklung der Spannungen im Verbund nach einem Temperaturschock zu untersuchen. Die SAM-Bilder der Ausgangsbedingungen und nach 50 und 150 Thermoschockzyklen sind in Abbildung 20 dargestellt. Alle Proben zeigen ein gleichmäßiges und homogenes gesintertes Interconnect im Null-Stunden-Zustand und im Falle von C1, C2 und C3 werden bereits nach 50 Thermoschockzyklen Delaminationen beobachtet. Wie in Abbildung 22 zu sehen ist, entspannt sich die Spannung entlang beider Diagonalen nach den Thermoschockzyklen. Obwohl die SAM-Analyse keinen großen Unterschied zwischen den gesinterten Verbindungen machen kann, zeigen die Raman-Messungen eindeutig einen Unterschied in der Leistung der gesinterten Verbindungen, was darauf hindeutet und bestätigt, dass es sich um eine empfindlichere zerstörungsfreie Prüftechnik handelt. Sie ist jedoch zeitaufwändig und reagiert im Vergleich zu TTA oder SAM sehr empfindlich auf die Umgebungsbedingungen der Prüfung.

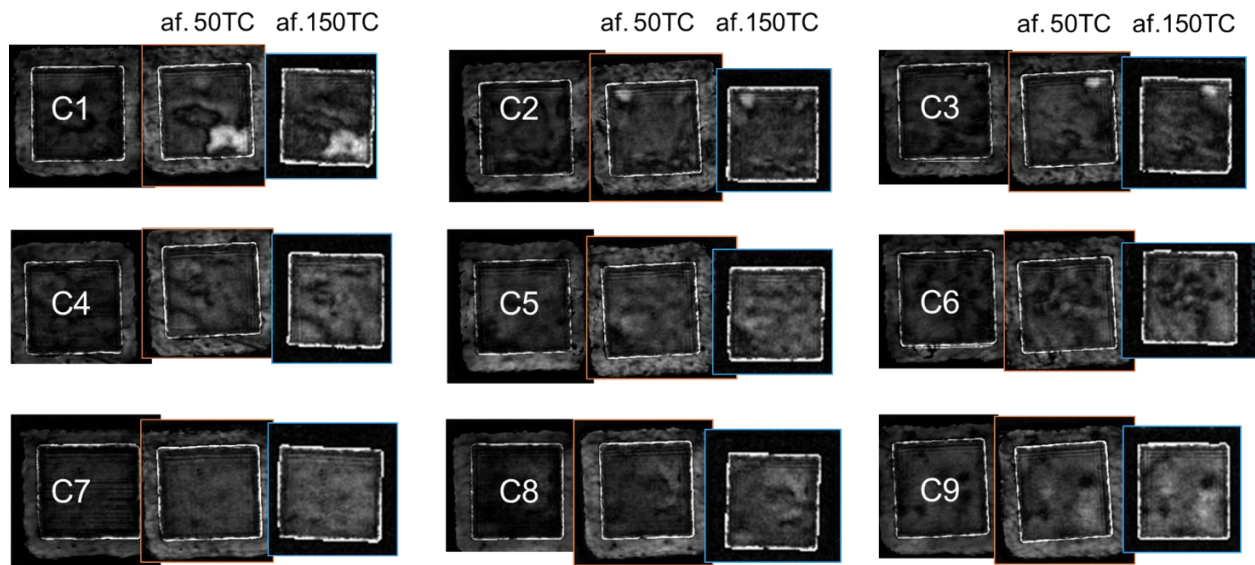


Abbildung 29 - SAM-Analyse der gesinterten Verbindungen im gesinterten Zustand und nach Thermoschock.

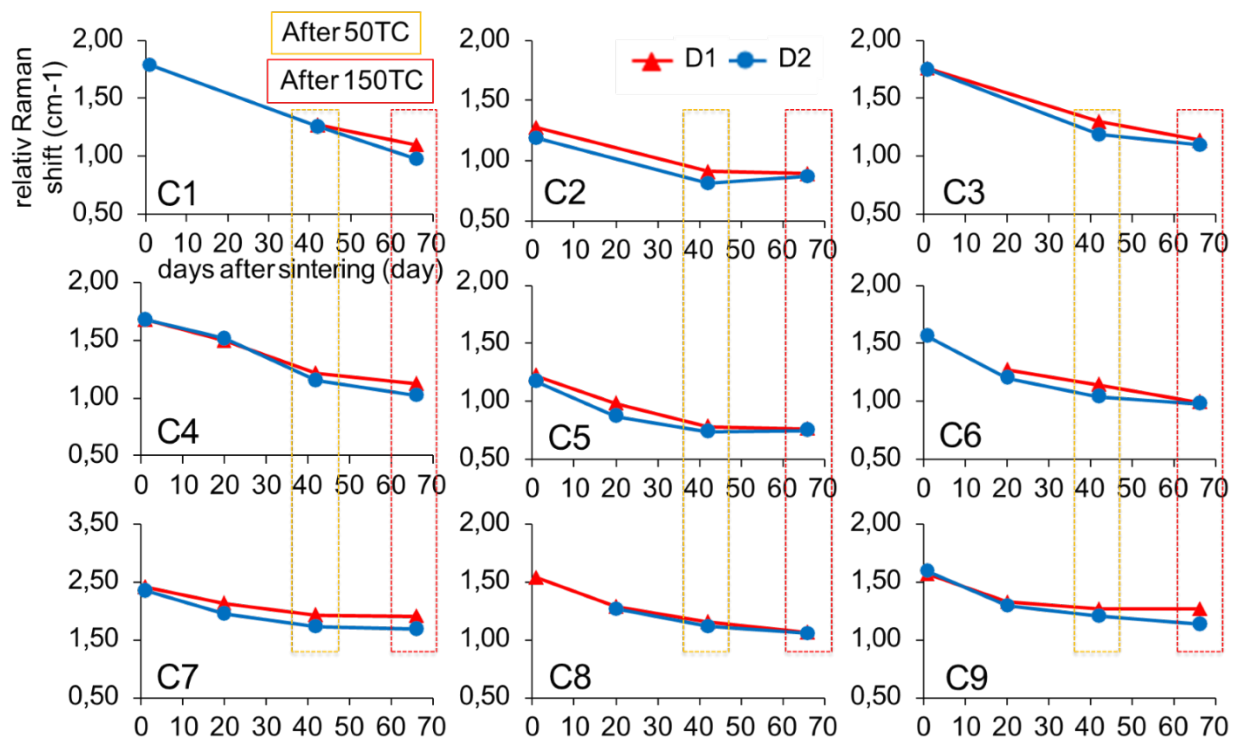


Abbildung 30 - Relative Raman-Verschiebung in Abhängigkeit von den Thermoschockzyklen.

Um schließlich die Auswirkungen des Verbindungsmaterials zu vergleichen, wurde die auf Mikrofloken basierende Kupfersinterpaste mit einer Nanopartikel-Silbersinterpaste verglichen, die beide unter den gleichen Bindungsbedingungen gesintert wurden. Die gesinterte Silberverbindung war tatsächlich $\sim 15\mu\text{m}$ dicker als die gesinterte Kupferverbindung. Vergleicht man die in Abbildung 31 und Abbildung 26 dargestellten Ergebnisse, so lässt sich feststellen, dass die gesinterten Silberverbindungen im Vergleich zu den gesinterten Kupferverbindungen eine höhere Spannung (20-30 %) aufweisen. Die genauen Gründe für das beobachtete Verhalten

konnten zum Zeitpunkt der Einreichung dieses Berichts noch nicht geklärt werden, und die detaillierte Analyse ist noch nicht abgeschlossen.

Results of Raman – after sintering

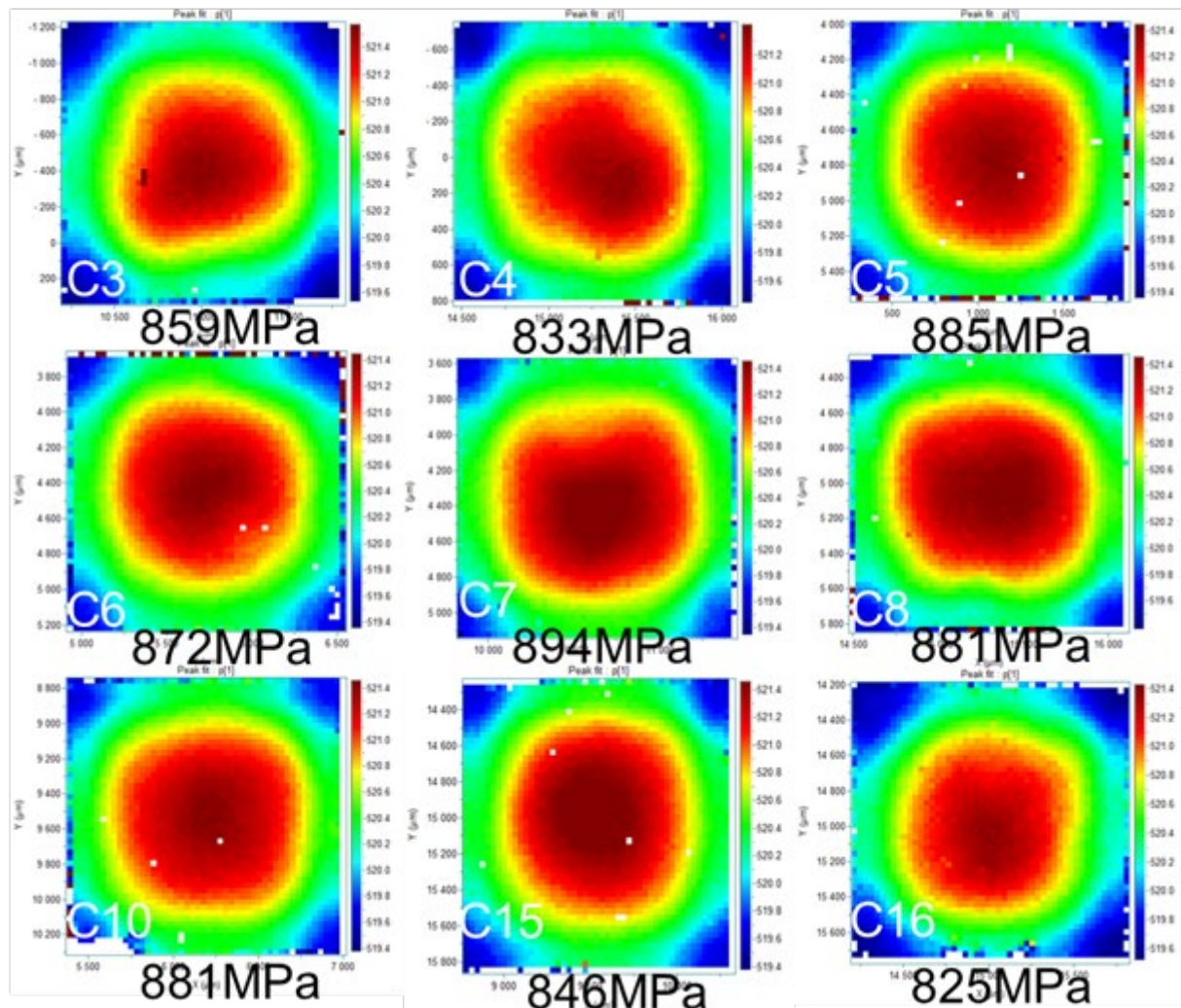


Abbildung 31 - μ -Raman-Analyse der gesinterten Proben mit Silbersinterpaste auf nanopartikel-Basis

WP2: Qualifikation der Interconnects durch TTA/Rth-Messungen

WP2-1 Gepulste und stochastische TTA

2-1.1 Gepulste und stochastische TTA zur thermischen Charakterisierung

I. LTTA – Laser stimulierte Transiente Thermische Analyse

Im Projekt IQLED wurde zur thermischen Charakterisierung von Halbleitermodulen eine laserbasierte Variante des thermisch transienten Analyse Verfahrens (TTA) vor dem Hintergrund der Auflösung von Fehlermoden insbesondere in dünnen Schichten von Modulen entwickelt. Innerhalb des Projekts konnte gezeigt werden, dass sich die neu entwickelte Laser TTA als

Alternative zum Standardverfahren aus der JEDEC JESD51-Dokumentenserie bzw. des MIL-STD-750F eignet.

Generell basieren TTA-Methoden auf der Auswertung der transienten thermischen Impedanz Z_{th} eines Moduls, welche der zeitaufgelösten Temperaturänderung $\Delta T(t)$ durch einen Heizleistungssprung P entspricht und daher zu $Z_{th}(t) = \Delta T(t)/P$ definiert ist. Dieser Parameter dient als Key Indikator des Alterungszustands und wird über den Zeitbereich hinsichtlich etwaiger Änderungen des thermischen Pfades durch Alterungsprozesse untersucht und bewertet. Die Standardverfahren basieren auf einem Leistungssprung interner Verluste durch einen Heizstrom im Halbleiter und einer unmittelbar anschließenden Abkühl- bzw. Messphase. Die Temperaturänderung wird typischerweise durch die zeitaufgelöste Messung eines temperatursensitiven Parameters, wie etwa der Vorwärtsspannung V_f einer Leuchtdiode oder der Körperdiode von Feldeffekttransistoren, ermittelt. In nachfolgender Abbildung 32 ist dieses Messverfahren am Beispiel des gezeigten Halbleitermoduls bestehend aus einer LED als Device under Test (DUT), den Lötverbindungen, Kupferkontakten, einem IMS Board (Insulated Metal Substrate) und einem Kühlkörper schematisch dargestellt.

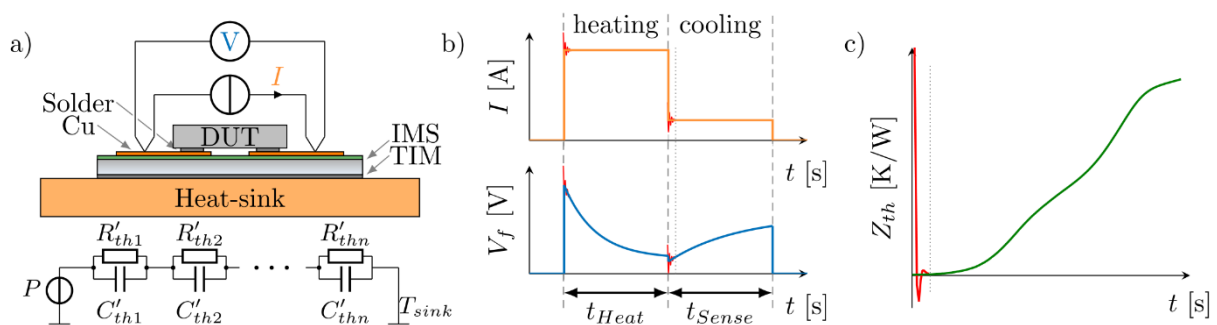


Abbildung 32 – Schema der Standard TTA Messmethode mit Schaltstörungen a) Lagen- und Foster-Modell des Halbleitermoduls, b) Heiz- und Messphase mit gleichzeitiger Messung der Vorwärtsspannungsänderung, c) zeitaufgelöste störungsbehaftete thermische Impedanz.

