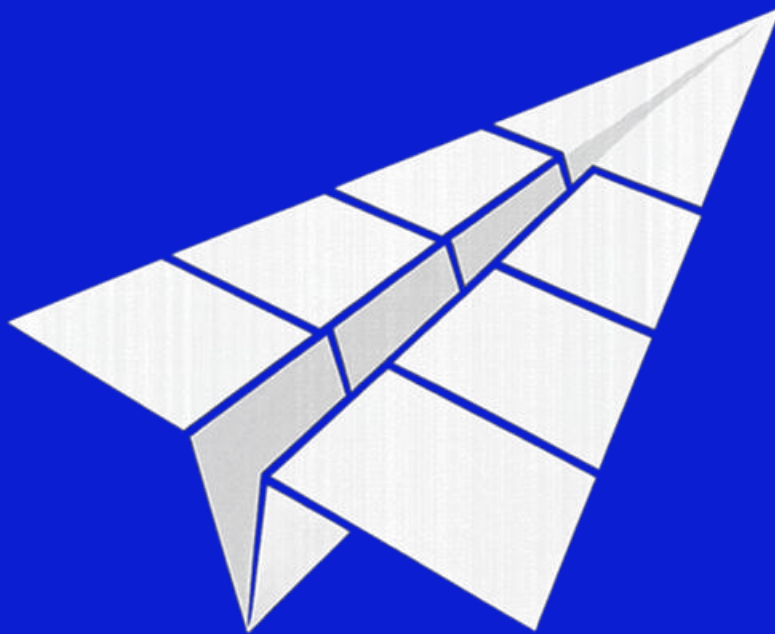


PV PILOT

Abschlussbericht zum Verbundvorhaben PV Pilot – Studie für eine Forschungs- und Pilotumgebung zur Unterstützung resilienter, lokaler PV-Produktion



AUTOREN: DR. WOLFGANG JOOSS, JULIAN REICHLÉ (ALLE RCT), RUDOLF HARNEY, DR. JÖRIS LIBAL (ALLE ISC KONSTANZ), DR. PUZANT BALIOZIAN (VDMA), DR. IVONA KAFEDJISKA, PROF. BERND STANNOWSKI, PROF. RUTGER SCHLATMANN (ALLE HZB), DR. THORSTEN DULLWEBER, DR. FELIX HAASE, DR. UDO RÖMER (ALLE ISFH), DR. JOCHEN RENTSCH, DR. SEBASTIAN NOLD (ALLE ISE)

FÖRDERKENNZEICHEN: FKZ 03EE1219

DATUM: 14. JULI 2025

DIE VERANTWORTUNG FÜR DEN INHALT DIESER VERÖFFENTLICHUNG LIEGT BEI DEN AUTOREN

LAUFZEIT: 8 MONATE (1. OKTOBER 2024 BIS 31. MAI 2025)

PROJEKTKOORDINATION: RCT SOLUTIONS GMBH

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

EXECUTIVE SUMMARY

Mit dem Projekt PV PILOT wurde im Zeitraum Oktober 2024 bis Mai 2025 eine koordinierte Initiative gestartet, um den Aufbau einer Pilotfertigungslinie für Photovoltaik (PV) in Deutschland konzeptionell vorzubereiten. Ziel war es, industrie- und forschungsnahen Umsetzungsszenarien zu entwickeln, die zur Resilienz und internationalen Wettbewerbsfähigkeit der deutschen und europäischen PV-Industrie beitragen können.

1. Ein Schulterschluss der führenden Institute und des Maschinenbaus

Ein herausragendes Merkmal von PV PILOT ist die enge Kooperation der führenden deutschen PV-Forschungsinstitute – Fraunhofer ISE, HZB, ISFH und ISC Konstanz – die sich im Projekt in einem ungewöhnlich hohen Maß abgestimmt haben. Trotz teils konkurrierender Interessen bei Forschungs- und Fördermitteln wurde hier ein gemeinsamer Ansatz verfolgt, getragen von der Einsicht: Im globalen Wettbewerb, in dem inzwischen über 90 % der PV-Produktion und ein Großteil der F&E-Investitionen in China erfolgen, ist ein koordiniertes Miteinander entscheidend. Koordiniert wurde das Projekt von RCT Solutions mit Kompetenz in der Planung neuer PV Fabriken. Zudem hat der VDMA als Verband der PV-Maschinenbauer in Deutschland die Perspektive des Maschinenbaus eingebracht – der aktuell wichtigsten PV-Wertschöpfungsstufe in Europa.

2. Enge Einbindung der Industrie und agile Projektsteuerung

Bereits zu Projektbeginn wurde gemeinsam mit dem VDMA eine groß angelegte Umfrage unter Unternehmen und Forschungseinrichtungen durchgeführt. Mit über 80 Rückläufen lieferte sie ein repräsentatives Bild der Anforderungen an eine Pilotlinie. Wenige Wochen später fand im Rahmen der VDMA-Jahrestagung ein Workshop mit rund 100 relevanten Stakeholdern statt, bei dem technologische, organisatorische und wirtschaftliche Fragen der Pilotfertigung diskutiert wurden.

Ein zentrales Ergebnis: Eine vollständig neu errichtete Pilot-Linie ist derzeit weder öffentlich noch industriell finanzierbar. Gleichzeitig zeigte PV Pilot, dass die Nachfrage nach Turnkey-Angeboten stark wächst – also schlüsselfertigen Fabriklösungen für internationale Kunden z.B. in Indien oder den USA.

Die PV Pilot Verbundpartner passten gemeinsam mit dem PtJ und dem BMW die Projektinhalte entsprechend an. So wurden in den Arbeitspaketen 3 (Betreibermodelle) und 4 (Finanzierungsinstrumente) neue Schwerpunkte auf Turnkey-Konsortien und deren spezifische Anforderungen gelegt. Eine zweite Umfrage zum Projektende diente als Rückkopplung und Bestätigung dieses Kurses.

3. Entwicklung konkreter Umsetzungsszenarien und Finanzierungspfade

In PV Pilot wurden vier Szenarien für eine Pilotlinie entwickelt (AP1) – von der vollständig neuen industriellen Linie bis hin zur virtuellen Linie auf Basis bestehender Technikums-Infrastrukturen. Dabei erwies sich insbesondere das Szenario einer verteilten Pilotlinie an Forschungsinstituten mit deren aktuellen und z.T. in der Modernisierung befindlichen Technikums-Linien als kurzfristig realisierbar mit geringem Investitionsbedarf. Für diese verteilte Pilotlinie wurde:

- der Technologiepfad definiert von TOPCon über IBC zu Tandem (AP 2),



- die Technikumsinfrastrukturen evaluiert und erste Synergien aus der kombinierten Nutzung abgeleitet (AP 6),
- Betriebskosten (OPEX) und Investitionen (CAPEX) berechnet (AP 4),
- betriebliche Risiken und Absicherungsmechanismen geprüft, insbesondere der Einsatz von Avalen (AP 4),
- erste rechtliche Rahmenbedingungen und Betreiberkonzepte entworfen (AP 3).
- Die potentielle Finanzierungsunterstützung auf Europäischer Ebene (z.B. Horizon Europe, European Innovation Fund, und InvestEU) detailliert erörtert (AP 5)

Eine neue Pilotlinie würde einen noch größeren Durchsatz bieten als die verteilte Pilotlinie und daher eine noch produktionsstypischere Evaluierungsplattform bieten. Dies ist jedoch derzeit weder öffentlich noch von der Industrie in Deutschland finanzierbar. Eine Alternative könnte sein, eine neue Pilotlinie an eine neu aufzubauende PV Fabrik z.B. in Indien oder den USA anzudocken unter Verwendung von Technologien und Maschinen, die in der verteilten Pilotlinie vorentwickelt wurden.

4. Empfehlungen und nächste Schritte

Die Ergebnisse von PV PILOT zeigen: Eine verteilte Pilotlinie auf Basis vorhandener Infrastrukturen ist kurzfristig realisierbar und kann als Demonstrationsplattform für innovative Produktionslösungen dienen – insbesondere für Turnkey-Angebote „Made in Germany“. Die wichtigsten Erkenntnisse und weiterführenden Schritte sind:

- Kombination der technologischen Stärken der deutschen Institute für neue attraktive Turnkey-Angebote, z. B. TOPCon bei einem Institut und Modulverschaltung eines anderen Instituts oder z.B. IBC Front End bei einem Institut und silberfreie Metallisierung bei einem anderen Institut.
- Analyse von Flaschenhälsen zur Optimierung der Anlagenausstattung an den beteiligten Instituten.
- Forschung und Entwicklung von Turnkey-Technologieupgrades, z.B. von TOPCon auf IBC und später auf Tandem-Zellen. Enge Kooperation der virtuellen Pilotlinie mit dem deutschen Maschinenbau zur Weiterentwicklung von Turnkey-Angeboten
- Ausarbeitung eines Konsortium-Modells aus Fabrikplanern, Maschinenlieferanten und der verteilten Pilotlinie für zukünftige Turnkey-Aufträge
- Ausarbeitung von Absicherungsmodellen z.B. über Bürgschaften und Avale

Viele dieser obigen Punkte sollen in dem beantragten Nachfolgeprojekt PV Action detailliert konzeptionell ausgearbeitet werden. Zusätzlich bedarf es weiterhin der kontinuierlichen Forschungsförderung für die Technologieentwicklung wie oben ausgeführt. Diese Maßnahmen haben das Ziel, den deutschen PV Maschinenbau für Fabrikaufträge aus dem Ausland wieder fit zu machen und zu unterstützen. Für die Wiederansiedlung einer PV Produktion in Deutschland und Europa bedarf es darüber hinaus einer Änderung der wirtschaftspolitischen Rahmenbedingungen, welche eine heimische Produktion vor extrem billigen Importen aus Asien schützt und die Nachfrage nach lokal produzierten Zellen und Modulen steigert.



EXECUTIVE SUMMARY, ENGLISH VERSION

The PV PILOT project was launched in October 2024 as a coordinated initiative to prepare the conceptual design for a pilot production line for photovoltaics (PV) in Germany. The aim was to develop industry- and research-oriented implementation scenarios that could contribute to the resilience and international competitiveness of the German and European PV industry.

1. Leading institutes and mechanical engineering companies join forces

A key feature of PV PILOT is the close cooperation between leading German PV research institutes – Fraunhofer ISE, HZB, ISFH, and ISC Konstanz – which have coordinated their efforts to an unusually high degree in this project. Despite sometimes competing interests in research and funding, a joint approach was pursued, based on the understanding that coordinated cooperation is crucial in global competition, where more than 90% of PV production and a large proportion of R&D investment now takes place in China. The project was supported by the VDMA, which, as the most important association of the PV industry in Germany, contributed in particular the perspective of the production equipment industry – currently the most important PV value-added stage in Europe.

2. Close involvement of industry and agile project management

Right at the start of the project, a large-scale survey of companies and research institutions was conducted in collaboration with the VDMA. With over 80 responses, it provided a representative picture of the requirements for a pilot line. A few weeks later, a workshop with around 100 relevant stakeholders was held as part of the VDMA annual conference, where technological, organizational, and economic issues relating to pilot production were discussed.

One key finding was that a completely new line is not currently financially viable. At the same time, it became clear that there is a growing demand for turnkey solutions, i.e., ready-to-use factory solutions, which are increasingly in demand from international customers (e.g., in India or the US).

The consortium responded quickly and, together with PtJ and BMW, flexibly adapted the project content. In work packages 3 (operator models) and 4 (financing instruments), new priorities were set on turnkey consortia and their specific requirements. A second survey at the end of the project served as feedback and confirmation of this course.

3. Development of concrete implementation scenarios and financing paths

In WP 1, four scenarios for a pilot line were developed – ranging from a completely new industrial line to a virtual line based on existing infrastructure. The scenario of a distributed pilot line at research institutes (concept B) proved to be particularly feasible in the short term and economically viable. For this scenario, the following were identified:

- technology paths were identified (WP 2),
- specific infrastructures were analyzed (WP 6),
- operating costs (OPEX) and investments (CAPEX) were calculated (WP 4),
- operational risks and hedging mechanisms were examined (WP 4),
- initial legal framework conditions and operator concepts were drafted (WP 3).



- In WP 5, a comprehensive catalog of potential EU funding instruments was compiled, including Horizon Europe, the Innovation Fund, and InvestEU. This opens up the possibility of establishing a larger program with European funding in the medium term.

4. Recommendations and next steps

The results of PV PILOT show that A distributed pilot line based on existing infrastructure can be realized in the short term and can serve as a demonstration platform for innovative production solutions – especially for turnkey offerings “Made in Germany.” The most important findings are:

- The research is ready. All four institutes have modernized or are building facilities that are suitable for networked use.
- Industry is interested. Mechanical engineering companies and equipment suppliers see the line as a potential showroom – provided that confidentiality, IP protection, and throughput are guaranteed.
- Financing is feasible. Purely national funding currently seems unrealistic, but EU financing instruments offer real opportunities.
- A follow-up step is necessary. The follow-up project PV ACTION should now be launched with concrete planning, coordination structure, and international cooperation.

PV PILOT has laid the foundation for coordinated implementation with broad support from industry, research, and politics. It is now crucial to continue with a follow-up project that will translate the preliminary work into a concrete pilot line, thus sending a clear signal for the reconstruction of a resilient PV industry in Europe.



INHALTSVERZEICHNIS

Executive Summary.....	2
Executive summary, English Version.....	4
Inhaltsverzeichnis	6
Einleitung/Motivation.....	8
Motivation Pilotlinie.....	8
Beschreibung Arbeitspakete.....	9
AP 0: Anforderung an Pilotlinie, Innovationszentrum bzw. die Forschung insbesondere von der Solarindustrie	11
AP 0.1 Umfrage	11
AP 0.2 WORKSHOP.....	13
AP 1: Ausarbeitung der Szenarien.....	21
Einleitung	21
AP 1.1: Erarbeitung von Szenarien und Modellen für die Umsetzung einer Pilotlinie	22
AP 1.2 Analyse der Szenarien	25
AP 2: Bewertung und Auswahl von Technologien und Technologiepfaden	29
AP 2.1 Aufstellung potenzieller Technologieoptionen für die Pilotlinie	29
AP 2.2 Bewertung der möglichen Technologieoptionen anhand der Kriterien aus AP0 und AP1	29
AP 2.3 Festlegung des Technologiepfades der Pilotlinie (ISFH, HZB, ISE, ISC, RCT)	33
AP 3: Geschäfts- und Betreibermodelle einer PV-Pilotfertigung.....	34
AP 3.1 Chancen und Herausforderungen für den Transfer innovativer Technologien in globale Wachstumsmärkte.....	34
AP 3.2 Modelle zum Transfer innovativer Technologie an Endkunden.....	40
AP 4: Finanzierung und Absicherung.....	44
AP 4.1/4.2: CAPEX UND OPEX der verschiedenen Szenarien von Pilotlinien.....	44
Instrumente zur Exportabsicherung bei Turnkeyprojekten für Pilotierung und Massenproduktion	53
Stand der möglichen Implementierung eines zusätzlichen Absicherungsinstrumentes:	57
Fazit und Feedback:	58
AP 5: EU-Förderprogramme für PV und PV-Pilotfertigungslinien.....	60
EU-Förderung für Forschung und Innovation (F&I): Horizont Europa	61
EU-Politikinstrumente zur Unterstützung der PV-Produktion und/oder des Ausbaus	62
EU-Finanzierungsinstrumente, die über Solar-PV hinausgehen, aber politische Maßnahmen zur Unterstützung der Solar-PV-Fertigung direkt finanzieren.....	67



AP 6: Bewertung und Einbeziehung von existierender Infrastruktur der Forschungsinstitute	71
AP 6.1 Erstellung einer Übersicht der existierenden Infrastruktur	71
AP 6.2 Bewertung der existierenden Infrastruktur für die Pilotlinie	75
AP 7: Standort	77
AP 8: Abschließende Handlungsempfehlungen	78
Schlusswort.....	84
Referenzen:	85
Anhang.....	88
Präsentation der PV PILOT Umfrage (mit Diagrammen).....	88
Ingot & Wafer Equipment Kalkulation	93
Zellannahmen	94



EINLEITUNG/MOTIVATION

MOTIVATION PILOTLINE

Die Photovoltaik-Technologie entwickelt sich rasant weiter – doch zwischen erfolgreicher Laborforschung und industrieller Massenfertigung klafft eine oft unterschätzte Lücke. Um diese zu schließen, ist eine sogenannte Pilotlinie unverzichtbar: eine vorindustrielle Fertigungsumgebung, in der neue Prozesse, Materialien und Anlagen unter realitätsnahen Bedingungen getestet, optimiert und skaliert werden können.

Eine Pilotlinie dient dabei mehreren Zwecken:

- **Technologiebewertung und Risikominimierung:** Neue Verfahren und Materialien können vor dem industriellen Rollout unter praxisnahen Bedingungen erprobt werden. Fehler und Schwächen im Prozess werden frühzeitig erkannt und behoben – das reduziert technische und wirtschaftliche Risiken.
- **Skalierbarkeit und Kostenabschätzung:** Sie liefert belastbare Daten zur Skalierbarkeit, Prozessstabilität und zu Produktionskosten – eine wichtige Entscheidungsgrundlage für Investitionen in Großanlagen.
- **Validierung und Zertifizierung:** Die Fertigung von Kleinserien ermöglicht erste Markttests, die Durchführung von Feldversuchen und die Vorbereitung auf Produktzertifizierungen.
- **Training und Qualifikation:** In der Pilotlinie können Fachkräfte an neuen Technologien geschult werden – ein wichtiger Faktor angesichts der zunehmenden Komplexität von PV-Produktionsprozessen.
- **Demonstration und Markteintritt:** Maschinen- und Materialhersteller können ihre Produkte in der Linie demonstrieren und in realitätsnahen Szenarien verifizieren – das stärkt ihre internationale Wettbewerbsfähigkeit, insbesondere im Turnkey-Geschäft.

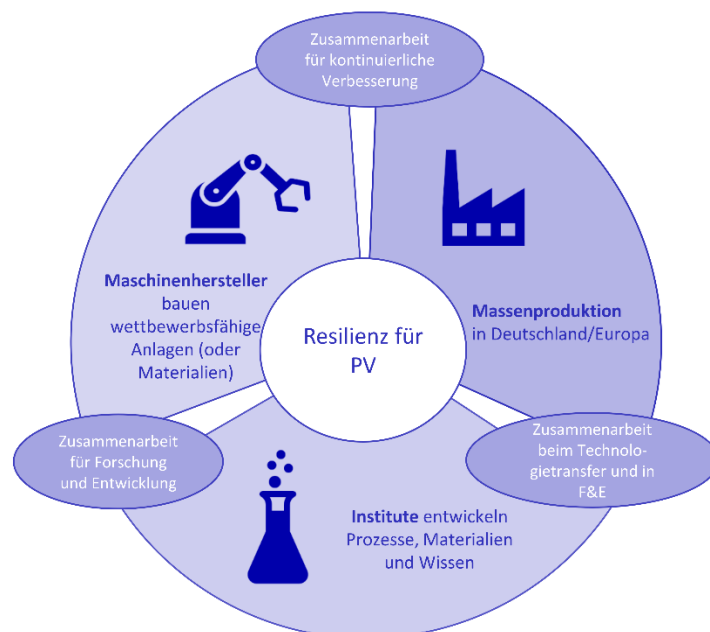


Abbildung 1: Übersicht: Zweck einer Pilotlinie



Besonders in Europa kommt der Pilotlinie eine strategische Rolle zu: Während mehr als 90 % der weltweiten PV-Produktion inzwischen in China stattfindet – bei gleichzeitig hohen chinesischen F&E-Investitionen – fehlt in Europa bislang eine vergleichbare Struktur, um neue Technologien industrienah zu entwickeln und global zu vermarkten.

Daher wurde im Projekt PV PILOT ein Modell entwickelt, bei dem die Pilotlinie nicht einem einzelnen Unternehmen gehört, sondern als geteilte Infrastruktur von Forschungseinrichtungen betrieben und für verschiedene Akteure offen ist. Sie soll dem Aufbau eines robusten PV-Ökosystems dienen, in dem:

- Maschinenbauer neue Anlagenkonzepte erproben,
- Materialhersteller realistische Prozessbedingungen nutzen,
- Forschungseinrichtungen Technologien zur Marktreife führen,
- und Turnkey-Konsortien komplette Lösungen präsentieren können.

Eine solche Linie ist somit mehr als nur ein technisches Testfeld: Sie ist ein strategisches Bindeglied zwischen Forschung, industrieller Umsetzung und Export. Sie ermöglicht es, schneller, koordinierter und risikominimierter in neue Märkte zu gelangen – und bietet damit ein Instrument, das Europa dringend braucht, um in der PV-Industrie wieder international Fuß zu fassen.

BESCHREIBUNG ARBEITSPAKETE

Das Projekt PV PILOT verfolgte das Ziel, tragfähige Konzepte für eine industrielle Photovoltaik-Pilotlinie in Deutschland zu entwickeln. Die Arbeitsstruktur war in acht Arbeitspakete (AP) gegliedert, deren Inhalte nach dem Auftaktworkshop im Oktober 2024 in enger Abstimmung mit dem Projektträger PtJ und dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) angepasst wurden. Hintergrund der Anpassung war die frühzeitige Erkenntnis, dass eine vollständig neu zu errichtende Pilotlinie kurzfristig nicht finanzierbar ist, auch angesichts der vorerst noch fehlenden produzierenden heimischen Industrie. Daher wurden das gesamte Arbeitspaket 7 (AP7: Standortanalyse) sowie die ursprünglich geplanten Meilensteine MS 3.1 und MS 3.2 (Businessplanung für eine neue Linie) gestrichen. Stattdessen wurde der Fokus auf alternative Konzepte wie verteilte Pilotlinien und insbesondere auf sogenannte Turnkey-Projekte gelegt. Als neue Inhalte kamen Aspekte zur Risikoabsicherung durch Bürgschaften (Avale) hinzu.

AP0: Anforderungen an Pilotlinie, Innovationszentrum und Forschung

In AP0 wurden der Bedarf und die Anforderungen aus Sicht der Industrie und Forschung erfasst. Grundlage bildeten eine breit angelegte Umfrage unter Branchenakteuren und ein interaktiver Workshop.

AP1: Spezifikationen und Anwendungsszenarien

Aufbauend auf den Ergebnissen von AP0 wurden in AP1 konkrete Szenarien und Anforderungen für verschiedene Nutzungskonzepte entwickelt. Der Meilenstein MS 1.3 dokumentierte den Abschluss der Analyse dieser Szenarien.



AP2: Bewertung und Auswahl von Technologien und Technologiepfaden

In AP2 erfolgte die systematische Analyse und Bewertung relevanter Zell-, Modul- und Fertigungstechnologien für eine Pilotlinie.

- MS 2.1: Erstellung einer Liste potenzieller Technologien
- MS 2.2: Bewertung dieser Optionen gemäß den zuvor definierten Anforderungen
- MS 2.3: Festlegung eines möglichen Technologiepfads

AP3: Geschäftsmodelle und internationale Perspektiven

Da eine zentrale Pilotlinie nicht umsetzbar war, richtete sich AP3 auf alternative Geschäfts- und Betreibermodelle.

- Der ursprünglich vorgesehene MS 3.1 (Identifikation zweier Betreibermodelle für einen Businessplan) und MS 3.2 (Businessplan) wurden gestrichen.
- Stattdessen wurden Marktpotenziale für den Technologietransfer analysiert (neuer MS 3.1) und eine Machbarkeitsstudie zum Turnkey-Konzept erstellt (neuer MS 3.2), inkl. Absicherungsmechanismen durch staatlich unterstützte Bürgschaften.

AP4: Finanzierung und Risikoabsicherung

AP4 befasste sich mit den finanziellen Anforderungen an unterschiedliche Szenarien.

- MS 4.1: Ermittlung des Investitionsbedarfs (CAPEX) und der daraus resultierenden Bürgschaftshöhen
- MS 4.2: Analyse der Betriebskosten (OPEX), Haftungsrisiken und potenziellen Vertragsstrafen

AP5: Fördermöglichkeiten auf nationaler und europäischer Ebene

In AP5 wurde ein umfassender Überblick über Förderinstrumente erarbeitet, darunter Programme aus dem BMWF, Horizon Europe, dem Innovation Fund und InvestEU.

- MS 5.1: Dokumentation der möglichen Förderpfade

AP6: Nutzung existierender Infrastruktur

Ein Schwerpunkt des Projekts lag in der Analyse der vorhandenen Forschungslinien.

- MS 6.1: Bewertung bestehender Technikumseinrichtungen hinsichtlich Durchsatz, Technologietiefe und Eignung für Pilotlinien
- MS 6.2: Strategien zur Attraktivitätssteigerung dieser Einrichtungen für Turnkey-Konsortien

AP7: Standortanalyse

Dieses Arbeitspaket wurde nach dem Auftaktworkshop gestrichen, da die Errichtung eines neuen physischen Standorts nicht mehr verfolgt wurde.

AP8: Gesamtbewertung und Handlungsempfehlungen

Abschließend wurden in AP8 die im Detail untersuchten Szenarien vergleichend bewertet und Handlungsempfehlungen für Politik, Forschung und Industrie formuliert.

- MS 8.1: Abschlussbericht mit systematischer Bewertung und konkreten Empfehlungen



AP 0: ANFORDERUNG AN PILOTLINIE, INNOVATIONSZENTRUM BZW. DIE FORSCHUNG INSBESONDERE VON DER SOLARINDUSTRIE

Koordination: ISC

AP 0.1 UMFRAGE

FAZIT

Die Umfrageergebnisse zeigen ein großes Interesse und eine hohe Bereitschaft zur Zusammenarbeit innerhalb der Solarbranche, um eine Pilotlinie zu entwickeln und zu betreiben. Die Finanzierung bleibt jedoch eine der größten Herausforderungen, und es wird empfohlen, öffentliche Fördermittel und alternative Finanzierungsmodelle zu prüfen.

ZIELE DER UMFRAGE

Eine Umfrage wurde erstellt, um den Bedarf an einer PV Pilotlinie von den Akteuren in Deutschland zu ermitteln. Diese Umfrage unterscheidet zwischen notwendigen und wünschenswerten Anforderungen. Sie wurde an die relevanten Akteure in Deutschland verteilt, darunter Maschinenbauer, Materialhersteller, Forschungseinrichtungen, Ausrüster von PV-Fabriken und politische Entscheidungsträger. Ziel war es, direkt nach Projektstart, möglichst innerhalb einer Woche, erste Rückmeldungen zu erhalten, um diese bei einem nachfolgenden Workshop bereits auswerten zu können.

Die Umfrage wurde im Rahmen des Kickoff-Treffens des PV PILOT Projekts durchgeführt und erhielt insgesamt 89 Antworten, von denen 43 vollständig waren.

ERGEBNISSE DER UMFRAGE

Diagramme sind im Anhang zusammengestellt

1. Teilnehmer

- Mehr als die Hälfte der Teilnehmer sind Produktionsmittelhersteller in der PV Industrie
- Jeweils ca. 35 Teilnehmer in den Bereichen Solarzelle und Solar Module, ca. 20 aus dem Bereich der Kristallisation und Wafer-Technologien.

2. Interesse an der Pilotlinie und Infrastruktur:

- Die Mehrheit der Teilnehmer zeigte großes Interesse an der Entwicklung einer Pilotlinie und der dazugehörigen Infrastruktur.
- Etwa ein Drittel der Teilnehmer bevorzugt einen Standort für eine Piloteinrichtung in Deutschland oder im Umkreis von 100 km, ein weiteres Viertel hält auch die EU für einen akzeptablen Standort. Nur 12 % der Teilnehmer können sich eine Pilotlinie in einer der wachstumsstarken Produktionsregionen Nordamerikas oder Indiens vorstellen. Nur ein Teilnehmer bevorzugt China als Produktionsstandort.
- Es wurde ein starkes Bedürfnis nach einer solchen Einrichtung festgestellt, um die Forschung und Entwicklung in der Solarbranche voranzutreiben.



- Die Teilnehmer sehen verschiedene Vorteile der Pilotlinie, von Forschung und Entwicklung bis zur Demonstration für potenzielle Kunden und zur Bemusterung verkaufter Anlagen. Nachteile sind nicht erkennbar.
- Zu der Frage des Konzepts einer verteilten Pilotlinie äußern sich etwa 30 Teilnehmer, dass sie dieses Konzept als nützlich oder akzeptabel empfinden, während etwas mehr als 10 Teilnehmer es als nicht nützlich bezeichnen.

3. Finanzielle Beteiligung:

- Die Umfrage ergab, dass die Teilnehmer bereit sind, in Summe nur bis zu ca. 1,2 Millionen Euro jährlich in die Pilotlinie zu investieren.
- Auf die Frage der mögliche Nutzungsdauer gibt ein Großteil 3-5 Jahre an.
- Öffentliche Fördermittel wurden als eine der wichtigsten Finanzierungsquellen identifiziert.
- Grundsätzlich wird durch die Bereitstellung einer Pilotlinie das finanzielle Engagement in die Forschung und Entwicklung, was sich jedoch auch mit dem beschränkten Budget vieler Firmen erklären lässt.

4. Technologische Schwerpunkte:

- Die Frage der in der Produktionslinie zu berücksichtigenden Wertschöpfungsschritte deckt sich weitestgehend mit den Kunden und Produkten der anwesenden Teilnehmer. Darüber hinaus ist die Nachfrage nach einer Perowskit/Tandem-Pilotlinie fast so hoch wie die nach der Zell- und Modulfertigung.
- Es wurde betont, dass die Linie sich primär auf bestehende Technologien wie TOPCon und HJT konzentrieren sollte, aber auch erweiterbar für Perowskit/Tandem und Tandem sein sollte. Auch für den Bereich der Kristallisation und des Waferings besteht Interesse.
- Reserveplatz für neue oder alternative Anlagen sind allen Teilnehmern wichtig.
- Vertraulichkeit bezüglich IP ist wichtig
- Bei der Notwendigkeit eines 24/7 Betriebs scheint es geteilte Ansichten zu geben

5. Institute

- Die Mehrheit der Teilnehmer ist sich einig, dass die Forschungseinrichtungen erhalten bleiben müssen, um flexible Entwicklungen mit niedrigem TRL zu ermöglichen.
- Alle Teilnehmer stimmen darin überein, dass die Fördermittel der Institute nicht stark gekürzt werden dürfen.



AP 0.2 WORKSHOP

EINLEITUNG UND ZIELE

Zu Projektbeginn sollte ein Workshop mit wichtigen deutschen Akteuren veranstaltet werden, in dem der Bedarf an einer Pilotlinie im Detail ermittelt wird. Der Workshop sollte Ergebnisse liefern, die die Basis für die Projektplanung darstellen und frühzeitig eine breite Beteiligung sichern. Die Einbindung des Workshops in die Jahrestagung des VDMA Photovoltaik Produktionsmittel erwies sich als passend. Insbesondere konnte der Workshop damit sehr schnell initiiert werden.

Am 23. Oktober 2024 fand der „PV PILOT Workshop“ beim VDMA in Frankfurt am Main statt. Organisiert wurde die Veranstaltung vom PV PILOT Projektkonsortium (RCT Solutions, VDMA Photovoltaik Produktionsmittel, Fraunhofer ISE, Institut für Solarenergieforschung Hameln – ISFH, Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie und dem ISC Konstanz). Moderator war Dr. Torsten Brammer (Wavelabs & The Solar Journey).

Unter den 45 Teilnehmenden befanden sich Vertreter aus dem Maschinenbau, der Forschung, Hersteller, Materiallieferanten, Integratoren sowie politische Vertreter und Fördermittelgeber. Die angeregte und konstruktive Atmosphäre mit vorbereitenden Präsentationen, interaktiven Gruppengesprächen und Diskussionen an Stellwänden ermöglichte konkrete Ergebnisse.

ABLAUF

- Begrüßung durch Dr. Matthias Stranzenbach (BMW) und Dr. Christoph Hünnekes (PtJ)
- Vorstellung PV PILOT und der wichtigsten Ergebnisse des LIBERTAS-Projekts (~~Folien im Anhang~~)
- Präsentation einer Umfrage zum Interesse an Pilotlinie und Infrastruktur (~~Folien im Anhang~~)
- Vorstellung der Partner und ihrer Forschungseinrichtungen (~~Folien im Anhang~~)
- Arbeit in Expertengruppen mit anschließender Präsentation der Ergebnisse
- Podiumsdiskussion zum Standort und zur Finanzierung

EXPERTENGRUPPEN: ERGEBNISSE DER THEMATISCHEN ARBEITSGRUPPEN

Für die Arbeit in Expertengruppen wurden fünf Stellwände zu verschiedenen Themen aufgestellt. Die Teilnehmer konnten sich in wechselnden Gruppen intensiv zu jedem Thema austauschen.

1. Spezifikation der Linie

Betreuer: Rudolf Harney, ISC

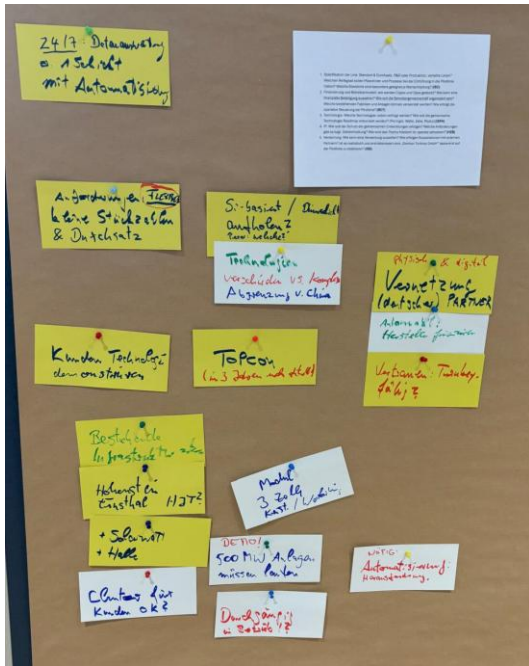


Abbildung 2: Diskussion über Standort, Durchsatz, Flexibilität und geeignete Technologien

Diskussion über Standort, Durchsatz, Flexibilität und geeignete Technologien:

- Eine vollautomatisierte Linie bietet Potenzial für das Testen und Demonstrieren von Maschinen und Technologien, erfordert jedoch Flexibilität, um unterschiedliche Technologien unterstützen zu können. Z.B. 5.000 Zellen pro Woche (als Standby) und bei Bedarf mehr erscheint sinnvoll.
- Die Linie sollte zukunftsfähig sein und State-of-the-Art-Technologien wie TOPCon unterstützen, jedoch auch neue Ansätze für kommende Technologien bieten.
- Die Option einer verteilten Linie über mehrere Standorte hinweg wurde diskutiert, was möglicherweise die Anpassung an spezifische Anforderungen von verschiedenen Wertschöpfungsstufen erlaubt.
 - Verteilte Linie - konkret (1) Kristallisation & Wafering / (2) Zelle / (3) Modul - scheint sinnvoll
 - Konkret hat Andreas Waltinger (Meyer Burger) die Möglichkeit einer Nutzung der Pilotlinie in Hohenstein-Ernstthal für HJT ins Gespräch gebracht (weitere Gespräch sollten folgen)
 - Die Nutzung der bestehenden Pilotlinie von Q CELLS in Talheim scheint laut Jörg Müller nicht grundsätzlich ausgeschlossen (weitere Gespräch sollten folgen)
 - Für eine Modullinie könnte Solarwatt und Heckert angefragt werden.



