



**EXPERTENEMPFEHLUNGEN AUS DEN ARBEITSGRUPPEN
PHOTOVOLTAIK FÜR DEN KONSULTATIONSPROZESS
ZUM 7. ENERGIEFORSCHUNGSPROGRAMM**



**FORSCHUNGSNETZWERK
ENERGIE** ERNEUERBARE ENERGIEN

**Expertenempfehlungen aus den Arbeitsgruppen Photovoltaik
für den Konsultationsprozess zum 7. Energieforschungsprogramm**

FORSCHUNGSNETZWERK ERNEUERBARE ENERGIE

Einleitung

Transparenz und Partizipation sind wichtige Ziele der Bundesregierung im 6. Energieforschungsprogramm. Die sieben Forschungsnetzwerke Energie sind somit ein wichtiges Instrument der Energieforschungspolitik des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi). Sie tragen maßgeblich dazu bei, alle wesentlichen Akteure eines Themenschwerpunkts der Energieforschung zu vernetzen und an Strategieprozessen zu beteiligen. Dazu erarbeiten die Mitglieder der Forschungsnetzwerke Expertenempfehlungen zum künftigen Forschungsbedarf sowie zu möglichen Förderschwerpunkten und -formaten.

Im Dezember 2016 hat das BMWi als federführendes Ministerium für die Energiewende den Konsultationsprozess für ein neues Energieforschungsprogramm gestartet. Dieser Prozess bindet alle relevanten Akteure der Energieforschung und -wirtschaft frühzeitig in die Diskussion zur Weiterentwicklung der Energieforschungsförderpolitik ein und soll bis Ende 2017 abgeschlossen werden. Die Mitglieder des Forschungsnetzwerks Erneuerbare Energien haben konkrete Expertenempfehlungen für den Konsultationsprozess zum 7. Energieforschungsprogramm erarbeitet, die in dieser Broschüre vorgestellt werden.

Themen des Forschungsnetzwerks – Bereich Photovoltaik

Mit fünf Photovoltaik-Arbeitsgruppen werden sämtliche Ansätze adressiert, um einerseits die Einbindung der Photovoltaik in die Energiesysteme weiter zu verbessern und andererseits die Stromgestehungskosten von Photovoltaik weiter zu reduzieren: Eine hohe Qualität und ein hoher Wirkungsgrad der Wafer und Module, eine lange Lebensdauer, niedrige

Herstellungs- und Materialkosten sowie flexible Systemarchitekturen. Es werden sowohl erfolgreiche Konzepte weiterentwickelt als auch neue Ansätze untersucht. Konkret handelt es sich um die folgenden Themenfelder:

- AG 1** – Kristallines Silizium – weiterentwickelte Hochleistungsmodule
- AG 2** – Kristallines Silizium – neue Ansätze für Hochleistungsmodule
- AG 3** – Alternative Konzepte und Materialien
- AG 4** – PV-Systeme und -Komponenten
- AG 5** – Ökonomie, Metrologie/Charakterisierung

Um den größtmöglichen Input zu erhalten, sind die Gruppen untereinander vernetzt, sei es in Form von personeller Überlappung oder gegenseitiger Unterstützung konkreter Fragestellungen. Insbesondere Themen wie optimierte PV-Systeme bzw. die innerhalb der gesamten Wertschöpfungskette benötigte Messtechnik spielen in die jeweils anderen Themen hinein.

Gründung und Entwicklung des Forschungsnetzwerks

Die Gründung des Netzwerks Erneuerbare Energien fand am 6. April 2016 im Beisein von 150 Vertretern aus Wirtschaft, Wissenschaft und Politik im Bundesministerium für Wirtschaft und Energie in Berlin statt. Mit den Themen Windenergie und Photovoltaik sind in dem Netzwerk zunächst die Technologien vertreten, die innerhalb Deutschlands den größten Anteil an Strom aus erneuerbaren Energiequellen liefern. Parallel zur Gründung wurde ein gemeinsames Intranet freigeschaltet, als Arbeitsgrundlage für den Ideenaustausch sowie die Organisation einer geeigneten Struktur. Mittlerweile sind 285 Experten für

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Impressum

Herausgeber
Projektträger Jülich (PtJ)
Forschungszentrum Jülich GmbH
52425 Jülich

Redaktion und verantwortlich für den Inhalt
Forschungsnetzwerk Erneuerbare Energien,
Einleitung: Projektträger Jülich (PtJ)

Gestaltung und Produktion
Projektträger Jülich (PtJ)
Forschungszentrum Jülich GmbH
52425 Jülich

Stand
Oktober 2017

den Themenbereich Photovoltaik registriert. Diese Zahlen machen das Wissens- und Erfahrungspotential deutlich, das in das Netzwerk eingebracht wird. Die in einem Abstimmungsprozess mit allen Teilnehmern definierten Arbeitsgruppen trafen sich zunächst im November 2016 beim Projektträger in Jülich. Hier wurden für jede Arbeitsgruppe jeweils zwei Mentorinnen bzw. Mentoren gewählt, die die Gruppen moderieren und weitere Treffen organisieren. Zudem wurden für die jeweiligen Bereiche Ideen zu relevanten Forschungsthemen gesammelt. Eine erste Vollversammlung für den Bereich Photovoltaik folgte im Februar 2017 im Umweltforum Berlin auf Einladung des BMWi. Rund 120 Teilnehmende aus Industrie, Forschung und Politik diskutierten aktuelle technologische Entwicklungen, den künftigen Forschungsbedarf und gaben Anregungen für eine programmatische Neuausrichtung der anwendungsorientierten Forschungspolitik.

Die Geschäftsstelle der Forschungsnetzwerke Energie beim Projektträger Jülich ist Ansprechpartner für alle aktiven oder weiteren interessierten Akteure. Für das Netzwerk Erneuerbare Energien stellt der PtJ-Geschäftsbereich „Energiesystem: Erneuerbare Energien/Kraftwerkstechnik“ (ESE) darüber hinaus Koordinatoren als Ansprechpartner für fachliche Fragen zur Verfügung.

Expertenempfehlungen für den Konsultationsprozess

Durch das erste Arbeitsgruppentreffen in Jülich ist zunächst eine Themenübersicht für die einzelnen Bereiche entstanden. Die Mentoren haben hieraus für ihre jeweilige Arbeitsgruppe Entwürfe für vier Themenblätter verfasst, die möglichst den gesamten Förderbedarf abdecken. Diese Themenblätter sind

im Netzwerk von den Mitgliedern intensiv diskutiert und weiterbearbeitet worden. Auf der Vollversammlung im Februar 2017 in Berlin sind die Themenblätter vorgestellt, beraten und verabschiedet worden, sodass die Mentoren im Anschluss die Endversionen erstellen konnten um sie auf der Netzwerkplattform zu veröffentlichen.

Jede Arbeitsgruppe hat konkrete Forschungsziele erarbeitet, die zusammen genommen das hohe Entwicklungspotential der Photovoltaik umsetzen sollen. Unterteilt in Motivation, Forschungsinhalte, erwartete Ergebnisse sowie eine Beschreibung der dafür benötigten Art von Forschung sind die einzelnen Themen übersichtlich strukturiert und gut nachzuvollziehen. Kurze Einleitungen führen in die jeweiligen Themen ein. Die Expertinnen und Experten des Netzwerks möchten ihre in Form der Empfehlungen abgegebene Expertise gerne als Impuls für die weitere Forschungsförderung zur Verfügung stellen.

INHALT

AG 1	
KRISTALLINES SILIZIUM – WEITERENTWICKELTE HOCHLEISTUNGSMODULE	2
AG 2	
KRISTALLINES SILIZIUM – NEUE ANSÄTZE FÜR HOCHLEISTUNGSMODULE	8
AG 3	
ALTERNATIVE KONZEPTE UND MATERIALIEN	14
AG 4	
PV-SYSTEME UND -KOMPONENTEN	20
AG 5	
ÖKONOMIE, METROLOGIE / CHARAKTERISIERUNG	26

AG 1 C-SI – WEITERENTWICKELTE HOCHLEISTUNGSMODULE

Die kumulierte weltweit installierte Leistung von Photovoltaik-Modulen (PV-Modulen) hat zum Ende des Jahres 2016 einen Wert von 308 Gigawatt peak erreicht (ITRPV 2017). Als dominierendes absorbierendes Halbleitermaterial mit einem Marktanteil von über 90 Prozent kommt hochreines kristallines Silizium (c-Si) zum Einsatz.

Der Herstellungsprozess beinhaltet die Reduktion von Quarzsand mittels Kohle zu metallurgischem Silizium. Dieses reagiert mit Chlorwasserstoff zu sogenannten Chlorsilanen, deren niedriger Siedepunkt eine sehr effiziente Aufreinigung durch fraktionierte Destillation erlaubt und deren Abscheidung bei hohen Temperaturen hochreines Silizium ergibt.

Es haben sich zwei Kristallisationsmethoden in der Photovoltaik etabliert, die dieses hochreine Silizium produktiv defektarm rekristallisieren und dabei eine Basisdotierung hervorrufen. Bei beiden Verfahren wird Silizium in Tiegeln aufgeschmolzen. Beim sogenannten Czochralski-Verfahren entstehen großvolumige Einkristalle. Hierfür wird ein runder mit Siliziumschmelze gefüllter Quarztiegel verwendet, in den ein Saatkristall getaucht und unter Drehung herausgezogen wird. Beim VGF-Verfahren (Vertical Gradient Freeze) wird ein quaderförmiger Graphit-Tiegel mit hochreinem Silizium beladen und erhitzt, so dass das Silizium dann aufgeschmolzen und kontrolliert rekristallisiert wird. Als Dotierstoffe können in beiden Fällen Elemente der dritten oder fünften Hauptgruppe des Periodensystems der Schmelze beigegeben werden. Dies ergibt p- bzw. n-leitendes Silizium.