Der thermische Pfad durch das Modul von der Junction als Quelle des Wärmestroms bis hin zum Kühlkörper lässt sich über die Analogie zum Elektrischen mittels des in Abbildung 32a gezeigten Foster Äquivalenznetzwerks modellieren. Hierdurch wird deutlich, dass die thermische Impedanz als Antwort auf den Heizsprung der Summe der Exponentialfunktionen der einzelnen RC-Glieder der Schichten des Moduls entspricht. Da das Volumen der Schichten des Halbleitermoduls entlang des thermischen Pfades gewöhnlich zunimmt, steigen auch die äquivalenten thermischen Kapazitäten C'_{thi} des Fostermodells und daher die Zeitkonstanten an. Die Antwort dünner Schichten nahe der Junction findet sich deshalb zu Beginn des Zeitbereichs der thermischen Impedanz Z_{th} wieder. Wie jedoch in Abbildung 32b angedeutet, verläuft das Umschalten vom konstant geregelten Heiz- auf den wesentlich geringeren Messstrom nicht ohne ein gewisses Nachschwingen, welches zu einer starken Beeinflussung des Signals in diesem kritischen Zeitabschnitt führt (vgl. Abbildung 32c). Hierdurch ist die Bewertung dünnerer Schichten wie des Dies einer LED oder eines FETs gewöhnlich ausgeschlossen, oder nur mit hohen Kosten für das

Equipment bzw. auch großem Messaufwand verbunden. Des Weiteren ermöglicht die Standardmethode der TTA lediglich die vertikale Auflösung von Fehlermoden, d.h. es kann nur die Schicht, in der ein Fehler aufgetreten ist, ermittelt werden und Informationen über die genaue Fehlerstellen stehen aus.

Aus diesen Gründen wurde im Projekt IQLED im WP2-1 die Messmethode für ein Laser stimuliertes transient thermisches Analyse Verfahren entwickelt, welches einen Infrarot Laser als Heizquelle vorsieht, um einen möglichst idealen und instantanen Übergang von Heiz- zu Messphase zu realisieren. Diese Methode soll letztlich Zuverlässigkeitsaussagen für immer dünner werdende Strukturen in Halbleitern ermöglichen. Eine weitere Einsatzmöglichkeit ist die orts aufgelöste transiente Impedanzbestimmung eines Halbleiters über dessen Fläche und die damit verbundene Präzisierung der Fehlerlokalisierung.

Die entwickelte Methode der Laser stimulierten transienten thermischen Analyse, nachfolgend LTТА genannt, setzt eine Photonenenergie des Lasers unterhalb des Bandabstands des zu untersuchenden Halbleiters voraus. Der Grund hierfür ist, dass eine Anregung von Elektronen aus dem Valenz- in das Leitungsband verhindert werden soll, was zu einer Beeinflussung der Messung des temperatursensitiven elektrischen Parameters (TSEP) und damit der Temperaturbestimmung führen kann. Zur messtechnischen Ermittlung des TSEP, d.h. beispielsweise der Vorwärtsspannung einer Diode, ist jedoch immer noch ein kleiner, konstanter Sense-Strom I_s nötig. In Abbildung 33a ist die LTТА Messmethode zur Bestimmung der thermischen Impedanz schematisch am Beispiel einer blauen Hochleistungs-GaN-LED ($E_g=3.4\text{eV}$) dargestellt. Für diese Messmethode wird der Strahl des 7W infrarot Lasers mit 808nm Wellenlänge ($E_p=1.53\text{eV}$) für ein homogenes Aufheizen des LED Dies durch eine Linsenaufbau defokussiert. Die exemplarisch ausgesuchte LED ist vom Typ LUXEON F Plus, welche einen Phosphor Converter zur Emission von weißem Licht oberhalb des Dies und eine zusätzliche Silizium Verpolschutzdiode aufweist. Wie bereits erwähnt, bietet die LTТА Methode auch die Möglichkeit einer orts aufgelösten transienten thermischen Impedanzbestimmung, welche in Abbildung 33b mit einem fokussiertem und über das Messobjekt wanderndem Laserstrahl dargestellt ist.

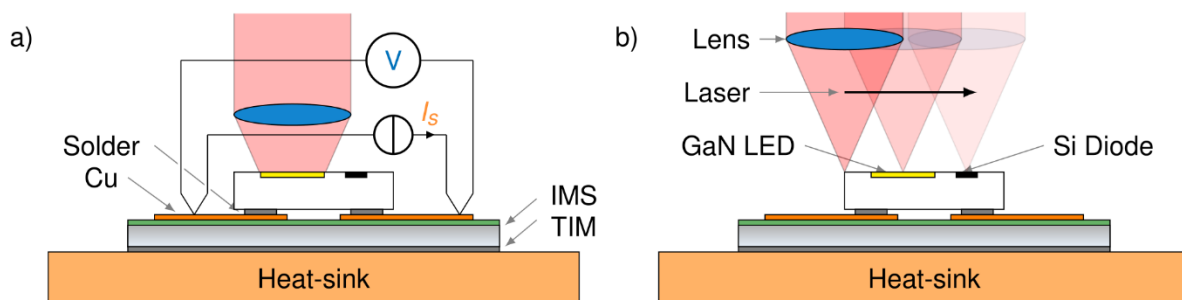


Abbildung 33 – a) LTТА Messmethode mit defokussiertem Laserstrahl b) orts aufgelöste LTТА Messmethode mit ortsveränderlichem fokussiertem Laserstrahl.

Aufgrund von Reflexionen des Laserstrahls an der Oberfläche des Messobjekts und zum Teil auch an der Optik, entspricht die Laserleistung nicht der eingebrachten Heizleistung in den Halbleiter. Diese wird jedoch für die Berechnung der thermischen Impedanz Z_{th} vorausgesetzt. Da zunächst keine Möglichkeit bestanden hat die Heizleistung zu bestimmen, wurden die Messergebnisse der LTTA in normalisierter Form dargestellt, welche die relative Änderung des thermischen Pfades des Moduls widerspiegelt. Zur ersten Validierung der Methode sind die Ergebnisse der Standard TTA denen der im Rahmen des Projekts entwickelten LTTA in Abbildung 34a gegenübergestellt. Die Messergebnisse beider Methoden wurden hinsichtlich der Datenverarbeitung bzw. Filterung identisch behandelt und nicht extrapoliert. Aus diesem Vergleich ergibt sich, dass das LTTA Signal der normierten thermischen Impedanz des Standardverfahrens generell gut entspricht und darüber hinaus wie erwartet noch Aussagekraft in sehr kleinen Zeitbereichen unter $2\mu s$ besitzt. Das Standardverfahren ist in diesem Zeitabschnitt hingegen von Störungen des Umschaltprozesses von Heiz- auf Messstrom beeinflusst, weshalb gewöhnlich eine Extrapolation in den Standards der Messmethodik vorgesehen ist, welche zu einem Informationsverlust führt. Es sollte angemerkt werden, dass im unteren Zeitbereich eine leichte Abweichung zwischen den Verfahren festgestellt werden kann, welche wohlmöglich auf die Einbringung der Wärme an unterschiedlichen Stellen des Halbleiters zurückzuführen ist. Im nächsten Schritt wurde der Laserstrahl, wie in Abbildung 33b dargestellt, fokussiert und entlang einer Linie über die Mitte der LED bewegt. Die Ergebnisse dieser orts aufgelösten Impedanzbestimmung sind in Abbildung 34b gezeigt. In der aufgespannten Impedanzfläche lassen sich eindeutig der GaN LED Die und die darunterliegenden Strukturen (Gold bumps) im Bereich zwischen 50 und 200 μm durch die charakteristische Doppelkurve ausmachen. Ein interessanter Effekt kann im Bereich der Si Verpolschutzdiode bei 210 μm beobachtet werden. Hier existiert im unteren Zeitbereich bis etwa $10\mu s$ eine negative Impedanz, welche durch die Anregung von Elektronen aus dem Valenz- in das Leitungsband des Silizium Halbleiters ($E_g = 1.12 eV < E_p$) begründet ist. Dieser Effekt verdeutlicht demnach die Relevanz der ursprünglichen Überlegungen zur Auslegung der Laser Wellenlänge im Bezug auf das Messobjekt.

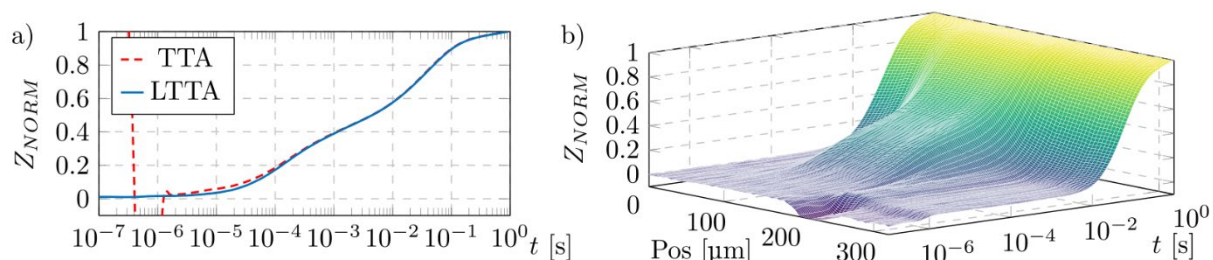


Abbildung 34 - Normalisierte thermisch transiente Impedanz a) Standard TTA vs. LTTA mit defokussiertem Laser b) orts aufgelöste LTTA mit Positionsveränderung des fokussierten Lasers.

Innerhalb des Projekts wurden die anfänglichen aufbaubedingten Probleme der entwickelten Messmethode behoben und zwischenzeitlich viele Erfahrungswerte im Umgang mit dem Verfahren gesammelt. Zudem wurde ein Konferenzbeitrag [1] mit der Zusammenfassung der bisherigen Ergebnisse eingereicht. Eine stochastische thermische Anregung der Halbleitermodule wurde innerhalb des Projektzeitraums zwar angedacht, jedoch noch nicht praktisch umgesetzt. Hierbei ist der Ansatz aus der Signaltheorie, dass die Autokorrelationsfunktion eines Systems direkt aus der Autokorrelationsfunktion einer gemessenen Ausgangsgröße hervorgeht, wenn das Eingangssignal weißes Rauschen ist, Grundlage für die Messmethodik. Es ließe sich demnach, das zeitaufgelöste Impedanzverhalten eines Systems durch die thermische Anregung mit einem Lasersignal, welches einem quasi weißen Rauschen entsprechen würde, bestimmen.

II. DPA TTA – Deterministischer Puls Algorithmus

Im Rahmen des Projekts IQLED und einer Dissertation [2] wurde ein weiteres TTA-Verfahren zur Verbesserung der Signalqualität der thermisch transienten Impedanz im frühen Zeitbereich entwickelt und patentiert. Die Standardverfahren basieren auf einer Verbesserung der Signalqualität durch zeitaufwändiges Mitteln von Messwiederholungen. Hierdurch reduziert sich jedoch der Durchsatz des Messequipments, weshalb innerhalb der Produktionslinie ein Kompromiss aus Zeitaufwand und Signalqualität getroffen werden muss. Der Deterministische Puls Algorithmus für die Transiente Thermische Analyse, nachfolgend DPA TTA genannt, wurde entwickelt um die Signalqualität ohne Messwiederholungen zu verbessern. Hierdurch konnte eine Reduzierung der Messzeit für Untersuchungen, bei denen die Impedanz im Zeitbereich unter 1ms von besonderer Relevanz ist, um bis zu 97% im Vergleich zur Standardmethode mit gleichem Signal-Rauschverhältnis erzielt werden.

Generell kann als Alternative zur zeitintensiven Mittelung durch Messwiederholungen das Rauschen auch durch einen Tiefpassfilter reduziert werden. Hierbei besteht jedoch die Gefahr eines Informationsverlusts bei zu gering gewählter Filtergrenzfrequenz. Bei Untersuchung der analytischen Beschreibung

$$Z_{th}(t) = \sum_{i=1}^n R'_{thi} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_i}} \right) \quad T_i = R'_{thi} \cdot C'_{thi} \quad (1)$$

des Foster Äquivalenznetzwerks eines Halbleitermoduls aus Abbildung 32a wird jedoch deutlich, dass die Bandbreite mit zunehmender Messzeit t abnimmt. Aus diesem Grund kann im späteren Zeitbereich der Impedanzbestimmung die Signalqualität durch Tiefpassfilterung verbessert werden, während dies aufgrund der höheren Bandbreite im frühen Zeitbereich ohne

Informationsverlust nicht möglich ist. Deshalb muss hier das Rauschen durch Mittelung über Messwiederholungen reduziert werden.

Um nur im frühen Zeitbereich zu Mitteln, wird die Standard TTA Sequenz (vgl. Abbildung 32b) um eine vorangehende deterministische Puls (DP) Sequenz aus n kurzen Heiz-Phasen und n kurzen Mess-Phasen ergänzt. Alle Heiz- und Mess-Phasen haben dabei die gleiche Länge t_{DP} und sind deutlich kürzer als die Phasen t_{Heiz} und t_{Mess} der Standard TTA Sequenz. Die gesamte DPA TTA Sequenz ist nachfolgend in Abbildung 35 dargestellt.

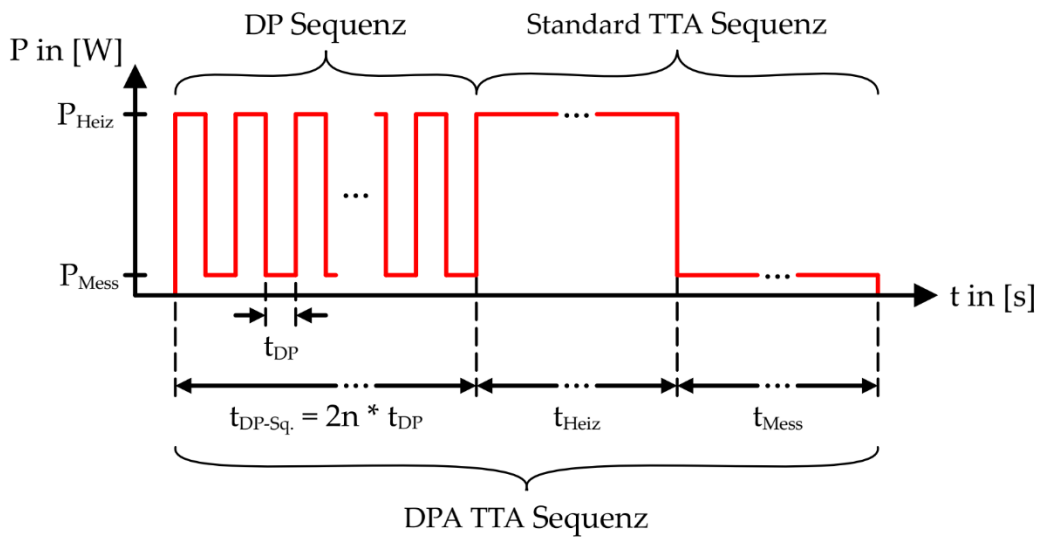


Abbildung 35 - DPA TTA Sequenz aus den Teilen DP Sequenz mit n kurzen Heiz- und Mess-Phasen mit der Länge t_{DP} und Standard TTA Sequenz, t_{Heiz} und t_{Mess} sind dabei deutlich länger als t_{DP-Sq}

Die Mittelung für den frühen Zeitbereich erfolgt über alle n Mess-Phasen in der DP Sequenz. Allerdings wird während keiner der kurzen Heiz- und Mess-Phasen das thermische Gleichgewicht des DUTs erreicht. Dafür ist t_{DP} deutlich zu kurz. Daher sind im Gegensatz zur Standard TTA, in welcher thermisches Gleichgewicht erreicht und vorausgesetzt wird, die Systemantworten der DPA Sequenz von den vorangehenden Ereignissen bzw. Leistungssprüngen abhängig. Bevor demnach gemittelt werden kann, muss zuerst die Sprungantwort auf den letzten Leistungssprung aus der gemessenen Antwort ermittelt werden. Grundlage hierfür ist das Superpositionsprinzip. Das Superpositionsprinzip von Sprungantworten gilt allgemein für alle linearen zeitinvarianten Systeme und somit auch für die lineare zeitinvariante thermische Impedanz. Sie kann daher genutzt werden, um die Temperaturänderung $\Delta T(t)$ aus der zeitlich verschobenen Überlagerung von Leistungssprüngen ΔP_i zu den Zeitpunkten t_i auf Basis der vorherigen n Leistungssprünge zu bestimmen.

$$\Delta T(t) = \sum_{i=1}^n \Delta P_i \cdot Z_{th}(t + t_i) \quad (2)$$

Zur Verdeutlichung des DPA Prinzips wird das Verfahren anhand der ersten Leistungssprünge in der DP Sequenz durch den Leistungsverlauf und zugehörigen Temperaturverlauf in Abbildung 36

graphisch dargestellt. Der Leistungsverlauf in Abbildung 36a besteht aus fünf Leistungssprüngen, welche die Sequenz in jeweils fünf Phasen unterteilt. Dabei werden die Heiz-Phasen jeweils durch die positiven Leistungssprünge ΔP_0 , ΔP_2 und ΔP_4 von 0W auf 3W eingeleitet. Die Mess-Phasen durch die negativen Leistungssprünge ΔP_1 und ΔP_3 von 3W auf 0W. Alle Heiz- und Mess-Phasen haben die gleiche Länge $t_{DP}=1\text{ms}$. Der aus dem Leistungsverlauf resultierende Temperaturverlauf $\Delta T_\Sigma(t)$ ist in Abbildung 36b als schwarze Linie dargestellt. $\Delta T_\Sigma(t)$ ist, basierend auf den einzelnen Heiz- und Mess-Phasen, in Intervalle unterteilt, die jeweils mit $\Delta T_{\Sigma,i}(t)$ bezeichnet sind. Zusätzlich sind die Temperatur-Sprungantworten $\Delta T_{\sigma,i}(t)$ auf die einzelnen Leistungssprünge ΔP_i als rote Linien für $t < 1\text{ms}$ und graue Linien mit unterschiedlichen Markern für $t > 1\text{ms}$ eingezeichnet.

