

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Schlussbericht

Verbundprojekt:

„Utility4Indium: Entwicklung eines Utility-Modules mit deutlich verbesserter LCOE und Nachweis der Bankability“

Teilvorhaben:

„Entwicklung eines hocheffizienten, kostengünstigen Utility-Moduls“

Kennzeichen:	03EE1127A
Geplante Projektlaufzeit:	01.05.2022 bis 30.04.2025
Verlängerung:	bis 31.12.2025
Tatsächliche Projektlaufzeit:	01.05.2022 – 02.06.2025
Förderschwerpunkt:	Photovoltaik

von Meyer Burger (Germany) GmbH

Verbundpartner, neben Verbundkoordinator:

Fraunhofer ISE

Centroplan GmbH

Koenen GmbH

Meyer Burger Technology AG (Schweiz) (assoziiert)

Borealis Polyolefine GmbH (Österreich) (assoziiert)

Inhaltsverzeichnis

1. Aufgabenstellung	3
2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	3
3. Planung und Ablauf des Vorhabens.....	4
4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde.....	6
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	12
6. Erzielte Ergebnisse mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	12
Zusammenfassung zu den Meilensteinen.....	15
7. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	16
8. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	16
9. Voraussichtlicher Nutzen, insb. Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans.....	17
10. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	18
11. Veröffentlichungen der Ergebnisse	18

1. Aufgabenstellung

Das übergeordnete Gesamtziel des Projektes ist die Entwicklung eines kosteneffizienten, langlebigen und hochleistungsfähigen Moduls für Großkraftwerksanwendungen auf Basis der vorhandenen HJT/SWCT-Technologie. Mit Hilfe des Projektes werden somit die Grundlagen geschaffen, dass Module der nächsten Generation für einen solchen Anwendungszweck durch die Firma Meyer Burger wieder in Deutschland und Europa gefertigt werden könnten.

Im Teilvorhaben „Entwicklung eines hocheffizienten, kostengünstigen Utility-Moduls“ des öffentlich geförderten Forschungsvorhabens „Utility4Indium“ liegt der Fokus auf der evolutionären Weiterentwicklung der HJT-Zelltechnologie und deren industriell anwendbaren Charakterisierungsmethoden unter Berücksichtigung der Weiterverarbeitung dieser im Großkraftwerkssolarmodul bzw. einem integrativen Entwicklungsansatzes, der bestmögliche Modulwirkungsgrade und Zuverlässigkeit bei minimalen Kosten garantiert.

Neben dem Schwerpunkt auf Kostensenkung und Leistungssteigerung werden auch gezielt Grundlagenuntersuchungen zur Erhöhung der Bifazialität für potentielle Agri-PV-Anwendungen sowie zur Verlegung der Frontkontaktstruktur auf die Rückseite der Zelle (IBC-Ansatz) für höchste Moduleffizienz im Projekt verortet.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Vorhaben begann unter vielversprechenden Voraussetzungen im Mai 2022. Die Zusammenarbeit im Verbund war offen und konstruktiv. Es fanden während der gesamten Laufzeit regelmäßige Treffen persönlich sowie auch online statt. Zuarbeiten wurden, entsprechend der Absprachen, durchgeführt.

Im Verlaufe des Jahres 2023 spitzte sich aufgrund der massiven Überkapazitäten aus dem asiatischen Markt die zunehmend herausfordernde Lage für Produzenten von Solarzellen sowie –modulen zu und gipfelte schließlich im Januar 2024 in der Ankündigung seitens Meyer Burger die Modulproduktion in Deutschland, im sächsischen Freiberg, einzustellen.

Die schwierigen Rahmen- und Marktbedingung führten in 2024 dazu, dass eine umfassende Restrukturierung des Konzerns und damit einhergehend auch von MBG anvisiert wurde. Einhergehend mit der Planung der Restrukturierung wurde ein Großteil der Arbeitnehmer der MBG beginnend Ende September 2024 in Kurzarbeit geschickt.

Zusammenfassend stand das Vorhaben unter insgesamt herausfordernden organisatorischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen. Zu Beginn der Projektlaufzeit lagen stabile technische Voraussetzungen sowie ausreichend F&E-Ressourcen für die geplanten Arbeiten an den PECVD-Prozessen und den IBC-Zelltechnologien vor. Im weiteren Verlauf verschlechterte sich jedoch die wirtschaftliche Situation des Unternehmens erheblich, was zu Investitionsstopps und strikter Kostenkontrolle führte. Die Kurzarbeit reduzierte temporär die verfügbare

Personaldecke erheblich. Dies wirkte sich vor allem auf die Geschwindigkeit der experimentellen Arbeiten in AP 2, AP6 und AP 9 aus.

Trotz dieser Einschränkungen konnten die wesentlichen technologischen Entwicklungsarbeiten weitergeführt werden, da vor Projektbeginn die benötigten Basiskomponenten (PECVD NextGen-Plattform, Messtechnik, grundlegende Laborinfrastruktur) zumindest partiell bereits geplant waren.

Im Januar 2025 wurde ein Antrag auf Mittelumwidmung gestellt, da im Projekt personalaufwendige Umgehungslösungen zur Erreichung gewisser Projektziele erarbeitet wurden. Zusätzlich wurde bekanntgegeben, dass ein strategischer M&A-Prozess durchgeführt werden soll. Im März 2025 wurde aufgrund der Verzögerungen im Projekt eine kostenneutrale Verlängerung beantragt bis zum 31.12.2025. Die Verlängerung war mit den Partnern abgesprochen. Es bestand die Hoffnung, dass die eingeleiteten Maßnahmen im Konzern Meyer Burger greifen und die Projekte mit Verzögerung dennoch weitergeführt bzw. erfolgreich beendet werden können.

Trotz intensiver und langwieriger Verhandlungen konnte im M&A-Prozess bis dato keine Einigung mit Interessenten erzielt werden. Dies führte dazu, dass u.a. für MBG am 03.06.2025 die Eröffnung eines Insolvenzverfahrens beantragt wurde. Ein vorläufiger Insolvenzverwalter wurde eingesetzt. Ziel des vorläufigen Verwalters war es, dass Unternehmen während des gesamten vorläufigen Verfahrens fortzuführen. Indes wurden auch die wirtschaftliche Lage und die potentiellen Sanierungsoptionen geprüft. Mit dem 01.09.2025 wurde das Insolvenzverfahren offiziell eröffnet.