Nach der Kristallisation im VGF-Verfahren wird das Material erst in Quader mit einer Kantenlänge der Grundfläche von heute üblicherweise ca. 156 Millimetern geteilt. Im Anschluss wird es mittels eines dünnen Drahtes in dünne Scheiben (Wafer) mit einer Dicke von ca. 0,2 Millimeter gesägt.

Die hergestellten Scheiben werden in Solarzellen weiterprozessiert. Die am häufigsten verwendete Solarzellenstruktur weist dabei einen bordotierten Wafer, einen phosphordotierten Emitter mit einer Antireflexbeschichtung an der Vorderseite der Siliziumscheibe sowie eine Rückseite aus Aluminium auf. Diese Struktur wird zunehmend durch einen Ansatz ersetzt, bei dem die Rückseite noch durch ein Dielektrikum passiviert wird, das nur lokal für die Kontaktierung geöffnet ist. Weitere industriell verwendete Solarzellenstrukturen sind die interdigitale Rückkontaktsolarzelle sowie die Solarzelle mit einem Heteroübergang basierend auf einer Schicht aus amorphem Silizium, beides auf n-typ-Silizium. Die hergestellten Solarzellen werden dann mittels einer Stromspannungsmessung bei definierten Licht- und Temperaturbedingungen charakterisiert.

Die Solarzellen werden anschließend zu Strings und Arrays verlötet und durch die Lamination von transparenten Medien wie Glas und Kunststofffolien eingekapselt. Abschließend werden für die Module Leistungsmessungen unter unterschiedlichen Bestrahlungsstärken durchgeführt sowie eine Anschlussdose und üblicherweise ein Befestigungsrahmen montiert. Vor der Produkteinführung werden einzelne Module detailliert hinsichtlich ihrer Stabilität gegen Umwelteinflüsse untersucht.

THEMEN | AG 1:

- AG 1 – 1. Material/Kristallisation/Wafer
- AG 1 – 2. Steigerung des Energieertrages von oberflächenpassivierten Solarzellen und Kostensenkung
- AG 1 – 3. Modultechnologien für reduzierte Stromgestehungskosten
- AG 1 – 4. Neue Simulations- und Charakterisierungsmethoden für c-Si-Wafer, -Zellen und -Module

Mentoren AG 1: Dr. Ralf Preu und Dr. Holger Neuhaus

AG 1 – 1. Material/Kristallisation/Wafer

Die Forschung im Bereich der Siliziumscheiben ist durch die zu erreichenden Solarzellen-Wirkungsgrade und Kosteneinsparungen bestimmt. Entscheidend für einen höheren Wirkungsgrad sind die Verbesserungen der Kristallqualität bspw. durch diffusionssperrende Beschichtungen der Tiegel. Durch niedrige Versetzungsdichten und Konzentrationen von Verunreinigungen konnte die Diffusionslänge der Ladungsträger im Silizium bereits signifikant erhöht werden, durch zunehmend größere Chargen konnten die Material- und Energiekosten gesenkt werden. Beim Sägen der Wafer hält das Diamantdrahtsäge die Schädigung der Oberflächen klein, führt zu hohen Ausbeuten sowie zu einer hohen Produktivität der Prozesse und Anlagen und senkt die Kosten für Verbrauchsstoffe.

■ MOTIVATION

Kosten von mc- und Cz-Siliziumwafern sowie verwandten Verfahren sollen weiter gesenkt und deren Qualität gesteigert werden. Ein besonderes Augenmerk liegt auf der Verbesserung der Ladungsträgerlebensdauer und deren Degradation, um die genannten Wafertypen in hocheffizienten oberflächenpassivierten Solarzellen einsetzen zu können. Dies schließt explizit PERC, PERT und Zellstrukturen mit passivierten Kontakten (z. B. Tunneloxid, polykristallines, amorphes Silizium und transparente leitende Oxide) ein. Die Kosten sollen durch die Einsparung von Siliziumrohstoff, neue Verbrauchsmaterialien und schnellere, energie- sowie kosteneffizientere Technologien, Aufbauten und Rezepte gesenkt werden. Verbesserungen der Waferqualität werden bei der Kristallisation, dem Quadrieren und der Waferherstellung betrachtet.

■ FORSCHUNGSINHALTE

Der Durchsatz bei mc- und Cz-Kristallisation und beim Sägen soll erhöht werden. Ebenfalls relevant ist die Verbesserung der Eigenschaften hochreinen Siliziummaterials. Es werden Wafer mit einem Verhältnis der Diffusionslänge der (Minoritäts-) Ladungsträger zur Zeldicke von mindestens 5 bei geeignetem Widerstand

benötigt, z. B. durch die Reduzierung der Sauerstoffkonzentration (Cz) oder von Versetzungen (mc). Dies ist relevant für hocheffiziente oberflächenpassivierte Solarzellen. Weitere Themen sind der Materialverbrauch und Personaleinsatz beim Quadrieren sowie die Reduktion der Kosten von Verbrauchsmaterialien bei der Kristallisation und beim Wafering, etwa durch kostengünstige, hochqualitative Kokillen, Nachchargierung in der Kristallisation und Continuous Pulling, kostengünstige Sägeflüssigkeit oder neuentwickelte Diamant- und strukturierte Drähte. Zudem soll der Sägeverlust in der herkömmlichen Waferherstellung reduziert werden. Weiterhin geht es um die Entwicklung kosteneffizienter Sägeverfahren mit dünnen Diamant- und strukturierten Drähten (und deren Entwicklung hin zu höheren Standfestigkeiten) sowie nachgelagerte Reinigungsverfahren. Das Waferformat soll über 157 mm hinaus gesteigert, die Waferdicke reduziert werden (übergreifendes Thema hierbei ist die Energieeinsparung bei Kristallisation und Wafering).

■ ERGEBNISSE

Das Ziel der Forschungsaktivitäten ist ein erhöhter Durchsatz und die unmittelbare Senkung der Kosten für die Kristallisation und das Wafering von mc- und Cz-Silizium. In den nächsten fünf Jahren soll hierfür die Ladungsträgerlebensdauer dieser Wafer stabile Wirkungsgrade von mehr als 23 Prozent im industriellen Umfeld mit oberflächenpassivierten Solarzellen ermöglichen. Weiterhin sollen Sägetechnologien entwickelt werden, die durch eine geeignete Reduzierung des Sägeverlustes und der Waferdicke in Verbindung mit einer Vergrößerung der Waferoberfläche (Waferformat) den Einsatz an Silizium und Energie pro erbrachte Leistung in Watt halbieren. Die Kosten für n-Typ-Wafer sollen sich an die Kosten für p-Typ-Wafer angleichen, um den Übergang zu Konzepten mit höheren Wirkungsgraden zu erleichtern.

■ ART DER FORSCHUNG

Industriennahe Forschung mit schneller Umsetzung in der Massenfertigung, bevorzugt Verbundprojekte zwischen Material- und Anlagenherstellern sowie Forschungseinrichtungen und Universitäten.

AG 1 – 2. Steigerung des Energieertrags von oberflächenpassivierten Solarzellen und Kostensenkung

Im Bereich der Forschung industrienahe Solarzellen stehen oberflächenpassivierte Solarzellen seit mehr als 20 Jahren im Vordergrund. Aufgrund der abnehmenden Dicke der Siliziumscheiben und der verbesserten Materialqualität ist die Reduktion der Verluste an den Oberflächen der Solarzellen ein zunehmend wichtiges Thema, wenn es darum geht, die Wirkungsgrade weiter zu erhöhen. Durch oberflächenpassivierende Beschichtungen mit lokaler Kontaktierung konnten industriell hergestellte Solarzellen in den vergangenen Jahren in Sachen Wirkungsgrad deutlich verbessert werden. Deutschland nimmt hierbei mit den an Forschungseinrichtungen erarbeiteten Grundlagen sowie dem Transfer in die Industrie durch Produzenten von Solarzellen und Produktionsanlagen eine Führungsrolle ein.

■ MOTIVATION

Neben der unmittelbaren Steigerung des Wirkungsgrades der Solarzelle ist die Steigerung des Energieertrages von PV-Modulen ein zentraler Hebel für die zukünftige Senkung der PV-Stromgestehungskosten (LCOE). Dies soll insbesondere durch passivierte Solarzellen realisiert werden. Darüber hinaus können durch neue und verbesserte Fertigungsverfahren Rohstoffe und Produktionskosten eingespart werden.

■ FORSCHUNGSINHALTE

Für die Entwicklung der angestrebten Modulwirkungsgrade müssen oberflächenpassivierte Solarzellen mit einem Vorderseitenwirkungsgrad von über 23 Prozent und für bifaziale Solarzellen mit einem Rückseitenwirkungsgrad von über 21 Prozent entwickelt werden. Hierfür bietet sich zum einen die kontinuierliche Optimierung der bestehenden Prozesstechnologie an, wie z. B. die Weiterentwicklung der Kontakte, der Oberflächenpassivierung und der Emittertechnologie. Alternativ können Upgrade-fähige neue Prozesstechnologien für die Integration in den Zellprozess evaluiert werden, wie z. B. neue Metallisierungskonzepte oder Texturverfahren für diamantdrahtgesägte mc-Si-Wafer. Weitere Themen sind die Entwicklung innovativer Prozesstechnologien, welche im Vergleich zum Stand der Technik (z. B. Rohrofen diffusion, PECVD-Abscheidungen, Siebdruck) höhere Durchsätze und Wirkungsgrade sowie reduzierte Materialkosten ermöglichen, sowie die Entwicklung neuartiger Materialien zur effektiveren Nutzung bzw.

