



ERFOLGSKONTROLLE DER FÖRDERINITIATIVE „FORSCHUNG UND ENTWICKLUNG FÜR PHOTOVOLTAIK“

Ergebnisbericht zur Verwertungsbilanz

IMPRESSUM

Herausgeber:

Projektträger Jülich (PtJ)
Forschungszentrum Jülich GmbH
52425 Jülich

Verantwortlich:

Sven Macko, PtJ
Ina Klassen, PtJ
Christoph Hünnekes, PtJ

Stand:

August 2019

Bildnachweis:

Titel: ©agnormark – stock.adobe.com

INHALT

1. HINTERGRUND	6
2. UNTERSUCHUNGSGEGENSTAND UND FRAGESTELLUNGEN	6
3. BETRACHTUNGEN ZUM STAND DER TECHNIK UND DEN WIRTSCHAFTLICHEN ENTWICKLUNGEN DER PHOTOVOLTAIKBRANCHE ZU BEGINN UND NACH ABSCHLUSS DER FÖRDERMASSNAHME	9
4. ÜBERBLICK ÜBER DIE ERGEBNISSE UND AUSWERTUNG.....	10
4.1. INDIKATOR 1 – INDUSTRIELLE RELEVANZ	10
4.2. INDIKATOR 2 – ERHÖHUNG DER DURCHSATZRATE/PRODUKTIVITÄT	12
4.3. INDIKATOR 3 – VERRINGERUNG DER FERTIGUNGSKOSTEN	13
4.4. INDIKATOR 4 – RESSOURCENVERBRAUCH.....	14
4.5. INDIKATOR 5 – ERHÖHUNG DER LANGZEITSTABILITÄT	15
4.6. INDIKATOR 6 – PATENTE, LIZENZEN UND VERÖFFENTLICHUNG DER ERGEBNISSE	16
4.7. BETRACHTUNG WEITERER INDIKATOREN	17
4.8. ERGEBNISSE DER ZUSAMMENFASSENDEN EINSCHÄTZUNG DES ONLINE-FRAGEBOGENS	18
5. FAZIT.....	20

Zusammenfassung

In Konkretisierung des 6. Energieforschungsprogramms „Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung“ von 2011 wurde die ressortübergreifende Förderinitiative „FuE¹ für Photovoltaik“ am 8. Mai 2013 veröffentlicht. Übergeordnete technologische Ziele der Förderbekanntmachung sprechen drei Themenbereiche an: Systemlösungen für selbsttragende Märkte, Fertigungskonzepte für eine effiziente, kostengünstige Produktion und Qualitäts-PV²-Module zur Positionierung im internationalen Wettbewerb. Mittels dieser Fördermaßnahme wurden seitens des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) acht Verbundvorhaben und ein Einzelvorhaben gefördert. Das Fördervolumen beträgt 39,5 Millionen Euro. Der vorliegende Bericht soll für die dem BMWi zugeordneten Projekte die Zielerreichung überprüfen, Wirkungen messen und einen Indikator für die Wirtschaftlichkeit der Maßnahme geben.

In diesem Bericht werden die Verbundvorhaben zu Zell- und Modultechnologien berücksichtigt.

Die Auswertung basiert auf 41 Rückmeldungen zu einer Online-Umfrage an die Projektleitenden der einzelnen Teilvorhaben sowie der korrespondierenden, strukturierten Auswertung der Abschlussberichte. Sie zeigt auf, dass in den Verbundprojekten den anvisierten Entwicklungszielen in produktiver Weise nachgegangen wurde. Es wurden technische Prozesse und Fertigungsverfahren verbessert, neue Anlagentechnologien und -konzepte umgesetzt und Kooperationen vertieft. Einige im Rahmen der Förderinitiative entwickelten Prozesse und Anlagen konnten bereits industriell umgesetzt und wirtschaftlich verwertet werden. In weiteren wird Vermarktungspotenzial gesehen und eine wirtschaftliche Verwertung angestrebt. Deutlich wird auch, dass zum Beispiel durch die Insolvenz der Firma SolarWorld AG, Verwertungsmöglichkeiten weggefallen sind, auch wenn die in den entsprechenden Vorhaben entwickelten Prozesse vielversprechend sind.

Im Ergebnis wird jedoch durch die Förderinitiative „FuE für Photovoltaik“ eine Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit der deutschen PV-Industrie bestätigt, indem

- i. durch Erhöhung der Durchsatzrate/Produktivität und eine verbesserte Materialnutzung – damit reduzieren sich die Gesamtbetriebskosten z. B. bei Drucktechnologien, Laserprozessen oder Passivierungssystemen – Herstellungskosten verringert oder Wirkungsgrade erhöht werden konnten,
- ii. Mess- und Anlagentechnik weiterentwickelt wurden und teilweise bereits am Markt angeboten werden (Spektralellipsometrie, Produktionsplattformen und Prozesse zu Passivierungs- und Antireflexschichten für kristalline Solarzellen, Modulflasher),
- iii. die Zuverlässigkeit von PV-Komponenten als relevantes Qualitätskriterium optimiert werden konnte,

¹ FuE: Forschung und Entwicklung

² PV: Photovoltaik

- iv. **Konzepte zur Vermeidung von bleihaltigen Loten entwickelt wurden und somit ein Beitrag zum Umweltschutz geleistet wurde und**
- v. **letztendlich auch die Vernetzung zwischen den beteiligten industriellen Partnern und die Stärkung der Kooperationen eine Voraussetzung zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit darstellt.**

Auch wenn zu attestieren ist, dass ein wichtiger Ansatzpunkt der Förderinitiative, den produzierenden Unternehmen der deutschen PV-Branche einen wichtigen Impuls im globalen Wettbewerb zu geben, nicht erreicht wurde, so haben sich doch aus der Förderung eine Reihe von neuen Produkten und Verfahren mit konkret positiven Effekten ergeben.

Allein durch die oben angeführten neu entwickelten Anlagen und Messtechniken wurde ein Umsatz generiert, der – auf Basis von Abschätzung bekannter Anlagenpreise – rund dem Vierfachen des Fördervolumens von rund 40 Millionen Euro (BMWi-Anteil) entspricht. Zudem erreicht die gezeigte Ersparnis beim Einsatz von Silbermetallisierungspasten perspektivisch rund sieben Millionen Euro/Gigawatt jährlich, was den deutschen Anbietern dieser effizienten Metallisierungstechnologie Wettbewerbsvorteile verschafft. Volkswirtschaftlich betrachtet hat die Fördermaßnahme damit einen signifikanten Effekt erzielt.

1. HINTERGRUND

Die Bundesregierung verfolgte mit der Förderpolitik im Rahmen des 6. Energieforschungsprogramms „Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung“ die Umsetzung des Energiekonzepts vom 28. September 2010. Es sollte der Übergang des bestehenden, konventionellen Energiesystems in ein nachhaltiges Energiesystem durch die Verwendung erneuerbarer Energien und eine Steigerung der Energieeffizienz ermöglicht werden. Das Energieforschungsprogramm setzt auf eine verbesserte Förderung von Forschung und Entwicklung zukunftsfähiger Energietechnologien und ist ein gemeinsames Programm des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi), des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU), des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMELV) und des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF). Die Umsetzung der Energiewende ist eine Gestaltungsaufgabe, die Gesellschaft, Wirtschaft, Umwelt und Politik betrifft, und der Prozess der Energiewende baut auf einer wissenschaftlichen Expertise auf.

