

Umweltfreundliches Galvanisierungsverfahren zum Ersatz von Silber durch Kupfer für PV- Solarzellenkontakte

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem AZ: 35505/71 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

PV2+ GmbH

Juni 2025

Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung	3
2. Einleitung	4
2.1. Ausgangssituation und Umweltsituation	4
2.2. Zielsetzung.....	4
2.3. Aufgabenstellung und Stand der Technik.....	5
3. Hauptteil	6
3.1. Vorhabensdurchführung und erzielte Ergebnisse.....	6
3.2. Diskussion der Ergebnisse und aufgetretene Herausforderungen	7
3.3. Ökologische, technologische und ökonomische Bewertung	8
3.4. Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse	10
4. Fazit	12
5. Literaturverzeichnis	13

1. Zusammenfassung

Das geförderte Projekt der PV2+ GmbH hatte zum Ziel, ein patentiertes, umweltfreundliches Galvanisierungsverfahren zum Ersatz von Silber durch Kupfer in Solarzellenkontakten zu entwickeln und zu validieren. Dies adressiert den hohen Silberverbrauch der Solarindustrie, der eine erhebliche Kostenbelastung und Umweltgefahr darstellt und als Hindernis für die Energiewende gilt.

Die technischen Projektziele wurden im Wesentlichen erreicht. Durch Optimierung des Gesamtprozesses konnte ein neuer interner Effizienzrekord erzielt werden. Der Fokus lag auf dem Prozesstransfer auf Demo- und Großanlagen:

- Sputtering und Laserablation wurden für diverse Waferformate (bis G12-halb) optimiert und auf Pilotanlagen übertragen, Laserschäden reduziert (Voc von 745mV erreicht).
- Die Galvanikanlage wurde für höhere Durchsätze (8+8 Solarzellen bis G12-Wafer) in Betrieb genommen. Das Kupferelektrolyt zeigte über 2 Jahre hinweg Stabilität, und eine homogene Abscheidung auf bis zu ≥ 500 Zellen wurde demonstriert, ohne Abscheidung an der Waferkante.
- Der Proof of Concept auf Industriezellen (SHJ, IBC, TOPCon) wurde erbracht, wobei verbesserte physikalische Eigenschaften und ein Return on Invest (ROI) von ca. einem Jahr für Kunden festgestellt wurden. Erste Umsätze aus Kunden-Samplings wurden generiert.

Die ursprüngliche Strategie, eine Pilotfertigung bei einem deutschen Hersteller (Meyer Burger) zu realisieren, wurde aufgrund des Rückgangs der europäischen PV-Industrie und der Verlagerung von Produktionen notwendig angepasst. Stattdessen wird eine Internationale Strategie verfolgt, die den Aufbau eigener pilotähnlicher Demofertigungen und die Zusammenarbeit mit führenden Akteuren in Asien (China, Indien) und den USA (z.B. Sunwell, Von Ardenne, REC Reliance, NuVision) vorsieht. Berichte über Reproduktionsversuche chinesischer Hersteller führten zur Einschränkung weiterer Publikationen zum Schutz des geistigen Eigentums.

Die Innovation von PV2+ bietet einen signifikanten ökologischen und ökonomischen Mehrwert: Kupfer ist $\sim 100x$ günstiger und $\sim 1000x$ häufiger verfügbar als Silber, wodurch schätzungsweise 2,3 Mio. € pro hergestelltem Gigawatt (GWp) für die industrielle Zellfertigung eingespart werden kann. Die Lebenszyklusanalyse zeigt, dass Kupfer mindestens $20x$ umweltfreundlicher ist als Silber. Der Ansatz fördert die Kreislaufwirtschaft durch Nutzung von Recycling-Kupfer und recycelbarem Aluminium als Maskierungsmaterial, reduziert Umwelt- und Sozialschäden des Silberabbaus, sichert Lieferketten und vermeidet gefährliche Emissionen. Die Technologie leistet einen wesentlichen Beitrag zur Skalierung der Solarenergie und damit zu den UN-Nachhaltigkeitszielen (SDGs).