2. Finanzierung und Betreibermodell

Betreuer: Wolfgang Jooß, RCT

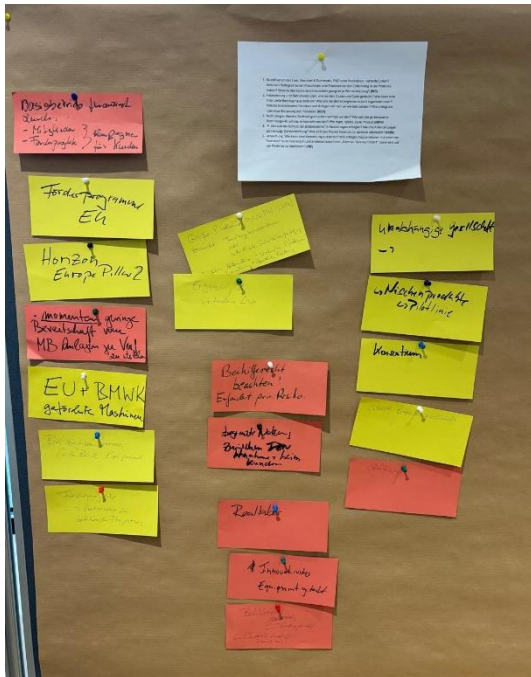


Abbildung 3: Diskussion über Herausforderungen der Finanzierung und Betriebskosten:

- Öffentliche Fördermittel wurden als eine der wichtigsten Finanzierungsquellen identifiziert, einschließlich der Prüfung auf EU-Ebene (z.B. Horizon Europe Pillar 2) oder BMWK-Förderung von Reallaboren.
- Maschinenbauer zeigten begrenzte Bereitschaft zur kostenfreien Ausstattung der Pilotlinie mit eigenen Maschinen. Eine größere Bereitschaft zur Beteiligung scheint nur möglich, wenn dadurch erhöhte Umsätze für den Maschinenbau zu erwarten sind.
- Die Möglichkeit einer Kooperation, bei der die Maschinen für eine begrenzte Zeit (z.B. 3-6 Monate) für einen FAT in der Pilotlinie betrieben werden, wurde als potenzieller Mehrwert für Maschinenbauer und deren Kunden diskutiert.
- Kombination einer Pilotlinie mit Fertigung scheint speziell für Nischenprodukte attraktiv (beispielsweise angepasste Module für Dächer oder carports und VIPV Zellen und Module).
- Mögliche (im weiteren Projekt zu prüfende) Betreiber:
 - Unabhängige Gesellschaft
 - Konsortium aus Interessenten
 - Stiftung
 - Staatliche Betreibergesellschaft



3. Technologie

Betreuer: Thorsten Dullweber, ISFH

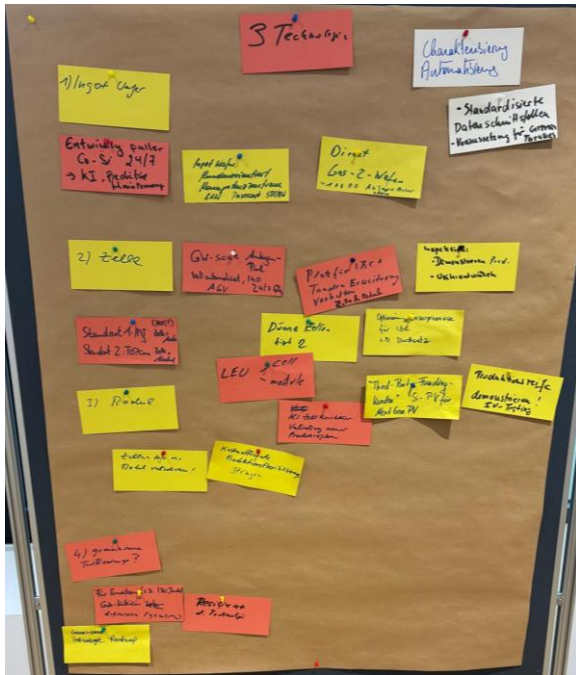


Abbildung 4: Diskussion über Technologie-Roadmap und geeignete Produktionsprozesse:

- Ingot- und Wafer- sowie Zell-Pilotlinien weckten das größte Interesse, mit Fokus auf Produktionstauglichkeit im Maßstab von 100 MW bis 1 GW.
 - Konkret: PVA Tepla Cz Ingot + Wafer, Nexwafe Epitaxie
 - Module: M10 wünscht sich Demonstration Ihres flexiblen Stringprozesses ihres neuen Matrixstringers in einer Pilotlinie im mit hohem Durchsatz.
- Die Linie sollte sich primär auf bestehende Technologien wie TOPCon und HJT konzentrieren und gleichzeitig aber auch erweiterbar für IBC und Tandem sein, um die Zukunftsfähigkeit sicherzustellen.
- Ein vollständiger Prozess bis hin zum fertigen Modul wird als notwendig erachtet, um die Technologiereife im Bereich Zelle und Wafer zu demonstrieren.
- Die Meinungen zu einer gemeinsamen Technologie Roadmap waren geteilt. Einige Teilnehmer fanden es gut, eine gemeinsame Roadmap für die Pilotlinie abzustimmen und zu entwickeln. Andere Teilnehmer wollten lieber erst mal für sich vorentwickeln.



4. IP- und Geheimhaltungsschutz

Betreuer: Rutger Schlatmann, HZB

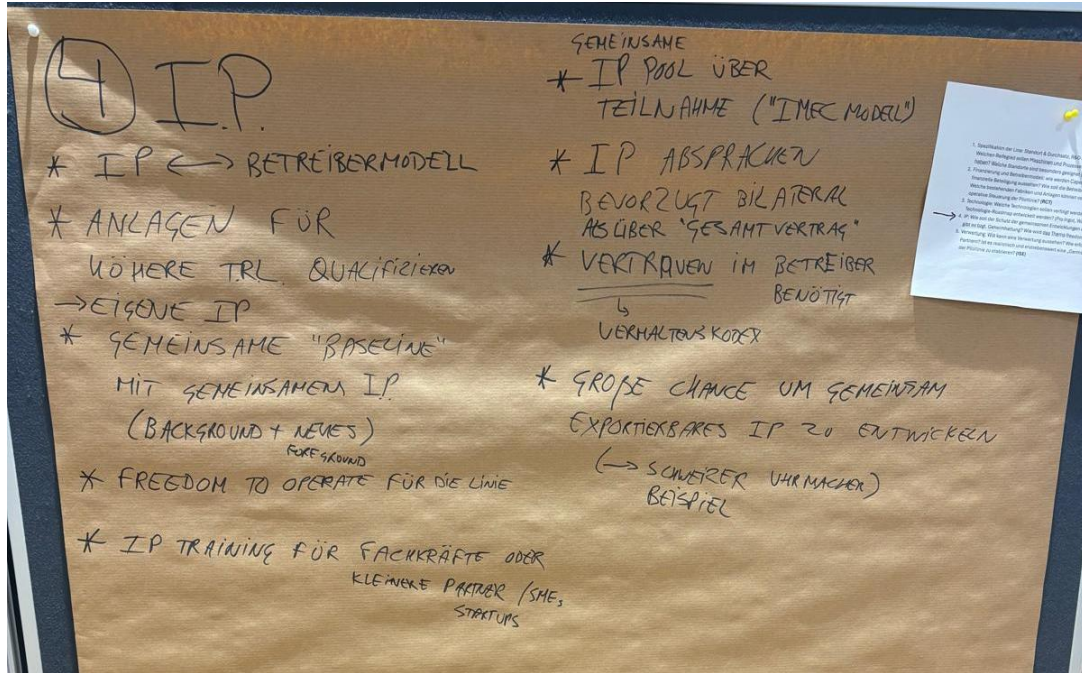


Abbildung 5: Überlegungen zur Handhabung des geistigen Eigentums

- Der Schutz des geistigen Eigentums ist eng mit dem Betreibermodell verbunden, wobei ein gemeinsames IP-Framework als Grundlage dient.
- Eine transparente und vertrauensvolle Zusammenarbeit innerhalb der Betreibergesellschaft wurde als essenziell betrachtet.
- Ein Konzept ähnlich dem IMEC-Modell in Belgien mit schlanken Vertragsstrukturen könnte eine praktikable Lösung sein.



5. Verwertung

Betreuer: Jochen Rentsch und Ralf Preu, ISE

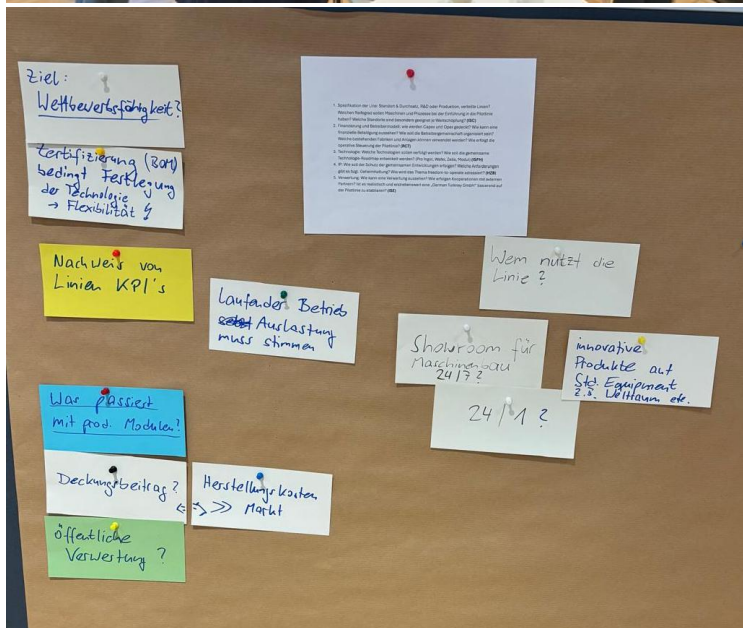


Abbildung 6: Strategien zur praktischen Nutzung der Ergebnisse der Pilotlinie

Strategien zur praktischen Nutzung der Ergebnisse der Pilotlinie:

- Entscheidend für die Verwertungsstrategie ist die Frage: Wem nützt die Pilotlinie?
- Eine Pilotlinie, die die Produktentwicklung zum Ziel hat, muss am Ende als „Produkt“ ein voll zertifiziertes Produkt ausstoßen, das am Markt bestehen kann.
- Eine Pilotlinie, die insbesondere deutschen Anlagenherstellern als Demonstrator dienen soll, kann die KPIs der Linie nachweisen (Showroom).
- Die Verwertung von realen Produkten (=Modulen) aus der Pilotlinie setzt eine hohe Auslastung voraus, um halbwegs zu akzeptablen Kosten zu produzieren, aber aufgrund der noch geringen Größe ist die Wettbewerbsfähigkeit unrealistisch, d.h. der potentielle Verkaufspreis liegt deutlich über dem Markt. Wer trägt den Deckungsbeitrag?
- Eine Verwertung der entstehenden Module in öffentlichen Ausschreibungen ist unrealistisch, da auch öffentliche Ausschreibungen strengen, insbesondere



wettbewerblichen Regeln unterliegen, eine bevorzugte Behandlung von Produkten aus einer ebenfalls geförderten Pilotlinie ist daher unwahrscheinlich / nicht möglich (klare Rückmeldung PtJ und BMW im Rahmen der Diskussion).

- Für die Pilotlinie als Showroom besteht die Herausforderung in der Wirtschaftlichkeit und Finanzierbarkeit (Anlagenhersteller können ihr Equipment nicht kostenlos zur Verfügung stellen) und Flexibilität (z.B. auch in Richtung innovativer Hocheffizienzprodukte (ehemals Nische)). Nicht jeder Technologiestrang wird sich in voller Größe realisieren lassen. Die Attraktivität einer Pilotlinie für die nicht zum Zuge kommenden Anlagenhersteller ist daher begrenzt.
- Gleiches gilt für das Konzept der "German Turnkey GmbH", dies kann nur mit einem ausgewählten Kreis von Anlagenherstellern funktionieren. Ansonsten stellt sich die Frage, wer bei welchem Kunden zum Zuge kommen soll, da viele Anlagenhersteller auch im Wettbewerb zueinanderstehen.

PODIUMSDISKUSSION



Abbildung 7: Podiumsdiskussion zum Workshop

Die Podiumsdiskussion war ein weiteres Highlight des Workshops. Die Panelteilnehmer, Sebastian Gatz (Von Ardenne), Holger Kühnlein (RENA), Rutger Schlatmann (HZB), und Rolf Schmitz (RSMANCONS Schmitz), beleuchteten unterschiedliche Perspektiven auf die Herausforderungen und Chancen einer Pilotlinie. Sebastian Gatz und Holger Kühnlein machten deutlich, dass der Maschinenbau aktuell nur begrenzte Möglichkeiten zur Bereitstellung von Maschinen für eine Pilotlinie sieht, und appellierten an die Politik, den gesellschaftlichen Mehrwert einer Pilotlinie zu bewerten und gegebenenfalls zu unterstützen. Rutger Schlatmann wies auf die Bedeutung europäischer Förderprogramme und Regularien hin, während Rolf Schmitz betonte, dass insbesondere die Kristallisations- und Wafering-Industrie in Deutschland von einer Pilotlinie profitieren würde.



FAZIT

Der Workshop offenbarte ein großes Interesse an einer Pilotlinie zur Unterstützung der Solarbranche in Deutschland. Allerdings herrscht eine geringe Bereitschaft zur Finanzierung. Die Forschungsinstitute betonten die Bereitschaft zur intensiven Kooperation.

Wichtige Punkte für die weitere Projektplanung sind:

- Hervorhebung des Nutzens einer Pilotlinie, um die Finanzierungsmöglichkeiten zu erweitern. Insbesondere soll der Maschinenbau dahingehend angesprochen werden, auch bezüglich der Kooperation innerhalb einer „German Turnkey“ Allianz.
- Prüfung europäischer Förderprogramme und Entwicklung alternativer Konzepte wie einer verteilten Linie oder Nutzung bestehender Infrastrukturen (z.B. Meyer Burger).
- Betonung der Bedeutung der Linie für Nischenprodukte und die potenzielle internationale Nachfrage.

Der Workshop verdeutlichte, dass eine umfassende Unterstützung von staatlicher Seite derzeit unwahrscheinlich ist. Viele Maschinenbauer fokussieren sich weniger auf den PV-Sektor, und nur wenige Unternehmensmitglieder treiben diese Projekte voran. Dennoch bleibt das Interesse an einer Pilotfertigung in anderen Ländern, insbesondere den USA und Indien, bestehen. Der deutsche Maschinenbau signalisierte durch seine Präsenz, dass weiterhin Bedarf und Engagement vorhanden sind.

AUSBLICK

Mit den Ergebnissen des Workshops und den Beiträgen der Expertengruppen werden die Projektpartner einen Fahrplan erstellen, der konkrete Umsetzungsmöglichkeiten und Finanzierungsstrategien für eine Pilotlinie in Deutschland aufzeigt. Die Erkenntnisse bieten eine fundierte Grundlage für die weitere Projektentwicklung und eine mögliche Realisierung einer Pilotproduktion als wichtigen Schritt für die Solarindustrie in Deutschland.



AP 1: AUSARBEITUNG DER SZENARIEN

Koordination: ISC – Beteiligte Partner: ISC, HZB, ISE, RCT, ISFH

EINLEITUNG

Ziel dieses Arbeitspakets ist es, verschiedene Szenarien und Modelle für die Umsetzung einer Pilotlinie zu erstellen. Diese Szenarien sollen die Bandbreite der möglichen Umsetzungen abdecken, von umfassenden industriellen Pilotlinien bis hin zu virtuellen Pilotlinien, die vorhandene Infrastrukturen nutzen. Die unterschiedlichen Anforderungen und Bedingungen der Stakeholder sollen berücksichtigt werden. Diese Szenarien sollen anschließend in einer ersten Analyse bezüglich ihrer Erfüllung der Anforderungen aus AP 0 überprüft werden und legt die Grundlage für die weitere Planung und Entwicklung der Pilotlinie.

Ein wichtiges Ergebnis aus dem Workshop war, dass derzeit zwar das Interesse an einer Pilotlinie groß ist – aber kaum Bereitschaft der Industriepartner erkennbar war, sich finanziell zu beteiligen. Daher haben wir uns im Konsortium und in Abstimmung mit PtJ darauf verständigt, alternative Lösungen zu einer kostenintensiven, neu zu errichtenden Pilotlinie in den Vordergrund zu stellen.

Wir betrachten trotzdem zunächst grundsätzlich die Extremfälle:

A Industrielle Pilotlinie: Eine vollständige Pilotlinie, die alle Schritte der Wertschöpfungskette vom Kristall (Ingot) bis zum fertigen Modul abdeckt, industriellen Durchsatz ermöglicht, rund um die Uhr (24h/7d) betrieben wird und mit Automatisierung sowie Inline-Messtechnik ausgestattet ist. Sowie

B verteilte Pilotlinie: Nutzung der vorhandenen Infrastruktur der Forschungsinstitute und Maschinenbauer, um eine virtuelle, dezentrale Pilotlinie zu schaffen.

Weitere, relevante Szenarien, die zwischen den beiden Extremfällen A und B liegen sind:

α eine angedockte Pilotlinie, die an eine neu entstehende deutsche oder europäische Fertigung angegliedert wird. Solche Fertigungen werden intensiv geplant, beispielsweise durch NEW Niedersächsische Energie Werke GmbH in Niedersachsen oder von CARBON oder Holosolis in Frankreich. Die Wertschöpfungskette richtet sich nach der Wertschöpfung, welche von der Fabrik abgedeckt wird. Sie sollte mit industriellem Durchsatz betrieben werden und mit Automatisierung sowie Inline-Messtechnik ausgestattet sein. Damit können für die Fertigung alternative (Teil-)Prozesse erprobt werden oder andere Anlagen. Sie soll aber auch für externe offen sein (Maschinenbaufirmen oder Forschungseinrichtungen).

β Nutzung bestehender Produktions- oder Pilotlinie: In Deutschland betreiben beispielsweise Q CELLS in Thalheim oder Meyer Burger in Hohenstein-Ernstthal Pilotlinien. Beide Firmen sind im Umbruch, andere (beispielsweise Solarwatt) haben Fertigung oder Pilotfertigung geschlossen. Hier könnte eine verteilte Pilotlinie mit bestehendem Labor und Anlagen entstehen.



AP 1.1: ERARBEITUNG VON SZENARIEN UND MODELLEN FÜR DIE UMSETZUNG EINER PILOTLINIE

Tabelle 1: Erarbeitung der Szenarien

Standorte / Technologien	Komplett neue Linie	Andocken an neue Fertigung (z.B. NEW)	Verwendung Industrielinien	Verwendung Institutslinien
	A	α	β	B
1. Zellen				
TOPCon	300 MW	300 MW	Ca.100 MW (Q CELLS)?	ISC (1,33 MWp M6 & 2 MWp M12 ab Mitte 25), ISE (12 MWp/a), ISFH (6 MWp M2 & 20 MWp (M10) ab 2026),
TBC (TOPCon BC)	300 MW	300 MW	100 MW? (Q CELLS + extra equipment)?	ISC (1,3 MW M6 & 2 MWp M12 ab Mitte 25), ISFH (6 MWp & 20 MWp ab 2026)
HJT	300 MW		Zum Erstellungszeitpunkt 50 MW (Meyer Burger), momentane Situation unklar	ISE (50 Zellen am Tag (M10), ca. 145 kWp/a), HZB: max. 12 HJT Zellen (M6) pro Woche.
Perowskit-Topzelle auf Si	30-100 MW			HZB: ca. 10 M6 2TT Zellen pro Woche. ISE (ca. 80 G12 Zellen am Tag) ISFH (ca. 5 G12 Zellen am Tag),
Bottomzelle (2TT, 3TT)				
Tandem 4T bzw. Perowskit single-junction	30-100 MW			ISE, HZB, Größe und Menge offen
Standorte / Technologien	Komplett neue Linie	Andocken an neue Fertigung (z.B. NEW)	Verwendung Industrielinien	Verwendung Institutslinien
	A	α	β	B
2. Wafer				
Cz Pulling	100 MW	100 MW		CSP 6 MWp/a Kristallisation, 20 MWp/a Wafersägen
Epitaktische Wafer	250 MW	Nutzung der Nexwafe Pilotlinie Bitterfeld (50 MW)		
3. Module				
Flexible Module (vgl. Fa. M10)	300 MW	100 MW		ISE (18 MW)
Standard Module	200 MW	100 MW	Solarwatt oder Heckert	ISC 10 MW ab Mitte 2025, ISE (18 MWp/a)



Erläuterungen: Kapazität an Instituten (für den genannten Prozess) bedeutet: Prozessschritt mit geringstem Durchsatz, unabhängig von tatsächlicher Automatisierung. Das ist nicht realistisch, aber macht es vergleichbar und gibt mit Abschlägen ein realistisches Bild, welche Kapazität möglich wäre.

Fazit: Eine komplette Pilotlinie für Wafer-Zelle-Modul + Tandem lässt sich entweder

1. **A** mit 100 ... 300 MW Durchsatz neu aufbauen und wäre damit für die Entwicklung und zum Equipment Test optimal geeignet. Oder
2. **B** mit Größenordnung 2 MWp ... 10 MWp Durchsatz an Pilotlinien der Institute realisieren.

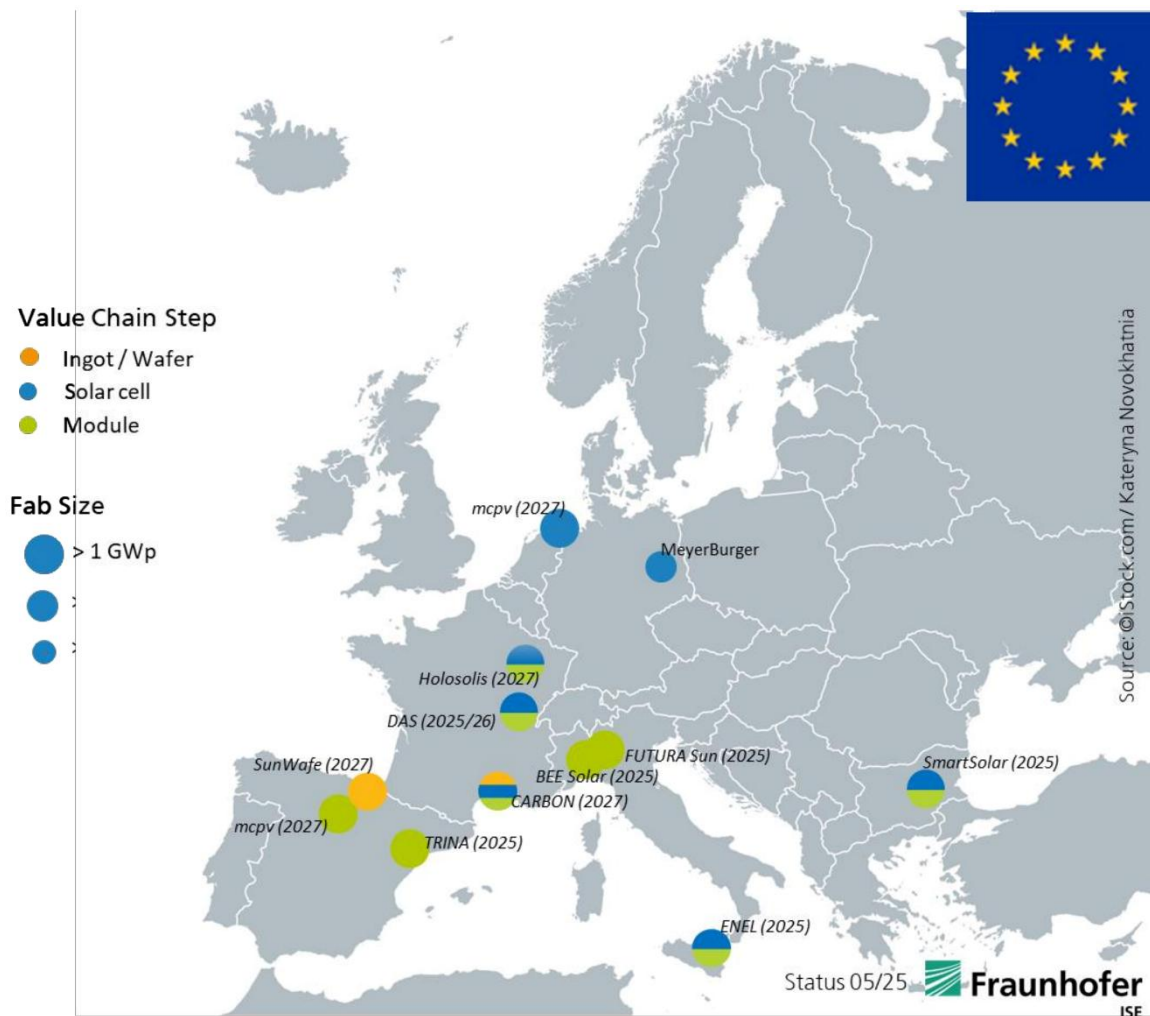


Abbildung 8: Bestehende und geplante große (> 1 GWp) Photovoltaik-Fertigungsstätten in Europa (basierend auf Angaben des Konsortiums)



- Das Andocken an eine neue Fertigung α ist technisch sehr interessant, aber es ist unklar, wann und ob die Fertigungen entstehen, daher sollte damit derzeit nicht geplant werden. Zwar erscheint diese Option technologisch attraktiv – insbesondere hinsichtlich Skalierbarkeit, Automatisierung und Industrienähe – doch steht sie derzeit vor erheblichen praktischen Herausforderungen: Derzeit existiert in der EU nur eine einzige Produktionsstätte im Gigawatt-Maßstab, und neue Fabriken dieser Größenordnung befinden sich frühestens ab Ende 2025 im Aufbau (Abbildung 8). Das europäische Produktionsökosystem ist aktuell noch geprägt durch eine Vielzahl kleinerer Fertigungen mit begrenztem Integrationspotenzial für externe Pilotaktivitäten. Um in der industriellen Umsetzung Schritt zu halten, ist es daher entscheidend, dass Forschungseinrichtungen und Turnkey-Anbieter frühzeitig und aktiv in entstehende Großprojekte in Deutschland und der EU eingebunden werden.
 - Parallel dazu gilt es, die Entwicklungen in dynamischen Auslandsmärkten – etwa in Indien, den USA oder MENA-Staaten – zu beobachten und gezielt Kooperationen anzustreben. Eine Kopplung an industrielle Linien bleibt perspektivisch eine wertvolle Option, erfordert aber strategisches Timing und enge Partnerschaften mit den jeweiligen Betreiberkonsortien.
- Die Verwendung bestehender industrieller Linien β (Q CELLS, Meyer Burger, Solarwatt, ...) scheint derzeit ebenfalls sehr unsicher und es können je nur bestimmte Teile der gewünschten Technologien (z.B. TOPCon bei Q CELLS und evt. HJT bei Meyer Burger) realisiert werden. Damit würde die Entwicklung nicht durch Anforderung der Maschinenbauer oder neuer Technologien bestimmt, sondern durch bestehende Linien.

Daher diskutieren wir im Folgenden detailliert die Möglichkeiten, eine verteilte Pilotlinie an den Laboren der Forschungsinstitute

- ISC Konstanz
- Fraunhofer ISE
- ISFH Hameln und
- HZB

aufzubauen. Dabei werden verschiedene Szenarien geprüft, beispielsweise

- ein Forschungs-Hub Nord (ISFH + HZB + CSP) sowie ein Forschungs-Hub Süd (ISC + ISE) oder
- eine virtuelle c-Si Linie (ISC + ISE + ISFH), eine virtuelle HJT Linie (ISE + HZB), eine virtuelle Tandem Linie (ISE + ISFH + HZB), eine Wafer Pilotlinie (CSP) und eine virtuelle Modul Linie (ISC + ISE + ISFH).

Im Detail ist zu prüfen, wie einfach und schnell in virtuellen Linien geplant werden kann und wie schnelle Experimente mit unterschiedlichem Equipment durchgeführt werden können – auch für potenzielle Turnkeykonsortien.



NÄCHSTE SCHRITTE:

- Kombinationen und detailliertere Szenarien: z.B. o.g. Szenarien oder Zellen in Instituten und Module bei Solarwatt, o.a. (AP 1.2).
- Kosten der Szenarien (für jeden Eintrag der Tabelle) abschätzen (AP 4)
- Betreibermodelle (AP 3)
- Prüfung der Akzeptanz einer virtuellen Linie. Teilweise wurde von einzelnen Maschinenbauern schon Bedenken geäußert, ob so eine Linie, die über mehrere Standorte verteilt ist, nützlich ist.

AP 1.2 ANALYSE DER SZENARIEN

Die Anforderungen aus dem PV PILOT Workshop (AP0) zeigen den Bedarf an einer flexiblen, zukunftssicheren und zugleich wirtschaftlich tragfähigen Pilotlinie, die den deutschen PV-Maschinenbau und die Materialhersteller stärkt und eine praxisnahe Entwicklungs- und Demonstrationsplattform bereitstellt.

Dies sind die wichtigsten Anforderungen thematisch untergliedert:

1. Technische Anforderungen

- Durchsatz und Flexibilität
 - Standby-Kapazität von ca. 5.000 Zellen pro Woche, erweiterbar bei Bedarf.
 - Vollständige Abdeckung der Prozesskette (Ingot, Wafer, Zelle, Modul) im Bereich 100 MW bis 1 GW.
- Zukunftsfähige Technologien
 - Primär State-of-the-Art (z. B. TOPCon, HJT), erweiterbar auf IBC und Tandem.
 - Zukunftssicherheit und Modularität bei Anlagen und Prozessen.
- Anlagenkonzept (verteilte Linie)
 - Aufteilung in (1) Kristallisation & Wafering, (2) Zelle, (3) Modul.
 - Möglichkeit zur Kopplung mit (Nischen-) Fertigungsstandorten (z. B. VIPV, angepasste Modulformate).

2. Finanzierung und Wirtschaftlichkeit

- Öffentliche Fördermittel
 - Prüfung von EU-Programmen (z. B. Horizon Europe, InvestEU) und nationalen Förderoptionen (z. B. BMW); jedoch derzeit geringe BMW-Unterstützung.
- Beteiligung der Industrie
 - Maschinenbauer nur eingeschränkt bereit, kostenfrei Maschinen beizusteuern; finanzielle Beteiligung abhängig von zu erwartenden Umsatzsteigerungen.
 - Kombination von Pilotlinie und Fertigung als Chance für Nischenprodukte.



3. Nutzungskonzept und Mehrwert

- Produktentwicklung & Zertifizierung
 - Die Pilotlinie sollte ein fertiges, zertifiziertes Produkt herstellen können, um Marktzugang und Produktionsreife zu demonstrieren.
- Showroom für Maschinenbau & Materialhersteller
 - Vorführung von Maschinen- und Anlagen-KPIs für potenzielle Kunden.
 - Turnkey-Konsortien sollen Lösungen in realer Umgebung testen und weiterentwickeln können.

4. Governance, IP und Zusammenarbeit

- Betreibergesellschaft und IP
 - Gemeinsames IP-Framework als Grundlage, um geistiges Eigentum zu schützen und klar zu regeln.
- Vertrauensvolle Kooperation
 - Transparenz und enge Abstimmung zwischen allen Partnern (Maschinenbau, Forschung, Betreiber, Politik).