Substitution der kostentreibenden Materialien wie Silber. Neben der Anlagenkonzept-spezifischen Optimierung der Schichtabscheidung (u. a. hinsichtlich elektrischer Eigenschaften der passivierten Kontakte, Anlagendurchsatz, Schichthomogenität) besteht die größte Herausforderung derzeit in der Integration der passivierten Kontakte in industrietypische Solarzellen-Herstellungsprozesse. Neben einer eleganten Prozesssequenz sind die zu entwickelnden Einzelaspekte u. a. die kostengünstige und stabile chemische Vorbehandlung der Wafer (Textur, Reinigung, Funktionalisierung), die Integration der Kontaktformierung in ohnehin notwendige Hochtemperaturprozesse und die Metallisierung der passivierten Kontakte.

■ ERGEBNISSE

In den nächsten fünf Jahren soll der Wirkungsgrad oberflächenpassivierter Solarzellen von heute 20 bis 22 Prozent auf 23 bis 24 Prozent, mit passivierten Kontakten auch darüber gesteigert werden. Zudem können diese Solarzellen beidseitig lichtempfindlich sein mit einer Bifazialität von bis zu 90 Prozent. Unter typischen Aufstellbedingungen von Solarkraftwerken in Deutschland (10 Prozent zusätzlicher Lichteinfall von der Rückseite) soll somit der Energieertrag um über 20 Prozent gesteigert werden.

Ziel der Forschungsaktivitäten ist weiterhin die Entwicklung von Prozessverfahren und -materialien, welche im Vergleich zum Stand der Technik eine Durchsatzsteigerung und Materialkosten- bzw. allgemein Stückkostenreduktion um mindestens den Faktor 2 erlauben.

■ ART DER FORSCHUNG

Die für die genannten Ergebnisse notwendigen Forschungsarbeiten sind im Bereich der angewandten Forschung bis hin zu Pilotprojekten angesiedelt. Die aufgeführten Technologien sind bereits vorentwickelt, wodurch die Hauptaufgabe darin besteht, die Technologien bis zur Produktionsreife weiterzuentwickeln sowie deren Kosteneffizienz und Energieertragspotenzial nachzuweisen.

AG 1 – 3. Modultechnologien für reduzierte Strom- gestehungskosten

Die Forschung im Bereich der Photovoltaik-Module basiert ganz wesentlich darauf, den Energieertrag zu erhöhen. Wesentliche Voraussetzungen hierfür sind der Einsatz hocheffizienter Solarzellen und ein großer aktiver Flächenanteil im Modul. Dieser hohe Flächenanteil wird insbesondere durch weniger abgeschattete Bereiche bei neuen Zellverbindungskonzepten, weniger Zellzwischenräume und Randbereiche, den Einsatz lichtleitender Elemente oder Bifazialität erreicht. Aufgrund der langen erforderlichen Lebensdauer von PV-Modulen unter unterschiedlichen Einsatzbedingungen kommt zudem der Analyse von Degradationsmechanismen auf verschiedenen Zeitskalen eine wesentliche und wachsende Bedeutung in der aktuellen Forschung zu.

■ MOTIVATION

Die Steigerung des Energieertrags von PV-Modulen ist ein zentraler Hebel für die zukünftige Senkung der PV-Stromgestehungskosten (LCOE). Die Herstellungskosten des Moduls zu senken bietet dahingegen nur ein limitiertes Potenzial für niedrigere Stromgestehungskosten, da die BOS-Kosten (z. B. Aufständigung, Inverter) einen vergleichsweise hohen Anteil einnehmen. Heutzutage beträgt der Wirkungsgrad von Modulen aus oberflächenpassivierten Solarzellen 18 bis 19 Prozent und die Module sind in der Regel monofazial, entsprechend einer Leistungsdichte von 180–190 W/m² unter Standardtestbedingungen. Im Rahmen der PV-Forschungsförderung der nächsten sechs Jahre soll der Wirkungsgrad dieser Module auf über 22 Prozent gesteigert werden. Zudem sollen die Module teilweise beidseitig lichtempfindlich sein, mit einer Bifazialität von 90 Prozent. Unter typischen Aufstellbedingungen von Solarkraftwerken in Deutschland (10 Prozent zusätzlicher Lichteinfall von der Rückseite) könnte somit die Leistungsdichte auf bis zu 240 W/m² und der Energieertrag der Module um über 20 Prozent gesteigert werden.

■ FORSCHUNGSINHALTE

Es ist eine Weiterentwicklung einer Modultechnologie erforderlich, die hohe Cell-to-Module Leistungs- und Effizienzkoeffizienten aufweist und auch bifaziale Anwendungen ermöglichen soll. Vielversprechende Ansätze hierzu sind neue Verschaltungskonzepte, z. B. Multi-Busbar/Wire- oder Schindelansätze, Lichtlenkstrukturen zur Erhöhung der Lichtausbeute im Modul, sowie Ansätze zur Reduzierung der Modultemperatur.

Weitere Themen sind Modultechnologien für silber-reduzierte Zellkontakte, dünnere Wafer und ökologisch unbedenkliche Produkte, geringe Degradation, verbesserte Zuverlässigkeit und damit höhere spezifische Jahresenergieerträge für die neuen Technologien.

■ ERGEBNISSE

In den nächsten sechs Jahren soll der Wirkungsgrad der Module von heute 18 bis 19 Prozent auf über 22 Prozent gesteigert werden. Dabei können die Module mit oberflächenpassivierten Solarzellen beidseitig lichtempfindlich sein mit einer möglichst hohen Bifazialität. Unter typischen Aufstellbedingungen von Solarkraftwerken in Deutschland (10 Prozent zusätzlicher Lichteinfall von der Rückseite) kann somit die Leistungsdichte auf 240 W/m² gesteigert werden. Für eine weitergehende Reduktion der Stromgestehungskosten soll zum einen die Zuverlässigkeit der Module eine Lebensdauer von 30 Jahren ermöglichen, auch in sonnenreichen Klimata. Zum anderen sollen das Performance Ratio, d. h. das Verhältnis aus Jahresertrag und nominalem Ertrag, erhöht und die Herstellungskosten signifikant reduziert werden.

■ ART DER FORSCHUNG

Die dafür notwendigen Forschungsarbeiten sind im Bereich der angewandten Forschung bis hin zu Pilotprojekten angesiedelt. Die aufgeführten Technologien sind bereits vorentwickelt und die Hauptaufgaben bestehen darin, die Technologien bis zur Produktionsreife weiterzuentwickeln sowie deren Kosteneffizienz und Energieertragspotenzial nachzuweisen. Es sind insbesondere Verbundprojekte zwischen Anlagenherstellern und PV-Modul-Industrie sowie Instituten und Universitäten anzustreben.

AG 1 – 4. Neue Simulations- und Charakterisierungsmethoden für c-Si-Wafer, -Zellen und -Module

Der bisherige Fortschritt der c-Si-PV-Technologie wurde von der Entwicklung neuer Mess- und Simulationstechniken begleitet und ermöglicht. Beispiele dafür waren neue Lebensdauerermessmethoden wie „quasi-steady-state photo conductance“ (QSSPC) oder Photolumineszenz (PL) sowie abbildende Diagnostiktechniken wie z. B. Elektrolumineszenz (EL), Infrarot-Spektroskopie (IR) oder Photolumineszenz (PL) für Zellen und Module. Die zukünftig neu zu entwickelnden Messtechniken sollten möglichst kostengünstig und inline-fähig sein, sollen spezifische Fragen neuer PV-Technologien beantworten und könnten auch rückkoppelnd in den Herstellungsprozess eingreifen. Des Weiteren müssen aufgrund der

immer besser werdenden Zellen spezielle Methoden entwickelt werden, um Materialeigenschaften (Degradation, Materiallimitierungen) oder lokale Struktureigenschaften (u. a. Kontakte, lokale Dotierung) detailliert untersuchen zu können.

■ MOTIVATION

Mit weitergehenden neuen Charakterisierungstechniken kann der Fortschritt beschleunigt werden: Die Qualität der produzierten Produkte wird effektiv gesteigert und die Herstellkosten werden sowohl durch vermiedenen Ausschuss als auch durch eine verringerte Halbwertsbreite der Leistungsverteilung reduziert. Dies ist vor dem Hintergrund steigender Wirkungsgrade und immer aufwendiger und empfindlicher werdender Herstellungsprozesse von wachsender Bedeutung. Neue Zell- und Modultechnologien (z. B. Bifazialzellen, Tandemzellen auf c-Si-Basis) bringen neue Charakterisierungs- und Standardisierungsbedarfe mit sich. Die Entwicklung von kommerzieller Messtechnik für die PV ist eine Stärke kleinerer und mittlerer Unternehmen, die mit solcher Forschung zu neuen Produkten kommen. Der Anlagenbau könnte mittels vorausplanender Simulation und rückkoppelnder in-situ-Charakterisierung hochproduktive Maschinen für hochwertigere Produkte erzeugen.

■ FORSCHUNGSINHALTE

Qualitäts- und Prozesskontrolle entlang der Wertschöpfungskette, Hochdurchsatz- und Inline-Messverfahren sowie die Prozessierung mittels rückkoppelnder In-situ-Messverfahren, hochauflösende Offline-Messverfahren für die Identifikation von Verlustursachen, optische Modellierung auf allen Längenskalen, Modellierung von Schichtwachstumsprozessen und Simulation neuer Halbleiterprozesse, zeiteffiziente Transportsimulationen, Inline-Effizienzvorhersage an Wafern und Zellen, Inline-Monitoring von Produktionsprozessen wie z. B. dem Sägen von Wafern, Standardisierung von Messverfahren für neue Zellen (z. B. Bifazialzellen), Ertragsanalyse von Modulen, Analyse und Verständnis von Degradationsmechanismen mit neuen Methoden z. B. der Mikrocharakterisierung, Lebensdauermonitoring und -modellierung. Eine starke Wechselwirkung zwischen schneller Messung und schnellem Modellieren der Messergebnisse erhöht die Aussagekraft der Messungen, maximiert die Größe der Stichproben und ermöglicht rückkoppelnde Veränderungen des Herstellungsprozesses.