Das 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung legte ein besonderes Gewicht auf die projektorientierte Förderung von Forschung und Entwicklung moderner Energietechnologien. Eine exzellente, breit angelegte und gut vernetzte – von den Grundlagen bis zur industriellen Anwendung und Demonstration reichende – Forschung und Entwicklung gehört zu den wichtigsten Voraussetzungen, um neue Konzepte zu erproben, Innovationen zu beschleunigen und zukunftsfähige Energietechnologien an den Markt heranzuführen. Hierdurch sollen rasche Erfolge bei der Modernisierung der Energieversorgung Deutschlands erzielt werden.

In Konkretisierung des 6. Energieforschungsprogramms wurde die ressortübergreifende Förderinitiative „FuE für Photovoltaik“ am 8. Mai 2013 vom BMWi (ursprüngliche Zuständigkeit lag beim BMU) und BMBF veröffentlicht. Hier soll für die dem BMWi zugeordneten Vorhaben der Initiative eine Erfolgskontrolle zur Ergebnisverwertung stattfinden. Diese dient dazu, die Zielerreichung zu überprüfen, Wirkungen zu messen und die Wirtschaftlichkeit der Maßnahme einzuschätzen.

Um die Systematik und Zielgerichtetheit der projektorientierten Förderung zu hinterfragen, werden die einzelnen Projekte der Förderbekanntmachung ausgewertet. Es wird geprüft, ob die Ziele, Zielvorgaben und Gegenstände der Förderung erreicht beziehungsweise umgesetzt werden konnten.

In erster Linie dient der Erfolgskontrollbericht dem Fördergeber zur Prüfung, ob die Fördermaßnahme zielführend und zweckmäßig umgesetzt werden konnte. Ein weiterer Adressat ist der Projektträger in seiner Rolle als Schnittstelle zwischen den Zuwendungsgebern und Zuwendungsempfängern sowie als Begleiter der Förderinitiative in der Umsetzung durch Begutachtung der Anträge und der durchgeführten Arbeiten.

2. UNTERSUCHUNGSGEGENSTAND UND FRAGESTELLUNGEN

Mittels der Fördermaßnahme „FuE für Photovoltaik“ wurden seitens des BMWi acht Verbundvorhaben mit insgesamt 51 Teilvorhaben und ein Einzelvorhaben gefördert. Das gesamte Fördervolumen beträgt seitens des BMWi 39,5 Millionen Euro. Die Auswertung basiert auf den Abschlussberichten der einzelnen Teilprojekte und Daten der Projektleiter, die anonym zu den Teilprojekten

mittels eines Online-Fragebogens gesammelt wurden. Die durch das BMBF geförderten Vorhaben sind nicht Teil dieser Erhebung. In diesem Bericht werden die Verbundvorhaben zu Zell- und Modultechnologien berücksichtigt.

Einige Teilvorhaben konnten aufgrund von Insolvenzen nicht beendet werden. Die Abschlussberichte dieser Vorhaben fließen in die Evaluation mit ein, jedoch konnten die Projektleitenden dieser Unternehmen nicht mehr befragt werden. Die effektive Rücklaufquote der Online-Befragung liegt bei rund 87 Prozent.

Kernpunkt der Erfolgskontrolle ist die Überprüfung des Zielerreichungsgrades. Dazu wird der Ist-Zustand zu Beginn dem Soll-Zustand nach Auslaufen der Förderinitiative gegenübergestellt und anhand von Indikatoren bewertet. Es ergeben sich Leitfragen, welche sich aus den Zielen der Förderbekanntmachung vom Mai 2013 ableiten. Diese konkretisieren die Ziele der Erfolgskontrolle. Auf Basis der Beantwortung der Leitfragen erfolgen die Bewertung der Zielerreichung sowie die Ableitung von Empfehlungen und Vorschlägen.

Die übergeordneten technologischen Ziele der Förderbekanntmachung lauten:

- › Systemlösungen für selbsttragende Märkte: ganzheitlich optimierte, zentrale und dezentrale Energieversorgungssysteme für einen wirtschaftlichen Photovoltaik-Betrieb unter Berücksichtigung von Energiemanagement und intelligentem Speichereinsatz
- › Fertigungskonzepte für eine effiziente, kostengünstige Produktion: innovative Herstellungstechniken und PV-Produktionsanlagen einschließlich Inline-fähiger Prozessüberwachung für integrierte Fertigungslösungen und zur Erschließung neuer, industrierelevanter Materialsysteme
- › Qualitäts-PV-Module zur Positionierung im internationalen Wettbewerb: neue Modulkonzepte als Basis für Kostensenkungen und Leistungssteigerungen sowie vor allem für eine deutliche Verbesserung der Modulqualität (Lebensdauer, Degradation, Recyclingfähigkeit etc.), um für die deutschen PV-Hersteller Alleinstellungsmerkmale zu erschließen

Ergänzend können folgende thematische Schwerpunkte beziehungsweise konkretisierte Ziele in der Förderbekanntmachung ausgemacht werden:

- › Systemlösungen zum Leistungsausgleich auf dezentraler Ebene, beispielsweise im Bereich PV-Smart-Home für Strom und Wärme (z. B. kombinierte Strom-Wärme-Systeme, intelligenter Speichereinsatz in Kombination mit Wechselrichtern, Energiemanagement und Prognoseverfahren)
- › Innovationen für periphere Systemkomponenten (z. B. hocheffiziente Wechselrichter mit gesteigerter Zuverlässigkeit und Lebensdauer)
- › Photovoltaik-Systemlösungen für den „Fuel-Saver“-Betrieb in dieselgestützten Systemen zum weltweiten Einsatz
- › Produktionsverfahren und Automatisierungskonzepte für Hocheffizienz- beziehungsweise Qualitätsmodule; innovative Anlagentechnik für integrierte Fertigungslösungen
- › Neue Handling-Verfahren und Prozess-Equipment zur Erhöhung der Durchsatzraten einschließlich Inline-fähiger Prozessüberwachung und Analytik zur frühzeitigen Fehlererkennung

- › Neue oder verbesserte Materialsysteme, Herstellungsverfahren, sowie Anlagentechnik für die Dünnschichtphotovoltaik, insbesondere für Kupfer-Indium/(Gallium)-Diselenid-Technologien (CIS/CIGS³)
- › Modul- und Systemtechnologien zur Jahresertragsoptimierung von Solarsystemen, angepasst für verschiedene geografische Regionen
- › Nutzbarmachung neuer Materialien und Prozesse zur Ertragssteigerung (z. B. bessere Einkopplung oder Ausnutzung des Sonnenspektrums)
- › Innovationen im Bereich der Konzentrator-Photovoltaik zur Erhöhung des Systemwirkungsgrads und des Nettoenergieertrags
- › Arbeiten zur Nachhaltigkeit des Ressourceneinsatzes (z. B. Energieeinsparungen im Herstellungsprozess, Vermeidung des Einsatzes schädlicher oder knapper Rohstoffe)

Aus der Förderbekanntmachung lassen sich zentrale Indikatoren für eine Bewertung der Zielerreichung ableiten. Der Fokus der Online-Umfrage von Teilprojektleitern bezieht sich auf die sechs bedeutendsten Indikatoren, die gemäß der Förderbekanntmachung ausgemacht werden konnten:

- 1) Industrielle Relevanz
- 2) Erhöhung der Durchsatzrate/Produktivität
- 3) Verringerung der Fertigungskosten
- 4) Verringerter Ressourcenverbrauch
- 5) Erhöhung der Langzeitstabilität
- 6) Patente, Lizenzen und Veröffentlichung der Ergebnisse.