Tabelle 2: Anforderungen

1. TECHNISCHE ANFORDERUNGEN	Ind. Linie A	Angedockte Pilotlinie α	bestehende Linien β	Verteilte Pilotlinie B
Durchsatz und Flexibilität				
Standby-Kapazität von ca. 5.000 Zellen pro Woche, erweiterbar bei Bedarf.	Ja	Ja	Ja	Ja
Vollständige Abdeckung der Prozesskette (Ingot, Wafer, Zelle, Modul) im Bereich 100 MW bis 1 GW.	Ja	Je nach Fertigung	Verteilt	Nein (100MW+)
Zukunftsfähige Technologien				
Primär State-of-the-Art (z. B. TOPCon, HJT), erweiterbar auf IBC und Tandem.	Ja	Verm. unflexibel	Kaum möglich	Ja
Zukunftssicherheit und Modularität bei Anlagen und Prozessen, damit auch neue Anlagen und Zellprozesse eingebracht werden können.	Ja	Verm. unflexibel	Kaum möglich	Ja
Anlagenkonzept (verteilte Linie)				
Aufteilung in (1) Kristallisation & Wafering, (2) Zelle, (3) Modul.	Ja	Je nach Fertigung	Bestand begrenzt	Ja
Möglichkeit zur Kopplung mit (Nischen-) Fertigungsstandorten (z. B. VIPV, angepasste Modulformate).	Ja	Ja	Ja	Ja
2. FINANZIERUNG UND WIRTSCHAFTLICHKEIT	Ind. Linie A	Angedockte Pilotlinie α	bestehende Linien β	Verteilte Pilotlinie B
Öffentliche Fördermittel				
Prüfung von EU-Programmen (z. B. Horizon Europe) und nationalen Förderoptionen (z. B. BMW); jedoch derzeit geringe BMW-Unterstützung.	Ja	Ja	Verm. schwierig	Ja
Beteiligung der Industrie				
Maschinenbauer nur eingeschränkt bereit, kostenfrei Maschinen beizusteuern; finanzielle Beteiligung abhängig von zu erwartenden Umsatzsteigerungen.	Problem	Problem	Bestand nutzbar?	Anlagen vorhanden
Kombination von Pilotlinie und Fertigung als Chance für Nischenprodukte.	Ja	Ja	Ja	Ja
3. NUTZUNGSKONZEPT UND MEHRWERT	Ind. Linie A	Angedockte Pilotlinie α	bestehende Linien β	Verteilte Pilotlinie B
Produktentwicklung & Zertifizierung				
Die Pilotlinie sollte ein fertiges, zertifiziertes Produkt herstellen können, um Marktzugang und Produktionsreife zu demonstrieren.	Ja	Ja	Ja	Ja
Showroom für Maschinenbau & Materialhersteller				
Vorführung von Maschinen- und Anlagen-KPIs für potenzielle Kunden.	Ja	Ja	Verm. unflexibel	Ja
Turnkey-Konsortien sollen Lösungen in realer Umgebung testen und weiterentwickeln können.	Ja	Ja	Verm. unflexibel	Ja
4. GOVERNANCE, IP UND ZUSAMMENARBEIT	Ind. Linie A	Angedockte Pilotlinie α	bestehende Linien β	Verteilte Pilotlinie B
Betreiber-gesellschaft und IP				
IP-Schutz der Kunden gewährleistet	Ja	Wettbewerb zu Lfd. Fert.	Wettbewerb zu Eigent..	Ja
Gemeinsames IP-Framework als Grundlage, um geistiges Eigentum zu schützen und klar zu regeln.	Ja	Wettbewerb zu Lfd. Fert.	Wettbewerb zu Eigent..	Ja
Vertrauensvolle Kooperation				
Transparenz und enge Abstimmung zwischen allen Partnern (Maschinenbau, Forschung, Betreiber, Politik).	Ja	Interessens-konflikt?	Interessens-konflikt?	Ja



ZUSAMMENFASSUNG:

Die Konzepte für eine Pilotlinie

A Komplette neue Linie

α Andocken an neue Fertigung (z.B. NEW)

β Verwendung Industrielinien und

B Verwendung Institutslinien

Eine Gegenüberstellung mit den im Workshop definierten Anforderungen ergab, dass Konzepte **A** und **B** deutlich mehr Punkte erfüllen als **α** und **β**. Grund dafür ist die geringere Flexibilität bei **α** und **β**, da bei der Anbindung an bestehende oder neue Fertigungen stets die Betreiber mitentscheiden müssen – beispielsweise bei Erweiterungen, Nutzungsrechten oder technischen Erneuerungen. Das kann insbesondere für Turnkey-Konsortien problematisch sein, die auf eine durchgängige Anpassbarkeit und Offenheit der Linie angewiesen sind.

Der größte Unterschied zwischen **A** und **B** liegt im möglichen Durchsatz. Eine neue, großdimensionierte Linie (z. B. 300 MW+) bietet erheblich höhere Kapazitäten, was besonders für den Maschinenbau und Turnkey-Konsortien interessant ist. Sie könnten dort ihre Technologien in größerem Maßstab demonstrieren und potenziellen Kunden im laufenden Betrieb vorstellen. Demgegenüber stehen jedoch hohe Investitionskosten und lange Realisierungszeiten: Die Beantragung und der Aufbau einer solchen Linie (ggf. mithilfe von EU-Fördermitteln) dürften mindestens fünf Jahre in Anspruch nehmen.

Bei den Institutslinien (Konzept **B**) hingegen besteht bereits Infrastruktur, die an vielen Standorten aktuell modernisiert wird. Eine Verknüpfung zu einer verteilten Pilotlinie könnte daher mit geringem finanziellem und zeitlichem Aufwand realisiert werden.

Im weiteren Projektverlauf soll nun vor allem das Konzept einer verteilten Linie an den Instituten detaillierter ausgearbeitet werden.

ERFÜLLTE MEILENSTEINE:

Meilenstein MS 1.1: Eine detaillierte Liste von Szenarien für die Umsetzung einer Pilotlinie, die die verschiedenen Anforderungen der Stakeholder abdeckt

Meilenstein MS 1.3: Analysebericht, der die Eignung der verschiedenen Szenarien in Bezug auf die Anforderungen aus AP 0 darstellt.



AP 2: BEWERTUNG UND AUSWAHL VON TECHNOLOGIEN UND TECHNOLOGIEPFADEN

Koordination: ISFH, beteiligte Partner: HZB, ISE, ISC, RCT

AP 2.1 AUFSTELLUNG POTENZIELLER TECHNOLOGIEOPTIONEN FÜR DIE PILOTLINE

Koordination: ISFH, beteiligte Partner: HZB, ISE, ISC

Im AP2.1 wurden die an den Instituten ISC, ISE, ISFH und HZB existierenden Wafer-, Zell- und Modultechnologien für c-Si und Perowskit-c-Si Tandemsolarzellen zusammengestellt, um einen Überblick über relevante Technologieoptionen für die Pilotlinie zu erhalten. Während im Ingot / Wafer Bereich nur das Fraunhofer CSP eine Cz-Technologie vorrätig hat, gibt es im Bereich c-Si Solarzelle (TOPCon, POLO BJ, HJT, verschiedene IBC Varianten), Tandemzelle (verschiedene Pero-Top- und Si Bottom-Zell-Varianten) und Modultechnologien (klassisches Multi BB Lötten auf Ag Pads, Ultraschalllötten von Al, ECA Verbindung, Shingle) eine Vielzahl hochrelevanter PV-Technologien an den Instituten. Zudem wurde die 0BB Modultechnologie notwendig eingestuft, die bisher aber noch nicht an den Instituten zur Verfügung steht.

AP 2.2 BEWERTUNG DER MÖGLICHEN TECHNOLOGIEOPTIONEN ANHAND DER KRITERIEN AUS AP0 UND AP1

Koordination: ISFH, beteiligte Partner: HZB, ISE, ISC, RCT

In AP2.2 wurden die Technologieoptionen bewertet, wie sie derzeit an den Instituten verfügbar sind. Hierfür wurde zunächst diskutiert, welche Bewertungskriterien relevant für eine spätere Pilotlinie und nachfolgend für eine Überführung in die Produktion sind. Ausgewählt wurde der Wirkungsgrad (Stand heute und in 2 Jahren) sowie die Bifazialität als Indikatoren für den zu erwartenden Energieertrag, das aktuelle und in 2 Jahren zu erwartende Technology Readiness Level (TRL), ob die Technologie eher eine Start-Technologie ist (Baseline) oder ein zukünftiges Upgrade, die Cost of Ownership in der Massenproduktion basierend auf einer detaillierten Kostenrechnung von RCT, sowie die Patentlage. Abbildung 9 zeigt eine Übersicht der Effizienzen der Solarzellentechnologien, der Wafergrößen und -Dicken für die Ingot- & Wafertechnologien und der Verschaltungsoptionen für Module, jeweils angeordnet nach ihren TRLs bei den beteiligten Instituten. Abbildung 10 zeigt die Total Cost of Ownership der untersuchten Zelltechnologien, welche von RCT anhand der von den Instituten angegebenen Prozessflüsse und Zelleffizienzen berechnet wurden.



TRL LEVEL of Production Equipment and Process

TRL	Description	Ingot/Wafer		TOPCon		POLO BJ		POLO IBC		Selfi		HJT		p- / n-poly IBC		Pero / c-Si Tandem		Module interconn.	
		now	2 y.	now	2 y.	now	2 y.	now	2 y.	now	2 y.	now	2 y.	now	2 y.	now	2 y.	now	2 y.
1	Basic Research																		
2	Technology Concept Formulated																32		
3	Experimental Proof of Concept															27		laser weld.	
4	Technology Validated in Lab			26.1										26.0				Laser weld.	
5	Advanced scaling: First high throughput tool/processes at final size							24.1				24.5				32			
6	Feasibility: High Throughput and Quality at all stages	G12 150				24.2				23.0								ECA	
7	Pilot Phase: Demonstrated in Continuous Operational Environment	M10 130	G12 130	24.5	25.5		24.8		25.5		25.5		24.2	26				stringer	
8	Industrialization Phase: Mass Production 24/7 – high throughput at GW scale	Transfer		Transfer							Transfer		Transfer					Transfer	
9	Maturity Phase: Standard and dominant in its phase																		

Abbildung 9: Übersicht der von den Instituten zur Verfügung gestellten Technologieoptionen, sowie Effizienzen (in %) der Solarzellentechnologien, die Wafer-Formate und -dicken (in µm) für die Ingot- & Wafer-Technologien und die Verschaltungstechnologien für Module, jeweils angeordnet nach vorhandenem TRL heute und erwartetem TRL in zwei Jahren.

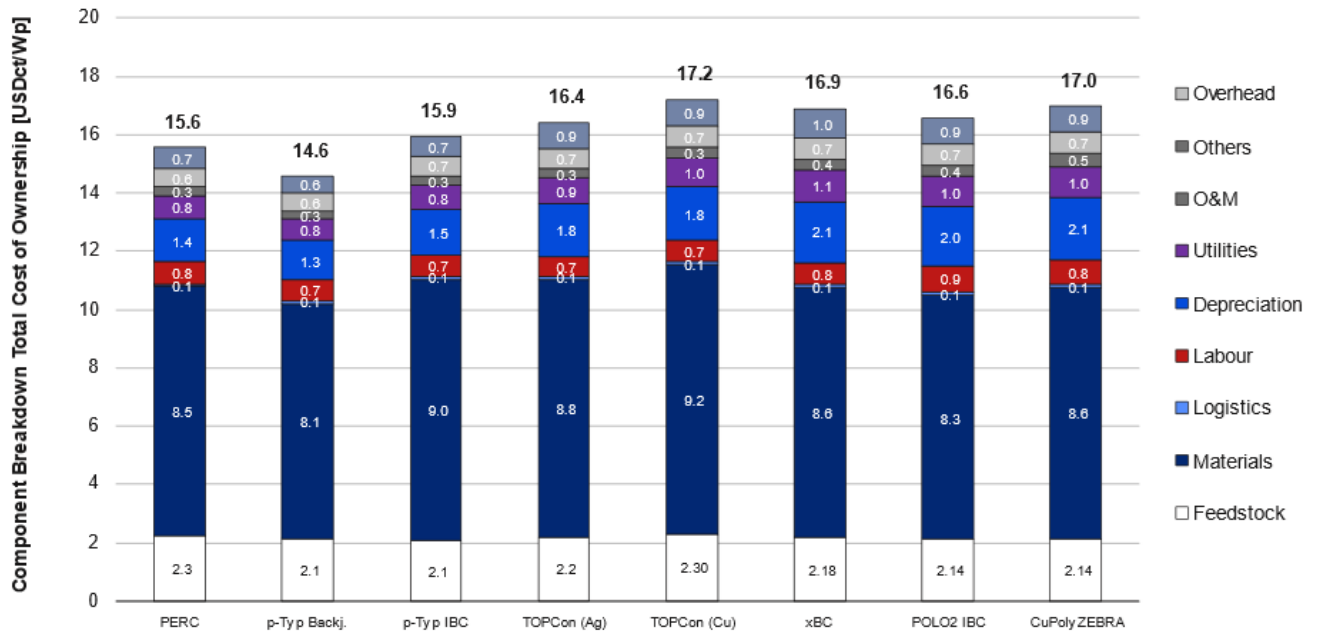


Abbildung 10: Total Cost of Ownership und ihre Zusammensetzung für die untersuchten Zelltechnologien.

In der Ingot- & Wafertechnologie ist im Bereich des Kristallwachstums die aktuell marktbeherrschende Technologie das sogenannte Recharged Czochralski Verfahren (RCz), im Bereich des Wafering die galvanisierte Diamantdrahtsäge-Technologie. Am Fraunhofer CSP steht eine vollständige Prozesskette mit obiger Technologieauslegung zur Verfügung, die Ziehmaschinen sind in der Lage Ingots bis zu einer Größe von 300 mm (Tiegel-Durchmesser 36") zu wachsen, was Flexibilität sowohl für M10- als auch für G12-Wafergrößen ermöglicht. Bei den Anlagen handelt es sich jedoch um Halbleiteranlagen, d.h. die entsprechende Ingotlänge entspricht nicht den heutzutage üblichen Längen (und damit Durchsätzen) der PV Industrie. Aus diesem Grund hat das Fraunhofer CSP mit Partnern aus der Anlagenindustrie (Lapmaster-Wolters, PVA Tepla, RENA) das Projekt SiMatPV beim BMW beantragt, welches die bestehende Pilotlinie am CSP um aktuelle PV Anlagentechnologie



erweitert. Ab 2026 stünde damit am CSP eine vollständige auf TRL 7 bestehende Ingot & Wafer Pilotlinie zur Verfügung.

Die im Zellbereich derzeit marktbeherrschende TOPCon Technologie steht in mehreren Instituten mit einer hohen Technologiereife (TRL7) in Verbindung mit einem guten Wirkungsgrad um 24,5% und zu erwartenden moderaten Herstellkosten um 16 USDcent/Wp zur Verfügung. Es gibt jedoch eine Vielzahl von Patenten Dritter, die einer Nutzung in einer späteren neuen Zelllinie potentiell entgegenstehen können. Daher muss der Betreiber einer neuen Produktionslinie die Patentlage für seinen Produktionsstandort sehr genau bewerten. Da die Nachfrage in neuen Märkten wie Indien, USA und Türkei nach neuen TOPCon Linien sehr hoch ist und dieses ein attraktiver Markt für den deutschen Maschinenbau ist, wird die TOPCon Technologie als hochrelevant für eine industrielle oder eine verteilte Pilotlinie bewertet. Förderbedarf gibt es für die Aufrechterhaltung des TOPCon-Basisprozesses sowie für dessen kontinuierliche Verbesserung. Alternative beidseitig kontaktierte Zelltechnologien wie POLO BJ (geringste Herstellkosten aber auch geringstes Wirkungsgradpotential), Selfi (aktueller Wirkungsgrad und TRL noch zu gering) und HJT (gute Patentlage, aber kein vorhandenes IBC Upgrade) sind ebenfalls interessant, wurden aber aus den genannten Gründen als etwas weniger aussichtsreich eingestuft. Aufgrund des noch höheren Wirkungsgradpotentials von 26% und der damit verbundenen Marktnachfrage werden die p-poly / n-poly IBC Zelltechnologien ebenfalls als sehr relevant für eine Pilotlinie bewertet. Für diese IBC Zellkonzepte gibt es eigenes IP der Institute, aber auch eine Vielzahl von Patenten Dritter, die vom Betreiber einer Produktionslinie im Detail bewertet werden müssen. Für p-poly / n-poly IBC Technologien gibt es noch Entwicklungsbedarf, z.B. Wirkungsgradsteigerung der polyZEBRA Zelle und höheres TRL der POLO² IBC Zelle, damit sie z.B. für eine neue Turnkey-Fabrik ein hochrelevantes Upgrade einer TOPCon Produktionslinie darstellen können. Die POLO IBC Zelle besitzt zwar geringere Herstellkosten, hat aber auch das geringste Wirkungsgradpotential der IBC Technologien und wird daher geringer priorisiert. Die Tandemtechnologien der Institute besitzen ein exzellentes Wirkungsgradpotential bis 34%, aber aktuell noch ein sehr geringes TRL von 3. In den nächsten zwei Jahren streben die Institute an, das TRL der Tandemtechnologien auf 5 zu steigern, welches aber immer noch deutlich unter dem für eine Pilotproduktion benötigten TRL von 7 liegt. Daher wird die Tandemtechnologie noch nicht als reif für eine neue Pilotlinie eingestuft, sollte aber unbedingt in der virtuellen verteilten Pilotlinie zu einem höheren TRL und Wirkungsgradlevel weiterentwickelt werden.

Die Designs von Solarmodulen werden hauptsächlich von den Anforderungen der jeweiligen Märkte und Anwendungen bestimmt, auf die der zukünftige Hersteller abzielt. Große GW-Unternehmen bevorzugen in der Regel ein Produktportfolio, das den Kundenwünschen und Anforderungen der spezifischen Märkte und Anwendungen entspricht. Mit unterschiedlicher Technologiereife können am ISE, ISC und ISFH Module für diese Märkte entwickelt und hergestellt werden. Abbildung 11 gibt einen Überblick über die Prozessoptionen in der Technologieauslegung. Als marktbeherrschende Technologielösung können aktuell bifaziale Glas-Glas-Module mit einer Glasdicke von 2 mm angesehen werden. Für die Verbindung werden in der Regel halbierte HJT- oder TOPCon-Zellen im Waferformat M10 bis G12 mit Runddrahtbändern in einer 12- bis 18-fachen Multibusbar-Konfiguration verlötet. Auf diese Weise ermöglichen alle Designkriterien einen hohen Modulwirkungsgrad, geringe CTM-Verluste und reduzierte Kosten (durch Ag-Reduzierung in der Metallisierung)



und damit niedrige LCOE. Neben der Löttechnologie besteht am ISE auf hohem Technologiereifegrad 7 auch die Möglichkeit der Klebeverschaltung, welche insbesondere für die Schindelverschaltungstechnologie sowie zukünftig die Si-Pero Tandemtechnologie interessant wird.

An allen drei in der Modulentwicklung involvierten Instituten (ISE, ISC, ISFH) besteht zudem die Möglichkeit verschiedene Modulgrößen sowohl für Dachanlagen (in der Regel unter 2 m²) oder auch Großanlagen (in der Regel größer als 2,5 m²) herzustellen. Am ISE besteht zudem die Möglichkeit zur Kleinserienfertigung von Modulen mit Stückzahlen von > 100 Modulen pro Tag.

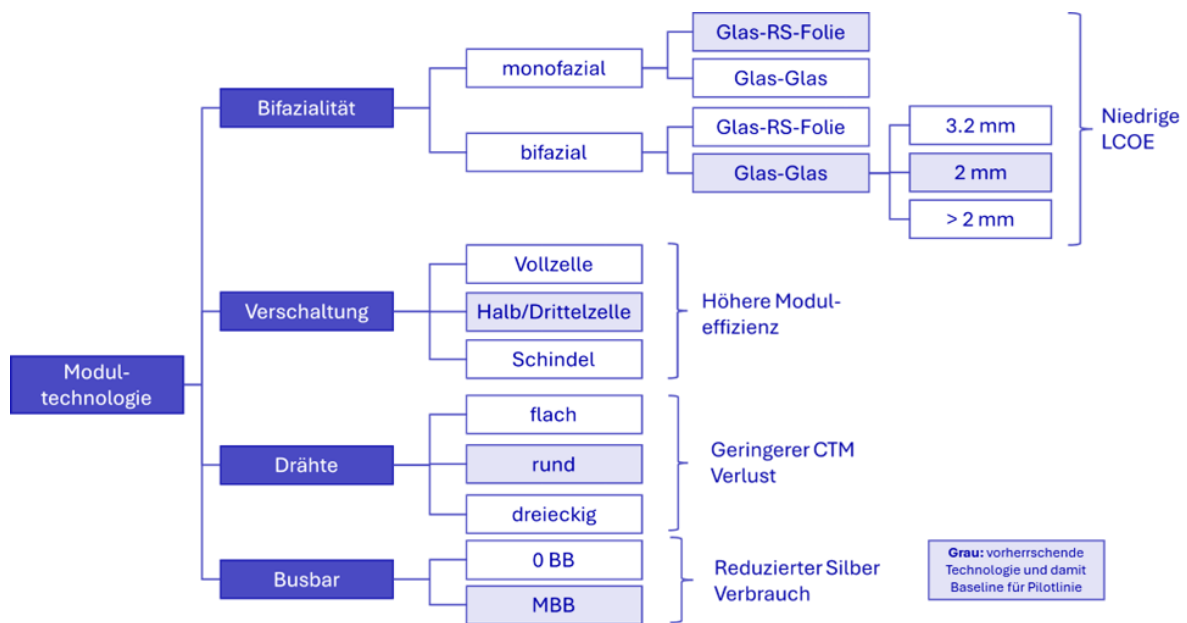


Abbildung 11: Übersicht der Technologieoptionen in der Modultechnologie. Grau hinterlegt: aktuelle Baseline für eine (verteilte) Pilotlinie



AP 2.3 FESTLEGUNG DES TECHNOLOGIEPFADES DER PILOTLINIE (ISFH, HZB, ISE, ISC, RCT)

Aus der obigen Technologiebewertung leitet sich der folgende Technologiepfad in AP2.3 für eine Pilotlinie ab.

Szenario A (Bau einer industriellen Pilotlinie):

Als Start-Technologie für eine neue Linie empfehlen die Verbundpartner die TOPCon Technologie. Sehr zeitnah, idealerweise sofort, sollten die wenigen weiteren Prozessanlagen (Laser, p-poly Schichtbildung) installiert werden, die für die Prozessierung der p-poly / n-poly IBC Zelle benötigt werden und damit spätestens ein Jahr nach Ramp der TOPCon Technologie auch die IBC Technologien in der Pilotlinie etabliert sind. Die Tandemtechnologie sollte nach etwa drei Jahren in der Pilotlinie als weiteres Upgrade installiert werden, falls eine ausreichende Technologiereife erzielt ist und dadurch eine gezielte Auswahl der benötigten Produktionsanlage möglich ist.

Szenario B (verteilte Pilotlinie in den Technikumseinrichtungen der Institute)

Die TOPCon Technologie liegt bereits mit einem hohen TRL und Wirkungsgrad bei mehreren Instituten vor und wird im Zuge der Technikumsmodernisierungen mit State-of-the-art Prozessanlagen deutscher Maschinenbauer verfügbar sein. Förderbedarf gibt es zukünftig für die Aufrechterhaltung des TOPCon-Basisprozesses sowie für dessen kontinuierliche Verbesserung. Die polyZEBRA Zelle ist bereits zu einem hohen TRL7 entwickelt, bedarf aber noch der weiteren Steigerung des Wirkungsgrades von aktuell 24% auf zukünftig 26%. Die POLO2 IBC Zelle erzielt bereits einen hohen Wirkungsgrad von 25,5%, derzeit aber noch mit einem semi-industriellen Herstellprozess (TRL3), der in zukünftigen F&E Projekten und mithilfe der SolarTeC Erneuerung auf TRL7 angehoben werden soll. Für die Tandem-Technologie gibt es an den Instituten verschiedene Technologieansätze und Prozessanlagen. Dies ist aufgrund der geringen Technologiereife auch sinnvoll, um die zukünftig vielversprechendsten Tandemtechnologien im Rahmen weitere F&E Projekte zu entwickeln. Hiermit ist der zugehörige Meilenstein 2.3 erfüllt.



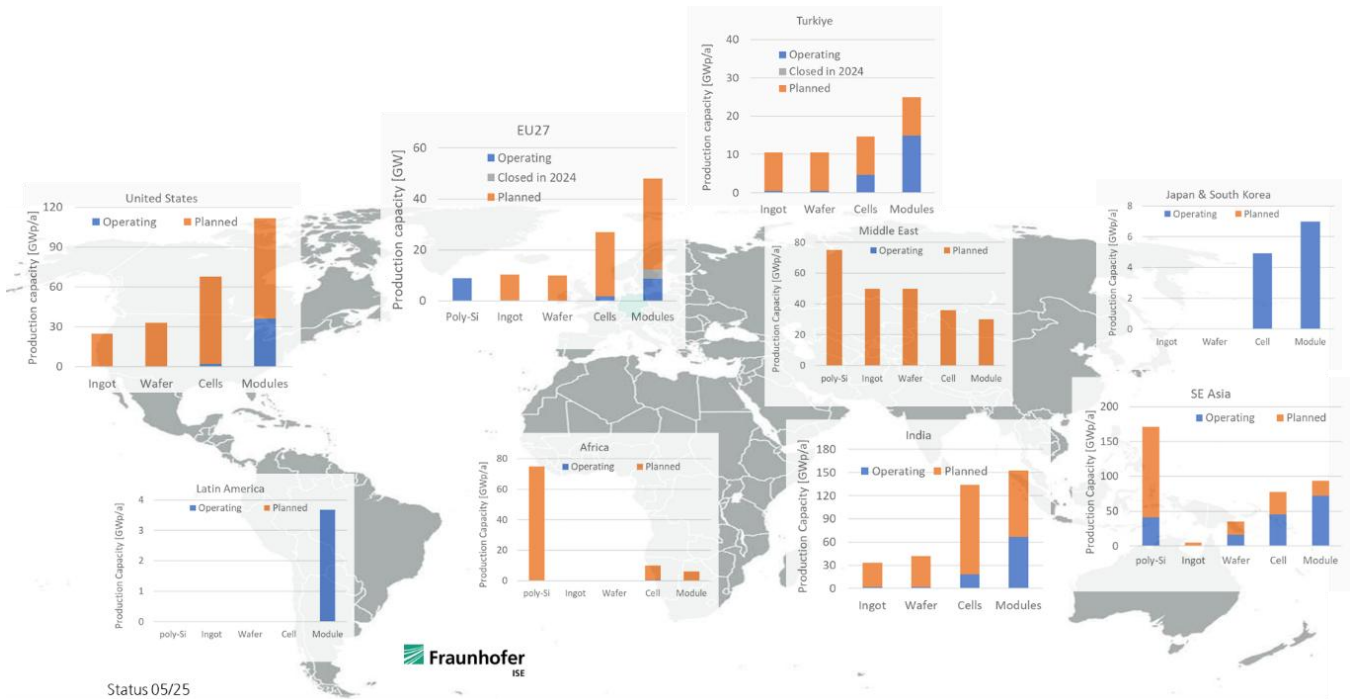
AP 3: GESCHÄFTS- UND BETREIBERMODELLE EINER PV-PILOTFERTIGUNG

Koordination: ISE

Das Fazit der Szenarioanalyse möglicher Pilotfertigungs-Umsetzungsmodelle hat ergeben, dass als einzig erfolgversprechendes, zeitnah umsetzbares und finanzierbares Modell die verteilte Pilotlinie, d.h. die Verknüpfung der bestehenden Infrastruktur, der in Deutschland ansässigen und im Projekt beteiligten Institute verbleibt. Für AP3 hat dies zur Konsequenz, dass ein Betreibermodell für eine solche verteilte Pilotlinie bereits in AP6 entwickelt und beschrieben wird. AP3 fokussiert sich somit eher auf die Chancen und Herausforderungen deutscher Anlagenbauer in globalen Wachstumsmärkten, insbesondere im Wettbewerb mit chinesischen Anlagenanbietern (AP3.1 und MS 3.1). Des Weiteren werden Zusammenarbeitsmodelle zwischen Anlagenherstellern und Instituten entwickelt und diskutiert, um Endkunden Turnkey-äquivalente Angebote unterbreiten zu können (die wiederum über die in AP4 beschriebenen Avale abgesichert werden sollten – AP 3.2, MS 3.2)

AP 3.1 CHANCEN UND HERAUSFORDERUNGEN FÜR DEN TRANSFER INNOVATIVER TECHNOLOGIEN IN GLOBALE WACHSTUMSMÄRKTE

In Abbildung 12 ist ein im Rahmen des Projektes erstellter weltweiter Überblick (ohne China) in Betrieb befindlicher bzw. geplanter PV-Fertigungen entlang der Wertschöpfungskette dargestellt. Die Vereinigten Staaten und Indien stellen dabei die Regionen mit den höchsten geplanten Zuwächsen dar und stellen somit interessante, aktuelle Wachstumsmärkte für den deutschen und europäischen Maschinenbau dar. Im Folgenden soll auf die einzelnen Märkte detailliert eingegangen werden.



Status 05/25

Abbildung 12: Überblick laufender bzw. sich in Planung befindlicher PV Produktionskapazität entlang der Wertschöpfungskette (ohne China). Die Zahlen beruhen auf öffentlichen Bekanntmachungen der entsprechenden Firmen aus 2024 und 2025.

Europa und Türkei

Das europäische Marktumfeld ist selbstverständlich für alle in Deutschland und Europa ansässigen Firmen und Institute am interessantesten. Leider ist jedoch die letzten zwei Jahre zu beobachten dass mehr und mehr Firmen aus der PV Produktion ausgestiegen sind und nur wenige, insbesondere kleine und in sehr spezifischen Marktsegmenten agierende Firmen neue (insbesondere) Modulproduktionen aufgebaut haben. Im Bereich der Zulieferindustrie ist zudem zu beobachten, dass auch hier mehr und mehr Teile der Wertschöpfungskette wegbrechen, so musste beispielsweise der einzige noch verbliebene europäische PV Glashersteller in Brandenburg seine Produktion einstellen. Im Bereich der Anlagenhersteller stellt sich zudem die Herausforderung, dass chinesische Wettbewerber ohne Einschränkung im europäischen Markt agieren können. Verbleibende Vorteile europäischer Hersteller bleiben die Nähe zu den Forschungsinstituten sowie der Anlagenhersteller in Bezug auf technologische Weiterentwicklungen und technische Dienstleistungen.

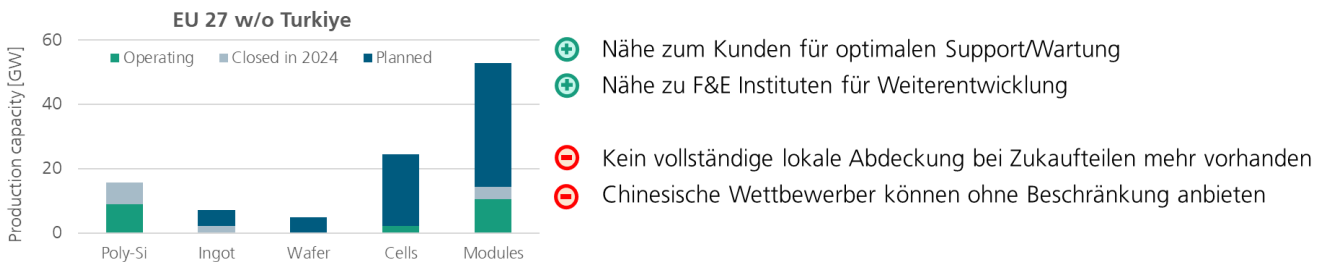


Abbildung 13: Überblick laufender bzw. sich in Planung befindlicher PV Produktionskapazität entlang der Wertschöpfungskette in der EU27 sowie Vorteile bzw. Herausforderungen deutscher Anlagenhersteller in diesem Zielmarkt



In der Türkei stellt sich die PV-Landschaft im Vergleich zu Kern Europa etwas anders dar. Es gibt hier bereits eine bestehende, sehr agile PV-Herstellerlandschaft, des Weiteren investiert der türkische Staat über Förderprogramme auch aktiv in den Ausbau weiterer Fertigungskapazität. Herausfordernd für den deutschen Anlagenbau stellt sich die Preissensitivität in Bezug auf den CAPEX türkischer Firmen dar, da in der Türkei insbesondere auch chinesische Turnkeyanbieter bzw. auch chinesische PV-Produzenten sehr aktiv sind.

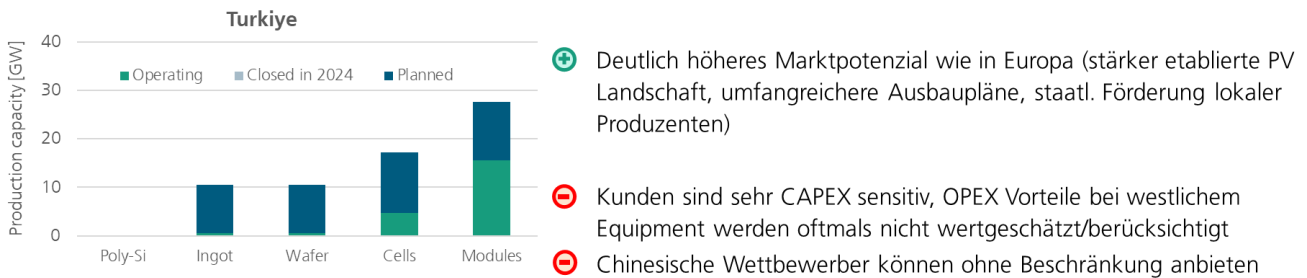


Abbildung 14: Überblick laufender bzw. sich in Planung befindlicher PV Produktionskapazität entlang der Wertschöpfungskette in der Türkei sowie Vorteile bzw. Herausforderungen deutscher Anlagenhersteller in diesem Zielmarkt

Indien

Bezüglich der bereits laufenden sowie zukünftig geplanter Fertigungskapazität stellt Indien nach China den zweitgrößten Markt dar. Aufgrund diverser staatlicher Unterstützung (Production Linked Incentive (PLI), Approved List of Module Manufacturers (ALMM)) werden gezielt indische Firmen unterstützt, die lokale Produktion aufbauen wollen bzw. betreiben. Hinzu kommen Einfuhrzölle für chinesische Vorprodukte, die teilweise bzw. vollständig bestehende Kostenunterschiede ausgleichen. Zwischen Deutschland und Indien bestehen vielfältige Kontakte zur Förderung der Zusammenarbeit (bspw. Indo-German Industry Forum).

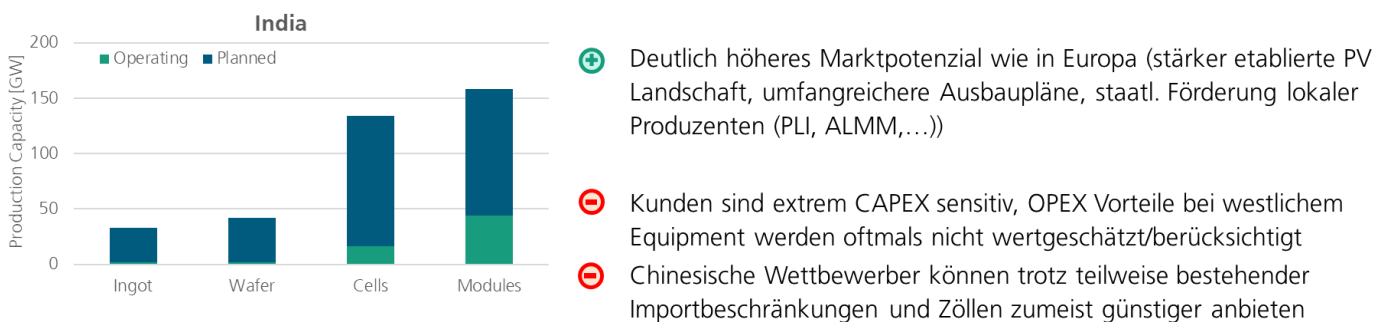


Abbildung 15: Überblick laufender bzw. sich in Planung befindlicher PV Produktionskapazität entlang der Wertschöpfungskette in Indien sowie Vorteile bzw. Herausforderungen deutscher Anlagenhersteller in diesem Zielmarkt



Worin bestehen nun die Herausforderungen/Chancen für den indischen PV Markt sowie für deutsche Firmen und Institute die in Indien tätig sein wollen:

- CAPEX/Turnkey: Indien ist ein extrem preissensitiver Markt, deutsche Anlagen- und Komponentenhersteller stehen unter enormen Druck gegenüber chinesischen Wettbewerbern, die aufgrund des aktuell zusammenbrechenden Marktes in China verstärkt nach Indien drängen. Trotz wiederkehrender auch politischer Spannungen zwischen Indien und China wird ein Großteil der indischen Fabriken von chinesischen Turnkeyanbietern ausgerüstet. Die Fähigkeit vollständig schlüsselfertig zu liefern (unter teilweise extrem vorteilhaften Zahlungsbedingungen) kann von deutschen und europäischen Unternehmen nicht in gleicher Weise angeboten werden, dies stellt einen klaren Wettbewerbsnachteil dar.
- Technologie: in Indien findet der Wechsel zu der in China bereits als Mainstream geltenden TOPCon Technologie erst jetzt statt, viele Solarzellenfabriken stellen bislang noch veraltete PERC Solarzellen her. Das Fraunhofer ISE ist aktuell beispielsweise von der Firma EMMVEE beauftragt, die Inbetriebnahme deren erster TOPCon Solarzellenlinie zu begleiten (diese wird die erste indische TOPCon Linie mit weitestgehend deutschem Equipment darstellen – insbesondere Centrotherm und RENA als Haupttechnologielieferanten). Die Linie soll als Blaupause für weitere Projekte auch anderer Firmen beim Aufbau von TOPCon Linien dienen. Wenige Firmen, insbesondere Reliance, haben sich zudem auf die HJT Technologie fokussiert. Allgemein kann man sagen, dass man Indien bislang eher als einen „Technologie-Follower“ denn einen „Innovator“ ansehen konnte.