Zusammenfassend liefert das Projekt eine technologisch ausgereifte, ökonomisch vorteilhafte und ökologisch wegweisende Lösung für die Silber-Substitution in Solarzellen. Die strategische Neuausrichtung auf globale Märkte sichert die weitere Kommerzialisierung und Skalierung der Innovation.

2. Einleitung

2.1. Ausgangssituation und Umweltsituation

Die Solarenergie ist eine der tragenden Säulen der globalen Energiewende. Um die Klimaziele zu erreichen, ist eine massive Skalierung der Solarindustrie notwendig, die jedoch durch den hohen und exponentiell wachsenden Verbrauch von Silber in Solarzellenkontakten stark gefährdet ist. Experten zufolge ist Silber das erste Industriemetal, das weltweit zuneige gehen könnte und die einzige kritische Ressource in der Solarzellenproduktion. Derzeit werden bereits etwa 17% des jährlich abgebauten Silbers für die Solarzellenfertigung beansprucht¹. Eine Verfünffachung der PV-Industrie, wie sie zur Einhaltung der Klimaziele nötig wäre, würde den globalen Silbermarkt immens überfordern. Der Abbau von Silber, insbesondere in Ländern wie China, Russland, Mexiko und Peru, ist oft mit erheblichen Umwelt- und Sozialschäden verbunden. Dies umfasst die Verletzung von Umwelt- und Sozialstandards, Menschenrechtsverletzungen, gesundheitsgefährdende Arbeitsbedingungen für Bergleute, die Vertreibung indigener Bevölkerungsgruppen und intransparente Lieferketten. Zudem führt die Abhängigkeit von wenigen Abbauzentren zu instabilen Lieferketten und hohen Transport-CO₂-Emissionen. Die am meisten betroffene Technologie ist die Silizium-Heterojunction-Technologie (SHJ), die aufgrund ihrer hohen Leistung und ihres geringen CO₂-Fußabdrucks in Europa bevorzugt wird, jedoch einen höheren Silberverbrauch pro Watt (22 mg/W) aufweist als herkömmliche PERC- oder TOPCon-Zellen².

2.2. Zielsetzung

Das übergeordnete Ziel des Vorhabens war es, durch die Entwicklung eines umweltfreundlichen Galvanisierungsverfahrens zum Ersatz von Silber durch Kupfer für Solarzellenkontakte den drohenden Silbermangel in der Solarindustrie zu überwinden und damit die notwendige Skalierung der Solarenergie für die Energiewende zu ermöglichen. Konkret sollten die Vorteile von Kupfer belegt werden:

- **Kostenreduktion:** Kupfer ist ca. 100-mal günstiger als Silber. Dies birgt ein jährliches Einsparpotenzial von ca. 1,5 Mrd. USD für die Solarindustrie im Jahr 2025³
- **Rohstoffverfügbarkeit und sichere Lieferketten:** Kupfer ist ca. 1000-mal häufiger verfügbar als Silber und gut recyclebar. Dies führt zu einer stabileren Rohstoffversorgung, kürzeren Lieferketten und reduzierten Abhängigkeiten von politisch instabilen Regionen.

¹ World Silver Survey 2025

² Bloomberg NEF

³ Bloomberg NEF, World Silver Survey 2025

- Nachhaltigkeit und Umweltentlastung: Das Verfahren ist umweltfreundlicher, da Kupfer in der Lebenszyklusanalyse mindestens 20-mal umweltschonender ist als Silber⁴. Es soll zusätzlich zur Kreislaufwirtschaft beitragen, Umwelt- und Sozialschäden des Silberabbaus mindern und gefährliche Emissionen vermeiden⁵.
- Leistungssteigerung: Potenzial für höhere Zelleistung durch schmalere Leiterbahnen (ca. 30% weniger Abschattung) und 2-3-mal bessere Leitfähigkeit als Niedertemperatur-Silberpasten.