Die Auswertung entwickelt sich entlang dieser Indikatoren und wird die Zielerreichung in allen Einzelheiten prüfen. Die Verwertungsbilanz findet auf zwei Ebenen statt: Die erste Ebene basiert auf einer Online-Umfrage der Projektleiter der einzelnen Teilvorhaben der Förderinitiative zugehörigen Projekte. Die zweite Ebene fußt auf einer strukturierten Auswertung der Schlussberichte aller Teilvorhaben durch die den Projekten zugeordneten betreuenden wissenschaftlichen Mitarbeitern beim Projektträger Jülich (PtJ).

³ CIS/CIGS: Copper Indium Gallium Selenide (Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid)

3. BETRACHTUNGEN ZUM STAND DER TECHNIK UND DEN WIRTSCHAFTLICHEN ENTWICKLUNGEN DER PHOTOVOLTAIKBRANCHE ZU BEGINN UND NACH ABSCHLUSS DER FÖRDERMASSNAHME⁴

Der weltweite Photovoltaikmarkt hat sich im vergangenen Jahrzehnt durchgehend positiv entwickelt. Betrug die installierte Leistung 2013 zu Beginn der Fördermaßnahme „FuE für Photovoltaik“ weltweit 138 Gigawatt, mit einem jährlichen Zubau von 37 Gigawatt, lag die installierte Leistung 2018 zum Ende der Fördermaßnahme bei 505 Gigawatt, mit Zubau von 102 Gigawatt. Diese Entwicklung spiegelte sich in Deutschland nicht wider. In Deutschland fiel der Photovoltaikzubau im Jahr 2012 von 7,6 Gigawatt auf 3,3 Gigawatt in 2013. Zwischen 2014 und 2017 lag der nationale jährliche Photovoltaikzubau unterhalb von 2 Gigawatt. Zeitgleich geriet die deutsche Photovoltaikindustrie in eine wirtschaftliche Krise. 2018 erholte sich der jährliche deutsche Zubau und lag knapp unter 3 Gigawatt.

Die technologischen Entwicklungen für diese Periode lassen sich wie folgt zusammenfassen: Die kristalline Siliziumtechnologie dominierte unverändert den PV-Markt mit einem Anteil von über 90 Prozent an der globalen Produktion. Die eingesetzten Substrate waren fast ausschließlich das etablierte p-Typ Silizium und wurden zu Beginn der Fördermaßnahme standardmäßig zu Al-BSF Solarzellen verarbeitet. Wirkungsgrade in der industriellen Fertigung lagen zu diesem Zeitpunkt bei bis zu 17,5 Prozent für multi- und bis zu 18,5 Prozent für monokristalline Al-BSF Solarzellen. „Passivated Emitter and Rear Cell“ (PERC) Solarzellen wurden als sehr vielversprechender Kandidat für die nächste Generation von industriellen Siliziumsolarzellen gehandelt. Die Modulleistung lag 2013 für ein typisches Modul mit 60 Solarzellen (p-typ mono) bei 262 Watt.

2017 konnte die Leistung durch den Einsatz der PERC-Technologie für vergleichbare Module (p-typ mono) mit 60 Solarzellen auf über 290 Watt gesteigert werden. Dabei lagen die Zellwirkungsgrade bei 20 Prozent bis 22 Prozent.

Während im betrachteten Zeitraum von 2013 bis 2017 die Modulkosten von 0,55 Euro/Wattpeak auf 0,30 Euro/Wattpeak deutlich gesunken sind, haben sich die Kosten für Solarzellen und Siliziumwafer nur moderat verringert. Der Preis für Silizium blieb relativ konstant. Trotz diverser Prognosen, dass sich die Dicke der verwendeten Siliziumwafer für Solarzellen in der Fertigung merklich verringern würde, blieb diese nahezu unverändert. Im Bereich der Frontseitenmetallisierung hingegen hat sich die Fingerbreite der elektrischen Kontakte im Bezugszeitraum deutlich von 80 Mikrometer auf 45 Mikrometer verringert. Auch die Schätzungen, dass die Siebdrucktechnologie der Platingtechnologie weichen würde, haben sich nicht bewahrheitet. Weiterhin stand die Siebdrucktechnologie 2017 mit einem Anteil von circa 98 Prozent in der Fertigung unangefochten als bedeutendste Metallisierungsmethode zur Verfügung. Die Anzahl der Busbars in der Zellverschaltung hat sich von drei Busbars hin zu jeweils gleichwertigen Anteilen mit vier und fünf Busbars verschoben, mit einem prominenteren Anteil im Bereich der „4-Busbar-Technologie“.

⁴ siehe unter anderem: IEA PVPS Annual Reports 2013 ff. (<http://www.iea-pvps.org/index.php?id=6>) und ITRPV – International Technology Roadmap for Photovoltaic (<https://itrvp.vdma.org/>)

4. ÜBERBLICK ÜBER DIE ERGEBNISSE UND AUSWERTUNG

Im folgenden Berichtsteil wird eine Übersicht der Ergebnisse aus den Vorhaben der Förderbekanntmachung aufgeführt. Mit Beendigung der Vorhaben wurden alle Projektleitende abgeschlossener Teilvorhaben aufgefordert, an einer Online-Umfrage zur Auswertung der Förderbekanntmachung teilzunehmen. Fünf Teilvorhaben waren von einem Teilprojektabbruch oder einer Insolvenz betroffen, ein Einzelvorhaben war noch nicht abgeschlossen, sodass von insgesamt 53 Teilprojekten 47 Projektleitende zur Online-Umfrage eingeladen worden sind. Die Auswertung ergibt 41 ausgefüllte Datensätze.

4.1. INDIKATOR 1 – INDUSTRIELLE RELEVANZ

4.1.1 Online-Umfrage

Mittels Online-Fragebogen wurde ermittelt, inwieweit die im Projekt behandelten Prozesse unter industriellen Rahmenbedingungen getestet wurden und ob diese in industrielle Fertigungsanlagen überführt werden konnten. Aus den Rückmeldungen geht hervor, dass bedeutende, industriell umsetzbare Entwicklungen bei Laser- und Beschichtungsverfahren, bei der Zellmetallisierung, bei der Waferbehandlung sowie bei der Optimierung von bestehenden industriellen Anlagenkonzepten getätigt wurden.

Im Einzelnen wurden für die Siliziumzelltechnologie fortschrittliche Lasertechnologien wie ein kostengünstiger Laserkontaktöffnungsprozess⁵, die Laserstrukturierung der Zellrückseite oder die Laseraktivierung von Duktanden weiterentwickelt.

Unter den industriellen Beschichtungsverfahren wurden das serielle Co-Sputtern (Magnetron-sputtern) oder diverse AlO_x- sowie SiN_x-Abscheidungen für PERC-Solarzellen mittels ICP⁶ oder PECVD⁷ behandelt und optimiert. Für den Solarzellenemitter konnten die Phosphordiffusion mit POCl₃, die Passivierung und die selektive Kontaktierung lasergeöffneter Emitter verbessert werden.

Weiter wurden verschiedene Zellmetallisierungen optimiert, einerseits zum Beispiel die Feinlinienmetallisierung der PERC-Zellvorderseite mit schmalere Fingeröffnungen, geringerem Kontaktwiderstand sowie geringerem Pastenauftrag (verringertes Silberverbrauch) und andererseits eine verringerte Zellschädigung durch eine PERC-Rückseitenmetallisierung mit zuverlässigerer Haftkraft.

