

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie



MEYER BURGER

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Schlussbericht

Verbundprojekt:

**„TANTRUM - Entwicklung eines kosteneffizienten
Perowskit-Heterojunction-Tandemprozess
im industriellen Umfeld“**

Teilvorhaben:

**„Aufbau eines Demonstrators zur Co-Verdampfung
von Perowskit-Absorbern“**

Kennzeichen:	03EE1153A
Geplante Projektlaufzeit:	01.02.2023 – 31.01.2026
Tatsächliche Projektlaufzeit:	01.02.2023 – 02.06.2025
Förderschwerpunkt:	Photovoltaik

von Meyer Burger (Germany) GmbH

Verbundpartner mit Teilvorhabenbeschreibung:

Helmholtz-Zentrum Berlin

Fraunhofer IKTS

TU Bergakademie Freiberg, Institut für Angewandte Physik (IAP)

Inhaltsverzeichnis

1. Aufgabenstellung	3
2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....	4
3. Planung und Ablauf des Vorhabens	5
3.1. Projektmanagement (AP0)	5
3.2. Entwicklung eines Demonstrator-Tools für die Perowskit-Topzelle (AP1).....	5
3.3. Prozessentwicklung für die Perowskit-Solarzelle (AP2)	6
3.4. Charakterisierung und Simulation (AP3)	7
3.5. Entwicklung und Test einer Ultraniedertemperatur-Siebdruck-Silberpaste (AP4)	7
3.6. Umwelt- und Gefährdungsanalyse (AP5)	7
3.7. Zusammenarbeit der Partner	7
3.8. Einfluss externer Faktoren auf den Projektablauf.....	8
4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde.....	8
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen	9
6. Erzielte Ergebnisse mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele.....	10
6.1. AP1 – Entwicklung eines Demonstrator-Tools für die Perowskit-Topzelle	10
6.2. AP2 – Entwicklung der Prozesse für die Perowskit-Solarzelle	11
6.3. AP3 – Charakterisierung und Simulation.....	13
6.4. AP4 – Entwicklung und Test einer Ultraniedertemperatur-Siebdruck-Silberpaste.....	13
6.5. AP5 – Umwelt- und Gefährdungsanalyse.....	13
7. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	14
8. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	15
9. Voraussichtlicher Nutzen, insb. Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans.....	16
10. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	16
11. Veröffentlichungen der Ergebnisse.....	17

1. Aufgabenstellung

Die Silizium-Heterojunction-Technologie (HJT) ist eine Schlüsseltechnologie der Photovoltaik, die derzeit Wirkungsgrade von bis zu ca. 25 % auf Industriesolarzellen erreicht. Auf der Roadmap von Meyer Burger ist vorgesehen, diese Grenze durch Rückkontakttechnologie (IBC) auf etwa 26 % zu verschieben. Für Effizienzsteigerungen auf 30 % und darüber hinaus ist jedoch zwingend die Kombination von zwei Zellen im Tandem-Verbund erforderlich. Laborergebnisse zeigen, dass für Perowskit-Silizium-Tandem-Solarzellen bereits Effizienzen von bis zu 31,25 % nachgewiesen werden konnten. Die zentrale Herausforderung besteht nun darin, diese hohen Wirkungsgrade auf industrielles Equipment und große Flächen zu übertragen.

Das Teilvorhaben „Aufbau eines Demonstrators zur Co-Verdampfung von Perowskit-Absorbern“ im Verbundprojekt TANTRUM unterstützt die Erweiterung der F&E-Linie für Heterojunction-Solarzellen von Meyer Burger am Standort Hohenstein-Ernstthal und ermöglicht die Weiterverarbeitung zu Perowskit-Silizium-Tandem-Solarzellen (PVST). Die Verschaltung im 2-Terminal-Verbund erfordert die Applikation zusätzlicher Top-Layer auf die HJT-Zelle, die eine zweite Absorberschicht mit größerer Bandlücke bereitstellen und so höhere Wirkungsgrade von bis zu 30 % ermöglichen.

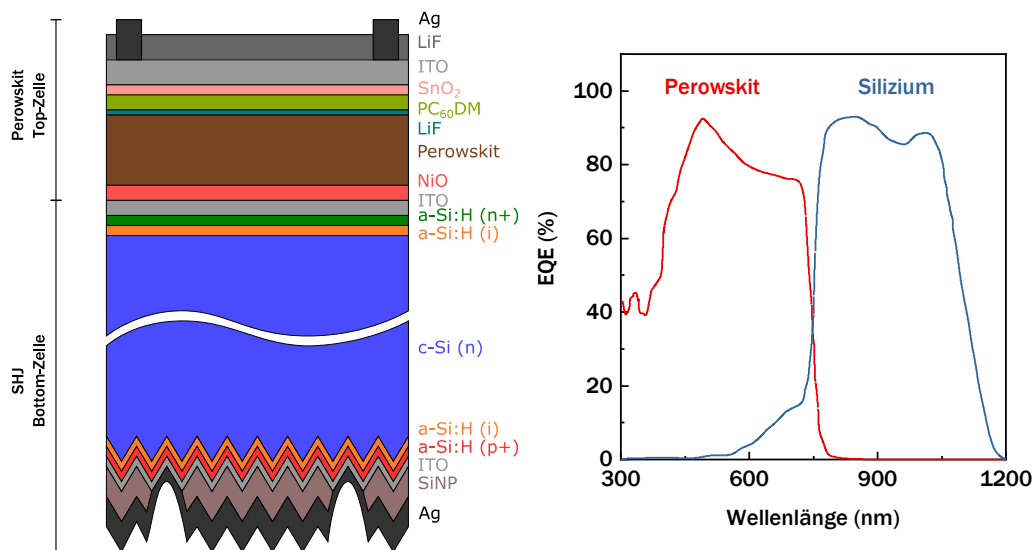


Abbildung 1: (Links) Beispielhafter Aufbau einer Perowskit-Tandem-Solarzelle und (Rechts) externe Quanteneffizienz von Perowskit-Top-Zelle und Silizium-Bottom-Zelle

Bisher werden solche Top-Layer nur im Labor hergestellt, häufig mit ökologisch bedenklichen und seltenen Materialien. Meyer Burger verfügt als etablierter Maschinenbauer über umfangreiche Erfahrung in der Industrialisierung von HJT-Technologien und ist überzeugt, dass die Laborprozesse verschlankt und im Rahmen einer kosteneffizienten Fertigung auf eigenen Maschinen abgebildet werden können. Im Projekt SWITCH konnte bereits der Topzellen-Prozess auf industriellem Equipment demonstriert werden, allerdings mit nur begrenzter Wirtschaftlichkeit. Die bislang komplexe Prozesskette erfordert einen hohen Automatisierungsaufwand.