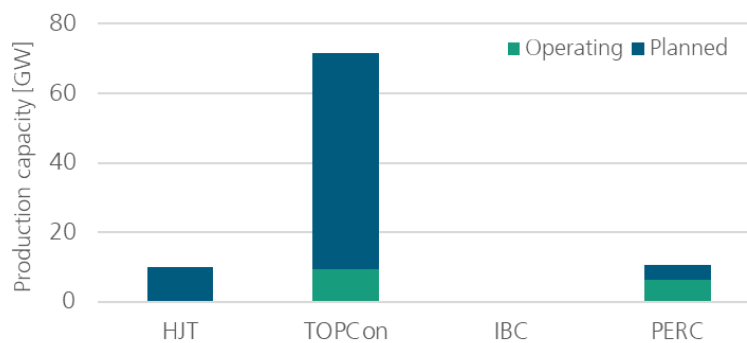


Abbildung 16: Solarzellentechnologie laufender und geplanter PV Produktionen in Indien

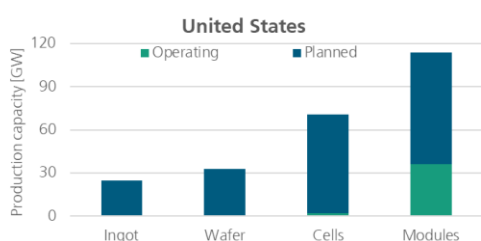
- Patente: viele der aktuell in Diskussion stehenden Patente und Patentfamilien zu TOPCon sind in Indien nicht als solches angemeldet, im indischen Markt gelten somit wenig Einschränkungen zum Einsatz der Technologie (siehe auch Abschnitt zu Patenten).



- Upstream-Prozesskette: so erfolgreich der Aufbau von Modul- und Solarzellenlinien aktuell voranschreitet, so schleppend läuft der Aufbau im Bereich Ingot- und Wafertechnologie, sowie weiter Upstream, im Bereich poly-Silizium Fertigung. Lediglich die Firma Adani konnte bislang eine erste 2 GW Ingot- und Waferfabrik in Betrieb nehmen, weitere auch über PLI geförderte Firmen stecken noch im Planungsstadium fest. Hier schlägt die Dominanz chinesischer Firmen durch, aufgrund der nahezu vollständigen Monopolstellung chinesischer Firmen in diesem Segment versucht die chinesische Regierung über Exportverbote für Produkte und auch Anlagen den Ausbau außerhalb Chinas zu bremsen. Dies kann auch als Chance für das noch vorhandene KnowHow deutscher Firmen in diesem Bereich angesehen werden (Stichwort Pilotlinie zur Ingot&Waferherstellung mit deutschen Anlagenherstellern wie PVA Tepla und Lapmaster-Wolters).
- Innovation: Wenige Firmen, in der Regel die bereits etablierten Hersteller, fokussieren sich auf die nächsten Technologie-Generationen. Ein Beispiel ist hier das Engagement der Firma Reliance beim deutschen Wafer-Startup NexWafe.

USA

In den USA wurden über die letzten Jahre im wesentlichen Modulfertigungen aufgebaut, aktuell wurde somit eine laufende Produktionskapazität von etwa 40 GW erreicht. Aufgrund noch fehlender Upstream Prozesskette (es gibt nur wenige, bislang kleine Zellfertigungen) müssen jedoch für diese Modulfertigungen die Solarzellen in der Regel aktuell noch importiert werden. Aufgrund des Inflation Reduction Act, welcher die lokale Herstellung der Produkte entlang der Wertschöpfungskette stark incentiviert, wurden viele Projekte zum Aufbau von Zellfertigungen, in geringerem Umfang auch im Bereich Ingot&Waferfertigung angekündigt und befinden sich aktuell in Planungsphase, einen Überblick über die angekündigten Kapazitäten liefert Abbildung 17.



- ⊕ Deutlich höheres Marktpotenzial wie in Europa (stärker etablierte PV Landschaft, umfangreichere Ausbaupläne, staatl. Förderung lokaler Produzenten (IRA))
- ⊕ Hersteller haben teilweise starke Präferenz zu westlichem Equipment, was die Eintrittsbarriere deutlich senkt
- ⊖ Aktuell starke Verunsicherung durch mögliche drastische Kürzungen der staatlichen Unterstützung über den IRA, bremst Investitionen in neue Projekte

Abbildung 17: Überblick laufender bzw. sich in Planung befindlicher PV Produktionskapazität entlang der Wertschöpfungskette in den USA sowie Vorteile bzw. Herausforderungen deutscher Anlagenhersteller in diesem Zielmarkt

Viele Projekte sind aktuell aufgrund der Unsicherheit bzgl. der Fortführung des Inflation Reduction Acts on Hold, Anfang Juli 2025 wird jedoch hier eine Entscheidung erwartet. Technologisch im Bereich Solarzellentechnologie ist aufgrund der komplizierten IP Situation in den USA bzgl. TOPCon bei den First Movern wie beispielsweise Suniva zu



beobachten, dass diese noch auf die PERC Technologie setzen, um eine lokal hergestellte Solarzelle im Markt anbieten zu können. Firmen, die im Bereich TOPCon in den amerikanischen Markt eintreten wollen und diese lokal herstellen wollen, müssen sich sehr gut informieren und eine Lizenzierungsstrategie entwickeln, um sich abzusichern.

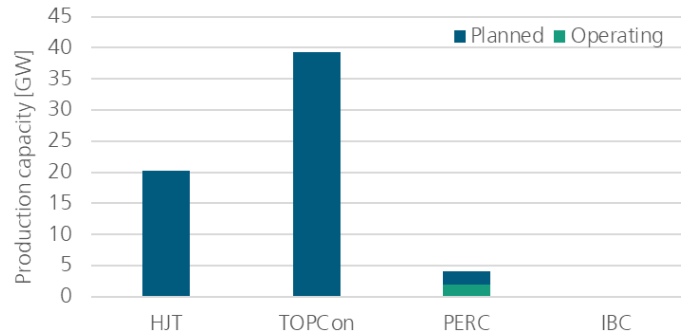
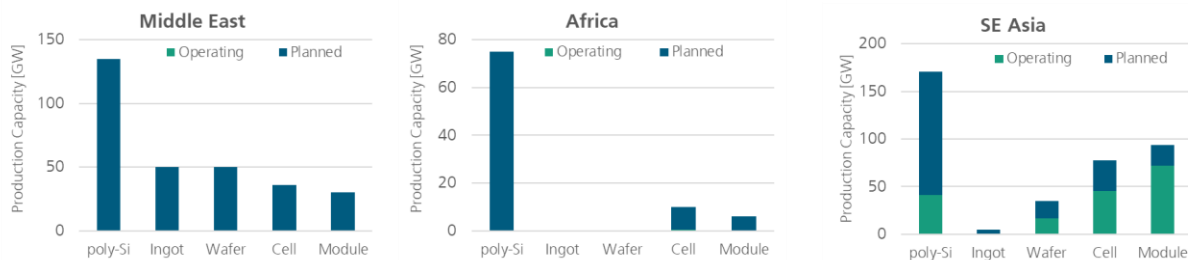


Abbildung 18: Solarzellentechnologie laufender und geplanter PV Produktionen in den USA

Rest der Welt

Neben den Hauptmärkten europäischer Anlagenhersteller, Europa, Indien und die USA, hat sich über die Jahre insbesondere Süd-Ost-Asien (Vietnam, Thailand, Kambodscha, Malaysia, ...) als wesentlicher Produktionsstandort für PV Komponenten hervorgetan. Der Zuwachs dort erfolgte in den meisten Fällen aufgrund von Einfuhrbeschränkungen gegenüber in China hergestellten Produkten, die dort gegründeten Firmen sind entweder Joint Ventures lokaler Firmen mit chinesischen Firmen oder direkte Ableger chinesischer Firmen. Ein weiterer Wachstumsmarkt stellt der Nahe und Mittlere Osten und Afrika dar. In Ländern wie etwa Saudi-Arabien wurde eine staatliche Förderung lokaler Produzenten ins Leben gerufen, welche PV Projekte incentiviert. Aufgrund niedriger Infrastrukturkosten ist diese Region insbesondere für die energieintensiven Bereiche der Wertschöpfungskette, poly-Si und die Ingot&Waferherstellung, interessant. Sehr große Projekte im Bereich poly-Si wurden angekündigt, oftmals auch als Joint Venture chinesischer Firmen mit lokalen Firmen.



- Teilweise staatl. Förderung lokaler Produzenten (z.B. local content Regelung in KSA)
- Mittlerer Osten und Afrika hat niedrigste LCOE, ideale Standorte für Großkraftwerke
- ⊖ Ausbau der Produktionskapazität wird insbesondere von chinesischen Firmen bzw. JV aus chin. und lokalen Firmen betrieben, die chinesisches Equipment in der Regel bevorzugen
- ⊖ Kunden sind extrem CAPEX sensitiv, OPEX Vorteile bei westlichem Equipment werden oftmals nicht wertgeschätzt/berücksichtigt
- ⊖ Aufbau von Kapazität ist aktuell stärker durch Handelsbeschränkungen getrieben wie von tatsächlichem lokalen Bedarf (Kapazität in SE Asien wurde für Export in die USA aufgebaut)

Abbildung 19: Überblick laufender bzw. sich in Planung befindlicher PV Produktionskapazität entlang der Wertschöpfungskette in den USA sowie Vorteile bzw. Herausforderungen deutscher Anlagenhersteller in diesem Zielmarkt



IP Situation derzeitiger Mainstreamtechnologie (TOPCon, HJT)

Neben den Produktionskosten und der Verfügbarkeit der Lieferkette stellt auch die Situation im Bereich des geistigen Eigentums ein großes Hindernis für den aktuellen Einsatz der Zelltechnologie dar. Insbesondere im Bereich der TOPCon-Solarzellentechnologie gibt es zahlreiche aktive Klagen zwischen vielen großen PV-Herstellern weltweit (siehe Abbildung 20). Die verschiedenen Ansprüche beziehen sich entweder auf strukturelle oder auf den Prozessablauf der TOPCon- bzw. IBC Solarzellentechnologie. Als potenzieller Hersteller müssen je nach Zielmarkt Lizenzen von verschiedenen Akteuren in diesem Bereich erworben werden, wobei der US-Markt derzeit das am stärksten umkämpfte Feld ist. Die meisten der derzeit diskutierten Rechte an geistigem Eigentum sind noch bis Anfang der 2030er Jahre gültig.

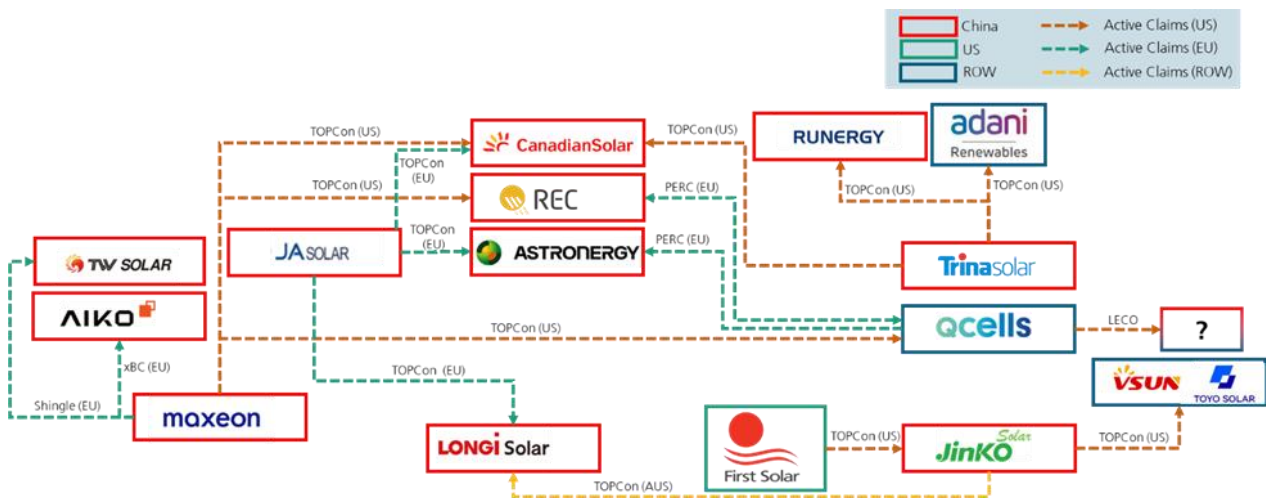


Abbildung 20: Übersicht über aktive Klagen im Bereich der TOPCon und IBC-Technologie (Hinweis: Ausgewählte IP-Streitigkeiten, kein Anspruch auf Vollständigkeit aller patentbezogenen Streitigkeiten). Quelle: Modifiziert aus dem First Solar-Ergebnisbericht Q3/24 (29. Oktober 2024)

Im Bereich der HJT-Solarzellentechnologie sieht die Situation hinsichtlich der aktiven Rechte an geistigem Eigentum wesentlich einfacher aus, da wichtige, starke Rechte an geistigem Eigentum von frühen Anwendern wie Sanyo/Panasonic bereits seit einigen Jahren ausgelaufen sind. Die noch bestehenden Rechte von Akteuren in diesem Bereich decken in der Regel nur bestimmte Aspekte der Technologie ab und können durch geringfügige Anpassungen oder bestehende Alternativen in der Verarbeitungsreihenfolge oder den verwendeten Rezepturen leicht umgangen werden.

AP 3.2 MODELLE ZUM TRANSFER INNOVATIVER TECHNOLOGIE AN ENDKUNDEN

Die verschiedenen Ansätze für die Durchführung von PV-Fertigungsprojekten sind in Tabelle 3 dargestellt. Beim Full-Turnkey-Ansatz ist der Auftragnehmer für die gesamte Produktionsausrüstung, die Technologie und die Leistungskennzahlen (KPIs) der Fabrik verantwortlich. Die Gebäude und Anlagen liegen in der Verantwortung des Endkunden, werden jedoch in enger Zusammenarbeit mit dem Turnkey-Anbieter entworfen und gebaut, da die Anforderungen der Produktionslinie erfüllt werden müssen. In einigen Fällen können jedoch auch die Beschaffung, Installation und der Betrieb der Versorgungsanlagen Teil des vollständigen Turnkey-Leistungsumfangs sein. In Bezug auf die Produktionsanlagen und -



technologie würde der Vertrag des Endkunden mit einem einzigen Auftragnehmer für das gesamte Projekt als Turnkey-Lösung abgeschlossen werden. Beim Turnkey-„Light“-Ansatz ist der Turnkey-Anbieter für die Technologie, die Fabrik-KPIs und einen Teil des Anlagenpakets verantwortlich, das in der Regel in seinem Angebot enthalten ist. Die restlichen Produktionsanlagen würden vom Endkunden beschafft, Spezifikationen werden in der Regel von einem beauftragten Technologieanbieter vorgegeben oder müssen von ihm genehmigt werden („Owners Engineer“). Wie bei einem vollständigen Turnkey-Projekt liegen die Anlagen und Fabrikarbeiten in der Verantwortung des Endkunden.

Tabelle 3: Aspekte verschiedener Ansätze zur Umsetzung des Projekts

	Komplett schlüsselfertig	Schlüsselfertig „Light“	Eigenentwicklung
<i>Verantwortung</i>	Der schlüsselfertige Anbieter ist verantwortlich für die Lieferung der Technologie, der Produktionsanlagen, der Schulungen und der Spezifikationen für Verbrauchsmaterialien und den Fabrikbau.	Der schlüsselfertige Anbieter ist verantwortlich für die Lieferung der Technologie, ausgewählter Anlagen, Schulungen und Spezifikationen für Verbrauchsmaterialien, Versorgungsleistungen und den Fabrikbau.	Die Technologie und die Erfüllung der KPIs liegen in der Verantwortung des Projektverantwortlichen. Die Planung und der Bau der Versorgungsleistungen und der Fabrik liegen in der Verantwortung des Projektverantwortlichen.
<i>Vertrag</i>	Ein Vertragspartner für Produktionsausrüstung und Technologie.	Hauptvertrag mit dem Turnkey-Anbieter, aber zusätzliche Verträge mit anderen einzelnen Ausrüstungslieferanten.	Einzelverträge des Projektinhabers mit Ausrüstungslieferanten und Subunternehmern.
<i>Auswahl der Ausrüstung</i>	Auswahl und Bereitstellung aller Produktionsausrüstungen, Versorgungsleistungen und fabrikspezifischen Aspekte.	Die restliche Ausrüstung (mit Ausnahme der vom Turnkey-Anbieter bereitgestellten) wird gemeinsam mit dem Projektinhaber ausgewählt und vom Projektinhaber gekauft.	Die Auswahl aller Ausrüstungen erfolgt durch den Projektinhaber.

Beim Ansatz der Eigenentwicklung (oder „Cherry Picking“) liegen die Auswahl der Technologie und Ausrüstung, die Erreichung der Werks-KPIs und der gesamte Werksbetrieb in der Verantwortung des Projektinhabers. Der Eigenentwicklungs-Ansatz hat das niedrigste Budget der drei Optionen und die höchste Flexibilität in Bezug auf die Auswahl der Technologie und Ausrüstung, ist jedoch mit einem höheren Aufwand und Risiken auf der Prozess- und Technologieebene verbunden.



In einem komplexen Projekt, das die gesamte Wertschöpfungskette von Polysilizium bis zu Solarmodulen umfasst, ist ein vollständiger EPC- oder Turnkey-Ansatz aus einer Hand kaum möglich. Dies liegt an der unterschiedlichen Natur der beteiligten Technologien, die von der metallurgischen Verarbeitung über die chemische Verarbeitung bis hin zur Halbleiterfertigung und Montage reichen.

Die allgemeinen Vor- und Nachteile der oben genannten Ansätze sind in Tabelle 4 unten aufgeführt. Ein vollständiger Turnkey-Ansatz birgt das geringste Risiko für den Projektinhaber, während das Budget im Vergleich zu den anderen Optionen am höchsten und die Flexibilität bei der Auswahl der Ausrüstung am geringsten ist. Der „Light“-Turnkey-Ansatz bietet Flexibilität bei der Auswahl der Ausrüstung und garantiert KPIs mit einem geringeren Budget im Vergleich zum vollständigen Turnkey-Ansatz. Der Turnkey-Light-Ansatz birgt ein mittleres Risiko für den Projektinhaber, da die Planung und der Betrieb der gesamten Versorgungsanlagen und der Fabrik in der Verantwortung des Projektinhabers liegen. Der Eigenbauansatz birgt das höchste Risiko hinsichtlich der Erfüllung der Fabrik-KPIs, da es an Technologiepartnern für den Hochlauf, die damit verbundene Fehlerbehebung und die Produktionsorganisation mangelt. Es sollte jedoch an dieser Stelle erwähnt werden, dass die Entscheidung für eine Ausführungsmethode mögliche Maßnahmen zur Risikominderung berücksichtigen sollte (siehe AP 4 Avale).



Tabelle 4: Vor- und Nachteile der verschiedenen Ausführungsmethoden

Ausführungs- methode	Vorteile	Nachteile
<i>Komplett schlüsselfertig</i>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Garantie für KPIs und Zeitplan ✓ Grundlegende und detaillierte Planung für Versorgungsleitungen und Fabrikgebäude durch den Komplettanbieter, sofern im Leistungsumfang enthalten ✓ Geringstes Risiko für den Projektinhaber 	<ul style="list-style-type: none"> - Höheres Budget im Vergleich zur Komplettlösung „Light“ (Bearbeitungsgebühr für Geräte von Drittanbietern und Komplettlösungsgebühr) - Eingeschränkte Flexibilität bei der Auswahl von Ausrüstung und Technologie (Turnkey-Anbieter konzentrieren sich auf die Leistung, nicht auf die Betriebskosten!)
<i>Schlüsselfertig 'Light'</i>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Höhere Flexibilität bei der Auswahl von Technologie und Ausrüstung ✓ Geringere Gesamtprojektkosten im Vergleich zu Full-Turnkey ✓ Garantie für KPIs und Zeitplan 	<ul style="list-style-type: none"> - Individuelle Verträge zwischen dem Projektinhaber und zusätzlichen Ausrüstungslieferanten - Höheres Budget im Vergleich zur Eigenentwicklung - Grundlegende und detaillierte Planung und Bau der Versorgungsanlagen und Fabrikgebäude durch den Projektinhaber - Das Risiko ist höher als bei einem vollständigen Turnkey-Ansatz, da die meisten Ausrüstungsverträge mit dem Projektinhaber abgeschlossen werden und die volle Verantwortung für die Versorgungsanlagen im Aufgabenbereich des Projektinhabers liegt.
<i>Eigenverantwortung, Cherry-Pick</i>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Niedrigstes Budget im Vergleich zu den Turnkey-Optionen ✓ Hohe Flexibilität bei der Auswahl der Technologie und Ausrüstung 	<ul style="list-style-type: none"> - Höchstes Risiko für den Projektinhaber, die Fabrik-KPIs und den Fabrikbetrieb zu erfüllen - Fehlender Technologiepartner für die Hochlauf- und Produktionsorganisation



AP 4: FINANZIERUNG UND ABSICHERUNG

Koordination: RCT, Beteiligte: ISE

AP 4.1/4.2: CAPEX UND OPEX DER VERSCHIEDENEN SZENARIEN VON PILOTLINIEN

ZIEL

RCT führte in AP4 die vorläufige Kosten- und Leistungsbewertung der Ingot/Wafer-, Solarzellen- und Solarmodul-Konzepte durch. Ergänzend dazu wurden Modellrechnungen und Bewertungen zu den von den Instituten bearbeiteten Technologien den Verbundpartnern zur Verfügung gestellt. Zudem dienten diese Analysen auch zu grundlegenden Investitionsbewertungen der Technologien im AP3, bezüglich CAPEX und OPEX. Sämtliche CAPEX- und OPEX-Zahlen im PV-Pilotprojekt sind in USD angegeben, um eine einheitliche und vergleichbare Finanzbewertung über internationale Standorte hinweg zu gewährleisten. Für die Umrechnung wurde ein Wechselkurs von 0,90 EUR = 1,00 USD (Stand: 13. Mai 2025) verwendet.

AUFBAU EINER NEUEN PILOTLINIE, Z.B. IN DEUTSCHLAND (SZENARIO A)

Erste Variante betrifft den Aufbau einer komplett neuen 300 MW Pilotlinie. Die Kosten für diese Variante wurde bereits im Vorgängerprojekt für eine TOPCon Modulfertigung abgeschätzt. Die Investitionssummen pro GW sind in Tabelle 5 dargestellt. Die Investitionskostenschätzung für die Maschinen und Automatisierung für eine Pilotlinie variieren je nach Bereich.

Tabelle 5: CAPEX Industrielle Pilotline aus Libertas

CAPEX (Mio.USD)	Ingot + Wafer	Zelle	Modul
CAPEX Equipment	20 – 27*	27	10
CAPEX Gebäude + Infrastruktur	22	27	20
Gesamt	40 - 47	52	30

*Upgedatet von Libertas

Betriebskosten für eine Ingot bis Modulpilotlinie liegen zwischen 14 und 17 USDct pro Wattpeak, was für 300 MW einem Gesamtaufwand von 42 bis 51 Mio. USD entspricht. Das Equipment würde über einen Zeitraum von sieben Jahren abgeschrieben werden und dabei bereits 4 Cent pro Wp zu den Gesamtkosten beitragen. Die Vermarktung der pilotierten Produkte gestaltet sich aufgrund von Zertifizierungsanforderungen jedoch als schwierig und wird in Kapitel 4.2 näher erläutert.

Ein Neubau sowie der Betrieb einer industriellen Pilotlinie in Deutschland waren aufgrund der ermittelten hohen Kosten nicht umsetzbar. Im Rahmen des zu Beginn des Projekts durchgeführten Workshops wurde deutlich, dass sowohl in der Industrie als auch im öffentlichen Sektor keine entsprechenden finanziellen Mittel zur Verfügung standen. Aus diesem Grund wurde dieser Ansatz in Abstimmung mit dem Projektträger frühzeitig nicht weiterverfolgt.



NUTZUNG EINER BESTEHENDEN PRODUKTION- ODER PILOTLINIE

Die Investitionskosten für bestehende Produktions- oder Pilotlinien sind oft niedriger, lassen sich jedoch aufgrund individueller Gegebenheiten wie Eigentümer, Betreiber, Technologie und Infrastruktur nur schwer pauschal berechnen und wurden daher nicht berücksichtigt.

GETEILTE PILOTLINIE BASIEREND AUF BESTEHENDEN INSTITUTSLINIEN (SZENARIO B)

Im Konsortium wurden für die Untersuchung die Kosten des Betriebs eines TOPCon Basisprozesses herangezogen. Eine qualitative Übersicht der Kostenunterschiede wurden ermittelt und in sind

Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6: Kostenunterschiede in den "Operativen Expenditures" in der verteilten Pilotlinie

KATEGORIE	BESCHREIBUNG
PERSONAL	Wissenschaftliches und technisches Personal für Betrieb und höherer Bedarf durch fehlende Automatisierung
ENERGIE	Erhöhter Stromverbrauch für Anlagenbetrieb durch niedrige Auslastung
MATERIALIEN	Höherer Verbrauch von Materialien für Zell- und Modulproduktion durch höhere Bruchraten Geringere Abnahmemengen führen zu höheren Preisen
WARTUNG & INSTANDHALTUNG	Regelmäßige Wartung der Anlagen und Infrastruktur bei geringer Instandhaltung und häufigem Umrüsten
IT & KOMMUNIKATION	Softwarelizenzen, Netzwerkinfrastruktur, Datenmanagement im Laborbetrieb
VERWALTUNG & DOKUMENTATION	Projektmanagement, Berichtswesen, Audits

Ein Vorteil der verteilten Pilotlinie besteht darin, dass die Leerlaufkosten sehr gering sind. Personal- und die meisten anderen Kosten entstehen hauptsächlich nur dann, wenn die Linie tatsächlich genutzt wird. Investitionskosten fallen keine an. Im Vergleich liegen hier jedoch die Betriebskostenkosten (OPEX) beim Faktor 10x - 20x höher im Vergleich zur Massenproduktion. Diese Daten beruhen auf einer Abschätzung der Projektpartner. Die Institute bieten ihre Infrastruktur für externe Versuche an, halten ihre Kostenstruktur jedoch meist zurück.



AN DIE INDUSTRIE ANGEDOCKTE PILOTLINE

In den folgenden Abschnitten werden verschiedene Modelle für eine an die Industrie angebundene Pilotlinie beziehungsweise Innovationsumgebung beschrieben. Dies erfolgt vor dem Hintergrund:

1. Die langfristige Zuweisung von Reserveflächen bringt dem Hersteller auch Vorteile für zukünftige Upgrades. Dies wird auch nochmals an einem Beispiel erläutert.
2. Fläche und Infrastruktur können bis zum Upgrade für Pilotprojekte in Zusammenarbeit mit Maschinenbauunternehmen in einer Massenproduktionsumgebung gemeinsam genutzt werden.
3. Eine Produktionslinie ohne Möglichkeit zur Umrüstung / zum Upgrade wird in der Regel nach mehr als 5 Jahren stillgelegt.

Ein Reserveplatz dient normalerweise folgenden Zwecken:

1) Prozess-Upgrade:

- a) Ohne Reservefläche: Die Ausrüstung muss schrittweise aufgerüstet werden.
- b) Mit Reservefläche: Der Platz kann über die Zeit hinweg zugewiesen werden. Bis zur Nutzung kann dieser Bereich auch zur Pilotierung verwendet werden, was Produzent und Maschinenentwickler eine vorteilhafte Situation schafft.

2) Technologie-Upgrade:

- a) Ohne Reservefläche: Alte Ausrüstung muss häufig in großen Mengen entfernt und/oder unter Buchwert verkauft werden, um Platz für zusätzliche neue Tools zu schaffen. Oft reduziert sich dadurch die Gesamtkapazität.
- b) Mit Reservefläche: Zusätzliche Ausrüstung kann ohne Kapazitätseinbußen im reservierten Bereich installiert werden.

Im folgenden Beispiel wurden zwei Fälle eines TBC-Technologie-Upgrade ausgehend von einer TOPCon-Linie nochmals separat durchgespielt:

- Fall $\beta 1$ (TOPCon \rightarrow TBC, mit Platzreserve): Einfachstes Upgrade, aber höchster CAPEX
- Fall $\beta 2$ (TOPCon \rightarrow TBC, ohne Platzreserve): Niedrigere Investitionen, aber höhere Komplexität und geringere Kapazität



Tabelle 7: Darstellung von zwei Optionen für ein TBC Upgrade (links) mit Reservefläche (rechts) ohne Reservefläche. Die Investitionen berücksichtigen westliche Kostenstruktur

Fall	<i>β1 mit Reservefläche</i>	<i>β2 ohne Reservefläche</i>
Start-up-Technologie		TOPCon - 5,5 GW
Upgrade-Technologie	TBC - 5,6 GW	TBC - 4,8 GW
Reserve	<ul style="list-style-type: none"> • Reinraumfläche • Infrastruktur 	<ul style="list-style-type: none"> • Nur Infrastruktur
Investitionsausgaben (Starten + Aktualisieren)	795 + 31 Mio. USD	723 + 31 Mio. USD
CoO [USDct/wp]	TOPCon: 6.2 TBC: 6,6	TOPCon: 6.0 TBC: 6,8
Entfernte und hinzugefügte Tools für das Upgrade	-0 Tools + 60 Tools	-12 Tools +50 Tools
Vorteile	+ Einfachste Upgrade-Optionen (kein Entfernen von Werkzeugen) + Niedrigerer CAPEX/GW nach dem Upgrade + Wettbewerbsfähigste TBC-Kosten	+ Wettbewerbsfähige TOPCon Kosten + Niedrigerer CAPEX/GW vor dem Upgrade
Profil des Produzenten	Der Produzent konzentriert sich auf nahtlose Technologieupdate mit minimalen Unterbrechungen bestehender Produktionslinien. Zudem ist ein Upgrade bereits innerhalb der ersten 3 Jahre nach Produktionsbeginn absehbar.	Neue Produzent sucht nach marktführender Technologie, hat aber nur begrenztes Vertrauen in die IP-Landschaft von TBC, was sie bei groß angelegten Investitionen vorsichtig macht. Zeitpunkt des Upgrades zudem noch nicht absehbar.

Fall β1, das Upgrade von TOPCon auf TBC, scheint die einfachste Option zu sein, da nur 60 Tools hinzugefügt werden müssen. Im Gegensatz dazu geht es bei anderen Konfigurationen beim Upgrade nicht nur um das Hinzufügen, sondern auch um das Entfernen von Tools. Der Hauptnachteil dieses Ansatzes ist jedoch der höchste erforderliche CAPEX, obwohl es sich um das einfachste Upgrade handelt, da nur Platz zur Verfügung gestellt wird. Für TOPCon ist die CoO der produzierten Zellen günstiger, wenn nur CAPEX für Utilities für ein zukünftiges Upgrade zur berücksichtigt werden. Aufgrund der besseren Linienkonfiguration, der Anzahl entfernter Werkzeuge und der Auslastung der Installierten Tools ist der CoO für das Upgrade auf TBC jedoch deutlich niedriger, wenn zusätzlicher Reserveplatz für das Upgrade zugewiesen wird. Somit ist die Wichtigkeit eines der Reservefläche auf die zukünftigen Betriebskosten nicht zu vernachlässigen.