Folglich der Geschehnisse, der unsicheren Zukunftsprognosen und der gegebenen Regularien wird MBG nun alle laufenden Förderprojekte in Form von Teilwiderrufen einstellen, unabhängig von der geplanten Laufzeit. Es werden Schlussberichte zum aktuellen Stand zusammengefasst. Utility4Indium muss seitens MBG etwa sieben Monate vor dem neu anvisierten Laufzeitende abschließen.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Gesamtplanung orientierte sich an den definierten Arbeitspaketen (AP 1–AP 9), wobei der Schwerpunkt für MBG besonders, entsprechend auch der ursprünglichen Personalplanung, auf nachfolgenden Punkten lag.

- AP 2 – Kostensenkung und Wirkungsgradsteigerung auf Zellebene und
- AP 9 – Machbarkeit IBC-Zelle/Modul.

Ergebnisse aller APs werden unter Abschnitte 6 dieses Berichtes behandelt.

AP1 – Projektmanagement:

Es wurden kontinuierlich monatliche Abstimmungen im Partnerkonsortium durchgeführt. Formelle Projekttreffen und auch Arbeitstreffen fanden regulär bzw. regelmäßig statt.

AP 2 – PECVD-Entwicklung auf der NextGen-Plattform:

Der Ablauf gliederte sich in mehrere Entwicklungsstufen:

1. Inbetriebnahme der NextGen-Anlage (Ende 2023) und Start der Prozessentwicklung (Q1/2024).
2. Erste Funktions- und Lebensdauertests, um die a-Si-Passivierung sowie Homogenität in den Stackreaktoren zu validieren.
3. Optimierung der Temperaturführung, inklusive Hardwareanpassungen am Heizungssystem.
4. Erste produktionsnahe Versuche (1000-Wafer-Test) zur Evaluierung von Durchsatz, Stabilität und Einfahreffekten.
5. Einzelschicht- und Hardwaretests zur Optimierung der Taktzeiten und Homogenität.
6. Weiterentwicklung der mikrokristallinen n-Schichten, die signifikante Effizienzgewinne zeigten.

AP 9 – IBC-Zelle/Modul:

Da Inline-Tools für IBC-Messungen am Standort zum Teil nicht geeignet sind, wurde eine separate Laboranlage beschafft, installiert und erfolgreich in Betrieb genommen. Messsysteme (Xenon- und LED-Beleuchtung, Spektralanpassung, Homogenitätsnachweise) erfüllen die IEC-Anforderungen. Der eigentliche Prozesstransfer in die Pilotlinie ist aufgrund von Personalmangel und fehlender Automatisierung noch nicht abgeschlossen.

Der Projektablauf entsprach im Wesentlichen der ursprünglichen Planung, wurde aber im letzten Drittel durch die wirtschaftliche Unternehmenslage verlangsamt, sodass eine Verlängerung der Projektlaufzeit notwendig erschien. Dies konnte aufgrund der Insolvenz jedoch nicht ausgenutzt werden.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Der Stand von Wissenschaft und Technik, an welchen angeknüpft wurde, ist auch der GVB zu entnehmen. Im Bereich der Zelltechnologie bestehen die Lösungsansätze darin, die Effizienz weiter zu steigern, die Kosten zu reduzieren und damit die LCOE signifikant zu senken. Darüber hinaus müssen die Halbleiterschichten und die Metallisierung für die weitere Modulintegration adaptiert werden, um die optische Ausbeute im Modul zu erhöhen und die Fähigkeit zur Kontaktierung mit SWCT zu sichern. Ein wesentlicher Schritt zur Marktreife besteht in der Entwicklung und Demonstration stabiler Prozesse mit hohem Durchsatz auf großen Wafer-Formaten. Nachfolgend ist der Forschungs- und Entwicklungsbedarf näher erläutert.

Silizium-Wafer:

Durch die hohen Passivierqualitäten der a-Si-Schicht spielt das Wafer-Material eine herausragende Rolle beim Erreichen hoher Wirkungsgrade. Um dem gerecht zu werden, wird n-type-Material eingesetzt. Dieser allgemeine Trend ist auch in der ITRPV (Abbildung 1) zu sehen. Es ist zu erwarten, dass hier verbesserte Materialien auf den Markt kommen, die es zu analysieren gilt. Zudem müssen alle Prozesse auch flexibel auf den Trend zu größeren Wafern reagieren können. Bekanntermaßen treten hier oft Problemstellungen in der Homogenität auf. Im Projekt sind Machbarkeitsstudien zu M10 und ggf. G12 vorgesehen. Die dritte Variable, die zu untersuchen ist, ist die Waferdicke. Hierzu müssen ggf. Maschinenmodifikationen unternommen werden, um dünne Wafer insbesondere bei großen Formaten zu handhaben. Ergänzend müssen auch noch Pre-Treatmentverfahren getestet werden, um darüber die Waferqualität verbessern zu können.

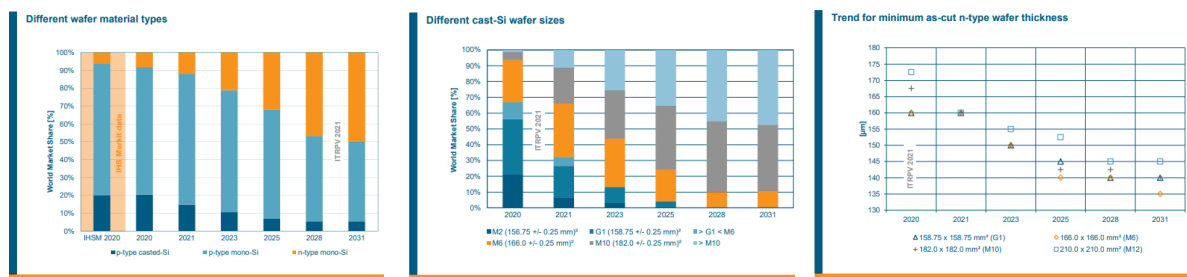


Abbildung 1: Wafer-Trends nach ITRPV2020

Insgesamt ist der Punkt der Flexibilität enorm wichtig, da der niedrigste Waferpreis ct/W immer über den zukünftigen Mainstream zu erzielen ist, Stichwort: Economy of Scale.