Das Teilvorhaben „Aufbau eines Demonstrators zur Co-Verdampfung von Perowskit-Absorbern“ war ein zentraler Baustein des Verbundprojekts TANTRUM, das die Industrialisierung der Perowskit-Silizium-Tandemtechnologie als Schlüsseltechnologie der Photovoltaik vorantreiben sollte. Ziel war die Entwicklung eines industrierelevanten Tandemprozesses, der auf HJT-Bottomzellen basiert und eine kosteneffiziente Fertigung hocheffizienter PVSK-HJT-Tandemzellen ermöglicht.

Im Kern beinhaltete das Teilvorhaben folgende Schwerpunkte:

- **Prozess- und Materialspezifikation:** Erstellung detaillierter Prozessbeschreibungen für die Co-Verdampfung von Perowskit-Absorbern sowie die Abscheidung funktionaler Schichten (HTL, ETL, Pufferschichten) unter Berücksichtigung von Stabilität, industrieller Relevanz, ökologischen Risiken und IP-Aspekten.
- **Anlagendesign und Engineering:** Entwicklung einer industrierelevanten Verdampferanlage, inkl. Vakuumbführung, Substrathandling, Temperatur- und Atmosphärenkontrolle, sowie Integration von inline-Analysen und Monitoring.
- **Prozessentwicklung und Optimierung der Topzelle:** Aufbau reproduzierbarer Perowskit-Abscheideprozesse und Abstimmung mit HZB-Referenzprozessen zur schrittweisen Einführung eines stabilen Tandembasisprozesses mit >26 % Zellwirkungsgrad.
- **Peripherieentwicklung:** Schaffung eines geeigneten Handhabungs-, Mess- und Logistikkonzepts für die empfindlichen Perowskit-Schichten.
- **Vorbereitung der Modulskalierung:** Unterstützung bei ersten Mustermodulen zur Bewertung von Stabilität, Materialkompatibilität und Zertifizierungsfähigkeit (IEC 61215/61730).

Übergeordnetes Ziel war es, die Basis für eine skalierbare und industrielle Perowskit-Tandemtechnologie zu legen, die perspektivisch in die Fertigung von Meyer Burger übernommen werden könnte.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Durchführung des Teilvorhabens erfolgte in einem industriell geprägten Umfeld am Standort Hohenstein-Ernstthal, im Rahmen der F&E-Linie von Meyer Burger für Heterojunction-Solarzellen. Die Voraussetzungen wurden durch die etablierte HJT-Produktion, das vorhandene Fachpersonal sowie die Kooperation mit Forschungseinrichtungen wie HZB, IAP und IKTS bestimmt. Die Ausgangslage war geprägt durch die bereits erreichten Laborwirkungsgrade der Perowskit-Silizium-Tandemzellen, die als Referenz für industrielle Prozessentwicklung dienten.

Parallel zu den technologischen Voraussetzungen hatten externe Rahmenbedingungen Einfluss auf die Durchführung: Die Markt- und Unternehmenslage von MBG erforderte ab September 2024 Kurzarbeit für einen Großteil der Mitarbeitenden. Diese reduzierte die Kapazität der Projektarbeit erheblich und führte zu Verzögerungen bei der Bearbeitung der Arbeitspakete.

Darüber hinaus wurde am 03.06.2025 ein Insolvenzverfahren beantragt, was die Projektfinanzierung und -fortführung unmittelbar beeinflusste. Die Arbeiten mussten daher mit Beginn des Insolvenzverfahrens am 01.09.2025 eingestellt werden, wodurch eine vorzeitige Einreichung des Schlussberichts erforderlich wurde

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Verbundprojekt „TANTRUM“ war ursprünglich auf eine Projektlaufzeit von 36 Monaten angelegt und gliederte sich in fünf übergeordnete Arbeitspakete (AP0–AP5). Die Arbeitspakete waren jeweils in mehrere Teilarbeitspakete untergliedert, um die industrielle Übertragbarkeit der Perowskit-Silizium-Tandemtechnologie voranzutreiben. Ziel war es, sowohl die Prozessentwicklung für die Perowskit-Topzelle als auch deren Integration auf die Heterojunction-Bottomzellen von Meyer Burger zu ermöglichen. Die Planung sah vor, dass jeder Partner seine spezifischen Kompetenzen einbringt, um die Ziele des Gesamtprojektes effizient zu erreichen. Die Projektkoordination wurde primär durch die Meyer Burger (Germany) GmbH (MBG) übernommen, unterstützt von den Partnern HZB, IKTS und IAP.

3.1. Projektmanagement (AP0)

Das Arbeitspaket 0 umfasste die übergreifende Koordination und Administration des Projektes über die gesamte Laufzeit. Ziel war die Steuerung des Projektfortschritts, die termingerechte Erbringung der Meilensteine und Ergebnisse, die Sicherstellung der Berichterstattung an den Projektträger sowie die Organisation von regelmäßigen Projekttreffen und Telefonkonferenzen. Geplant waren zwei Projekttreffen pro Jahr sowie zusätzliche Arbeitstreffen nach Bedarf. Parallel dazu wurden halbjährlich Zwischenberichte erstellt. Der erste Meilenstein, MS0-4, der Kooperationsvertrag, war für Projektmonat 4 vorgesehen und wurde termingerecht umgesetzt. Regelmäßige Projekttreffen fanden statt an folgenden Terminen 15.09.2023, 24.01.2024, 17.06.2024, 22.11.2024 und 27.03.2025. Ergänzend gab es monatliche Fachrunden zu Prozessentwicklung und Technologieabgleich zwischen MBG, HZB, IKTS, TU BAF und weiteren Partnern.

3.2. Entwicklung eines Demonstrator-Tools für die Perowskit-Topzelle (AP1)

In AP1 lag der Fokus auf der Erstellung eines favorisierten Prozessablaufs und der Prozessspezifikationen für die spätere industrielle Umsetzung der Perowskit-Silizium-Tandemsolarzellen. Das Teilprojekt wurde von MBG geleitet und in vier Unterarbeitspakete gegliedert:

- 1.1 Erarbeitung der Prozessspezifikation,
- 1.2 Überprüfung der Prozessspezifikation,
- 1.3 Anlagendetailspezifikation und Bau sowie
- 1.4 Hardwareoptimierung parallel zum Prozesstransfer

Wesentlicher Meilenstein war der Design Freeze der Verdampferanlage (MS1) im Projektmonat 12, der die Grundlage für die anschließende Detailplanung und den Aufbau der Demonstrationsanlage bilden sollte. Der von MBG bereitgestellte Prozessablauf wurde auf Basis der am HZB gewonnenen Erkenntnisse fortlaufend angepasst. Ziel war es, einen reproduzierbaren Prozess für die Herstellung des Perowskit-Absorbers zu etablieren. Der ursprünglich geplante Ko-Verdampfungsprozess konnte jedoch nicht in ausreichender Reproduzierbarkeit umgesetzt werden. Deshalb beschloss das Konsortium am 11.09.2023, den Prozessfluss auf einen hybriden Ansatz umzustellen, bei dem der organische Anteil des Perowskit nicht mehr verdampft, sondern mittels Inkjet-Druck aus Ethanolösung aufgetragen wird.