■ ERGEBNISSE

Neue Mess- und Simulationstechniken für beschleunigten Fortschritt, verbesserte Produktqualität und verringerte Herstellkosten. Kombination inlinefähiger und rückkoppelnder In-situ-Messtechnik, Methodik zur lokalen Analyse von Verlusten und schnellem Modellieren der physikalischen Prozesse. Außerdem Kombination mit schnellem Modellieren der physikalischen Prozesse für neuartige Solarzellenstrukturen und Modulkonzepte.

■ ART DER FORSCHUNG

Je nach Technologie kann das Spektrum von Grundlagenforschung über angewandte Forschung bis hin zur Pilotierung reichen.



AG 2 C-SI – NEUE ANSÄTZE FÜR HOCHLEISTUNGSMODULE

Ein drastisch erhöhter Stromertrag bei gleicher Fläche, Stromgestehungskosten im Wenige-Cent-Bereich und die gesellschaftlich akzeptierte Erschließung neuer Flächen sind realistische Ziele für die regenerative Energieversorgung von morgen. Siliziumphotovoltaik (Si-PV), heute schon die weltweit dominierende Photovoltaiktechnologie, wird auf das nächste Level gehoben und verbessert die Energiegestehungskosten um Faktoren.

Heute kostet Photovoltaikstrom sechs bis zwölf Eurocent pro Kilowattstunde in Deutschland und drei bis sechs Eurocent pro Kilowattstunde in sonnenreichen Ländern. Der schnell weltweit wachsende Bedarf an regenerativ erzeugter Energie wird auch weiterhin die kosteneffiziente, siliziumbasierte Technologie nutzen wollen. Weitere große Schritte bei der Effizienzsteigerung und Kostensenkung sind möglich und können der europäischen PV-Industrie einen technologischen Vorsprung im internationalen Wettbewerb bringen. Diese Chance bieten insbesondere disruptive Technologieweiterentwicklungen.

Hierzu zählen neue Fertigungsverfahren für Si-Wafer mit stark reduziertem Materialverbrauch. Dabei steht neben den Fertigungsverfahren (bspw. Epitaxie oder bandgezogene Wafer) auch die Materialgüte im Fokus. Noch effizientere Zelltechnologien, welche die hochproduktive Prozessierung der Si-Wafer erlauben, werden verstärkt im Entwicklungsfokus stehen. Neben der Erhöhung des Wirkungsgrades ist die Reduktion des Herstellungsaufwands eine Leitlinie der zukünftigen Entwicklungen. Dies schließt die Erforschung beidseitig passivierender Kontaktschemata und Siliziumtandemsolarzellen ein, welche das Sonnenspektrum besser ausnutzen können. Alle neuen Wafer- und Zelltechnologien bedürfen einer angepassten Modultechnologie, welche mit den neuen Materialien und Zellkontakten kompatibel sein muss. Neue Verbindungstechniken, die mögliche kostensparende Integration von Zusatzfunktionen, eine erhöhte Lebensdauer der Module, aber auch anwendungsangepasste Module (bspw. BIPV, Agro-PV, VIPV) können die Kosten weiter senken und neue Märkte erschließen.

In den Bereichen Energiewirtschaft, Materialherstellung, Anlagenbau und Zellherstellung erhält die deutsche Industrie durch angewandten Spitzenforschung ihre international anerkannte Innovationskraft. Mit Innovationen haben neue Firmen die Chance für einen erfolgreichen Eintritt in einen wachsenden weltweiten PV-Markt.

AG 2 – 1. Kristalline Siliziumwafer ohne Sägeverluste

Die Siliziumwafer machen weiterhin einen wesentlichen Teil von derzeit etwa 35 Prozent der Modulkosten aus. Die konventionelle Waferherstellung enthält die Prozessschritte Abscheidung von polykristallinem Silizium, Kristallisation und Sägen. Eine direkte Herstellung von neuen Siliziumwafern aus der Gasphase (Epitaxie) oder aus der flüssigen Phase (Bänder) kann diese Herstellungskette kürzen.

■ MOTIVATION

Für konkurrenzfähige Siliziumphotovoltaik in Europa und eine erfolgreiche weltweite Energiewende ist es notwendig, Kostensenkungspotenziale entlang der gesamten Wertschöpfungskette zu heben. Für europäische Akteure in der PV ist es dabei insbesondere notwendig, sich mit Innovation von den internationalen Konkurrenten abzuheben. Kristalline Si-Wafer ohne Sägeverluste bergen ein großes Marktpotenzial für neue und alte europäische Anlagen- und Waferhersteller, weil diese Wafer je nach Prozess auch ohne Anpassung des Zellprozesses von Zellherstellern verwendet werden können. Es sind bessere Waferqualitäten als mit bisherigen Wafern möglich, weil die BO-Degradation vermieden werden kann und die Wafer einkristallin sein können. Durch das Vermeiden des Sägeverlustes verkürzt sich außerdem die Prozesskette und der Materialverbrauch kann reduziert werden. Es können dünnere Wafer als bisher hergestellt werden. Die Waferkosten können bis auf die Hälfte reduziert werden. Die Energierücklaufzeit von neuen c-Si-Modulen aus Wafern ohne Sägeverlust wird verkürzt. Die Entwicklung von Wafern ohne Sägeverluste kann somit einen wichtigen Beitrag zur Kostenreduktion der Energiewende leisten und zugleich die heimische Industrie stärken.

THEMEN | AG 2

AG 2 – 1. Kristalline Siliziumwafer ohne Sägeverluste

AG 2 – 2. Solarzellenprozesse mit neuen passivierenden Kontakten für beide Polaritäten

AG 2 – 3. Siliziumbasierte Tandemsolarzellen

AG 2 – 4. Neue c-Si-Modultechnologien für neue c-Si-Solarzellen und Anwendungen

Mentoren AG 2: Prof. Dr. Rolf Brendel und Kristin Lüdemann

■ FORSCHUNGSINHALTE

Es sind Prozesse und Anlagen für hohe Durchsätze (z. B. für Epitaxie oder direkte Kristallisation) zu entwickeln. Die mechanischen und elektrischen Eigenschaften der Wafer müssen qualifiziert werden, um Rückschlüsse auf den Porosifikations- und Epitaxie-Prozess ziehen zu können. Die Prozessausbeute und deren bestimmende Größen werden ermittelt. Neben Hochdurchsatzanlagen für die Kernprozesse Porosifikation und Si-Epitaxie werden auch Prototypanlagen für die neuen Prozesse, wie z. B. Flächendefinition und Ablösung, für das Waferhandling oder die dazugehörigen Reinigungsverfahren entwickelt. Prozessstabilität, Maschinenverfügbarkeit, der Einsatz von Rohstoffen und Verbrauchsmitteln werden optimiert. Die Integration von pn-Übergängen und Dotierprofilen im Epitaxie-Prozess kann die Prozesskosten im Zellbereich zusätzlich reduzieren und muss untersucht werden. Die Wafer sollen für die zum jeweiligen Zeitpunkt konventionellen Zellprozesse ebenso wie für neue Zelltechnologien eingesetzt werden können und werden in diesem Zusammenhang technologisch qualifiziert. Je nach Technologiereifegrad ist auch eine Pilotierung der neuen Prozesse notwendig.

■ ERGEBNISSE

Das Ziel der Forschungsaktivitäten ist die Entwicklung von stabilen Prozessketten und Anlagen für Wafer ohne Sägeverlust, die einen gegenüber heute wenigstens halbierten Siliziumverbrauch zeigen und Ladungsträgerlebensdauern von mehr als einer Millisekunde aufweisen. Ein Ergebnis wird auch die erfolgreiche technologische Qualifizierung und Eignungsprüfung der Wafer für die anschließende Zell- und Modulprozessierung sein. Zeitskala: stabile Prozesse nach zwei bis vier Jahren, Anlagen mit hohem Durchsatz nach drei bis fünf Jahren. Demonstration der Vorteile gegenüber dem Standard in der Pilotierung nach vier bis acht Jahren.

■ ART DER FORSCHUNG

Je nach Technologie handelt es sich um Grundlagenforschung, angewandte Forschung oder Demonstration und Pilotierung.

AG 2 – 2. Solarzellenprozesse mit neuen passivierenden Kontakten für beide Polaritäten

Heute dominieren diffundierte Kontakte die Silizium-Photovoltaik. Statt Dotierstoffe in den c-Siliziumwafer einzubringen, können neue passivierende Schichtsysteme auf die Solarzelle aufgebracht werden, welche die Rekombination um Größenordnungen reduzieren und nur eine Ladungsträgersorte passieren lassen. Mit solchen passivierenden Kontakten werden höhere Wirkungsgrade erreicht als mit diffundierten Kontakten. Es gibt eine große Zahl von Materialsystemen für passivierende Kontakte. Herausragende Ergebnisse wurden bisher außer mit amorphem Silizium (a-Si:H) mit polykristallinem Silizium erreicht. Zu nennen sind hier etwa „POLO“, kurz für „poly-Si on oxide“ sowie „TopCon“, kurz für „tunnel oxide passivated contact“. Auch neue Ansätze wie Übergangsmetalloxide zeigen spannende Entwicklungspotenziale. Von den a-Si:H-basierten Kontaktsystemen abgesehen gibt es bisher zu wenig Solarzellentwicklung mit passivierenden Kontakten für beide Polaritäten. Die Anwendung von passivierenden Kontakten für beide Polaritäten erfordert einen vom heutigen Standard deutlich verschiedenen Prozessfluss, neue Prozesstechnologien und neue, vor allem hochproduktive Anlagenkonzepte.

