

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

# Öffentlicher ABSCHLUSSBERICHT

zum Projekt BIG  
Teilprojekt der TAMURA ELSOLD GmbH

Bereitstellung von Innovationen für  
große Waferformate –  
Entwicklung niedrigschmelzender und thermisch zuverlässiger  
Lotpasten für die flexible und leistungsfähige Fertigung

<b>Laufzeit:</b>	<b>3 Jahre plus kostenneutrale Verlängerung (aufgrund anderer Teilprojekte im Gesamtkonsortium) (01.06.21-31.05.25)</b>
<b>Projektpartner:</b>	<b>TAMURA ELSOLD GmbH</b>
Ansprechpartner:	Dr.-Ing. Nils Kopp
Telefon:	039452 - 487921
Fax:	039452 - 487966
E-Mail:	n.kopp@tamura-elsold.de
<b>Datum:</b>	<b>28. November 2025</b>

**Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für  
Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 03EE1116C gefördert. Die Verantwortung für  
den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.**

## ***Einleitung und Ziele***

Die Fertigung von Solarzellen ist heute fast ausschließlich in Asien angesiedelt. Deutsche PV Modulproduzenten sind noch am Markt vertreten, stehen allerdings auf Grund der starken Konkurrenz aus Asien vermehrt unter Preisdruck und können nur überleben, wenn sie herausragende Produkte in Bezug auf deren Betriebseigenschaften und möglichen Anwendungszwecken anbieten können. Da die PERC Zelle, welche momentan das Arbeitspferd der Si basierten PV-Produktion ist, vom Wirkungsgradpotential für die industrielle Fertigung nahezu ausgeschöpft ist und kostengünstige Alternativen noch nicht im Markt Fuß gefasst haben, setzen die meisten Zell- und Modulproduzenten derzeit auf die Herstellung größerer Solarzellen, um Module mit höheren Nennleistungen anbieten zu können.

Dies stellt eine Herausforderung für kleine Modulproduzenten speziell in Bezug auf die Zell-Zell-Verbindung dar. Kostspielige Aufrüstungen bestehender Prozessanlagen sind nötig, um größere Zellen, Teilzellen oder Zellen mit erhöhter Busbaranzahl verarbeiten zu können. Zu diesen Schritten sehen sich Modulproduzenten gezwungen, da sie vom Angebot der Lieferanten abhängig sind. Allerdings fehlt ihnen die Planungssicherheit für solche Investitionen, da sie nicht sicherstellen können, dass die Zelllieferanten ihr Portfolio über längere Zeit beibehalten, was nötig wäre, dass sich die Investition in eine Aufrüstung einer Prozessanlage rechnet. Diese rapide Entwicklung der Zellformate und Konfigurationen sollte im Rahmen des BIG Projektes als Chance genutzt werden, um mit in Deutschland entwickelten Prozessanlagen und Verbrauchsmaterial den deutschen Modulproduzenten neue Möglichkeiten anzubieten welche nicht nur kosteneffektive Produktion kommerziell attraktiver Module sondern auch Prozessflexibilität und somit Planungssicherheit bieten kann. Dies wird den heimischen Modulherstellern erlauben, sich weiterhin zu diversifizieren und sich vom Massenmarkt abzusetzen. Hierfür wurden Produktionsprozesse und Materialien entwickelt, die sich flexibel für verschiedene Waferformate einsetzen lassen und somit eine effektive (Kosten und Zell zu Modul Leistungsverluste) Produktion von Solarmodulen erlauben.

Ziel dieses Teilprojektes war es bleifreie Lotpasten für die flexible und leistungsfähige Fertigung von Solarmodulen, im Schindelprozess und mit Kupferflachdraht, zu entwickeln. Die Applikation sollte über Jet-Dispensprozesse und über Hochleitungsdruckprozesse ermöglicht werden. Eine gegenüber dem Stand der Technik erhöhte thermische Belastbarkeit bei gleichzeitig geringer thermischer Belastung im Lötprozess erhöht die Flexibilität in der Prozesskette. Grundvoraussetzung ist dabei die Sicherheit der Lötverbindungen, die auch in enger Zusammenarbeit mit dem TP des ISC nachgewiesen werden sollte. Hiermit sollten folgende Vorteile geschaffen werden:

- **Ökologie & Arbeitssicherheit:** Verzicht auf reproduktionstoxische und umweltgefährdende Stoffe, im Vergleich zu bleihaltigen Lotpasten
- **Ökonomie:** Faktor 10 günstigere Materialrohstoffkosten im Vergleich zu Leitlebern
- **Sicherheit & Leistungsfähigkeit:** Nachgewiesene, erhöhte Sicherheit der Lötverbindungen gegenüber Korrosion und thermischen Belastungen
- **Produktivität & Flexibilität:** Einsatz in flexiblen (Jet) und schnellen (Hochleistungsdruck) Applikationsprozessen, flexible Prozesskettengestaltung.

## ***Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele***

Mit den zu entwickelnden bleifreien Lotpasten steht erstmals eine Lösung bereit, mit niedrigen Materialkosten und moderaten Fügeprozesstemperaturen deutlich unter 200 °C dennoch elektrisch und mechanisch nachgewiesenen zuverlässigen und thermisch belastbaren Verbindungen in Solarmodulen zu realisieren, die darüber hinaus

kein Blei enthalten. Eine damit realisierbare, bislang in Kombination mit entsprechend niedrigen Löttemperaturen nicht mögliche, Weiterverarbeitung bereits gelöteter Verbindungen bzw. Module in nachgelagerten Fertigungsschritten mit thermischer Belastung (Laminieren: 15 min @ 165 °C) schafft neue Möglichkeiten der Prozesskettengestaltung. Der Stand der Technik wird sowohl hinsichtlich der Eigenschaften der Lotpasten bzw. der Lötverbindungen als auch der verlässlichen Kenntnis dieser Eigenschaften unter anwendungsspezifischen Vorgaben wesentlich übertroffen. Letztere ermöglicht erst den zielgenauen Einsatz und die angepasste Auslegung von Strukturen und Prozessen einerseits und eine langjährige Nutzung der gelöteten Module andererseits. Geringere Strukturgrößen können ebenso realisiert werden wie ein breites Band an Applikationsprozessen und Losgrößen – vom massentauglichen Druck bis zum hochflexiblen Jet-Prozess bei kleinen Stückzahlen oder nur punktuellen Verbindungen. Die Voraussetzungen für die Entwicklung flexibler Lösungen zur Zellverbindung, einerseits im Schindelprozess und andererseits mittels nicht vorbeloteter Flachdrahtverbinder, z.B. auch für die Verbindung von temperatursensitiven Si-Heterojunction Zellen, werden so geschaffen.

Dabei werden folgende Einzelziele angestrebt:

- Entwicklung einer bleifreien Lotpaste für den Einsatz in Schindelmodulen und Entwicklung einer bleifreien Lotpaste für den Einsatz in verbinderbasierten Modulen
  - Entwicklung geeigneter Lotlegierung
    - Notwendige Löttemperatur  $\ll$  200 °C, zur Reduktion der thermischen Belastung (induzierte Spannungen, temperatursensitive Materialien, geringerer Energiebedarf)
  - Entwicklung geeigneter Flussmittel
    - Zuverlässiges Aufschmelzen ohne verstärkte Oxidation (solder balling) der Lotpulver, auch bei feinen Korngrößen
    - Gute Benetzung der Modulmaterialien, insb. auch Cu-blank
    - Sicher gegenüber Korrosion und Elektromigration
- Übergangswiderstand zwischen Lotpaste und Zellmetallisierung bzw. Lotpaste und Kupferverbinder gleich oder niedriger als bei Verbindungen mit typischen Leitlebern (in Zusammenarbeit mit TP ISC)
- Prototypenmodule mit Schindelverbindung und verbinderbasierte Prototypenmodule bestehen erweiterte Zuverlässigkeitstests nach IEC (TC400, DH2000) (in Zusammenarbeit mit TP ISC, Ergebnis der erfolgreichen Lot- und Flussmittelentwicklung)
- Lotpastenformulierung für den Einsatz in Hochleistungsdruckprozessen entwickelt
  - Optimierung der Flussmittelviskosität
  - Optimierung von Lotpulveranteil und -korngrößenverteilung
- Lotpastenformulierung für den Einsatz in Jet-Dispensern entwickelt
  - Angepasste Entwicklung von Flussmitteln mit für den Jetprozess geeigneter Rheologie
  - Optimierung von Lotpulveranteil und -korngrößenverteilung
- Jet-Dispensing Prozess für Lotpaste in der Laboranlage am ISC etabliert (Unterstützung des TP ISC durch geeignete Lotpasten, Cu-Oxidationsschutz und Know How)

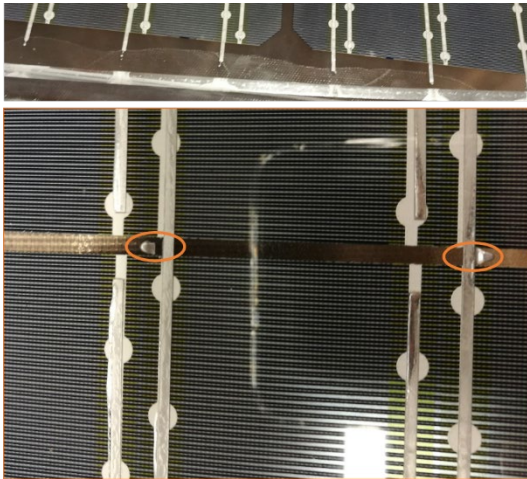
## Stand der Wissenschaft und Technik und Alternative F&E- und Lösungsansätze

Um die elektrische und mechanische Verbindung der Solarzellen im Modulverbund zu ermöglichen, entspricht die Verwendung von lotbeschichteten (fast ausschließlich SnPb) Kupferflachdrähten oder silberhaltigen Leitklebern dem Stand der Technik. Als Alternative versprechen Lotpasten mit günstigeren Rohstoffpreisen (Metallpreis: Ag 740 €/kg; Sn 15 €/kg) und einer durch Schmelzprozesse grundsätzlich gegebenen Recyclingfähigkeit wesentliche ökonomische und ökologische Vorteile. Als genormte Legierungen finden bislang insbesondere SnAgCu (insb. Sn96.5Ag3Cu0.5) und SnBi(Ag) (insb. Sn42Bi58) Verwendung (ISO 9453) (Pfluke, 2011), (Henkel Loctite, 2020)). Erstere erfordern mit einer Schmelztemperatur von knapp 220 °C für die Komponenten der Solarmodule teils zu hohe Fügeprozesstemperaturen, insbesondere in Hinblick auf entstehende thermisch induzierte Spannungen. Bei Letzteren liegt die Schmelztemperatur bei nur ca. 140 °C, was hingegen die weitere thermische Belastbarkeit einschränkt und somit z.B. nachgeschaltete Laminierprozesse verhindert, so dass hier teilweise eine Integration des Löt- in den Laminierprozess gewählt wird (Angela De Rose\*, 2017). Der Zwischenbereich hätte in der Vergangenheit teilweise mit bleihaltigen Pasten (ca. 180 °C) gefüllt werden können, was sich aber aus Aspekten des Umwelt- und Gesundheitsschutzes verbietet. Auch wenn die Solarmodule nicht unter die RoHS-Vorgaben fallen, so dass Blei hier nicht offiziell verboten ist, ist dieses doch von der ECHA als besonders besorgniserregender Stoff (SVHC) eingestuft, reproduktionstoxisch und als Pulver, das die Basis für Lotpasten bildet, zudem umweltgefährdend. Ab dem 01.01.2021 gilt zudem eine aufwändige Registrierungspflicht (SCIP) für mit bleihaltigen Werkstoffen gefertigte Produkte. Eine Nutzung für Neuentwicklungen erscheint damit trotz günstigem Schmelzverhalten nicht mehr zu rechtfertigen.



Abbildung 1: Schmelzbereich konventioneller Lotlegierungen im Vergleich zu Löt- und Laminiertemperaturen und mögliche Lösungsansätze

Abbildung 1 zeigt die Schmelztemperaturen konventioneller Lotlegierungen im Vergleich zu angestrebten Löttemperaturen und typischen Laminiertemperaturen. Bei Sn42Bi58 ist ein Löten im Laminierprozess möglich, erfordert ggf. aber spezielle technologische Maßnahmen, z.B. entsprechend (Mondon, et al., 2018), zur Vermeidung eines Verschimmens und schränkt die Prozessgestaltung durch die Kombination der unterschiedlichen Anforderungen an Zeit-Temperatur-Profile ein.



**Abbildung 2: Wiederaufschmelzen von SnBi-Lot im Laminierprozess [ISC]**

Ein Laminieren nach dem Löten mit Sn42Bi58 bei industrietypischen Temperaturen oberhalb von 150 °C (Michel, Maiocchi, & Lange, 2010) führt zwangsläufig zu einem Wiederaufschmelzen der Lötverbindung mit dem Risiko der Entnetzung und ebenfalls des Verschwimmens. Ein Beispiel zeigt eine interne Untersuchung des ISC (Abbildung 2).