Auf dieser Basis erstellte MBG einen vorläufigen Prozessablauf, eine Prozessspezifikation sowie eine Anlagen-Detailspezifikation und ein grundlegendes Konzept für die industrietaugliche Meyer-Burger-Verdampferanlage. Die Dokumente werden kontinuierlich aktualisiert, um den neuesten Erkenntnissen vom HZB, dem Stand der Technik und den experimentellen Ergebnissen Rechnung zu tragen. Parallel dazu werden alternative Herstellungsansätze evaluiert, insbesondere zur Optimierung der Materialeigenschaften des Perowskitabsorbers. Die TU BAF lieferte Empfehlungen zur Inline-Prozesskontrolle (MS3.1-12), und HZB erstellte eine Spezifikation zum Transport der Proben (MS3), die fortlaufend aktualisiert wird.

Trotz intensiver Bemühungen konnten im Berichtszeitraum keine entscheidenden Fortschritte hinsichtlich der Reproduzierbarkeit des hybriden Prozesses erzielt werden. Das Risiko signifikanter Änderungen im Prozessablauf bleibt weiterhin hoch, und das Konsortium arbeitete daran, alle relevanten Prozessparameter zu identifizieren und den zulässigen Prozessparameterraum zu definieren.

3.3. Prozessentwicklung für die Perowskit-Solarzelle (AP2)

Das von HZB geleitete AP2 zielte auf die Etablierung einer Referenzlinie für Perowskit/Silizium-Tandemsolarzellen auf M6-Waferformat. Dabei sollten sämtliche Einzelprozesse für die Topzelle entwickelt, optimiert und für den Transfer in die Pilotlinie bei MBG vorbereitet werden. Die Unterarbeitspakete umfassten die Vorbereitung der Kreuzprozessierung (2.2), Anpassung der HJT-Bottomzellen (2.3), Entwicklung der Einzelprozesse für HTL, ETL, TCO, ALD-Pufferschicht und ko-verdampften Perowskit-Absorber (2.4) sowie den Prozesstransfer zur Demonstrationslinie bei MBG (2.5) und die Gesamtprozessentwicklung (2.6). Besonders hervorzuheben ist, dass die Entwicklung der Einzelprozesse trotz der wirtschaftlichen und personellen Einschränkungen, insbesondere der Kurzarbeit von September 2024 bis Mai 2025, weitgehend wie geplant durchgeführt werden konnte. Die Meilensteine, darunter MS2 (Wirkungsgrad von 27 % auf vollem Wafer) und MS2.5 (Basisprozess für PVSK-HJT-Tandemzellen bei MBG mit 26 % CE), wurden zum Teil erreicht oder konnten in vorbereitender Form dokumentiert werden. Die sichere Handhabung und der Versand der empfindlichen Perowskitproben zwischen den Partnern wurden erfolgreich umgesetzt.

3.4. Charakterisierung und Simulation (AP3)

Unter Leitung des IAP wurden in AP3 Messmethoden zur Inline-Prozesskontrolle sowie zur Charakterisierung der Einzel- und Tandemzellen etabliert. Ziel war es, durch optische und elektrische Analysen Optimierungen in den Prozessparametern ableiten zu können. Die Unterarbeitspakete umfassten die Charakterisierung der Einzelschichten (3.1), der Gesamtzelle (3.2) sowie die Entwicklung eines kalibrierten Gesamtdevicesimulationsmodells (3.3). Wesentliche Meilensteine waren die Handlungsempfehlung für Inline-Prozesskontrolle (MS3.1-12) und die Bereitstellung des kalibrierten Modells für die Verlustanalyse (MS3.3-36). Trotz der Unterbrechung durch die Insolvenzeröffnung konnten viele der Charakterisierungsarbeiten abgeschlossen und die Simulationsmodelle in den relevanten Bereichen erstellt werden.

3.5. Entwicklung und Test einer Ultraniedertemperatur-Siebdruck-Silberpaste (AP4)

Ziel dieses von IKTS geleiteten Arbeitspaketes war die Entwicklung einer Siebdruck-Silberpaste, die bei niedrigen Temperaturen härtbar ist und die erforderlichen elektrischen Eigenschaften für Perowskit-HJT-Tandemzellen aufweist. Die Unterarbeitspakete umfassten Evaluierung kommerzieller Pasten (4.1), Entwicklung einer Formulierung (4.2) sowie Tests auf HJT- und Perowskit-Zellen (4.3, 4.4). MS4.2-24, die Bereitstellung von drei verschiedenen Sample-Pasten, wurde erfolgreich umgesetzt.

3.6. Umwelt- und Gefährdungsanalyse (AP5)

MBG übermittelte seit Februar 2023 regelmäßig aktualisierte Listen potenzieller Präkursoren inklusive Sicherheitsdatenblättern an das IKTS. Gemeinsam mit MBG und HZB wurden die typischen Prozessschritte der Tandemzellherstellung analysiert und relevante Spezifikationen sowie Anforderungen ausgetauscht. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse wurden kontinuierlich in die laufende Gefahrstoffbetrachtung integriert, insbesondere im Hinblick auf die neu eingeführten Hybridprozessschritte. Unter Leitung von IKTS wurden die Umwelt- und Sicherheitsaspekte der eingesetzten Chemikalien analysiert sowie Recyclingpotenziale untersucht. Dies umfasste die Gefahrstoffbetrachtung (5.1) und die Evaluation der Recyclingmöglichkeiten (5.2). Die Arbeiten lieferten wichtige Grundlagen für die spätere industrielle Umsetzung und zeigten Möglichkeiten für eine ökologische Optimierung der Prozesse auf.

3.7. Zusammenarbeit der Partner

Die Partner koordinierten ihre Arbeit eng über regelmäßige Meetings, Probenversand und Kreuzprozessierungen. HZB war primär für die Laborentwicklung und Prozessentwicklung der Topzellen zuständig, MBG für die Pilotlinie und die industrielle Anwendungsnähe, IAP für die Simulation und Charakterisierung, sowie IKTS für die Pastenentwicklung und Umweltanalysen. Alle Partner tauschten Daten und Zwischenergebnisse systematisch aus, um die Arbeitspakete aufeinander abzustimmen und die geplanten Meilensteine termingerecht zu erreichen.