Zudem kann unterschieden werden, wie der Reserveplatz in der Fabrik verteilt wird:

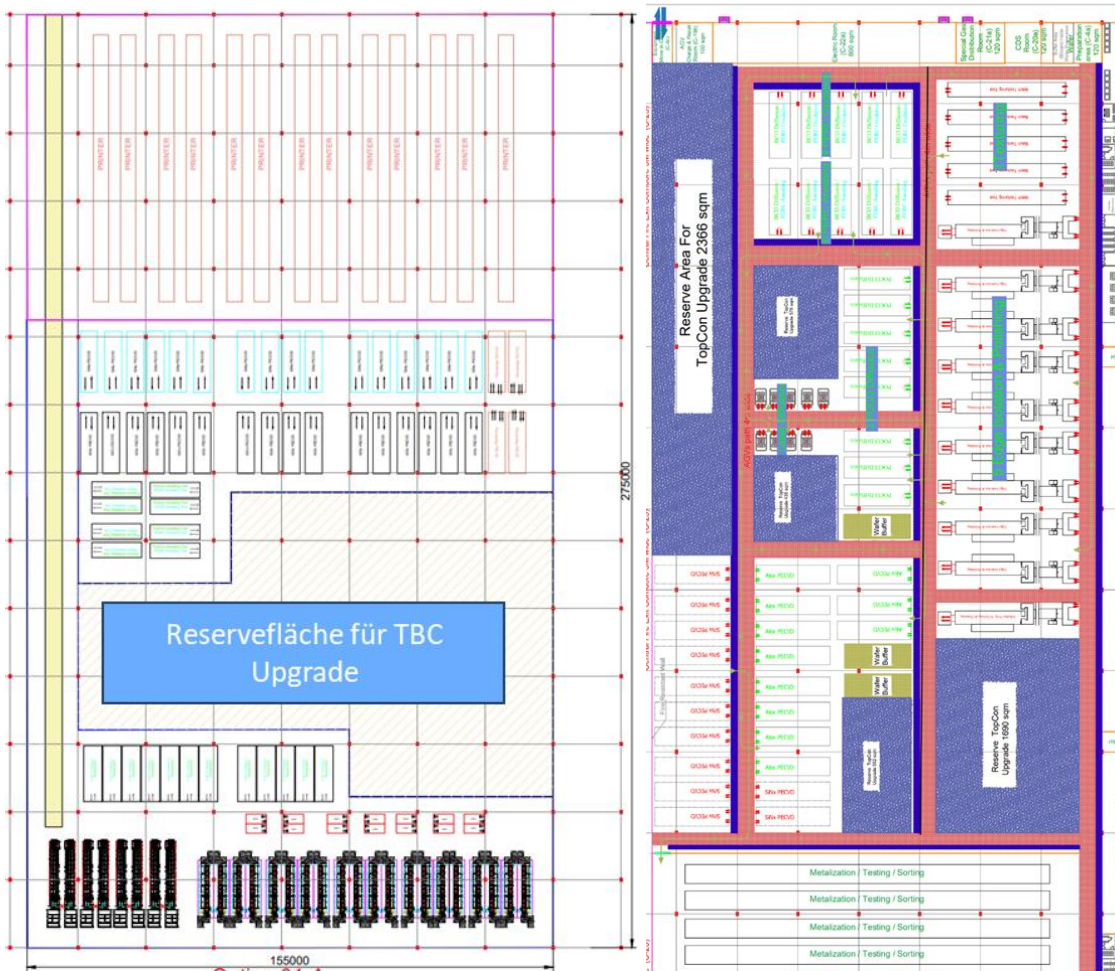


Abbildung 21: Beispielhafte Darstellung der beiden Optionen (1, links) Zentraler Reserveplatz, z.B. für TBC Upgrade (2, rechts) mehrere Reserveplätze pro Prozesscluster

Option 1: Zentraler Reserveplatz (gesammelt)

Beispiel: Reservefläche für TBC-Upgrade

- Skalierbarkeit: Reserveflächen können über die Projektlaufzeit hinweg modular genutzt werden – ideal für Pilotierungen, Technologie-Upgrades oder temporäre Testläufe.
- Abgetrennt für Forschung & Industrie: Ermöglicht die Integration neuer Technologien (z. B. TBC, TOPCon) ohne Eingriff in bestehende Linien. Besonders geeignet für öffentlich geförderte Pilotprojekte, bei denen mehrere Partner gemeinsam auf eine Plattform zugreifen.
- Flexible Installation und Inbetriebnahme: Die Versorgungseinrichtungen und der Reinraum können abgetrennt werden. Dies senkt die anfänglichen Betriebskosten und auch die Kosten für den Betrieb der Reservefläche.



Nachteile:

- Hoher initialer Flächenbedarf
- Potenziell längere Wege für Materialflüsse

Option 2: Reservefläche in jedem Cluster (dezentral)

Beispiel: Test von neuem Equipment (z.B. PECVD)

- Geringe Störung des Hauptprozesses: Neue Tools können direkt im Cluster getestet werden, ohne bestehende Linien zu unterbrechen.
- Effiziente Nutzung alter Linien: Nicht aufrüstbare Linien (z. B. nach 5 Jahren) können als Testumgebung weiterverwendet werden.
- Geringere Investitionshürde: Kein separater Neubau nötig – Nutzung bestehender Infrastruktur.

Nachteile:

- Begrenzte Fläche und Medienversorgung pro Cluster
- Weniger geeignet für größere Pilotprojekte oder disruptive Technologien
- Höhere Komplexität bei der Koordination über mehrere Cluster hinweg

International angedockte Pilotlinie

In diesem Abschnitt wird eine Pilotlinie als Teil einer Massenfertigung untersucht. Die Kapazität der Pilotlinie liegt bei ca. 300 MW. Da eine baldige Wiederaufnahme der Massenproduktion in Europa derzeit nicht absehbar ist, gleichzeitig die Ergebnisse auch kurzfristig umsetzbar sein sollen (etwa durch Implementierung in Indien oder der USA, unter Verwendung von westlichem Equipment) wurde folgender Ansatz zur Darstellung der Ergebnisse gewählt:

Als Massenfertigung zum Andocken diene eine 5 GW-Fertigung in Indien (Referenz). Investitionskosten für Infrastruktur (CAPEX) der Pilotlinie werden zusammen mit einer Turnkey-Fabrik berechnet, jedoch skaliert auf eine Kapazität von 300 MW. Betriebskosten (OPEX) umfassen Personal, Energie und Wartung.

Ziel der Untersuchungen in diesem Abschnitt ist auch der Vergleich von verschiedenen Zell- und Modultechnologien hinsichtlich ihrer Kosten und Leistungsfähigkeit. Die Basislinie basiert auf einer Grundtechnologie (TOPCon) für Zellen oder Module, mit der Möglichkeit der Pilotierung weiterer 300 MW, um diese auf weitere fortgeschrittene Zellkonzepte (z.B. IBC) oder andere Modulkonzepte auszuweiten.

Hinweis: Die genauen Kosten sind unten beschrieben. Die exakten CAPEX-Werte stehen am Ende im Fazit in Tabelle 8.



Solarzelle:

Die Pilotlinie (ca. 300 MW) startet mit TOPCon (Tunnel-Oxid Passivated Contact) als Kerntechnologie, welche einen industriell erprobten hocheffizienten Zellprozess (~25 % Wirkungsgradpotenzial) bieten. Zudem werden auch die Upgrade-Möglichkeiten zu verschiedenen Zelltechnologien betrachtet. Die Hauptannahmen sind in Abbildung 22 in der Tabelle 18 im Anhang dargestellt.

POLO BJ (G12)	POLO IBC (G12)	TOPCon (G12)	xBC (G12)	POLO SQUARE (G12)	POLYZEBRA CU (G12)	HJT (G12h)
Batch Polish	Batch SDE/TEX	Batch SDE/TEX	Batch Polish	Batch SDE/TEX	Batch SDE/TEX	Pre-Clean
LPCVD	SSE (BSG)			SSE (BSG)		Pre-Gettering
POCL3 Diff / or anneal	PECVD SiON/n-poly-Anneal	BCL3 Diff + Ox. & dr.-	LPCVD BCL3 Diff + Ox. & dr.- Laser Patterning	LPCVD doped-poly-Si Anneal PECVD SiN Mask Laser Patterning	PECVD: SiO2+a-Si(n) PECVD SiN Mask	
SSE (PSG) Batch SDE/TEX		SSE (BSG) Batch Polish LPCVD POCL3 Diff / or anneal	SSE (BSG) Polish and Batch Clean LPCVD POCL3 Diff Laser Isolation	Batch Polish LPCVD Anneal PECVD SiN Mask	Laser Patterning Batch Polish PECVD SiO2+a-Si(O) BCL3 Diff + Ox. & dr.-	PECVD a-Si(i,n,p) coat
		SSE (PSG) p-Si Wrap-around re	SSE (PSG) Batch Texture	Laser Ablation Batch Polish	Batch Polish Laser Doping Batch Polish BCL3 Diff + Ox. & dr.-	
ALD AlOx	ALD AlOx	ALD AlOx	ALD AlOx	ALD AlOx	ALD AlOx	
PECVD SiNx PECVD SiNx	PECVD SiNx PECVD SiNx	PECVD SiNx PECVD SiNx	PECVD SiNx PECVD SiNx	PECVD SiNx PECVD SiNx	PECVD SiNx PECVD SiNx	PVD
Laser Contact Opening	Laser Contact Opening					
1st Print (RB)	1st Print (RB)	1st Print (RB)	1st Print (Fine/Dashed) Fast Firing LECO	1st Print (Fine/Dashed) Fast Firing LECO	1st Print (Fine/Dashed) Fast Firing LECO	1st Print (RB)
2nd Print (RF) 3rd Print (FB) 4th Print (FF)	2nd Print (RF) 3rd Print (FB) 4th Print (FF)	2nd Print (RF) 3rd Print (FB) 4th Print (FF)	2nd Print (Cu Finger) 3rd Print (Isolation P) 4th Print (Cu BB)	2nd Print (Cu Finger) 3rd Print (Isolation P) 4th Print (Cu BB)	2nd Print (Cu Finger) 3rd Print (Isolation P) 4th Print (Cu BB)	2nd Print (RF) 3rd Print (FB) 4th Print (FF)
Fast Firing LECO	Fast Firing LECO	Fast Firing LECO				
IV+Sorting+Packing	IV+Sorting+Packing	IV+Sorting+Packing	IV+Sorting+Packing	IV+Sorting+Packing	IV+Sorting+Packing	IV+Sorting+Packing

Abbildung 22: Prozessrouten und detaillierte CAPEX Berechnung für 5GW Industrietransfer, auch Basis für 300 MW Pilotierungsupgrade.

Im Folgenden werden TOPCon und alternative Zellkonzepte hinsichtlich Kosten (CAPEX/OPEX) und Rahmenbedingungen gegenübergestellt:

- **TOPCon (Baseline):** CAPEX und OPEX einer TOPCon-Fertigung dienen als Referenz für Kostenvergleiche der Alternativen da auch Vorzug als Pilotlinie-Basis.
- **POLO-BJ (Poly-Si on Oxide, Back-Junction):** Bietet die niedrigsten Zellherstellungskosten – rund 1,8 US-Cent/Wp geringer als TOPCon (ca. 10–12 % Kostensenkung). Grund ist u.a. der Verzicht auf Frontseiten-Silberdruck (ersetzt durch günstigere Al-Kontakte). POLO-BJ ist sehr attraktiv für eine kostensensitive Produktion, wurde in PV PILOT aber nicht weiter verfolgt, da die Technologie bereits relativ weit entwickelt ist, das Effizienzlimit unter TOPCon liegt.
- **POLO-IBC (Interdigitated Back Contact mit POLO):** Rückkontakt-Technologie auf Basis POLO. Alle Kontakte liegen auf der Rückseite (keine Frontbusbars → höhere Effizienz durch weniger Abschattung). Im Vergleich zu POLO-BJ ist die Struktur komplexer (erfordert z.B. Schattenmasken für lokales Poly-Si). Der Vorteil ist ein ~0,5 % absolut höherer Zellwirkungsgrad, Nachteil sind leicht erhöhte Kosten: interne Analysen zeigen etwa 0,3 US-Cent/Wp höheren OPEX gegenüber POLO-BJ.



Dennoch bleibt POLO-IBC im Vergleich zu TOPCon ca. 5 % günstiger in den Gesamtkosten.

- **POLO2-IBC (Next-Gen IBC vom ISFH):** Weiterentwicklung der POLO-IBC mit vereinfachtem Equipment. Laut Kostenbewertung etwa 0,3 US-Cent/Wp günstiger als das obige IBC-Konzept. Auch hier liegt der Fokus auf Silberreduktion und Prozessintegration, CAPEX ca. 27% höher als TOPCon.
- **polyZEBRA IBC (Cu-basiert, ISC Konstanz):** Dieses Konzept ersetzt Silber weitgehend durch kupferbasierte Metallisierung (selektive Cu-Plate-Technik) und erreicht ebenfalls rückseitige Kontaktierung. OPEX seitig ist das Konzept ~0,8 US-Cent/Wp teurer als TOPCon, vor allem CAPEX seitig +46% durch zusätzliche Prozessschritte (Laserstrukturierung, Cu-Plating etc.) und OPEX seitig durch zu geringe Silbereinsparung im Vergleich zum Kupferauftrag. Allerdings bietet die Kupfervariante langfristig großes Einsparpotenzial, da teures Silber eliminiert werden kann.
- **HJT (Heterojunction):** Technologie mit amorphen a-Si Schichten. Anderer Prozessfluss (niedrigere Prozesstemperaturen, andere Anlagen wie PECVD) – eine bestehende TOPCon-Linie ließe sich nicht einfach auf HJT umrüsten. Vor allem ist der Investitionsbedarf höher: Schätzungen gehen von ~500 Mio. € CAPEX für 5 GW aus, vs. ~360 Mio. € bei TOPCon. Für eine kleine Pilotlinie rechnet RCT mit ~70 Mio. € Mindestinvest (lohnt sich erst ab ca. 500 MW Größe). HJT muss deshalb als separater Basisprozess betrachtet werden, bleibt aber als zukünftige Option interessant (falls Tandemzellen angestrebt werden).
- **Tandemzellen (Perowskit/Silizium):** Sehr hohes Wirkungsgradpotential (>30 %), aber derzeit niedriges TRL (~3). Konkrete CAPEX-Daten sind derzeit nicht verfügbar, da viele Prozesse noch nicht auf Industrieniveau skaliert sind und sich noch kein State-of-the-Art Prozessfluss etabliert hat. Für diese Zusammenfassung werden Tandems deshalb nicht vertieft analysiert.

Hinweis: OPEX Zahlen und Visualisierung können aus dem Kapitel AP2 entnommen werden.

Modultechnologien: Standard vs. 0BB vs. Shingle

Parallel zur Zellproduktion wurden verschiedene Modul-Verschaltungstechnologien bewertet, da sie die Investitionskosten und Modulleistung beeinflussen. Die Basislinie ist eine klassische Modullinie (Stringer, Laminator etc.) für Halbzellmodule mit Lötverbindung. Folgende Upgrades wurden berücksichtigt.



State-of-the-art TOPCon	State-of-the-art xBC	ECA-Shingle-String Modul
TLS Teilen	TLS Teilen	TLS Teilen
		ECA-Shingle-Verschaltung
Versträngen (Vorder- und Rückseite)	Versträngen (Rückseite)	Lineares Schindelstringen
Lay-up	Lay-up	Lay-up
Quer-Verschaltung	Quer-Verschaltung	Quer-Verschaltung
Laminieren	Laminieren	Laminieren
Trimmen	Trimmen	Trimmen
Junction-Box setzen	Junction-Box setzen	Junction-Box setzen
Rahmen Montage	Rahmen Montage	Rahmen Montage
12 -17 Mio. USD per GW	xBC Stringer +1 Mio USD GW	20 - 25 Mio. USD per GW

Abbildung 23: Prozessflüsse der Modultechnologien

Im Detail zu den Kosten:

- **Standard-Stringer:** Verlöten der Zellen (z.B. 12 Busbars) oder Multiwire (0BB, d.h. viele dünne Drähte anstelle von breiten Busbars). Diese Technik ist etabliert und am kostengünstigsten. Ein 5 GW-Modulwerk benötigt Investitionen von rund 100 Mio. USD, entsprechend ~20 Mio. USD/GW. Für die 300 MW industrielle Pilotlinie ergibt sich ein CAPEX von etwa 12–17 Mio. USD.
- **xBC:** Das Rückkontaktstringing kann oft durch Nachrüstung des Stringers erreicht werden (Umbaukosten ca. 1 Mio. USD je /GW).
- **Laserverschweißung (Wire-Bonding):** Dies gilt insbesondere für Verbinderdrähte (wie beim 0BB-Konzept). Ein Laserstringer ist in der Anschaffung teurer – Schätzungen liegen bei 20–25 Mio. USD/GW. Für die Pilotlinie wären das ~6–8 Mio. USD anstelle von 5 Mio. für Standard-Stringer. Diese Technik ist primär interessant, wenn höhere Durchsätze oder besondere Materialverbindungen (z.B. Kupferdraht ohne Lot) erzielt werden sollen.
- **ECA-Shingling (elektrisch leitfähiger Klebstoff):** Bei Shingle-Modulen werden Zellen in Streifen geschnitten und überlappend verklebt. Die CAPEX sind ca. 50 % höher als für Standard, da spezielle Stringer und Handling nötig sind (für 5 GW ~150 Mio. USD statt 100 Mio.). Für ~300 MW entspräche dies grob zusätzlichen 5–8 Mio. USD Invest. Außerdem ist der Prozess komplexer – eine Matrix-Shingle-Anordnung (z.B. ISE PET-Matrix) kann Verschattung weiter reduzieren, erfordert aber noch mehr Equipment.

Ultraschalllöt-, -schweißen sowie die Herstellung von PVS- und PET-ECA-Shingle-Matrix-Modulen wurden wegen ihres Entwicklungsstands nicht quantitativ bewertet.



Zusammenfassung:

Tabelle 8 fasst alle im Projekt ermittelten und referenzierten Zahlen zusammen.

Tabelle 8: Zusammenfassung aller im Projekt Kalkulierten und Untersuchten Szenarien für die Equipment kosten für deutsches Equipment

WERTSCHÖPFUNG / TECHNOLOGIE	5GW TURNKEY PROJEKT +15% (I&C) + 5% (IFC)	QUELLE	ANGEDOCKTE PILOTLINIE 300MW	QUELLE
Ingot & Wafer	420 Mio. USD	Fraunhofer ISE	32 Mio. USD*	Libertas
Solar Zelle (TOPCon)	360 Mio. USD	PV Pilot	26 - 32 Mio. USD	PV Pilot
Nex-Gen Technologie	POLOBJ -20% PERC -17% POLO-IBC -5% TBC + 13% POLO2 +27% CuPolyZebra +46%	PV Pilot	POLOBJ -20% PERC -17% POLIIBC -5% TBC + 13% POLO2 +27% CuPolyZebra +46%	PV Pilot
Solar Zelle (HJT)	500 Mio. USD	PV Pilot	70 Mio. USD (Min. 500MW)	PV Pilot
Module (State-of-the-art)	100 Mio. USD	PV Pilot	12-17 Mio. USD (600 – 800 MW)	PV Pilot
Module ECA-Shingle-String	150 Mio. USD	PV Pilot		RCT

*Im vorherigen Zwischenstand wurde die Ingot CAPEX Werte inkl. Entwicklungskosten des Maschinenbauers angegeben, diese belaufen sich ca. auf weitere 30 Mio. USD.

Anmerkungen: Die 5 GW-Werte enthalten Zuschläge für Installation & Inbetriebnahme (I&C) und Nebenkosten (IFC). Die Pilotlinie profitiert von vorhandener Infrastruktur, was z.B. Gebäude- und Versorgungs-CAPEX reduziert. Die Zelltechnologie-Abweichungen zeigen, wie sich die Herstellkosten pro Wp verändern würden, wenn statt TOPCon eine alternative Technologie eingesetzt wird (z.B. POLO-BJ ca. -20 % günstiger, CuPolyZebra +46% teurer).

Die OPEX-Berechnung der Szenarien und Technologien ist sowohl in AP 2 im Technologievergleich als auch in AP 4.1 zusammen mit der CAPEX-Betrachtung enthalten.

INSTRUMENTE ZUR EXPORTABSICHERUNG BEI TURNKEYPROJEKTEN FÜR PILOTIERUNG UND MASSENPRODUKTION

Trotz der aktuellen Herausforderungen für die wettbewerbsfähige Photovoltaik-Produktion in Deutschland bleibt der deutsche Maschinenbau weiterhin ein zentraler Akteur in der Herstellung von PV-Produktionsanlagen. In den für den Maschinenbau attraktiven Märkten außerhalb von China, wie etwa Indien und USA, werden größtenteils Turnkey-Projekte umgesetzt. In dieser Form der Projektrealisierung gibt es für den Produzenten nur einen Vertragspartner, welcher die gesamten Leistungen aus Equipment, Technologie sowie Leistungsgarantien für die gesamte Linie übernimmt. Aktuell wird dieses Marktsegment der Turnkey-Projekte fast ausschließlich von chinesischen Firmen bedient. Westliche Anbieter versuchen durch andere Modelle, wie etwa Konsortien, eine Alternative aufzubauen. Aus Kundensicht müssen diese Gesellschaftsformen vergleichbare Absicherungs- und



Garantieanforderungen im Vergleich zu Turnkey-Projekten eines Anbieters übernehmen können.

Um solche Absicherungs- und Garantieforderungen detailliert prüfen zu können, wurden die relevanten Informationen in Rücksprache mit dem BMW und ptj zusammengestellt. Diese sind im Folgenden detailliert dargestellt. Ergänzt wird dieser Abschnitt durch Überlegungen, wie eine Auswahl entsprechender Projekte erfolgen kann.

Formen des gesellschaftlichen Zusammenschlusses verschiedener Firmen

Die folgende Tabelle stellt verschiedene Formen des Zusammenschlusses von Firmen bei der gemeinsamen Realisierung von Großprojekten dar

Tabelle 9: Mögliche Formen des gesellschaftlichen Zusammenschlusses verschiedener Firmen

Typ:	Joint Venture	Einfaches Konsortium (Losvergabe-Prinzip)	Arbeitsgemeinschaft (ARGE)	Solidar-konsortium	Bietergemein-schaft
<i>Rechtliche Einheit</i>	Eigene Gesellschaft	Keine	Keine	Keine	Keine - Nach Zuschlag ggf. Umwandlung in ein z.B. Solidar-konsortium
<i>Dauer</i>	Langfristig	Projektbezogen	Projektbezogen	Projektbezogen	Projekt- oder Produktbezogen
<i>Haftung</i>	Abhängig von der Gesellschaftsform	Haftung meist nur für den eigenen Leistungsanteil	Häufig teils gesamtschuldnerisch, teils einzel-schuldnerisch	Gemeinschaft-lich für das gesamte Projekt	Vor Auftragsver-gabe meist keine Haftung gegen-über Dritten
<i>Beispiel</i>	Renault-Nissan	Flughafenbau (Startbahnbau, Terminalbau etc.).	ARGE-Elbphilharmonie	Airbus-Konsortium Eurotunnel-Konsortium	Öffentliche Ausschrei-bungen
<i>Branchen</i>	Industrie (Automobil, Elektronik, etc.), Luftfahrt, IT	Bau, IT-Projekte (z. B. einzelne Projektbausteine)	Bau, Infrastruktur, Anlagenbau	Großbau (Tunnel, Brücken), Energie (Kraftwerke)	IT, Bau, Großprojekte



VERTRAGLICHE ASPEKTE

Für die Umsetzung eines Turnkey oder Pilotprojektes gelten bei internationalen Projekten vertragliche Standardpraktiken in der PV-Industrie. Folgende Punkte sind vertraglich geregelt, deren detaillierten Werte variieren aber zwischen Projekten:

General Limitation of Liability

Die Gesamthaftung des Auftragnehmers ist vertraglich begrenzt. Der Prozentsatz des Vertragspreises, der typischerweise verhandelbar ist, beträgt bei PV-Verträgen 100%. Ausgeschlossen sind Haftungen für entgangene Gewinne, Einnahmen, Vertragsverluste sowie indirekte oder Folgeschäden.

Liquidated damages

Vertragsstrafen bei Nichterfüllung von **Leistungsstandards** (Durchsatz, Ausbeute, Wirkungsgrad, Materialeinsatz) und **Zeitplan**. Liegen typischerweise zwischen 10% und 20%, wobei ein Leistungsstandard auf bis zu 10% limitiert ist. Vertragsstrafen für Leistungsstandard oftmals nur bis zu einem Minimalwert, darunter kann der Rückbau verlangt werden

Performance Guarantees

Zusätzliche Leistungsgarantien motivieren den Generalunternehmer, seine beste Leistung zu erbringen und optimal zu unterstützen. Liege in der Regel bei 5% - 20%

Defects and Liability Period

Während des Gewährleistungszeitraums reduziert sich die Gesamthaftung in der Regel auf maximal 20%.

Der Generalunternehmer sichert sich üblicherweise mit Anleihen oder Versicherungen gegen Ausfallrisiken ab. Der Versicherungsbetrag ändert sich im Verlauf des Projekts, beispielsweise wenn die Abnahme erfolgt und die Mängelgewährleistungsperiode beginnt. Dies kann nur risikobehaftete Teile wie Vertragsstrafen und Schadenersatz betreffen, aber auch höher sein.

Das Problem ist nun, dass Versicherungen, Garantien und Exportfinanzierung (von Euler Hermes aber auch anderen Firmen) oft nur für Folgeprojekte mit „Proven Technology“ oder and finanziell starke Integratoren (die es aktuell im Bereich PV nicht gibt) erteilt werden, bzw. werden sie an diese Projekte mit viel zu hohem Kosten erteilt. Die Versicherungssumme liegt dabei bei **max. 10% des Gesamtvolumens pro Jahr**.

An zwei Beispielen wurde dies kalkuliert für eine n-Typ Ingot und Wafer Fabrik, TOPCon Zellfabrik und Modulfabrik anhand der oben ermittelten CAPEX (siehe Tabelle 11).



Tabelle 10: CAPEX berücksichtigt zur Projektabsicherung [Mio. USD]

Fabriken	CAPEX Equipment +15% (I&C) + 5% (IFC)	
	Pilot Linie 300 MW	Produktion 5GW
Ingot and Wafer	38 Mio. USD	420 Mio. USD
Cell	38 Mio. USD	360 Mio. USD
Module	19 Mio. USD	120 Mio. USD

- **Szenario 1:** Absicherung durch Totalausfall von 100% bis zu dem Beginn der Gewährleistungsperiode
- **Szenario 2:** Absicherung der Mängelgewährleistung, Liquidated Damages und der Performancegarantien

Der gesamte Verlauf ist in folgender Grafik dargestellt:

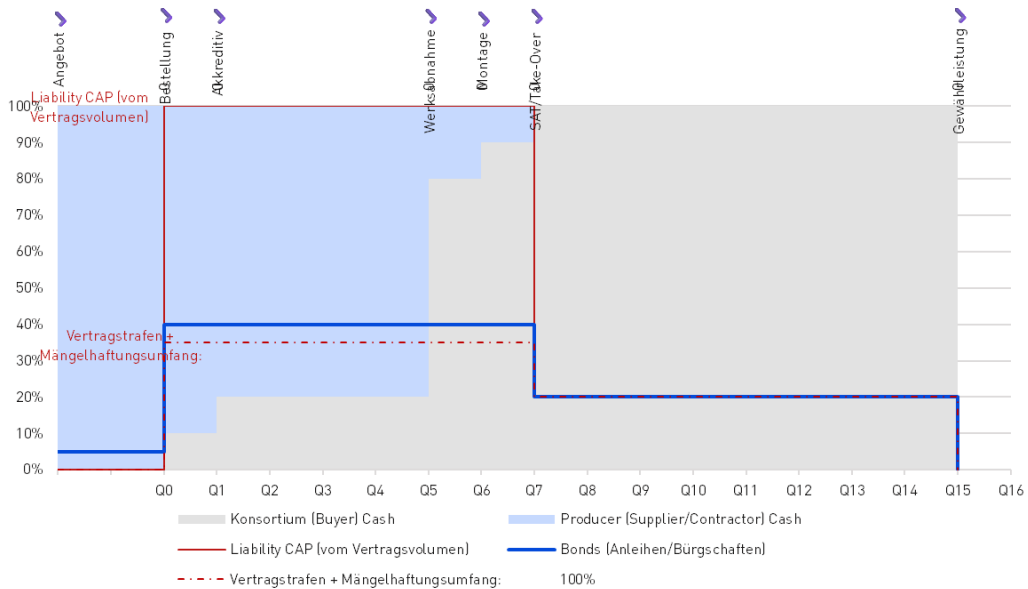


Abbildung 24: Darstellung der Zahlungen, Bonds und Haftungen anhand des Totalen „Liability CAPs“ welches als identisch zum Auftragsvolumen angenommen wurde.

Die Versicherungskosten sowie vergleichbare Garantien belaufen sich für die 46 Millionen USD Ingot/Wafer-Pilotlinie auf 11% bis 22% des Investitionsvolumens. Weitere Ergebnisse sind in Tabelle 11 zusammen mit der Absicherungssumme während des jeweiligen Projektzeitraumes dargestellt.



Tabelle 11: Berechnung der Versicherungssummen auf Basis von 10%

Vertragstrafen + Mängelhaftungsumfang:	Kosten Absicherung Pilot Linie 300 MW	Kosten Absicherung Produktion 5GW	Bestellung	Akkreditiv	Werkabnahme	Montage	SAT/Take-Over	Gewährleistung
Ingot und Wafer	4 mUSD	44 mUSD	35%	35%	35%	35%	20%	0%
Zelle	4 mUSD	37 mUSD	35%	35%	35%	35%	20%	0%
Module	2 mUSD	12 mUSD	35%	35%	35%	35%	20%	0%
100% coverage (theroetical)	Pilot	5 GW						
Ingot und Wafer	8 mUSD	91 mUSD	100%	100%	100%	100%	20%	0%
Zelle	8 mUSD	78 mUSD	100%	100%	100%	100%	20%	0%
Module	4 mUSD	26 mUSD	100%	100%	100%	100%	20%	0%

Fazit: Die hohen Kosten sind eine Hürde für den internationalen Markteintritt. **Ein Absicherungsinstrument für Risiken bei Kunden und Generalunternehmern wird empfohlen, um wettbewerbsfähige Angebote zu ermöglichen.** Die Produktion von Photovoltaik-Produkten in Deutschland ist schwierig, aber der Maschinenbau behauptet sich als wichtiger Anbieter von PV-Produktionsanlagen. Turnkey-Projekte sind gefragt, verlangen jedoch umfangreiche Garantien, was europäische Konsortien zurückhaltend macht. Das schwächt den deutschen Export im Bereich Produktionstechnologien. Ein Finanzierungsmechanismus zur Absicherung von Garantien könnte die globale Wettbewerbsfähigkeit stärken – vorausgesetzt, Forschung und Entwicklung bleiben auf dem neuesten Stand.

STAND DER MÖGLICHEN IMPLEMENTIERUNG EINES ZUSÄTZLICHEN ABSICHERUNGSSINSTRUMENTES:

Die Projektergebnisse und vorläufigen Zahlen wurden bereits innerhalb der Projektlaufzeit dem BMWF zur Verfügung gestellt. Ergänzend wurden folgende Empfehlungen erarbeitet:

Projekttablauf

Aufgrund der Dringlichkeit eines zusätzlichen Absicherungsinstrumentes, welches etwa durch mehrere Maschinenbauunternehmen während des Workshops auf der Intersolar geäußert wurde, empfehlen wir, das Projekt in eine vorlaufende Vertriebsphase mit einer dezidierten Laufzeit zu unterteilen, die vom Antragsteller festgelegt werden muss. Gibt der Antragsteller die Laufzeit der Vertriebsphasen an, kann sie in die Bewertung einfließen, konkrete Projekte können bevorzugt werden und eine Herausögerung der Projekte verhindert werden. In dieser Phase liegt nach einer effizienten Vorauswahl das Absicherungsinstrument als Zusage vor und kann anschließend mit der Finalisierung zusätzlicher bzw. aktualisierter Informationen sowie einem konkreten Kaufvertrag mit dem Kunden im zweiten Schritt realisiert werden. Dadurch können die Antragsteller frühzeitig zusätzliche Absicherung bei Verhandlungen und Ausschreibungen einsetzen. Sollte sich während der Vertriebsphase kein Kunde finden, werden die Absicherungsmittel wieder für neue Projekte bereitgestellt. Details hierfür sind Tabelle 12 zu entnehmen.



Tabelle 12: Aufteilung der Avalstellung

MEILENSTEIN	ZIELE/AUFGABEN	ENTSCHEIDUNGSKRITERIEN
PHASE 1 – VERTRIEBSPHASE	Vorauswahl (bis 8 Projekte) Erste Risiko- und Bonitätsprüfung (Hermes-Rating) Vorläufige Aval-Anfrage bei Euler Hermes (Avalkreditdispo)	Letter of Intent oder Ausschreibungsergebnis vorhanden Positive Bonität des Kunden Förderungswürdigkeit (Bundes-ECA-Kriterien)
PHASE 2 – REALISIERUNGSPHASE	Finalisierung Endkundenvertrag und Zahlungspläne Konkrete Avalbeantragung (Leistungsgarantie, Anzahlungsaval etc.) Einsatz staatlicher Teildeckung (Avalgarantie/Hermes)	Unterzeichneter Kauf-/Liefervertrag vorliegend Interne Projektfreigabe (Budget, Termine) Bereitstellung der Avalgarantie (Bundesdeckung)

Portfoliovorschlag

Außerdem wurde ein Vorschlag erstellt, welche Projekte für die Pilotphase und eine schlüsselfertige Umsetzung durch deutsche Konsortialpartner berücksichtigt werden könnten.

- Metallurgisches Silizium, z.B. Verhinderung von Zwangsarbeit in Uyurien, Markterwartungen
- Polysilizium: Etablierte Hersteller mit umfangreicher Expertise
- Wafer (2+1):
 - Czochralski-Kristallisationsprozess
 - Mögliche Bildung eines separaten Konsortiums im Bereich von Brick zu Wafer
 - Direct Wafering – Alternative Technologien (eventuell auch neue Dotierung oder magnetische Cz-Systeme)
- Solarzelle (3 + 1):
 - TOPCon-Technologie
 - Rückkontakttechnologie XBC
 - Heterojunction-Technologie
 - Tandem
- Module (2 +1)
 - Weiterentwicklungsstufe der Standardtechnologie
 - Premiumsegment, z.B. ECA Shingle Matrix
- Materialien:
 - Herstellung von dünnem Glas
 - Fortgeschrittene Extrusion von Verkapselungsschritten

FAZIT UND FEEDBACK:

Feedback zum Vorschlag eines zusätzlichen Aval-Instrument im Abschlussworkshop:

Die Maschinenbauer berichteten, dass es bei Konsortialprojekten und nicht etablierten Exportinitiativen oft nicht gelingt, staatlich abgesicherte Garantien, Kredite, private Versicherungen und Bankgarantien zu erhalten. Das Haupthindernis ist die Bestimmung des Integrators / des Konsortialführers. In der Regel übernehmen kleinere Unternehmen die Führung. Während interne Risiken vertraglich gesteuert werden können, werden z.B. externe Garantien durch niedrigere Bilanzen der federführenden Konsortialpartner behindert.



Das Vertrauen in schlüsselfertige europäische Lösungen ist in den letzten zehn Jahren aufgrund des Mangels an westlicher Referenzlösungen gesunken. Während einzelne Schritte in eine TOPCon-Linie integriert werden konnten, wurde eine vollständige Linie mit validierten KPIs wie der Zelleffizienz von einem Konsortium nicht bestätigt, so dass z.B. Euler Hermes sie nicht als bewährte Technologie einstuft und Garantien für ihre Lösungen und die gesamte Projekthaftung verhindert.