Nasschemie:

Die nasschemischen Prozesse dienen einerseits der Oberflächenstrukturierung für verbesserte (minimierte) Reflexion und andererseits der Oberflächenkonditionierung für die nachfolgende a-Si-Abscheidung. Hier sollen neue Additive-Prozesse mit verbesserten Texturierungseigenschaften entwickelt werden. Zudem bieten neue Clean-Sequenzen und alternative Chemikalien dafür immer neues Kostensenkungspotential.

PECVD:

Hier liegt der größte Hebel zu Wirkungsgradsteigerung. Gerade die Wechselwirkung zwischen den verschiedenen a-Si-Layern macht es unumgänglich hier mit umfangreichen Experimentmatrizen zu arbeiten, um die lokalen Optima zu detektieren, auch in Kombination mit dem TCO. Schwerpunkt der Arbeit ist hier, neue Layer-Eigenschaften sowohl über Prozesseinstellungen als auch durch Zugabe neuer Prozessgase herauszuarbeiten. Zudem müssen alle Prozessoptimierungen auch auf die neue Next-Generation-PECVD transferiert werden.

TCO:

Diese multifunktionale Schicht muss einerseits Transparent als auch hoch leitfähig sein. Aktuell wird dies mit ITO (Indium-Zinn-Oxid) realisiert. Indium ist jedoch knapp und teuer. Deswegen werden im Projekt Materialien zur Substitution gesucht. Ggf. kann eine Kostenersparnis aber auch mit Stapellayern erreicht werden (siehe auch Abschnitt zu multifunktionalen Schichten).

Metallisierung:

In den letzten zwei Jahrzehnten wurden sowohl im Bereich des Produktionsdurchsatzes als auch bei der Reduzierung der vorderseitigen Elektrodenbreite zur weiteren Steigerung der Solarzelleneffizienz enorme Fortschritte erzielt. Seit 2005 wurden zahlreiche Arbeiten veröffentlicht, in denen es gelang die durchschnittliche Elektrodenbreite auf der Vorderseite von Si-Solarzellen von 120µm auf bis zu 26µm zu reduzieren. Abbildung 2 zeigt den historischen Verlauf dieser Erfolgsgeschichte, welche zum einen auf fortschreitender Anlagen- und Prozessoptimierung, aber auch zu erheblichem Maße auf Silberpasten- und Siebentwicklungen basiert sowie den Ausblick auf die nächsten Jahre.

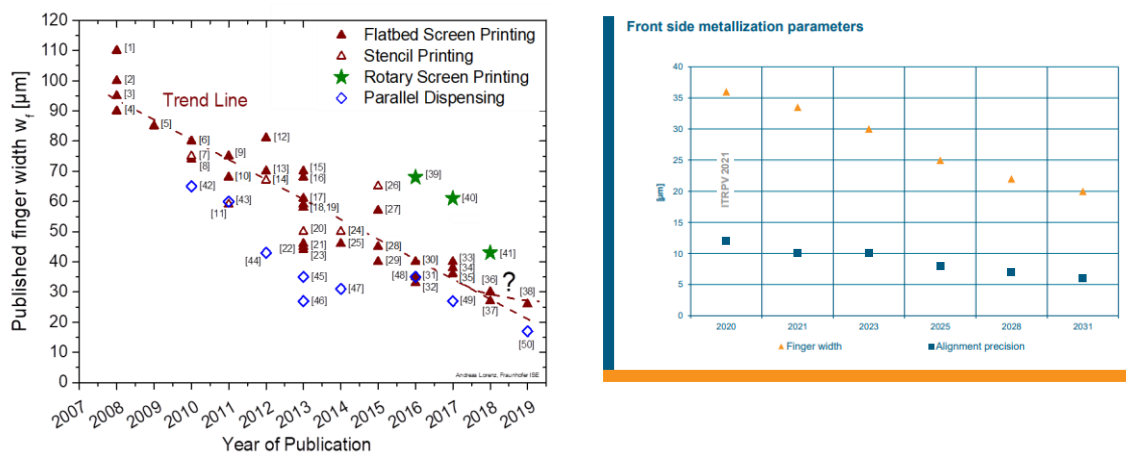


Abbildung 2: Historie von Kontaktfingerbreiten für die Vorderseitenmetallisierung von Si-Solarzellen (aus Projekt FINALE) sowie der Ausblick gemäß ITRPV2020.

Im Rahmen dieses Projektes soll sich in enger Zusammenarbeit mit dem Partner KOENEN auf die Optimierung des Siebdruck-Prozesses für feinste Linienstrukturen in Verbindung mit der Verwendung von Niedertemperaturpasten für HJT-Solarzellen bei gleichzeitig hohem Durchsatz und höchster Siebstandzeit fokussiert werden. Die erforschten Siebparameter werden final in der Produktionsumgebung von Meyer Burger getestet.

Zudem muss der Markt proaktiv gescannt werden, um neue Silberpasten oder im besten Fall sogar silberfreie Materialien zu eruieren. Der Entwicklungszyklus pro Hersteller für Pasten ist ca. 1 Jahr, so dass im Projekt pro Jahr ebenfalls ein Untersuchungszyklus mit mindestens 3 Pasten geplant ist. Alle vielversprechenden Pasten gehen danach bis zur Reliability-Untersuchung in Testmodulen, um sicherzustellen, dass eine Zertifizierung in Kombination mit SWCT erreicht werden kann.

Light Soaking:

Immer mehr Untersuchungen werfen die Frage auf, ob eine zusätzliche „Lichttränkung“ (engl. Light Soaking) dazu beitragen kann, den Wirkungsgrad der HJT-Zelle und des Moduls zu verbessern, ob der Effekt über die Zeit stabil ist und welche physikalischen Mechanismen dahinterstehen. Tieferegehende Betrachtungen hierzu finden sich in der TVB.