Für andere Anwendungen als die Solartechnik gibt es bereits Entwicklungsideen den Bereich zwischen 140 °C und 220 °C mit metallurgischen bzw. thermo-chemischen (z.B. EP3696850A2 A1 bzw. z.B. US5229070A, US10118260B2) Lösungsansätzen auch bleifrei abzudecken, was auch zu den in Abbildung 1 skizzierten Lösungsansätzen führt. Einerseits kann durch klassische Legierungsentwicklung, d.h. durch Veränderung der Anteile der Legierungselemente oder Zugabe weiterer Legierungselemente eine Veränderung der Solidus- und Liquidustemperaturen erreicht werden, zusätzlich zu hierdurch möglichen Beeinflussungen des Lötverhaltens und der insbesondere mechanischen Eigenschaften der Lötverbindung. Entsprechend der Thermodynamik und -chemie ist häufig aber eine hier angestrebte Erhöhung der Solidustemperatur darüber nur eingeschränkt möglich oder mit einer zu starken Erhöhung der Liquidustemperatur und damit der Löttemperatur verbunden: Wie das Phasendiagramm Sn-Bi zeigt liegt die Solidustemperatur über den großen Bereich von 21 bis 99.9% bei konstant 139°C. Bei kleineren Bi-Gehalten steigen hingegen sowohl Solidus- als auch Liquidustemperatur, so dass für eine angestrebte Solidustemperatur von ca. 175 °C Löttemperaturen deutlich oberhalb von 220 °C resultieren würden.

Ein Ansatz zur Nutzung von Pastenneuentwicklungen, sowohl in Hinblick auf Legierung als auch Korngröße wurde durch die US amerikanische Firma Macdermid Alpha Electronics Solutions verfolgt, die ihre aktuellen Weiterentwicklungen der niedrigschmelzenden SnBi-Pasten auch für eine Anwendung in Schindelstrings untersuchte (Narahari S Pujari 1\*). Zum einen wurde der bekannten eutektischen SnBi-Legierung (dem Produktnamen nach) Antimonmischoxide zugeben, um so eine höhere mechanische Festigkeit und Beständigkeit bei Schockbelastung zu erreichen. Zum anderen wurde eine nicht-eutektische Sn-Bi-Legierung mit ebenfalls verbesserten mechanischen Eigenschaften entwickelt, jedoch ohne die Legierung weiter zu charakterisieren. Die möglichen Prozess- und Einsatztemperaturen werden jedoch mit Liquidustemperaturen von 138 °C bzw. 152 °C nicht oder nicht ausreichend erweitert, so ist der nachfolgende Laminierprozess hier auf 140 °C beschränkt ist, was deutlich unterhalb des Temperaturniveaus von industrietypischer Prozesse liegt (s.o.). Weiterhin ist die Applikation auf Druck oder konventionelle Dispensprozesse beschränkt, es sind keine Jet-dispensierbare Formulierungen bekannt, u.a. da auch die eingesetzten Korngrößen mit 20-38 µm hierfür noch immer zu grob sind. Aufbauend auf diesen Arbeiten wurde von Macdermid Alpha Electronics Solutions hier die Patentfamilie WO 2020/233839 A1 angemeldet, bislang aber nur in China und Indien erteilt.

Von (Angela De Rose\*, 2017) wurde zudem die Nutzung von Standard-SnBi-Lotpasten (Schmelzpunkt ca. 140 °C) zum Löten blanker Kupferverbinder grundsätzlich erfolgreich untersucht, was zeigt, dass auch für nicht vorbelo-

tete Verbindermaterialien ein Löten grundsätzlich möglich ist. Betrachtet wurde jedoch nur ein manueller Pastendruck.

Außer der genannten Anmeldung WO 2020/233839 A1 sind keine entgegenstehenden Schutzrechte für Lotpasten spezifisch für die Fertigung von Solarmodulen bekannt. Jedoch wurden für verschiedene niedrigschmelzende Sn-Bi-Basislegierungen in der Vergangenheit Schutzrechte angemeldet, wenige sind noch aktiv. Die Schutzrechte stehen den Entwicklungen dieses Projektes jedoch nicht entgegen, da einerseits die bekannten bzw. aus dem Bi-Anteil abzuschätzenden Solidustemperaturen unterhalb des hier angestrebten Zielbereichs liegen, und zum anderen die Ansprüche ohnehin auf sehr enge Bereiche von enthalten (Mikro-)Legierungselementen begrenzt sind. Vielmehr können die aus den Patenten verfügbaren Daten eine Hilfe zur Festlegung eigener Legierungszusammensetzungen mit dem Ziel höherer Solidustemperaturen sein.

- EP2987876B (aktiv) beschreibt niedrigschmelzende Lotlegierungen mit Rest Sn, 31-59% Bi und den weiteren Legierungselementen 0,01-0,06% Ni, 0,3-1% Cu, 0,001-0,07% P und/oder 0,001-0,03% Ge, mit Liquidustemperaturen im Bereich 140 °C-185 °C.
- CN106216872 (aktiv) beschreibt niedrigschmelzende Lotlegierungen mit Rest Sn, 32,8-56,5% Bi und 0,7-2,2% Sb, wobei das Verhältnis von Bi zu Sb exakt definiert ist.
- EP3696850A2 (noch nicht erteilt) beschreibt niedrigschmelzende Lotlegierungen mit 58-62% Sn, 38-41% Bi und den weiteren Legierungselementen wie Sb und Nb, als Solidustemperatur werden für das damit verbundene kommerzielle Produkt 139 °C genannt.
- US5833921 (abgelaufen) beschreibt niedrigschmelzende Lotlegierungen mit 43-58% Sn, 38-52% Bi und weiteren Legierungselementen wie Sb, Cu, In und Ag mit Schmelztemperaturen im Bereich 133°-167° C.
- JPH11221693 (abgelaufen) beschreibt niedrigschmelzende Lotlegierungen mit Rest Sn, 30-58% Bi und den weiteren Legierungselementen Sb, Ag und Ge, mit einer Liquidustemperatur von ca. 180 °C.
- JP4135268B2 (abgelaufen) beschreibt niedrigschmelzende Lotlegierungen mit Rest Sn, 25-55% Bi und den weiteren Legierungselementen Cu und In.
- JPH08252688A (abgelaufen) beschreibt eine niedrigschmelzende Lotpaste aus 37-58% Sn, Rest Bi und Ag.
- DE19904765 (abgelaufen) beschreibt niedrigschmelzende Lotlegierungen mit Rest Sn, 30-58% Bi und den weiteren Legierungselementen Ge, Ag, Sb, Ni und Cu.

Aktive Schutzrechte für Flussmittel, die speziell für niedrigschmelzende Lotpasten entwickelt wurden, sind nicht bekannt. Historisch ist hier das Schutzrecht DD264175A1 zu nennen. Dieses beschreibt ein Flussmittel für niedrigschmelzende Lotpasten, welches für Lötungen elektronischer Bauteile unter Temperaturen von 175°C angewendet wird, gekennzeichnet dadurch, dass das Flussmittel aus einem Harz und einer alkylsubstituierten aromatischen Sulfonsäure besteht.

## ***Zusammenarbeit mit anderen Stellen und Ablauf des Vorhabens***

Das Projektkonsortium bestand aus folgenden Verbundpartnern, wobei die Leitung und Koordinierung vom ISC übernommen wurde.

Firma/Institut	Ansprechpartner	Adresse
ISC Konstanz e.V.	Andreas Halm	Rudolf-Diesel-Str. 15, 78467 Konstanz
ASYS Automatisierungssysteme GmbH	Dr.-Ing. Julius Röth	Benzstr. 10, 89160 Dornstadt
TAMURA ELSOLD GmbH	Dr.-Ing. Nils Kopp	Hüttenstraße 1, 38871 Ilsenburg



Abbildung 3: Ablauf des Gesamtprojektes

Abbildung 3 zeigt den Ablauf des Gesamtprojektes, wobei die eigenen Schwerpunkte klar in AP4 lagen wie auch folgende Arbeitsstruktur (Abbildung 4) zeigt:

AP	Bezeichnung	* AP Leiter
<b>1</b>	<b>Koordination und Kostenkalkulation</b>	<b>ISC</b>
1.1	Koordination	ISC, alle
1.2	Kosten	ISC, alle
<b>2</b>	<b>Integration Zelltechnologie</b>	<b>ISC</b>
2.1	Entwicklung einer PERC Zelltechnologie mit Emitterfenster	ISC
2.2	Anpassungen der Zellprozesse für größere Waferformate	ISC, ASYS
2.3	Herstellung / Metallisierung PERC (+) und MoSON (+) in verschiedenen Größen	ISC, ASYS
<b>3</b>	<b>Entwicklung kombinierter Prozess Laserschneiden und Kantenpassivierung</b>	<b>ASYS</b>
3.1	Messmethoden zur Bestimmung des Laserschadens	ISC
3.2	Laserschneiden und gleichzeitige Al Dotierung	ISC, ASYS
3.3	Laserschneiden und gleichzeitige Phosphor/Bor Dotierung aus einer flüssigen Lösung	ISC, ASYS
3.4	Laseranritzen, brechen und nachfolgende Kantenpassivierung	ISC, ASYS
3.6	Spezifikation des Vereinzelungs- und Kantenpassivierungsprozesses für eine Prototypanlage	ISC, ASYS
3.7	Aufbau und Funktionalität der Zellvereinzelungs- und Passivierungs-Prototypanlage	ASYS, ISC
<b>4</b>	<b>Entwicklung von Lotpaste für Schindel und Verbinderanwendungen</b>	<b>TEG</b>
4.1	Anforderungsdefinition	ISC, TEG, ASYS
4.2	Metallurgische thermo-chemische Ansätze zur Legierungsentwicklung	TEG, ISC
4.3	Pulver-, Flussmittel- und Lotpastenentwicklung	TEG, ISC
4.4	Charakterisierung und Qualifizierung	ISC, TEG
4.5	Hochleistungsdruck	ASYS, TEG, ISC
4.6	Hochdurchsatz Jet-Dispensen	ISC, TEG
<b>5</b>	<b>Modulprozess</b>	<b>ISC</b>
5.1	Entwicklung lotpastenbasierter Verbinderverfahren	ISC, TEG
5.2	Entwicklung lotpastenbasierter Schindelprozess	ISC
5.3	Erweiterung der Verbindungsprozesse auf beliebige Zellformate	ISC
5.4	Herstellung und Charakterisierung Testmodule	ISC
5.5	Machbarkeitsstudie	ISC, UA

Abbildung 4: Arbeitsstruktur des Gesamtprojektes

## **Anforderungsdefinition**

In Kooperation mit dem Projektpartner ISC wurden folgende Anforderungen definiert:

- Prozesszeit: optional weniger als 1 s  
Dies ist zum einen hinsichtlich einer Entweichung von Flussmittelbestandteilen in der Entwicklung zu berücksichtigen.
- Prozesstemperatur: "unter SnPb" 165-180°C, idealerweise 145-155°C
- Abziehkraft: 0,5 N/mm<sup>2</sup> (gleich wie bei Standardbändern).
- Degradation: 2x IEC-Standard für beschleunigte PV-Alterungstests - DH2000 und TC400 mit < 2-3% Leistungsverlust.

Darüber hinaus werden hinsichtlich der Flussmittel RO/RE LO/L1 Flussmittel entsprechend DIN EN 61190-1-1 als Anforderung festgelegt.

## **Legierungsentwicklung und Pulverentwicklung**

Auf Basis der Elemente Sn, Bi, Ag, Cu, Indium und weiterer Zusätze wurden gestützt durch thermo-chemisches Analysen neue Legierungskonzepte entwickelt. Hieraus wurden bei T3 und T5 Lotpulver hergestellt. Die genauen Zusammensetzungen unterliegen der Vertraulichkeit. Im Folgenden werden die Legierungen als SBAC (SnBiAgCuX) bzw. SBIAC oder LTS (Low Temperature Solder) bzw. LTS2 bezeichnet.

## **Flussmittelentwicklung**

Zur Pastenflussmittelentwicklung bildete das bisherige Standard-ROL1-Flussmittel AP-10 die Ausgangsbasis. Untersucht wurden Modifikationen mit nicht gesundheitsschädlichen Lösungsmitteln, alternativen Harzen und Aktivatoren sowie die Zugabe von Korrosionsinhibitoren. Aus den Flussmitteln wurden zunächst zur einfacheren Bewertung des Benetzungsverhaltens (ohne Einfluss der Konturtreueaspekte) Lotpasten mit BSA-Pulver hergestellt und geprüft. Neben Benetzungstest wurde die Viskosität und deren zeitliche Stabilität geprüft. Einzelne Modifikationen wie der Einsatz alternativer Harze (z.B. M3) weisen auf eine Verbesserung bei beiden Eigenschaften hin.

Als ein wesentliches Ergebnis kann der Austausch eines Lösungsmittels (notwendig zur Lösung bestimmter Aktivatoren) festgehalten werden. Sowohl Benetzung als auch Viskosität der Lotpasten zeigen beim so modifizierten Flussmittel AP-10G keine Unterschiede zum Ausgangsflussmittel AP-10, so dass ein 1:1 Austausch ohne große Veränderung bei Applikation oder Lötprozess realistisch möglich erscheint. Auch die Sicherheit hinsichtlich Korrosion und Elektromigration wurde entsprechend erfolgreich geprüft. Ein sehr großer Vorteil ergibt sich aber hinsichtlich des Gesundheits- und Arbeitsschutzes, die bisherige augenschädigende und reproduktionstoxische Wirkung entfällt vollständig, die nunmehr qualifizierte AP-10G ist hingegen nicht als Gefahrstoff eingestuft.

Für die Flussmittelentwicklung wurden wie geplant verschiedene Kombinationen der zuvor entwickelten Modifikationsansätze untersucht. Am geeignetsten in Hinblick auf Benetzungsverhalten und Viskositätsstabilität erwies sich die Kombination aus Einsatz alternativer Harze (M3) und Austausch des Lösungsmittels (notwendig

zur Lösung bestimmter Aktivatoren; Nutzung einer nicht augenschädigenden und reproduktionstoxischen Alternative), die als M3G bezeichnet wurde. Im Hinblick auf einen noch höheren Korrosionsschutz und die Reduktion möglicher chemischer Wechselwirkungen wurden zudem die Varianten M3G+, mit Zugabe eines Korrosionsinhibitors, und M3G-, ohne den ansonsten genutzten Halogenid-Aktivator, entwickelt. Letztere erwies sich jedoch als nicht langzeitstabil, das Fehlen der Halogenide führte zu stärkeren Wechselwirkungen der anderen Bestandteile, deren Ausfällung und einem schnellen Viskositätsanstieg der damit hergestellten Lotpasten. Mit M3G und M3G+ hergestellte Pasten zeigten hingegen eine gute Cremigkeit, mit auch bei Raumtemperatur über lange Zeiten (>4 Monate) vergleichsweise geringem Viskositätsanstieg.