3.8. Einfluss externer Faktoren auf den Projektablauf

Von September 2024 bis Mai 2025 war bei MBG Kurzarbeit angeordnet, wodurch die personellen Kapazitäten reduziert waren und einzelne Teilaufgaben verzögert durchgeführt werden mussten. Am 3.6.2025 wurde ein Insolvenzantrag für MBG gestellt, der am 1.9.2025 eröffnet wurde. Infolge dieser Ereignisse mussten alle Arbeiten eingestellt werden, und der Schlussbericht wird infolge eines Teilwiderufs vorzeitig eingereicht. Trotz dieser Einschränkungen konnte die Projektplanung in den meisten Bereichen wie vorgesehen dokumentiert werden, um eine solide Basis für mögliche Fortführungen durch Investoren oder Partner zu schaffen.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Die Entwicklung eines kosteneffizienten Herstellungsprozesses für Perowskit-Silizium-Tandemsolarzellen im industriellen Maßstab ist weltweit bislang noch nicht erfolgreich erfolgt. Das Konsortium hat daher das Ziel verfolgt, einen solchen Prozess auf Basis der etablierten Silizium-Heterojunction-(SHJ)-Solarzellen von Meyer Burger zu entwickeln, die eine ideale Plattform für die Integration einer zweiten Absorberschicht darstellen. Die Ausgangsbasis erschien vielversprechend: Im Labormaßstab wurden bereits Perowskit-Silizium-Tandemzellen hergestellt, die die Effizienz einer IBC-Siliziumeinzelzelle von 26,6 % deutlich übertreffen.

In den vergangenen Jahren wurden zahlreiche Laborergebnisse veröffentlicht, die die Machbarkeit und das Potenzial von Perowskit-Tandemzellen demonstrieren. So erzielte die EPFL/CSEM-Gruppe 2022 eine 1 cm² kleine Tandemzelle mit hybridem Prozess auf texturierter Vorderseite mit 31,25 % Wirkungsgrad. Auch das HZB erreichte in Spin-Coating-Prozessen auf kleineren SHJ-Bottomzellen Wirkungsgrade von bis zu 29,8 %. In allen Fällen handelt es sich um Labormethoden, die häufig auf Lösungen oder Spin-Coating beruhen, wodurch die Skalierbarkeit auf Industriegrößen stark eingeschränkt ist.

Eine zentrale Herausforderung ist die Übertragung dieser Prozesse auf industrielle Substratformate. Spin-Coating, die im Labor dominierende Methode zur Abscheidung von Perowskit-Topzellen, ist nicht direkt skalierbar. Alternative industrielle Methoden, wie Tintenstrahl- oder Slot-Die-Beschichtung sowie das Aufdampfen im Vakuum (Physical Vapor Deposition, PVD), sind dagegen potenziell industrietauglich. Insbesondere das Co-Verdampfen von PbI₂ und organischen Komponenten ermöglicht die Herstellung stabiler Perowskit-Absorber mit reproduzierbaren Eigenschaften, die auch auf texturierten SHJ-Substraten konform aufgebracht werden können. Hierbei konnten am HZB kürzlich auf 1 cm² großen Zellen Effizienzen von 28,4 % erzielt werden, während größere Flächen bisher noch geringe Wirkungsgrade aufweisen (z. B. 57,4 cm² Tandemzelle mit 22,6 %).

Die Verbesserung der Effizienz in Perowskit-Silizium-Tandemzellen wird insbesondere durch die Optimierung der Rückseitenkontakte und der TCO/Metall-Vorderseitenkontakte bestimmt.

Bisherige metallisierte Vorderseiten auf Perowskit-Zellen weisen Leitungswiderstände von $60 \text{ m}\Omega \text{ cm}^2$ auf, deutlich höher als bei klassischen HJT-Zellen ($<10 \text{ m}\Omega \text{ cm}^2$), was die Effizienz auf großen Flächen limitiert. Dies zeigt, dass neben der Abscheidung des Perowskits auch die Anpassung der Metallisierungstechnologien für eine industrielle Umsetzung entscheidend ist.

Zusammenfassend zeigt der Stand der Technik: Während auf kleiner Fläche bereits sehr hohe Wirkungsgrade erreicht wurden, ist die Herstellung großflächiger, industrierelevanter Perowskit-Silizium-Tandemzellen mit texturierter Vorderseite und hoher Reproduzierbarkeit bislang nicht realisiert. Die Entwicklung eines skalierbaren, industrietauglichen Vakuumprozesses zur Co-Verdampfung von Perowskit-Absorbern auf HJT-Bottomzellen stellt daher die wesentliche wissenschaftlich-technische Ausgangsbasis für das Teilvorhaben TANTRUM dar.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Zusammenarbeit innerhalb des TANTRUM-Verbundprojekts zeichnete sich durch eine intensive und koordinierte Abstimmung zwischen den Partnern aus, die über die formale Zuordnung der Arbeitspakete hinausging. Die Projektpartner MBG, HZB, IKTS und IAP brachten jeweils komplementäres Know-how ein: MBG mit Expertise in Heterojunction-Industrieprozessen und Maschinenbau, HZB mit wissenschaftlicher Forschungserfahrung in Perowskit-Tandemzellen, IKTS in Materialentwicklung und Siebdruckpasten sowie IAP in Simulation und Charakterisierung. Neben der internen Abstimmung war die Kooperation auf mehreren Ebenen organisiert. Gemeinsame Projekttreffen, halbjährlich und bei Bedarf ergänzt durch Arbeitstreffen, dienten dem Austausch von Zwischenergebnissen, der Diskussion technischer Probleme und der Planung der nächsten Schritte. Besonders wichtig war der koordinierte Probentransfer zwischen den Partnerlaboren, da Perowskit-Schichten äußerst empfindlich gegenüber Luft, Feuchte, Licht und Temperatur sind. Dafür wurden speziell inert verpackte Transportboxen entwickelt und ein sicherer Versand der Wafer organisiert.

Im Projektverlauf wurde insbesondere das Institut für Photovoltaik (IPV) der Universität Stuttgart als externer Partner einbezogen. Diese Zusammenarbeit entstand primär aus dem Bedarf heraus, bestimmte perowskitspezifische Fragestellungen mit hoher messtechnischer Präzision zu adressieren. Dazu gehörten u. a. Analysen zu Schichtgleichmäßigkeiten, optoelektronischen Eigenschaften und strukturellen Merkmalen von Testabscheidungen, die im Rahmen der frühen Prozessentwicklung notwendig waren. Das IPV verfügt über etablierte Expertise und Infrastruktur im Bereich Dünnschichtcharakterisierung und Perowskit-Materialstudien, sodass die dortigen Serviceleistungen eine wichtige Ergänzung für die Arbeiten im Teilvorhaben darstellten. Die Kooperation mit dem IPV war organisatorisch als Fremdleistung (SUV) eingebunden, was sich auch im zahlenmäßigen Nachweis des Projekts widerspiegelt. Die beauftragten Leistungen wurden im Projektverlauf vollständig erbracht und flossen direkt in die Bewertung von Material- und Prozessrouten ein. Damit trug das IPV insbesondere zur methodischen Absicherung der frühen Entwicklungsarbeiten bei – zu einem Zeitpunkt, an dem MBG aufgrund der fehlenden

Demonstratoranlage noch nicht selbstständig auf industriennahe Abscheideergebnisse zugreifen konnte.

Darüber hinaus bestand ein kontinuierlicher wissenschaftlicher Austausch mit externen Forschungseinrichtungen (CSEM, EPFL, ISE), um die entwickelten Prozesse an den Stand der Technik anzubinden. Dieser Austausch ermöglichte eine frühzeitige Validierung von Prozessideen und eine Orientierung an industriell relevanten Zielgrößen.