Der im Rahmen der HJT-Fertigung bislang angewandte Prozess kombiniert höhere Beleuchtungsintensitäten mit einer Temperaturbehandlung, die für HJT für einige Sekunden angewendet werden. Im bisherigen Erklärungsmodell wird basierend auf der hohen Beleuchtungsintensität erwartet, dass ein "inverser" SWE (Staebler-Wronski-Effekt) die Position der Energieniveaus verschiebt und in Kombination mit der Temperatur eine Wasserstoff-Umverteilung ermöglicht, die zu einer Sättigung der Grenzflächendefektzustände an der a-Si/c-Si-Grenzfläche innerhalb des TCO führt und den TCO/Metallkontakt verbessert. Der genaue Wirkmechanismus soll im Rahmen dieses Projektes sowohl an Zellen aus der Fertigung sowie an speziell hergestellten Teststrukturen weiter untersucht und verstanden werden.

Indizien deuten darauf hin, dass es ein thermisches Grenzbudget für die Zellen gibt. Aus diesem Grund müssen diese Untersuchungen auch immer in Wechselwirkung zur Lamination untersucht werden.

Multifunktionale Barrierschichten:

Im Rahmen des Projektes soll die Eignung unterschiedlicher Dünnschichtsysteme zur Verbesserung der Langzeitstabilität sowie zur Einsparung von Indium für die Ausbildung der TCO-Schicht der HJT Zelle evaluiert werden. Die Materialien und Depositionsmethoden sind hinsichtlich Barriere-Wirkung (z.B. Feuchtigkeit), Optik und Kompatibilität mit den vor- und nachgelagerten Prozessen zu untersuchen. Eine weitere Funktion solch transparenter Barrierschichten liegt in der Möglichkeit als Teil der Antireflexionsschicht zu fungieren. Dies soll die deutliche Reduzierung der ITO Schichtdicke ermöglichen und damit eine Einsparung von Indium. Die Untersuchung Indium-freier TCO zur kompletten Vermeidung von Indium ist ein weiteres Thema. Die zusätzliche Barriere-Schicht reduziert die Anforderungen an die Stabilität, welche oft als Herausforderung für die Integration von Indium-freien TCOs im industriellen Maßstab beobachtet wird.

Entwicklung Augmented-Intelligence-Methoden:

Augmented Intelligence erweitert und unterstützt die menschliche Intelligenz mithilfe von künstlicher Intelligenz. Die von Computern bereitgestellten Ergebnisse und Datenanalysen ermöglichen schnellere und präzisere menschliche Entscheidungen. Die künstliche Intelligenz wertet große Datenmengen aus und liefert dem Menschen Entscheidungsgrundlagen. Dazu muss einerseits das Human-Machine-Interface (HMI) dahingehend weiterentwickelt werden (Evaluierung von Ideen für neue grafische Anzeigen für intuitiveren Erkenntnisgewinn, z.B. Carrier in Nasschemie, Traymap CVD/PVD mit EL-Bildern). Des Weiteren müssen auch Daten aus dem vorhandenen Pool für jeweilige Prozessspezialisten selbst (ohne KI-Kenntnisse) intuitiv mit machine learning/ KI-basiert ausgewertet werden. Zu testende Ideen hierfür:

- Advanced Tracking Control: Entwicklung und Test von Konzepten für virtuelles Substrattracking in einer Zellfertigung (Korrelationen von Daten verschiedener Stellen innerhalb des Gesamtherstellungsprozesses)
- Verschleißvorhersage für Drucksiebe
- Auslastungsplanung
- Einbindung von technisch relevanten SAP-Daten wie z.B. Bestellchargennummern

Moduldesign und BOM-Entwicklung:

Die im Projekt betrachteten Zell- und Verschaltungstechnologien und deren Integration in geeignete Modulkonzepte wird fortlaufend mit FEM-Simulationen, Effizienz- und Ertragsanalysen sowie von praktischen Schnelltests zum Materialscreening begleitet. So werden modellbasiert optimale Design-Materialparameter für die unterschiedlichen Verschaltungslayouts entwickelt, beispielsweise mit dem Ziel die Spannungen auf Zellverbinder zu reduzieren und so eine hohe Beständigkeit sicherzustellen. Hierfür baut das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE auf fundierten Erfahrungen zur FEM-basierten Simulation von thermo-mechanischen Spannungen auf Kontakt- und Modulebene auf. Für die betrachteten Zell- und Verschaltungskonzepte werden die Auswirkungen auf die Modulleistung sowie auf zu erwartende Ertragsvorteile analysiert (z.B. auf Basis von CTM-Berechnungen) und unter Berücksichtigung von Produktions- und Materialkosten optimierte Moduldesigns überführt. Für die weitere Kostenoptimierung sollen beispielsweise rahmenlose Module betrachtet werden. Gleichzeitig ist die Glasdicke zu variieren, um die geforderte Steigerung der Modullebensdauer und Reduktion der Degradation sicher zu stellen.

Steigerung der Lebensdauer / Minderung der Degradation:

Solarmodule werden mit einer Leistungsgarantie >25 Jahre verkauft. Diese kann über sogenannte Durability-Tests innerhalb kurzer Zeit abgeprüft werden. Die HJT-Module zeigen ein abweichendes Verhalten gegenüber herkömmlichen PERC-Modulen. Einerseits kann das über das n-type-Wafermaterial erklärt werden, da es stabiler ist, andererseits durch das amorphe Silizium, da es eine höhere Empfindlichkeit gegenüber UV-Strahlung, Feuchtigkeit und Temperatur aufweist. Dies ist auch schon aus der Dünnschichttechnologie bekannt. Geeignete Stabilitätsmethoden können sowohl auf Zell- (Barrierelayer) als auch auf Modulebene (Einkapselung) gefunden werden. MB verspricht für seine Module, dass die Leistung nach 25

Jahren immer noch bei 92 Prozent liegt, bei Glas-Glas-Modulen sogar über 93 Prozent nach 30 Jahren. Für das Utility-Modul sind diese Werte unbedingt zu erreichen.

Bifazialität:

HJT-Solarzellen zeichnen sich aufgrund des symmetrischen Aufbaus und der Ag-Metallisierung auf der Rückseite bereits durch eine hohe Bifazialität aus. Bisher war die Bifazialität aber nicht Schwerpunkt der Optimierungen. Die Bifazialität der Solarzelle und des Modules (beispielsweise rückseitige AR-Beschichtung des Glases) soll weiter gesteigert werden. Der Mehrertrag von den bifazialen HJT-Modulen für Großkraftwerke soll in Simulationen und im Feld erprobt werden. Dabei sollen verschiedene Varianten verglichen werden (Süd-Ausrichtung, Ost/West-Ausrichtung, Tracker). Zudem soll die Machbarkeit eines vollsymmetrischen Ost-/West-Moduls für Agri-PV-Anwendungen untersucht werden.