Im Bereich der Siliziumwaferbehandlung konnten Fortschritte in der Waferreinigung, der Rückseitenpolitur sowie dem Waferhandling erzielt werden.

Im wirtschaftlich verwertbaren Feld der Dünnschichttechnologien wurde die Entwicklung von TCO⁸ auf Basis von amorphem InZnO industriell als Inline-Abscheidungsprozess erfolgreich getestet. Für die gesputterte Zn(O,S)-Pufferschicht wird eine industrielle Überführung angestrebt. Dazu muss die Abscheiderate jedoch noch erhöht werden. Zur Steigerung der Prozessqualität wurden Verfahren

⁵ LCO: Laser Contact Opening (Laserkontaktöffnungsprozess)

⁶ ICP: Inductively Coupled Plasma (induktiv gekoppelte Plasmaabscheidung)

⁷ PECVD: Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition (Plasmaunterstützte chemische Gasphasenabscheidung)

⁸ TCO: Transparent Conducting Oxide (transparentes, elektrisch leitfähiges Oxid)

zum Monitoring des Schichtwachstums und eine in-situ-Charakterisierung von Plasmen umgesetzt. Beispielsweise ist für die in-situ-Schichtanalytik von TCO auf Glas eine industrielle Übertragung geplant.

Neben der Verbesserung von Fertigungsprozessen werden als Projektergebnisse neue Generationen von Anlagen wie Diffusionsöfen genannt. Als zweckmäßiges Verfahren wurde das Flash Lamp Annealing industriell getestet, sodass es in die Industrie überführt werden soll.

In der Umfrage wurden verschiedene Unternehmen genannt, die die Ergebnisse der geförderten Vorhaben bereits industriell erfolgreich verwerten konnten: beispielsweise Centrotherm Systemtechnik GmbH im Bereich der Diffusionsöfen, InnoLas Photonic GmbH und LPKF Laser & Electronics AG bezüglich der Laserkontaktöffnung und Heraeus Holding GmbH auf dem Gebiet der Metallisierung mit der Pastenentwicklung.

Diverse Technologien konnten nicht industriell verwertet werden. Das reaktive Magnetronspütern⁹ konnte die anvisierten optischen Schichteigenschaften noch nicht erreichen. Ferner konnten durch die Insolvenz der SolarWorld AG (und später SolarWorld Innovations GmbH) Technologien wie das Lasertrennen von Drahtverbindern, die PECVD-Abscheidung aus PassDop Schichten, die Feinlinienmetallisierung mittels Coextrusion, der Aluminium-Fingerdruck etc. nicht in die industrielle Fertigung überführt werden. Eine Verwertung durch andere Unternehmen ist ungewiss. Weiter haben sich manche Technologierouten als derzeit nicht produktionstauglich dargestellt, wie zum Beispiel der Silber-Schablonendruck, die Hochgeschwindigkeitslaserstrukturierung oder die automatisierte Prüfung von Solarmodulen im Labor.

4.1.2 Abschlussberichte

Das Hauptaugenmerk des Vorhabens HELENE lag auf der Entwicklung von Fertigungskonzepten auf industrierelevanten Anlagenplattformen für eine effiziente, kostengünstige Produktion hocheffizienter Solarzellen. Durch produktionsnahe Innovationen konnte der Zellwirkungsgrad signifikant gesteigert werden. Es wurden 22 Prozent für monokristalline und 19 Prozent für multikristalline PERC Zellen nachgewiesen. Die Technologien konnten bis zur Insolvenz der SolarWorld AG produktionsnah getestet werden. Für die industriellen Projektpartner ergeben sich dennoch Verwertungsmöglichkeiten auf Basis verbesserter Maschinengenerationen oder Materialien für den stark wachsenden Markt für PERC-Solarzellen.

Im Verbundprojekt LAURA konnte durch produktionsnahe Innovationen, wie der Drahtelektroden-technologie, der Modulwirkungsgrad signifikant gesteigert werden. Die Verwendung von Blei bezüglich der Standard-Zellverbindertechnologie wurde umgangen. Die Technologie wurde unter industriellen Rahmenbedingungen getestet. Außerdem wurde eine Multianalysekammer entwickelt, die durch den Partner MBJ Solutions GmbH am Markt angeboten wird.

Mit Zusammenführung der Produktionsprozesse aller Projektpartner im Vorhaben HighPERC wurde mit dem produktionsnahen PERC-Prozess ein Wirkungsgrad von 21,6 Prozent erzielt (ein-

⁹ HiPIMS/MF: high power impulse magnetron sputtering / mid frequency magnetron sputtering (Hochleistungsimpuls-Magnetronspütern/Mittelfrequenz-Magnetronspütern)

seitige Politur und rückseitige AlOx/SiNy Passivierung von Singulus Technologies AG und Laserkontaktöffnung von LPKF). Neue Prozessschritte wie Passivierung, Politur, LCO/LTP¹⁰ und Siebdruck können in bestehende Anlagentechnologien eingebunden werden.

Das Ziel des Vorhabens AdmMo – die Optimierung der vollständigen Produktionskette einer PERC-Solarzelle ausgehend vom Wafer mit einer Reduzierung der Stromgestehungskosten auf unter 0,06 Euro/Kilowattstunde – wurde erreicht. Einige Vorhabenergebnisse wurden bereits ganz oder teilweise in die Produktportfolios der geförderten Unternehmen aufgenommen. Dabei findet eine Verwertung auch außerhalb der Photovoltaik statt.

Das Vorhaben SIMPLEX beschäftigte sich mit insitu-Inline-Charakterisierungsverfahren für Plasma-beschichtungstechnologien. Es wurde eine neu entwickelte ICP-Quelle hinsichtlich der Anforderungen industrieller Produktionsanlagen weiterentwickelt und optimiert. Die Erkenntnisse konnten für einen industriellen Einsatz genutzt werden. Zudem ist im Projekt die einzige auf dem Markt verfügbare Lösung für spektroskopische Ellipsometrie entstanden, die in der Solarproduktion inline in der Fertigungslinie eingesetzt werden kann und die Schichtmessung auf der Zellvorder- und -rückseite erlaubt. 2018 wurden die ersten Ellipsometer verkauft.

Ausgehend von Laborprozessen war das übergeordnete Ziel des Vorhabens TCO4CIGS die Hochskalierung zweier vielversprechender Prozesse in den Industrie- bzw. Pilotlinien im Verbund vertretener CIGS-Modulhersteller. Final umgesetzt wurde im Vorhaben schließlich eine evolutionäre Lösung: die Hochskalierung eines verbesserten Standardprozesses. Die Ergebnisse eröffnen neue Möglichkeiten für die Verbesserung des Puffer-/Fensterschicht-Systems. Sie können in die Produktion einfließen und hier perspektivisch Kosten- und Qualitätsvorteile bringen. Auch konnte im Vorhaben das reaktive Sputtern und Co-Sputtern (Magnetronsputtern) weiterentwickelt werden. Das System muss allerdings noch bis zur Industrietauglichkeit gebracht werden.

4.2. INDIKATOR 2 – ERHÖHUNG DER DURCHSATZRATE/PRODUKTIVITÄT

4.2.1 Online-Umfrage

Es wurden beachtenswerte Ergebnisse in Bezug auf eine Erhöhung der Durchsatzrate und Produktivität vorgelegt.