Zur Bewertung der Korrosionsbeständigkeit wurden entsprechend Normvorgaben (EN 61190-1-1) mit den Benetzungsproben Klimatests für 3 Tage bei 40°C und 93% rF durchgeführt, sowie im Anschluss noch über die Norm hinausgehend, 1 weiterer Tag bei 85°C und 85% rF, um den Einfluss höherer Temperaturen abzubilden. Sowohl nach Normtest als auch nach der Ergänzung war keinerlei Korrosion auf Kupfer erkennbar, die Normprüfung ist klar bestanden. Auf Zellmaterial trat insbesondere für die halogenidhaltigen Varianten eine leichte Verfärbung auf, jedoch keine Schädigung des Materials (Abbildung 8).

Das Elektromigrationsverhalten der Flussmittel M3G und M3G+ (ohne Lot) wurde nach IPC-TM-650 bei 85°C und 85% rF auf IPC-B24 Kammstrukturen geprüft. Der SIR lag über die gesamte Prüfzeit von 168 h bei beiden Proben mit Werten zwischen  $10^{12}$  und  $\gg 10^{13}$  Ohm weit oberhalb des zulässigen Grenzwertes von  $10^8$  Ohm. An den Prüfkörpern konnte keine Dendritenbildung nachgewiesen werden (Abbildung 3), für M3G zeigte sich im Unterschied zum M3G+ (mit Korrosionsinhibitor) eine leichte, aber zulässige Grünfärbung des Kupfers.

Zum Abschluss der Einstufung der beiden Flussmittel M3G und M3G+ als sichere ROL1-Flussmittel wurden Kupferspiegeltests durchgeführt, die ebenfalls bestanden wurden (kein Durchbruch, Abbildung 4).

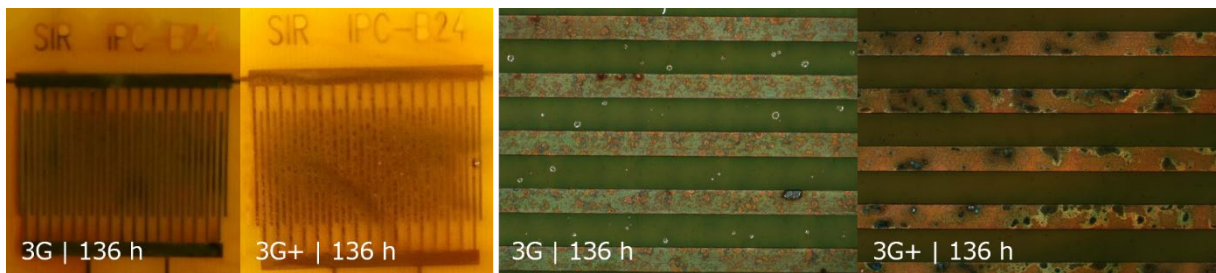


Abbildung 5: Keine Dendritenbildung bei M3G und M3G+ im Elektromigrationstest

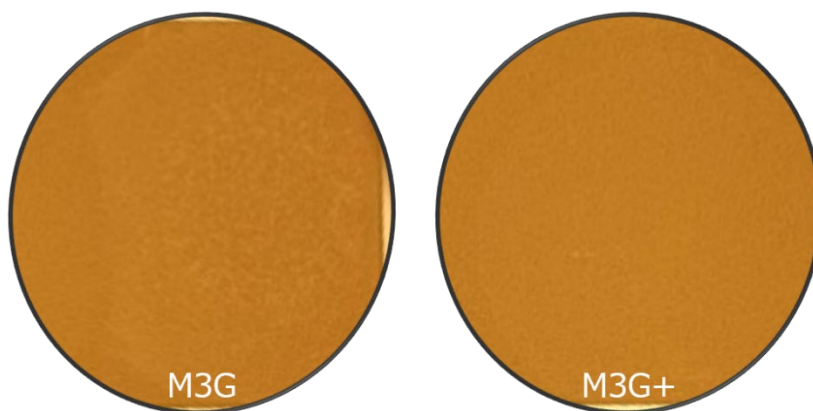


Abbildung 6: Kein Durchbruch im Kupferspiegeltest bei den Flussmitteln M3G und M3G+

Mit AP-10G, M3G und M3G+ stehen als Entwicklungsergebnis drei Flussmittelpasten bereit, die hinsichtlich Viskosität, Gesundheits- und Arbeitsschutz und Lötverhalten (wie in AP4.4. dargestellt), dem Ausgangszustand AP-10 deutlich überlegen sind und alle Normforderungen an eine ROL1-Paste erfüllen.

## Benetzungsverhalten und Grundwerkstoffreinigung

Im Verbindprozess sollen Kupferflachdrähte mit Lotpaste direkt ohne vorherige metallische Beschichtung gelötet werden. Um eine zu starke Oxidation des Kupfers zu verhindern, können sog. OSP (Organic Solderability Preservative) genutzt werden. Zur Evaluierung wurden Kupferflachdrähte mit zwei verschiedenen OSP beschichtet (siehe Abbildung 5 oben rechts) und anschließend in einer Benetzungswaage mit flüssigem BSA- und SAC-Lot das Benetzungsverhalten mit und ohne OSP charakterisiert. Abbildung 5, unten rechts, zeigt, dass (je nach Lot hinsichtlich Benetzungsgeschwindigkeit oder Kraft) eine Verbesserung der Benetzung durch die OSP erreicht werden konnte.

In Versuchen mit Lotpaste (BSA mit AP10G (ROL1) Flussmittelpaste und ROL0 Flussmittelpaste, SAC mit ROL0 Flussmittelpaste) sind die Unterschiede zwischen den Proben mit und ohne OSP jedoch nur sehr gering, auch nach einer thermischen Vorbehandlung. Das Benetzungsverhalten wird maßgeblich durch Lot- und Flussmittel dominiert. Dies zeigt erstens, dass die AP10G (ROL1) Flussmittel eine sehr gute Benetzung auf den angestrebten Materialien ermöglichen. Zweitens, dass bei normalen Zuständen der Cu-Oberfläche die Benetzung so gut ist, dass auf eine OSP verzichtet werden kann. Und andererseits drittens, dass, wenn bei z.B. widrigen Lagerbedingungen (lang, feucht-warm, korrosiv) doch eine OSP erforderlich werden sollte, zumindest hinsichtlich der Benetzung auch eine Kompatibilität zwischen Pasten bzw. Flussmitteln und OSP gewährleistet ist (Abbildung 5 und Abbildung 6).

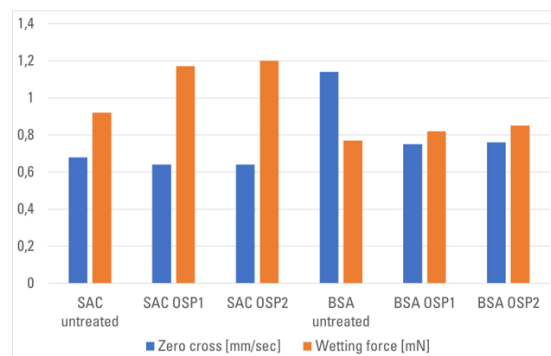
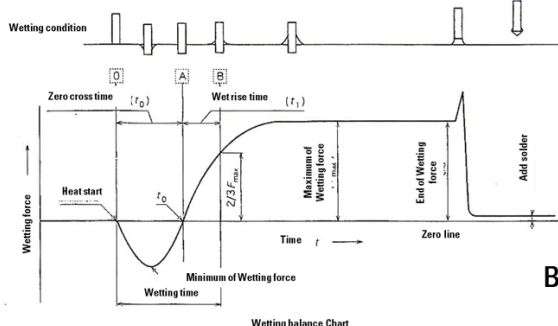
### Verwendung von nicht-metallisch beschichtetem Cu zur Kostensenkung.

#### OSP als möglicher preiswerter Oxidationsschutz.

- Cu-Band: 1,5 mm x 0,2 mm
- 2 OSP-Beschichtungen
- Wetting-Balance-Tests
  - SAC: Lötbad 250 °C
  - BSA: Lötbad 180 °C
  - Standard-Flussmittel mit geringer Aktivität



Ätzen	Vorbehandlung	OSP	Dicke
25°C-60s	25°C-60s	40°C-60s	-
	1.5%	OSP1	0.28µm
	10%	OSP2	0.35µm



Benetzbarkeit: unbehandelt < OSP-beschichtet

Abbildung 7: Wetting-Balance-Tests: Flussmittel/Lötbad

## OSP: Wetting Balance Reflow Test mit Lotpaste

- BSA ROLO ( $T_{\text{peak}}$ : 180°C) | BSA ROL1 ( $T_{\text{peak}}$ : 180°C) | SAC ROLO ( $T_{\text{peak}}$ : 245°C)
- Einfluss von 1h 90°C Wärmebehandlung
- Wetting time T1 (Zeit bis 2/3  $F_{\text{max}}$ )
- Max. Benetzungskraft  $F_{\text{max}}$

**Einfluss der Lotpaste (Metall und Flussmittel) viel größer als Einfluss von OSP und Vorbehandlung. Gute und sehr schnelle Benetzung von BSA ROL1.**

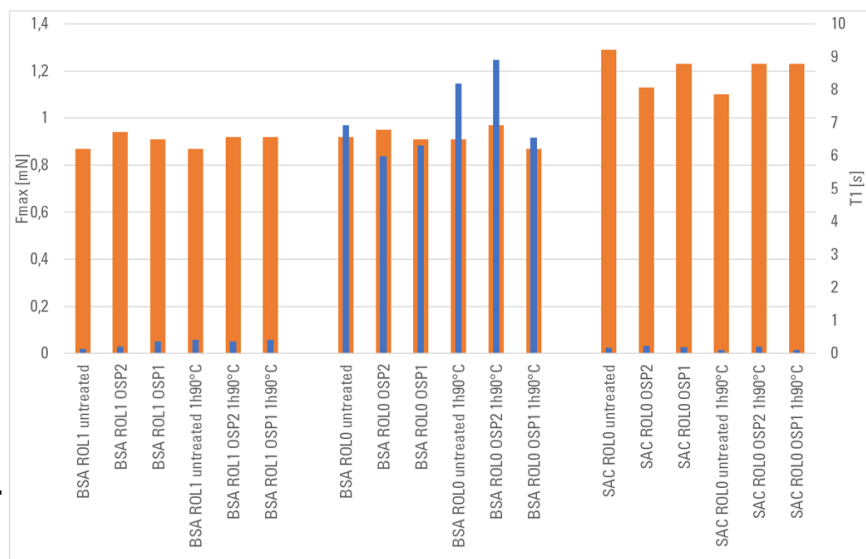


Abbildung 8: Wetting Balance-Tests: Lotpaste

## Pastenentwicklung und Upscaling

Aufbauend auf den vorherigen Ergebnissen wurden für die zuvor im Labormaßstab entwickelten Flussmittel (AP10-G und M3G) und Lotpastenvarianten Produktionsprozesse entwickelt, die eine Herstellung auf industrietyptischen Anlagen ermöglichen. Die so erzeugten Flussmittel und Pasten wiesen in der Grundcharakterisierung keine signifikanten Unterschiede zu den Laboransätzen auf, so dass von einer erfolgreichen Hochskalierbarkeit ausgegangen werden kann. Die hergestellten Lotpasten wurden für eine weitergehende Charakterisierung und für (Hochleistungs-)druckversuche verwendet.

## Charakterisierung und Qualifizierung

Zur Untersuchung des Benetzungsverhaltens wurden die entwickelten Flussmittel in Kombination mit BSA-Lotpulver, das ein vollständiges Aufschmelzen und damit eine klassische Benetzung zeigt, auf Kupferblech (in lagerungsbedingt oxidiertem Zustand), solarindustrietyptischer Kupferfolie und Zellmaterial bei 165 °C für 20 min gelötet. Als Referenz diente die Standardflussmittelpaste AP-10. Wie Abbildung 7 zeigt, konnte insbesondere für die solarindustrietyptischer Kupferfolie beim Flussmittel M3G eine Verbesserung der Benetzung erreicht werden. Auf den anderen beiden, schwerer benetzbaren Materialien zeigt sich ein ähnliches Verhalten wie bei der Referenz. Die Modifikationen M3G+ und M3G- weisen wie zu erwarten eine geringere Benetzungsfläche auf, die Benetzung ist aber noch als ausreichend (Benetzungswinkel bis auf M3G- auf Zellmaterial unterhalb von 30°) zu bewerten.