Trotz der Einschränkungen durch Kurzarbeit und die Insolvenzeröffnung von MBG konnte durch diese kooperative Struktur ein hohes Maß an Transparenz und Dokumentation gewährleistet werden. Die Partner konnten ihre jeweiligen Arbeitspakete effizient abstimmen und erarbeiteten ein belastbares Fundament, das im Falle einer Fortführung des Projekts durch Investoren oder andere Partner sofort nutzbar wäre.

Die Zusammenarbeit war somit nicht nur auf die Erreichung der definierten Projektziele ausgerichtet, sondern auch auf die Schaffung nachhaltiger wissenschaftlicher und industrieller Netzwerke, die über den Projektzeitraum hinaus fortbestehen könnten.

6. Erzielte Ergebnisse mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Das Teilvorhaben TANTRUM verfolgte die ambitionierten Ziele, die industrielle Übertragbarkeit von Perowskit-Silizium-Tandemsolarzellen zu demonstrieren und dafür sowohl Prozessentwicklung als auch Pilotlinie und begleitende Charakterisierungsmethoden aufzubauen. Die Projektplanung sah vor, die Arbeiten strukturiert über fünf Arbeitspakete (AP1–AP5) umzusetzen. Im Folgenden wird die Umsetzung der Ziele detailliert in Bezug auf die einzelnen Arbeitspakete beschrieben.

6.1. AP1 – Entwicklung eines Demonstrator-Tools für die Perowskit-Topzelle

Ziel von AP1 war die Erstellung eines Demonstrator-Verdampfertools inklusive Peripherie für die Herstellung der Perowskit-Topzelle auf HJT-Bottomzellen. Hierbei sollten zunächst Prozessspezifikationen erarbeitet und überprüft, anschließend die Anlagendetailspezifikation erstellt und das Equipment optimiert werden.

Aufgrund der Insolvenz von MBG konnte der Aufbau der Demonstratoranlage nicht abgeschlossen werden, dennoch wurden die Arbeitspakete 1.1 und 1.2 (Erarbeitung und Überprüfung der Prozessspezifikation) erfolgreich bearbeitet. Die Analyse der Prozessparameter und Materialanforderungen wurde in enger Abstimmung mit HZB und IKTS durchgeführt, sodass ein validierter und dokumentierter Entwurf für die Verdampferanlage vorliegt. Parallel dazu wurden Vorbereitungen für den Prozesstransfer (AP1.4) getroffen, die jedoch infolge der Insolvenzsituation am 1.9.2025 eingestellt werden mussten.

Status der Meilensteine:

- MS1 (Design Freeze, PM12) – Ziel teilweise erreicht: Prozessspezifikation finalisiert, Detaildesign dokumentiert, Aufbau des Tools nicht umgesetzt.
- MS2.4.4-12 (Überprüfung Spezifikation) – Ziel erreicht.

Der nach aktuellem Wissensstand seitens MBG erstellte Prozessablauf und die vorläufige Prozessspezifikation, sowie die vorläufige Anlagendetailspezifikation wurde auf Grundlage der bereits am HZB gewonnenen Erkenntnisse nach aktuellem Stand geprüft und MBG vom HZB vorgestellt (MS2.4.4-12). Zusätzlich wird der aktuelle Stand der Technik akribisch verfolgt u.a. auch durch den Besuch wissenschaftlicher Konferenzen und Fachvorträgen (EU PVSEC 23.-27.9.24 & PSCO incl. Industry Workshop 16.-19.9.24), um Anpassungen am Prozessfluss (Siehe Abbildung 2), sowie der Prozess- und Anlagenspezifikation vornehmen zu können.

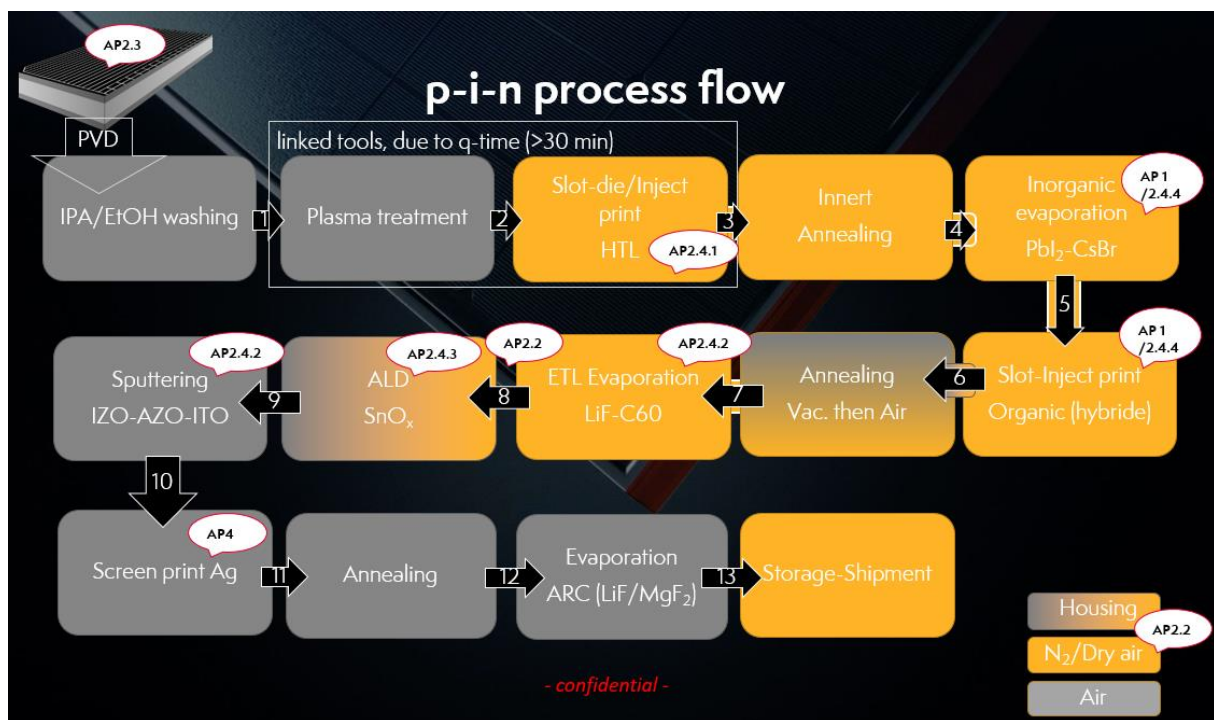


Abbildung 2: aktualisierter Prozessfluss zur Herstellung der Perowskit-Teilzelle auf einer MB-Si-HJT-Teilzelle, incl. zugehöriger Arbeitspakete denen die fortlaufenden Optimierungen zuzuordnen sind

6.2. AP2 – Entwicklung der Prozesse für die Perowskit-Solarzelle

AP2 konzentrierte sich auf die Einzelprozesse der Topzelle sowie deren Integration auf HJT-Bottomzellen.