Alle Parteien waren sich einig, dass ein spezielles Garantieprogramm die Initiierung und den Neustart bereits bestehender Initiativen erheblich positiv beeinflussen würde, und betonten, wie wichtig sofortiges Handeln ist. Für Zellfertigungsprojekte wird erwartet, dass innerhalb der nächsten zwei Jahre erhebliche Kapazitäten in Indien beschafft werden. Zuschüsse und Garantien müssen jedoch frühzeitig in den Verkaufsgesprächen vorliegen, um effektiv an großen Ausschreibungen teilnehmen zu können. Daher muss schnell ein potenzielles Programm eingerichtet werden, wobei die Verwaltungsverfahren schlank und schnell sein müssen.

Es wurden einige weitere Herausforderungen identifiziert, die beim Abschluss des Projekts angegangen werden:

1. Wie wählt man die richtigen Projekte aus, wenn es verschiedene Lieferanten gibt, z.B. Lieferanten von nasschemischen Werkzeugen?
2. Gibt es eine Möglichkeit, Teilkredite anzubieten, um die Lücke zu schließen, die durch aggressive chinesische Zahlungsbedingungen entsteht, die oft nur eine Anzahlung von 10 % erfordern?
3. Wie können wir Projektgesellschaften gründen, und wie sollte eine Teiltechnologie von den Maschinenherstellern lizenziert werden?

Erfüllte Meilensteine:

MS 4.1: Ermittlung des CAPEX-Bedarfs für verschiedene Szenarien sowie der daraus resultierenden Bürgschaftshöhen für Equipment-, Versorgungsanlagen und Rücknahmeprozess

MS 4.2: Ermittlung OPEX und Höhe einer Mängelhaftung, mittelbare Schäden und Abschätzung von Höhe von Vertragsstrafen bei Geschäftsausfällen



AP 5: EU-FÖRDERPROGRAMME FÜR PV UND PV-PILOTFERTIGUNGSLINIEN

Koordination: HZB

Gemäß der 2023 Renewable Energy Directive [1] hat sich die Europäische Union verpflichtet, bis 2030 einen Anteil von mindestens 42,5 % erneuerbarer Energien am Gesamtenergieverbrauch zu erreichen, mit einem angestrebten Zielwert von 45 %. Im Jahr 2023 betrug der Anteil erneuerbarer Energien am Energieverbrauch in der EU 24,5 %.

Zur Erreichung dieses Ziels hat Europa eine Vielzahl politischer Maßnahmen verabschiedet, die in erster Linie den Ausbau erneuerbarer Energien – wobei Photovoltaik (PV) eine zentrale Rolle spielt – fördern. Die Produktion von PV-Technologien innerhalb der EU wurde zwar ebenfalls als wichtig eingestuft, jedoch bislang als nachrangig gegenüber dem raschen Ausbau betrachtet. Gleichwohl enthalten einige dieser politischen Maßnahmen – insbesondere der *Green Deal Industrial Plan* [2], der *Net-Zero Industry Act* [3] sowie die *European Solar Charter* [4] – klare Zielsetzungen, wie etwa die „Stärkung der Herstellung von Netto-Null-Technologien in der EU“, die „Skalierung der inländischen Produktion sauberer Technologien auf mindestens 40 %“ sowie ein „industrielles Bekenntnis zur PV-Fertigung in der EU“.

Diese Zielsetzungen und politischen Rahmenwerke sind jedoch in der Regel nicht mit eigenständigen Haushaltsmitteln unterlegt, die Industrieunternehmen oder Forschungseinrichtungen in Kooperation mit der Industrie unmittelbar abrufen oder nutzen könnten, um die PV-Produktion in der EU auszubauen. Stattdessen wird der Großteil der Finanzierungsmöglichkeiten auf etablierte, jedoch stark kompetitive und bürokratische Instrumente wie den *European Innovation Council (EIC)* [5], die *Europäische Investitionsbank (EIB)* [6] und den *European Innovation Fund (EIF)* [7] verwiesen.

Im Gegensatz dazu haben die Europäische Kommission und das Europäische Parlament auch politische Maßnahmen veröffentlicht, die konkrete Angaben zur vorgesehenen finanziellen Ausstattung enthalten. So sieht der *REPowerEU-Plan* [8] den beschleunigten Ausbau von Photovoltaik zur Verringerung der Abhängigkeit von fossilen Energieträgern – insbesondere russischem Gas und Öl – vor und ist mit einem Budget von 210 Milliarden Euro bis 2027 ausgestattet. Der *Europäische Grüne Deal* [9] (nicht zu verwechseln mit dem *Green Deal Industrial Plan* [2]) verfolgt eine sektorübergreifende tiefgreifende Dekarbonisierung und verfügt über ein Budget von 1 Billion Euro, verteilt über zehn Jahre.

Darüber hinaus besitzt die EU einen einzigartigen Vorteil in der öffentlichen Forschungs- und Innovationsförderung, insbesondere durch das Programm *Horizont Europa* [10]. Laut Europäischer Kommission stehen zur Unterstützung des Ausbaus der Solarenergie unter anderem folgende EU-Instrumente zur Verfügung: die *Aufbau- und Resilienzfazilität* [11], die *Kohäsionsfonds* [12], *InvestEU* [13], der *Innovationsfonds* [7], der *Modernisierungsfonds* [14], *Horizont Europa* [10], das *LIFE-Programm* [15], die *Connecting Europe Facility* [16] sowie der *Finanzierungsmechanismus für erneuerbare Energien* der EU [17].

Bislang existiert jedoch keine eindeutige Richtlinie darüber, welche dieser Fördermechanismen konkret zur Unterstützung der lokalen Produktion von PV-Technologien innerhalb der EU herangezogen werden können, und nicht alle Instrumente



zur Unterstützung des Roll-outs sind zwangsläufig auf die industrielle Fertigung übertragbar oder dafür geeignet.

Im Folgenden wird daher ein strukturierter Überblick über verschiedene EU-Finanzierungs- und Politikmaßnahmen gegeben, die – in unterschiedlichem Ausmaß – PV-Pilotfertigungslinien in ganz Europa, einschließlich Deutschland, unterstützen können.

EU-FÖRDERUNG FÜR FORSCHUNG UND INNOVATION (F&I): HORIZONT EUROPA

Horizont Europa [10] ist das zentrale Förderprogramm der EU für Forschung und Innovation (F&I). Es verfolgt das Ziel, die Wettbewerbsfähigkeit und das Wachstum der EU zu stärken sowie den Klimawandel durch die Förderung von Zusammenarbeit und durch den Ausbau des europäischen F&I-Systems zu bekämpfen. Mit einem Gesamtbudget von über 95,5 Milliarden Euro für den Zeitraum 2021–2027 zählt *Horizont Europa* zu den weltweit größten öffentlichen Förderprogrammen im Bereich Forschung und Innovation.

Im Hinblick auf die Photovoltaikproduktion (PV) soll *Horizont Europa* – ebenso wie die EU-F&I-Politik insgesamt – einen entscheidenden Beitrag zur Schaffung einer stabilen europäischen Innovations- und Produktionsbasis für PV leisten. Ziel ist es, die Investitions- (CAPEX) und Betriebskosten (OPEX) entlang der PV-Wertschöpfungskette zu senken und damit kostengünstigere Solarmodule sowie einen niedrigeren Levelized Cost of Electricity (LCOE) zu ermöglichen. Diese Kostenreduktionen sollen vor allem durch den Einsatz neuartiger und effizienterer Solartechnologien (z. B. Tandemsolarzellen) sowie durch die Entwicklung neuer, effizienter Maschinen und industrieller Prozesse erzielt werden.

Parallel zu den technologischen Fortschritten hat die EU auch eine Reihe nicht-preislicher Kriterien für die lokale PV-Fertigung definiert und unterstützt insbesondere Vorhaben, die zur ökologischen und sozialen Nachhaltigkeit der europäischen PV-Wertschöpfungskette beitragen.

Der Umfang der erwarteten Förderanträge umfasst u. a. die Entwicklung und Demonstration alternativer Herstellungsverfahren und -ausrüstungen für PV mit reduziertem CAPEX, OPEX, Energie- und Materialverbrauch sowie die Implementierung von *Industrie 4.0*-Konzepten. Ferner sollen die Produktivität und Nachhaltigkeit von großtechnischen PV-Produktionsanlagen erhöht, der CO₂-Fußabdruck von Solarmodulen in der Herstellung und am Ende ihres Lebenszyklus verringert, multidisziplinäre Konsortien unter Einbeziehung industrieller Partner gebildet sowie neue PV-Technologien näher an den industriellen Maßstab herangeführt werden.

Die Ausschreibungen im Rahmen von Pfeiler 2 „Globale Herausforderungen und industrielle Wettbewerbsfähigkeit Europas“ [18] sehen rund 40 Milliarden Euro für Forschungsmaßnahmen vor, die den *Europäischen Grünen Deal* unterstützen. Rückblickend wurden im Zeitraum 2021–2024 durchschnittlich 73 Millionen Euro pro Jahr durch *Horizont Europa* speziell für PV-Forschung und -Innovation in Europa bereitgestellt.

Mit Blick auf die Jahre 2026–2027 hat die Europäische Kommission die Einführung der *European Partnership for Innovation in PV (EUPI-PV)* [19] angekündigt. Ziel dieser Partnerschaft ist es, die Zusammenarbeit zwischen öffentlichem und privatem Sektor zu stärken und die Fördermittel aus *Horizont Europa* gezielter auf Projekte mit hoher



Technologie-Reife (TRL) im PV-Sektor zu lenken. Das übergeordnete Ziel besteht darin, die Markteinführung von PV-Forschung und -Innovation in Europa zu beschleunigen, indem sichergestellt wird, dass die Förderaufrufe von *Horizont Europa* dem Stand der Technik im Bereich PV entsprechen und F&I-Projekte in industriellem Maßstab ermöglicht werden.

EU-POLITIKINSTRUMENTE ZUR UNTERSTÜTZUNG DER PV-PRODUKTION UND/ODER DES AUSBAUS

Der *EU-Innovationsfonds* [7] zählt zu den weltweit größten Förderinstrumenten für die Einführung innovativer Netto-Null-Technologien. Im laufenden Jahrzehnt (2020–2030) werden über das EU-Emissionshandelssystem rund 40 Milliarden Euro für eine klimaneutrale Zukunft der EU bereitgestellt. Die Mittelvergabe erfolgt in Form von Zuschüssen und Auktionen und richtet sich insbesondere an Projekte im Bereich Produktion und Fertigung innerhalb der EU. Von den insgesamt rund 40 Milliarden Euro wurden bislang etwa 4,8 Milliarden Euro für die Industrie und Akteure im Bereich Clean-Tech bereitgestellt. Künftige Ausschreibungen zielen darauf ab, die Einführung und Herstellung innovativer Technologien noch weiter zu beschleunigen.

Die *European Solar Industry Alliance (ESIA)* [20] hat in einer ihrer Veröffentlichungen empfohlen, den Innovationsfonds für die Einführung wettbewerblicher Ausschreibungsmechanismen zur OPEX-Förderung (€/Watt produziert) über eine Mindestdauer von zehn Jahren zu nutzen. Darüber hinaus sei sicherzustellen, dass ein ausreichender Anteil der Mittel zweckgebunden für die PV-Wertschöpfungskette bis 2030 zur Verfügung steht. Insbesondere sollten dabei kritische Segmente wie die Herstellung von Ingots und Wafern priorisiert werden.

Zwar umfasst das Portfolio des *Innovationsfonds 2023* elf Fertigungsprojekte zur Produktion von erneuerbaren Energien oder Energiespeichern – davon sechs im Bereich Photovoltaik –, jedoch war lediglich eines dieser Vorhaben auf großskalige PV-Produktion ausgerichtet. Im Rahmen des *TANGO*-Projekts, das von *ENEL Green Power* durchgeführt wird, förderte der Innovationsfonds die *3Sun-Gigafactory* in Catania, Italien – eine der größten Produktionsstätten für Solarmodule in Europa [21]. Die Fabrik ist die erste in Europa, die bifaziale Module mit Heterojunction-Technologie in Serie herstellt, und soll ihre Produktionskapazität auf jährlich 3 Gigawatt erhöhen, mit dem Ziel, zur größten Solarmodulfertigung Europas zu werden.

Die übrigen fünf PV-Projekte waren: das *HOPE*-Projekt der *Meyer Burger Technology AG*, Deutschland [22]; das *DAWN*-Projekt von *Midsummer*, Schweden [23]; das *SunRISE*-Projekt von *NorSun*, Norwegen [24]; die *Helexio*-Fertigungslinie für gebäudeintegrierte PV in Frankreich [25] sowie das Projekt *AGRIVOLTAIC CANOPY* in Frankreich [26].

Grundsätzlich stellt der Innovationsfonds aufgrund seines klaren Fokus auf die Entwicklung, den Ausbau und die lokale Fertigung von Clean-Tech eine vielversprechende Finanzierungsquelle auf europäischer Ebene dar. Besonders geeignet ist er zur Förderung von PV-Pilotfertigungslinien, insbesondere solcher mit nachweislicher industrieller Reife.

Ein wesentlicher Nachteil des Innovationsfonds liegt jedoch in seiner stark kompetitiven Ausgestaltung, den hohen Antragskosten sowie dem langen Entscheidungszeitraum –



zwischen Ausschreibung und Mittelzuteilung kann ein Zeitraum von bis zu 18 Monaten liegen.

Der *Europäische Grüne Deal* [9], der im Dezember 2019 ins Leben gerufen wurde, ist die umfassende Strategie der EU zur Erreichung der Klimaneutralität bis zum Jahr 2050. Photovoltaik (PV) und der Grüne Deal sind eng miteinander verknüpft – PV spielt eine zentrale Rolle bei der Verwirklichung der ehrgeizigen Klimaziele der EU sowie bei der Dekarbonisierung des Energiesystems. Ziel ist die Reduktion der Treibhausgasemissionen um mindestens 55 % bis 2030 im Vergleich zum Niveau von 1990, mit dem langfristigen Ziel von Netto-Null-Emissionen bis zur Mitte des Jahrhunderts. Darüber hinaus soll der Grüne Deal Unternehmen dabei unterstützen, weltweit führend in der Entwicklung und Produktion sauberer Technologien und Produkte zu werden und gleichzeitig einen gerechten und inklusiven Übergang sicherstellen.

Diese Initiative erstreckt sich über zahlreiche Sektoren – darunter Energie, Verkehr, Landwirtschaft und Industrie – und verfolgt das Ziel, die EU in eine nachhaltige und wettbewerbsfähige Wirtschaft zu transformieren.

Zur Finanzierung dieser ambitionierten Ziele hat die EU über einen Zeitraum von zehn Jahren rund 1 Billion Euro vorgesehen. Davon stammen etwa 500 Milliarden Euro aus dem EU-Haushalt für Klima- und Umweltmaßnahmen, sowie rund 279 Milliarden Euro aus *InvestEU* (siehe unten), die für klimabezogene Projekte eingeplant sind. Zusätzlich soll der *Just Transition Mechanism* [27] mindestens 100 Milliarden Euro mobilisieren, um Regionen und Gemeinschaften zu unterstützen, die vom Übergang zu einer CO₂-armen Wirtschaft besonders betroffen sind. Darüber hinaus hat sich die EU verpflichtet, weitere Maßnahmen zur Förderung grüner öffentlicher und privater Investitionen bereitzustellen, attraktive Investitionsbedingungen zu schaffen und technische Unterstützung zur Auswahl nachhaltiger Projekte anzubieten.

Das Programm *InvestEU* [13] bündelt öffentliche und private Mittel, um langfristige Finanzierungen für die Nachhaltigkeitsziele der EU sicherzustellen. Es zielt darauf ab, private Investitionen in Schlüsselbereiche der EU-Politik zu lenken, darunter die grüne und digitale Transformation, die Innovationsförderung sowie soziale Investitionen und Qualifikationsentwicklung. *InvestEU* hat mehrere bedeutende Projekte zur PV-Fertigung gefördert, um den grünen Wandel Europas zu unterstützen.

Beispielsweise wurde ein Darlehen in Höhe von 35 Millionen Euro an *Exeger* (Schweden) [28] vergeben, um die Produktion ihrer innovativen *Powerfoyle*-Solarzellen hochzuskalieren. Diese ultra-dünnen, flexiblen Zellen wandeln Innen- und Außenlicht in Strom um und sind für den Einsatz in Unterhaltungselektronik konzipiert. Sie ermöglichen selbstaufladende Geräte und reduzieren somit den Bedarf an Einwegbatterien. *Solaria* (Spanien, Italien und Portugal) [29] erhielt eine Finanzierungszusage über 1,7 Milliarden Euro zur Errichtung von 120 Solarparks mit einer Gesamtkapazität von 5,6 GW. Diese Anlagen sollen etwa 2,5 Millionen Haushalte mit sauberer Energie versorgen und während der Bauphase tausende Arbeitsplätze schaffen.

Der *Just Transition Fund* [30] – die erste Säule des oben genannten *Just Transition Mechanism* [27] – hat bisher keine PV-Projekte direkt gefördert, allerdings wurden andere energiebezogene Projekte unterstützt. In Estland beispielsweise werden 354 Millionen Euro



aus dem Just Transition Fund verwendet, um über 11.000 ehemalige Beschäftigte der Ölschieferindustrie umzuschulen [31]. Im schwedischen Landkreis Norrbotten fließen 7 Millionen Euro in das Projekt *H2-Labs*, das die Wasserstoffproduktion zur Dekarbonisierung der Stahlindustrie erforscht [32].

Der *REPowerEU-Plan* [8], der infolge des Kriegs in der Ukraine veröffentlicht wurde, betont die Notwendigkeit, die Abhängigkeit von russischen fossilen Brennstoffen zu verringern – womit der Ausbau der Photovoltaik (PV) noch stärker in den Vordergrund rückt. Der beschleunigte Ausbau von Solar- und Windenergieprojekten, kombiniert mit der Einführung von erneuerbarem Wasserstoff, soll dazu beitragen, Einsparungen von rund 50 Milliarden Kubikmetern Gasimporten zu erzielen. Für die Umsetzung bis 2027 ist ein Budget von insgesamt 210 Milliarden Euro vorgesehen, von dem mehr als die Hälfte (113 Milliarden Euro) für erneuerbare Energien (86 Mrd. €) sowie für den Aufbau der Wasserstoffinfrastruktur (27 Mrd. €) eingeplant ist. Die verbleibenden Mittel verteilen sich wie folgt: Energieeffizienz und Wärmepumpen bis 2030 (56 Mrd. €), Umstellung der Industrie auf weniger fossile Brennstoffe (41 Mrd. €), Ausbau der Biomethanproduktion (47 Mrd. €), Netzausbau zur Elektrifizierung (29 Mrd. €), LNG- und Pipeline-Gasimporte (10 Mrd. €) sowie Maßnahmen zur Ölversorgungssicherheit (1,5–2 Mrd. €).

Trotz dieser erheblichen Investitionen in den Bereich der erneuerbaren Energien bietet REPowerEU jedoch keinen klaren Investitionspfad für den Aufbau neuer Pilotfertigungslinien für saubere Technologien. Vielmehr liegt der Fokus auf dem Ausbau von Infrastrukturprojekten.

Im Rahmen von REPowerEU wurde zudem die *EU-Solarstrategie* [33] vorgestellt (nicht zu verwechseln mit der *Europäischen Solar-Charta* [4]). Diese stellt eine PV-spezifische Teilstrategie dar und enthält u. a. eine rechtsverbindliche Solarpflicht für Dächer in der EU, Maßnahmen zur Ausbildung einer qualifizierten Fachkräftebasis für Produktion, Installation und Wartung von PV-Anlagen sowie Unterstützung für den Ausbau der europäischen PV-Industrie – insbesondere zur Deckung der Nachfrage des Binnenmarktes. Darüber hinaus beinhaltet die Strategie die Vereinfachung von Genehmigungsverfahren, die Ausarbeitung von Leitlinien für die Mitgliedstaaten sowohl für konservative als auch innovative PV-Anwendungen, die Förderung von Gleichstrom-Technologien (DC), die Einführung von Ökodesign- und Energiekennzeichnungsanforderungen für PV sowie potenzielle Importverbote für PV-Produkte, die unter Zwangsarbeit hergestellt wurden.

Wie REPowerEU fokussiert sich auch die EU-Solarstrategie primär auf die Förderung des Ausbaus von PV-Anlagen, nicht jedoch explizit auf die Produktion von PV-Modulen in Europa. Im Gegensatz zum Grünen Deal oder REPowerEU handelt es sich bei der Solarstrategie um eine strategische Leitlinie ohne eigenes Budget. Die Finanzierung soll überwiegend durch private Investitionen erfolgen, ergänzt durch öffentliche Mittel – wobei Letztere bislang nicht eindeutig definiert sind.

Der *Green Deal Industrial Plan* [2], der im Februar 2023 vorgestellt wurde, zielt darauf ab, die Wettbewerbsfähigkeit Europas im Bereich der Netto-Null-Industrien zu stärken und die Transformation zur Klimaneutralität zu beschleunigen. Obwohl kein gesondertes Budget vorgesehen ist, soll durch vier strategische Säulen ein förderliches Umfeld für den Ausbau der europäischen Fertigungskapazitäten für Netto-Null-Technologien, einschließlich Solar-



PV, geschaffen werden: (1) Vereinfachung des regulatorischen Rahmens, (2) schnellerer Zugang zu Fördermitteln über bestehende EU-Finanzierungsprogramme, (3) Förderung von Kompetenzen und Qualifikationen sowie (4) Sicherstellung offener und widerstandsfähiger Lieferketten durch fairen Handel.

Die finanzielle Unterstützung des Green Deal Industrial Plan basiert auf zwei Ansätzen: Einerseits wurden temporäre Lockerungen der Beihilfavorschriften angekündigt, um es den Mitgliedstaaten zu ermöglichen, Steuervergünstigungen und beschleunigte Förderungen – etwa für PV-Hersteller – zu gewähren. Andererseits soll auf bestehende EU-Finanzierungsinstrumente zurückgegriffen werden, z. B. REPowerEU, InvestEU oder den Innovationsfonds. Dennoch fehlt bislang ein klar definierter Mechanismus oder ein eigenes Budget zur gezielten Finanzierung von PV-Fertigungskapazitäten innerhalb der EU.

Das *Net-Zero Industry Act* (NZIA) [3] ist eine konkrete Gesetzesinitiative innerhalb des Green Deal Industrial Plan, mit dem Ziel, die Fertigungskapazitäten von acht sauberen Schlüsseltechnologien in Europa auf mindestens 40 % des Bedarfs zu erhöhen. Dazu gehören: Solar-PV, Batterien und Speicherlösungen, Windenergie, Wärmepumpen und Geothermie, Elektrolyseure und Brennstoffzellen, CO₂-Abscheidung und -Speicherung, nachhaltiges Biogas/Biomethan sowie Netztechnologien. Insbesondere PV wird im NZIA als „strategische Netto-Null-Technologie“ definiert, deren Herstellung in der EU forciert werden soll.

Der NZIA zielt darauf ab, Investitionen anzuziehen und bessere Rahmenbedingungen sowie Marktzugang für saubere Technologien zu schaffen – etwa durch öffentliche Ausschreibungen mit Resilienz-Kriterien (*resilience auctions*), wie sie im NZIA vorgesehen sind. Im Rahmen des Green Deal Industrial Plan gilt der NZIA als zentrales Instrument zur Vereinfachung des regulatorischen Umfelds in der EU und zur Förderung der europäischen Fertigung von PV-Technologien.

Darüber hinaus sollen sogenannte *Non-Price Criteria* (Nicht-Preis-Kriterien) dazu beitragen, dass europäische Kunden verstärkt zu in der EU hergestellten PV-Modulen greifen. Diese Kriterien können beispielsweise die Einschränkung der Förderfähigkeit von Produkten aus Drittländern vorsehen, die mehr als 50 % des EU-Marktes dominieren, oder die Bewertung des Anteils europäischer Fertigung als Zuschlagskriterium in Ausschreibungen berücksichtigen.

Der *Green Deal Industrial Plan* und der *Net-Zero Industry Act* beabsichtigen, ihre Ziele überwiegend durch die Nutzung bestehender EU-Finanzierungsinstrumente zu erreichen. Im Gegensatz dazu verfolgt der im Februar 2025 vorgelegte *Clean Industrial Deal* [34] einen neuen Ansatz: Er soll die Nachfrage nach sauberen Produkten stärken und den Übergang zur Klimaneutralität gezielt durch Investitionen in erneuerbare Energietechnologien, insbesondere Photovoltaik (PV), finanzieren. Zu den Maßnahmen gehört unter anderem die Einführung von „Nachhaltigkeits-, Resilienz- und ‚Made in Europe‘-Kriterien“ bei öffentlichen und privaten Beschaffungsverfahren – vergleichbar mit den *Non-Price Criteria* im NZIA –, um die Nachfrage nach in der EU hergestellten Technologien zu steigern.

Der *Clean Industrial Deal* sieht ein eigenes Budget in Höhe von 100 Milliarden Euro speziell für die europäische Produktion sauberer Technologien vor. Ergänzend sollen Maßnahmen eingeführt werden, um die Stromkosten zu senken und faire Wettbewerbsbedingungen für



die europäische PV-Fertigung zu schaffen. Die Europäische Kommission hat angekündigt, gemeinsam mit der Europäischen Investitionsbank (EIB) ein Pilotprogramm in Höhe von 500 Millionen Euro zu starten, um langfristige Stromabnahmeverträge (Power Purchase Agreements, PPAs) für erneuerbare Energien abzusichern – mit einem besonderen Fokus auf kleine und mittlere Unternehmen. Zudem sollen die Beihilfevorschriften bis Juni 2025 vereinfacht werden.

Darüber hinaus soll die Entwicklung sauberer Technologien durch eine für 2026 vorgeschlagene *Industrial Decarbonisation Bank* [35] weiter gestärkt werden. Diese neue Einrichtung soll auf dem bestehenden Innovationsfonds sowie auf Einnahmen aus Teilen des Emissionshandels (ETS) basieren und zusätzliche 100 Milliarden Euro für saubere Technologien bereitstellen. Abschließend ist vorgesehen, über ein privatwirtschaftliches Finanzierungsinstrument weitere 50 Milliarden Euro zu mobilisieren.

Insgesamt stellt der *Clean Industrial Deal* – auch aufgrund der klaren Zielsetzung, „Made-in-EU Clean Tech“ zu fördern – eines der bislang bedeutendsten industriepolitischen Maßnahmenpakete der Europäischen Kommission dar. Besonders stark ist die Initiative in ihrem Ziel, die Energiekosten in der EU zu senken – ein Faktor, der die Entwicklung der PV-Produktion in Europa seit Jahren erheblich gehemmt hat. Durch niedrigere Energiepreise würde die PV-Industrie eine kontinuierliche OPEX-Unterstützung erhalten, vergleichbar mit der operativen Unterstützung für PV-Fertigung in den USA im Rahmen des *Inflation Reduction Act* (IRA). Obwohl sich die Initiative noch in einem frühen Stadium befindet, ist der *Clean Industrial Deal* voraussichtlich das attraktivste EU-weite Finanzierungsinstrument zur Etablierung von PV-Pilotlinien in Deutschland und anderen Mitgliedstaaten.

Ein weiteres konkretes Instrument zur Unterstützung des europäischen PV-Sektors ist die im April 2024 unterzeichnete *Europäische Solar-Charta* [4]. Sie stellt eine gemeinsame Selbstverpflichtung der Industrie zur Förderung der PV-Fertigung in der EU dar und sieht unter anderem Mittel in Höhe von mindestens 400 Millionen Euro aus dem Innovationsfonds vor. Die Charta ist jedoch rechtlich nicht bindend für die Europäische Kommission und fordert daher eine starke Unterstützung durch die Mitgliedstaaten.

Einerseits haben sich die unterzeichnenden Mitgliedstaaten verpflichtet, eine widerstandsfähige Versorgung mit hochwertigen und innovativen PV-Produkten in der EU zu fördern, sämtliche verfügbaren EU-Fördermöglichkeiten zu nutzen, sich aktiv an der Task Force der *European Solar Industry Alliance* zu beteiligen, bestehende Produktionskapazitäten zu erhalten und auszubauen sowie Aspekte wie Resilienz, Nachhaltigkeit, verantwortungsvolle Unternehmensführung, Innovation und Cybersicherheit in ihre nationalen Strategien einzubeziehen – auch durch Kooperation mit Herstellern.

Andererseits hat die Europäische Kommission erklärt, den Zugang zu EU-Finanzmitteln für PV-Fertigungsprojekte weiter erleichtern zu wollen, insbesondere über die erwähnten 400 Millionen Euro aus dem Innovationsfonds. Darüber hinaus soll die Unterstützung durch InvestEU und die Europäische Investitionsbank (EIB) verstärkt werden. Schließlich beabsichtigt die Kommission, die Mitgliedstaaten bei der Einführung und Umsetzung von *Non-Price Criteria* sowie bei Ökodesign- und Energiekennzeichnungsmaßnahmen zu unterstützen.



Ähnlich wie der *Clean Industrial Deal* bietet auch die *Solar-Charta* ein geeignetes Instrument auf EU-Ebene zur Unterstützung von PV-Pilotprojekten. Ein potenzieller Nachteil besteht jedoch darin, dass die Hauptverantwortung stark auf die Mitgliedstaaten verlagert wird. Dies könnte sich jedoch als Vorteil erweisen, wenn beispielsweise in einem einzelnen Mitgliedstaat – wie Deutschland – eine Pilotlinie entwickelt werden soll.

EU-FINANZIERUNGSINSTRUMENTE, DIE ÜBER SOLAR-PV HINAUSGEHEN, ABER POLITISCHE MAßNAHMEN ZUR UNTERSTÜTZUNG DER SOLAR-PV-FERTIGUNG DIREKT FINANZIEREN

Der *European Innovation Council Fund (EIC)* [5] ist der Beteiligungsarm des Europäischen Innovationsrats und verfügt über ein Gesamtbudget von 3,5 Milliarden Euro. Er unterstützt Start-ups durch sogenanntes „geduldiges Kapital“, um Risiken für private Investoren zu minimieren. Der Fonds gliedert sich in vier zentrale Förderlinien: 1) *EIC Pathfinder* (Forschungs- und Innovationszuschüsse für bahnbrechende Forschung vom Labor bis zum Prototyp); 2) *EIC Transition* (Markteinführungszuschüsse zur Vorbereitung auf den Eintritt in den Markt); 3) *EIC Accelerator* (Wachstumzuschüsse und Investitionen für die Skalierung von Unternehmen); und 4) *STEP Scale-up* (größere Investitionen zur Unterstützung europäischer Unternehmen bei der Entwicklung zu globalen Marktführern).

Eine PV-Pilotlinie würde je nach Projektstand entweder im zweiten oder dritten Förderprogramm eingeordnet werden – abhängig davon, ob bereits industrielle Zusammenarbeit und Fertigung demonstriert werden können oder ob das Projekt sich noch in der Markteintrittsphase befindet.

Der EIC-Fonds hat bisher Investitionen in Höhe von rund 623 Millionen Euro genehmigt, davon sechzehn (16) Projekte im Energiesektor – einschließlich drei (3) im Bereich der Photovoltaik oder Solartechnologien:

- *Brite Solar Technologies* [36] (Solarglas mit 80 % Transparenz zur Stromerzeugung, insbesondere für Gewächshäuser; Griechenland);
- *RISE Technologies* [37] (Anbieter grüner Lösungen für die Solarindustrie zur Effizienzsteigerung und Kostensenkung; Italien);
- *ROSI SAS* [38] (Entwickler von Recyclingtechnologien für PV-Module zur Rückgewinnung und Wiederverwertung von Rohstoffen; Frankreich).

Daher könnte der EIC-Fonds potenziell PV-Pilotlinien in der EU unterstützen, jedoch erscheinen andere Finanzierungsinstrumente geeigneter.

Wichtig ist, den *EIC Fund* nicht mit dem *Innovation Fund* [7] zu verwechseln, obwohl ihre Bezeichnungen ähnlich sind. Der *EIC Fund* stellt Risikokapital zur Unterstützung von Unternehmen mit disruptiven Innovationen bereit. Der *Innovation Fund* hingegen konzentriert sich auf die kommerzielle Demonstration CO₂-armer Technologien zur Erreichung der Klimaneutralität und ist damit besser für Solar-PV-Projekte geeignet. Er



unterstützt unter anderem die zuvor genannten politischen Maßnahmen wie den *Net-Zero Industry Act (NZIA)* und die *European Solar Charter*.

Im Jahr 2023 stellte die *Europäische Investitionsbank (EIB)* [6] über 21 Milliarden Euro für energiebezogene Projekte zur Verfügung – unter anderem für Energieeffizienz, den Ausbau erneuerbarer Energien, Stromnetze und Speicher. In den letzten zehn Jahren wurden Projekte zur Solarstromerzeugung in der EU mit insgesamt 10 Milliarden Euro finanziert, davon 2 Milliarden Euro für 32 Transaktionen in der Solarbranche (einschließlich Fertigung und Innovation). Neben der finanziellen Unterstützung bietet die EIB auch Beratung und technische Hilfe für besonders innovative Vorhaben in industriellen Sektoren.

Die EIB spielt insbesondere im Rahmen von *REPowerEU* eine wichtige Rolle. Im Juli 2023 kündigte sie eine Erhöhung ihres *REPowerEU*-Pakets um 50 % an, um Investitionen in die Fertigung von sogenannten „Strategischen Netto-Null-Technologien“ zu fördern. Diese zusätzliche Finanzierung soll bis 2027 über 150 Milliarden Euro an Investitionen mobilisieren – insbesondere für saubere Energietechnologien wie Solar-PV, Solarthermie, Batterien und Speicher. Die Finanzierungsmöglichkeiten der EIB umfassen Projektfinanzierungen für etablierte Technologien mit absehbaren Cashflows, Risikokapital (*Venture Debt*) für Pilotlinien und das Hochskalieren neuer Technologien sowie Unternehmenskredite für Großunternehmen. Für PV-Pilotlinien erscheint das Instrument *Venture Debt* am geeignetsten.

Venture Debt [39] ist für Unternehmen mit bis zu 3.000 Beschäftigten zugänglich – eine relativ hohe Schwelle für PV-Pilotlinien. Im Rahmen eines virtuellen Pilotprojekts mit gemeinsam genutzter Infrastruktur über mehrere Forschungszentren hinweg könnte diese Bedingung schwer erfüllbar sein, da die Gesamtzahl der Beschäftigten aller Beteiligten diese Grenze überschreiten dürfte.