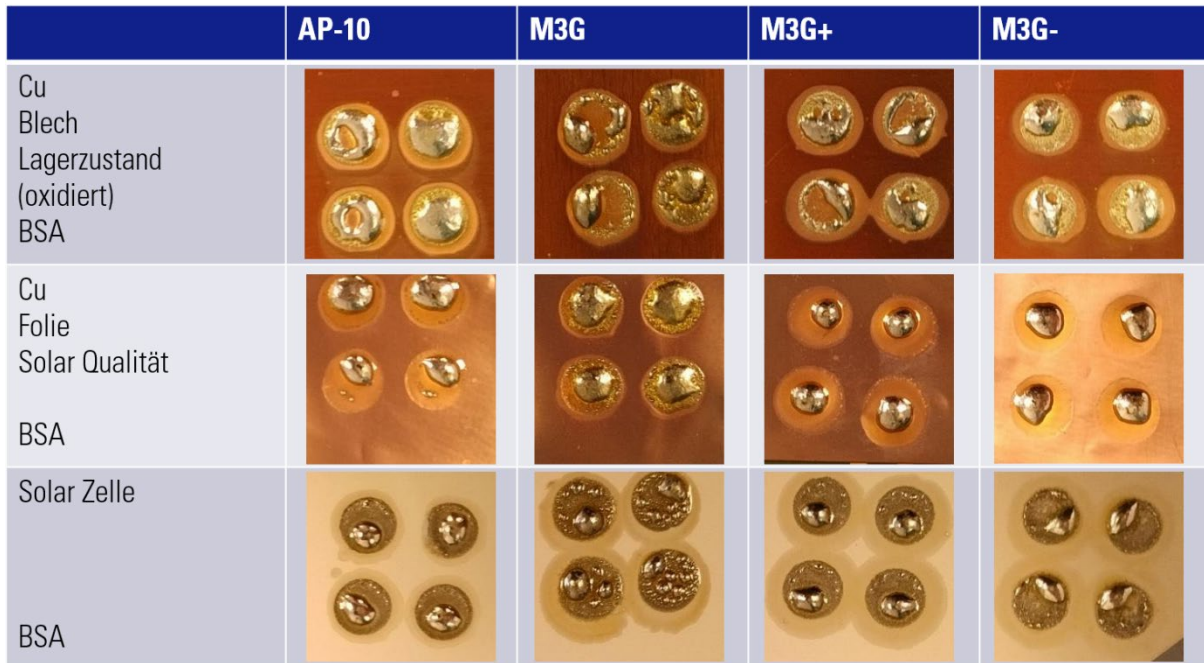


Abbildung 9: Benetzung der Flussmittel in Kombination mit BSA-Pulver auf verschiedenen Substraten

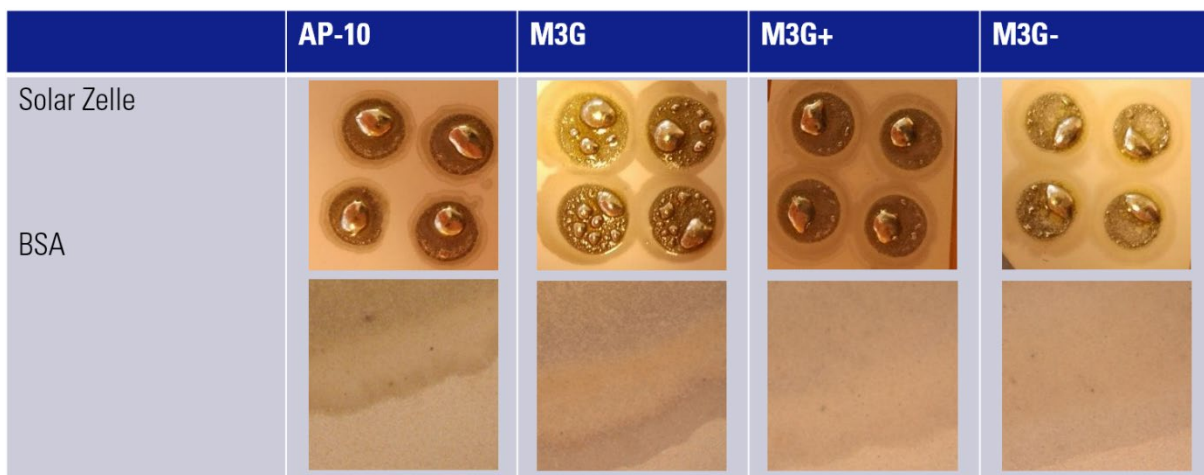


Abbildung 10: Leichte Verfärbungen, jedoch keine Schädigungen nach Klimatest. Flussmittelvarianten in Kombination mit BSA-Pulver auf Zellmaterial.

LTS-Lotpasten (jeweils mit Flussmittel AP-10) wurden hergestellt und dem ISC zur Fertigung von Prüfkörpern für Peel Test (Stringer-Module) und Shear-Test (Schindel) sowie Klimatests übergeben. Die Peel Tests zeigten eine Festigkeit von durchschnittlich 0.8 N/mm, was das Minimalziel von 0.5 N erreicht, aber unterhalb des angestrebten Ziels von min. 1 N/mm und der Referenz (ECA: 1.47 N/mm) liegt, das nach einer Analyse und Optimierung der Prozessparameter wie nachfolgend beschrieben erreicht werden konnte. Das Versagen fand nicht in der Lötverbindung selbst statt, sondern überwiegend in der Verbindung Busbar-Zelle. Ursachen könnten hier in einer Vorschädigung im Lötprozess durch thermo-mechanische (induzierte Spannungen aufgrund Ausdehnungs- und mechanischem Verhalten des Lotes), metallurgische (Diffusion) oder chemische (Wechselwirkungen mit dem Flussmittel) Effekte liegen. Auch die Shear-Tests zeigten ein ähnliches Ergebnis mit einer aber grundsätzlich nachgewiesenen Eignung von Lotpasten und Lötprozess.

Zum Verständnis der Peeltestergebnisse wurden die Bruchflächen der Proben mit wechselnden Versagensorten in eigenen Untersuchungen näher betrachtet (Abbildung 9) und die Kraft-Weg-Kurven der einzelnen Proben ausgewertet (Abbildung 10). Aufgrund der Ergebnisse ist zu folgern, dass bei einem (lokalen) Versagen der Lötverbindung selbst (im Lötgut oder an den Grenzflächen), Festigkeiten von oberhalb des Zielwertes von 1 N/mm erreicht werden.

Die Festigkeitswerte  $< 0,5$  N/mm korrelieren hingegen mit einem Versagen im Interface zwischen Busbar und Zelle. Die kann einerseits durch eine thermo-mechanisch bedingte Schädigung begründet werden, da das hartsprödere Lötgut im Vergleich zu einem weich-plastischen ECA deutlich weniger Spannungen abbauen kann. Zum anderen ist eine chemische Schädigung durch eine Infiltration mit Flussmittel denkbar. Weitere Indizien hierfür lieferten Versuche, die bei längeren Lötzeiten und in Abhängigkeit des Busbarmetallisierungstyps ein Versagen dieses Interfaces bei geringeren Belastungen zeigten. Wie Abbildung 11 zeigt kann aber durch Reduktion der Lötzeit auch bei potentiell kritischem Zellmaterial (hier: Rückseite) das Problem der Schädigung des Interfaces Zelle-Busbar ausreichend reduziert werden. Unter Berücksichtigung, dass dem gegenläufig die Lotreaktionen Zeit benötigen ergibt sich so ein Optimum bei ca. 15 sec Lötzeit und einer resultierenden Festigkeit von 1 N/mm, d.h. dem gesetzten Zielwert.

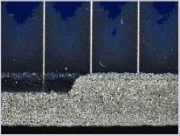

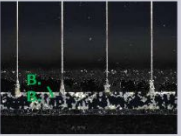
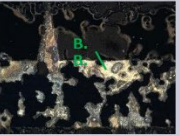
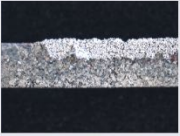
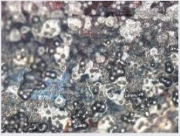
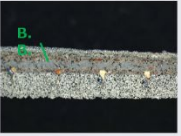
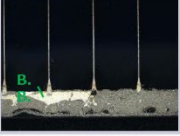
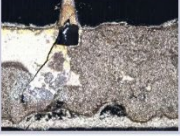
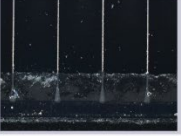



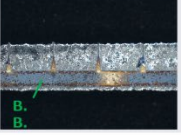
		Versagen der Lötverbindung		Bruch Busbar-Zell-Verbindung		
Cell			Lotreste auf der Zelle und Cu . Der Bruch erfolgt entlang der Form der (eh.) Lotkugeln.			Die meisten Busbars werden mit Lot von der Zelle gelöst, aber einige Busbars verbleiben auf der Zelle. (Stromschienen mit nicht gelöteten Bereichen verbleiben)
	Cu					
Cell			Fast das gesamte Lot verbleibt auf der Zelle Bruch an der Grenzfläche zwischen Lot und Cu			Die meisten Busbars lösen sich zusammen mit dem Lot von der Zelle.
	Cu					

Abbildung 11: Typische Versagensorte und Bruchflächen der Peeltest Proben

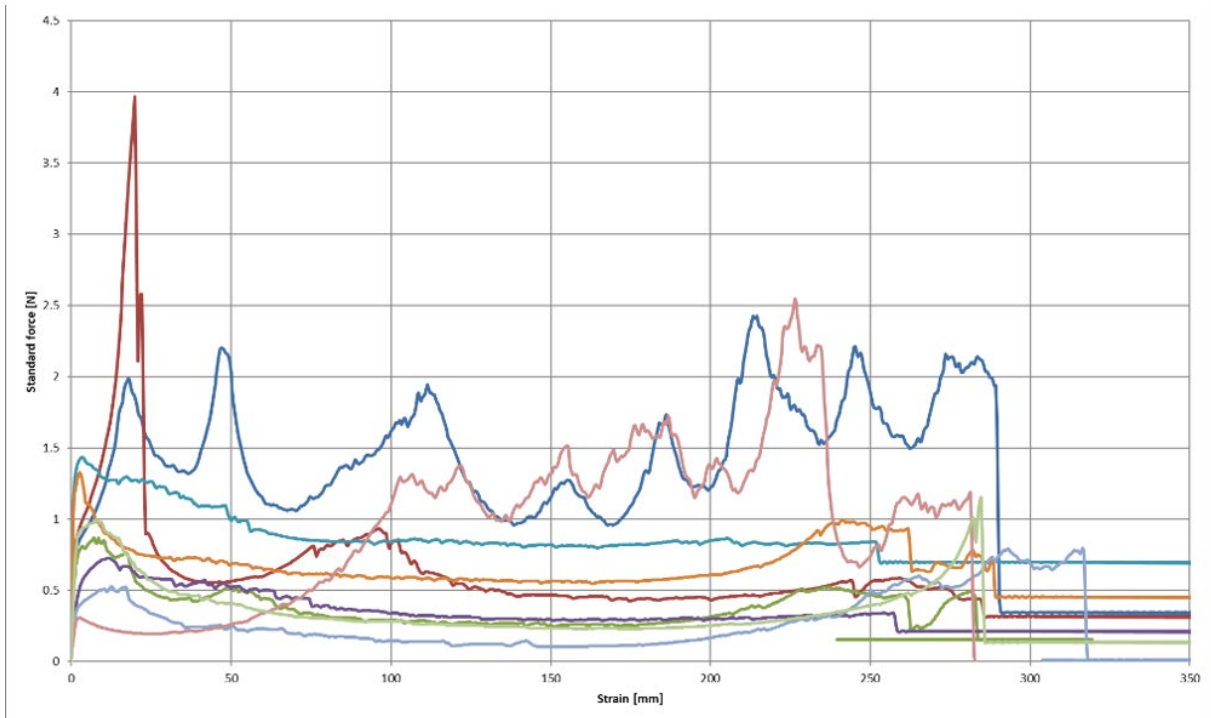


Abbildung 12: Beispiel für stark schwankende Weg-Zeit-Kurven der Peel-Tests

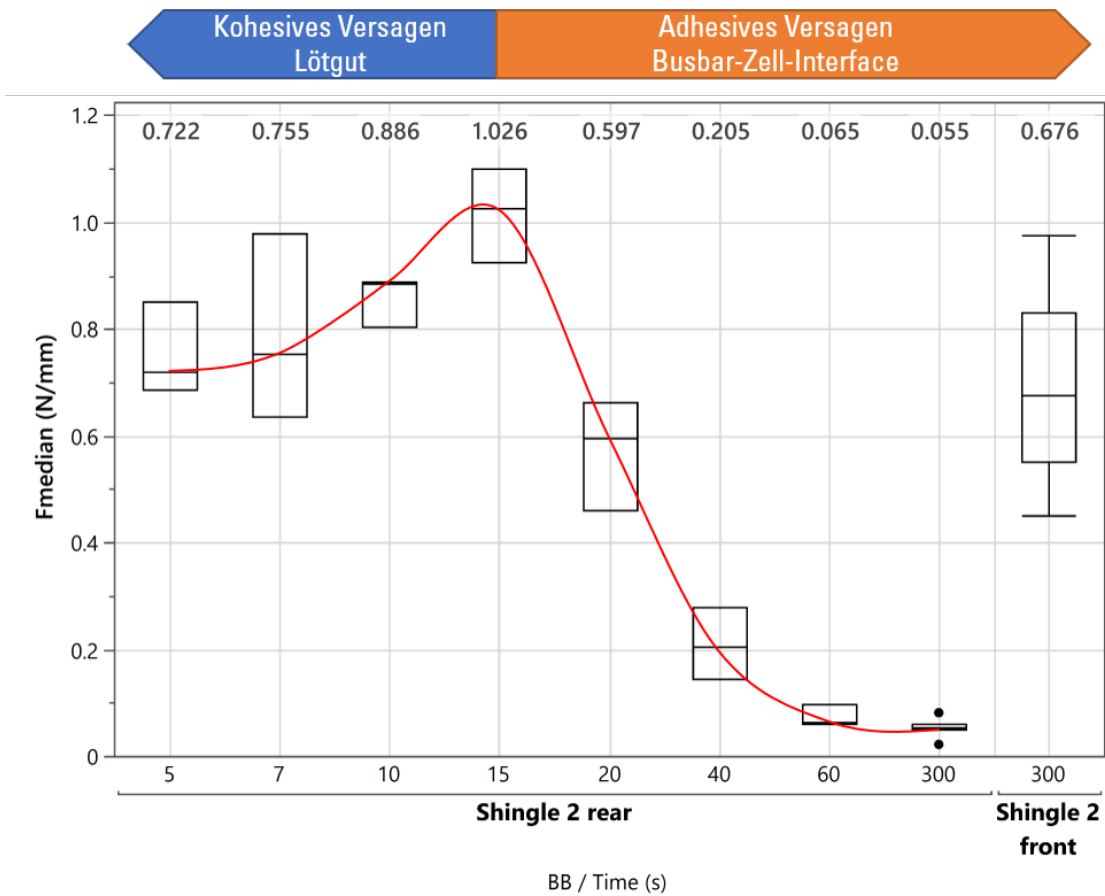


Abbildung 13: Versuchsserie zu Peel-Test und Einfluss von Zelltyp und Lötzeit.