Bankability:

Ergänzend zu den in der Gesamtvorhabenbeschreibung aufgeführten Erläuterungen ist es notwendig, dass Meyer Burger am eigenen Standort eine Demonstrationsanlage aufbaut. Insbesondere der Nachweis der Ertragssteigerung durch Bifazialität kann derzeit über leistungscharakterisierende Messungen nur bedingt abgebildet werden, da die Aufstellkonditionen gänzlich unbekannt sind. Mit einem Demonstrator-Outdoor-Teststand können diese Vorteile von HJT/SWCT-Glas-Glas-Modulen sauber herausgearbeitet werden. Zudem beliefern diese Daten die LCOE-Berechnung.

LCOE:

In Zusammenarbeit aller Projektpartner soll das am Fraunhofer ISE entwickelte techno-ökonomische Bewertungsmodell SCost herangezogen werden, um die im Projekt laufenden Prozessentwicklungen von techno-ökonomischer Seite zu evaluieren und deren Wirtschaftlichkeit zu untersuchen. Ausgehend von der Betrachtung der Total Cost of Ownership (TCO) der Solarzellenproduktion soll im Rahmen der techno-ökonomischen Analyse auch der Einfluss von Kosten und Wirkungsgrad der HJT/SWCT-Technologie entlang der PV-Wertschöpfungskette über das PV-Modul bis in das PV-System und hin zu den Stromgestehungskosten im Vergleich mit den Referenztechnologien analysiert werden.

LCA:

Darüber hinaus soll eine Untersuchung der Umweltauswirkungen (wie u.a. CO₂-Emissionen) der untersuchten Technologien und Prozessketten im Rahmen ökologische Analysen auf Basis von Stoffstrommodellierung und Life Cycle Assessment erfolgen. Die Bewertung basiert auf der DIN EN ISO 14040 „Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen“, der Empfehlungen der International Energy Agency (IEA) PVPS Task 12 „Methodology Guidelines on Life Cycle Assessment of Photovoltaic Electricity“. Dazu müssen Systemgrenzen, Rahmenbedingungen und Bewertungsmethoden entsprechend gewählt und für die betrachteten Technologierouten die für die Ökobilanz notwendigen Daten erhoben und eine Sachbilanz erstellt werden. Das Glas-Glas-Modul soll mit dem Glas-Folie- (d.h. Al-kaschiert) und einem rahmenlosen Glas-Glas-Modul verglichen werden. Die Vorzüge der HJT-Technologie werden herausgearbeitet: bleifrei, Niedertemperaturprozesse, dünne Wafer etc.

Machbarkeit IBC-Zelle/Modul:

Meyer Burger hat eine HJT-basierte IBC-Solarzelle im Labormaßstab entwickelt. Hiermit wurden bereits Wirkungsgrade von 25.4% erzielt, die vom CalLab des Fraunhofer ISE extern bestätigt wurden. Die Herstellungskosten der HJT-basierte IBC-Solarzelle scheinen aufgrund des geringeren TCO-Verbrauchs sogar günstiger als die klassischen HJT-Solarzellen. Die IBC-Zelltechnologie soll aus dem Labor auf die Pilotfertigung von Meyer Burger in Hohenstein-Ernstthal übertragen werden. Maskierungs- und strukturierte PECVD-Prozesse (Next Generation) sind zu entwickeln. Zudem muss ein neuer Metallisierungsprozess für industrielles Equipment definiert und getestet werden. Vollflächig gesputterte Metallschichten müssen nach siebgedruckten Masken nasschemisch strukturiert werden. Die Verschaltung der IBC-Zellen soll anschließend mit SWCT erfolgen. Dies wird bei dem assoziierten Partner MBCH oder/und bei MBI erfolgen.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Verbundvorhaben besteht aus den Partnern Meyer Burger (Germany) GmbH, dem Fraunhofer ISE, der KOENEN GmbH und der Centroplan GmbH. Zudem begleiteten die zwei assoziierten Partner Meyer Burger (Switzerland) AG und Borealis Polyolefine GmbH das Projekt. Es wurde hierbei eine vertrauensvolle Entwicklungspartnerschaft angestrebt. Auf dieser Grundlage wurde ein offener und sehr regelmäßiger Kontakt zwischen Projektverantwortlichen und Wissenschaftlern/Ingenieuren in den einzelnen Arbeitspaketen gepflegt.

Die Arbeitspakete sind organisatorisch so aufgeteilt, dass sich die Arbeiten bei den jeweiligen Projektpartnern gut abgrenzen lassen. Jedes Unterarbeitspaket ist eindeutig einem der beteiligten Partner zugeordnet. Ebenfalls sind die Meilensteine jeweils einem Partner zugewiesen. Durch diese Aufgabenteilung ist eine effektive Zusammenarbeit möglich und zur Erreichung der Projektziele notwendig. Die Partner unterstützen sich nach Bedarf in den Arbeitspaketen des jeweils anderen Partners und versorgen sich gegenseitig mit Materialien und Proben.

Es waren keine FuE-Aufträge an Dritte vorgesehen. Ein Dienstleistungsunterauftrag zum Schweizer Solarinstitut CSEM war ursprünglich für das letzte Projektjahr geplant, um den IBC-Prozesstransfer mit zu begleiten. Der hier angedachte Unterauftrag (unter 0850 verortet) in Höhe von ca. 55.000,- € wurde von der Geschäftsleitung aufgrund der finanziell angespannten Situation bei MB nicht vergeben. Ein weiterer Auftrag im Umfang von 13.870,-€ ging an die Firma Informattec. Dabei wurde in einer Proof-of-Concept-Session getestet, inwiefern SAP-Daten (Lagerbestände, Einkaufsmengen, Preise, etc.) mit Prozessdaten (Gasflüsse, Pastenverbrauch, Standzeiten, etc.) verknüpft werden können, um z.B. CoO-Daten insitu automatisiert abrufen zu können.