In der ersten Heiz-Phase von 0ms bis 1ms entspricht $\Delta T_{\Sigma,0}(t)$ der Sprungantwort $\Delta T_{\sigma,0}(t)$, da kein weiterer Leistungssprung vorher auftrat. In der ersten Mess-Phase von 1ms bis 2ms überlagern sich bereits $\Delta T_{\Sigma,0}(t + 1\text{ms})$ und $\Delta T_{\sigma,1}(t)$, was in Summe $\Delta T_{\Sigma,1}(t)$ ergibt. Aufgabe des DPA ist es, aus dem messbaren schwarzen Temperaturverlauf $\Delta T_{\Sigma,1}(t)$ die rote Sprungantwort $\Delta T_{\sigma,1}(t)$ zu berechnen, welche zur Mittelung verwendet werden kann. Für diese Berechnung wird der zeitabhängige Offset $T_{\text{Offset},1}(t)$ (graue Fläche) von $\Delta T_{\Sigma,1}(t)$ abgezogen. Der Offset wird dabei durch die Sprungantworten aller vorherigen Leistungssprünge in diesem Zeitintervall bestimmt. Dieses Schema setzt sich über alle weiteren Heiz- und Mess-Phasen fort. Für den folgenden Offset muss jeweils eine Sprungantwort mehr einbezogen werden. Allerdings sind für die Berechnung aller Offsets ausschließlich Ausschnitte der Sprungantwort für $t > 1\text{ms}$ bzw. $t > t_{DP}$ notwendig.

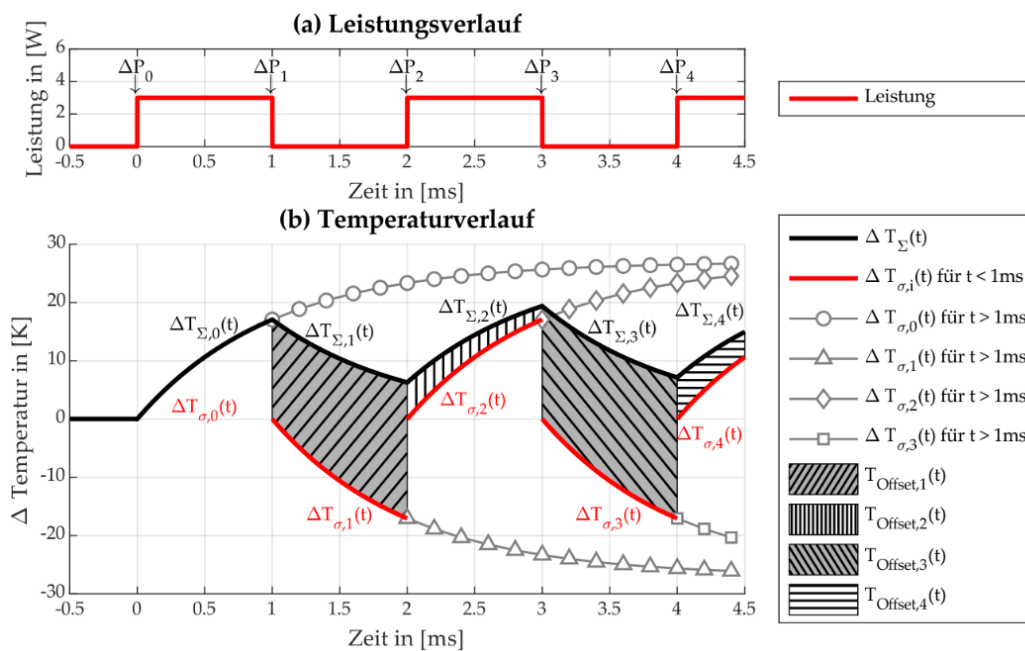


Abbildung 36 - Temperaturverlauf aufgrund des Superpositionsprinzips während der Deterministischen Puls Sequenz mit (a) Leistungsverlauf aus den ersten fünf Leistungssprüngen und (b) resultierendem Temperaturverlauf und -antworten auf einzelne Leistungssprünge.

Hier liegt die grundlegende Idee des DPA. Diese Abschnitte werden aus der Sprungantwort der Standard TTA Sequenz herangezogen, welche durch die vorherige Filterung mit einem Tiefpass stark rauschreduziert wurde. Das Rauschen auf den zeitabhängigen Offsets $T_{\text{Offset},i}(t)$ ist dementsprechend deutlich geringer als auf den gemessenen Antworten $\Delta T_{\Sigma,i}(t)$. Durch den DPA und die DPA Sequenz stehen dann n $\Delta T_{\sigma,i}(t)$ für die Mittelung zur Verfügung. So kann das Rauschen im frühen Zeitbereich durch Mittelung auch ohne das Erreichen des thermischen Gleichgewichts und damit nur geringem zeitlichen Mehraufwand reduziert werden.

Der Gesamtablauf des DPA Verfahrens ist in [Abbildung 36](#) schematisch dargestellt. Das DUT wird im ersten Schritt mit der DPA TTA Sequenz angeregt und die Temperaturantwort aufgezeichnet. Anschließend werden die Antworten während der einzelnen Mess-Phasen ausgelöst. Dadurch erhält man n Antworten aus der DP Sequenz und die Sprungantwort der Standard TTA Sequenz. Aus der Sprungantwort der Standard TTA Sequenz werden nach einer Filterung mit einem Tiefpass die n Offsets berechnet. Der jeweilige Offset wird von der zugehörigen DP Sequenz Antwort abgezogen, um n Sprungantworten für $t < t_{\text{DP}}$ zu erhalten. Über diese wird gemittelt, um die rauschreduzierte thermische Impedanz $Z_{\text{th}}(t)$ für den Zeitbereich $t < t_{\text{DP}}$ zu berechnen. Aus der gefilterten Antwort der Standard TTA Sequenz wird $Z_{\text{th}}(t)$ für den späteren Zeitbereich $t > t_{\text{DP}}$ bestimmt. Abschließend werden beide Teile zusammengesetzt und man erhält die rauschreduzierte $Z_{\text{th}}(t)$.

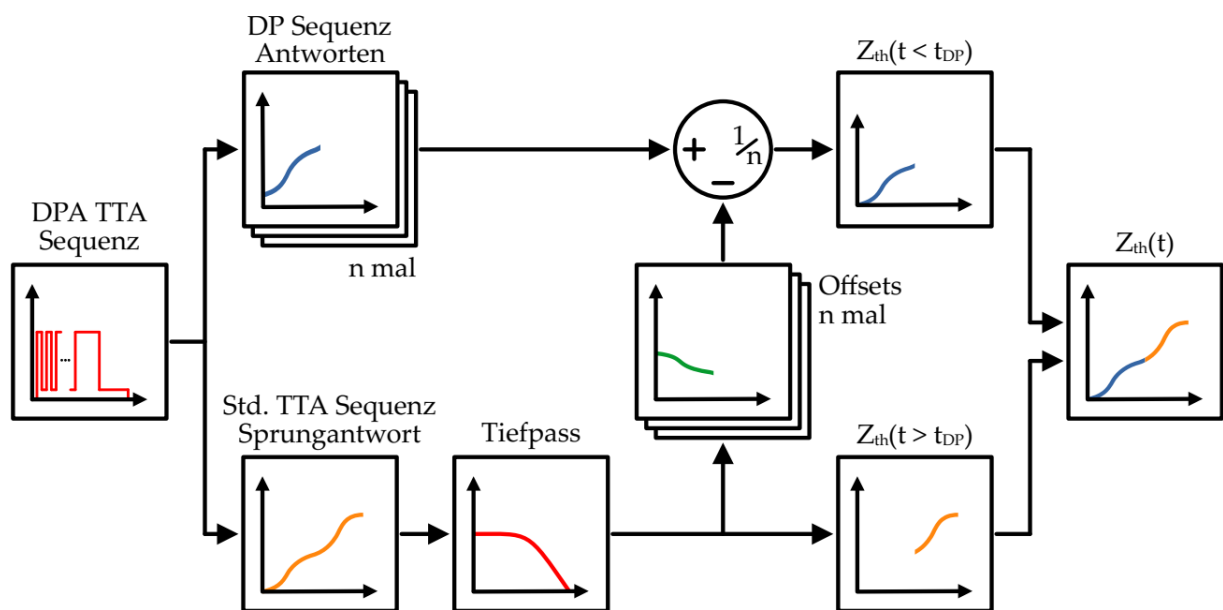


Abbildung 37 - Ablaufdiagramm des Deterministischen Puls Algorithmus: Die Antwort des Bauteils auf die DPA TTA Sequenz wird in DP Sequenz Antworten und Standard TTA Sequenz Sprungantwort aufgeteilt. Letztere wird durch einen Tiefpass gefiltert und anschließend zur Berechnung der Offsets und $Z_{\text{th}}(t > t_{\text{DP}})$ genutzt. Die DP Sequenz Antworten werden durch Offsets in Sprungantworten umgerechnet und gemittelt um $Z_{\text{th}}(t < t_{\text{DP}})$ zu bestimmen und die Ergebnisse zusammenzusetzen

2-1.2 Integration in TTA Tester

I. LTTA - Laser stimulierte Transiente Thermische Analyse

Es wurde sich innerhalb des Projekts gegen eine Integration der LTTA Messmethode in einen automatisierten TTA Tester entschieden, da der Fokus zunächst auf die Bestimmung der eingebrachten Heizleistung und damit der real vorhandenen thermisch transienten Impedanz durch die Integration einer Ulbrichtkugel gelegt wurde. Hierfür wurde der Messaufbau vom Stand des dritten Zwischenberichts in Abbildung 38a zum aktuellen Stand b verändert. Die Linsenoptik zur Fokussierung des Laserstrahls wurde durch einen Kollimator und eine in einem variablen Abstand befindliche Linse getauscht. Darunter befindet sich eine kleine Ulbrichtkugel durch welche der Laserstrahl auf ein temperaturstabilisiertes DUT gerichtet ist. Durch eigens entworfene reflektierende Adapter wird sichergestellt, dass der reflektierte Fluss innerhalb der darüber befindlichen Kugel durch einen optischen Photodiodensensor SM05PD1A möglichst vollumfänglich integriert werden kann. Hierdurch kann über die Kenntnis der initialen Laserleistung der Heizleistungssprung bestimmt und auf eine normierte Darstellung der Impedanzbestimmung verzichtet werden.

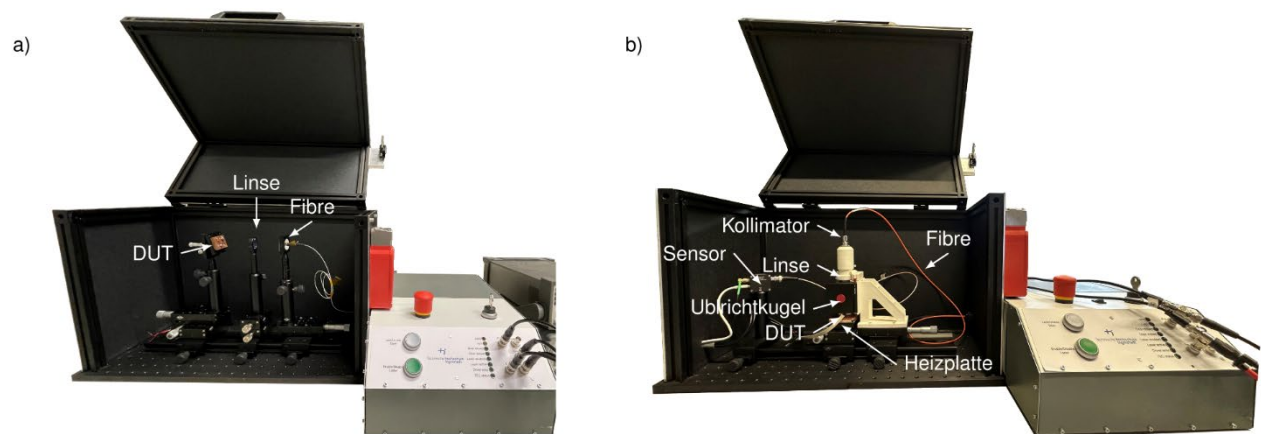


Abbildung 38 – LTTA Setup a) Stand vom dritten Zwischenbericht b) aktueller Stand mit neuer Optik, Ulbrichtkugel und thermisch stabilisiertem DUT

Die Ergebnisse

II. Gepulste TTA / Optische Vermessung

Der umgesetzte und in dem TTA Tester integrierte Gesamtablauf des DPA Verfahrens ist in Abbildung 39 schematisch dargestellt. Das DUT wird im ersten Schritt mit der DPA TTA Sequenz angeregt und die Temperaturantwort aufgezeichnet. Anschließend werden die Antworten während der einzelnen Mess-Phasen ausgelöst. Dadurch erhält man n Antworten aus der DP Sequenz und die Sprungantwort der Standard TTA Sequenz. Aus der Sprungantwort der Standard TTA Sequenz werden nach einer Filterung mit einem Tiefpass die n Offsets berechnet. Der jeweilige Offset wird von der zugehörigen DP Sequenz Antwort abgezogen, um n

Sprungantworten für $t < t_{DP}$ zu erhalten. Über diese wird gemittelt, um die rauschreduzierte thermische Impedanz $Z_{th}(t)$ für den Zeitbereich $t < t_{DP}$ zu berechnen. Aus der gefilterten Antwort der Standard TTA Sequenz wird $Z_{th}(t)$ für den späteren Zeitbereich $t > t_{DP}$ bestimmt. Abschließend werden beide Teile zusammengesetzt und man erhält die rauschreduzierte $Z_{th}(t)$.