Zur Charakterisierung des Aufschmelz- und Benetzungsverhaltens und der Voidbildung der drei Pasten LTS/AP10G, LTS/M3G, LTS2/M3G wurden Benetzungsproben auf Kupfer bei unterschiedlichen Profilen im „SMT Scope“ der Firma SANYOSEIKO CO., LTD. untersucht. Hierbei handelt es sich um ein mit einer Heizkammer ausgestattetes Hochtemperatur-Videomikroskop in dem typische Reflowprozesse abgebildet und in situ untersucht werden können. Auch wenn die Verhältnisse durch das Fehlen eines Fügepartners (um die optische Zugänglichkeit zu ermöglichen) nicht vollständig dem realen Prozess entsprechen, kann diese in situ Beobachtung des Lötprozesses grundsätzlich wertvolle Erkenntnisse über die Benetzung und die Voidbildung liefern. Insgesamt wurden 48 Lötprozesse im SMT Scope aufgezeichnet und ca. 10 GB Video-Daten erzeugt und ausgewertet, um so Empfehlungen für die Prozessgestaltung zu gewinnen und ein besseres Verständnis der z.B. in Peel-Test lötprozessabhängig stark unterschiedlichen Ergebnisse zu erhalten.

Hierzu wurden weiterhin die am ISC erzeugten und geprüften Peel-Test-Proben in metallographischen und rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen betrachtet und mit den Festigkeitswerten verglichen.

Die Peel-Test-Ergebnisse (Abbildung 12) zeigen eine deutliche Abhängigkeit der erreichbaren Festigkeit von der Lötzeit. Nach einem leichten Anstieg der Festigkeit von 5 zu 15 sec – dies kann darüber erklärt werden, dass für den Lötprozess für Schmelzen, Benetzen und metallurgische Reaktionen eine gewisse Mindestzeit notwendig ist – kommt es insbesondere beim Zelltyp Shingle 2 Rear, der im Vergleich zum Front-Typ insgesamt eine deutlich niedrigere Verbundfestigkeit aufweist, zu einem kontinuierlichen Abfall der Festigkeit mit zunehmender Lötzeit, bis bei 300 sec. eine nur noch sehr geringe Festigkeit verbleibt. Auch beim Front-Typ wird bei 15 sec Lötzeit (nicht im Diagramm dargestellt; blau gerahmtes REM-Bild) eine wesentlich höhere, und absolut mit 2,8 N/mm sehr gute, Festigkeit erreicht, als bei 300 sec.

Die REM-Bilder zeigen im ersten Vergleich zwei Auffälligkeiten, die teilweise das Versagen erklären können. Zum einen kommt es bei 300 sec (rear; roter Rahmen im Abb. 28) zu einer Ablösung der Ag-Busbar. Zum anderen weisen die Proben mit kurzer Lötzeit (15 sec., rear: grüner Rahmen und front: blauer Rahmen) eine sehr hohe Porosität auf. Dieser Trend aus der Betrachtung im Querschnitt, der ggf. stärker einer Abhängigkeit von der jeweiligen Schnittposition unterliegt, wird grundsätzlich auch in der Aufsicht mittels Röntgenprüfung bestätigt. Abbildung 12 oben zeigt, zwar feiner verteilt, ebenfalls eine höhere Porosität bei 15 sec. Lötzeit als bei 300 sec., ebenso bestätigen die Untersuchungen mittels „SMT Scope“ (vgl. Abbildung 13 unten) diesen Trend. Dass Lötverbindungen bei sehr kurzen Lötzeiten eine erhöhte Porosität aufweisen, ist u.a. dadurch zu erklären, dass zum einen die Entweichung des Flussmittels bzw. entstehender Gase Zeit benötigt und zum anderen auch die Füllung entstandener Poren durch Benetzen und Fließen des Lotes zeitabhängig ist.

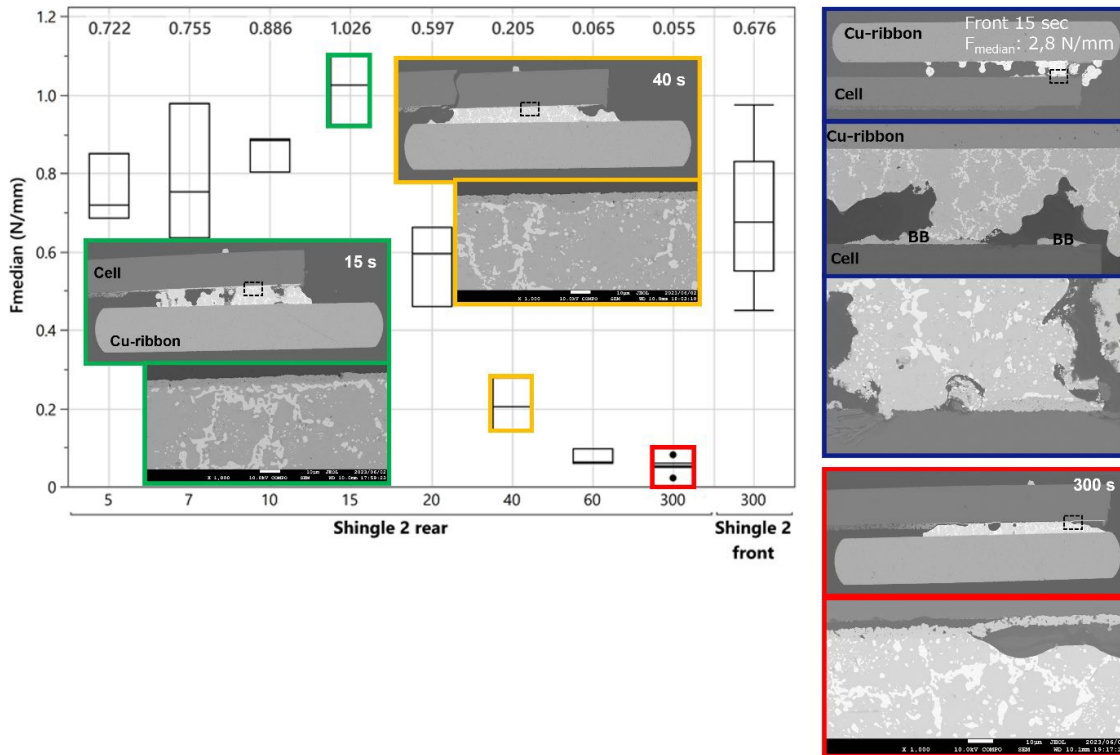
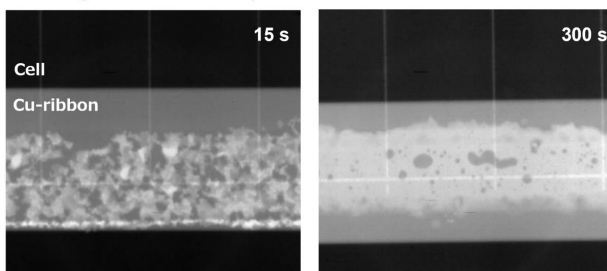


Abbildung 14: Ergebnisse der Peel-Tests (ISC) und REM-Untersuchung der jeweiligen Proben

### Röntgen Zelle/Kupfer



### Benetzung auf Kupfer



Abbildung 15: Einfluss der Lötzeit auf die Porosität; Röntgenuntersuchungen der Peel-Test-Proben (oben) und Benetzungsproben aus dem SMT Scope

Das Zusammentreffen von erhöhter Porosität und erhöhter Festigkeit könnte zumindest teilweise auch mit einem kausalen Zusammenhang zwischen beiden Größen erklärt werden, auch wenn dies dem üblichen Trend, dass eine möglichst vollständige und fehlerfreie Lötverbindung als besser zu bewerten ist, widerspricht. Dieser scheinbare Widerspruch kann durch die hohe Sprödigkeit der beteiligten Materialien begründet werden. Neben dem Zellmaterial ist auch das Lot bzw. das entstehende Lötgut als bismuthaltige Legierung sehr spröde, so dass vermutet werden kann, dass es nicht (in ausreichendem Maße) zu einem Abbau von (aufgrund des Mismatches der Wärmeausdehnungskoeffizienten) thermisch induzierten Spannungen durch plastische Verformung kommen kann, was dann zu einem Versagen zwischen Busbar und Zellmaterial (Abbildung 12, roter Rahmen) führen

könnte. Bei einer poröseren Struktur und weniger flächigen Anbindung ist jedoch davon auszugehen, dass es zu einer einfacheren elastischen Verformung (schwammartige Struktur) oder geringen induzierte/übertragenen Spannungen (kleinere Anbindungsfläche) kommt. Dass selbst scheinbar sehr poröse Strukturen wie bei der Front-15sec-Probe (Abbildung 12 blauer Rahmen) hohe Festigkeiten liefern können, zeigt, dass die Festigkeit von Lötgut und auch die Anbindung von Lot an Busbar und Kupfer grundsätzlich weit mehr als ausreichend sind.

Ein weiterer möglicher Einfluss der geometrischen Ausbildung der Lötverbindung auf die Spannungen und das mögliche Versagen ergibt sich zudem durch die Beobachtung, dass die Lötnahtbreiten mit ca. 50-75 µm deutlich dicker sind als bei zum Vergleich mit SnPb-Vorbelotung erzeugten Referenzproben mit ca. 20 µm. Zur Überprüfung dieses Einflusses und zur möglichen Optimierung einerseits der Verbundfestigkeit und andererseits auch der Reduktion des Materialverbrauchs und der Kosten, sollte in weiteren Versuchen eine präzisere Applikation der Paste mittels (manuellem) Schablonendruck erfolgen, da es bei der bisherigen experimentellen, manuellen Applikation durch Dispensen zu größeren Lotmengen und größeren Schwankungen dieser kommen kann.

Um dementsprechend gegenüber dem bislang genutzten manuellen Dispensverfahren bei der Modulherstellung, der potentiell größeren Schwankungen unterworfen ist, sowohl in Hinblick auf die Schwankungen der mechanischen Untersuchungen als auch in Hinblick auf die zu applizierende Menge für die wirtschaftlichkeitsbewertung eine ggf. reproduzierbarere Alternative Applikationsart auch im Labormaßstab umsetzen zu können, wurde in Absprache mit dem ISC und mit Unterstützung von Tamura Japan und externen Dienstleister eine Druckschablone entworfen, in Gerberdaten umgesetzt und produziert. Das nachfolgende Bild zeigt das prinzipielle Layout.

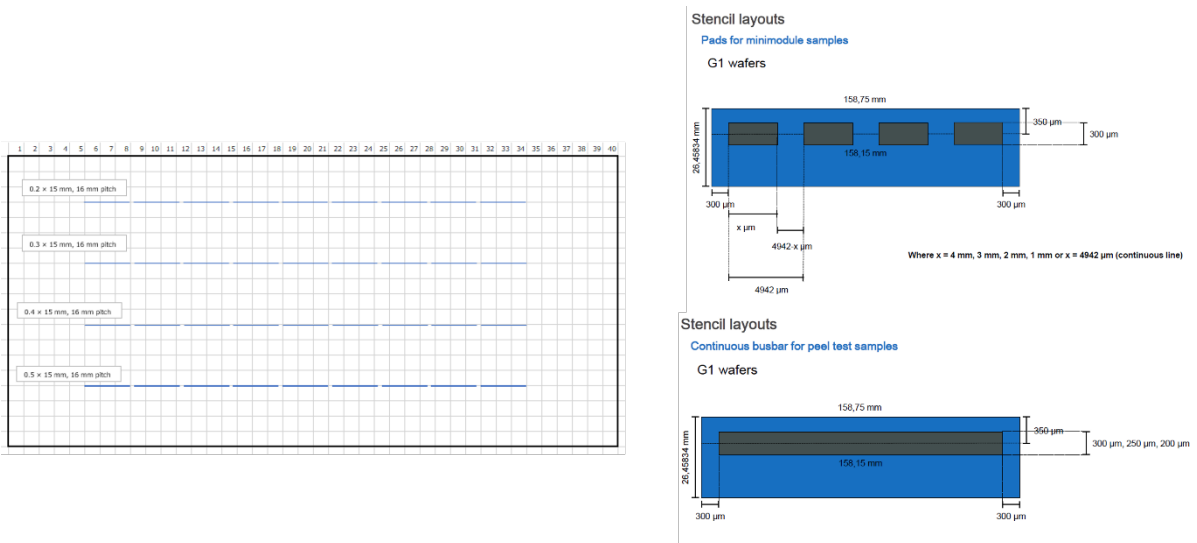


Abbildung 16: Layout der Druckschablone

Neben dem geometrisch-mechanischen Einflussfaktoren sind auch chemisch-metallurgische Ursachen für den Abfall der Festigkeit mit zunehmender Lötzeit möglich. Eine Betrachtung der Silberverteilung im Vergleich der Back-15sec und der Back-300sec-Probe (Abbildung 15 und Abbildung 16) zeigt zudem im Lötgut in der Nähe zum (ehemaligen) Interface zum Busbar bei längerer Lötzeit größere Ag-reiche Phasen, was ein mögliches Indiz dafür sein kann, dass es zu einer erhöhten Ag-Diffusion von Busbar zum Lötgut durch die längere Lötzeit gekommen ist, was wiederum die Anbindung an die Zelle schwächen kann.