Dennoch kann *Venture Debt* für die Einrichtung einer realen Pilotlinie attraktiv sein, da es auf das Wachstum von Unternehmen abzielt und auch Ausgaben wie: Investitionen (CAPEX), betriebliche Ausgaben (OPEX) im Zusammenhang mit Wachstum, Erwerb von Vermögenswerten (mit Ausnahme von Grundstücken), nachhaltige Erhöhung des Betriebskapitals und Marktexpansion abdecken kann. *Venture Debt* wird durch *InvestEU* garantiert und ist besonders technologiegetrieben – geeignet für frühe Phasen neuer Fertigungsprojekte. Aufgrund des limitierten Budgets und einer jährlichen Genehmigungsrate von nur 7 bis 10 Projekten ist es jedoch stark umkämpft und mit einer niedrigen Erfolgsquote verbunden.

Obwohl *Venture Debt* bereits im Energiesektor eingesetzt wurde, wurde es seit 2017 nicht mehr zur Finanzierung der PV-Fertigung genutzt – trotz der prinzipiellen Eignung für innovative Projekte, Innovationszentren oder Pilotlinien künftiger Produktionskapazitäten. Laut *ESIA* wird dieses Instrument den Bedürfnissen der Branche voraussichtlich nicht gerecht werden – es könnte jedoch der EIB ermöglichen, sich frühzeitig in der PV-Wertschöpfungskette zu positionieren, bevor es zu Projektfinanzierungen kommt [40].

Zu den mit *Venture Debt* unterstützten Projekten zählen unter anderem *Heliatek* und *SUNPARTNER TECHNOLOGIES*:

Im Jahr 2016 erhielt das deutsche Unternehmen *Heliatek*, spezialisiert auf organische Photovoltaik und die Herstellung von Solarbändern, rund 80 Millionen Euro zur



Finanzierung eines großflächigen Produktionsausbaus [41], darunter 20 Millionen Euro durch die EIB im Rahmen von *InnovFin – EU-Finanzierung für Innovatoren* [42]. *Heliatek* ist weiterhin aktiv, Mitglied der *ESIA* und kooperiert mit namhaften Forschungszentren in Deutschland (z. B. Fraunhofer ISE, IWS, FEP sowie dem Leibniz-Institut für Polymerforschung in Dresden). Im Jahr 2021 brachte das Unternehmen seinen ersten organischen Solarfilm auf den Markt.

Im Jahr 2017 wurde das französische Unternehmen *SUNPARTNER TECHNOLOGIES* [43] mit 15 Millionen Euro durch die EIB unterstützt – mit der Option auf weitere 15 Millionen Euro als Kofinanzierung. Ziel war unter anderem die Einrichtung von zwei Produktionslinien mit jeweils 150.000 m² Kapazität für gebäudeintegrierte Photovoltaik und Smart Glass, weitere F&E-Kosten für die Entwicklung der Glasprodukte sowie der Aufbau einer gesamteuropäischen Vertriebsstruktur.

Abschließend ist auch der *Europäische Investitionsfonds (EIF)* [44], Teil der *EIB-Gruppe*, von Bedeutung. Er unterstützt europäische Kleinunternehmen, kleine und mittlere Unternehmen (KMU) beim Zugang zu Finanzierungen. Der EIF konzipiert und entwickelt Risikokapital-, Wachstumsfinanzierungs-, Garantie- und Mikrokreditinstrumente, die gezielt auf dieses Marktsegment abzielen. Dabei verfolgt er zentrale EU-Politikziele wie Wettbewerbsfähigkeit, Innovation, Digitalisierung, soziale Auswirkungen, Humankapital, Klimaschutz und ökologische Nachhaltigkeit. Zwar hat der EIF bereits Projekte im Rahmen von *REPowerEU* unterstützt – etwa in Zusammenarbeit mit der *LBBW* (Deutschland) für saubere Energieprojekte [45] –, doch bislang noch nicht im Bereich der Solar-PV-Fertigung.

Unter der Vielzahl von EU-Finanzierungs- und Förderinstrumenten sind insbesondere *Horizon Europe*, der *Innovation Fund*, der *Clean Industrial Deal*, die *European Solar Charter* sowie – in begrenztem Umfang – *REPowerEU* am besten geeignet, um entweder Forschungs- und Innovationsprojekte (R&I) im Bereich Photovoltaik mit Industriebezug zu unterstützen oder neue Pilotlinien in Deutschland aufzubauen. Zusätzlich könnte eine Finanzierung über den *European Innovation Council Fund*, die *Europäische Investitionsbank* oder den *Europäischen Investitionsfonds* erfolgen – insbesondere, wenn das Projekt im Kontext strategischer politischer Maßnahmen der EU steht, wie dem *Net-Zero Industry Act*, dem *Green Deal* und dem *Green Industrial Deal Plan*, wie in der nachstehenden Tabelle 13 zusammengefasst.



Tabelle 13 Zusammenfassung aller EU-Politikprogramme und -instrumente, die möglicherweise für die Finanzierung von PV-Pilotanlagen in Deutschland relevant sein könnten.

Regelung/Politik	Haushalt	Schwerpunktbereich	PV Relevanz
Horizont Europa	95,5 Milliarden € (2021-2027); 73 Millionen € pro Jahr für PV	F&I, Wettbewerbsfähigkeit, Dekarbonisierung	Unterstützt PV-Innovationen und Kostensenkungen; relevant für PV-Pilotlinien mit hohem TRL
Innovationsfonds	~40 Mrd. € (2020-2030); 4,8 Mrd. € für Industrie/Saubere Technologien	Einsatz und Herstellung innovativer sauberer Technologien	Unterstützt industrielle PV-Projekte und Pilotlinien (z. B. TANGO-Projekt)
Europäischer Green Deal	~1 Billion € über 10 Jahre	Dekarbonisierung, Führung im Bereich saubere Technologien	Breite PV-Relevanz durch Klimastrategie; unterstützt PV indirekt durch strategische Initiativen
InvestEU	279 Milliarden Euro (im Rahmen des Grünen Deals)	Grüner Übergang, Innovation, Kompetenzen	Finanziert von Exeger und Solaria; gilt für PV-Herstellung und -Einsatz
REPowerEU-Plan	210 Mrd. € bis 2027	Energieunabhängigkeit, Ausbau der erneuerbaren Energien	Bereitstellungsorientiert; indirekte Unterstützung für PV-Pilotanlagen
Strategie für Solarenergie	Kein direktes Budget	Strategische PV-Einführung, Solarenergie auf Dächern	Einsatzorientiert; begrenzte Unterstützung für Pilotlinien zur Herstellung
Green-Deal-Industrie-plan	Kein direktes Budget (nutzt bestehende EU-Mittel)	Net-Zero-Tech-Produktion; Straffung der Vorschriften	Ermöglicht ein Umfeld für PV-Pilotanlagen; unterstützt durch verbundene Instrumente
Netto-Null-Industrie-Gesetz (NZIA)	Keine direkten Haushaltsmittel	Ziel von 40% inländischer Produktion sauberer Technologien	Förderung von PV-Produkten aus der EU durch Beschaffung und nicht-preisliche Kriterien; relevanter politischer Kontext
Clean Industrial Deal	100 Mrd. € geplant; 500 Mio. € Pilotprojekt über EIB; +100 Mrd. € Bank	Förderung von in der EU hergestellten sauberen Technologien, niedrigere Stromrechnungen	Starke Unterstützung für PV-Pilotanlagen; umfassendste Unterstützung für die Herstellung
Europäische Solar-Charta	400 Millionen Euro (über den Innovationsfonds)	Engagement für die Herstellung von PV-Solaranlagen	Direkte Ausrichtung auf die PV-Herstellung in der EU; Förderung von Pilotlinien mit Unterstützung der Mitgliedstaaten
Europäischer Innovationsratsfonds (EIC)	3,5 Milliarden Euro	Risikoinvestitionen in bahnbrechende Technologien	Mögliche Unterstützung für Pilotlinien (Pathfinder/Transition/Accelerator); begrenzte PV-Erfolgsbilanz
Europäische Investitionsbank (EIB)	21 Mrd. €/Jahr Energie; 2 Mrd. € in PV in den letzten zehn Jahren	Energie, Innovation, Infrastruktur	Bietet Risiko-/Projekt-/Konzernkredite an; Potenzial für die Finanzierung von PV-Pilotanlagen als Risikokredite, wenn bis zu 3.000 Beschäftigte
Europäischer Investitionsfonds (EIF)	Nicht angegeben	KMU-Finanzierung, Innovation, Nachhaltigkeit	Begrenzte Erfahrung mit PV; unterstützt strategische Energieinvestitionen (z. B. REPowerEU-Anpassung)



AP 6: BEWERTUNG UND EINBEZIEHUNG VON EXISTIERENDER INFRASTRUKTUR DER FORSCHUNGSINSTITUTE

Koordination: ISFH

Die an der PV PILOT-Skizze beteiligten Forschungsinstitute ISFH, ISE, ISC und HZB betreiben bereits Technikums-Einrichtungen zur Herstellung von Solarzellen und PV-Modulen mit überwiegend industriellen Prozessanlagen. Zudem entwickeln die Institute fortlaufend neue Prozess-, Zell- und Modultechnologien zur Wirkungsgradsteigerung und Kostensenkung.

In diesem Arbeitspaket bewerteten die Projektpartner, welche Wafer-, Zell- und Modul-Produktionstechnologien mit aktueller und perspektivischer Relevanz für eine Pilotlinie an den beteiligten Forschungsinstituten sowie ggf. weiteren Forschungseinrichtungen und PV-Firmen bereits existieren. Es wurde anhand der Szenarien aus AP1, und aus der Technologieempfehlung aus AP2 bewertet, welche Beiträge die bestehenden Forschungsinfrastrukturen leisten können. Für eine neue Pilotlinie könnten die bestehenden Einrichtungen z.B. neue Technologien vorentwickeln. Für eine vernetzte Pilotlinie könnten verschiedene Technikums Einrichtungen z.B. verschiedene Abschnitte der Produktionskette darstellen.

AP 6.1 ERSTELLUNG EINER ÜBERSICHT DER EXISTIERENDEN INFRASTRUKTUR

ZIELE

In diesem Arbeitspaket wurde eine Übersicht zur existierenden Infrastruktur an den Forschungsinstituten erstellt. Im Fokus stand dabei die Produktionsrelevanz des vorhandenen Anlagenparks, die sich z.B. im Durchsatz der Anlagen, in der möglichen Produktionskapazität an Wafern / Zellen / Modulen, in den Prozesskosten und im Alter der Anlagen bzw. in deren Wiederbeschaffungsmöglichkeit widerspiegelt.

ERGEBNISSE

Tabelle 14 stellt die Übersicht über den Anlagenpark dar. Für die Silizium Technologien sind die Anlagen industrietypisch weitgehend mit automatisiertem Handling ausgestattet. Die Wafer- und Modulgrößen sind am ISE typisch für aktuell kommerziell erhältliche Produkte. Das ISC und das ISFH werden zudem in 2025 und 2026 ihr jeweiliges Si Zell-Technikum auf neue Prozessanlagen für bis zu G12 große Wafer upgraden. Für die Perowskit sind die Prozessanlagen noch laborartig. Es können auch schon große Perowskitsolarzellen auf großen Siliziumsolarzellen gefertigt werden, allerdings mit deutlich niedrigerem Durchsatz als Silizium. Perowskit/Silizium Tandemmodule können in der gleichen Größe und dem gleichen Durchsatz hergestellt werden wie reine Siliziummodule.



Tabelle 14: Übersicht über den Anlagenpark für Ingot, Zelle und Modul an den verschiedenen Instituten mit Angabe des Durchsatzes und der maximalen Größe.

	Silicon: ISC, ISFH, ISE (CSP)	Perovskite: HZB, ISE
Ingot, <u>cell</u> and <u>module</u> processing tools	Industry-type <u>production tools</u> , <u>automated handling</u>	Laboratory <u>tools</u>
<u>Ingot production capacity</u> [Ingots/week]	2 - 3	-
<u>Ingot size</u>	M10 – G12, 2m	-
<u>Cell production capacity</u> [wafer/h]	300 - 1000 (depending on tool)	20
<u>Wafer size</u>	M2 – M10 (M12 possible)	M6
<u>Module production capacity</u> [module/day]	up to 200	up to 200
<u>Module size</u>	up to 1.3 x 2.4 m ²	up to 1.3 x 2.4 m ²

Silizium-Ingots können beim Fraunhofer CSP gezogen werden. Dort steht ein Puller für das Czochralski-Verfahren zur Verfügung. Damit können zwei bis drei, 2m lange Ingots pro Woche gezogen werden.

In Tabelle 15 sind die Anlagenparks des ISC, ISE und ISFH für die Zellherstellung für die Silizium-Zelltechnologien, die in AP2 erarbeitet und priorisiert wurden, in der Reihenfolge der Prozesssequenz dargestellt. Tabelle 15 zeigt, dass für die jeweiligen Prozesse an den Instituten oft ähnliche Anlagen verwendet werden. Die Anlagen kommen fast ausschließlich aus Deutschland. Die meisten PECVD Beschichtungsanlagen und Öfen kommen von Centrotherm, die nasschemischen Anlagen von RENA und Singulus. Die meisten Prozessanlagen sind noch sehr neu und damit state-of-the-art (Anschaffungsjahr 2025 oder für 2026 geplant), nur wenige Anlagen sind älter (bis zu 8 Jahre). Der Durchsatz der Anlagen beträgt zwischen 300 und 1000 Wafer/h und ist damit überwiegend kompatibel zu einer Pilotproduktion.



Tool	ISC	Year	Wafer/h	ISE	Year	Wafer/h	ISFH	Year	Wafer/h
Waferbench (alkaline batch)	RENA (BatchTex 3 N50)	2025	327	Singulus (SILEX II CLEANTEX LAB)	2018	800	RENA	2025	300
Waferbench (cleaning batch)	RENA (BatchTex 3 N50)	2025	327	Singulus (SILEX II CLEANTEX LAB)	2018	800	RENA	2025	300
Waferbench (inline)	RENA (inline MiniLabTool)	2025	188	RENA (InOxSide FUSION)	2023	1200	tbd	2025	700
PECVD AlOx/SiN	Centrotherm (c-PLASMA LAB 2.600-410-5(5))	2025	168	Centrotherm (c-PLASMA AlOx 2.600-410-4(2))	2024	160	Centrotherm (c-plasma)	2021	1600
PECVD (n-Si)	Centrotherm (c-PLASMA LAB 2.600-410-5(5))	2025	112	Tempress (ALD SPECTRUM AE4)/ von Ardenne (SCALA LABX, PVD)	2024/2018/2017/2019	160/5/500/100	Centrotherm (c-plasma)	2021	1600
PECVD (p-Si)	Centrotherm (c-PLASMA LAB 2.600-410-5(5))	2025	112	Centrotherm (c-PLASMA AlOx 2.600-410-4(2))/ Indeotec (OCTOPUS II)	2024/2018	160/5	Centrotherm (c-plasma)	2021	1600
PECVD (i-Si)	Centrotherm (c-PLASMA LAB 2.600-410-5(5))	2025	112	Tempress (LPCVD SPECTRUM AE4)	2017	500	Centrotherm	2026	400
LPCVD (n-Si)	Centrotherm (c-PLASMA LAB 2.600-410-5(5))			Tempress (LPCVD SPECTRUM AE4)	2017	500	Centrotherm	2026	300
LPCVD (p-Si)	Centrotherm (c-PLASMA LAB 2.600-410-5(5))								
ALD	Centrotherm (c-PLASMA LAB 2.600-410-5(5))	2025	112						
tube BC13 diffusion furnace	Centrotherm (c-LAB DIFF 3.000-370-4(4))	2025	150	Centrotherm (c-LAB 3.000-440-4(4))	2024	1000	Centrotherm	2026	300
tube annealing furnace	Centrotherm (c-LAB DIFF 3.000-370-4(4))	2025	240	Centrotherm (c-LAB 3.000-440-4(4))	2024	1000	Centrotherm	2026	600
Laser (ps)	Innolas (Linexo P318)	2024	30,120				Stella	2025	100
Laser (doping)	Innolas (Linexo P318)	2024	30						
Screen-printing and drying	ASYS	2020	300	ASYS/ Airon	2023	500	tbd	2026	800
Firing/Curing	Centrotherm (c:fire)	2010	400/2000	Rehm (FFO RFS-D)/ TESOMA (Solarofen SD 03)	2018	1000/200	tbd	2026	1000
LECO	CE (LECO)	2023	300	CE (LECO)	2023	300	CE (LECO)	2026	300
TCO				von Adenne (SCALA LABX)	2019	100			

Tabelle 15: Zusammenfassung des Silizium-Anlagenparks am ISC, ISE und ISFH mit Anschaffungsjahr und Durchsatz der Anlagen.



Für jede Anlage wurden weitere relevante Daten je Prozessschritt für eine virtuelle Pilotlinie gesammelt, wie z.B. aktuell typischer Durchsatz, maximaler Durchsatz in MWp je Zelltechnologie, Batchgröße, Anteil Anlagennutzung für Pilotlinie, aktuelle und maximale Wafergröße, automatisch Be- und Entladung und ob die Anlage aktuell kommerziell vom Hersteller neu zu erhalten ist. Diese Zusatzinformationen werden in einer Exceldatei in AP6 auf dem PV Pilot Projekt Sharepoint archiviert und stehen für weitere Arbeiten nach Projektende somit zur Verfügung.

In der Tabelle 16 sind die Modultechnologien und die damit verbundenen Prozesse aufgelistet. Die Anlagen für die Standardverschaltung (Mult BB Lötten auf Ag Pads) von beidseitigen Siliziumsolarzellen sind an allen Instituten vorhanden. Beim ISC steht noch eine Anlage für das Verlöten von IBC Solarzellen, beim ISFH stehen zusätzlich noch Anlagen für das Verzinnen und Ultraschallschweißen und beim ISE noch zusätzlich eine Anlage fürs Shingling und die Kantenpassivierung.

Tabelle 16: Prozessflüsse der Modultechnologien

Standard/IBC /0BB	Ultraschalllöten	Ultraschallschweißen	ECA-Shingle-String Modul	ISE Shingle-Matrix Modul	PET-ECA-Perowskit Modulfertigung
TLS Teilen	TLS Teilen	TLS Teilen	TLS Teilen	TLS Teilen	TLS Teilen
				PET Kantenpassivierung	
	Verzinnen (Roboter)	Lay-Up Zellen und Verbinder	ECA-Shingle-Verschaltung	ECA-Shingle-Verschaltung	ECA-Shingle-Verschaltung Mit Flachverbindern und Runddrähten
Versträngen (Vorder- und/oder Rückseite)	Versträngen (Vorder- und/oder Rückseite)	Verschweißen mit Laser	Lineares Schindelsträngen	Matrix Schindeln	Lieares Schindelsträngen
Lay-up	Lay-up	Lay-up	Lay-up	Lay-up	Lay-up (Butterfly)
Querverschaltung	Querverschaltung	Querverschaltung	Querverschaltung	Querverschaltung	Querverschaltung
Laminieren	Laminieren	Laminieren	Laminieren	Laminieren	Laminieren mit Butyl versiegelung
Trimmen	Trimmen	Trimmen	Trimmen	Trimmen	Trimmen
Junction-Box setzen	Junction-Box setzen	Junction-Box setzen	Junction-Box setzen	Junction-Box setzen	Junction-Box setzen
Rahmen	Rahmen	Rahmen	Rahmen	Rahmen	Rahmen

Die ECA-Shingling-String-Technologie nutzt elektrisch leitfähigen Klebstoff (ECA) zur Verbindung von Zellstreifen, wodurch eine flexible, bleifreie und umweltfreundliche Herstellung von Solarmodulen ermöglicht wird, was eine höhere Leistung pro Fläche und geringere Energieverluste durch Abschattung ermöglicht. Die ECA-Shingling-Matrix-Anordnung der Zellen verbessert die Abschattungsresistenz und steigert die Effizienz. Der Durchsatz der Anlagen lässt eine Modulfertigung von bis zu 200 Stück pro Tag zu. Die Größen der Module sind begrenzt zu 1,3 m x 2,4 m.



AP 6.2 BEWERTUNG DER EXISTIERENDEN INFRASTRUKTUR FÜR DIE PILOTLINIE

ZIELE

In diesem Arbeitspaket sollte die existierende Infrastruktur anhand der Szenarien aus AP1, der Technologieempfehlung aus AP2 sowie den Betreibermodellen aus AP3 bewertet werden. Konkrete Umsetzungsvorschläge zum Zusammenwirken der existierenden Infrastruktur im Rahmen einer virtuellen Pilotlinie und zur Ergänzung einer industriellen Pilotlinie sollten erarbeitet werden.

ERGEBNISSE

Der Durchsatz der Anlagen bei den Ingots, Zellen und Modulen liegt zwar weit hinter einer kommerziellen GW Produktion aus China zurück, reicht aber für die Demonstration einer Technologie in industrieller Umgebung aus. Die Anlagen für die Solarzellenfertigung sind noch sehr neu, mit aktuellen Waferformaten kompatibel und kommerziell erhältlich. Auch das Handling ist automatisiert. Dies sind wichtige Voraussetzungen für eine Demonstration einer Technologie in der virtuellen Pilotlinie für potenzielle Kunden, die den Aufbau einer Fertigungslinie planen und bewerten wollen.

Dennoch fehlen einige Teile für eine vollständige Demonstration und der genauen Kalkulation für eine Fertigungslinie. Noch fehlen genaue Definitionen der Übergabe der Solarzellenprekursorer nach verschiedenen Prozessschritten, die auch eine Simulationsplattform für eine digitale Planung erfordert. Durch die gezielte Kombination von Anlagen von verschiedenen Instituten wäre es damit möglich, den Durchsatz zu erhöhen und Prozesse zu optimieren. Mit solch einer Infrastruktur kann dann auch bewertet werden, welche innovative Anlage an welchem Institut optimal ergänzt werden könnte, was für Anlagenbauer interessant ist.

Voraussetzung für den Betrieb der virtuellen Pilotlinie ist auch die Entwicklung einheitlicher Vertragsmodelle für IP, Datenschutz, Betriebssicherheit und Nutzung von gemeinsamer Infrastruktur wie Messtechnik oder Softwaretools. Für eine kurzfristige Nutzung wäre auch die Einführung eines vereinfachten „Fast-Track“-Zugangs für KMU mit vorkonfigurierten Rahmenbedingungen hilfreich.

Bevor einem Kunden solche Prozesse angeboten werden, sollte die virtuelle Pilotlinie mit einigen Institutsübergreifenden Prozessen getestet werden. Die Übergabe kann z.B. nach dem Frontend des Solarzellenprozesses erfolgen und nochmalig nach Fertigstellung der Solarzelle für die Modulfertigung. Idealerweise sollen dadurch in der virtuellen Pilotlinie verbesserte Zelltechnologien und Prozesssequenzen entwickelt werden, indem technologische Highlights und Alleinstellungsmerkmale der einzelnen Institute kombiniert werden wie z.B. die Kombination des Frontend IBC Prozess des ISFH mit hohem iVoc mit dem kostengünstigen Cu-Backend IBC Prozess des ISC. Im Modulbereich wäre die Nachrüstung eines vorhandenen



Stringers für 0BB-Stringing interessant, was Änderungen am Zelltransportsystem sowie zusätzliche Drucker und Aushärtungsstationen erfordert. Die Umrüstung kostet ca. 250.000 USD.



AP 7: STANDORT

Dieses AP wurde in Abstimmung mit PtJ und BMW bei der Neuausrichtung des Projekts gestrichen, da eine neue Pilotlinie zunächst nicht in Frage kommt.



AP 8: ABSCHLIEßENDE HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN

Koordination: HZB

Im Rahmen dieses Projekts wurden vier Szenarien für Pilotlinien zur Unterstützung der industriellen PV-Produktion und der Entwicklung von Produktionsanlagen in Deutschland untersucht:

- A Komplett neue Pilot-Linie
- B Nutzung bereits bestehender industrieller Instituts-Technikumseinrichtungen
- α Integration der Pilot-Linie in eine neue PV Fabrik
- β Nutzung bereits bestehender industrieller Pilot-Linien

Ein Vergleich mit den in der Studie definierten Anforderungen zeigte, dass das erste (A.) und zweite (B.) Konzept deutlich mehr Kriterien erfüllen als α und β . Der Hauptgrund dafür ist die geringere Flexibilität der beiden letztgenannten Optionen, da die Integration in bestehende Strecken oder die Nutzung industrieller Infrastruktur immer eine enge Abstimmung mit den Betreibern erfordert.

Daher konzentrierte sich die Studie auf die Untersuchung des Potenzials der Szenarien A und B. Für den Zell- und Modulteil dieser beiden Linien werden die folgenden Empfehlungen ausgesprochen.

1. Start mit TOPCon-Technologie
2. Vorbereitung auf die frühzeitige Integration von IBC-Technologien
3. Planung zukünftiger Aufrüstung auf Tandemtechnologie
4. Verwendung von bifazialer Glas-Glas-Module mit fortschrittlichen Verbindungselementen
5. Produktion flexibler Modulgrößen ermöglichen
6. Ziel: internationale Vermarktung der Ergebnisse der in der EU/Deutschland hergestellten Maschinen in Verbindung mit dem technologischen Know-how
7. Kontinuierlicher Ausbau der Forschungs- und Entwicklungsinfrastruktur für eine innovative Solarindustrie.

Der größte Unterschied zwischen einer neuen, industriellen Pilotlinie (Szenario A) und einer über mehrere Institute verteilten Pilotlinie (Szenario B) ist die Kapazität. Eine industrielle Linie, die rund um die Uhr in Betrieb ist, würde einen höheren Durchsatz und damit statistisch zuverlässigere und industriell relevante Ergebnisse liefern, allerdings zu deutlich höheren Kosten und einer längeren Projektlaufzeit.

Die meisten der vorgestellten EU-Fördermittel sind eher für Erstinvestitionen und CAPEX als für OPEX geeignet. Das Finanzmanagement für den Betrieb wird häufig von den Unternehmen erwartet. Viele der Förderprogramme sind darauf ausgerichtet, den Einsatz von PV-Anlagen und nicht die lokale PV-Herstellung zu unterstützen. Dies gilt für den Europäischen Green Deal, REPower EU und seine Solarenergiestrategie sowie das Fit for 55-Paket, aber sie können dennoch potenziell für den Aufbau neuer Pilotanlagen genutzt werden, insbesondere für unabhängige Anlagen (Szenario A).



Für Szenario B empfiehlt das Projektteam den komplementären Einsatz der Labore für einzelne Technologien (z. B. TOPCon bei einem Institut und Modulverschaltung eines anderen Instituts oder z.B. IBC Front End bei einem Institut, silberfreie Metallisierung bei einem anderen Institut) und ein zusätzliches Programm für die technologische Aufrüstung der verschiedenen Institute.

Unter den gegebenen (förder)politischen Umständen und um den deutschen Maschinenbau trotzdem bestmöglich zu unterstützen ist eine virtuelle oder verteilte Pilotlinie (Szenario B) mit einer gemeinsamen Infrastruktur in verschiedenen Labors von Forschungsinstituten und mit Unterstützung der deutschen Maschinenhersteller eine praktikablere Option. Sie würde auch die kontinuierliche Entwicklung zukünftiger Technologie-Upgrades wie z.B. IBC Solarzellen und Tandemsolarzellen unterstützen. Außerdem verfügen die Institutslinien bereits über eine bestehende Infrastruktur, die derzeit an vielen Standorten modernisiert wird. Deren Zusammenschluss zu einer verteilten Pilotlinie könnte daher mit relativ geringem finanziellem und zeitlichem Aufwand realisiert werden.

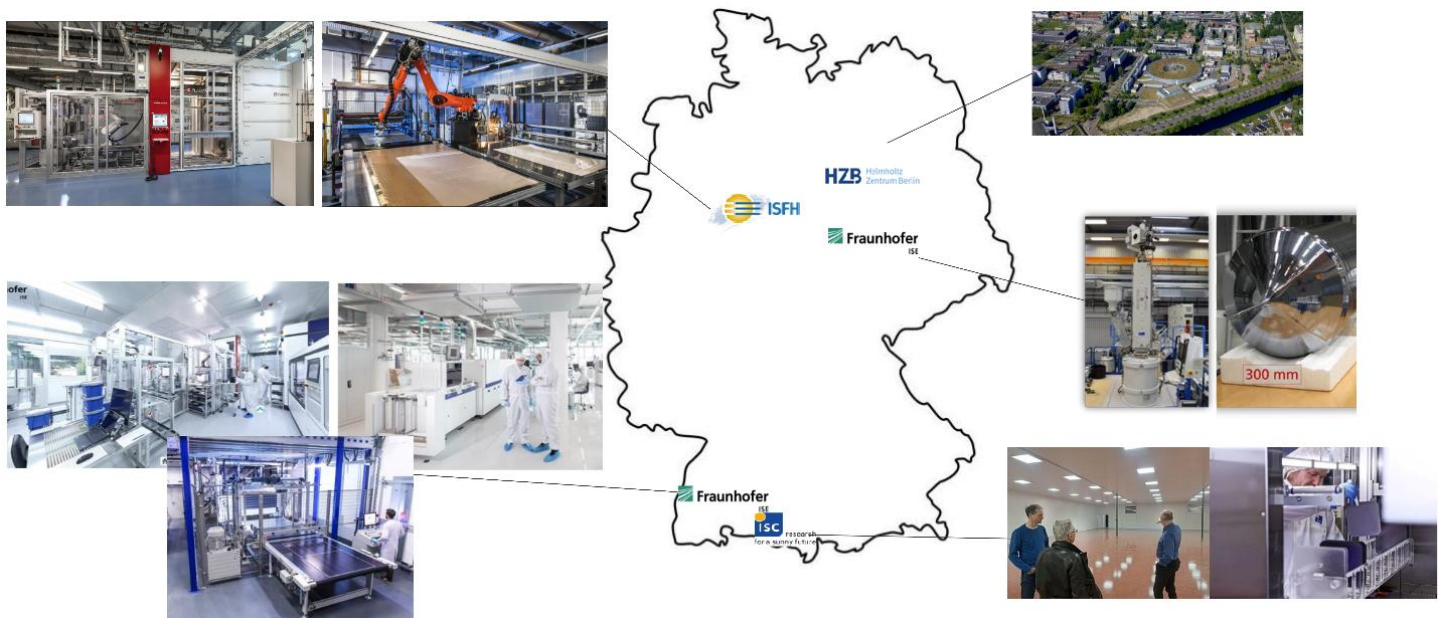


Abbildung 25: Standorte der vorgeschlagenen verteilten Pilotlinien

Darüber hinaus empfehlen wir den Maschinenherstellern, diese verteilte Pilotlinie zu nutzen, um neue Maschinen zu testen und die gleichzeitige Entwicklung von Maschinen sowie Zell- und Modultechnologien zu unterstützen. Diese Maßnahmen sollten gleichzeitig das Wachstum der europäischen Solar-PV-Produktion fördern, den europäischen/deutschen Maschinenbau unterstützen & ausbauen, Turnkey Konsortien unterstützen und einen zukünftigen Wettbewerbsvorteil schaffen, indem innovative PV-Technologien auf den Markt gebracht werden. Nachfolgend werden die beiden präferierten Szenarien detailliert ausgeführt hinsichtlich der jetzigen und künftigen präferierten Technologieoptionen, der Vermarktung und des jeweiligen Finanzierungsbedarfes.



EMPFEHLUNGEN NEUE PILOTLINE:

Eine industriell betriebene Pilotlinie bietet den Vorteil eines hohen Durchsatzes und ermöglicht die Validierung neuer Technologien unter realitätsnahen Produktionsbedingungen. Die Realisierung einer industriellen, eigenständigen Pilotlinie ist jedoch sowohl hinsichtlich der Investitions- (CAPEX) als auch der Betriebskosten (OPEX), beispielsweise aufgrund fehlender Skaleneffekte bei der Infrastruktur, sehr teuer. Da in Europa in den kommenden Jahren aufgrund fehlender wirtschaftspolitischer Rahmenbedingungen keine Massenproduktion zu erwarten ist, ist eine neue Pilotlinie eher als sehr ambitionierte Variante zu sehen, die ggf. über einem der EU Förderprogramme unterstützt werden könnte/müsste, falls die industriepolitischen Interessen dies unterstützen würde. In dem Fall würde das Projektkonsortium empfehlen:

1. Technologischer Startpunkt:

- a. Andocken an eine Linie mit **TOPCon-Technologie** als industriell erprobter Einstiegspunkt.

2. Zukunftssicherheit:

- a. Frühzeitige Berücksichtigung der Kompatibilität mit **IBC-Technologien**.
- b. Vorhalten von Flächen für eine partial mögliche spätere Nachrüstung auf **Tandemzellen und -module**.
- c. Möglichkeit zur Nachrüstung bifazialer **Glas-Glas-Module** mit fortschrittlicher Verschaltung sowie zur **Produktion flexibler Modulgrößen**.
- d. Erstellung regionalisierter Technologie-Roadmaps, insbesondere für Märkte in Europa, USA & Indien, mit besonderer Betrachtung dortiger Regionalisierungstrends bei der Zell- und Modulentwicklung

3. Exportorientierung und Kooperation mit Internationalen Herstellern:

- a. Analyse bestehender Industriekooperation international und Erstellung eines Plattform- / Netzwerk-Strategie für Produzenten und Maschinenbauer, um **Platzbedarf- und Angebot für die Pilotierung zu matchen**
- b. **Konkretisierung mehrerer Pilotlinienkonzepte** und Ausarbeitung eines Betreiber Modells für Zielgerichtete internationale **Vermarktung der Pilotlinie** zur Stärkung des deutschen Maschinenbaus und zur **Positionierung auf dem Weltweiten Markt**.

4. Finanzierung:

- a. Nutzung von **CAPEX-orientierten EU-Förderprogrammen** wie IPCEI oder EIC Pathfinder zur Deckung der hohen Investitionskosten bei Europäischer Pilotierung.
- b. Sofortige Initiierung eines **staatlich abgesicherten Garantieprogramms für Export der Pilotierung** empfohlen. Dieses soll insbesondere **Turnkey-Projekte und First-of-its-Kind-Technologien** absichern, um Investitionsrisiken zu minimieren und die internationale Wettbewerbsfähigkeit des deutschen Maschinenbaus zu stärken.