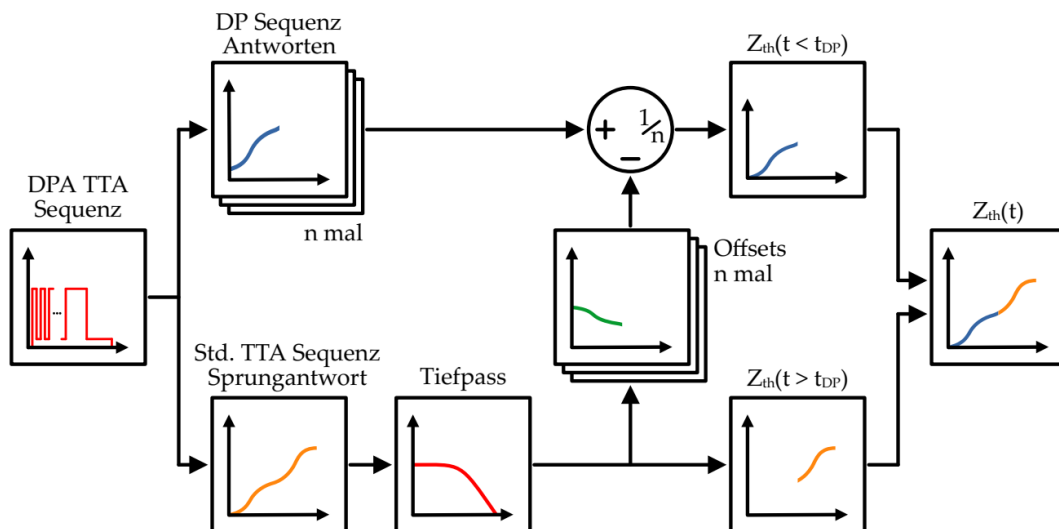


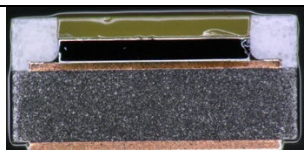
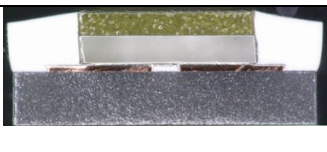
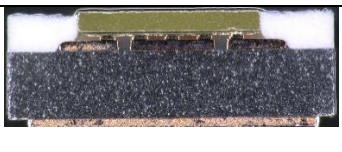
Abbildung 39 – Ablaufdiagramm des Deterministischen Puls Algorithmus: Die Antwort des Bauteils auf die DPA TTA Sequenz wird in DP Sequenz Antworten und Standard TTA Sequenz Sprungantwort aufgeteilt. Letztere wird durch einen Tiefpass gefiltert und anschließend zur Berechnung der Offsets und $Z_{th}(t > t_{DP})$ genutzt. Die DP Sequenz Antworten werden durch Offsets in Sprungantworten umgerechnet und gemittelt um $Z_{th}(t > t_{DP})$ zu bestimmen und die Ergebnisse zusammenzusetzen.

2.1.3 Validierung

I. LTTA - Laser stimulierte Transiente Thermische Analyse

Die Validierung der LTTA Methode erfolgte an drei verschiedenen Hochleistungs-GaN-LEDs, welche sich in ihrem internen Aufbau unterscheiden. In nachfolgender Tabelle 4 sind die für das LTTA Verfahren, den Wärmetransport und thermo-elektrischen Eigenschaften hauptsächlich relevanten Schichtstrukturen der LEDs angegeben.

Tabelle 4 - Test Sample Gruppe zur Validierung der LTTA Methode

Bezeichnung	Osram Oslon Compact	Dominant NagaJo	Lumileds Luxeon F
Bild			
Schicht 1	Phosphor	Phosphor	Phosphor
Schicht 2	GaN	Sapphire	GaN
Schicht 3	Silizium	GaN	Gold Bumps

Die Proben wurden auf einem Aluminium Insulated Metal Substrate Board mit SAC305 Lot aufgebaut und sowohl vor als auch nach der beschleunigten Alterung durch 100 Temperaturzyklen von -55°C bis $+155^{\circ}\text{C}$ mit der Standard TTA Methode wie auch der neu entwickelten LTТА Methode vermessen. Die Ergebnisse dieser Vermessung mit dem Vergleich der Methodiken sind in Abbildung 40 dargestellt. Die Kurven in grün zeigen den initialen Impedanzverlauf gestrichelt für die Standard TTA Methode und in durchgängiger Linie der LTТА Methode. Dies gilt auch für die roten Kurven, welche die thermische Impedanz der LED-Module nach 100 Temperaturzyklen zeigen. Die Ergebnisse der Oslon Compact LED zeigen, dass die LTТА in der Lage ist den Impedanzverlauf der Standard TTA wiederzugeben, woraus geschlossen werden kann, dass die Silizium-Schicht unterhalb des Dies durch den Laser nicht elektrisch angeregt wird und die Energie des Lasers in darüberliegenden Schichten bereits in Wärme umgewandelt wurde. Des Weiteren lässt sich der Vorteil der LTТА Methode im frühen Zeitbereich $<10\mu\text{s}$ erkennen, da die Ergebnisse nicht wie es bei der TTA der Fall ist durch Störungen unbrauchbar sind. Selbiges lässt sich für die LED vom Typ Dominant NagaJo festhalten, bei der durch den identischen Verlauf darauf geschlossen werden kann, dass die Phosphor- und Sapphireschicht oberhalb des Dies kaum Einfluss auf die gemessene thermische Impedanz zeigt. Abweichungen zwischen den Methoden werden erst bei LEDs vom Typ Luxeon F deutlich, da unterhalb des Dies Gold Bumps zur Kontaktierung vorhanden sind, welche je nach Eintreffen des Lasers unterschiedliche thermische Pfade bewirken. Hieraus kann geschlossen werden, dass der Laser trotz Defokussierung einen Intensitätsverlauf aufweist. Dieses Prinzip kommt bei der orts aufgelösten LTТА Methode zur Verwendung.

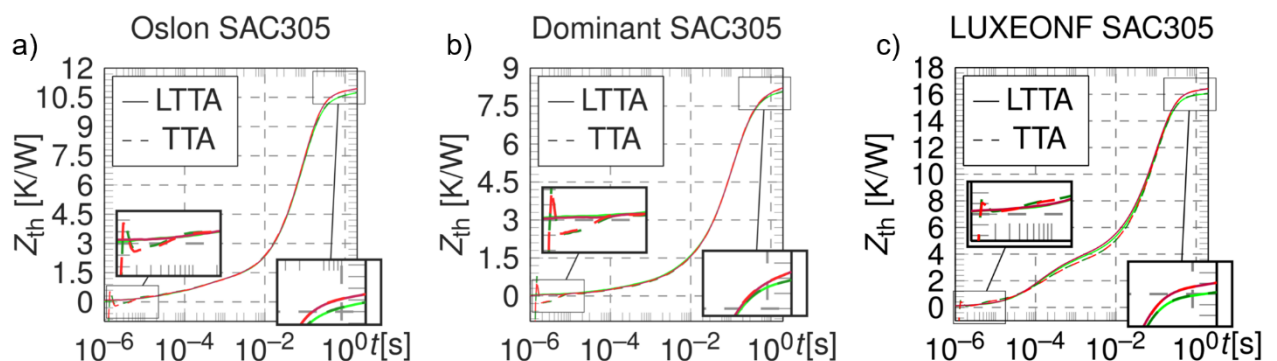


Abbildung 40 – Transiente Thermische Impedanz bestimmt durch die LTТА und Standard TTA Methode initial (grün) und nach 100 Temperaturzyklen (rot) für a) Osram Oslon Compact, b) Dominant NagaJo und c) Lumileds Luxeon F

II. Gepulste TTA / Optische Vermessung

Das DPA TTA Verfahren wurde in einem automatisierten TTA Tester durch Messungen validiert. Die experimentelle Überprüfung an der auch zuvor beispielhaft gewählten Hochleistungs-GaN-LED vom Typ LUXEON F Plus zeigte, dass bei einer Verwendung von 16 Mess-Phasen eine Rauschreduktion um 11,5dB erreicht werden kann. Hierfür muss die Standard TTA Sequenz nur um eine DP Sequenz mit 32ms verlängert werden. Im Vergleich dazu müsste die gleiche

Rauschreduktion mit der Standard TTA über 16 Messwiederholungen gemittelt werden. Dafür sind insgesamt 96s notwendig. Der DPA sorgt so für eine Zeitersparnis von 94%. Die durch das Umschalten von Heiz- auf Messstrom bedingten Störungen können durch das Verfahren natürlich nicht eliminiert werden, weshalb im Vergleich zur LTTA kaum Aussagekraft im sehr frühen Zeitbereich $<10\mu\text{s}$ vorliegt. Eine Kombination der Verfahren, mit der DPA zur Rauschunterdrückung bei beschleunigter Messzeit und der LTTA zur Auflösung dünner Schichten im frühen Zeitbereich, ist daher sinnvoll und wird weiterverfolgt.

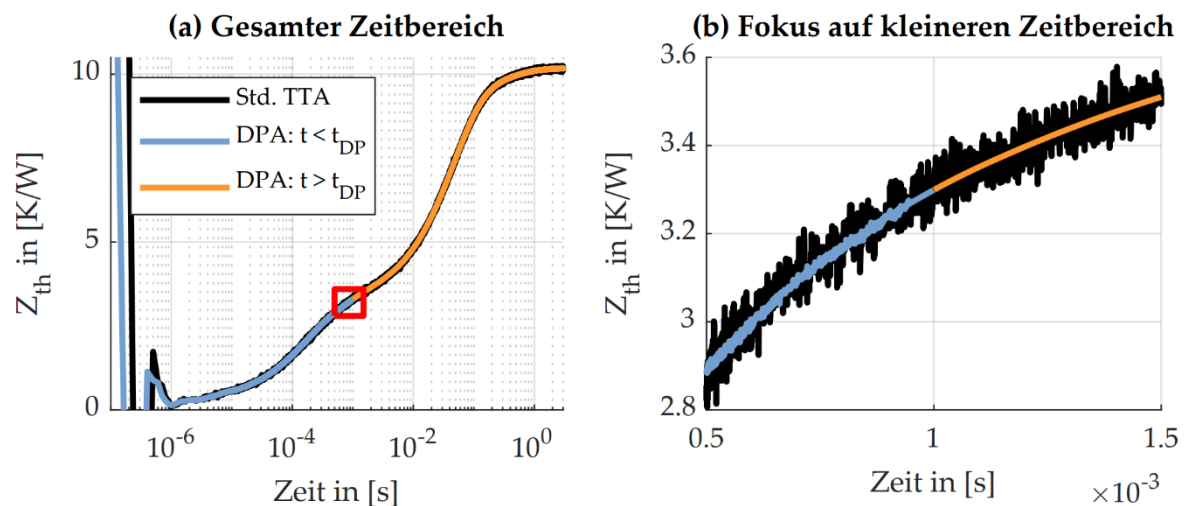


Abbildung 41 – Zusammengesetzte $Z_{th}(t)$ des DPA im Vergleich zu den Standard TTA Rohdaten. Die $Z_{th}(t)$ -Abschnitte sind farblich getrennt. (a) zeigt einen identischen Verlauf über den gesamten Zeitbereich und damit die Funktion des DPA für experimentelle Daten. Um die Rauschreduktion zu verdeutlichen, ist in (b) der rot markierte Bereich aus (a) dargestellt.

III. TTA Zuverlässigkeitsstudie

Im Rahmen des IQLED Projekts wurde eine umfangreiche Teststudie mit 1800 weißen Hochleistungs-LEDs von 9 verschiedenen Packagetypen unterschiedlicher Hersteller und 5 Lotpasten durchgeführt. Die Ergebnisse sind in den Publikationen [3] und [4] zusammengefasst und veröffentlicht.

WP2-2 In-Situ-Teststand: Aufbau eines kombinierten beschleunigten Teststandes mit In-Situ Messung der elektrooptischen und elektro-thermischen Eigenschaften der gesinterten Bauteile

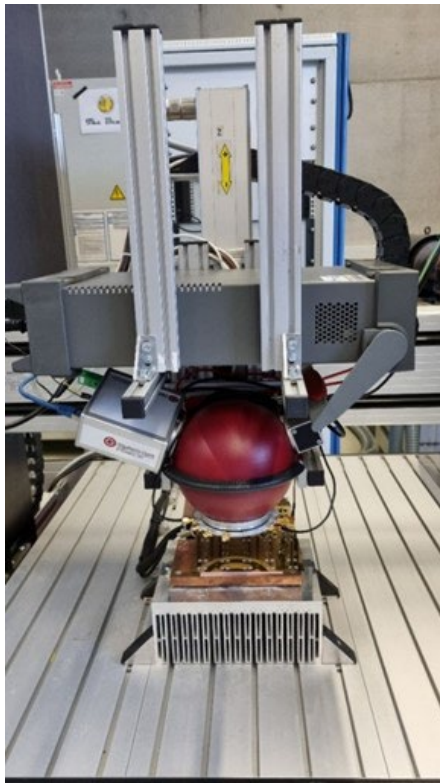


Abbildung 42 – Teststand zur elektro-thermischen und elektro-optischen Vermessung

Ein Teststand zur beschleunigten Messung der elektro-optischen und elektro-thermischen Eigenschaften von Halbleitermodulen wurde entworfen und aufgebaut. Hierbei kann ein in drei Achsen beweglicher Messkopf bestehend aus einer Gigahertz-Optik BTS2048 Ulbrichtkugel und einem an der Öffnung befindlichen Kontaktierungsadapter mit Federkontakten ein Testboard mit verschiedenen Samples automatisiert abfahren und elektro-thermisch bzw. elektro-optisch vermessen. Eine In-Situ Vermessung während beschleunigter Alterung war ursprünglich angedacht, jedoch lässt dies die Temperaturempfindlichkeit der Ulbrichtkugel nicht zu. Die Testgruppen befinden sich auf einem durch eine Meerstetter TEC Controller temperaturgeregelten Tisch. Die entwickelte Software zur Ansteuerung der Stromquelle ermöglicht nicht nur eine thermische Anregung

der zu untersuchenden Halbleiter nach dem Standard TTA Verfahren, sondern auch durch das zuvor besprochene DPA TTA Verfahren. Des Weiteren ermöglicht die Software die automatisierte Auswertung der Spektrometer-Daten der Ulbrichtkugel. Durch den Aufbau des Teststandes ist die Bestimmung des Wirkungsgrades von optoelektronischen Halbleitern während der Thermisch Transienten Analyse möglich, welcher sich über die Alterung auch auf die Genauigkeit der thermo-elektrischen Charakterisierung auswirkt.