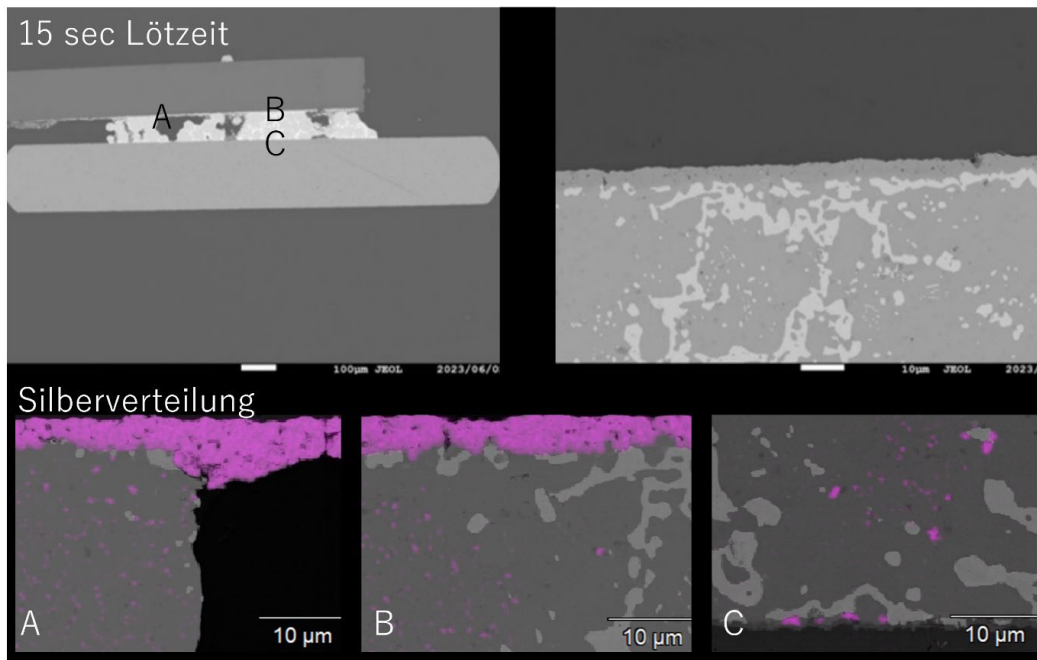


Abbildung 17: Silberverteilung ausgewählter Peel-Test-Proben

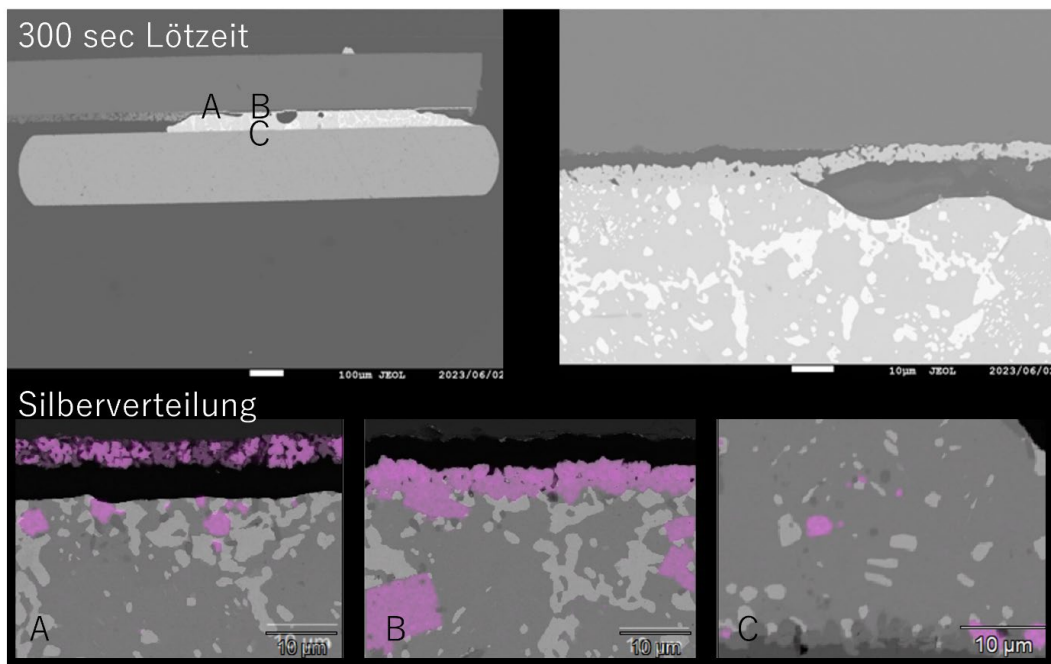


Abbildung 18: Silberverteilung ausgewählter Peel-Test-Proben

## Hochleistungsdruck

Die drei Pasten LTS/AP10G, LTS/M3G, LTS2/M3G wurden in (Hochleistungs-) druckversuchen umfangreich geprüft, zunächst mit einem in der Elektronikindustrie verbreitetem Testboard (siehe Abbildung 17), für das eine systematische Auswertung über automatische optische Inspektion gut möglich ist. Betrachtet werden jeweils das durchschnittliche Volumen (AV) in % des Volumens des theoretisch aufgrund der Schablonenöffnung und

Dicke zu erwartenden Lotpastendepots sowie die Standardabweichung (Sigma) zwischen den einzelnen Messpunkten auf dem Testboard, in Abhängigkeit von der Schablonengröße (Öffnungsbreite und Dicke) sowie der Druck- und Trenngeschwindigkeit. Tendenziell ist der Druck auf Leiterplatte aufgrund der größeren Strukturierung als schwieriger zu bewerten als der Druck für Solarmodule, so dass bei der Übertragung auf Solaranwendungen tendenziell bessere Ergebnisse zu erwarten sind.

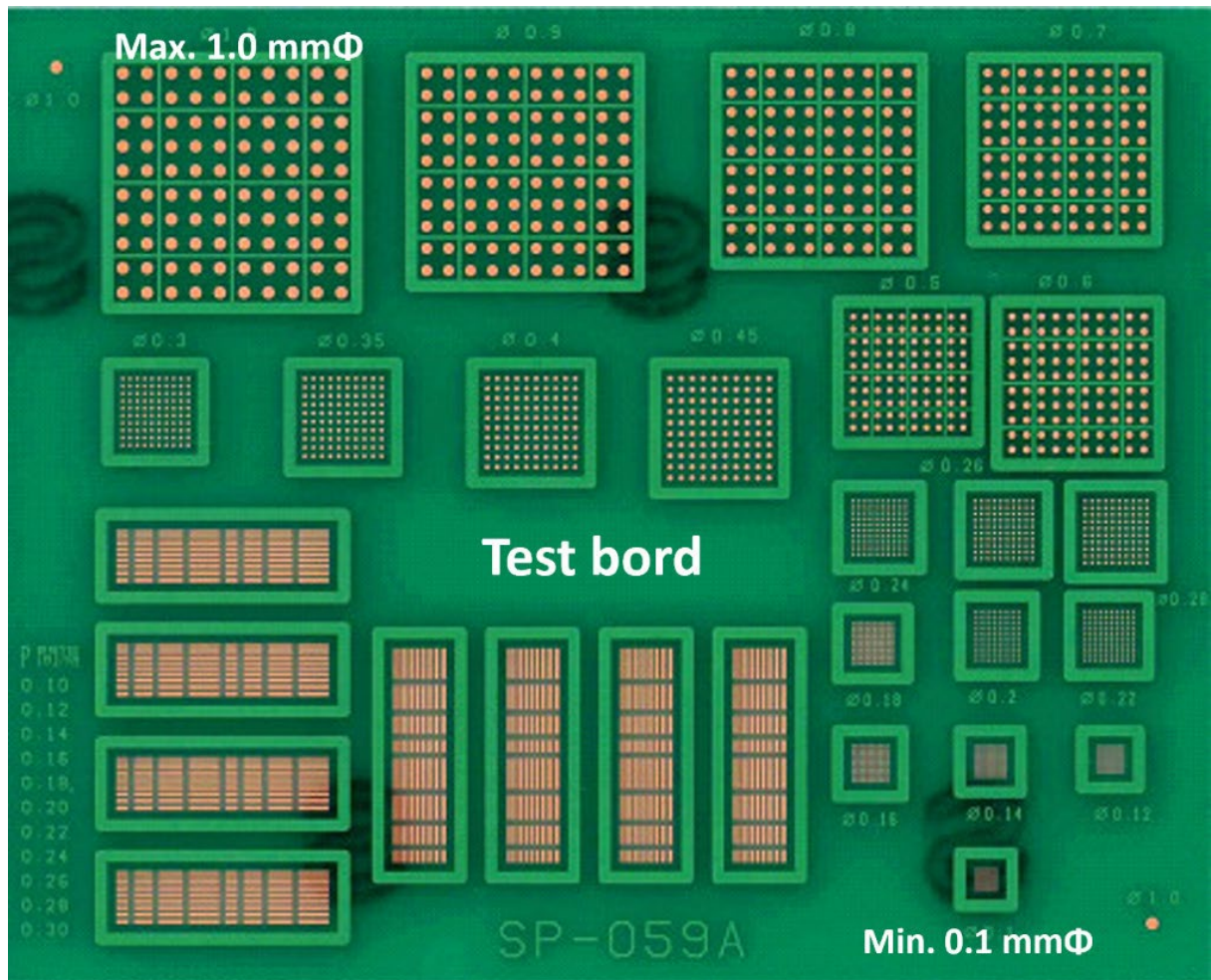
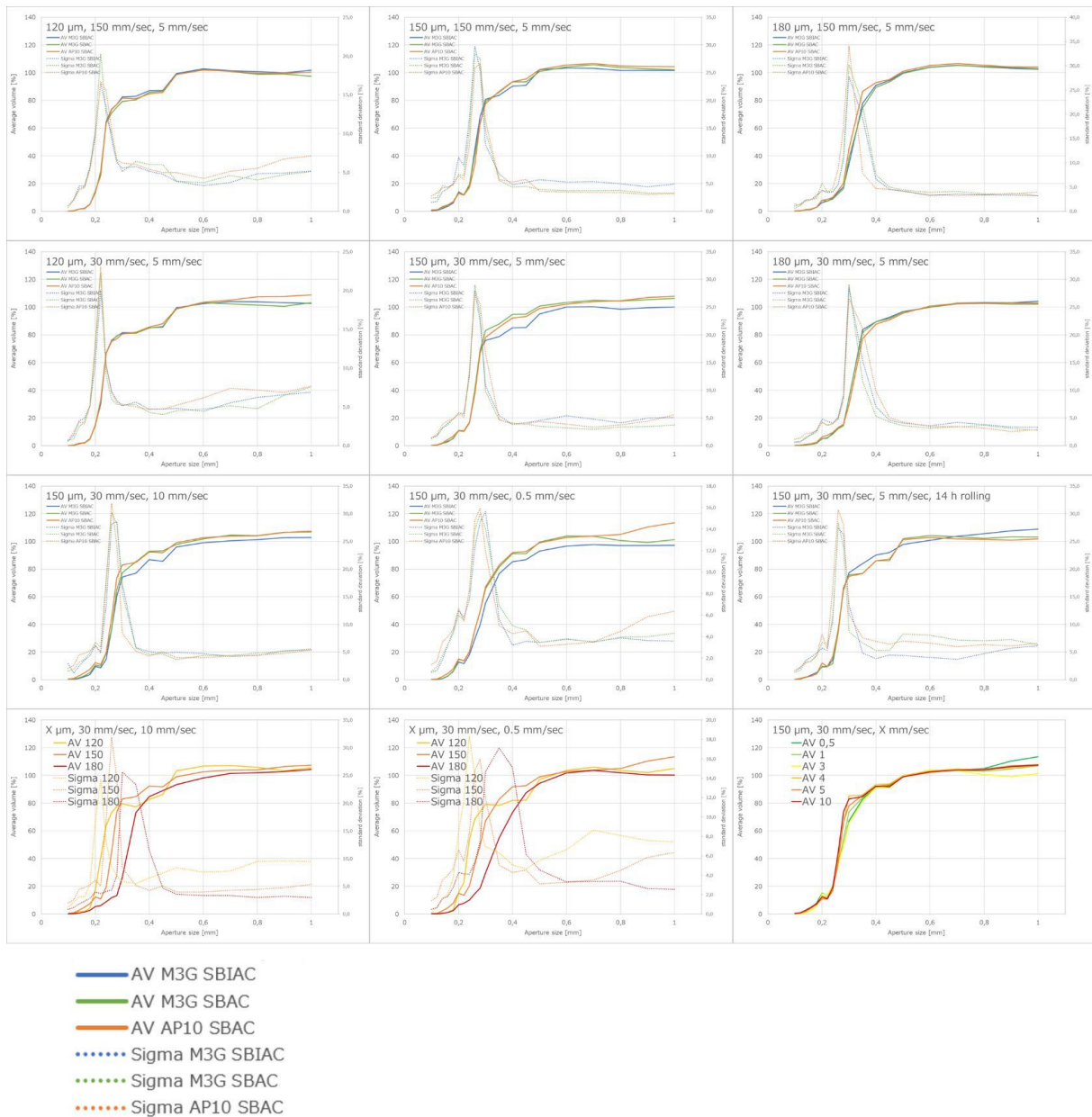


Abbildung 19: Test-Board zur Durchführung der Druckversuche



**Abbildung 20: Ergebnisübersicht der Druckversuche**

Abbildung 18 fasst die Ergebnisse zusammen. Ab einer Größe von ca. 300 μm Durchmesser erfolgt bei allen geprüften Parametern ein ausreichend stabiles und gutes Druckbild. Dies entspricht sowohl dem nach theoretischen Prinzipien des Schablonendesigns (Kleinste Öffnungsgröße > 6 x größter Partikeldurchmesser; (Grumm & Koenen, 2015) maximal Erreichbaren als auch den Maximalanforderungen typischer Solaranwendungen. Die unterschiedlichen Pastenvarianten zeigen nur geringe Unterschiede. Tendenziell führen geringere Schablonendicken zu einem beginnenden Pastentransfer bei auch kleineren Öffnungsdurchmessern, gute Ergebnisse >80% werden aber mit nur geringem Dickeneinfluss erreicht. Die Trenngeschwindigkeit hat einen nur kleinen Einfluss, im Wesentlichen nur auf die Steilheit im Übergangsbereich zwischen erfolgreichem und nicht-erfolgreichem Druck. Ebenso zeigt der Vergleich von 30 und 150 mm/sec Druckgeschwindigkeit einen nur geringen Einfluss auf das durchschnittliche Druckvolumen, lediglich die Schwankungen/Standardabweichungen werden leicht beeinflusst. Die damit bislang geschwindigkeitsunabhängigen guten Ergebnisse lassen Chancen für eine noch weitere Erhöhung der Druckgeschwindigkeit erkennen.