2.3. Aufgabenstellung und Stand der Technik

Die Aufgabenstellung umfasste die Entwicklung und Optimierung des patentierten Galvanisierungsverfahrens von PV2+, welches aus dem Fraunhofer ISE hervorgegangen ist. Dies beinhaltete die Prozessentwicklung für Sputtern, Laserablation und Kupfergalvanik sowie deren Transfer auf Demo- und Großanlagen zur Erzielung industrietauglicher Ergebnisse. Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der Validierung der Langzeitstabilität der Kupferkontakte.

Der derzeitige Standard für die Kontaktierung von Solarzellen ist der Siebdruck mit Silberpasten. Dieser Ansatz ist jedoch anfällig für Lieferengpässe und hohe Kosten. Wettbewerber in der Kupferkontaktierung sind unter anderem Copprint (Siebdruck mit Kupfer-Nanopartikeln) und SunDrive (elektroplattierte Kupferkontakte mit Polymer-Maskierung). Im Vergleich dazu bietet PV2+ mit seinem Galvanikverfahren, das eine recyclebare Aluminiumschicht zur Maskierung verwendet und einen speziell entwickelten Elektrolyten nutzt, eine überlegene Lösung hinsichtlich Leistung, Kosten und Umweltfreundlichkeit. Das Verfahren ist zudem durch starke Patente in Deutschland, China und den USA geschützt, was eine unerlaubte Reproduktion erschwert.

⁴ CO2 Faktor in tCO2-equivalent / t, BAFA (2024)

⁵ P. Nuss, M. Eckelman (2014)

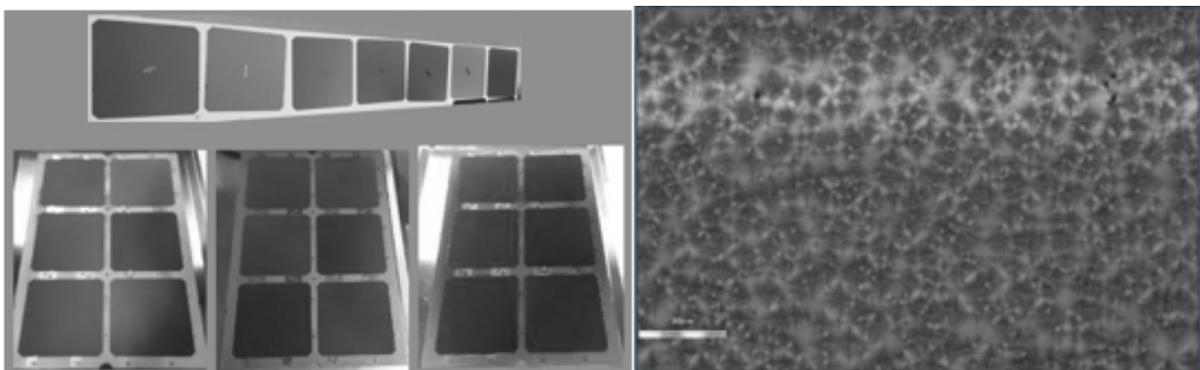
3. Hauptteil

3.1. Vorhabensdurchführung und erzielte Ergebnisse

Die Arbeitsschwerpunkte des Projekts lagen konsequent auf dem Prozesstransfer auf die Demo- und Großanlagen sowie der Optimierung des Gesamtprozesses. Hierbei konnte ein neuer interner Effizienzrekord erzielt werden.

Sputtering von Metallschichten: Der Sputtering-Prozess wurde kontinuierlich an unterschiedliche Waferformate (M2, M6, M10, G10, G12-halb) angepasst, um eine große Flexibilität für verschiedene Kunden zu gewährleisten. Die Aluminium-Maskierungsschicht wurde für M2- und M6-Wafer optimiert, um eine leichtere Laserablation zu ermöglichen. Der Metallstapel und der Gesamtprozess wurden für M6-, M10- und G10-Wafer verbessert. Der Metall-Sputterprozess konnte erfolgreich auf eine größere Pilotanlage übertragen werden, ohne dass Performanceverluste auftraten.