- **AP2.1 – Prozessentwicklung:** Die Entwicklung der Loch- (HTL) und Elektronen-Transfer-Schichten (ETL) sowie der TCO wurde abgeschlossen. Für die Pufferschicht (ALD SnO₂, AP2.4.3) wurden am IAP stabile und homogene Schichten etabliert.
- **AP2.2 – Vorbereitung Kreuzprozessierung:** Die organisatorischen Voraussetzungen für Probentransfer zwischen den Partnern wurden umgesetzt, einschließlich inert verpackter Transportboxen und Logistikabläufe.

- **AP2.3 – Anpassung der HJT-Bottomzelle:** Optimierungen der Bottomzelle zur Integration des Tandem-Toplayers wurden durchgeführt; Messungen zur Schichtdicke und optischen Eigenschaften erfolgten erfolgreich.
- **AP2.4 – Einzelprozessentwicklung:** Ko-Verdampfung von Perowskit-Absorbern, HTL, ETL und TCO auf Laborwafern durchgeführt; Wirkungsgrade auf 4 cm²-Zellen konnten bis 29 % nachgewiesen werden (MS2.1-36).

Im AP 2.3 und AP2.4 wurde der Zusammenhang zwischen Textur der unteren Si-Teilzelle und Herstellung des Perowskit-Absorbers festgestellt. So zeigt sich das die Herstellung der Perowskit-schichten auf die verwendete Textur angepasst werden muss. Änderungen in der Pyramidengröße und der Anzahl der Pyramiden müssen bei der Herstellung der verdampften anorganischen PbI₂/CsBr-Schichten beachtet werden, da dies signifikanten Einfluss auf Struktur und Schichtdicke dieser Schichten hat. Ändert sich die Schichtdicke bzw. Struktur der verdampften Schichten, so muss wiederum der folgende Inkjet-Prozess darauf angepasst werden. Die Arbeiten in AP 2.3 wurden dadurch verlangsamt, dass die im Projekt hergestellten Tandemzellen durch die Perowskit-Teilzelle begrenzt sind (vgl. Abbildung 3). Details dazu sind im Bericht des HZB zu finden. Wie beispielhaft anhand folgender EQE-Messungen ersichtlich, war die Funktionalität und Performance der HJT-Si-Teilzellen die MBG dem HZB zur Verfügung stellt reproduzierbar gut.

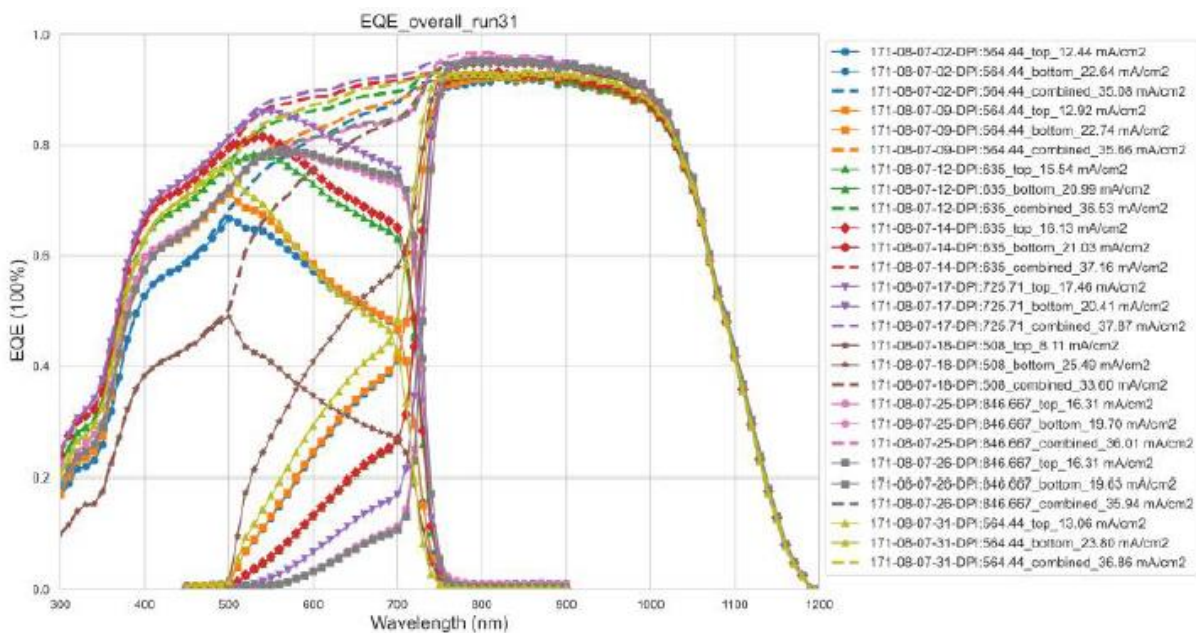


Abbildung 3: beispielhafte EQE Messungen der Tandems hergestellt am HZB, limitiert durch die obere Teilzelle, hierbei wurden die im August 2024 versendeten MB-Si-HJT-Teilzellen verwendet

Die Übertragung des Gesamtprozesses auf die Pilotlinie von MBG (AP2.5) konnte aufgrund der Insolvenzeröffnung nur teilweise vorbereitet werden, ein vollständiger Transfer wurde nicht realisiert. Ebenso wurde das Ziel, stabile 450 W-Module herzustellen (AP2.6), nicht erreicht.

Status der Meilensteine:

- MS2 (Wirkungsgrad 27 %, volles Waferformat) – Ziel teilweise bzw. noch nicht erreicht: Laborwerte vom HZB bisher nur auf kleiner Fläche demonstriert, Pilotlinientransfer konnte nicht abgeschlossen werden.
- MS2.1-36 (Wirkungsgrad 29 % auf 4 cm²) – Ziel erreicht.
- MS2.3-24, MS2.4.1-24, MS2.4.2-24, MS2.4.3-21, MS2.4.4-24 – Teilweise erreicht; Prozessparameter dokumentiert und optimiert.
- MS2.5-33, MS2.6-36 – nicht erreicht aufgrund Insolvenz.

Eine ausführliche Berichterstattung zu diesem AP wird mit dem Schlussbericht des Partner HZB erfolgen, der die AP-Leitung für AP2 innehat.

6.3. AP3 – Charakterisierung und Simulation

Ziel war es, Messmethoden für die Inline-Prozesskontrolle zu entwickeln, Einzel- und Gesamtzellen zu charakterisieren und kalibrierte Simulationsmodelle zu erstellen.

- AP3.1 – Einzelschichten: Charakterisierungsmethoden für HTL, ETL, Pufferschicht und Absorber wurden etabliert.
- AP3.2 – Gesamtzelle: Zellen aus HZB-Referenzlinien wurden analysiert; Pilotwafer von MBG vorbereitet, aber Produktionslinien konnten nicht vollständig genutzt werden.
- AP3.3 – Kalibriertes Simulationsmodell: Modell zur Verlustanalyse entwickelt, Basis für zukünftige Prozessoptimierung vorhanden (MS3.3-36).