Zusätzlich wurde die Paste, um eine Standzeitbewertung vorzunehmen, für 14 h durch Rakeln auf dem Drucker beansprucht und anschließend weitere Druckversuche vorgenommen sowie die Viskosität bewertet. Die Ergebnisse zeigten, dass die Pasten mit der neu entwickelten Flussmittelpastenvariante M3G über eine auch bei Langzeitbeanspruchung stabilere Viskosität verfügen. Zudem ist das Druckverhalten nach Langzeitbeanspruchung weiterhin gut, die Veränderung liegt betragsmäßig unterhalb der als Meilensteinkriterium definierten 20%.

## **Hochdurchsatz Jet-Dispensen**

In ersten Vorversuchen zum Hochdurchsatz Jet-Dispensen wurden zunächst ein kommerziell verfügbares System aus dem Jet-Flussmittel MJ21 und dem Pulver SAC305 T5 (15-25 µm) genutzt. Ziel war dabei eine Punktgröße nicht größer als 300-350µm, was eine Überlappung/Bandbreite von 0,5 mm ermöglicht. Mit bislang für leitfähige Klebstoffe verwendeten 90-µm-Düsen kam es zunächst zu einer Verstopfung der Düse. Von anderen Jet-Systemen (Mycronic, Musashi) ist jedoch bekannt, dass bei T5-Lotpasten mit 200-300 µm Düsengröße Punktgrößen von 350 µm möglich sind: Das Ausbreitungsverhalten ist bei Lotpaste deutlich anders als bei leitfähigen Klebstoffen, wie auch ein stark unterschiedliches Verhalten in den rheologischen Untersuchungen belegen. Mit einer Anpassung von Düsen und Lotpasten-Zusammensetzungen konnte ein erfolgreiches und sauberes Jet-Dispens-Ergebnis erreicht werden (Abbildung 19).



**Abbildung 21: Erfolgreich Jetdispensversuche am ISC mit Lotpaste SAC305 T5 MJ21 84,4%**

Die Ergebnisse der SAC305 T5 MJ21 beim Jet Dispensen konnten durch Anpassung des Metallgehalts auf BSA-Pasten übertragen werden und erfolgreiche und saubere Jet-Dispens-Ergebnisse in einem großen Prozessfenster erreicht werden. Auch für AP-10 Lotpasten wurden durch Anpassung von einerseits Metallgehalt und damit rheologischem Verhalten der Paste und andererseits der Jet-Parameter am ISC erfolgreiche Jet-Dispens-Prozesse umgesetzt werden, wenn auch in einem deutlich engeren Parameterraum.

Nachfolgende Benetzungstests zeigten dass die mit MJ21 hergestellten Proben jedoch für die speziellen Legierungen und Temperaturen hier eine unzureichende Aktivität und Benetzung aufwiesen. Andererseits konnten die hinsichtlich der Benetzung geeigneten Flussmittel auf Basis AP10G nur in einem kleinen Prozessfenster mittels Jetten appliziert werden.

Dementsprechend standen bei der darauf aufbauenden Flussmittelanpassung zwei Routen zur Verfügung. Einerseits die Erhöhung der Aktivität durch Zugabe des Aktivators der AP10G zum MJ21 Flussmittel und andererseits eine Anpassung der rheologischen Eigenschaften der AP10G. Letzteres kann neben der Einstellung des Metallanteils auch direkt und effektiver auf Flussmittelebene erfolgen, was nicht nur Viskosität sondern auch Thixotropie der Paste beeinflusst. Untersucht wurde insbesondere eine Reduktion des Harzgehaltes und eine Erhöhung des Lösemittelanteils. Die resultierenden Pasten wurden rheologisch, in Benetzungstest und am ISC in Jet-Versuchen charakterisiert.

Die Aktivatorzugabe (MJ21+) führte zwar zu einer Verbesserung der Benetzung, jedoch nicht in ausreichendem Maße. Die Reduktion des Harzgehaltes des Flussmittels (SJ18) verschob das rheologische Verhalten bei beiden Messwerten klar in Richtung der MJ21-Pasten, was in der praktischen Umsetzung jedoch nicht in einem signifikant besseren Jet-Verhalten resultierte, zudem ist mit dem geringeren Harzgehalt eine leichte Verschlechterung des Benetzungsverhaltes verbunden, was auch dem theoretisch Erwartbaren entspricht.

Die Zugabe von Lösemittel erfolgte direkt zu Lotpaste, so dass im Vergleich zu den für Druckprozesse entwickelten Pasten auf das identische, unveränderte Flussmittel zurückgegriffen werden konnte, was ggf. produktions-technische und ökonomische Vorteile hat. Die Zugabe verbesserte führte ohne maßgeblichen Einfluss auf das Benetzungsverhalten bei ausreichender Menge und dann relativ niedriger Viskosität zu einem zum Jet-Dispensen sehr gut geeignetem rheologischen Verhalten, das in Versuchen beim ISC über ein breites Prozessfenster ein klares Applikationsergebnis ohne Verschmierungen, stärkere Zipfelbildungen etc. lieferte (SJ26).

Da in kombinierten Löt- und Laminierprozessen ggf. Lösemittel aus der Lotpaste im Gesamtverbund eingeschlossen werden könnte, wurde der resultierende Mehranteil an Lösemittel in der nachfolgenden Übersichtstabelle separat ausgewiesen und betrachtet. Da im Vergleich zur entsprechenden AP10G Lotpaste bei Zugabe von Lösemittel ein geringerer Flussmittelanteil benötigt wird, beträgt der effektive Mehranteil bei SJ28 statt der nominellen 0.8% effektiv nur 0.5%, was bei einem Absolutanteil von ca. 5% als vertretbarer Anstieg bewertet wird.

Lotpaste		Lösemittelanteil	Viscosität / Pa-s	Thixotropie	Benetzung	Jet
MJ21	LTS		96	0.75	Nicht ausreichend	Gut
MJ21+	LTS		91	0.75	Besser als MJ21, aber noch nicht ausreichend	Gut
AP10G	LTS	4.58%	169	0.47	Gut	Nur in kleinem Prozessfenster möglich
SJ18	LTS	5.45%	80	0.57	Schlechter als AP-10G, besser als MJ21+	Nur in kleinem Prozessfenster möglich
SJ21	LTS	4.68%	94-128	0.52	Gut	Nur in kleinem Prozessfenster möglich
SJ26	LTS	5.08%	68	0.51	Gut	Gut

## **Entwicklung lotpastenbasierter Verbinderprozess, Charakterisierung und Qualifizierung**

Mit den Lotpastenvarianten LTS/AP10G, LTS/M3G und LTS2/M3G wurden am ISC Mini-Module gelötet und in TCT und DH-Tests geprüft. Alle drei Varianten bestehen die IEC (TC200/DH1000) Anforderungen. Bei längerer Belastung zeigte sich bei den M3G-Varianten sowohl im TCT als auch im DH eine Degradation. Beim TCT600 wies die Variante LTS/AP10G hingegen ein exzellentes Verhalten auf, besser als mit ECA gefertigte Referenzproben. Bei DH3000 kam es jedoch auch hier zu einer Degradation.

In weiteren eigenen Klimatests wurde der Einfluss verschiedener Zelltypen (in Kombination mit Lotpaste und Flussmittelpaste und gelötet mit unterschiedlichen Lötparametern) untersucht, wobei jedoch kein wesentlicher Unterschied oder Einfluss des Zellmaterials bzw. -types festgestellt werden konnte. Durch weitere DH-Tests am

ISC konnte ein entscheidender Einfluss der Kapselungsmaterials auf die Zuverlässigkeit erkannt werden. Wird anstelle von EVA-Materialien ein POE-Kapselungsmaterial genutzt, ist in allen Tests ein signifikant verbessertes DH-Testverhalten festzustellen und keine unzulässige Degradation. Da der Einsatz von POE anstelle von EVA mit keinen signifikanten Nachteilen verbunden ist, ist eine Einschränkung auf POE als Materialempfehlung bei Verwendung der entwickelten Pasten als unkritisch zu bewerten und kann somit als Entwicklungsergebnis abschließend akzeptiert werden.

In (Wienands, et al., 2024) wurde für mit LTS/AP10G gelötete geschindelte Minimodule der Einfluss des Kapselungsmaterials weiter untersucht. Zudem wurde die Menge der Lotpaste und die Lötzeit optimiert und zudem eine punktuelle Unterstützung der Lotpaste mit NCA untersucht. Durch Anpassung der Zeit auf 15 sec konnte eine zuverlässig hohe Festigkeit von über 1 N/mm (in Abhängigkeit des Zellmaterials von bis zu knapp 3 N/mm) erreicht werden. Abbildung 20 zeigt den Einfluss der Menge auf die I-V-Eigenschaften in TC600 und DH3000 Tests bei Nutzung von POE als Kapselungsmaterial. Bei optimalen Mengen werden so  $\Delta P_{MPP}$ -Werte von nur -2 bis -2,5% erreicht, was auch im Vergleich zu ECA ein exzellenter Wert ist. Durch punktuellen Ersatz der Lotpaste durch NCA, so dass die Lotpaste nur die elektrische Verbindung, jedoch weniger die mechanische Stabilität übernehmen muss, kann dieser sogar weiter auf -0,8 bis -1,6% verbessert werden. Die hierzu notwendigen Mengen wurden in (Tune, et al., 2025) publiziert und dienen zur nachfolgenden Kostenkalkulation. Als abschließender Punkt wurden mit den entwickelten Pasten und Fertigungsparameter Module am ISC im Realmaßstab erfolgreich gefertigt.

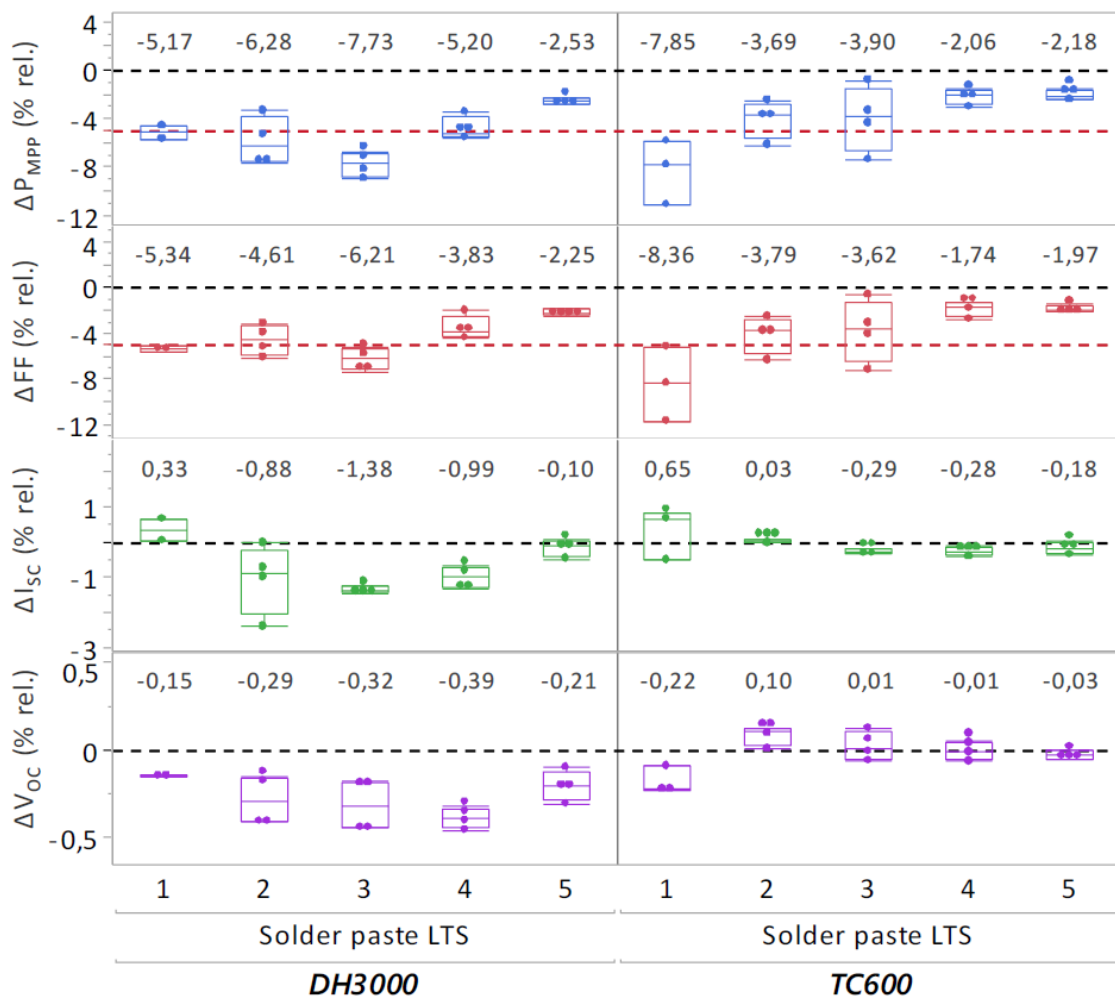


Abbildung 22: Relative Veränderungen der I-V-Eigenschaften von Minimodulen mit unterschiedlichen Mengen an Lotpaste nach DH3000 und TC600.