■ MOTIVATION

Für europäische Akteure in der PV ist es notwendig, sich mit Innovation von den internationalen Konkurrenten abzuheben und über effizienzsteigernde technologische Weiterentwicklungen Kostensenkungspotenziale zu heben. Gleichzeitig sind Kostensenkungspotenziale durch Produktivitätssteigerung und Economy of Scale zu realisieren. Insbesondere der deutsche Anlagenbau ist nach der zu erwartenden Ausoptimierung der derzeitigen PERC-Mainstreamtechnologie weiter auf kontinuierliche Innovationen angewiesen. Die neuen passivierenden Kontakte bieten eine große Chance hierfür, weil mit neuen Schichtsystemen höhere Wirkungsgrade und stabile Zellen hergestellt werden können. Diese ermöglichen die Nutzung neuartiger, hochproduktiver Prozesstechnologien. Höhere Wirkungsgrade tragen zu

reduzierten Kosten und einem reduzierten Raumverbrauch bei und erleichtern so die Energiewende.

FORSCHUNGSINHALTE

- Abscheiden und Charakterisieren von neuen passivierenden Kontakten ggf. in „Building Blocks“
- Entwicklung von adäquaten, stabilen und kostengünstigen chemischen Vorbehandlungsschritten (Textur, Reinigung, Funktionalisierung der Oberflächen) sowie Metallisierungs- und Kontaktierungsverfahren
- Entwickeln kosteneffizienter und integrierter Gesamtzellprozesse für Solarzellen (156x156 mm²) mit passivierenden Kontakten beider Polaritäten (beidseitig kontaktierend oder Rückkontakt) und Wirkungsgraden über 25 Prozent
- Evaluation kostengünstiger Metallisierungskonzepte (inkl. TCO)
- Aufbau und Pflege von Referenzprozessen an Instituten
- Demonstration der Modulintegration
- Anlagenentwicklung mit vorindustriellen Demonstrationsanlagen zum Nachweis der allgemeinen Funktionsfähigkeit sowie von Stabilität und Reproduzierbarkeit
- Ermittlung von Prognosen zu Produktivitäts- und Kostenfragen
- Sicherung eines schonenden Umgangs mit Ressourcen

■ ERGEBNISSE

Die entwickelten, industrietauglichen Prozesse und Anlagen zur Herstellung von Zellen mit passivierenden Kontakten für beide Polaritäten sollen durch den deutschen Anlagenbau verwertet werden und europäische Modul- und Zellhersteller in ihrer Wettbewerbsposition stärken. Die Zeitskala hierfür beträgt vier bis acht Jahre.

■ ART DER FORSCHUNG

Je nach Reifegrad der Technologie reichen die Arbeiten vom Grundlagenbereich über angewandte Forschung bis zur Pilotierung. Im Fall von polykristallinem Silizium (poly-Si) als passivierender Kontakt handelt es sich um angewandte Forschung bis zur Pilotierung.

AG 2 – 3. Siliziumbasierte Tandemsolarzellen

Die Photovoltaik mit kristallinem Silizium ist nach Dekaden von Entwicklungsarbeit bereits heute zu einer kostengünstigen Stromquelle geworden. Eine weitere Reduktion der Kosten pro Zellfläche ist zwar möglich, doch der erreichbare Wirkungsgrad wird durch die Materialphysik auf 29,4 Prozent beschränkt. Höhere Wirkungsgrade über 35 Prozent sind dagegen mit Tandemsolarzellen möglich. Diese verwenden die kostengünstige kristalline Siliziumsolarzelle als untere Zelle, auf die eine zweite Zelle mit großer Bandlücke aufgebracht wird.

■ MOTIVATION

Durch eine Wirkungsgradsteigerung auf über 35 Prozent lassen sich die Stromgestehungskosten perspektivisch um ein Drittel senken. Dafür darf die eingesetzte Tandemtechnologie jedoch nur wenig Mehrkosten gegenüber der heutigen Siliziumtechnologie aufweisen. Um die bisherigen und die zukünftigen Kostenreduktionen beim kristallinen Silizium zu nutzen, ist es vorteilhaft, die untere Zelle aus Silizium herzustellen. Dies erleichtert die industrielle Umsetzung als „revolutionäre Upgradetechnologie“. Für die Material-, die Zell- und die Anlagenhersteller der europäischen PV-Industrie bieten Tandemsolarzellen auf Si-Basis eine Differenzierungsoption gegenüber dem Wettbewerb, die an die bisherigen Erfolge in der reinen Si-Technologie anknüpft. Die verwendeten neuen Materialien bieten auch neuen Akteuren Chancen für den Markteintritt in einen wachsenden PV-Weltmarkt.

■ FORSCHUNGSINHALTE

Für die Entwicklung der oberen Solarzelle mit hoher Bandlücke kommen verschiedene Technologien mit unterschiedlichen Reifegraden in Frage (III-V-Halbleiterfilme, Perowskitesolarzellen, andere Mischhalbleiter und nanostrukturierte Materialien), für die kostengünstige und Si-kompatible Abscheidemethoden und Prozesstechnologien entwickelt werden müssen. Vor allem hochproduktive Abscheideverfahren bieten großes Potenzial zukünftig kostengünstig Tandemsolarzellen zu produzieren. Deren technologische Eignung muss qualifiziert werden. Für die Integration der beiden Zellen in ein monolithisches Tandem müssen Verbindungsschichten (Tunnelkontakte, Rekombinationskontakte) sowie die dazu nötigen Prozessschritte (Kleben, direktes Wachstum) entwickelt werden. Schließlich muss die Siliziumzelle auf die Anforderungen im Tandem hin optimiert werden (Kontakt-schichten, optische Kopplung, Lichtfallenstrukturen).

■ ERGEBNISSE

In sechs Jahren sollten Si-Tandems mit III-V-Zellen im Labor einen stabilen Wirkungsgrad von 35 Prozent und mit Perowskitesolarzellen einen stabilen Wirkungsgrad von 30 Prozent erreichen. Konzepte für die Pilotierung von Tandemzellen sind entwickelt. Stabile Tandemzellen mit neuen Materialien wurden erfolgreich demonstriert. Anlagentechnische Lösungen zur kosteneffizienten, hochproduktiven Herstellung von Siliziumtandemsolarzellen sind entwickelt.

■ ART DER FORSCHUNG

Je nach Reifegrad der Technologie reichen die Arbeiten vom Grundlagenbereich über angewandte Forschung bis zur Pilotierung von Depositionskonzepten für die Topzelle.

AG 2 – 4. Neue c-Si-Modultechnologien für neue c-Si-Solarzellen und Anwendungen

Modultechnologie wird benötigt, um aus Solarzellen effiziente, sichere und langlebige Produkte herzustellen. Auch schaffen Zellverbindung, Einkapselung und Moduldesign Voraussetzungen für die Integration von Modulen, bspw. in Gebäudehüllen (BIPV, kurz für „Building Integrated Photovoltaics“). Neue Zelltechnologien, wie bifaziale Zellen, Rückkontaktzellen, Solarzellen mit neuen passivierenden Kontakten, sehr dünne Zellen oder auch Si-basierte Tandemsolarzellen können nur mit neuen Modultechniken ihre Vorteile ausspielen. Module können darüber hinaus neue Zusatzfunktionen übernehmen, bspw. integrierte Wechselrichter, Beleuchtung, Display oder Diagnostik.

■ MOTIVATION

Die Zuverlässigkeit von Modulen mit neuer Technologie muss eine Lebensdauer von 25–30 Jahren ermöglichen, als entscheidender Beitrag zur Senkung der Stromgestehungskosten. Schließlich ist Modultechnologie selbst ein signifikanter Kostenfaktor, Materialien und die Herstellung des PV-Moduls (ohne Zellen) machen etwa die Hälfte der Modulkosten aus.

Wenn bis 2050 fast 100 Prozent des deutschen Energiebedarfs mit regenerativen Energien gedeckt werden sollen, ist es notwendig, auch Sonderflächen wie z. B. Fassaden und teilverschattete Flächen zu nutzen. Diese stellen nicht nur hohe und zum Teil individuelle Ansprüche an das Erscheinungsbild der Module, sondern auch an deren Performance und Kosten. Lokal angepasste Speziallösungen können kaum durch derzeit produzierte Massenwaren bedient werden. Die europäische PV-Industrie braucht eine Unterscheidung von den asiatischen Massenprodukten. Dies kann durch besonders hohe Jahreserträge der Module geschehen, aber auch durch Integration von Zusatzfunktionen, die dadurch zu Spezialmodulen werden. Außerdem muss eine möglichst verlustarme, materialsparende und kostengünstige Integration neuartiger, hocheffizienter Zellen gewährleistet werden.

■ FORSCHUNGSINHALTE

Für neue c-Si-Solarzellen wie z. B. Zellen mit passivierenden Kontakten beider Polaritäten oder für Bifazialzellen, Rückkontaktzellen oder Silizium-Tandemsolarzellen sollen neue Modulkonzepte entwickelt werden. Die Stromsammlung könnte von der Zellebene zunehmend

auf Modulebene übertragen werden, um Silber einzusparen. Alternative und an die neuen Zellen angepasste Kontaktierungs- und Verbindungsverfahren müssen entwickelt werden. Neue Modulkonzepte verwenden neue optisch-funktionale Schichten oder Komponenten oder zeigen einen höheren Integrationsgrad von Zell- und Modulherstellung (bspw. kein oder wenig Metall auf der Zelle). Für Si-basierte Tandemkonzepte muss das Photonenmanagement neu gedacht werden, wenn Standard-Vorderseitentexturen nicht mehr realisiert werden können und eine Stromanpassung notwendig ist. Neue Module sollen durch Farbgebung im Solarzellenprozess oder nachträgliches Einfärben bei niedrigen optischen Verlusten an die Umgebung anpassbar gestaltet werden. Für spezielle Anwendungen sollen Module mit Zusatzfunktionen, z. B. besonders hohen Spannungen, ausgestattet werden. Forschungsbedarf besteht auch bei Modellierungs- und Designwerkzeugen und der Demonstration des Zusatznutzens in der Praxis.