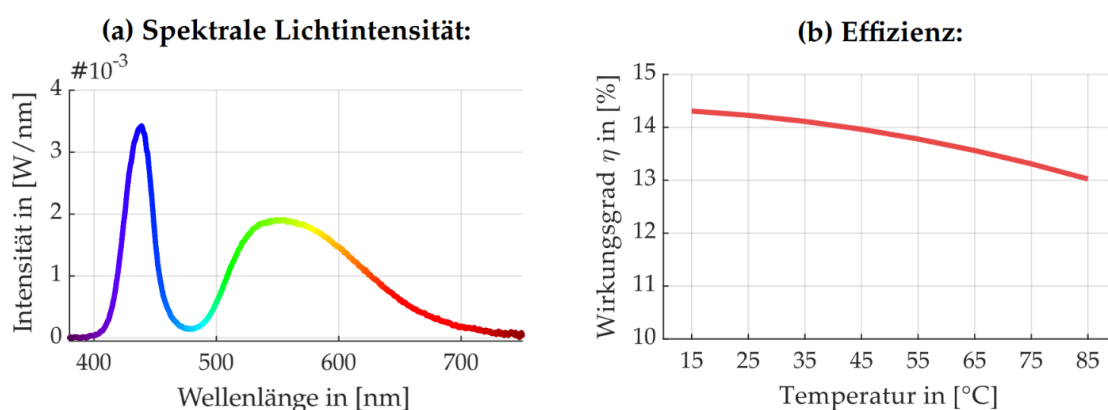


Abbildung 43 – a) Vermessenes Optisches Spektrum einer weißen High-Power LED auf Basis einer blauen LED mit Phosphor Konverter b) Temperaturabhängige Effizienz der LED

WP3: Zuverlässigkeit

WP3-1 Lot und Underfill/Verkapselung Prozess

• Underfill- und Verkapselungsprozessentwicklung

	Encapsulant 1	Encapsulant 2
Type	Filling & Transparent	Filling & Transparent
Mixing ratio	10:1	5:1
Refractive index (n_D^{25})	1.41	1.55
Viscosity 23degC (Pa·s)	6	5
Hardness Type A	45	80
Tensile strength (MPa)	6	2
Elongation at break (%)	150	80
Transmittance at 1mm (%)	Over 95	Over 99
Moisture permeability (g/m ² ·day)	Over 50	9
Cure condition	150degCx4hr	
Storage condition	Below 5degC	RT

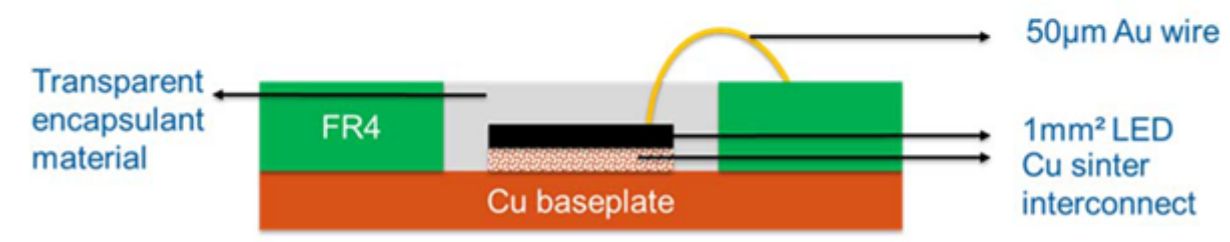


Abbildung 44 – Einzelheiten zu den beiden im Projekt untersuchten Verkapselungsmitteln und die schematische Darstellung des Aufbaus für die TTA-Analyse.

Es wurden zwei verschiedene Verkapselungsmaterialien von Shin-Etsu untersucht, die spezifisch für LEDs entwickelt sind. Es wurden transparente Materialien gewählt, da die Lichtdurchlässigkeit für die Hochleistungs-LEDs gewährleistet sein musste. Die Verkapselung erfolgte, wie in Abbildung 44 gezeigt, wobei die gesamte LED abgedeckt wurde. Obwohl die Vergussmasse 2 eine höhere Übertragungsrate als die Vergussmasse 1 aufwies, zeigte sie bei den drahtgebundenen LEDs eine schlechte Leistung, wobei das Hauptversagen während der Temperaturzyklen das Versagen des Drahtbonds war. Obwohl zwei potenzielle Materialien gemäß dem Datenblatt des japanischen Lieferanten Shin-Etsu als mögliche Kandidaten mit hohem Potenzial untersucht wurden, wurde beschlossen, auf standardmäßige und gut etablierte Verkapselungsprozesse bei Osram zurückzugreifen, die für die jeweiligen Produkte, das Gehäusedesign, den Betrieb und die Einschränkungen definiert sind. Daher wurde das transparente Verkapselungsmaterial KJR9022E-2L-2C, wie es intern bei Osram opto semiconductors bezeichnet wird, zur Vorbereitung der Proben für die TTA-Analyse gewählt. Darüber hinaus wurde über den Rahmen des Projekts hinaus ein neuartiges Material, nämlich Parylene, kurz untersucht. Dabei handelt es sich um eine ultradünne Schicht, die durch ein CVD-

Beschichtungsverfahren hergestellt wird. Die Materialkosten sind zwar wesentlich höher als bei den Standard-Verkapselungsmaterialien, aber Parylene kann bei Raumtemperatur aufgetragen werden und ist auch für medizinische Zwecke zugelassen. Außerdem zeichnet es sich durch eine sehr gute Haftung auf einer Vielzahl von Substraten und Oberflächen aus. Das Material ist für künftige F&E-Projekte vorgesehen.

WP3-2 DOE Zuverlässigkeit und Zuverlässigkeitstesten

- Aufbau der Proben und 0-Stundenanalyse

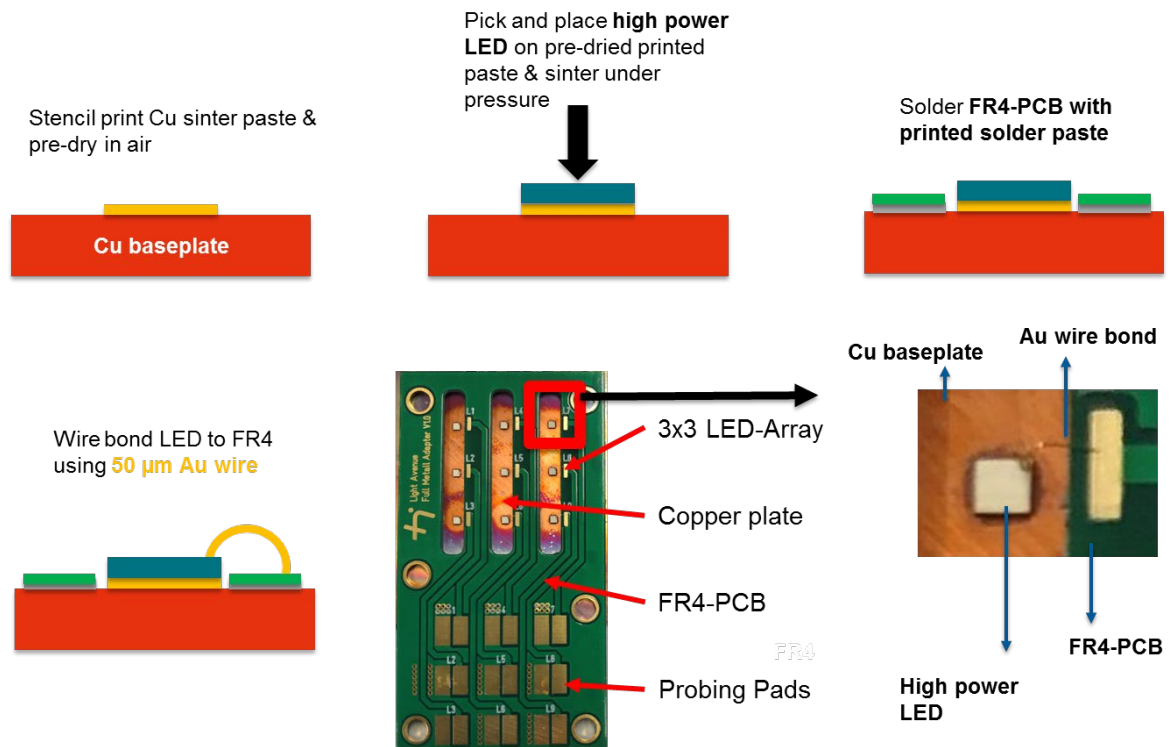
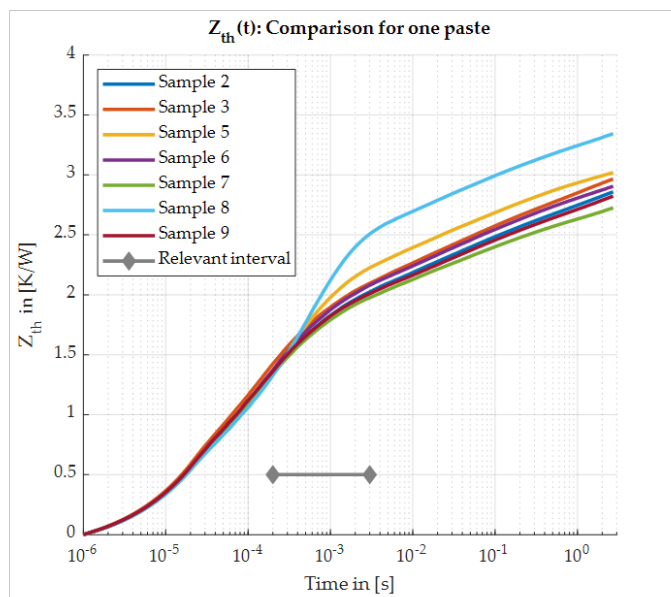


Abbildung 45 - Schematische Darstellung des Sinter Prozesses und die DUT Aufbau.

Zum Zweck der TTA-Analyse wurden die Proben wie in Abbildung 45 dargestellt aufgebaut. Die LEDs wurden zu einem 3x3 Array zusammengesetzt und mit einem 50µm Au-Draht gebondet. Es ist zu beachten, dass der manuelle Drahtbondprozess Prozessinstabilitäten und Diskrepanzen aufwies, die zu einer geringen Ausbeute führten. Die ersten 0-Stunden-Messungen der TTA nach dem Array-Bonding zeigten, dass der Prozess weitgehend stabil blieb. Mit Ausnahme von 2 LEDs an den Positionen 5 und 8 zeigten alle anderen LEDs eine vergleichbare Leistung. Aus der SAM-Analyse ging hervor, dass die LEDs 5 und 8 im Vergleich zu den anderen einen höheren Porositätsgrad aufweisen.

Measured $Z_{th}(t)$:



SAM:

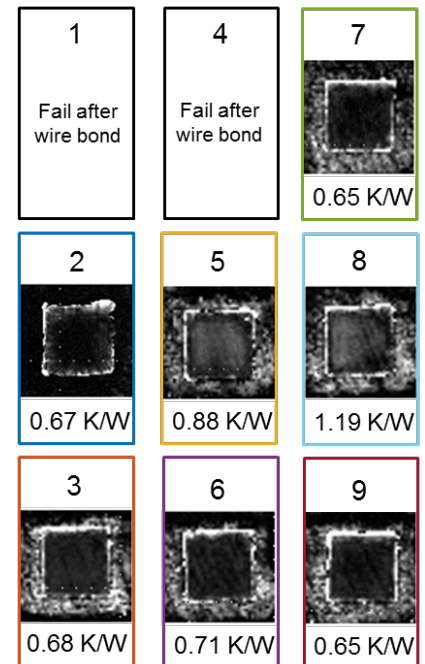


Abbildung 46 - TTA und Akustik Mikroskopie Analyse von Ref Cu Paste nach dem Array Bonding verfahren.

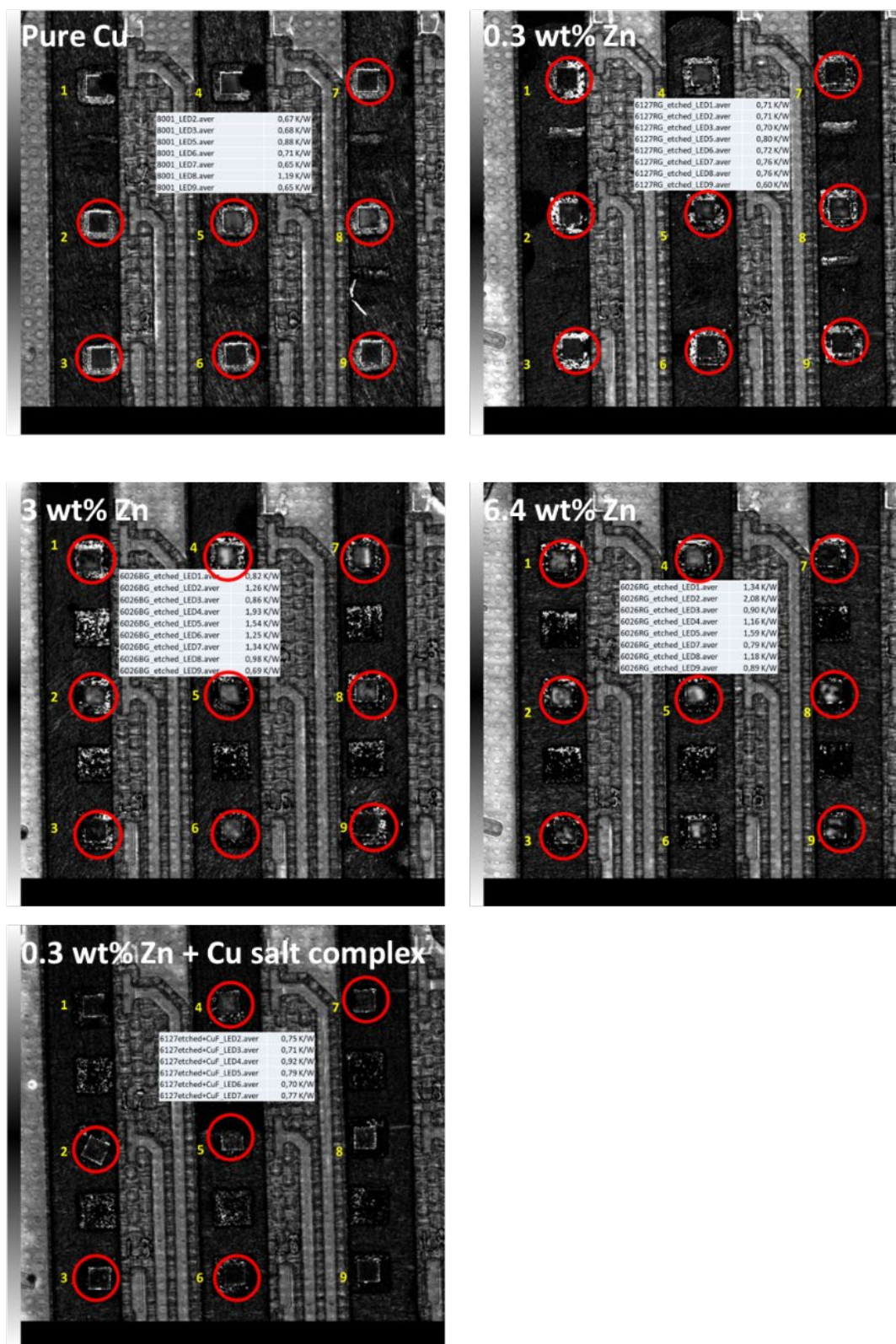


Abbildung 47 – SAM- und TTA-Analyse des gesinterten Interconnects. Die rot eingekreisten LEDs waren die funktionsfähigen LEDs nach dem Drahtbonds.

Tabelle 5 - Zusammenfassung der untersuchten Pasten, der TTA-Analyse, der Scherfestigkeit und der Leistung unter Thermoschockbedingungen.

Paste	Sinter conditions	Avg. Rth interconnect (K/W)	Rth interconenct best performer (K/W)	Shear strength (MPa)	Shear strength (MPa) after 1000 TCT
Original Cu	275°C_5 min_ 10MPa_nitrogen	0,78	0,65	34 ± 6	52 ± 25
0.3 wt % Zn		0,72	0,60	54 ± 9	61 ± 12
3 wt% Zn		1,19	0,69	63 ± 6	35 ± 19
6.4 wt% Zn		1,24	0,79	62 ± 6	38 ± 21
0.3 wt% Zn + Cu formate A2P complex	250 °C_ 5 min_20MPa_HCOOH enriched Nitrogen	0,77	0,70	100 ± 15	60 ± 24
Copper formate	250°C_5min_20MPa bonding pressure	0,75	0,65	80 ± 25	10 ± 8

- Zuverlässigkeitstesten, Fehleranalyse und Auswertung

Der Musteraufbau erfolgte nach dem in WP1-2, Prozess/Materialscreening und Prozess DoE, beschriebenen Verfahren. Die SAM-Analyse der Proben wurde intern bei Osram in Regensburg durchgeführt.