6. Erzielte Ergebnisse mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Im Nachfolgenden sind die in der Projektlaufzeit erzielten Ergebnisse und gegenüberstellende Bewertung zum Zielkorridor je Arbeitspaket zusammengefasst.

Ergebnisse in AP 2 (NextGen PECVD / HJT-Optimierung)

Erreichte Ergebnisse:

- Erfolgreiche Inbetriebnahme der NG-PECVD Plattform im Produktionsmaßstab, allerdings zunächst mit zeitlichen Verzögerungen.
- Nachweis der funktionierenden a-Si-Passivierung (Lebensdauer >500 ms).
- Erste Zellbatches der NG erreichten Effizienzen auf dem Niveau der Referenzanlagen – teilweise darüber.

- Identifikation und sukzessive Reduzierung von Inhomogenität (Temperatur, Gasstrom, Staubeffekte), Einfahreffekt durch Fluorätzen müssen beachtet werden
- Signifikante Effizienzgewinne von +0,2–0,3 % absolut durch Weiterentwicklung der mikrokristallinen n-Schichten.
- Verbesserte Homogenität der Reaktorstacks nach Heizungsumbau (deutlich geringere Streuung).
- Präkursorenbereitstellung für die Partner

Gegenüberstellende Bewertung zum Zielkorridor:

- Ziel „Prozessfähigkeit auf M10“: Erreicht. Umfängliche Umbauten und Anpassungen wurden erfolgreich abgeschlossen.
- Ziel „Druckbare Fingerstrukturen“: Auf Forschungsebene erreicht, jedoch ist die Übersetzung in die Produktion aktuell nicht als ökonomisch einzustufen.
- Ziel „Effizienzsteigerung“: Konzept für z.B. mikrokristalline Schichten validiert, erste Datensätze vorhanden; 25 % Ziel noch nicht vollständig erreicht – bisher beste mittlere Effizienz einzelner Prozessgruppen bei 24,7%, die 25% wäre aber realistisch bei fortgeführter Prozessentwicklung.
- Ziel „Kostensenkung“: mind. 10% Kostensenkung durch Metallisierungsoptimierungen möglich, eventuell auch mehr, aber Kostenbewertung konnte nicht abgeschlossen werden
- Ziel: „Augmented-Intelligence“: Die Arbeiten sind angelaufen, aber nicht vollständig abgeschlossen.
- Ziel „Big-Data“: Möglichkeiten wurden evaluiert. Programme wie QlikSense kamen umfangreich zum Einsatz (u.a. Lebensdauer-App, Wartungswarngrenze usw.). Ein erfolgreicher PoC zur Verknüpfung von Prozess- mit SAP-Daten konnte erfolgreich getestet werden. Der zusätzliche Invest für das dafür notwendige SAP-Modul wurde jedoch nicht freigegeben, da unmittelbar zu diesem Zeitpunkt die Kurzarbeit begann (→ erfolgreich getestet, aber nicht mehr umgesetzt).
- Ziel „Degradation“: Untersuchungen wurden durchgeführt (u.a. Gettern, nachgelagerte Temperaturbehandlungen), konnten aber aufgrund des vorzeitigen Ausscheidens von MBG nicht finalisiert werden.

Ergebnisse in AP 5 (Etablierung eines beschleunigten Modultestverfahrens))

Erreichte Ergebnisse:

- Mitarbeiter des Qualification & Certification Lab (QCL) in Freiberg sind nach der Werkschließung in Freiberg zu MBG gewechselt und haben sich zu den Entwicklungspfaden ausgetauscht.

Zielabgleich:

- Einige Testverfahren wurden evaluiert, Bewertung konnte aber nicht vollständig abgeschlossen werden und entsprechend fand auch die Etablierung noch nicht statt.

Ergebnisse in AP 6 (Bifazialität)

Erreichte Ergebnisse:

- Erster Schritt: Veränderung Rückseitengrid zu mehr Bifazialität (>92%) unter Reduktion des Silberauftrages (~6%) und -0,1% Zelleffizienz
- Konzept zu einer quasi-symmetrischen Zelle mit Bifazialität > 95% entwickelt, erste Experimente dazu haben stattgefunden

Gegenüberstellende Bewertung zum Zielkorridor:

- Ziel „Entwicklung einer quasi-symmetrischen Zelle“: Erfüllt.
- Ziel „Übertragung ins Modul“ kann aufgrund des Projektendes zum 02.06.2025 nicht mehr umgesetzt werden
- Ziel „Entwicklung eines vollsymmetrischen Moduls mit Flip-Flop-Verschaltung“ ist aufgrund der Werkschließung in Freiberg nicht mehr möglich.

Ergebnisse in AP 9 (Machbarkeit IBC-Zelle/Modul)

Erreichte Ergebnisse:

- Prozessfluss bei MBG definiert inkl. der sich daraus ergebenden Maskierungsprozesse, um lokal getrennte p- und n-Bereiche zu kreieren.
- Beschaffung, Installation und erste Validierung eines IBC-Teststands
- Erfolgreiche Homogenitäts- und Spektrumnachweise gemäß IEC-Normen
- funktionsfähige Laborumgebung für IBC-I-V-Charakterisierung

Zielabgleich:

- Ziel „Definition eines industrialisierbaren Prozessflusses für IBC-HJT“: Erfüllt.
- Ziel „Prozesstransfer in Pilotlinie inkl. Aufbau einer Pilotumgebung“: Teilweise erfüllt; Pilotumgebung aufgebaut, Prozesstransfer-Arbeiten wurden begonnen, sind aber noch nicht abgeschlossen.
- Ziel „Vereinfachung der Prozesse hinsichtlich Wirtschaftlichkeit“: Erfüllt. Es wurde entschieden den Zwischenlayer auszulassen.
- Ziel „Machbarkeit Effizienzziel von 24% und Modulaufbau“: Aufgrund fehlender Automatisierung, Firmenrestriktionen und Projektende aufgrund Insolvenzverfahrens zum 02.06.2025 bis dato noch nicht möglich.

Zusammenfassung zu den Meilensteinen

Im Nachfolgenden ist der Status der Meilensteine aufgezeigt.