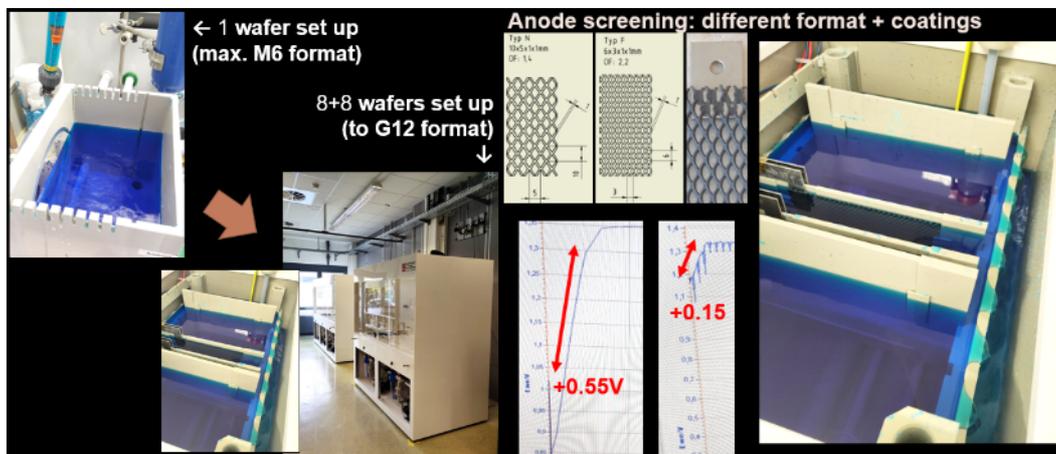
Aluminiumlaserablation: Das Griddesign wurde für Wafer bis G12 halb angepasst, und später auch für andere Solarzellenarten wie IBC (Interdigitated-Back-Contacted) und TOPCon. Durch einen Wechsel von Tempern zu einer Belichtungsbehandlung konnte der Laserschaden bei der Aluminiumablation signifikant reduziert werden, sodass $iVoc$ und Voc vergleichbare Werte erreichten und eine Voc von 745mV erzielt wurde. Der Transfer des Laserprozesses auf Anlagen mit höherem Durchsatz ist aktuell in Arbeit.



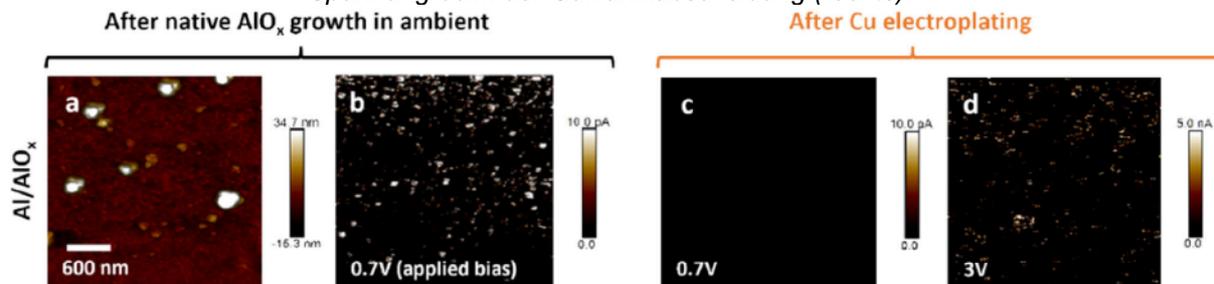
Ab.1. Aluminiumsputtervariation (links), mikroskopisches Bild von ablatiertem Aluminium, auf einer SHJ-Solarzelle textuiert (rechts).

Kupferplating und -etching: Eine neue Galvanikanlage wurde in Betrieb genommen, die das Potenzial für die Prozessierung von 8+8 Solarzellen bis zum G12-Wafer-Format bietet, eine deutliche Steigerung gegenüber der ursprünglichen Kapazität von einem Wafer im M6-Format. Das Kupferelektrolyt hat sich als äußerst zuverlässig erwiesen und ist seit über 2 Jahren stabil. Eine homogene Kupferabscheidung auf einer größeren Anzahl von Solarzellen (zunächst ≈ 20 , dann ≥ 300 , zuletzt ≥ 500 Solarzellen) wurde erfolgreich demonstriert. Größere Waferformate wie M10 und G12 halb konnten erfolgreich prozessiert werden, und Solarzellen ohne Kupferabscheidung an der Waferkante wurden demonstriert. Der Waferhalter wurde weiter optimiert und acht Halter für einen höheren Durchsatz gefertigt. Eine neu

gebaute Stromquelle zur separat kontrollierten Kupferabscheidung für Zellvorder- und Rückseiten auf acht Solarzellen in einem Bad wird weiter optimiert, um den Durchsatz für Bemusterungen und Modulbau zu erhöhen.