- c. Entwicklung eines **standardisierten Bewertungsrasters** für neue Zell- und Modultechnologien zur Beschleunigung der Entscheidungsfindung in Förderorganen

EMPFEHLUNGEN FÜR DIE VERTEILTE PILOTLINE AUF BASIS DER INSTITUTS-LINIEN:

Die verteilte Pilotlinie nutzt die bestehenden Technikumseinrichtungen an mehreren Instituten und ermöglicht dadurch eine kosteneffiziente, schnell umsetzbare Alternative mit hoher technologischer Flexibilität. Die folgenden Empfehlungen unterstützen eine erfolgreiche Umsetzung:

1. Komplementäre Nutzung und Koordination:

- a. Empfehlung zur Ausarbeitung der Kombination der technologischen Stärken der deutschen Institute, insbesondere durch Kombination von verschiedenen industriell attraktiven Prozessschritten oder Technologien der Institute (z. B. TOPCon bei einem Institut Modulverschaltung eines anderen Instituts oder z.B. IBC Front End bei einem Institut, silberfreie Metallisierung bei einem anderen Institut).
- b. Planung eines zentralen Projektmanagements zur Abstimmung der Aktivitäten und zur Sicherstellung der technologischen Kompatibilität, sowie Entwicklung öffentlich-privater Partnerschaften zur Finanzierung des laufenden Betriebs (OPEX).

2. Exportorientiert und Industrienah:

- a. Bereitstellung der gemeinsamen Infrastruktur für Maschinenhersteller zur Erprobung neuer Anlagen und Prozesse im deutschen Raum.
- b. Bereitstellung der gemeinsamen Infrastruktur für Technologie-Demonstrationen aus gemeinsamer Entwicklung der Institute für Maschinenbauer und Turnkey-Anbieter – national und international
- c. Bereitstellung der gemeinsamen Infrastruktur für Entwicklung und Qualifizierung industrienahen Fachpersonals

3. Zukunftssicherheit:

- a. Basierend auf Flaschenhälsen, ergänzendes Aufrüstungsprogramm zur Harmonisierung und Erweiterung der Anlagenausstattung an den beteiligten Instituten.
- b. Forschung und Entwicklung von Technologieupgrades, z.B. von TOPCon auf IBC und Tandem-Zellen
- c. Marktstudie zur Integration aufstrebender Technologien wie Tandemzellen auf Perowskit-Basis in die bestehende Infrastruktur auf Basis regionalisierter Anfrage

4. Sichtbarkeit und Vermarktung

- a. Positionierung der verteilten Linie als europäisches Innovationszentrum durch gezielte Kommunikation und internationale Vernetzung.
- b. Planung und Umsetzung eines institutsübergreifender Pilotlauf & Demonstration



5. Finanzierung

- a. Aufbereitung förderpolitischer Handlungsempfehlungen und strategischer Einbettung in nationale und europäische Programme
- b. Finanzierung der Optimierung eines Basisprozesses auf der verteilten Pilotlinie, z.B. TOPCon für die Zellfertigung.
- c. Finanzierung der Forschung und Entwicklung von Technologieupgrades, z.B. IBC oder Tandem-Zellen

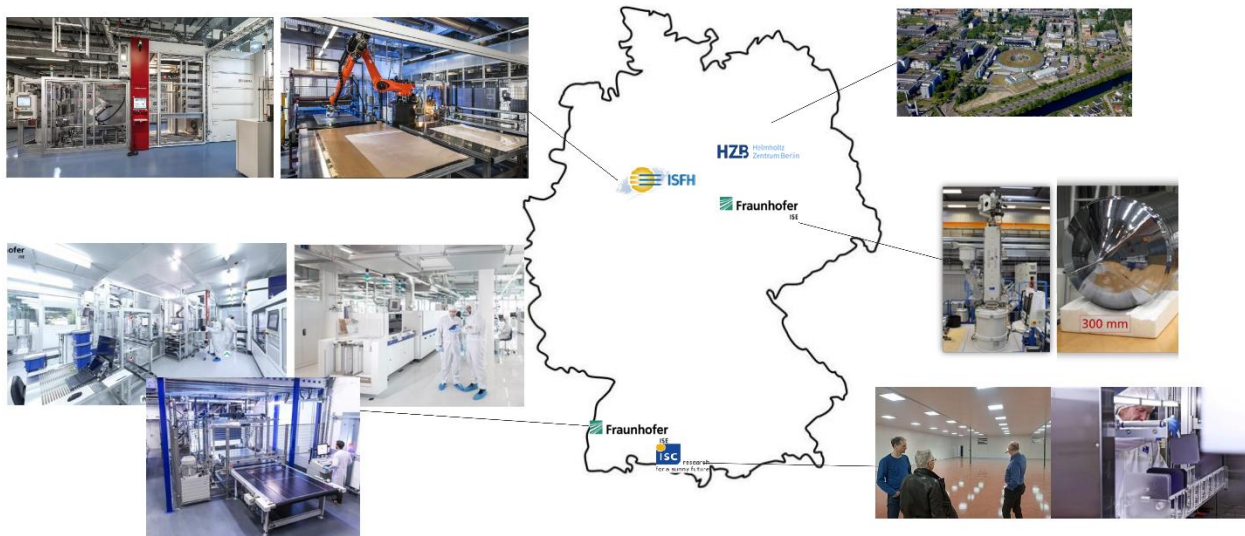


Abbildung 25: Standorte der vorgeschlagenen verteilten Pilotlinien

EMPFEHLUNGEN FÜR EIN AVALINSTRUMENT:

Deutsche Maschinenbauunternehmen sind führend in der PV-Produktionsanlagentechnologie, können sich aber international kaum gegen chinesische Anbieter durchsetzen. Grund dafür sind fehlende oder zu teure Absicherungsinstrumente für Turnkey-Projekte mit innovativen, aber noch nicht als „proven“ eingestuft Technologien. Besonders in wachstumsstarken Märkten wie Indien oder den USA dominieren chinesische Anbieter mit staatlich gestützten Komplettlösungen.

Ein staatlich unterstütztes Garantie- und Absicherungsinstrument, das gezielt auf Pilot- und Turnkey-Projekte deutscher Konsortien zugeschnitten ist, um internationale Wettbewerbsfähigkeit zu sichern und Exportpotenziale zu heben.

1. Aufsetzen eines zweistufigen Aval-Programms:

- **Phase 1 – Vertriebsphase:** Vorläufige Absicherungszusage (z. B. Hermes-Dispo) zur Unterstützung bei Ausschreibungen und Kundenverhandlungen.
- **Phase 2 – Realisierungsphase:** Finalisierung der Avalgarantien bei Vorliegen eines Kundenvertrags.

2. Förderung von Konsortien mit KMU-Führung:

Staatliche Teildeckung auch bei geringer Bonität des Konsortialführers, um innovative



Zusammenschlüsse zu ermöglichen und die Notwendigkeit von Großunternehmen zu reduzieren.

3. Klare Projektvorauswahl und strukturierte Bewertung:

Einführung eines transparenten Auswahlverfahrens für förderfähige Projekte (z. B. durch LOI, Ausschreibungsergebnisse, Bonitätsprüfung), um Ressourcen gezielt einzusetzen und Verzögerungen zu vermeiden.

4. Technologieoffenheit und gezielte Förderung von Schlüsseltechnologien:

Unterstützung von Projekten entlang der gesamten PV-Wertschöpfungskette – von Silizium über Wafer, Zellen (z. B. TOPCon, HJT, Tandem) bis zu Modulen und Materialien – mit Fokus auf europäische Referenzlösungen.

Ein solches Instrument würde nicht nur bestehende Exportinitiativen reaktivieren, sondern auch neue Projekte ermöglichen, Vertrauen in europäische Turnkey-Lösungen stärken und die technologische Souveränität im PV-Sektor sichern.

ÜBERGREIFENDE MAßNAHMEN

Dissemination, strategische Einbindung und Verstetigung stehen im Mittelpunkt der Handlungsempfehlung. Ziel ist es, neben technologisch relevanten Ergebnissen eine nachhaltige Infrastruktur für Innovation, Demonstration und Transfer zu schaffen, die zukünftig weiter genutzt werden kann. Abbildung 25 zeigt wie die noch offenen Punkte aktuell in der Gesamthistorie des Projekts und des Vorgängerprojektes Libertas stehen.

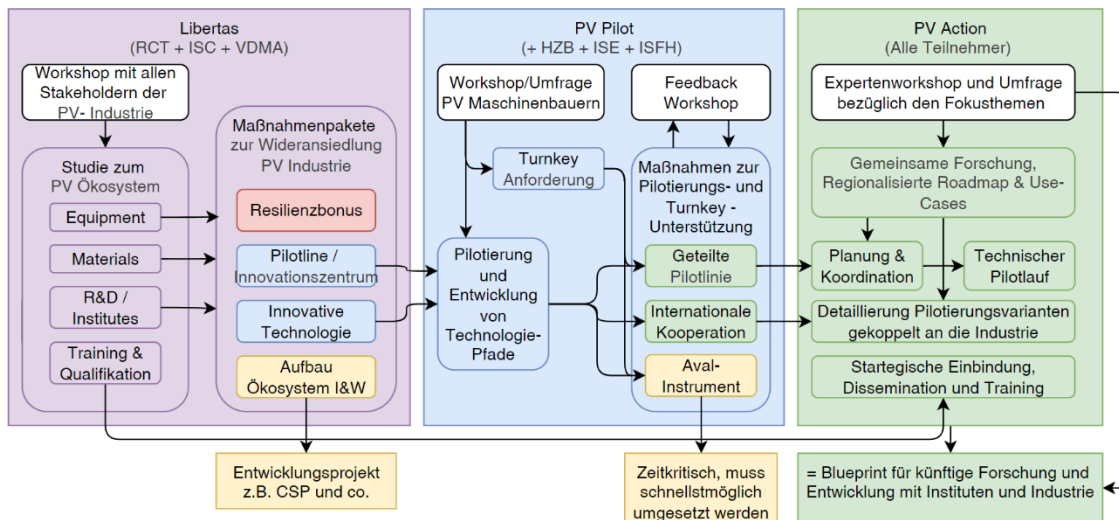


Abbildung 25: Projekthistorie mit der Platzierung von PV Action



SCHLUSSWORT

Das Projekt PV PILOT konnte innerhalb von nur acht Monaten zentrale Fragestellungen zur Zukunft der PV-Produktion in Deutschland adressieren und dabei nicht nur fundierte technische und wirtschaftliche Konzepte entwickeln, sondern auch den Dialog zwischen Forschung, Industrie und Politik maßgeblich voranbringen.

Wir danken allen beteiligten Projektpartnern für ihr großes Engagement, ihre Offenheit und die konstruktive Zusammenarbeit über Institutions- und Interessensgrenzen hinweg. Besonders hervorheben möchten wir die enge und vertrauensvolle Abstimmung mit dem Projektträger Jülich (PtJ) – unser Dank gilt insbesondere Herrn Dr. Sven Macko und Herrn Dr. Christoph Hünnekes für die jederzeit verlässliche Unterstützung und die Bereitschaft, den Projektverlauf flexibel und lösungsorientiert mitzugestalten.

Ein besonderer Dank geht zudem an Herrn Dr. Matthias Stranzenbach vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) für seinen unermüdlichen Einsatz zur Stärkung des Photovoltaikstandorts Deutschland. Sein Interesse und seine Begleitung waren für das Konsortium ein wichtiges Signal – und ein Ansporn, gemeinsam an umsetzbaren Lösungen zu arbeiten.

PV PILOT hat gezeigt, dass es in der deutschen PV-Community eine neue Bereitschaft zur Zusammenarbeit gibt. Aufbauend auf dem Erreichten freuen wir uns darauf, mit dem Folgeprojekt PV ACTION die nächsten Schritte zu gehen – konkret, kooperativ und mit Blick auf eine starke und resiliente Solarindustrie in Deutschland und Europa.



REFERENZEN:

- [1] European Commission, “Directive - EU - 2023/2413 - EN - Renewable Energy Directive - EUR-Lex.” Accessed: Jun. 18, 2025. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2023/2413/oj/eng>
- [2] “The Green Deal Industrial Plan - European Commission.” Accessed: Jun. 18, 2025. [Online]. Available: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/green-deal-industrial-plan_en
- [3] “The Net-Zero Industry Act.” Accessed: Jun. 18, 2025. [Online]. Available: https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/sustainability/net-zero-industry-act_en
- [4] “European Solar Charter.” Accessed: Jun. 18, 2025. [Online]. Available: https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/solar-energy/european-solar-charter_en
- [5] “European Innovation Council - European Commission.” Accessed: Jun. 18, 2025. [Online]. Available: https://eic.ec.europa.eu/index_en
- [6] “Homepage | European Investment Bank.” Accessed: Jun. 18, 2025. [Online]. Available: <https://www.eib.org/en/index>
- [7] “Innovation Fund - European Commission.” Accessed: Jun. 18, 2025. [Online]. Available: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-funding-climate-action/innovation-fund_en
- [8] “REPowerEU.” Accessed: Jun. 18, 2025. [Online]. Available: https://commission.europa.eu/topics/energy/repowereu_en
- [9] “The European Green Deal - European Commission.” Accessed: Jun. 18, 2025. [Online]. Available: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en
- [10] “Horizon Europe - European Commission.” Accessed: Jun. 18, 2025. [Online]. Available: https://research-and-innovation.ec.europa.eu/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-europe_en
- [11] “Recovery and Resilience Facility - European Commission.” Accessed: Jun. 18, 2025. [Online]. Available: https://commission.europa.eu/business-economy-euro/economic-recovery/recovery-and-resilience-facility_en
- [12] “Inforegio - Cohesion Fund.” Accessed: Jun. 18, 2025. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/regional_policy/funding/cohesion-fund_en
- [13] “InvestEU - European Union.” Accessed: Jun. 18, 2025. [Online]. Available: https://investeu.europa.eu/index_en
- [14] “Modernisation Fund - European Commission.” Accessed: Jun. 18, 2025. [Online]. Available: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-funding-climate-action/modernisation-fund_en
- [15] “LIFE - European Commission.” Accessed: Jun. 18, 2025. [Online]. Available: https://cinea.ec.europa.eu/programmes/life_en
- [16] “Connecting Europe Facility - European Commission.” Accessed: Jun. 18, 2025. [Online]. Available: https://cinea.ec.europa.eu/programmes/connecting-europe-facility_en
- [17] “EU renewable energy financing mechanism - European Commission.” Accessed: Jun. 18, 2025. [Online]. Available: https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/financing/eu-renewable-energy-financing-mechanism_en



- [18] Directorate-General for Research and Innovation (European Commission), *Horizon Europe, pillar II - Global challenges and european industrial competitiveness*. Publications Office of the European Union, 2021. Accessed: Jun. 18, 2025. [Online]. Available: <https://data.europa.eu/doi/10.2777/881197>
- [19] “EU boosts innovation with new European partnerships in advanced materials, textiles & photovoltaics,” European Commission - European Commission. Accessed: Jun. 18, 2025. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_25_841
- [20] “European Solar PV Industry Alliance,” ESIA. Accessed: Jun. 18, 2025. [Online]. Available: <https://solaralliance.eu/>
- [21] “The TANGO story: Towards the largest solar factory in Europe - European Commission.” Accessed: Jun. 18, 2025. [Online]. Available: https://climate.ec.europa.eu/news-your-voice/news/tango-story-towards-largest-solar-factory-europe-2022-07-11_en
- [22] “Meyer Burger successfully applies for 200 million euros in funding from the EU Innovation Fund for 3.5 gigawatt project.” Accessed: Jun. 18, 2025. [Online]. Available: <https://www.meyerburger.com/en/newsroom/artikel/meyer-burger-successfully-applies-for-200-million-euros-in-funding-from-the-eu-innovation-fund-for-35-gigawatt-project>
- [23] “Project Dawn,” Midsummer. Accessed: Jun. 18, 2025. [Online]. Available: <https://midsummer.se/en/project-dawn/>
- [24] “Sunrise,” European Solar PV Industry Alliance. Accessed: Jun. 18, 2025. [Online]. Available: <https://solaralliance.eu/projects/sunrise/>
- [25] European Commission, “HELEXIO Line: Demonstrating manufacturing for innovative BIPV roof components.” Jun. 13, 2025. Accessed: Jun. 18, 2025. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/assets/cinea/project_fiches/innovation_fund/101038919.pdf
- [26] “Agrivoltaic Canopy: crops and solar panels sharing sunlight - European Commission.” Accessed: Jun. 18, 2025. [Online]. Available: https://cinea.ec.europa.eu/featured-projects/agrivoltaic-canopy-crops-and-solar-panels-sharing-sunlight_en
- [27] “The Just Transition Mechanism - European Commission.” Accessed: Jun. 18, 2025. [Online]. Available: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/finance-and-green-deal/just-transition-mechanism_en
- [28] “Sweden: InvestEU — EIB signs loan agreement worth up to €35 million for scaling up Exeger’s cutting-edge solar cell technology,” European Investment Bank. Accessed: Jun. 18, 2025. [Online]. Available: <https://www.eib.org/en/press/all/2023-528-sweden-investeu-eib-signs-loan-agreement-worth-up-to-eur35-million-for-scaling-up-exeger-s-cutting-edge-solar-cell-technology>
- [29] “Solaria European PV Green Loan - European Union.” Accessed: Jun. 18, 2025. [Online]. Available: https://investeu.europa.eu/investeu-operations-0/investeu-operations-list/solaria-european-pv-green-loan_en
- [30] “Inforegio - Just Transition Fund.” Accessed: Jun. 18, 2025. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/regional_policy/funding/just-transition-fund_en
- [31] “EU Cohesion Policy: €354 million for Estonia,” European Commission - European Commission. Accessed: Jun. 18, 2025. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_5963
- [32] “Test facility for hydrogen receives €7 million -.” Accessed: Jun. 18, 2025. [Online]. Available: <https://northswedenbusiness.com/news/2023/oktober/test-facility-for-hydrogen-redeives-eur-7-million/>



- [33] “EU Solar Energy Strategy | Legislative Train Schedule,” European Parliament. Accessed: Jun. 18, 2025. [Online]. Available: <https://www.europarl.europa.eu/legislative-train/package-repowereu-plan/file-eu-solar-strategy>
- [34] “Clean Industrial Deal - European Commission.” Accessed: Jun. 18, 2025. [Online]. Available: https://commission.europa.eu/topics/eu-competitiveness/clean-industrial-deal_en
- [35] “Industrial Decarbonisation Bank (IDB) – EU €100B Climate Fund,” Carbon Gap - Policy Tracker. Accessed: Jun. 18, 2025. [Online]. Available: <https://tracker.carbongap.org/policy/industrial-decarbonisation-bank-idb/>
- [36] “BRITE HELLAS - European Commission.” Accessed: Jun. 18, 2025. [Online]. Available: https://eic.ec.europa.eu/eic-fund/eic-fund-portfolio/brite-hellas_en
- [37] “RISE TECHNOLOGY SRL - European Commission.” Accessed: Jun. 18, 2025. [Online]. Available: https://eic.ec.europa.eu/eic-fund/eic-fund-portfolio/rise-technology-srl_en
- [38] “ROSI SAS - European Commission.” Accessed: Jun. 18, 2025. [Online]. Available: https://eic.ec.europa.eu/eic-fund/eic-fund-portfolio/rosi-sas_en
- [39] “Venture debt.” Accessed: Jun. 18, 2025. [Online]. Available: <https://www.eib.org/en/products/equity/venture-debt/index>
- [40] ESIA, “Recommendations on financial mechanisms to fill the cost gap and restore the PV industry in Europe.” Sep. 21, 2023. Accessed: Jun. 18, 2023. [Online]. Available: <https://solaralliance.eu/wp-content/uploads/2023/09/Recommendations-on-financial-mechanisms-to-fill-the-cost-gap-and-restore-the-PV-industry-in-Europe-VF.pdf>
- [41] “Heliatek - Independent. Green. Future.,” Heliatek GmbH. Accessed: Jun. 18, 2025. [Online]. Available: <https://www.heliatek.com/de/>
- [42] European Investment Bank, European Investment Fund, and European Commission, “InnovFin: EU Finance for Innovators.” Accessed: Jun. 18, 2025. [Online]. Available: https://www.eib.org/files/publications/thematic/innovfin_eu_finance_for_innovators_en.pdf
- [43] “SUNPARTNER TECHNOLOGIES (EGFF).” Accessed: Jun. 18, 2025. [Online]. Available: <https://www.eib.org/de/projects/pipelines/all/20170227>
- [44] European Commission, “European Investment Fund (EIF).” Accessed: Jun. 18, 2025. [Online]. Available: <https://www.eif.org/index.htm>
- [45] “Germany: EIB Group and LBBW join forces to support renewable energy investment.” Accessed: Jun. 18, 2025. [Online]. Available: https://www.eif.org/what_we_do/equity/news/2023/germany-eib-group-and-lbbw-join-forces-to-support-renewable-energy-investment.htm?lang=-en



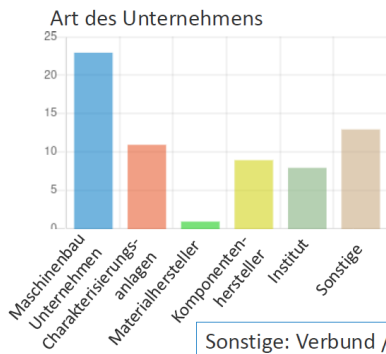
ANHANG

PRÄSENTATION DER PV PILOT UMFRAGE (MIT DIAGRAMMEN)

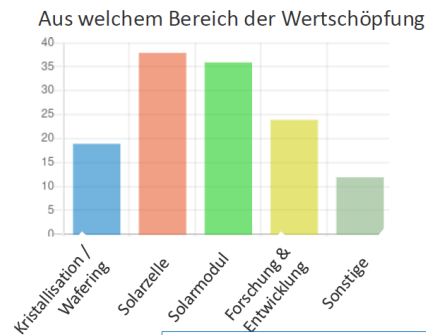
PV PILOT Umfrage

- 89 Antworten
- Firmen / Einrichtungen mit 30.000 Mitarbeitenden und 5 Mrd. Euro Umsatz
- Repräsentieren: **3.000** Mitarbeitende und **550 Mio. Euro** Umsatz **im Bereich PV**
- Fragen zu:
 - Teilnehmern (z.B. aus welchem Bereich der Wertschöpfung)
 - Standort Pilotlinie
 - Technologie Anforderungen
 - Art der Nutzung
 - Mögliche finanzielle Beteiligung
 - Einbindung in bestehende Forschungslandschaft

Umfrage: Teilnehmer



Sonstige: Verbund / Beratung / Behörde / Verband / ...



Sonstige: Recycling / Speicher / Verwaltung / ...



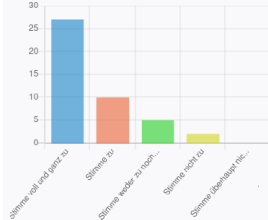
Pilotlinie und Standort

>90% ist der Zugriff auf eine **Pilotlinie wichtig**

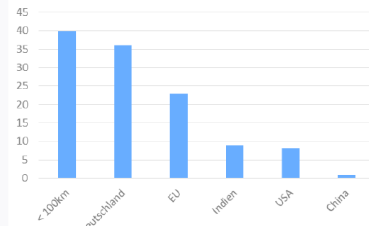
90% wünschen als Standort Deutschland, 60% Standort EU

>70% verteilte Pilotlinie akzeptabel

Bitte nennen Sie Ihre Zustimmung zu folgender Aussage: Der Zugriff auf eine Pilotlinie wäre für unser Unternehmen wichtig

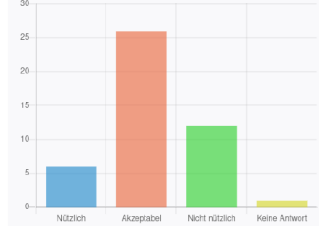


Standort einer Pilotlinie



Außerdem: Remote Zugriff

Eine verteilte Pilotlinie in Deutschland entlang der Wertschöpfungskette (gemäß der vorigen Frage) an z.B. 2-3 verschiedenen Standorten wäre ...



Wertschöpfung / Technologien

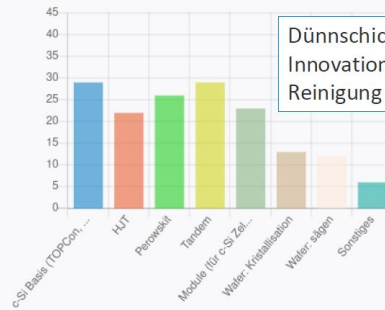
Alle Teile der Wertschöpfung sollen enthalten sein

Kristallisation weniger – braucht am meisten Unterstützung?

Diese Teile der PV Wertschöpfung sollen in einer Pilotlinie enthalten sein



Diese Technologien sollen in einer Pilotlinie enthalten sein

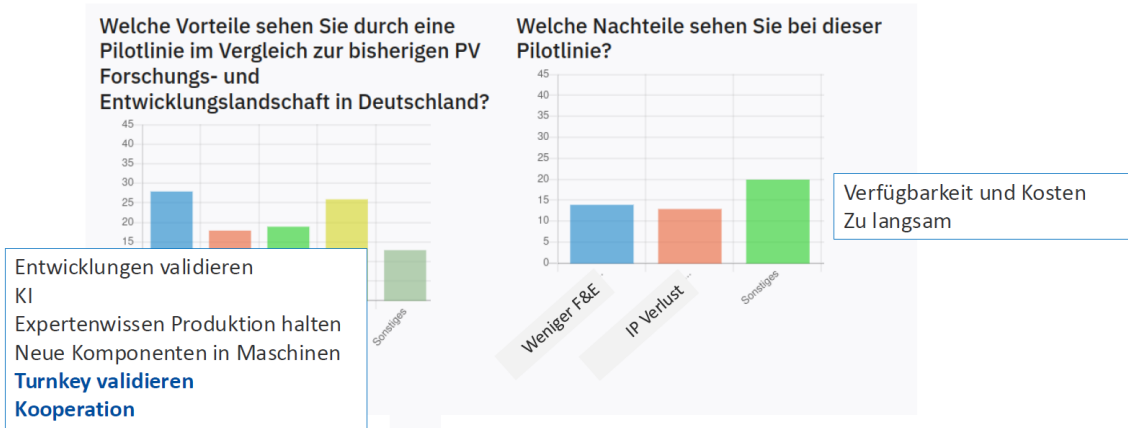


Dünnschicht
Innovationspotential
Reinigung



Warum (nicht)?

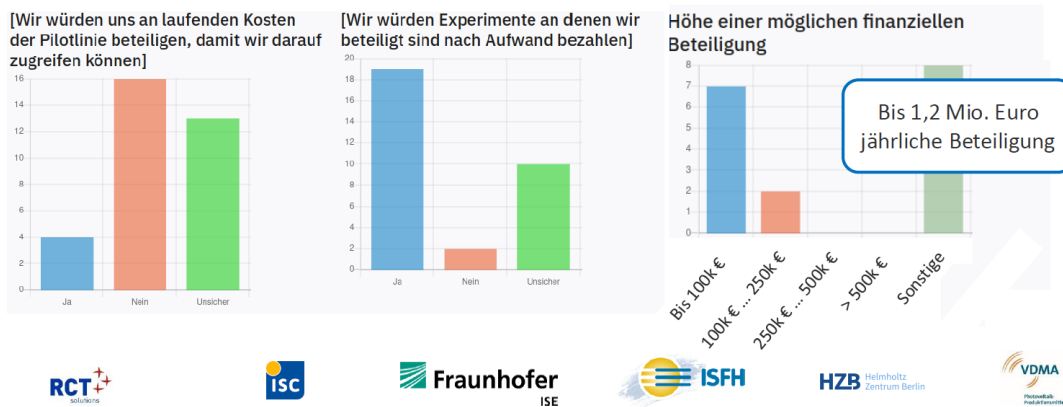
Durchsatz, Bemusterung, TRL: alles wichtig



Finanzielle Beteiligung

Finanzielle Beteiligung bis 1,2 Mio. Euro jährlich genannt

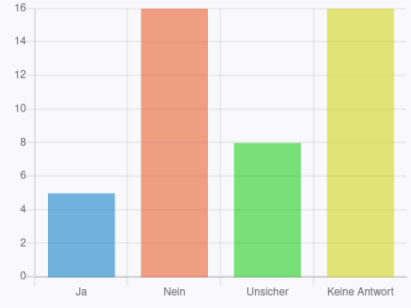
>60% würden sich finanziell an Experimenten beteiligen





Weitere Beteiligung

[Wir würden unsere Anlagen / Maschinen kostenlos zur Verfügung stellen, damit sie in der Pilotlinie betrieben werden]



Maschinen / Anlagen zur Evaluation stellen:

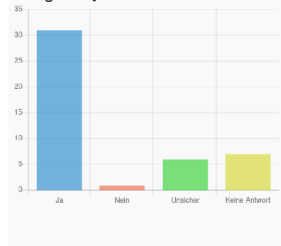
Mehr Engagement vom Maschinenbau möglich?

Forschungslandschaft

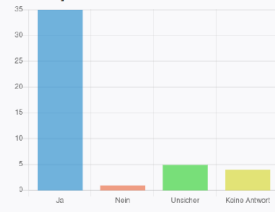
Bestehende Forschungslabors müssen beibehalten werden: große Zustimmung!

Keine Änderung des finanziellen Engagements für bestehende Forschungslabors

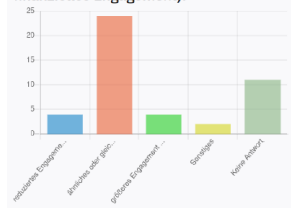
[Labors in Forschungseinrichtungen müssen beibehalten werden, um flexible Entwicklungen mit geringerem TRL zu ermöglichen]



[bestehende nationale Mittel für flexible Forschung und Entwicklung im Bereich Photovoltaik an hiesigen Forschungseinrichtungen darf auch mit einer Pilotlinie nicht weiter gekürzt werden]



Wie wird sich Ihr finanzielles Engagement bei der bisherigen Forschungs- und Entwicklungslandschaft insbesondere an Forschungsrichtungen durch die Pilotlinie verändern (zukünftiges finanzielles Engagement/bisheriges finanzielles Engagement).





Zusammenfassung

- Teilnehmer meist Maschinenbau / Charakterisierungsgerätebau
- Zugriff auf eine Pilotlinie ist für fast alle wichtig
- Finanzielle Beteiligung aus Industrie angekündigt aber überschaubar
 - Was bringt's? Aufzeigen!
 - Geräte in produktionsnaher Umgebung zur Verfügung?
- Standort Deutschland favorisiert, verteilte Linie akzeptabel



INGOT & WAFER EQUIPMENT KALKULATION

Tabelle 17: Kalkulation Angedockte Equipment Bedarf + Mix mit Verfügbarem Equipment

Equipment	300 MW Stk.	Preis spanned China [USD]	Kalkuliert Prototypen Kosten pro Stk.	Prototypen Kosten bei Angedockter				Einsparung
				Für Demo benötigt		+ Chinesisches Equipment		
Crushing	1 Stk.	800k – 1,200k	2.00 Mio. USD	1 Stk.	2.00 Mio. USD	0 Stk.	0.00 Mio. USD	0%
Si Cleaning	1 Stk.	270k – 430k	0.42 Mio. USD	1 Stk.	0.42 Mio. USD	0 Stk.	0.00 Mio. USD	0%
Grower	23 Stk.	200k – 300k	0.50 Mio. USD	2 Stk.	1.00 Mio. USD	21 Stk.	5.25 Mio. USD	-91%
Multi-Cropper	1 Stk.	240k – 290k	0.37 Mio. USD	1 Stk.	0.37 Mio. USD	0 Stk.	0.00 Mio. USD	0%
Single Cropper	1 Stk.	50 – 80 k	0.09 Mio. USD	1 Stk.	0.09 Mio. USD	0 Stk.	0.00 Mio. USD	0%
Recropper	1 Stk.	35 – 50 k	0.06 Mio. USD	1 Stk.	0.06 Mio. USD	0 Stk.	0.00 Mio. USD	0%
Squarer	1 Stk.	260k – 300k	0.39 Mio. USD	1 Stk.	0.39 Mio. USD	0 Stk.	0.00 Mio. USD	0%
Grinding	2 Stk.	230k – 290k	0.36 Mio. USD	1 Stk.	0.36 Mio. USD	1 Stk.	0.26 Mio. USD	-50%
Gluing	1 Stk.	700k – 1,300k	1.50 Mio. USD	1 Stk.	1.50 Mio. USD	0 Stk.	0.00 Mio. USD	0%
DWS	4 Stk.	200k – 300k	0.45 Mio. USD	1 Stk.	0.45 Mio. USD	3 Stk.	0.75 Mio. USD	-75%
Wafer Cleaning	1 Stk.	270k – 560k	0.50 Mio. USD	1 Stk.	0.50 Mio. USD	0 Stk.	0.00 Mio. USD	0%
Wafer Sorting	1 Stk.	200k – 300k	0.60 Mio. USD	1 Stk.	0.60 Mio. USD	0 Stk.	0.00 Mio. USD	0%
Others	1 Stk.	200k	0.40 Mio. USD	1 Stk.	0.40 Mio. USD	0 Stk.	0.00 Mio. USD	0%
Full Automation	1 Stk.	5,400k	9.72 Mio. USD	1 Stk.	9.72 Mio. USD	0 Stk.	0.00 Mio. USD	0%
Metrology	1 Stk.	2,100k	2.52 Mio. USD	1 Stk.	2.52 Mio. USD	0 Stk.	0.00 Mio. USD	0%
			32.60 Mio. USD	20.39 Mio. USD		6.26 Mio. USD		-18%
				26.65 Mio. USD				



ZELLANNAHMEN

Tabelle 18: Hauptannahmen zum Zellvergleich

Variante	PERC	p-Typ Backj.	p-Typ IBC	TOPCon	TOPCon (Cu)	TBC	POLO ² IBC	CuPolyZE BRA	HJT
Deckt ab:	Standard	ISFH POLO BJ ISE TOPCore	ISFH PoloBJ	ISFH TOPCon ISE TOPCon ISC TOUCAN	ISC CuSelfi	Standard	ISFH POLO ² IBC	ISC CuPolyZE BRA	ISE HJT Standard
Wafer			p-Typ			n-Typ			
Paste mg/Wafer	Ag 86 Al 440	Ag 86 Al 264	Ag 104 Al 293	Ag 81	Tbd.	Ag 48 Cu 265	Ag 48 Cu 265	Ag 48 Cu 265	Ag 107
Kommentar				Schattenmasken	LPCVD-Route	Tbd.			Kupfer-Metallisierung