Diverse Beschichtungsverfahren wurden verbessert. Bei der Inline-Beschichtung von In₂O₃:H als TCO-Schicht für CIGS Solarzellen wurde die Depositionsrate von 0,5 Newtonmeter/Sekunde auf 3 Newtonmeter/Sekunde gesteigert. Damit liegt die Steigerung des Durchsatzes bei bemerkenswerten 500 Prozent. Bei der ultradünnen PECVD-AlOx-Beschichtung konnte eine um 200 Prozent gesteigerte Durchsatzrate erzielt werden. Weitere nennenswerte Durchsatzsteigerungen sind beim reaktiven Magnetronsputtern zur Herstellung eines ZnO:Al TCOs mit ca. 50 Prozent, in der PECVD-Beschichtung zur Zellpassivierung mit 40 Prozent und in der Rückseitenpolitur von Wafern mit 30 Prozent erreicht worden.

Im Bereich der Laserverarbeitung konnten große Verbesserungen bei der Hochgeschwindigkeitslaserstrukturierung der Zellrückseite mit einer um 300 Prozent gesteigerten Durchsatzrate erzielt

¹⁰ LTP: Laser Transfer Printing (Lasertransferdruck)

werden. Beim Prozess des kostengünstigen Laserkontaktöffnens ist eine Durchsatzsteigerung von 39 Prozent identifiziert worden.

Einige Entwicklungsfortschritte ermöglichten keine direkte Durchsatzerhöhung, sondern betreffen diese indirekt, indem der Ausschuss gesenkt, Wartungszeiten von Anlagen verringert oder Prozessvereinfachungen umgesetzt werden konnten: Beispielsweise erlaubt ein optimierter Prozess zur Frontseitenmetallisierung eine Verbesserung und damit Erhöhung von Standzeiten der Druckträger um circa 10 Prozent. Für die PERC Al₂O₃ Beschichtung auf Si₃N₄ konnte mit Hilfe der optischen in-situ Kontrolle von Beschichtungsprozessen der Ausschuss gesenkt werden. Der entwickelte Prozess zur gesputterten Zn(O,S)-Pufferschicht ersetzt vormals zwei zu verwendende Prozesse.

4.2.2 Abschlussberichte

Der Indikator Erhöhung der Durchsatzrate/Produktivität wird in den Vorhaben HighPERC, AdmMo und LAURA tangiert. Im Vorhaben HighPERC konnte die ICP PECVD als Abscheidemethode für AlO_x/SiNy Rückseitenpassivierungen hinsichtlich noch höherem Durchsatz und weiter gesteigerter Passivierqualität weiterentwickelt werden, um den zukünftigen Anforderungen an die Produktion zu entsprechen. Die ICP PECVD Technologie erreicht mit über 5 Nanometer/Sekunde eine der höchsten Abscheideraten für AlO_x/SiNy-Schichten und ist somit sehr gut für die Volumenproduktion geeignet. Ferner wurden im Vorhaben HighPERC neuartige Siebdruckprozesse entwickelt, welche ultraschmale Silberfinger bei erheblich reduziertem Silberpastenverbrauch von unter 40 Milligramm/Wafer bei Durchsätzen in der Massenproduktion von über 3.600 Wafer/Stunde drucken.

Die Arbeiten im Vorhaben AdmMo erfolgten unter Verwendung der Standard-Maschinenplattform der Firma InnoLas. Es konnten Verbesserungen bezüglich Handling und Durchsatz erzielt werden. Im Vorhaben konnte beim LCO-Prozess zur Herstellung lokaler Kontakte eine relative Durchsatzerhöhung von circa 60 Prozent erreicht werden. Es wurde eine kosteneffiziente Abscheideanlage für Dielektrika mit um 30 Prozent verringerten Gesamtbetriebskosten und einer Verbesserung der Kohlenstoffbilanz um 50 Prozent demonstriert.

Im Vorhaben LAURA wurde mit der entwickelten Multianalysekammer für PV-Module gezeigt, dass kombinierte Prüfungen von PV-Modulen zu einer Reduktion der Analysezeit beitragen.

4.3. INDIKATOR 3 – VERRINGERUNG DER FERTIGUNGSKOSTEN

4.3.1 Online-Umfrage

Zum Indikator Fertigungskosten wurden mehrere Einzelangaben von den Projektleitungen in der Online-Umfrage gemacht. Zusammenfassend lassen die Rückmeldungen der Online-Umfrage den Schluss zu, dass Verringerungen der Fertigungskosten vor allem durch Materialeinsparungen erreicht wurden. Aber auch in der Optimierung der Hochgeschwindigkeitsprozesse, zum Beispiel im Bereich der Laserstrukturierung, werden Kostenersparnisse gesehen. Zudem können mit optischen in-situ-Kontrollen von Beschichtungsprozessen Fertigungskosten gesenkt werden.

4.3.2 Abschlussberichte

Bei der Auswertung der Schlussberichte sind konkrete Ergebnisse aus den Verbänden LAURA, HELENE und SIMPLEX zu erkennen:

Das Vorhaben HELENE trug maßgeblich dazu bei, ein Beschichtungsverfahren zu etablieren (AlOx PECVD), welches vom Anlagenbauer im Nachgang vermarktet wird. Einem anderen Anlagenbauer ist es im Rahmen des Vorhabens Simplex gelungen, die AlOx-Schichtdicke (von 20 Nanometer) bis auf 4 Nanometer bei gleichbleibender Passivierungswirkung zu reduzieren. Die Reduzierung der Schichtdicke stellt eine essentielle Verbesserung bei der Prozessierung dar und bietet Optimierungspotential beim Ressourceneinsatz gegenüber herkömmlichen Prozessen. Daraus resultiert ein großer Effizienzgewinn hinsichtlich des eingesetzten Materials sowie in der Zykluszeit der Beschichtungsanlage. Im Vorhaben LAURA wurde ein Demonstrator für die Drahtelektrodenteknologie entwickelt und im Rahmen einer Pilotierung dessen Volumentauglichkeit überprüft. Dabei konnte das Kostensenkungspotenzial der Technologie bestätigt werden. Für wichtige Teilprozesse wurden im Demonstrator bereits vollautomatische Prozessüberwachungsverfahren integriert.

Zur Systemtechnik konnte im Vorhaben LAURA in einem Demonstrationshaushalt mit PV-Anlage, Batteriespeicher, Wärmepumpe und Elektromobil eine dynamische Optimierung von Erzeugung und Verbrauch mithilfe eines smarten Controllers erzielt werden. Die Kosten für in Batteriesystemen gespeicherten Solarstrom konnten im Rahmen des Vorhabens um mehr als 0,8 Euro/Kilowattstunde verringert werden. Wegen der Insolvenz der SolarWorld AG konnten Zwischenergebnisse jedoch nicht fertigungsreif umgesetzt werden.

4.4. INDIKATOR 4 – RESSOURCENVERBRAUCH

4.4.1 Online-Umfrage

Zum Indikator Ressourcenverbrauch wurden mehrere Einzelangaben von den Projektleitenden gemacht. Diese beziehen sich unter anderem auf die Reduktion von Silber (Ag) auf der PERC-Zellvorderseite. Einem Teilnehmer ist es gelungen, einen Ag-Verbrauch von unter 65 Milligramm/Zelle zu demonstrieren. Untermauert wird diese Tendenz mit prüffähigen Angaben von 40 Milligramm/Zelle aus den Abschlussberichten (siehe unten). Bei einem Standardverbrauch von 100 Milligramm/Zelle als Referenzgröße entspricht die letztere Reduktion circa 12 Milligramm/Wp¹¹. Ein weiteres Einsparpotential stellte die Reduktion des Trimethylaluminium (TMA) Precursors dar, der bei verbesserter Rückseitenpassivierung zum Aufbringen einer Aluminiumoxidschicht benötigt wird. Da hier Schichtdicken um 50 Prozent reduziert werden konnten, liegt die Einsparung von TMA¹² in der gleichen Größenordnung. Auch bei Aluminiumpasten konnte eine Reduktion von 2 Milligramm/Wp¹³ erzielt werden.