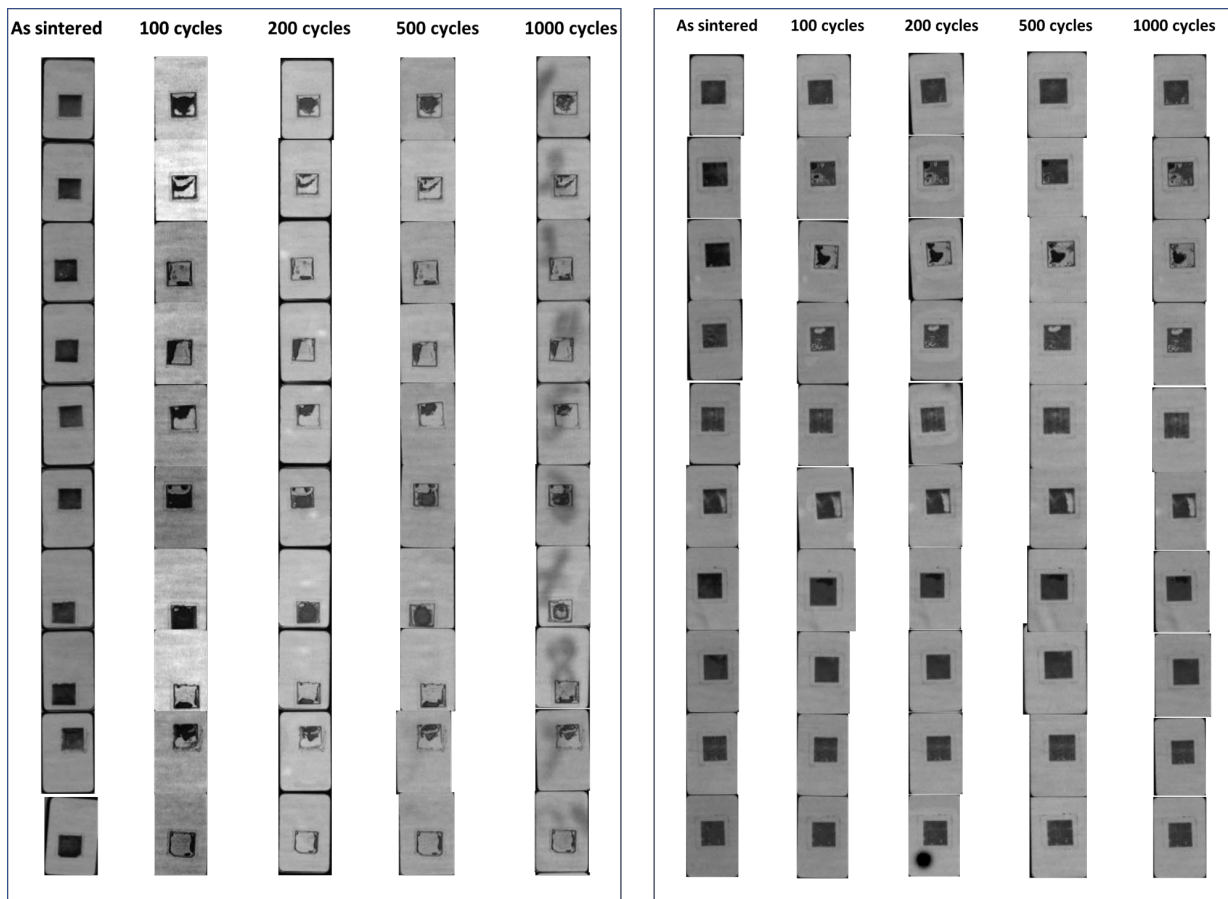


Abbildung 48 - SAM-Analyse der gesinterten Ag-Proben nach Thermoschockbedingungen von $-40/+150^{\circ}\text{C}$. (Links) gesintert mit 10 MPa Bindungsdruck und (rechts) gesintert mit 20 MPa Sinterdruck. Die Sinterzeit und die Temperatur wurden konstant bei 5 Minuten bzw. 275°C gehalten.

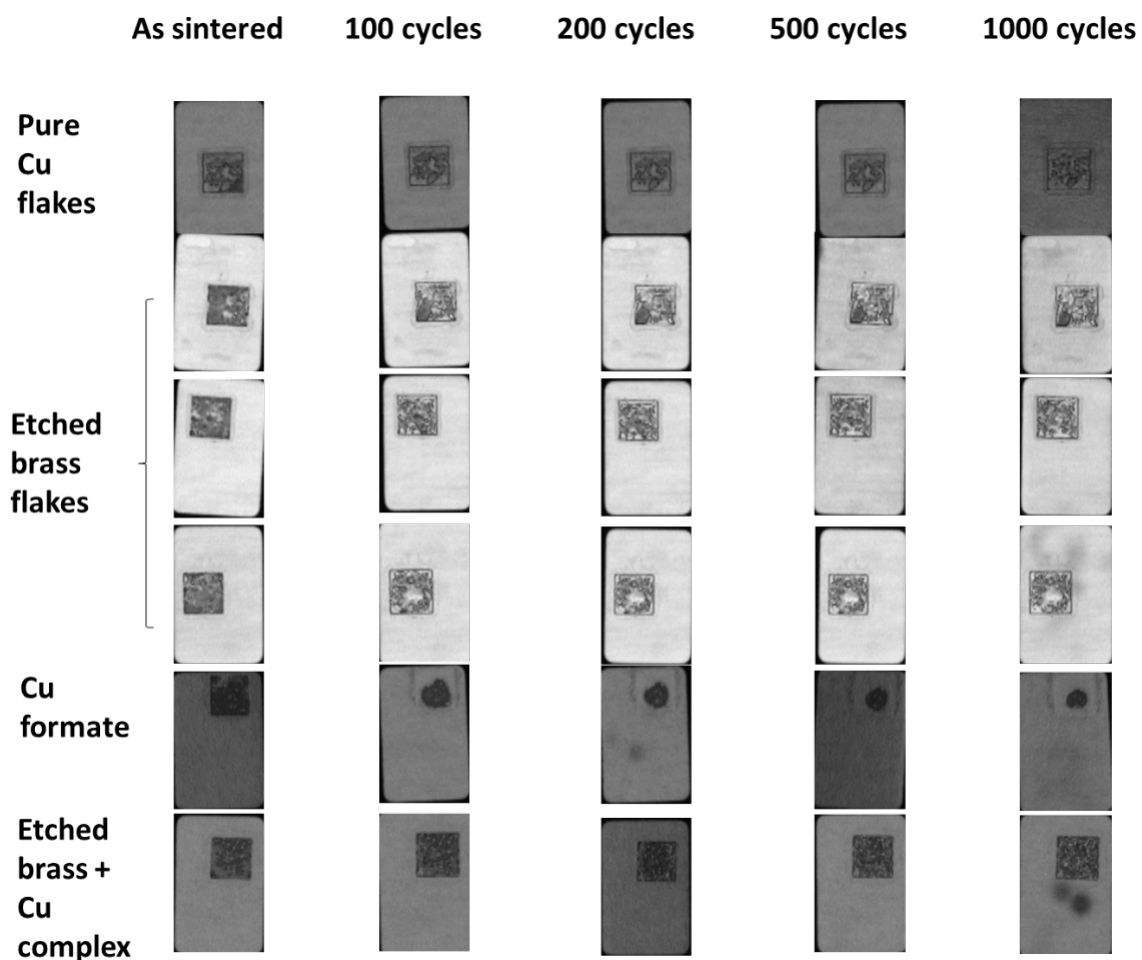


Abbildung 49 - SAM-Analyse der gesinterten Cu-Proben nach Thermoschock von $-40/+150^{\circ}\text{C}$. Sinterparameter 10MPa, 5min, 275°C .

Die Zuverlässigkeitsanalyse der gesinterten Silberproben zeigte, dass der Bindungsdruck einen erheblichen Einfluss hat. Während die mit einem Bindungsdruck von 10 MPa gesinterten Proben im gesinterten Zustand gute Ergebnisse zeigten, verschlechterten sie sich unter hohen thermomechanischen Stressbedingungen schnell. Im Gegensatz dazu zeigten die mit einem Bindungsdruck von 20 MPa gesinterten Proben eine sehr gute Leistung während der gesamten Tests. Im Vergleich dazu zeigten die unter 10 MPa druck gesinterten Kupferproben eine ähnliche Leistung wie die Ag gesinterte proben. Die geätzten Messing- und Komplexpasten, die unter 20 MPa Sinterdruck gesintert wurden, zeigten jedoch wiederum ähnliche Leistungen wie die gesinterten Ag-Proben, die ebenfalls unter 20 MPa Sinterdruck gesintert wurden.

Im Falle der reinen Kupfersalzpasten, die mit 20 MPa, aber bei 250°C gesintert wurden, ist zu beobachten, dass die gesinterten Verbindungen unter den hohen Temperaturschockbedingungen schnell degradieren. Es ist anzumerken, dass diese Verbindungen, obwohl sie im Ausgangszustand mit der gleichen $75\text{-}\mu\text{m}$ -Schablone gedruckt wurden, aufgrund der hohen Volumenschrumpfung des Kupfersalzes zur Realisierung von Kupfernanopartikeln in-situ während des Prozesses zu einer Bondlinestärke $< 10\text{ }\mu\text{m}$ führen.

Außerdem ist die Paste aufgrund der Sublimation des Kupfersalzes sehr anfällig für Verunreinigungen.

Für die Thermische Transiente Analyse (TTA) wurden Hochleistungs-LED-Chips mit einer footprint von 1 mm² und Au-Endmetallisierung ausgewählt. Alle Chips wurden von der Osram opto semiconductors GmbH bezogen. Die Chips wurden auf blanke Cu- Substrate von 1,5 mm Dicke gebondet. Nach dem Sintern wurde eine FR4-Platine mit SAC305-Lot unter einer mit Ameisensäure angereicherten N₂-Atmosphäre auf das blanke Cu-Substrat gelötet, um eine Oxidation der gesinterten Cu-Verbindungen während des Lötvorgangs zu verhindern. Schließlich wurden die LEDs mit einem 50µm Au-Draht unter Verwendung eines manuellen TPT-Drahtbonders auf die FR4-Platte gebondet, um die Proben für die TTA-Analyse vorzubereiten.

Um die Auswirkungen der Verkapselung zu verstehen, wurden vier Chargen von 3x3 Hochleistungs-LEDs auf blanke Cu-Substrate gebondet. Drei von ihnen wurden mit verschiedenen Verkapselungsmaterialien verkapselt, während die vierte Platine den Thermoschocktests ohne Verkapselung unterzogen wurde. Jede Charge wurde vor und nach der Verkapselung und nach 250 Zyklen bei -40/+125°C einer TTA- Analyse unterzogen. Das Verkapselungsmaterial wurde mit einem Handdispenser aufgetragen, und das Aushärtungsprofil umfasste eine Vortrocknung bei 100 °C für 30 Minuten, gefolgt von einer Aushärtung bei 150 °C für 4 Stunden.

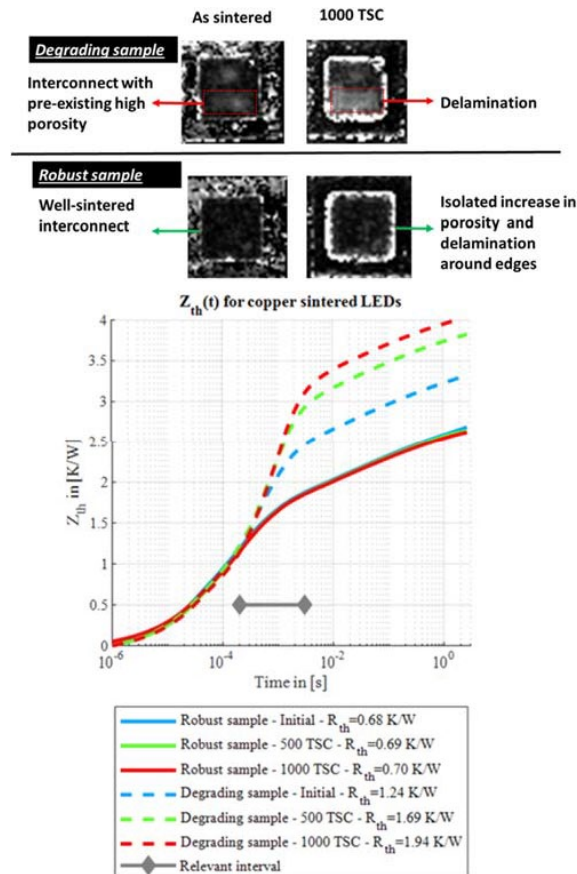


Abbildung 50 - Vergleich der Degradation in der gesinterten Verbindung zwischen der robusten und der degradierenden Probe (oben) SAM Bilder und (unten) TTA- Messungen

Bei den gut gesinterten Proben zeigten sowohl die eingekapselten als auch die nicht eingekapselten Proben ein ähnliches Maß an Zersetzung unter hohen thermomechanischen Belastungsbedingungen. Bei Proben, die anfangs schlecht waren, zersetzten sich die nicht eingekapselten Proben jedoch schneller als die eingekapselten Proben.

Unter anfänglichen Bedingungen wiesen alle Proben einen R_{th} (K/W) im Bereich von 0,78 bis 0,94 auf, was auf eine vergleichbare Leistung hinweist. Nach 250 Zyklen zeigte sich jedoch bei den verkapselten Proben ein R_{th} -Anstieg von 2,5 %, während die nicht verkapselten Proben einen Anstieg von etwa 50 % aufwiesen, was auf die Bedeutung der Verkapselung hinweist. Unsere Studien haben jedoch gezeigt, dass die Wahl des Verkapselungsmaterials ebenfalls wichtig ist, während bei bestimmten Arten von Verkapselungsmaterial beobachtet wurde, dass das Verkapselungsmaterial selbst zum Versagen der Au-Golddraht führt. Die Proben wurden auf von Osram Opto verwendeten Standardsubstraten montiert, die aufgrund der hohen CTE-Fehlanpassung zwischen Substrat und Chip eine hohe Belastung darstellen. Diese wurden einem Temperaturzyklustest bei $-40/+150^{\circ}C$ für 1000 Zyklen unterzogen und mit der handelsüblichen Silbersinterpaste verglichen. Die Kupfersinter Pasten zeigten eine

vergleichbare Leistung wie die kommerziellen Silbersinterpasten. Osram prüft nun neue Produktlinien, in die solche Kupfersinterpasten integriert werden können.

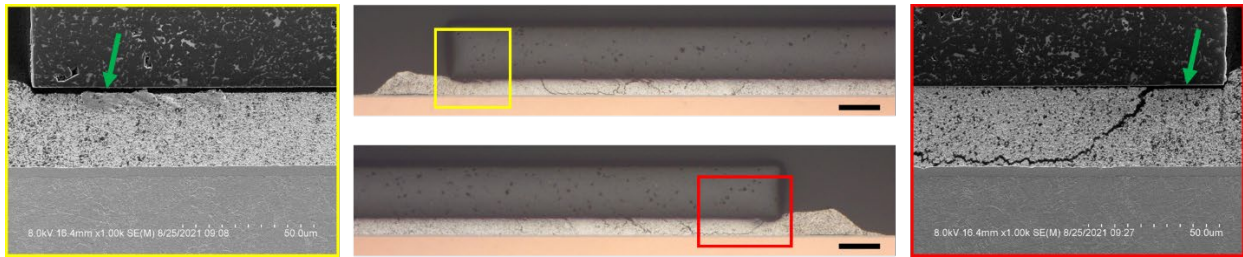


Abbildung 51 – REM-Querschnitt des auf Ag-Mikroflakes basierenden Interconnect nach 1000 Thermoschockzyklen. Der Maßstab im Lichtmikroskopie-Bild in der Mitte bezieht sich auf 100 µm. Grüne Pfeile zeigen die beobachteten Delaminationen entlang der Kanten und wie erwartet an der Chipschnittstelle.