■ ERGEBNISSE

Effiziente und kostensparende PV-Module aus neuartigen c-Si-Solarzellen. Demonstration der Langzeitstabilität und des Zusatznutzens von Spezialmodulen. Zeithorizont: sechs bis acht Jahre.

■ ART DER FORSCHUNG

Je nach Reifegrad spannt sich der Bogen von Vorlauf-forschung bis zur angewandten Forschung und Demonstrationsvorhaben.



AG 3 ALTERNATIVE KONZEPTE UND MATERIALIEN

Das heute in der Industrie und auf dem Markt dominierende Material für die Photovoltaik ist das kristalline Silizium in Form von Wafern, die zu Solarmodulen verschaltet und verpackt werden. Daneben gibt es noch weitere Materialien, die für die Photovoltaik von hohem Interesse sind und in dieser Arbeitsgruppe zusammengefasst sind.

Alle Alternativmaterialien zu „Wafer-Silizium“ werden in Form sehr dünner Halbleiter- und Metallschichten (Mikrometer Schichtdicken) meist großflächig hergestellt. Das verkürzt die Wertschöpfungskette wesentlich, hat erhebliche Vorteile in der Produktionstechnik und erfordert ein Minimum an Material.

Technologisch am weitesten fortgeschritten und seit Jahren kommerziell verfügbar sind die Verbindungshalbleiter aus Kupfer-Indium-Gallium-Selenid/Sulfid (CIGS), Kadmiumtellurid (CdTe) und aus sogenannten (III-V)-Halbleitern (z. B. GaAs, GaInP etc.). Letztere machen bisher nur im Einsatz mit hochkonzentrierenden Optiksensoren Sinn. Allerdings sind mit diesen Materialien noch große Verbesserungen im Wirkungsgrad als auch in den Techniken für die Massenproduktion möglich.

Seit wenigen Jahren machen andere Verbindungshalbleiter wie Kesterite und Perowskite und Solarzellen aus organischen Materialien mit guten Ergebnissen im Labor auf sich aufmerksam. All diese Materialien haben hervorragende Eigenschaften, die sie für den Einsatz in der Photovoltaik prädestinieren. Der Entwicklungsstand ist vergleichsweise noch niedrig.

Das Potenzial aller Dünnschichtmaterialien für weitere Kostenreduzierungen und für den Einsatz in spezifischen Märkten ist sehr hoch (z. B. als flexible Produkte). Entsprechend ihrer Entwicklungsgeschichten stehen sie noch relativ am Anfang ihrer massenhaften Verbreitung im PV-Markt. Die vielfältigen Designmöglichkeiten ihrer Eigenschaften und die Vielfalt der Prozesstechnologien eröffnen weitere Verbesserungspotenziale, insbesondere auch die Kombinationen verschiedener Materialien für Mehrfachsolarzellen (Multispektral: Tandem, Tripel usw.) sind hoch lukrativ. Die Wirkungsgrade können im

Vergleich zu Einzelsolarzellen weiter erhöht werden, was möglicherweise auch in Kombination mit kristallinem Silizium gilt. Außerdem sind diese alternativen PV-Technologien prädestiniert für die Systemintegration in Verbindung mit Konzentrator-Techniken sowie für Anwendungen in verschiedenen Klimazonen und spezifischen Märkten wie Gebäudeintegrierte PV und Produktintegrationen.

Zur Ausschöpfung der hohen Qualitätssteigerungs- und Kostensenkungspotenziale ist eine intensive und angepasste Forschung und Entwicklung notwendig und hoch lukrativ.

AG 3 – 1. Neue Märkte erschließen

Alternative Materialien zu Silizium und die dafür notwendigen Dünnschichttechnologien eignen sich besonders, um maßgeschneiderte Produktlösungen zu entwickeln. Die erforderlichen anwendungsspezifischen Prozesse müssen für die verschiedenen Dünnschichtmaterialien entwickelt werden, um bisher wenig erschlossene und neue Märkte für die Photovoltaik zu erschließen.

■ MOTIVATION

Der heutige PV-Markt wird praktisch ausschließlich durch die Forderung zur „maximalen Erzeugung von Strom“ dominiert. Entsprechend wurde die PV-Technologie entwickelt. Künftig werden sich neue Märkte ergeben, wo neben der reinen Stromerzeugung weitere Funktionalitäten genutzt werden. Genannt seien hier z. B. die Fassaden von Gebäuden (BIPV), Freifeldanlagen, die auch landwirtschaftlich genutzt werden (APV), in Transportmittel integrierte PV (VIPV) oder auch die autarke Versorgung von mobiler Elektronik und Sensoren für Industrie 4.0. Diese neuen Märkte erfordern spezialisierte Lösungen und Technologien, die in Deutschland hervorragend abgedeckt werden können. Hier können insbesondere Dünnschichttechnologien aus CIGS, CdTe, organischer PV oder auch dünnem kristallinen Si, Perowskite und III-V-basierende Materialien zum Einsatz kommen. Hierbei ist es wichtig, dass die

THEMEN | AG 3:

- AG 3 – 1. Neue Märkte erschließen
- AG 3 – 2. Produktionstechnologien für dünne Schichten
- AG 3 – 3. Effizienz- und Ertragssteigerung
- AG 3 – 4. Neue Materialien und neue Konzepte

Mentoren AG 3: Dr. Andreas Bett und Bernhard Dimmler

Wertschöpfungsketten vom Material bis zu den Spezialmodulen integrativ bearbeitet werden (durchaus im Überlapp zu anderen AGs). Diese neuen Märkte und Produkte werden langfristig einen wichtigen Beitrag zum Gelingen der Energiewende leisten.

■ FORSCHUNGSINHALTE

Die Themen von Forschung und Entwicklung erstrecken sich über Materialfragen, fertigungstechnologische Fragen bis hin zu spezifischen Anwendungen (BIPV, APV, VIPV). Die Produkte müssen von Anfang an für die spezifische Anwendung angepasst und entwickelt werden. Zum einen muss die Fähigkeit zur einfachen Produktintegration entwickelt werden. Dabei kommen verschiedene Produkte in Frage: Fahrzeuge jeglicher Art, Flugzeuge und Schiffe, unterschiedlichste Gebäudehüllen, Membranen wie etwa Dachhaut oder Zelte, bis hin zu flexiblen Produkten wie etwa Kleidung. Zum anderen bestehen Fragestellungen zum Einsatz in verschiedenen Klimazonen, zur Sicherung der Qualität und Zuverlässigkeit, zu Normung und Sicherheit sowie zu geeigneten Produktionstechnologien für die Materialbeschaffung, Materialherstellung und Modulfertigung. Wichtige Fragestellungen sind hierbei, wie bestehende Prozesstechnologien für die unterschiedlichen Materialien so angepasst werden können, dass die maximale Produktflexibilität im Design ermöglicht bzw. je nach Anwendung die optimale Anpassung der Prozesse an die spezifische Funktion des jeweiligen Produkts erreicht wird. Spezifische Fragestellungen zu flexiblen Modulen müssen adressiert werden.

■ ERGEBNISSE

Das Ziel der Forschungsaktivitäten ist es, die technologische Basis zu schaffen, um neue Märkte zu erschließen. Insbesondere werden eine flexible Fertigungsstrategie und neue innovative Integrationskonzepte erarbeitet. Dies führt zum einen zu einer höheren Akzeptanz und Marktdeckung bis zur Schaffung neuer Produkte und Märkte. Zum anderen werden höhere Energieerträge und eine Verringerung der Produktkosten erreicht. Darüber hinaus wird die Einhaltung von Bauvorschriften bzw. anderer Regulierungen sichergestellt.

■ ART DER FORSCHUNG

Den Schwerpunkt bildet die anwendungsnahe Forschung und Entwicklung, welche auf schon vorhandenen Materialien/Technologien/Prozessen aufbaut und auf die neuen Anforderungen adaptiert. Verbundvorhaben mit einem Querschnitt der notwendigen Kompetenzen, eine Beteiligung von produzierenden Unternehmen mit Erfahrung und Interesse an Markt- und Produktentwicklung und spätere kommerzielle Verwertung sind anzustreben.

AG 3 – 2. Produktionstechnologien für dünne Schichten

Die Abscheidung sehr dünner Schichten mit hoher Qualität sind für praktisch alle in der Photovoltaik eingesetzten Materialien eine zentrale Herausforderung. Dabei ist auf hohen Durchsatz und gute Materialausbeute zu achten. Der deutsche Anlagenbau hat hier eine führende Rolle. Die Wettbewerbsfähigkeit speziell für die Dünnschichttechnologien und die konzentrierende Photovoltaik soll für die Anlagenbauer und produzierenden Unternehmen in Deutschland mit der Weiterentwicklung bestehender Technologien sichergestellt werden.

■ MOTIVATION

Alternative Materialien, insbesondere die Dünnschichttechnologien mit CIGS, CdTe, dünnem kristallinem Si, III-V-Dünnschicht und organischer PV sind heute zum Teil schon wettbewerbsfähig, wenn mit großen Produktionseinheiten produziert werden kann. Deutsche Anlagenbauer sind hier auf dem Weltmarkt bereits führend. Allerdings haben die Dünnschicht- und die III-V-basierenden Konzentrationstechnologien noch erhebliche Verbesserungspotenziale hinsichtlich Produktionskosten und industriellem Wirkungsgrad. Diese müssen jedoch mit intensiver Forschung und Entwicklung flankiert und dann industriell qualifiziert werden. Dies erstreckt sich über die gesamte Wertschöpfungskette vom Material über den Anlagenbau bis hin zum Produkt. Dabei ist der Transfer von guten Ergebnissen, die unter Laborbedingungen erzielt wurden, in eine industrielle, großskalige Produktionsumgebung zentral.