¹¹ Eine Ersparnis von 60mg/Zelle entspricht 12mg/W_p, was bei einer 1 GW Fertigung und 600 Euro/kg Silber rund 7,2 Mio. Euro p. a. Kostenersparnis erbringt (Stand 2019).

¹² TMA – Trimethylaluminium wird zur Herstellung von Passivierungsschichten für PERC Solarzellen verwendet; 50 % TMA Ersparnis entspricht 1–1,4mg/W_p und bei 8GW Fertigung und 1,4 Cent/g: 112–160 Tsd. Euro p. a. Kostenersparnis (Stand 2019).

¹³ 2mg/W_p macht bei 8 GW Fertigung und 10 Euro/kg: 160 Tsd. Euro p. a. Kostenersparnis (Stand 2019).

Zusammenfassend lassen die Rückmeldungen der Online-Umfrage den Schluss zu, dass eine Reduktion des Ressourcenverbrauchs vor allem durch Optimierungen im Auftrag von Aluminiumoxid-schichten, Silber- und Aluminiumpasten möglich ist.

4.4.2 Abschlussberichte

Bei der Auswertung der Schlussberichte durch PtJ sind konkrete Ergebnisse aus den Verbänden HELENE, HighPERC und SIMPLEX zu erkennen: Die Reduzierung der Aluminiumoxidschicht stellt eine essentielle Verbesserung bei der Prozessierung dar und bietet Optimierungspotential beim Ressourceneinsatz gegenüber herkömmlichen Prozessen. Auch der reduzierte Silberpastenverbrauch auf unter 40 Milligramm/Wafer weist im Rahmen des Vorhabens HighPERC ein hohes Reduktionspotenzial an Material auf – und das sogar bei massenproduktionstauglichen Durchsätzen von über 3.600 Wafer/Stunde.

4.5. INDIKATOR 5 – ERHÖHUNG DER LANGZEITSTABILITÄT

4.5.1 Online-Umfrage

Zum Indikator Erhöhung der Langzeitstabilität erfolgten mehr Einzelangaben von den Projektleitenden. Diese beziehen sich sowohl auf Verbesserungen der PV-Anlagen und ihrer Komponenten (Zellen und Module) als auch auf Effekte im Herstellungsprozess, zum Beispiel bezüglich der Standzeiten-Erhöhung bei der Zellmetallisierung um circa zehn Prozent. Zusammenfassend lassen die Rückmeldungen der Projektleitungen den Schluss zu, dass Verbesserungen der Langzeitstabilität zur Siliziumtechnologie vor allem durch Verbesserungen bei den Druck- und Metallisierungstechnologien für Zellen und Module erreicht wurden. Zudem ist zu erkennen, dass auch für CIGS-Dünnsichtmodule signifikante Verbesserungen durch optimierte TCOs erreicht wurden. Während zur erstgenannten Innovation aus dem Kontext der anderen Indikatoren auch auf einen positiven Effekt auf der Kostenseite geschlossen werden kann, ist dies bei den TCOs für CIGS nicht möglich.

4.5.2 Abschlussberichte

Bei der Auswertung der Schlussberichte durch PtJ sind konkrete Ergebnisse aus den Verbänden LAURA und AdmMo zu erkennen:

Im Verbund LAURA wurden beschleunigte Testverfahren entwickelt, um die Modullebensdauer, die Alterung und den Jahresenergieertrag für alle weiteren Änderungen im Modul wissenschaftlich abzusichern. Bei gleichbleibenden Stückkosten sollte eine Solarmodullebensdauer von 30 Jahren bei einer Modulalterung von unter 0,35 Prozent pro Jahr für alle neu entwickelten Komponenten erreicht werden. Es wurden Fertigungsverfahren für PERC-Module mit Verschaltung via Drahtelektroden mit gesteigerter Leistung und stabiler Lebensdauer entwickelt. Die im Vorhaben entwickelte Multianalysekammer für PV-Module ermöglichte eine verbesserte Qualitätssicherung. Wegen der Insolvenz der SolarWorld AG kam die Umsetzung der Zwischenergebnisse jedoch nicht zum Tragen.

Arbeiten zur LeTID¹⁴, einem wesentlichen Degradationseffekt bei PERC Solarzellen, wurden im Verbund AdmMo durchgeführt. Sie resultierten in einer messbaren Verringerung der Degradation und damit zu längerer Lebensdauer. Da die genauen Degradationsprozesse sehr von den individuellen Eigenschaften der jeweiligen Zelle abhängen, kann nicht genau beschrieben werden, inwieweit die Arbeiten auf PERx-Konzepte in der Industrie anwendbar sind.

Auch hier zeigt sich, dass Ergebnisse zur Erhöhung der Langzeitstabilität sowohl auf der Ebene der Material- und Prozessentwicklung als auch bei den Hauptkomponenten der PV-Anlagen (Zellen und Module) erreicht wurden.

4.6. INDIKATOR 6 – PATENTE, LIZENZEN UND VERÖFFENTLICHUNG DER ERGEBNISSE

Von den Projektleitungen wurden in der Online-Umfrage aus vier Teilvorhaben Schutzrechte gemeldet, von denen eins bereits Lizenzannahmen generiert hat. Zugleich wurden 88 von Fachleuten begutachtete (peer-reviewed) Publikationen angegeben.

Die Auswertung der veröffentlichten Schlussberichte durch PtJ ergab folgendes Bild:

Verbund	Schutzrechte	Veröffentlichungen
HELENE	10	diverse
LAURA	6	12
AdmMo	-	9
SIMPLEX	1	keine Angabe
HighPERC	-	diverse
TCO4CIGS	-	9

¹⁴ LeTID: Light and elevated Temperature Induced Degradation (licht- und temperaturinduzierte Degradation)

Hervorzuheben sind die Schutzrechte aus dem Verbund LAURA, die das Energiemanagement im Kleinverbrauch und in Modultechnologien betreffen¹⁵, darüber hinaus aber insbesondere das Schutzrecht eines Unternehmens aus dem Verbund Simplex zur industrienahen Anwendung spektroskopischer Ellipsometer für PERC-Zellen und andere Zelltypen, das bereits in ein marktfähiges Produkt mündete.