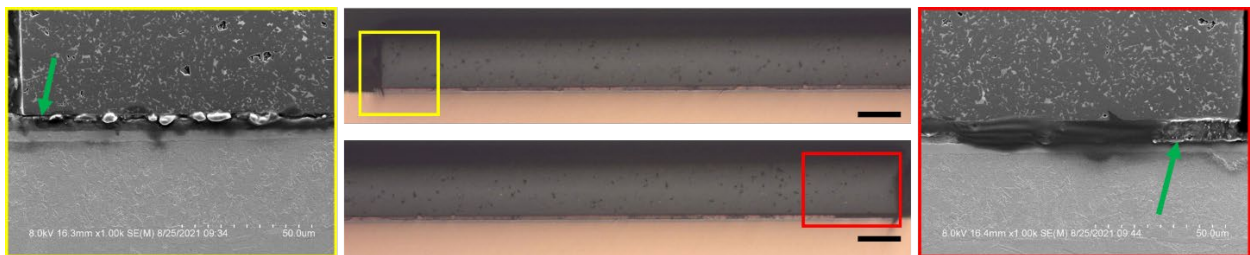


Abbildung 52 - REM-Querschnitt des auf reinen Cu-Mikroflakes basierenden Interconnects nach 1000 Thermoschockzyklen. Der Maßstab im Lichtmikroskopie-Bild in der Mitte bezieht sich auf 100 µm. Grüne Pfeile stellen die beobachteten Delaminationen entlang der Kanten und an der linken Schnittstelle auf der linken Seite und der Substratschnittstelle auf der rechten Seite dar.

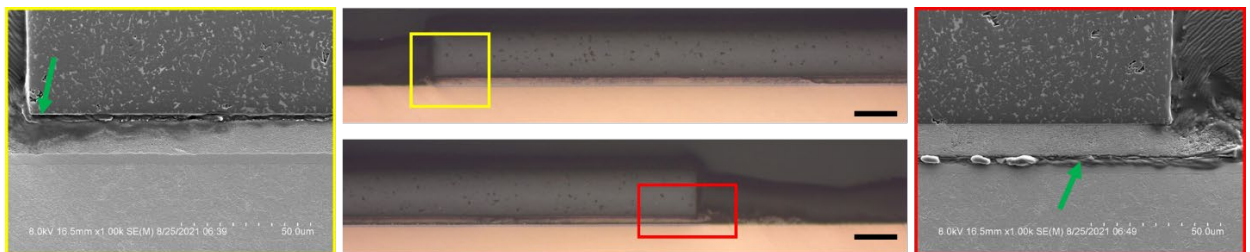


Abbildung 53 - REM-Querschnitt der geätzten Messing-Mikroflakes (0,3 Gew.-% Zn) auf Basis der Verbindung nach 1000 Thermoschockzyklen. Der Maßstab im Lichtmikroskopie-Bild in der Mitte bezieht sich auf 100 µm. Die grünen Pfeile stellen die beobachteten Delaminationen entlang der Kanten und an der linken Grenzfläche auf der linken Seite und an der Substratgrenzfläche auf der rechten Seite dar.

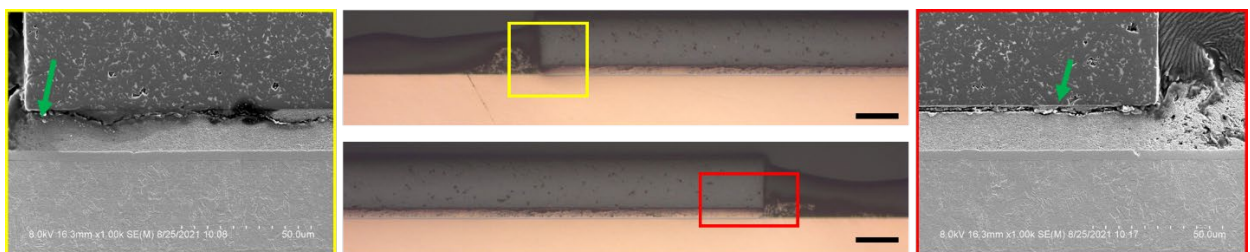


Abbildung 54 - REM-Querschnitt der geätzten Messing-Mikroflakes (3 Gew.-% Zn) auf Basis der Verbindung nach 1000 Thermoschockzyklen. Der Maßstab im Lichtmikroskopie-Bild in der Mitte bezieht sich auf 100 µm. Grüne Pfeile zeigen die beobachteten Delaminationen entlang der Kanten und wie erwartet an der Chipschnittstelle.

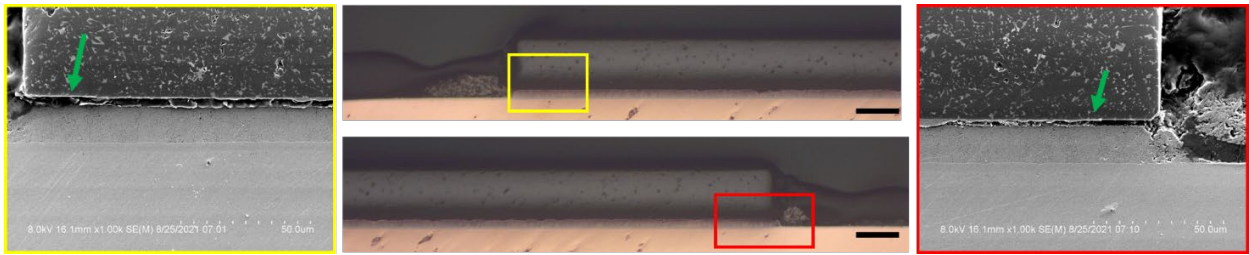


Abbildung 55 - REM-Querschnitt der geätzten Messing-Mikroflakes (6,4 Gew.-% Zn) auf Basis der Verbindung nach 1000 Thermoschockzyklen. Der Maßstab im Lichtmikroskopie-Bild in der Mitte bezieht sich auf 100 µm. Grüne Pfeile zeigen die beobachteten Delaminationen entlang der Kanten und wie erwartet an der Chipschnittstelle.

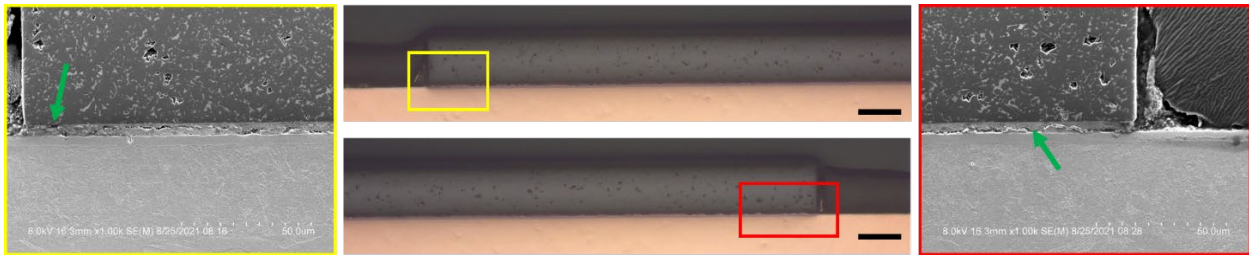


Abbildung 56 - REM-Querschnitt der auf reinem Kupferformiat basierenden Verbindung nach 1000 Thermoschockzyklen. Der Maßstab im Lichtmikroskopie-Bild in der Mitte bezieht sich auf 100 µm. Die grünen Pfeile zeigen die beobachtete Rissausbreitung in der interconnect bulk.

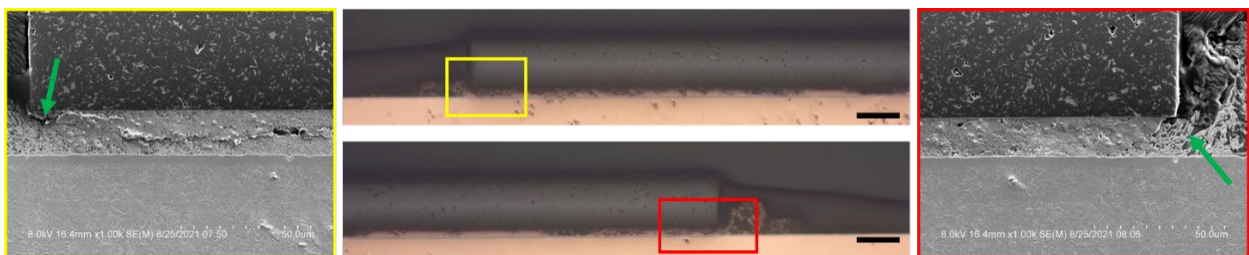


Abbildung 57 - REM-Querschnitt der geätzten Messing-Mikroflakes (0,3 Gew.-% Zn) + Verbindung auf Kupferkomplexbasis nach 1000 Thermoschockzyklen. Der Maßstab im Lichtmikroskopie-Bild in der Mitte bezieht sich auf 100 µm. Grüne Pfeile zeigen die beobachteten Rissbildungen entlang der Kanten.

Abbildung 51 bis Abbildung 57 zeigen die optischen Mikroskopie- und REM-Aufnahmen der Querschnitte der gesinterten Verbindungen nach 1000 Thermoschockzyklen bei $-40/+150^{\circ}\text{C}$. Es ist deutlich zu erkennen, dass die auf reinen Cu-Flakes basierenden Interconnects und die auf reinem Kupfersalz basierenden Interconnects im Vergleich zu den auf reinen Ag-Flakes und den geätzten Messing-Flakes basierenden Interconnects eine sehr geringe Bondline-Dicke aufweisen (Abbildung 58). Während alle gesinterten Verbindungen erwartungsgemäß Delaminationen entlang der Kanten und vor allem entlang der Chipschnittstelle aufweisen, zeigen die geätzten Messing- und Kupferkomplex-basierten gesinterten Verbindungen keine Delaminationen oder Rissausbreitung entlang der Kanten, was mit der SAM-Bildgebung in Abbildung 49 übereinstimmt. Von allen gesinterten Materialien, die in dieser Studie untersucht wurden, zeigte diese Paste die beste Leistung unter Thermoschockbedingungen.

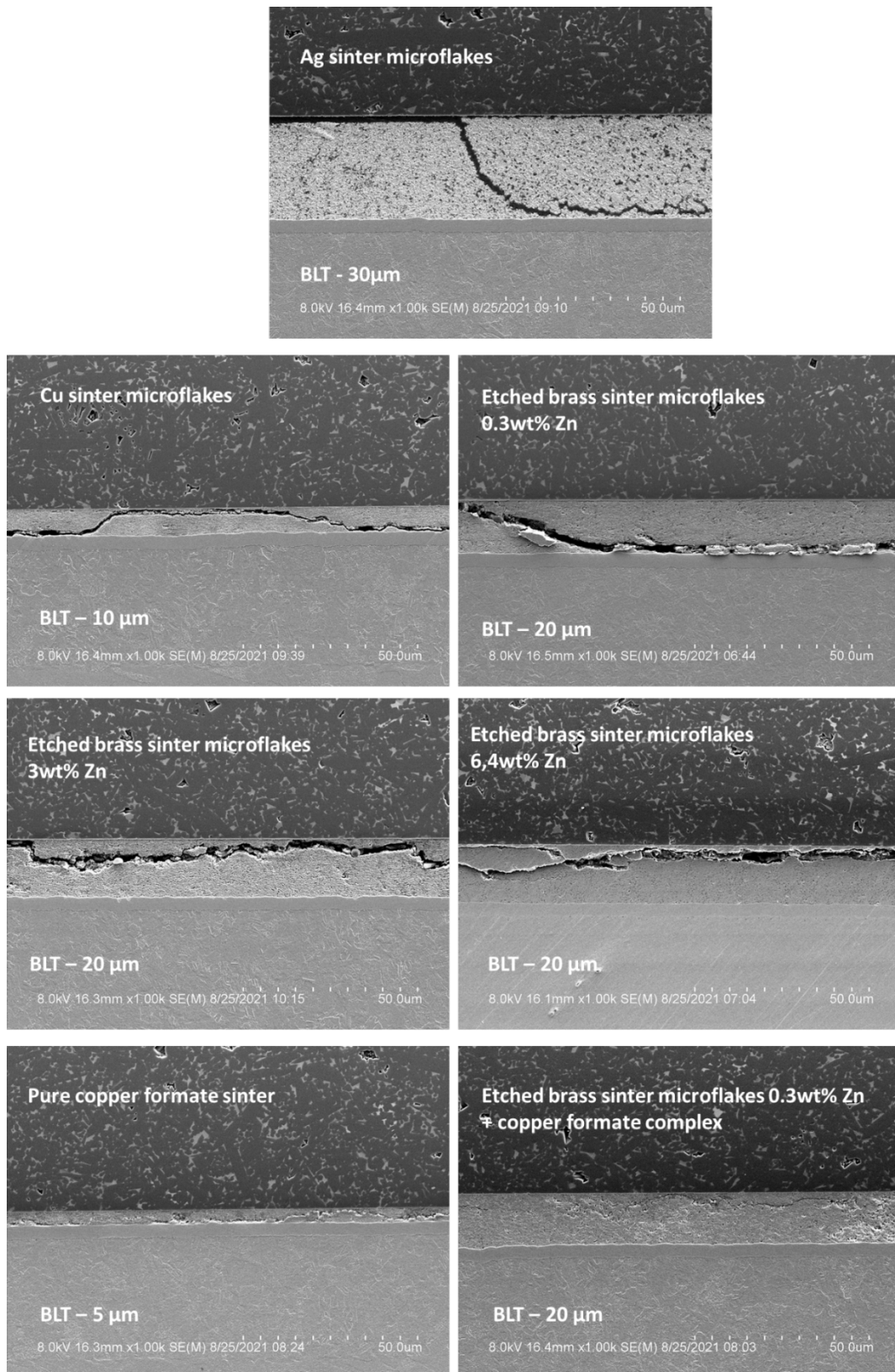


Abbildung 58 – REM-Analyse der gesinterten Verbindungen, die deutlich den Unterschied in der Bondliniendicke zwischen den verschiedenen untersuchten Sinterpasten zeigt.

- Transfer von ausgewählten Sinterprozessen

Die Forschungsgruppe arbeitet weiterhin eng mit Osram zusammen, und die im Haus entwickelten Sinterpasten und die entsprechenden Prozesse, einschließlich der Fähigkeiten zum Siebdruck und zur Sinterung, werden an die Prototyping-Abteilung von Osram Regensburg übertragen, wo nun verschiedene Versuche zur Sinterung von Mini-LEDs mit Kupfersinterpasten durchgeführt werden. Darüber hinaus wurde ein neues Projekt als bilaterale Vereinbarung zwischen der Universität und Osram definiert, um gesinterte Interconnects für die Kontaktierung von Laserdioden zu realisieren. Das angestrebte Sinterprozessfenster arbeitet mit 10 MPa Sinter Druck für 5 min bei 275°C.