■ FORSCHUNGSINHALTE

Die Anlagen- und Prozesstechnik soll im Hinblick auf eine höhere Produktivität (Durchsatz, Ausbeute, Verfügbarkeit bis hin zur Minimierung des Energieaufwandes zur Herstellung) optimiert werden. Die Produktfläche wird für einen maximalen Durchsatz (inkl. erhöhte Marktfähigkeit) vergrößert. Zudem soll die Energiebilanz durch Optimierung des Energieeinsatzes in der Produktion verbessert werden. Die Ausbeute und Qualität werden durch weitergehende Prozesskontrolle, Logistik- und Automatisierungskonzepte, Fabrik-Layout bis hin zu Servicequalität unter Berücksichtigung von Modellen aus Industrie 4.0 und IoT (Internet of Things) verbessert. Ein weiterer Ansatz besteht darin, die Materialkosten durch Optimierung von Materialreinheit, -dicken und Materialausbeuten bis hin zur Einsparung von Funktionsschichten zu reduzieren. Herausragende Laborergebnisse werden in die Produktionsumgebung transferiert und an die dort herrschenden Bedingungen angepasst. Darüber hinaus wird an einer verbesserten Nachhaltigkeit gearbeitet: Der Einsatz umweltunverträglicher Materialien wird minimiert bzw. die Materialien werden vollständig ersetzt und die Energiebilanz sowie der ökologische Fußabdruck werden berücksichtigt. Wichtig ist auch die Optimierung der Energieausbeute, eine hohe Lebensdauer und lang andauernde Stabilität der Produkte in verschiedenen Klimazonen.

■ ERGEBNISSE

Über Forschung und Entwicklung sollen Wege erarbeitet werden, welche die Produktivität und den Durchsatz verdoppeln. Gleichzeitig werden der Material- und Energieeinsatz reduziert, der Wirkungsgrad und die Produktionsstabilität erhöht. Somit wird auch die Energierücklaufzeit deutlich verringert und die Module werden ökologischer und ökonomischer gefertigt. Dabei wird auch der Stoffmengenkreislauf berücksichtigt, so dass ein einfaches Recycling für die eingesetzten Stoffe möglich ist. Summarisch führt dies zu einer deutlichen Kostenreduktion auf LCoE Niveau.

■ ART DER FORSCHUNG

Die Arbeiten sind weitgehend von der Module produzierenden Industrie und den Anlagenbauern zu leisten. Eine Unterstützung durch angewandte Forschung, Charakterisierung und Analytik ist wichtig. Soweit möglich (IP, Know-how) soll Verbundforschung von produzierenden Unternehmern, Anlagenbau und Instituten geleistet werden, sonst sind es eher singuläre bzw. bilaterale Vorhaben.

AG 3 – 3. Effizienz- und Ertragssteigerung

Die Gesamtkosten für Solarstrom setzen sich aus vielen Einzelposten zusammen. Viele Studien zeigen, dass ein höherer Wirkungsgrad bei den Modulen der zentrale Schlüssel zur Senkung der Kosten ist. Höhere Wirkungsgrade und ein optimierter Energieertrag bei niedrigen Produktionskosten sichern zudem der deutschen Industrie langfristig Wettbewerbsvorteile.

■ MOTIVATION

Letztlich ist die Ertragssteigerung einer PV-Anlage im Betrieb bei gleichzeitig minimalem Einsatz von Materialien ein entscheidendes Ziel, um die Photovoltaik noch kostengünstiger und nachhaltiger zu gestalten. Die Kosten korrelieren typischerweise mit der Effizienz und Prozesstechnik der Solarzelle bzw. des PV-Systems. Technologien für die alternativen Materialien, die noch nicht so stark im Markt vertreten sind wie die Dünnschichttechnologien, die konzentrierende Photovoltaik und die organische Photovoltaik haben noch hohes Potenzial, die Wirkungsgrade zu steigern. Im Labor wurden in Deutschland bereits Weltrekorde realisiert. Das hohe Entwicklungspotenzial gilt es auszuschöpfen, um der deutschen Industrie einen Wettbewerbsvorteil zu verschaffen. Dazu müssen die bereits im Labor gezeigten Wirkungsgradrekorde zielgerichtet für wettbewerbsfähige Produktionslösungen weiterentwickelt und für den Transfer in die Industrie qualifiziert werden.

■ FORSCHUNGSINHALTE

Forschung und Entwicklung bauen auf vorhandenem Know-how auf. Bei den verschiedenen Materialien sind unterschiedliche Fragestellungen zu berücksichtigen, die hier nicht allumfassend darzustellen sind.

- CIGS und CdTe: aufbauend auf schon existierendem Know-how, Materialentwicklung und Nachweis der Machbarkeit für großskalige Produktionen, verbesserte Zell designs, Ersatz von wenig umweltfreundlichen Materialien und Prozessen, neue Verschaltungsstrukturen und Verpackungsdesigns
- CPV: Verbesserung von Multi-Junction-Solarzellen bis zum Erreichen von 50 Prozent Wirkungsgrad, dazu Materialentwicklung, Prozessentwicklung, Solarzellenarchitekturen; Modulentwicklung; Verbesserungen der konzentrierenden Optik und der mechanischen Nachführungssysteme

- OPV und Perowskite: Verbesserung der Materialsysteme und Materialstabilität, spezielle Abscheideverfahren und Verkapselungsmethoden
- Generischer Ansatz Tandemsolarzellen: Durch die Kombination von fotoempfindlichen Einzelzellen mit unterschiedlichen Bandabständen und damit Kombination von unterschiedlichen Materialien können höhere Wirkungsgrade erzielt werden.
- Eignungsprüfung und Qualifizierung von anderen Substraten und Versiegelungen anstatt Dickglas, einschließlich verbesserte Laminationsmaterialien, um langlebige Module zu fertigen
- Vorentwicklungen der geeigneten Abscheideverfahren zur Beschichtung mittels Verdampfungs- und Sputtertechnik, Epitaxieverfahren, Rolle-zu-Rolle-Beschichtung sowie begleitender nasschemischer und thermischer Verfahren hinsichtlich Produktivität und Erschließung nicht-Vakuum-basierter Verfahren wie Drucktechnik
- Angepasste Charakterisierungstechniken, Analytik und Modellierung

■ ERGEBNISSE

Quantitative Zielvorgaben sind materialspezifisch. Generisch kann für alle Materialien eine relative Steigerung um 20 Prozent beim Modulwirkungsgrad von heute bis in fünf Jahren erwartet werden. In Bezug auf den Energieertrag ist eine noch höhere Steigerung darstellbar.

■ ART DER FORSCHUNG

Die Arbeiten auf dieser Entwicklungsebene sind wegen des vorhandenen Know-hows und der dafür notwendigen Kompetenzen und Ausrüstungen im Wesentlichen an Instituten zu leisten. Eine direkte Industriebeteiligung ist für die Verwertungsrelevanz und Feinjustierung der Themen notwendig.

AG 3 – 4. Neue Materialien und neue Konzepte

Forschung und Entwicklung im Grundlagen- bis angewandten Bereich sind für die langfristige Standort-sicherung in der Photovoltaik notwendig. Insbesondere Arbeiten im Grundlagenbereich müssen ermöglicht werden. Sie sind die Voraussetzung und bilden den Ausgangspunkt für künftige Innovationen auf einer Zeitskala von mehr als zehn Jahren. Somit wird hier die Basis für die künftige industrielle Produktion gelegt.

■ MOTIVATION

Grundsätzlich ist es wichtig, an neuen Materialien und Technologien zu forschen, um langfristige Potenziale zur Kostensenkung und Verbesserung der Qualität auszuschöpfen. Dies muss auch bisher wenig bearbeitete bzw. erforschte Themen umfassen, um z. B. das Lichtspektrum effektiver zu nutzen und die Kosten von PV-Systemen weiter zu verringern. Für die langfristige Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrie müssen daher auch grundlegende Themen, wie neue bzw. modifizierte Materialien oder Materialkombinationen erforscht werden.

■ FORSCHUNGSINHALTE

- Modifizierte Materialien und Kombinationen abgeleitet von etablierten Materialien
- Neue Materialien aus Materialscreening und Simulationen
- Neue Verfahren zur Materialsynthese und -prozessierung
- Neuartige Konzepte und Strukturen (z. B. 3D, Punktkontakt, Passivierung, Vielfachzellen etc.) für die photovoltaische Energiewandlung
- Zusätzliche Funktionsschichten zur besseren Nutzung des Spektrums wie Antireflexschichten und -strukturen, Up-/Down-Conversion, Schichten/Folien, neue Ansätze bzw. Übertragung von bekannten Nanostrukturen
- Kombinationen von Solarzellen, Speichermedien und Steuerungselementen (z. B. integrierte Dünnschichtbatterie oder Wasserstoffproduktion)

- Neue Konzepte zur Erzeugung von solarem Wasserstoff oder anderen chemischen Energieträgern

Die Themen stützen sich auf theoretische Betrachtungen, Materialmodellierungen und Materialscreening.

■ ERGEBNISSE

Nachweis von grundsätzlicher Machbarkeit und Wirkungsgrad sowie grobe Abschätzung für mögliche Herstellkosten in der Massenproduktion.

Der Anwendungshorizont übersteigt zehn Jahre.