4.7. BETRACHTUNG WEITERER INDIKATOREN

a) Industrieführte Projektkonsortien

Die Förderbekanntmachung sollte in einer wirtschaftlich angespannten Phase der Photovoltaik-industrie diese durch technologiespezifische, flankierende, industrienaher Forschungsvorhaben unterstützen. Daher sollten die Konsortien durch industrielle Unternehmen angeführt werden. Schlussendlich wurden sieben der neun Vorhaben durch ein industrielles Unternehmen angeleitet. Aufgrund einer Schließung des Geschäftsbereichs (bzw. im anderen Fall einer Verlagerung der Produktion ins außereuropäische Ausland) fielen die industriellen Konsortialführer aus zwei Vorhaben heraus. Unter Anpassung der Projektinhalte und -zielsetzungen wurden die zwei zuvor genannten Vorhaben unter Führung von Forschungseinrichtungen durchgeführt.

b) KMU-Beteiligung

Von den 41 Zuwendungsempfängern (Unternehmen und Forschungseinrichtungen) waren 10, und somit circa 24 Prozent, kleine und mittlere Unternehmen (KMU). An fünf der acht Verbundvorhaben waren KMU beteiligt.

c) Verbundstrukturen und Kooperation

Anvisiert war in der Förderbekanntmachung eine Verbundförderquote von 50 Prozent. Diese lag bei den geförderten Verbundvorhaben teilweise leicht oberhalb von 50 Prozent. Die Abweichungen nach oben erklären sich durch Aufschläge für KMU (zehn Prozent) und Änderungen an der Verbundstruktur (Ausscheiden von Industriepartnern) im Nachhinein.

In sieben von acht Verbundvorhaben wurde eine vertikale Kooperation umgesetzt, sodass Unternehmen mindestens aus zwei der drei Bereiche Anlagenbau, PV-Hersteller und Systemtechnik-ausrüster zusammenarbeiteten. Zu den drei Vorhaben HighPERC, HELENE und SIMPLEX konnten erfolgreich fortführende Vorhaben aufgesetzt werden, sodass die auf den Vorhaben aufbauenden Arbeiten in einer umsetzungsorientierten Zusammenarbeit mündeten.

¹⁵ ¹⁵ Patente „Verbrauchersteuerung“, „PV-Strom-Steuerung für Mehrfamilienhaus“, „Modul zur Einschaltung von Haushaltsgeräten“, „Bifaziales Modul mit Drahtelektrode“, „Verschaltung von bifazialen Zellen mit Drahtelektrode“, „Solarmodul für 1500 V Strangspannung“, „Verbindercharakterisierung mittels Ultraschall“, „Verfahren und Einrichtung zum schnellen stoffschlüssigen Verbinden von Körpern oder von Schichten oder von Körpern und Schichten durch Lötten mit Laserstrahlen“

d) Weitere Indikatoren:

Es wurden in Bezug auf die Förderbekanntmachung Auswertungen zu den weiteren Indikatoren „Ausbau des Technologievorsprungs, Entwicklung neuer Prozessschritte, Qualitätsoptimierung, Energieeinsparung in der Fertigung, Unternehmensgründungen sowie Erschließung neuer Märkte“ durchgeführt. Die Auswertung ergab, dass bei fünf Vorhaben der Technologievorsprung ausgebaut werden konnte. Dabei wurden in den Vorhaben LAURA, HELENE und TCO4CIGS neue Prozessschritte in bestehende Anlagentechnologien eingebunden. Im Fall des Vorhabens AdmMo konnte der technologische Stand – mit dem sich dynamisch entwickelnden Stand der Technik im Marktumfeld – durch das Vehikel der Förderung mithalten. Die Vorhaben AdmMo, SIMPLEX und TCO4CIGS konnten das Themenfeld der Prozessüberwachung zur Qualitätsoptimierung abdecken; das Themenfeld Energieeinsparung in der Fertigung wurde in keinem der Forschungsvorhaben prioritär adressiert. Unternehmensgründungen haben sich nicht ergeben. Dennoch konnten für Projektpartner aus den Vorhaben LAURA und SIMPLEX neue Märkte erschlossen werden.

4.8. ERGEBNISSE DER ZUSAMMENFASSENDEN EINSCHÄTZUNG DES ONLINE-FRAGEBOGENS

a) Verbesserung der Zusammenarbeit zwischen Ausrüstern, Maschinenbauern und/oder PV-Herstellern

Die Schlussfolgerungen aus der Befragung zeigen, dass die Anwendungsnähe der geförderten Forschungsprojekte und die intensiven Kontakte zu den Partnern entlang des Produktentstehungsprozesses zu einem verbesserten Gesamtprozessverständnis geführt haben und dass die Kooperation im Verbund eine deutlich bessere Anpassung der Entwicklungsschritte einzelner Forschungsbereiche hin zu einem abgestimmten System ermöglicht hat. Insbesondere haben sich die Verbundprojekte positiv im Bereich der Pastenherstellung sowie der Entwicklung von Messtechnik zur Prozesscharakterisierung als auch zur Laserprozesstechnik ausgewirkt. Es wurde zurückgemeldet, dass Maschinenbauer und Ausrüster (sowie Messtechnikhersteller) zusammen mit den Forschungsinstituten den gemeinsamen Wert der tieferen Kooperation und Erarbeitung gemeinsamer Entwicklungszielstellungen erkannt haben. Beispielsweise führte in einem Vorhaben die Kooperation zu einem erweiterten Verständnis und zu einer verbesserten Kostenabschätzung bei der Einführung eines neuen Prozesses, was im Umkehrschluss sowohl für die Industrie als auch in der Forschung zukünftig einen Vorteil bedeuten kann. Die konstruktive Zusammenarbeit soll auch über das Förderprojekt hinaus fortgeführt werden.

b) Vermarktung der gewonnenen Projektergebnisse

Gemäß den Antworten können Projektergebnisse aus den Bereichen PECVD-Beschichtung, Siebdruck, Laserprozesse und Messtechnik wirtschaftlich verwertet werden. Weiter wird ein inlinefähiger LED Sonnensimulator vertrieben. Vermarktungspotenzial wird in der PECVD PassDop-Schichtabscheidung und Siebdruck-Kontaktierung von PassDop gesehen – mit einer möglichen Markteinführung ab 2021. Für die Verfahren ultraschnelle Laserbearbeitung, Ultra-Feinlinien-Siebdruck, alternative Metallisierungspastensysteme sowie selektiv kontaktierende Silberpaste wird ebenfalls eine mögliche zukünftige Anwendung in der PV-Industrie gesehen. Auch die Technologie „Polymerlumineszenz im PV-Modul“ wird als vielversprechend eingestuft. Bei CIGS-Solarzellen werden Vermarktungspotenziale in den Verfahren zur gesputterten Zn(O,S)-Pufferschicht, dem seriellen Co-Sputter-Tool (Magnetronspattern) mit in-situ Manipulation der Targetdotierung als auch der optischen in-situ-Schichtanalytik des Sputterprozesses für TCO auf Glas gesehen.

c) Hemmnisse einer wirtschaftlichen Verwertung

Es wird konstatiert, dass die Insolvenzen in der deutschen Photovoltaik-Fertigung das Inlandsgeschäft erschweren. Allgemein wird in einem Fall angemerkt, dass „ein großes Hemmnis für die Umsetzung und Vermarktung das Fehlen von Solarzellen-Herstellern im europäischen Raum“ ist. Zur Umsetzung von Innovationen sind die Anlagenhersteller und Institute daher zur Kooperation mit (zumeist) asiatischen Herstellern gezwungen. Beachtenswert ist die Feststellung, ein Hindernis liege darin, dass die Wafer heute nicht mehr so schnell bewegt werden wie sie bearbeitet werden können. Es sind hier zum Teil substantielle Weiterentwicklungen im Bereich der Automatisierung nötig, um die Vorteile der neuen Technologie nutzen zu können.

d) Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit deutscher PV-Industrie

Gemäß den zusammengetragenen Aussagen konnten einige mit der Förderung zusammenhängende Entwicklungen zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit der PV-Industrie in Deutschland beitragen.