Ab.2. Galvaniklabor und Demoanlagen (links), Bild der Anodengeometrie und der Messung der Spannung beim der Galvanikabscheidung (rechts).



Ab.3. AFM mappings von die Al/AIO_x Oberflächen vor und nach der Kupfergalvanikabscheidung ins PV2+ Elektrolyt (publiziert unter 10.1002/solr.202300335).

Kundenvalidierung und Proof of Concept: Es wurden umfangreiche Samplings auf vier bzw. drei unterschiedlichen SHJ-Solarzellen-Präkursoren und Formaten (M6, M10, G10, G12 halb) von verschiedenen Herstellern durchgeführt. Erste Demos gab es auch für neue Märkte wie Thin-Film-PV, IBC- und TOPCon-Solarzellen. Der Proof of Concept auf industriell gefertigten Solarzellen mit industrietauglichen Prozessschritten wurde erbracht. Dabei zeigten die physikalischen Eigenschaften der Kupferkontakte deutlich bessere Ergebnisse als bei Referenzkontakten aus Silber. Eine Total-Cost-of-Ownership-Berechnung ergab einen deutlichen Vorteil und einen kalkulierten Return of Invest von ca. einem Jahr. Erste Umsätze für Kunden-Samplings konnten generiert werden.

3.2. Diskussion der Ergebnisse und aufgetretene Herausforderungen

Der erreichte Vorhabensstand weicht vom geltenden Arbeits-, und Kostenplan sowie dem Finanzierungsplan nicht ab. Der Projektfortschritt entspricht im Wesentlichen der Planung des ersten Förderbescheides.

Allerdings haben sich die Aussichten für die Erreichung der Projektziele im Berichtszeitraum verändert. Die Situation in der EU ist für Solarzellenhersteller derzeit nicht optimal, um Innovationen voranzutreiben und in neue Fertigungslinien zu implementieren, da konkrete politische Maßnahmen zum Aufbau einer PV-Industrie fehlen.

Diese Marktentwicklungen führten zu einer notwendigen strategischen Anpassung: Parallel zur Geschäftsentwicklung in Europa wird nun verstärkt eine Internationalisierung verfolgt. Ergänzend zu den Bemühungen, eine Pilotfertigung bei Kunden aufzubauen, wird eine pilotähnliche Demofertigung mit den zur Verfügung stehenden Anlagen von PV2+ angestrebt. Die Notwendigkeit, nicht auf europäische Hersteller warten zu müssen, führte zu Gesprächen mit Herstellern in anderen Regionen, darunter REC Reliance in Singapur/Indien und NuVision in den USA. Reisen nach China ergaben konkretes Interesse führender Akteure der PV-Wertschöpfungskette, wie Aiko Solar, Jinko, Von Ardenne und Sunwell. Dies eröffnet Optionen für gemeinsame Demofertigungen in Shanghai (mit Von Ardenne) und Meishan (mit Sunwell), um eine schnellere Marktvalidierung und Skalierung zu erreichen.

Eine weitere relevante Entwicklung von dritter Seite sind Berichte chinesischer Maschinenbauer, wonach führende Zellhersteller versuchen, den Prozess von PV2+ zu reproduzieren. Aus diesem Grund wurde entschieden, zunächst keine weiteren Ergebnisse mehr zu publizieren, um das geistige Eigentum (IP) von PV2+ zu schützen. Stattdessen wird der Fokus auf gezielte und selektive strategische Partnerschaften gelegt.

Trotz dieser strategischen Anpassungen sind keine Änderungen der übergeordneten Zielsetzung notwendig. Die Verlegung der Pilotfertigung zu Herstellern/Kunden wird voraussichtlich erst Q4 2025 starten, aber die internationale Ausrichtung ermöglicht es, die ursprünglichen Ziele der Industrialisierung und Markteinführung zu erreichen.