## **Kostenkalkulation**

Um auch hinsichtlich der stark schwankenden Börsenpreise der Materialien eine vereinfachte Vergleichsbasis zu haben, wurde im Folgenden mit gerundeten Werten

- 100 \$/kg für Lotpaste
- 1000 \$/kg für ECA

gerechnet.

Bei einer minimalen Lotpastemenge von 0,59 mg/cm (ohne NCA) betragen die extrapolierten Kosten 0,087 US\$/Wp. Mit NCA-Unterstützung sinken diese Verbrauchs-/Kostenwerte auf 0,32 mg/cm bzw. 0,048 US\$/Wp, mit dem zusätzlichen Vorteil, dass die Degradation von ca. 2% auf nur 0,8-1,6 % verbessert wird, wobei sich dies auf Module im Labormaßstab mit nicht optimierter Stückliste bezieht, für eine Serienfertigung mit optimiertem BOM sind hier noch weitere Verbesserungen zu erwarten. Zum Vergleich können äquivalente ECA-Module mit geringem Verbrauch von 0,03 mg/cm (u.a. bedingt durch die niedrigere Dichte) Kostenwerte und 0,046 US\$/Wp aufweisen, jedoch mit einer höheren Degradation in Labortests.

Insbesondere bei Kombination von Lotpaste und NCA liegen die Kosten der entwickelten Technologie auf gleichem Niveau wie bei ECA, verbunden jedoch mit technologischen Vorteilen. Zukünftige Entwicklungen bei Layout und Applikation lassen zudem auf eine weitere Reduktion der Lotpastenverbräuche und damit in Anbetracht der Materialkosten, die bezogen auf den Preis pro kg nur bei 10% liegen, eine weitere Verschiebung der wirtschaftlichen Betrachtung zum Vorteil der Lotpasten erwarten.

## **Fazit**

Es wurden aufbauend auf thermo-chemischen Überlegungen und Untersuchungen erfolgreich bleifreie Lotpasten für den Einsatz in Schindelmodulen und für den Einsatz in verbinderbasierten Modulen entwickelt. Die notwendige Löttemperatur konnte auf  $\ll 200\text{ °C}$ , in der (Mini-)Modulfertigung wurden  $180\text{ °C}$  genutzt, reduziert werden und so auch die der thermischen Belastung (induzierte Spannungen, tempertursensitive Materialien, geringerer Energiebedarf). Durch Nutzung von Indium als zusätzlichem Legierungselement konnte gezeigt werden, dass bei Bedarf eine weitere Absenkung der Löttemperatur möglich ist. Angepasst an die Legierungssysteme und Anwendung wurden Flussmittel entwickelt bzw. qualifiziert. Gegenüber den Ausgangssystemen konnte dabei zudem ein wesentlicher Beitrag zur Erhöhung der Arbeits- und Gesundheitsschutzes erreicht werden, da die neuen Systeme nicht als Gefahrstoff klassifiziert sind. Sie bieten ein zuverlässiges Aufschmelzen ohne verstärkte Oxidation (solder balling) der Lotpulver, auch bei feinen Korngrößen, eine gute Benetzung der Modulmaterialien, insb. auch Cu-blank, wie sowohl in Laborlötversuchen, Messungen der Benetzungskräfte als auch der Fertigung realer Module gezeigt werden konnte, und sind dabei sicher gegenüber Korrosion und Elektromigration, wie die Überprüfung in Normtests und Bauteilprüfungen zeigte. Durch die durchgängige und stoffschlüssige Anbindung ist bei einer Lötverbindung zudem ein geringer Übergangswiderstand gewährleistet. Durch optimierte Wahl von Pastenmenge, Lötzeit und Kapselungsmaterial konnte in Schindelverbindungen und Verbinderbasierten Modulen eine sehr hohe Zuverlässigkeit erreicht werden. Zuverlässigkeitstests wurden sogar in deutlich über Standard und das gesetzte Ziel hinausgehenden TC600 und DH3000 bestanden, mit nur sehr geringer Degradation, die unterhalb typischer Werte für vergleichbare ECA-Verbindungen liegt.

Trotz höherer Dichte und Materialverbräuche konnte auch aufgrund der niedrigeren Metallpreise, die nur ca. 10% im Vergleich zum ECA betragen, die Wirtschaftlichkeit der entwickelten Pasten gezeigt werden, insbesondere, wenn durch Kombination mit NCA eine weitere Mengenreduktion erfolgt. Die entwickelten Lotpasten zeigten ein sehr gutes Verhalten auch in Hochleistungsdurckprozessen. Durch leichte Anpassungen von Flussmittel bzw. Paste und damit des rheologischen Verhaltens konnten ebenfalls erfolgreich Jet-Dispensprozesse ermöglicht werden. Alle Ziele und Meilensteine des Projektes wurden damit wie geplant erreicht oder sogar übertroffen.

## **Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

- Personalkosten: Die Arbeiten erforderten umfangreiche Analysen und Entwicklungen durch entsprechend qualifiziertes Personal aus den Bereichen Werkstoffwissenschaften (Dr.-Ing.) und Chemie (M.Sc vergleichbar eingesetzt zu Ingenieur (FH)).
- Materialkosten:
  - Metalle (Sn, Ag, Cu, In) zur Herstellung der neu entwickelten Legierungen
  - Herstellung von Pulvern aus diesen Legierungen
  - Chemische Analyse der Zusammensetzung der hergestellten Pulver, da diese außerhalb der typischen Lotzusammensetzungen, für die Referenzproben zur OES vorhanden sind, liegen
  - Kupferspiegeltestmaterial zur normgerechten Qualifizierung der entwickelten Flussmittel
  - Druck-Schablonen zum reproduzierbaren Auftrag der Lotpaste

## **Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Das Vorhaben war umfangreich und komplex. Die eigenen Materialentwicklungen waren eng verknüpft mit den

innovativen prozess- und anlagentechnischen Lösungen im Bereich von Zelle und Modul der Projektpartner. Sie stellen daher Entwicklungen dar, die technologisch teilweise auch über den jetzigen Bedarf der Bestandskunden hinausgehen, so dass es sich nicht um die übliche Produkthanpassung gemäß Kundenspezifikation handelte, die TEG sonst auch selbstständig durchführt. Die verfolgten Lösungswege waren wie erwartet hinsichtlich der metallurgischen und chemischen Effekte im Vergleich hierzu anspruchsvoller, weshalb insbesondere der Kooperation mit den Partnern im Bereich der Analytik eine besondere Bedeutung zukam. Zur Entwicklung geeigneter Materialien und Prozessparameter waren sehr umfangreiche, teils neu zu entwickelnde und teils nur in der Kooperation mit den Partnern umsetzbare Untersuchungen möglich. In ihrer Gesamtheit führten die Arbeiten nur so zu einem wie dargestellt vollständig erfolgreichem Ergebnis. Somit waren die Arbeiten notwendig und angemessen.

### ***Voraussichtlicher Nutzen***

Wie im Fazit gezeigt, können die entwickelten Lotpasten eine sowohl wirtschaftlich (ähnliche Gesamtkosten, mit weiterem Optimierungspotential aufgrund nur 10% Materialpreis) als auch technologisch (sehr gute Zuverlässigkeit bei angepassten Prozessbedingungen und Materialkombinationen, deutlich über Normforderungen hinausgehend; geringe Prozesstemperaturen bei gleichzeitig hoher thermischer Beständigkeit) eine attraktive Alternative zum Einsatz von ECA bei der Fertigung von geschindelten oder verbinderbasierten PV-Modulen bieten. Gegenüber konventionellen, bleihaltigen Loten ergeben sich klare ökologische und arbeitssicherheitstechnische Vorteile. Aufbauend auf den Ergebnissen ergeben sich somit grundsätzlich gute Einsatzmöglichkeiten, insbesondere in der deutschen und europäischen PV-Modulfertigung, bei der Ansätze wie der geschindelte Aufbau gegenüber konventionellen Modulen im Verhältnis zum asiatischen Markt, einen deutlich höheren Anteil haben. Je nach spezifischer Anwendung, weiteren genutzten Materialien (z.B. Verkapselung) und Applikation ist ein Einsatz der Ergebnisse direkt oder nach weiteren Entwicklungen, für die hier die Basis gelegt wurde, möglich.

### ***Bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen***

Relevant ist hier beim Einsatz von Lotpasten bei der PV-Modulfertigung die Patentanmeldung der Macdermid Alpha Electronics Solutions in der Patentfamilie WO 2020/233839. Diese ist im fortgeschriebenen Stand der Technik dargestellt und gegenüber den eigenen Arbeiten klar abgegrenzt.

### ***Veröffentlichungen***

- (Wienands, et al., 2024): Wienands, K., Devoto, I., Kopp, N., Hallensleben, C., Kizukuri, R., Helbig, M., . . . Tune, D. (2024). Solder Pastes in Shingled Modules. EU PVSEC 2024, (S. 020157-001 - 020157-004). Wien.
- (Tune, et al., 2025): Tune, D., Devoto, M., Shanmugam, R., Wienands, K., Kopp, N., Hallensleben, C., . . . Halm, A. (2025). Contact Resistance Limitations in Conductive Adhesive and Solder Paste Modules. EU PVSEC 2025, (S. 020220-001 - 020220-008). Bilbao.

## Literaturverzeichnis

- Angela De Rose\*, D. E. (2017). LOW-TEMPERATURE SOLDERING FOR THE INTERCONNECTION OF SILICON HETEROJUNCTION SOLAR CELLS. *33rd European PV Solar Energy Conference and Exhibition*, Amsterdam, The Netherlands.
- Grumm, H., & Koenen, C. (2015). Schablonendruck für Leistungselektronik - Schablonengestaltung für Lot-, Sinter- und Wärmeleitpasten. In *Weichlöten Trends und Entwicklungsschwerpunkte in der Leistungselektronik* (S. 74-79). Deutscher Verlag für Schweisstechnik (DVS).
- Henkel Loctite. (2020). *MATERIALS FOR ADVANCED PHOTOVOLTAICS*. Von [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjZpsG03a\\_tAhUd7eAKHS16C88QFjAAegQIAxAC&url=https%3A%2F%2Fdm.henkel-dam.com%2Fis%2Fcontent%2Fhenkel%2F508-LT-8345%2520Solar%2520Brochure%2520A4%2520LRpdf&usg=AOvVaw3iWAWkqfHjNUhbm76U](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjZpsG03a_tAhUd7eAKHS16C88QFjAAegQIAxAC&url=https%3A%2F%2Fdm.henkel-dam.com%2Fis%2Fcontent%2Fhenkel%2F508-LT-8345%2520Solar%2520Brochure%2520A4%2520LRpdf&usg=AOvVaw3iWAWkqfHjNUhbm76U) abgerufen
- Michel, U., Maiocchi, A., & Lange, R. F. (2010). Optimized Lamination Process: Meeting the Need for Improved Efficiency. *Inter PV*, 3, 68-73. Von [http://www.interpv.net/wsr/wsr\\_view.asp?idx=130&part\\_code=03&page=11](http://www.interpv.net/wsr/wsr_view.asp?idx=130&part_code=03&page=11) abgerufen
- Mondon, A., Klasen, N., Fokuhl, E., Mittag, M., Heinrich, M., & Wirth, H. (2018). COMPARISON OF LAYOUTS FOR SHINGLED BIFACIAL PV MODULES IN TERMS OF POWER OUTPUT, CELL-TO-MODULE RATIO AND BIFACIALITY. *35th European PV Solar Energy Conference and Exhibition*. Brüssel.
- Pfluke, K. (2011). *Soldering Photovoltaic Cells*. Von [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwj56fiE3K\\_tAhW78uAKHSQAcwQFjAAegQIAhAC&url=http%3A%2F%2Fwww.fuhr-wire.com%2Fwp-content%2Fuploads%2F2013%2F03%2FIndium-Soldering\\_Photosvoltaic\\_Cells.pdf&usg=AOvVaw0tPup](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwj56fiE3K_tAhW78uAKHSQAcwQFjAAegQIAhAC&url=http%3A%2F%2Fwww.fuhr-wire.com%2Fwp-content%2Fuploads%2F2013%2F03%2FIndium-Soldering_Photosvoltaic_Cells.pdf&usg=AOvVaw0tPup) abgerufen
- Tune, D., Devoto, M., Shanmugam, R., Wienands, K., Kopp, N., Hallensleben, C., . . . Halm, A. (2025). Contact Resistance Limitations in Conductive Adhesive and Solder Paste Modules. *EU PVSEC 2025*, (S. 020220-001 - 020220-008). Bilbao.
- Wienands, K., Devoto, I., Kopp, N., Hallensleben, C., Kizukuri, R., Helbig, M., . . . Tune, D. (2024). Solder Pastes in Shingled Modules. *EU PVSEC 2024*, (S. 020157-001 - 020157-004). Wien.