Es wurde festgehalten, dass die Wettbewerbsfähigkeit durch neue innovative Produkte verbessert wurde oder indem Herstellungskosten von Solarzellen verringert beziehungsweise Wirkungsgrade von Solarzellen erhöht werden konnten. Weiter ist die Zuverlässigkeit von Solarmodulen ein relevantes Qualitätskriterium, wodurch Produkte optimiert wurden. Ferner werden auch der Wissensaustausch zwischen den beteiligten Partnern und die Stärkung der Kooperationen als Voraussetzung zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit identifiziert: Das generierte „Know-how ist anwendbar für PV-Modulhersteller, Turn Key Hersteller und Materialhersteller als auch im wettbewerblichen Bereich zu Aufträgen an Bestandsanlagen“. In diesem Zusammenhang wurde die Vermutung geäußert, dass die „Wertschöpfung durch Verkauf von Anlagen höher ist als die Produktion von Solarzellen“, die inzwischen eine Massenware darstellen (Anmerkung: Durch die Interdependenz beider Bereiche ist diese Aussage jedoch kritisch zu hinterfragen).

Schließlich wurden ganz konkret in Vorhaben Anlagen entwickelt, die sich bereits am Markt behauptet haben: Beispielsweise ermöglicht eine entwickelte Multianalysekammer für PV-Module Vorhersagen zu Lebensdauern der PV-Module nach geringen Alterungszeiten und ein kostengünstiger Sonnensimulator ist aufgrund des Preises wettbewerbsfähig. Explizit werden Technologien

wie das Lasertrennen und Laserlöten als hochproduktive Technologien identifiziert, deren Wettbewerbsfähigkeit von stetigen Innovationen abhängig ist und zu deren Begehrtheit die Entwicklungen im Förderprojekt beigetragen haben. Ein Projektpartner stellt die im Projekt entwickelte Technologie als „starkes Alleinstellungsmerkmal“ dar.

e) Sonstige Anmerkungen

Es wird festgestellt, dass durch die Förderung ein wichtiger Beitrag für die Energiewende in Deutschland mit globaler Ausstrahlung geleistet wurde. Die Forschungsförderung durch die Bundesregierung wird weiterhin als notwendig erachtet, um die Zusammenarbeit zwischen Forschungsinstituten und der Industrie in Verbänden, die die Teilprozesse der Wertschöpfungskette abbilden, zu stärken und damit die Entwicklung abgestimmter Fertigungsprozesse voranzutreiben. Ein Gesamtkonzept ermöglicht die erfolgreiche Umsetzung im Markt.

Es sei ist zu berücksichtigen, dass der deutsche PV-Anlagenbau international marktführend ist. Die Insolvenzen der deutschen PV-Fertiger erschweren zwar die Weiterentwicklung von Prozessen und Technologien, teilweise kann dies aber durch leistungsfähige Institute abgefangen werden. Die Finanzierung von Entwicklungsarbeiten der Forschungsinstitute übersteigt jedoch häufig die Möglichkeiten der zumeist mittelständisch geprägten Anlagenbauer. Auch hierin begründet sich eine weitere Förderung des deutschen PV-Anlagenbaus. Diese ist daher essenziell.

5. FAZIT

Der Beitrag der Förderbekanntmachung „FuE für Photovoltaik“ erstreckte sich über den gesamten Bereich der Photovoltaik – von der Materialentwicklung über die Solarzellentechnologie, sowohl im kristallinen Siliziumbereich als auch in der Dünnschicht-Technologie, bis hin zur Systemtechnik. Die deutsche Forschungslandschaft auf dem Gebiet der Photovoltaik erfolgt auf einer sehr hohen Qualitätsstufe und ist in der Breite der Ausrichtung wohl weltweit einmalig.

Durch die gezielte Förderung, insbesondere von vertikal angelegten Verbundprojekten zwischen Produktionsfirmen, Anlagenbauern, Geräteherstellern sowie Forschungseinrichtungen, konnte größtenteils eine rasche Umsetzung der Projektergebnisse erfolgen. Die starke Vernetzung der Forschung und Entwicklung in Industrie und Forschungseinrichtungen hat mit dazu beigetragen, dass viele Erkenntnisse aus den geförderten Projekten sehr bald in die Fertigung übertragen werden konnten, sodass die deutsche PV-Industrie und der Anlagenbau auf ihren spezifischen Arbeitsfeldern Technologieführerschaft beanspruchen können. Daher ist also eine sehr schnelle Umsetzung von FuE-Ergebnissen in die Produktion für die Förderbekanntmachung charakteristisch. Insbesondere fällt dies unter dem Aspekt ins Gewicht, dass die betrachtete Förderbekanntmachung in einer wirtschaftlichen Krise der deutschen Photovoltaikindustrie aufgesetzt wurde, um die Industrie in der Innovation technologischer Weiterentwicklungen zu unterstützen und um sie für den internationalen Wettbewerb zu stärken. Während sich die deutsche Solarzellenproduktion am internationalen Markt nicht behaupten konnte, dürften die Equipment-Anbieter und der deutsche Maschinen- und Anlagenbau weiterhin eine weltweite Spitzenposition einnehmen.

Im Ergebnis wird insgesamt eine Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit der deutschen PV-Industrie bestätigt, indem

- i. durch Erhöhung der Durchsatzrate/Produktivität und eine verbesserte Materialnutzung – damit reduzieren sich die Gesamtbetriebskosten, zum Beispiel bei Drucktechnologien, Laserprozessen oder Passivierungssystemen – Herstellungskosten verringert oder Wirkungsgrade erhöht werden konnten,
- ii. Mess- und Anlagentechnik weiterentwickelt wurden und teilweise bereits am Markt angeboten werden (Spektralellipsometrie, Produktionsplattformen und Prozesse zu Passivierungs- und Antireflexschichten für kristalline Solarzellen, Modulflasher),
- iii. die Zuverlässigkeit von PV-Komponenten als relevantes Qualitätskriterium optimiert werden konnte,
- iv. Konzepte zur Vermeidung von bleihaltigen Loten entwickelt wurden und somit ein Beitrag zum Umweltschutz geleistet wurde und
- v. letztendlich auch die Vernetzung zwischen den beteiligten industriellen Partnern und die Stärkung der Kooperationen eine Voraussetzung zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit darstellt.

Allein durch die oben angegebenen neu entwickelten Anlagen und Messtechniken wurde ein Umsatz generiert, der auf Basis von Abschätzung bekannter Anlagenpreise rund dem vierfachen des Fördervolumens von rund 40 Millionen Euro (BMW-Teil) entspricht. Zudem erreicht die gezeigte Ersparnis beim Einsatz von Silbermetallisierungspasten perspektivisch rund sieben Millionen Euro/Gigawatt jährlich, was den deutschen Anbietern dieser effizienten Metallisierungstechnologie Wettbewerbsvorteile verschafft. Volkswirtschaftlich betrachtet hat die Fördermaßnahme damit einen signifikanten Effekt erzielt.

Die Auswertung der technologischen Ergebnisse zeigt in überzeugender Weise, dass die Initiative „FuE für Photovoltaik“ einen wichtigen Beitrag zur Stärkung der deutschen PV-Industrie geleistet hat. Die breit angelegte Förderung umfasste verschiedene Solarzell- und Modultechnologien, sowie Systemtechnik, Qualitätssicherung und Fertigungstechnologie. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Förderbekanntmachung auf der technologischen Ebene ein großer Erfolg war. Das Programm trug wesentlich dazu bei, dass die deutsche Forschung zu fast allen Themen der Photovoltaik wichtige Beiträge leisten konnte.