Meilenstein	Status	Bemerkung
MS1-1 Kick-off Meeting durchgeführt	✓ erfüllt	Zeitpunkt: 24.05.2022
MS1-18: Evaluation des Projektverlaufs zur Halbzeit des Projektes	✓ erfüllt	Evaluation zudem regelmäßig erfolgt, s.a. Notwendigkeit der Verlängerung
MS1-36: Abschlusstreffen	✗ nicht erreicht	Verlängerung verschiebt MS, vorzeitiges Ausscheiden von MBG
MS2-12a Neue Einzelprozesse bereitgestellt	✓ erfüllt	u.a. funktionierende Schichtsysteme (a-Si-Passivierung erfolgreich), beidseitige mikrokristalline Schichten zeigen Erfolge
MS2-18a Wirkungsgrad von 24,5% erreicht & Kosten um 10% gesenkt	✓ erfüllt	Effizienzsteigerung auf 24,5% erreicht und Kostensenkungen um mind. 10% durch Metallisierungsoptimierung
MS2-18b NextGen-Anlage im Gesamtprozess integriert	✓ erfüllt	IB erfolgt, Anlage läuft in Pilotlinie mit definierten Rezepten
MS2-18d M10-Fähigkeit in der Pilotlinie nachgewiesen	✓ erfüllt	Alle Anlagen sind M10-fähig
MS2-36a Wirkungsgrad von 25,0% erreicht & Kosten um 20% gesenkt	✗ nicht erreicht	Verlängerung verschiebt MS, vorzeitiges Ausscheiden von MBG; bisher 24,7% mittlere Effizienz einzelner Prozessgruppen, Kostenbewertung nicht final abgeschlossen, aber im Zielkorridor
MS6-24: Optisch sym. Zelle mit >95% Bifazialität bereitgestellt	✓ erfüllt	Konzept entwickelt + Experimente
MS6-36: 100%.Bifi-Modul mit >370W demonstriert	✗ nicht erreicht	Verlängerung verschiebt MS, vorzeitiges Ausscheiden von MBG, FlipFlop durch Werkschließung nicht möglich
MS9-6: Prozessfluss definiert	✓ erfüllt	Auslassung Zwischenlayer
MS9-24: Transfer abgeschlossen	✗ nicht erreicht	war laufend, aber Verzögerung durch Kurzarbeit & fehlende Automatisierung
MS9-35: IBC-400W-Modul aufgebaut	✗ nicht erreicht	aufgrund strategischer Neuausrichtung und Ressourcenkürzungen bisher nicht umsetzbar

7. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

F&E-Fremdleistungen (0823) waren nicht geplant und sind entsprechend auch nicht angefallen.

Als entstandene Materialkosten (0813) wurden diverse Materialien im Wert von 379.037,69 Euro geltend gemacht. Zu diesen Materialien zählen z.B. Wafer, Trayplatten, Testgläser, mechanische und elektrische Kleinteile, Targets, Chemie, Gase, Siebdruckerbedarf sowie diverse Verbrauchsmaterialien im Rahmen der Solarzellenherstellung. Diese wurden u.a. für die Herstellung der HJT-Solarzellen im Rahmen der Evaluierungsprozesse und im Speziellen auch für die Präkursorherstellung genutzt.

Es sind Arbeitszeiten von Wissenschaftlern, Ingenieuren und Operatoren u.ä. im Projekt angefallen, welche mit 3.244.032,62 Euro als Personalkosten (0837) geltend gemacht wurden. Sie dienten sowohl der Präkursorbereitstellung als auch der Durchführung der Vielzahl an Prozessevaluierungen, Prozesstransferexperimenten und der Realisierung der nötigen technischen Austauschrunden mit den Projektpartnern.

Als Reisekosten (0838) fielen 12.919,87 Euro an. Die Kosten entstanden durch Projekt- und Arbeitstreffen, Equipment-Inbetriebnahmen sowie durch eine Vielzahl an Prozess- und Evaluierungstests. Auch Workshop-Besuche wie z.B. die Teilnahme am BC-Workshop oder Konferenzen im Rahmen von Datenauswertungen waren innerhalb des Projektes nötig.

Die Abschreibung des Invests (0847) wurde mit 216.913,12 Euro geltend gemacht. Die Abschreibungen beziehen sich auf den Asys-Drucker ab Dezember 2022 und den IV-Tester inkl. der IQE-Funktion ab März 2024. Beide Maschinen kamen im Rahmen des Projektes bei der Herstellung und Analyse der Zellen zum Einsatz.

An sonstigen unmittelbaren Vorhabenkosten (0850) fielen 260.716,69 Euro an. Dabei handelt es sich u.a. um verschiedene Kalibrierungen, Inbetriebnahmen, MES-Supportleistungen, diverse Analysen und Präparationen sowie Maschinenmietkosten. Zudem fällt hierunter der PoC mit Informatec in Höhe von 13.800,- €.

Generell fielen die gesamten Kosten im Endeffekt etwas geringer aus als geplant. Gründe, die für eine Projektverlängerung sprachen, wurden hinreichend erklärt. Die Projektverlängerung wurde beantragt und genehmigt, aber aufgrund des Insolvenzverfahrens kann MBG nun diese Zeit leider nicht vollends ausnutzen und wird entsprechend die Gelder auch nicht komplett abrufen.

8. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Für die beschriebene Entwicklung eines hochqualitativen Moduls für Kraftwerksanwendungen begleitend zum Aufbau einer entsprechenden HJT-Zell- und SWCT-Modulproduktion in Deutschland sowie der flankierenden Entwicklung der nächsten HJT Zell- und Modultechnologie-Generation (IBC) konnten die beteiligten Partner keine europäischen Fördermittel akquirieren. Es standen damit keine alternativen öffentlichen Fördermöglichkeiten

für das Projektvorhaben zur Verfügung. Die Projektpartner hätten die vorgesehenen Arbeiten in dieser Umfänglichkeit ohne die beantragte Förderung nicht durchführen können.

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 Wert sind. Durch die erläuterte Komplexität ergab sich die entsprechende Einstufung in die Gruppe forschungsintensiver Projekte. Das Vorhaben besitzt sowohl technologisch als auch wirtschaftlich ein enorm hohes Potential, welches sich derzeit auf Grund der entstandenen Rahmenbedingungen nicht in erwartetem Maße markttechnisch umsetzen lässt.