3.3. Ökologische, technologische und ökonomische Bewertung

Die Innovation von PV2+ ist von entscheidender Bedeutung für die Energiewende, da der absehbare Silbermangel die notwendige Skalierung der Solarindustrie behindert.

- **Technologische Bewertung:** PV2+ bietet ein patentiertes Galvanikverfahren mit Aluminiummaskierung, das im direkten Vergleich Wettbewerbslösungen wie Kupfer-Nanopartikel-Siebdruck (Copprint) oder Polymer-Maskierung (SunDrive) überlegen ist. Es ermöglicht die Abscheidung von Kupferkontakten auf industriellen Solarzellen mit hervorragender Leistung. Das Verfahren ist kompatibel mit der Silizium-Heterojunction-Technologie (SHJ), die in Europa aufgrund ihrer hohen Leistung, ihres geringen CO₂-Fußabdrucks und der Siliziumeinsparung bevorzugt wird. Durch die Möglichkeit, den Nachteil des erhöhten Silberverbrauchs in der SHJ-Technologie durch den Kupfereinsatz in einen Vorteil umzuwandeln, hat die SHJ-Technologie die besten Chancen, zum Zugpferd der Solarindustrie zu werden.
- **Ökonomische Bewertung:** Der wirtschaftliche Nutzen für Solarzellenhersteller ist erheblich:
 - **Kostensparnis:** Kupfer ist ca. 100-mal billiger als Silber. Der durchschnittliche Zell-Produzent gab ca. 8,5 Mio. € für Silber im Jahr 2024 aus. PV2+ ermöglicht die Einsparung von ca. 1,5 Mrd. € Silber in der Solarzellen-Produktion im Jahr 2025.³
 - **ROI:** Die Total-Cost-of-Ownership-Berechnung hat einen deutlichen Vorteil ergeben, mit einem kalkulierten Return on Invest von ca. einem Jahr für Kunden.

- Geschäftsmodell: PV2+ generiert Einnahmen primär durch den Verkauf eines speziell entwickelten, patentrechtlich geschützten Kupferelektrolyten, der die Lizenz zur Nutzung des Verfahrens beinhaltet und wiederkehrende Einnahmen mit hohen Margen verspricht. Zusätzlich wird Know-how zur Prozessintegration angeboten. Das Unternehmen strebt den Break-Even im Jahr 2029 an.
- Ökologische Bewertung (zusätzliche Umweltentlastung über gesetzliche Mindestanforderungen hinaus): Die PV2+-Technologie bietet ein umfassendes Umweltentlastungspotenzial, das weit über gesetzliche Mindestanforderungen hinausgeht und zu einem ganzheitlichen Nachhaltigkeitskonzept beiträgt.
 - Quantitative Entlastung: Das verwendete Kupfer ist in der Lebenszyklusanalyse mindestens 20-mal umweltfreundlicher als Silber⁵. Durch die komplette Silbereliminierung werden die mit dem Silberabbau verbundenen Umweltauswirkungen (z.B. Zerstörung von Ökosystemen, Eintrag giftiger Chemikalien und Schwermetalle, Beeinträchtigung der Biodiversität) vermieden.
 - Förderung der Kreislaufwirtschaft: PV2+ setzt auf recyceltes Kupfer, das ca. 1000-mal häufiger verfügbar ist und weltweit dezentral zur Solarzellenherstellung genutzt werden könnte. Das verwendete Maskierungsmaterial (Aluminium) ist recycelbar. Dies steht im Gegensatz zu anderen Galvanikverfahren, die Polymere als Maskierungsmaterial verwenden, welche als Mikroplastik anfallen und nicht wiederverwertbar sind. PV2+ wurde 2021 als eines der besten Startups der Kreislaufwirtschaft ausgezeichnet.
 - Reduzierung von Umwelt- und Sozialschäden: Die Technologie trägt dazu bei, die mit dem Silberabbau verbundenen sozialen Probleme (z.B. gesundheitsgefährdende Arbeitsbedingungen, Verletzung von Menschenrechten, Ressourcenkonflikte) zu mindern.
 - Sicherung von Lieferketten und CO₂-Reduktion: Durch die Unabhängigkeit vom Silber und die Nutzung lokal verfügbaren Kupfers können Lieferketten verkürzt und die Abhängigkeit von undemokratischen, silberabbauenden Staaten (z.B. China, Russland) reduziert werden. Kürzere Transportwege tragen zur Einsparung von CO₂-Emissionen bei.
 - Saubere Produktion: Im Vergleich zu herkömmlichen Siebdruckverfahren mit Silberpasten entstehen bei der galvanischen Aufbringung von PV2+ keine gefährlichen Emissionen von Silberpartikeln oder organischen Lösungsmitteln, was die Arbeitsumgebung sicherer macht.
 - Beitrag zu den UN-Nachhaltigkeitszielen (SDGs): Die Innovation leistet einen direkten Beitrag zu SDG 7 (bezahlbare und saubere Energie) und SDG 13 (Maßnahmen zum Klimaschutz). Sie trägt indirekt auch zu SDG 1 (keine Armut), 3 (Gesundheit und Wohlergehen), 5 (Geschlechtergleichheit), 8 (menschenwürdige Arbeit und Wirtschaftswachstum), 9 (Industrie, Innovation und Infrastruktur), 10 (weniger Ungleichheiten), 11 (nachhaltige Städte und Gemeinden), 12 (nachhaltige/r Konsum und Produktion) und 15 (Leben an Land) bei, indem sie die negativen Auswirkungen des Silberabbaus mindert und eine nachhaltige Industrialisierung fördert. PV2+ ist bestrebt, ein