Ergebnisse: Ziel für MS3.1-12 erreicht; MS3.3-36 erfolgreich erstellt.

Eine ausführliche Berichterstattung zu diesem AP wird mit dem Schlussbericht des Partner IAP erfolgen, der die AP-Leitung für AP3 innehat.

6.4. AP4 – Entwicklung und Test einer Ultraniedertemperatur-Siebdruck-Silberpaste

IKTS konnte die kommerziellen Pasten bewerten und drei eigene Prototypen entwickeln (MS4.2-24). Tests auf HJT-Zellen und auf Labor-Perowskizellen erfolgten, jedoch konnten industrielle Testläufe auf MBG-Pilotlinien nicht abgeschlossen werden. Eine ausführliche Berichterstattung zu AP4 wird mit dem Schlussbericht des Partner IKTS erfolgen.

6.5. AP5 – Umwelt- und Gefährdungsanalyse

Die Bewertung der Gefährdungspotentiale der eingesetzten Chemikalien und die ersten Untersuchungen zu Recyclingoptionen wurden durchgeführt. Ergebnisse liegen als interne Berichte vor, eine abschließende Evaluation und Umsetzung in die Pilotlinie konnte aufgrund der Insolvenzsituation nicht erfolgen (MS5.1 planmäßig). Die umfassende Liste mit möglichen in Frage kommenden Präkursoren insbesondere für die Herstellung der Perowskischicht, wurde im Berichtszeitraum aktualisiert und an das IKTS für die Bewertung des Gefährdungspotenzials übermittelt.

Folgend die anhand des aktuellsten Prozessablaufes aktualisierte Übersicht:

- **Präkursoren für die Abscheidung des HTL (hole transport layer):**
 - aktuell i.d.R. SAM (self assembled monolayer) in der Regel aus der Lösung abgeschieden:
 - Me-4PACz in Ethanol (WET)
 - Me-2PACz (WET)
 - 2PACz (WET)
 - Br-2PACz (WET)
 - MeO-2PACz (WET)
 - PTAA (WET)
 - Spiro-MeOTAD
 - NiO_x (PVD) (Nickeltarget + O₂)
 - TaTM (Verdampfen)
- **Präkursoren Verdampfung:**
 - PbI₂
 - CsBr
- **nasschemische Behandlung der verdampften Schichten mit:**
 - FAI und FABr in Ethanol
 - Weitere noch zu spezifizierende Additive
- **Präkursoren für die Abscheidung des ETL (electron transporting layer)**
 - C60 (Verdampfung)
 - PCBM
- **Präkursoren für die Herstellung der Pufferschicht welche i.d.R. unter dem TCO (z.B. ITO) abgeschieden werden muss**
 - SnO_x (ALD) z.B. aus TDMASn (C₈H₂₄N₄Sn) und H₂O oder O₃

Eine ausführliche Berichterstattung zu diesem AP wird mit dem Schlussbericht des Partner IKTS erfolgen, der die AP-Leitung für AP5 innehat.

7. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Das Teilvorhaben war mit Gesamtkosten in Höhe von **2.541.230,13 €** budgetiert. Wegen projektinternen Einschränkungen – namentlich der Kurzarbeit bei MBG (September 2024 bis Mai 2025), der nicht erfolgten Errichtung des geplanten Demonstrators und der späteren Insolvenzanmeldung – wurden jedoch nur **995.924,12 €** tatsächlich ausgegeben und abgerechnet. Die nachfolgende Beschreibung legt die wichtigsten Kostenpositionen in Relation zu Planung und Ist-Abrechnung dar und ordnet die Gründe für Abweichungen ein.

Die größten geplanten Positionen und ihr tatsächlicher Abruf zeigen deutlich, dass der Projektfortschritt nicht die im Antrag vorgesehene Investitions- und Verbrauchsebene erreicht hat. Die **Personalaufwendungen** waren mit **1.740.515,66 €** die größte Planposition; hiervon wurden im Abrechnungsstand **800.205,04 €** verwendet, während **940.310,62 €** nicht abgerufen wurden. Diese Differenz ist maßgeblich durch die o.g. Kurzarbeit und die anschließenden Einschränkungen infolge des Insolvenzverfahrens bedingt:

Verfügbare Arbeitsstunden konnten zeitweise nicht erbracht bzw. nicht projektbezogen abgerechnet werden.

Bei den **Materialkosten** waren ursprünglich **426.650,00 €** vorgesehen; tatsächlich abgerechnet wurden lediglich **25.003,41 €**, sodass **401.646,59 €** der geplanten Materialmittel ungenutzt blieben. Diese Unterauslastung folgt direkt daraus, dass die Demonstrator-Anlage zur Co-Verdampfung nicht errichtet wurde und daher zahlreiche projektspezifische Komponenten, Verbrauchsmaterialien und Investitionsgüter nicht beschafft oder verbraucht werden konnten.

Die **Reisekosten** waren mit **15.000,00 €** budgetiert; im Abrechnungsstand wurden **7.845,16 €** realisiert. Die Reduktion erklärt sich durch eingeschränkte Reisemöglichkeiten und reduzierte Aktivitäten während der Kurzarbeitsphase sowie die Verringerung operativer Treffen im späteren Projektverlauf. Zudem wurden viele Abstimmungsmeetings der Einfachheit halber online durchgeführt.

Die Position **vorhabenspezifische Abschreibungen (AfA)** war mit **92.604,96 €** geplant; hiervon wurde **kein Betrag** in Anspruch genommen, da die dafür vorgesehenen Anlagen bzw. aktivierbaren Investitionen nicht angeschafft und aktiviert wurden.

Unter **Sonstige unmittelbare Vorleistungen (SUV)** waren insgesamt **266.459,51 €** budgetiert; abgerechnet wurden davon **162.870,51 €**. Ein wesentlicher Anteil dieser abgerechneten Fremdleistungen entfiel auf externe Servicearbeiten der Universität Stuttgart (IPV). Die IPV-Leistungen umfassten insbesondere Charakterisierungsmessungen, die Entwicklung/Prüfung von ALD-Pufferschichten sowie numerische Simulationen. Sie trugen damit maßgeblich zur wissenschaftlichen Auswertung und Validierung von Prozessschritten bei. Die verbleibenden **103.589,00 €** dieser Budgetposition waren unter anderem für Kalibrierzellen und -module geplant, welche entsprechend des Fortschrittsplans noch nicht abgerufen werden konnten.

In der Summe ergibt sich damit der tatsächliche Abrechnungsstand von **995.924,12 €** gegenüber den geplanten **2.541.230,13 €**. Die Projektförderung war mit **50 %** kalkuliert (Fördersumme 1.270.615,06 €). Bezogen auf die tatsächlich abgerechneten Kosten entspricht dies einer ausgezahlten Fördersumme von **497.962,06 €**; der nicht beanspruchte Förderanteil beträgt **772.653,00 €** (entsprechend der nicht realisierten Kosten).

8. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Unter besseren Rahmenbedingungen für eine deutsche Solarindustrie (für Hersteller von Solarzellen und -modulen) wurde erwartet, dass die Ergebnisse langfristig für Meyer Burger von hohem strategischen und operativen Wert sind. Trotz der schwierigen Umstände wurde nach Kräften versucht, das Projekt weiterhin zu stützen, um einerseits die Chance auf eine Fortsetzung unter neuen Rahmenbedingungen zu ermöglichen, aber auch um die Partner trotz eingeschränkter Handlungsfähigkeit bestmöglich zu unterstützen, dass sie ihre Ziele erfüllen können.

Durch die erläuterte Komplexität ergab sich die entsprechende Einstufung in die Gruppe forschungsintensiver Projekte. Die damit verbundenen Risiken, der notwendige Forschungs- und Entwicklungsaufwand sowie das verbleibende Entwicklungsrisiko machten dieses Vorhaben sehr wertvoll.

9. Voraussichtlicher Nutzen, insb. Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Durch die Eröffnung des Insolvenzverfahrens über die Meyer Burger (Germany) GmbH am 03.06.2025 und die daraus resultierende Einstellung der Projektarbeiten zum 01.09.2025 konnte das Vorhaben TANTRUM nicht planmäßig abgeschlossen werden. Aufgrund des vorzeitigen Endes des Teilvorhabens „Aufbau eines Demonstrators zur Co-Verdampfung von Perowskit-Absorbern“ ist eine konkrete Abschätzung der industriellen Verwertbarkeit der erzielten Ergebnisse derzeit nur eingeschränkt möglich. Grundsätzlich kann jedoch auf die im ursprünglichen Antrag beschriebenen allgemeinen Verwertungsoptionen verwiesen werden:

Dazu zählen die Nutzung der entwickelten Perowskit-Prozessparameter, Material- und Schichtspezifikationen sowie Erkenntnisse zur Kreuzprozessierung in industriellen Fertigungsprozessen, insbesondere im Bereich HJT-Bottomzellen. Diese Ergebnisse könnten bei einer Fortführung des Projekts durch Investoren oder andere Partner in kommerzielle Produktionsprozesse integriert werden.

Es besteht weiterhin die Möglichkeit einer partiellen Übernahme durch Investoren oder strategische Partner, wodurch eine selektive Nutzung der im Projekt generierten Ergebnisse realisiert werden könnte. Die vorhandene Forschungslandschaft am Standort, einschließlich des angesammelten Know-hows aus den TANTRUM-Fördermaßnahmen, weckt nach wie vor großes Interesse und bietet die Basis für zukünftige Entwicklungsaktivitäten. Insofern bleibt das Potenzial für die Verwertung der wissenschaftlich-technischen Ergebnisse bestehen, auch wenn eine vollständige Umsetzung der ursprünglich geplanten Demonstratoranlage und der industriellen Integration derzeit nicht möglich war.

10. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

International wurden in den letzten Jahren zahlreiche Entwicklungen im Bereich der Perowskit-Silizium-Tandemtechnologie vorangetrieben, insbesondere im Labormaßstab. Forschungsgruppen an EPFL und CSEM in der Schweiz demonstrierten Labor-Tandemzellen mit Wirkungsgraden von bis zu 31,25 % auf kleinen Flächen, wobei hybride Verfahren eingesetzt wurden, die das Aufdampfen anorganischer Komponenten mit nasschemischer Applikation organischer Schichten kombinieren. Oxford PV konnte im M6-Waferformat (166 × 166 cm²) einen zertifizierten Wirkungsgrad von 26,8 % erreichen, wobei die genaue Herstellung der Topzelle nicht publiziert ist.

Weitere Gruppen, z. B. Bush et al. (Stanford + ASU), legten durch die Einführung der invertierten p-i-n-Perowskit-Topzelle mit ALD-beschichtetem TCO-Kontakt die Grundlagen für viele nachfolgende Entwicklungen. Kamino et al. und CSEM demonstrierten eine Skalierung auf größere Flächen (bis 57,4 cm²) unter Verwendung von Siebdruckmetallisierung, mit Wirkungsgraden von 22,6–28 %. Übersichtsarbeiten, u. a. von Vaynzof et al., zeigen, dass die überwiegende Zahl der Perowskit-Zellen weiterhin durch Spin Coating hergestellt wird. Co-verdampfte Topzellen auf größeren, industrierelevanten Flächen bleiben bislang selten, stellen aber einen wichtigen Entwicklungsbedarf dar.

Die Analyse der internationalen Aktivitäten verdeutlicht, dass insbesondere die industrielle Skalierung, die konforme Abscheidung auf texturierten Silizium-Bottomzellen sowie die Stabilität der Prozesse weiterhin große Herausforderungen darstellen. Damit liefert die externe Forschung wichtige Benchmarks und Orientierungspunkte für die Arbeit des TANTRUM-Konsortiums, welches die Übertragung dieser labortechnisch erzielten Wirkungsgrade auf größere, industriennahe Formate anstrebt.

11. Veröffentlichungen der Ergebnisse

Im Rahmen des Projektes TANTRUM wurden die Ergebnisse bislang vor allem in Form von Pressemitteilungen und Vorträgen auf Fachkonferenzen kommuniziert. Eine systematische Publikation wissenschaftlichen Zeitschriften, die explizit die Ergebnisse des Projektes TANTRUM dokumentieren, liegt zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Schlussberichts noch nicht vor.

Die Projektpartner haben jedoch die Fortschritte und den Stand der Arbeiten kontinuierlich in der Fachöffentlichkeit kommuniziert. So berichteten unter anderem *pv-magazine*, *iwr.de* und *solarserver.de* über die Kooperation von Meyer Burger (MBG) mit den Forschungspartnern HZB, CSEM und Fraunhofer-Instituten. Diese Artikel berichten u.a. über die Entwicklung von industrietauglichen Prozessketten und die angestrebten Wirkungsgrade von Tandemzellen, und geben damit einen öffentlich zugänglichen Überblick über die Projektaktivitäten. Darüber hinaus wurden Ergebnisse des Projektes im Rahmen von Vorträgen auf Fachkonferenzen und Workshops (z.B. TandemPV, FNEE-Jahresversammlung 2024) präsentiert.

Die wissenschaftlich-technischen Ergebnisse aus den Messungen, der Entwicklung von Perowskit-Absorbern, der TCO- und HTL/ETL-Prozessierung sowie Ergebnisse von Simulationen werden sicherlich durch die Partner weitergeführt und bilden eine solide Grundlage für künftige Publikationen. Sollte das Projekt durch die verbliebenen Partner weitergeführt werden, sind weitere Veröffentlichungen möglich. Zudem wird dieser Abschlussbericht in der TIB Hannover öffentlich zugänglich sein.