2. Voraussetzungen/Ausgangslage

Das Projekt IQLED startete auf dem Know How der Gruppe „Mikroelektronik Packaging“, das in den Projekten SmartLED, Wafer Level Tester und ZuKo, in denen Interconnect-Prozesse, vor allem flussmittelfreies Lötten und Silbersintern, und Testmethoden, vor allem die relative Thermisch Transiente Analyse, erworben worden war. In den Vorarbeiten der Projekte war die Reduzierung von Metallen, Loten und Kupfermetallisierung, über den Einsatz gasförmiger Ameisensäure untersucht worden. Diese Erkenntnisse wurden auf Kupfermaterialien und das Kupfersintern transferiert, um die kritische Frage der Oxidation von Kupfer zu lösen. Des Weiteren wurde in dem Projekt IQLED der automatisierte TTA Tester der Forschungsgruppe als grundlegendes Basisgerät verwendet und weiterentwickelt, um fundamentale Funktionen zu integrieren.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

		Jahr 1				Jahr 2				Jahr 3				Jahr 4	
		Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2
WP1	Sinterprozess und Materialentwicklung														
WP1-1	Sinter Pasten														
1.1.1	Metallpulvermodifikation														
1.1.2	Binder Entwicklung														
1.1.3	Metallsalze als Quelle atomaren Metalls														
1.1.4	Pastenherstellung, Sinterprozess und Testen des Interconnects														
1.1.5	Pasten Applikation und Prozessscreening														
WP1-2	Design of Experiments (DOE) Sinterprozess für Interconnect														
1-2.1	Prozess/Material Screening														
1-2.2	Prozess DOE														
1-2.3	Arraysintern														
M1-1	Verbesserung durch nanoporöse Pasten gezeigt														
WP1-3	Interconnect Charakterisierung und Anpassung Material/Prozess														
1-3.1	Messung Scherkriechen														
1-3.2	Stressmessung über RAMAN Spektroskopie														
1-3.3	Anpassung von Material und Prozessparametern														
M1-2	Potentielle Sinterinterconnects realisiert														
WP2	Qualifikation der Interconnects durch TTA/Rth Messungen														
WP2-1	Gepulste und stochastische TTA														
2-1.1a	Entwicklung gepulste/stochastische TTA (Stromquelle)														
2-1.2a	Integration in TTA Tester (Stromquelle)														
2-1.3a	Validierung (Stromquelle)														
M2-1a	Vermessung des Interconnects kleiner Bauteile realisiert														
2-1.1a	Entwicklung gepulste/stochastische Laser TTATTA														
2-1.2a	Integration in TTA Tester														
2-1.3a	Validierung														
2-1.3a	Vermessung des Interconnects mit Laser TTTA auf Anlage Validiert														
WP2-2	Aufbau eines kombinierten beschleunigten Teststandes														
2-2.1	Integration optische Messung														
2-2.2	Integration der Testkammer														
2-2.3	Validierung														
MB1.1	Kombinierter Teststand betriebsbereit														
WP3	Zuverlässigkeit														
WP3-1	Lot und Underfill Prozessanpassung und Entwicklung														
3-1.1	Prozessanpassung der Lotprozesse (AuSn und SAC)														
3-1.2	Underfill- und Verkapselungsprozessentwicklung														
3-1.3	0-Stunden Qualitätssicherung / Zuverlässigkeits-Screenen														
M3-1	Entscheidung DOE Zuverlässigkeit														
WP3-2	Zuverlässigkeitstesten														
3-2.1	Testprobenaufbau und 0-Stundenanalyse														
3-2.2	Zuverlässigkeitstesten, Fehleranalyse und Auswertung														
WP3-3	Transfer von ausgewählten Sinter und Testprozessen														
M3-2	Sinterpasten Potential gegenüber Lötverbindungen gezeigt														
Gesamt Vollzeitäquivalente (PM)															

II. Eingehende Darstellung

1. Soll-Ist-Vergleich der geplanten und erzielten Ergebnisse sowie der eingesetzten Mittel

WP1: Sinterprozess und Materialentwicklung

Im Gegensatz zu den geplanten Aktivitäten des Projekts wurde der Schwerpunkt sehr früh auf Kupfer- und Kupferlegierungspulver gelegt, da diese ein hohes Potenzial aufweisen, so dass Gold-Nanopulver nicht untersucht wurden. Im Falle von Silberpartikeln wurden kommerziell erhältliche Pasten ausgewählt, die ein breites Spektrum an Partikelbasis bieten, nämlich DOWA (Ag-Paste auf Nanopartikelbasis), NanoJoin (Paste auf Nanopartikel- und Silbersalzbasis) und Heraeus (Silbersinterpasten auf Basis mikroskaliger Flakes). Für das anfängliche Benchmarking wurde DOWA gewählt, da es die Standardsinterpaste in der Serienproduktion bei Osram ist.

Es wurden mehr Ressourcen als geplant in das Design, die Entwicklung und die Charakterisierung der geätzten Messingplättchen gesteckt, zum einen wegen des hohen Potenzials für die Realisierung einer Niedertemperatur- und Niederdruck-Sinterpaste und zum anderen wegen des hohen Forschungswerts, den sie für die Gruppe beim Versuch, die Auswirkungen verbesserter Oberflächenmodifikationen und Oberflächenoxide auf die Sinterung zu verstehen, darstellen würden. Dazu gehörte auch der Aufbau neuer Kooperationen, insbesondere in Großbritannien mit Dr. Hiren Kotadia und seinem Labor für die TEM-Analyse der Flocken, sowie eine enge Zusammenarbeit mit Schlenk zur Entwicklung eines besseren Verständnisses des Ausgangsmaterials und der Faktoren, die dessen Eigenschaften beeinflussen. Bei den organischen Bindemitteln wurde eine detaillierte Übersicht über den Stand der Technik bei der Silber- und Kupfersinterung durchgeführt, um die erforderliche Formulierung zu entwickeln, die einen einfachen Übergang von der Silbersinterung zur Kupfersinterung unter Verwendung etablierter Verfahren und Anlagen ermöglichen würde. Als Ergebnis der umfangreichen Arbeiten auf diesem Gebiet konnten zahlreiche Veröffentlichungen in hochrangigen Fachzeitschriften sowie auf führenden internationalen Konferenzen vorgelegt werden. Ein wissenschaftlicher Mitarbeiter hat auch seine Doktorarbeit zu diesem Thema abgeschlossen und wird demnächst die Verteidigung seiner Arbeit abschließen.

WP2: Qualifikation der Interconnects durch TTA/ R_{th} -Messungen

Die effektive Entwicklung der μ -Raman-Spektroskopie als vielversprechende zerstörungsfreie Analysemethode für die Charakterisierung von gesinterten Verbindungen trug dazu bei, ein grundlegendes Verständnis des Verhaltens von gesinterten Verbindungen im Vergleich zu herkömmlichen Hochtemperaturlötlagen wie AuSn und Standardlötungen für SMD wie SAC305 zu entwickeln. Diesbezügliche Veröffentlichungen erfolgten auch in Fachzeitschriften und auf führenden internationalen Konferenzen. Die TTA-Messungen der LEDs wurden sowohl als 0-Stunden-Analyse als auch nach Thermoschockzyklen erfolgreich abgeschlossen. Die Kriechmessungen in Kombination mit dem Bildkorrelationssystem konnten nicht in vollem Umfang abgeschlossen werden, wie es im Projekt vorgesehen war. Die Korrelation mit der μ -Raman-Spektroskopie und das detaillierte Verständnis der Eigenschaften der gesinterten Mikrostruktur, insbesondere der Porosität und deren Einfluss auf das Kriechverformungsverhalten, wird im Rahmen der laufenden Forschung weiterverfolgt.

WP3: Zuverlässigkeit

Die Realisierbarkeit der gesinterten Kupferverbindungen wurde anhand der Mikroflocken-Partikelmorphologie mit handelsüblichen Silbersinterpasten verglichen. Die Analyse ergab, dass die Leistung der Kupferpasten unter denselben Sinterbedingungen mit der von Silbersinterpasten vergleichbar war. Bei den neuen Arbeiten, die als Fortsetzung der im IQLED durchgeführten Arbeiten durchgeführt werden, wurde jedoch festgestellt, dass unter den optimalen Bindungsbedingungen von 15 MPa, 5 Minuten Sinterung und 275°C Sintertemperatur eine

überragende Zuverlässigkeit und Leistung gewährleistet werden muss. Die Arbeiten zur Verkapselung und zum Underfill konnten nicht in vollem Umfang abgeschlossen werden, wie es im Rahmen des Projekts vorgesehen war, aber die ersten Versuche zur Verkapselung wurden durchgeführt. Es handelt sich jedoch um einen Standardprozess bei Osram für die einzelnen Komponenten, und eine gut definierte Gruppe von Verkapselungsmitteln sowie die entsprechenden Prozesse und das Fachwissen sind intern verfügbar.

2. Erläuterung der wichtigsten Positionen im zahlenmäßigen Nachweis

Im Rahmen des Projekts wurden drei große Investitionen getätigt.

Bonder Sigma - Das Hauptgerät, das bei diesem Projekt zum Einsatz kam, trug zur Durchführung der gesamten Sinteraktivitäten einschließlich des Array-Bonding bei. Der Fineplacer Bonder wurde mit einer speziell entwickelten Sinterkammer beschafft, die die Durchführung von Sinteraktivitäten mit einer Bondkraft von bis zu 1000N und entweder unter konstantem Stickstofffluss oder mit Ameisensäure angereichertem Stickstoff ermöglicht. Das Array-Bonding-Werkzeug ermöglichte die automatische Aufnahme und das Bonden von 3x3 Arrays von Chips. Die feine aktive Kraftsteuerung innerhalb der Anlage und die Möglichkeit einer feinen Kraftaufbringungskurve von 1N/s ermöglichten das effektive Bonden der hochempfindlichen LEDs von Osram, ohne sie zu beschädigen. Die automatische Datenerfassung ermöglichte eine effektive Überprüfung der Protokolle nach dem Sintern, falls Anomalien festgestellt wurden.

Kriechtester mit Bildkorrelationssystem - der Kriechtester mit Bildkorrelationssystem ist ein einzigartiger Spezialaufbau von Kammrath & Weiss und der Chemnitzer Werkstoff Technik zur Analyse des Sinterverbundes. Schon früh im Projekt wurde jedoch erkannt, dass für die Durchführung der gewünschten Experimente ein neues Software-Update auf dem Kriechprüfgerät erforderlich war. Dieses wurde über ein anderes öffentlich gefördertes Projekt beschafft und die Messungen begannen daraufhin. Während die Kriechmessungen erfolgreich verlaufen, konnte die Integration des Bildkorrelationssystems und dessen Nutzung im Rahmen dieses Projekts nicht sichergestellt werden. Diese Aktivitäten laufen jedoch innerhalb der Gruppe weiter und werden von den wissenschaftlichen Mitarbeitern bearbeitet, um sie bei ihren jeweiligen laufenden Projekten zu unterstützen, bei denen die Materialcharakterisierung wichtig ist, um digitale Materialmodelle zu entwickeln und Prognosemöglichkeiten für die Materialleistung und -zuverlässigkeit zu haben. Das Kriechprüfgerät war eine wichtige Anschaffung, da es zu einer sehr detaillierten Analyse der gesinterten Verbindungen beiträgt und eine konstante Belastung mit einer Toleranz von 1N und Belastungsraten von nur 2nm/s ermöglicht. Die ersten Ergebnisse sind vielversprechend, und obwohl die Gruppe die detaillierte Analyse des Testers nicht wie geplant abschließen konnte, liefern die im Laufe des Projekts durchgeführten μ -Raman-Messungen eine Basislinie, die mit dem Scherkriechtester korreliert.

Luftfilter für Labor - der Luftfilter für das Labor war eine wichtige Investition, die dazu beitrug, die ersten Schritte in Richtung eines Reinraums und eines klar abgegrenzten Bereichs zur Durchführung der AVT-Experimente zu realisieren. Die hochpräzisen und teuren Geräte, die im Laufe des Projekts angeschafft wurden, insbesondere der Sigma-Bonder, benötigten eine kontrollierte Umgebung, um Genauigkeit und stabile Leistung zu gewährleisten. Außerdem erforderte die Arbeit mit LEDs mit einer kleinen Grundfläche von 1 mm² und deren Handhabung eine spezielle Umgebung, um sicherzustellen, dass externe Faktoren wie Staub oder andere organische Rückstände, die die Sinterung drastisch behindern würden, möglichst wenig Einfluss haben. Daher war der Filter eine wichtige Investition zur Entwicklung eines speziellen AVT-Bereichs im Forschungslabor.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Aufgrund des Potenzials, das die geätzten Messingplättchen für die Herstellung einer bei niedrigen Temperaturen und niedrigem Druck sinterbaren Paste aufweisen, wurde schon sehr früh im Projekt der Schwerpunkt daraufgelegt, das Material so detailliert wie möglich zu charakterisieren und auch ein detailliertes Verständnis des Verhaltens der Sinterpasten zu entwickeln. Daher wurden erhebliche Anstrengungen unternommen, um das Material zu verstehen und über den definierten Rahmen des Projekts hinaus die Materialien zu charakterisieren, einschließlich XRD- und XPS-Messungen mit Partneruniversitäten und -labors. Eine enge Zusammenarbeit wurde auch mit dem Materiallieferanten Schlenk Metallic Pigments GmbH entwickelt, um ein möglichst umfassendes Verständnis des vorliegenden Materials zu erlangen. Dies war notwendig, da die Materialien neben den organischen Bindemitteln einen sehr wichtigen Teil der Paste bilden. Obwohl all diese Aspekte in diesem Bericht nicht detailliert dargestellt werden, wurden die Ergebnisse im Rahmen des Projekts in hochrangigen Zeitschriften und aufführenden IMAPS- und IEEE-Konferenzen veröffentlicht. Die detaillierte Liste der Veröffentlichungen ist diesem Bericht beigelegt.

Das Endergebnis ist ein umfassendes Verständnis des Verhaltens von kugelmahlenen Flocken, das zur Entwicklung der nächsten Reihe von Sinterpasten beigetragen hat, die den Kern des Start-up-Unternehmens CuNex GmbH bilden, das die Sinterpasten nun kommerzialisiert hat.

4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses (Fortschreibung des Verwertungsplanes)

Die Entwicklung der Kupfersinterpasten im Rahmen des Projekts und die positive Bewertung derselben durch die Industrie führten zur Gründung der CuNex GmbH als Spin-off der Technischen Hochschule Ingolstadt. Ziel des Start-ups ist die Kommerzialisierung der Kupfersinterpasten und die Weiterentwicklung anderer kupferbasierter Verbindungstechnologien für Anwendungen in der Hochleistungs- und Optoelektronik.

5. Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen während der Durchführung

IQLED gab den Anstoß zur Entwicklung neuartiger kostengünstiger Kupfersinterpasten und damit die Möglichkeit, eine ganze Reihe neuer Projekte zu definieren, die es uns auch ermöglichten, erfolgreich öffentliche Fördermittel im Rahmen der Projekte JoinCuNext, ADDIRA, DFG-CuSint und Copperfield zu beantragen und einzuwerben. Durch die enge Zusammenarbeit mit Osram und das Interesse anderer Industriepartner, vor allem im Bereich der Hochleistungselektronik, war die Forschungsgruppe in der Lage, neue Industriepartnerschaften und Konsortien für bilaterale und öffentlich finanzierte Projekte aufzubauen. Damit ist das AVT-Labor in Ingolstadt heute eines der führenden Labore in Deutschland auf dem Gebiet der angewandten Forschung für Kupfersintermaterialien, einschließlich der Materialentwicklung und vor allem der Charakterisierung der Materialien mit Hilfe modernster und einzigartiger Geräte.

6. Geplante und erfolgte Veröffentlichungen im Rahmen des Vorhabens

Siehe Anlage

III. Erfolgskontrollbericht

Siehe Anlage.

IV. Kurzfassung/Berichtsblatt

Siehe Anlage.

E. Literaturverzeichnis

- [1] H. Schwan, M. Schmid and G. Elger, "Laser Stimulated Transient Thermal Analysis of Semiconductors," *2022 28th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC)*, Dublin, Ireland, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/THERMINIC57263.2022.9950672.
- [2] M. Schmid, "Weiterentwicklung der transienten thermischen Analysen für Leistungs-Halbleiter," 2023, 10.14279/depositonce-17406.
- [3] M. Schmid, A. Zippelius, A. Hanß, S. Bockhorst, G. Elger. (2022). Investigations on High-Power LEDs and Solder Interconnects in Automotive Application: Part I -Initial Characterization. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*. 22. 1-1. 10.1109/TDMR.2022.3152590.
- [4] M. Schmid, A. Zippelius, A. Hanß, S. Bockhorst, G. Elger. (2023). Investigations on High-Power LEDs and Solder Interconnects in Automotive Application: Part II -Reliability. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*. Not published yet, but reviewed.