wertebasiertes Unternehmen zu sein, das auch ökologische und soziale Aspekte in seine Entscheidungen einbezieht.

3.4. Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse

PV2+ hat die im Rahmen des Projekts erarbeiteten Ergebnisse durch verschiedene Kanäle verbreitet, wobei ein strategischer Fokus auf der industriellen Validierung und Kommerzialisierung liegt:

Veröffentlichungen:

- Eine Fachpublikation mit dem Titel "Atomic Force Microscopy Analysis of Aluminum Layer Properties and Correlation to Masking Functionality in Copper Plating Metallization for Solar Cells" (DOI 10.1002/solr.202300335) wurde veröffentlicht.
- Weitere geplante Publikationen wurden zum Schutz des geistigen Eigentums (IP) und zur Abwehr von Reproduktionsversuchen chinesischer Wettbewerber vorerst eingestellt.

Kunden-Samplings und Demos:

- Es wurden umfangreiche Samplings und Demos mit führenden Solarzellenherstellern durchgeführt. Dies umfasste verschiedene Waferformate (M6, M10, G10, G12-halb), SHJ-, IBC- und TOPCon-Zellen.
- Diese Aktivitäten führten zu ersten Umsätzen aus Kunden-Samplings, was den direkten industriellen Nutzen und die Akzeptanz der Technologie unterstreicht.

Netzwerkaktivitäten und strategische Gespräche:

- PV2+ pflegt einen aktiven Austausch innerhalb des Solarindustrie-Netzwerks, u.a. mit dem Fraunhofer ISE, SolarPower Europe und Maschinenbauern wie Von Ardenne und Trumpf.

Zukünftige und geplante Maßnahmen (über die Projektlaufzeit hinaus):

Aufbau von Pilot- und Demofertigungen:

- Aufgrund der schwierigen Geschäftsentwicklung in Europa wird eine internationale Strategie verfolgt. Geplant sind eigene pilotähnliche Demofertigungen und Kooperationen mit Herstellern in Asien (z.B. Von Ardenne und Sunwell in China) sowie in den USA (NuVision) und Indien (REC Reliance). Ziel ist es, eine schnellere Marktvalidierung und Skalierung zu erreichen.
- Strategische Partnerschaften: Es werden gezielte Kooperationen mit Schlüsselakteuren der PV-Wertschöpfungskette angestrebt, darunter Aiko Solar und Jinko. Diese Partnerschaften dienen der schnellen Marktdurchdringung und Skalierung der Technologie.
- Kommerzialisierung über Elektrolyt-Lizenz: Die Technologie wird primär über den Verkauf des speziell entwickelten, patentrechtlich geschützten Kupferelektrolyten lizenziert, der die Nutzung des Verfahrens ermöglicht und wiederkehrende Einnahmen generiert. Ergänzend wird Know-how zur Prozessintegration angeboten.
- Zugänglichkeit für KMU: Die Technologie zielt aufgrund des signifikanten Kostensenkungs- und Leistungssteigerungspotenzials in erster Linie auf große

Solarzellenhersteller ab, die in der Massenproduktion die Vorteile am besten realisieren können. Die Verbreitung erfolgt primär über etablierte Industriepartnerschaften und die globale Kommerzialisierung des Elektrolyten. Eine explizite Strategie zur direkten Ansprache kleinerer und mittelständischer Unternehmen als Endanwender ist nicht vorgesehen, da der Fokus auf großen Produktionslinien liegt.

4. Fazit

Das PV2+-Projekt zum Ersatz von Silber durch Kupfer in Solarzellenkontakten hat seine technischen Ziele äußerst erfolgreich erreicht. Die Vorgehensweise, die auf einer umfassenden Prozessentwicklung, Optimierung von Sputtern, Laserablation und Galvanik basierte, führte zu einem neuen internen Effizienzrekord und zur erfolgreichen Demonstration auf industriellen Wafern bis zum größten G12-halb-Format. Der Proof of Concept mit verbesserter Leistung und einem Return on Invest von etwa einem Jahr ist erbracht, und es wurden bereits erste Umsätze aus Kundenbemusterungen generiert. Der Projektfortschritt entsprach stets den Planvorgaben bei Arbeits-, Zeit- und Kostenplan.

Die anfängliche strategische Ausrichtung auf den europäischen Markt musste jedoch aufgrund des Rückgangs der europäischen PV-Industrie und der Verlagerung von Produktionskapazitäten angepasst werden. Die notwendige und erfolgreich umgesetzte Anpassung war die Internationalisierung der Marktstrategie (Fokus auf Asien/USA/Indien) und der Aufbau eigener pilotähnlicher Demofertigungen in Zusammenarbeit mit globalen Partnern wie Von Ardenne und Sunwell. Diese strategische Neuausrichtung sichert die Markteinführung und Skalierung der Innovation trotz veränderter regionaler Marktbedingungen.

Hinsichtlich alternativer Lösungsansätze haben sich keine überlegenen technischen Alternativen zu PV2+'s patentiertem Galvanikverfahren mit Aluminiummaskierung ergeben. Wettbewerbslösungen (z.B. Kupfer-Nanopartikel-Siebdruck oder Polymer-Maskierung) sind unserem Verfahren in Leistung, Kostenersparnis und Umweltfreundlichkeit unterlegen. Die wesentliche "alternative Idee", die das Projekt vorantrieb und erfolgreich umgesetzt wurde, war die strategische Neuausrichtung auf globale Märkte und die Initiierung eigener pilotähnlicher Demo-Produktionen. Dies ermöglicht es, die disruptive und dringend benötigte Technologie zur Silber-Substitution in Solarzellen, die sowohl ökonomisch vorteilhaft als auch ökologisch wegweisend ist, breitflächig in den Markt zu bringen und damit einen entscheidenden Beitrag zur Energiewende und zur Nachhaltigkeit der Solarindustrie zu leisten.

5. Literaturverzeichnis

Embleton, R. et. al.: *World Silver Survey 2025*. The Silver Institute, 2025.

Bloomberg NEF: *The world's appetite for solar panels is pushing up silver prices*. Bloomberg, 2023.

BAFA: *Informationsblatt CO₂-Faktoren – Bundesförderung für Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft – Zuschuss*. Version 3.1, 2024.

NUSS, P. und ECKELMAN, M. J.: *Life Cycle Assessment of Metals: A Scientific Synthesis*. PLOS ONE, 9 (7), e101298, 2014.