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

Die im Projekt erzielten Ergebnisse sind trotz der Gegebenheiten technologisch hoch relevant:

- Die NextGen-PECVD-Plattform liefert erstmals umfassende Erfahrungswerte im Produktionsmaßstab und bildet die Grundlage für zukünftige Industrieanlagen mit deutlich geringerem Material-, Energie- und Platzbedarf.
- Die Optimierung amorpher und mikrokristalliner Siliziumschichten ermöglicht höhere Zellwirkungsgrade, bessere Stromausbeute sowie langfristig höhere Modulwirkungsgrade.
- Die entwickelten Mess- und Analyseverfahren (hochauflösende Fotografie, PL- und Lebensdauerkonzepte, IBC-Teststand) schaffen prozessnahe Qualitätskontrollmöglichkeiten, die auch unabhängig vom Projekt dauerhaft genutzt werden können.
- Die Ergebnisse fließen direkt in die Weiterentwicklung von HJT- und IBC-Produktplattformen ein und tragen somit potentiell zur Stärkung der Position des anwendenden Unternehmens als Technologie- und Maschinenlieferant bei, sollte es zu einer Investorenlösung kommen.

Der potentielle Verwertungsplan verändert sich nicht wesentlich. Die Anwendungen sind für unterschiedliche Akteure der Photovoltaikindustrie in Deutschland interessant – von Anlagenherstellern über Maschinenbauer bis zu Modulproduzenten. Kurzfristig (1–2 Jahre) kann die Messtechnik und Prozessmodulentwicklung genutzt werden, mittelfristig (3–5 Jahre) ist der Einsatz in industriellen Produktionsplattformen möglich.

Eine Konkretisierung von Verwertungsoptionen hängt nun aber an der erfolgreichen Fortführung und dem entsprechenden Abschließen des Projektes durch die Partner und ggf. einer Investorenlösung im Rahmen des Insolvenzverfahrens ab. Es besteht noch die Chance einer ggf. partiellen Übernahme durch Investoren. Insbesondere die existierende Forschungslandschaft am Standort, u.a. mit dem Know-how aus den Förderprojekten, weckt nach wie vor großes Interesse.

10. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Die HJT-Solarzellenentwicklung mit ihren Untergebieten ist ein extrem dynamisches Gebiet. Es ist daher unmöglich, umfassend die Ergebnisse zu diesem Thema darzustellen. Die möglichen Fortschritte auf den einzelnen Gebieten werden ggf. auch von den betreffenden Projektpartnern kommuniziert.

Im gesamten Projektzeitraum wurden, soweit bekannt, keine externen, relevanten F&E-Ergebnisse deutlich, die den Projektfortschritt massiv beeinflussen oder alternative Technologien mit unmittelbarer Relevanz darstellen. Bezüglich HJT-Entwicklungen wurden bei den chinesischen Firmen Maxwell, Huasun und Risen sehr gute Wirkungsgrade und Modulleistungen beobachtet. Diese wettbewerblichen Entwicklungen basieren sehr wahrscheinlich aber auf mikro- bzw. nano-kristallinen Schichten, die in der PV-Community als potenziell degradationsgefährdet eingestuft werden, ähnlich wie bei der TOPCon-Technologie. Diese Ergebnisse wurden berücksichtigt und flossen in die Planung der Stabilitäts- und Langlebigkeitstests ein.

11. Veröffentlichungen der Ergebnisse

Im Rahmen des Teilvorhabens wurden keine Ergebnisse seitens MBG veröffentlicht. Lediglich der Prototyp des Utility-Moduls wurde auf der Intersolar (siehe Abbildung 3) vorgestellt. Zudem unterstützte MBG die Veröffentlichungen im Rahmen von Utility4Indium der Projektpartner hauptsächlich mit Präkursoren, sowie dem Grundlagenwissen zu HJT-Zellen sowie deren Prozessierung. Die Projektpartner werden ihre Veröffentlichungen in ihren Schlussberichten selbst teilen.

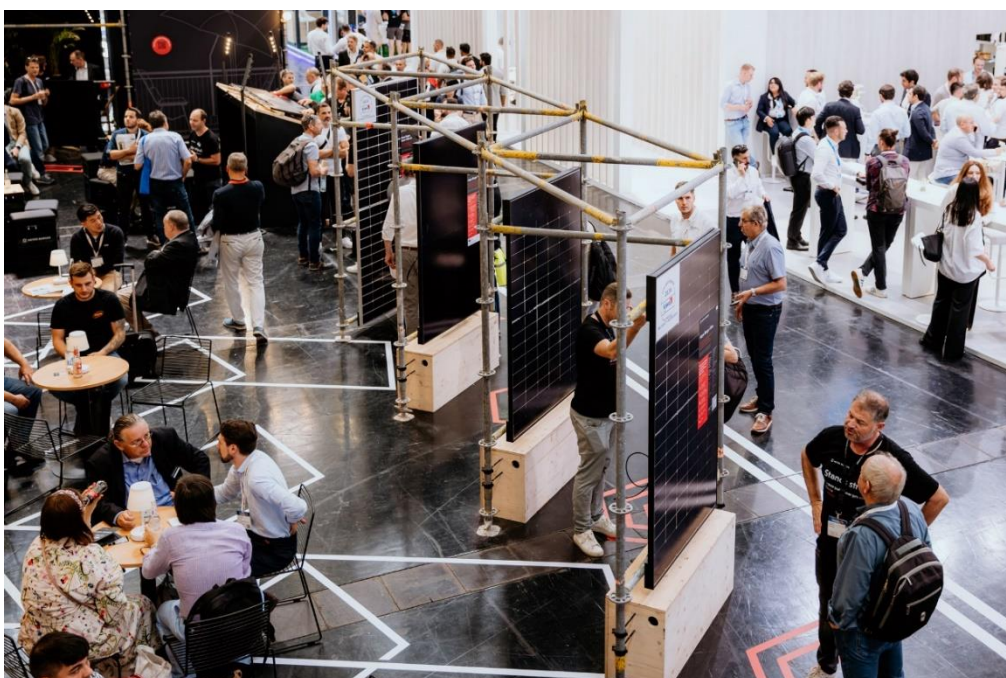


Abbildung 3: Utility-Modul (links) und drei Residential-Module von MBG (Quelle: Meyer Burger Mediacenter Download)