■ ART DER FORSCHUNG

Diese Themen haben alle grundlegenden Forschungscharakter. Die Ziele zu erreichen ist daher mit einem großen Risiko behaftet. Die Arbeiten werden durch interdisziplinäre Verbände aus kompetenten Instituten und Universitäten in der Materialforschung mit bestehendem Know-how zur PV-Anwendung durchgeführt. Schon in der sehr frühen Entwicklungsphase sollen Stabilität, Umweltrelevanz und Kostenhorizont bewertet werden. Wünschenswert wären auch Förderungsoptionen mit wenig administrativem Aufwand verbunden mit kleinem Förderbudget.



AG 4 PV-SYSTEME UND -KOMPONENTEN

Die Energiewende und der damit verbundene Anteil von Stromerzeugung aus Photovoltaik-Systemen (PV-Systemen) fordert eine stetige Weiterentwicklung aller Komponenten, die eine PV-Anlage ausmachen (PV-Systemtechnik), damit diese ihrer steigenden Systemverantwortung dauerhaft gerecht werden können. Im Wesentlichen wird durch die PV-Systemtechnik die Photovoltaik effizient und nutzbar gemacht. Dies reicht von Kleinstanlagen (z. B. Dachanlage oder gebäudeintegrierte Anlage) bis hin zum Kraftwerksmaßstab der Multimegawattklasse.

Das Herzstück solcher PV-Anlagen stellt der Wechselrichter dar. Mit ihm kann die erzeugte Leistung konform ins Verbundnetz eingespeist, ein autarkes Inselnetz bereitgestellt und auch eine Direktversorgung ermöglicht werden.

Neben reinen PV-Systemen rücken aktuell zunehmend PV-Eigenverbrauchsanlagen und PV-Diesel-Lösungen stärker in den Vordergrund. PV-Eigenverbrauchsanlagen zeichnen sich dadurch aus, dass mit Hilfe von Batteriesystemen oder durch die Kopplung mit steuerbaren Verbrauchern, wie z. B. Wärmepumpen, ein höherer lokaler Verbrauch der erzeugten Energie realisiert wird. PV-Diesel-Lösungen kommen vor allem in Inselnetzen und netzfernen Regionen zum Einsatz, um den Dieselverbrauch zu reduzieren.

Durch solche Entwicklungen, die Erschließung neuer internationaler Absatzmärkte und die Elektrifizierung des Verkehrs werden neue Anforderungen und Herausforderungen an die PV-Systemtechnik gestellt. Weiterentwicklungen in der PV-Systemtechnik ermöglichen den Wandel von PV-Anlagen, die bisher nur auf Netzeinspeisung ausgelegt sind, hin zu PV-Systemen, die in lokale oder übergeordnete Systemlösungen eingebunden werden können. Darüber hinaus gilt es aber vor allem auch weiterhin eine deutliche Kostenreduktion zu erreichen, um die internationale Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Hersteller zu erhalten und eine kostengünstige Stromversorgung für Industrie und Bevölkerung sicherzustellen.

Ziel der AG PV-Systeme und -Komponenten ist es, in diesem Themenbereich den aktuellen Stand zu bewerten, zukünftige Themen für Forschung und Entwicklung zu

identifizieren sowie diese im Hinblick auf Relevanz und Erfolgsaussichten zu bewerten und entsprechende prioritäre Empfehlungen für die Ausrichtung der weiteren Forschung und Entwicklung zu geben.

AG 4 – 1. PV-Großkraftwerke und PV-Diesel- Inselnetze

In großen Solarkraftwerken mit Leistungen von einigen Megawatt bis in den Gigawatt-Bereich kann der Solarstrom besonders effizient und preiswert erzeugt werden. Eine neue Generation noch kostengünstigerer PV-Großkraftwerke mit zusätzlichen netzdienlichen Kraftwerkeigenschaften für das Verbundnetz wird es zukünftig erlauben, den Solaranteil in der Energieversorgung noch weiter zu steigern. Auch in abgelegenen, nicht an das Verbundnetz angeschlossenen Regionen, die derzeit vor allem mit Dieselkraftwerken versorgt werden, kann die Solarenergie eine tragende Rolle übernehmen. Mit neuartigen PV-Dieselmotoren kann die Solarenergie für die großen Inselnetze im globalen Sonnengürtel einen Großteil des weltweiten Dieselverbrauchs in der Stromversorgung substituieren.

■ MOTIVATION

PV-Kraftwerke für den weltweiten Einsatz können im Verbundnetz die fossilen Kraftwerke weitgehend ersetzen. In PV-Dieselmotoren-Inselnetzen können sie den Solaranteil so weit erhöhen, dass ganze Dieselmotorkraftwerksblöcke entfallen können.

Zwei Drittel aller neuen PV-Anlagen sind PV-Großkraftwerke. Diese PV-Kraftwerke müssen wegen des weltweit oftmals schon beträchtlichen Solarstromanteils im Verbundnetz zunehmend auch Systemdienstleistungen im Stromnetz übernehmen, benötigen aber nach wie vor konventionelle Kraftwerke im Hintergrund. Innerhalb der nächsten zehn Jahre wird die Photovoltaik ohne Subventionen wirtschaftlich konkurrenzfähig betrieben werden und als tragende Säule im Stromnetz alle netzdienlichen Aufgaben eines Kraftwerks vollständig erfüllen müssen.

THEMEN | AG 4:

AG 4 – 1. PV-Großkraftwerke und PV-Diesel-Inselnetze

AG 4 – 2. Verbrauchsnahes Energiemanagement & Sektorkopplung

AG 4 – 3. Systemoptimierte PV-Kleinstanlagen, PV-Modul-integrierte Leistungselektronik

AG 4 – 4. PV-Komponenten-Integration und Design

Mentoren AG 4: Dr. Philipp Strauss und Dr. Oliver Führer

Durch den Einsatz von intelligenten PV-Diesel-Systemlösungen kann im globalen Sonnengürtel der Erde, also Gebieten mit hoher Solareinstrahlung wie etwa in Spanien, der Türkei oder in Kalifornien, ein Großteil des derzeit eingesetzten Dieselmotorkraftstoffes durch Solarenergie ersetzt werden. Derzeit werden dort über 20 GW Dieselmotoren jährlich neu installiert. Die in diesen Regionen aufgrund der guten Solarstrahlung und wegen des teuren Dieselmotortransports besonders wirtschaftliche Solarenergie kann so zur wirtschaftlichen Entwicklung dieser Regionen wie auch zum Erreichen der weltweiten Umweltziele beitragen.

■ FORSCHUNGSINHALTE

Es soll eine neue Generation von PV-Großanlagen mit speziellen Kraftwerkeigenschaften entwickelt werden, die Mitverantwortung für die Versorgungssicherheit und Systemstabilität übernehmen können. Mit solchen PV-Kraftwerken lassen sich deutlich größere PV-Anteile ins Netz integrieren als bisher, ohne dass der Netzbetrieb dadurch teurer wird. Darüber hinaus muss die Wirtschaftlichkeit des PV-Kraftwerks durch deutliche Kostenreduktion bei den Komponenten der Systemtechnik und den Betriebskosten (O&M-Aufwand) weiter verbessert werden. Im Bereich der PV-Diesel-Systemlösungen und Inselnetze muss die Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit weiter verbessert und vor allem auch im realen Praxisbetrieb evaluiert und nachgewiesen werden. Die verbesserten Systemlösungen schließen auch neue Methoden zur Messtechnik, Datenanalyse und Prognoseverfahren (insbesondere zuverlässigere Solarleistungsprognosen für die Systemintegration) mit ein.

■ ERGEBNISSE

Ergebnis von Forschung und Entwicklung sind optimierte Systemlösungen für vollständige PV-Großkraftwerke, die alle vom jeweiligen Netz gestellten Anforderungen zuverlässig und kostengünstig erfüllen sowie eine deutlich verbesserte Generation von PV-Diesel-Systemlösungen für Inselnetze. Dies beinhaltet angepasste Komponenten (insbesondere Wechselrichter), zusätzliche Systembausteine (wie z. B. Energiespeichereinheiten), verbesserte Messtechnik/Datenanalyse, bessere Prognosen und Reaktionsfähigkeit, neuartige Steuerungs- und

Regelungssysteme, Auslegungsverfahren und O&M-Strategien sowie den wissenschaftlichen Nachweis der Funktionalität, Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit. Der Zeithorizont für den Einsatz dieser neuen PV-Kraftwerke beginnt ab 2020, wobei die neuen Eigenschaften sukzessive nachgefragt werden – je nachdem, wie groß der PV-Anteil im Netz ist, ob es sich um schwache Netze handelt und wie die netz- und energiewirtschaftlichen Märkte regulatorisch und ökonomisch gestaltet sind.

■ ART DER FORSCHUNG

Es handelt sich um angewandte Forschung, bei PV-Diesel-Systemlösungen werden zudem Pilotanlagen mit Breitentest-Evaluationsprogramm benötigt.

AG 4 – 2. Verbrauchsnahes Energiemanagement & Sektorkopplung

Dezentrale PV-Anlagen bieten die attraktive Möglichkeit, den Strom verbrauchsnahe zu erzeugen und in großen Anteilen zur kostengünstigen Deckung des eigenen Strombedarfs einzusetzen. Wegen der zeitlichen Schwankungen in Stromerzeugung und -verbrauch bedarf dies jedoch einer intelligenten Steuerung der elektrischen Lasten und des Speichereinsatzes, was neben den Eigenverbrauchs-Betriebsstrategien im Übrigen auch für den lokalen Leistungsausgleich im Verbundnetz gilt. Hierfür gilt es, automatisierte netzverträgliche PV-Energiemanagement-Systeme für gewerblichen Eigenverbrauch, für die Sektorkopplung im Wohnungsbau und für einen wirtschaftlich selbsttragenden Solarstromeinsatz zu schaffen, zu evaluieren und weiter zu verbessern.

■ MOTIVATION

Durch automatische PV-Energiemanagement-Systeme mit intelligenter Steuerung von Lasten und Speichern (auf Basis zuverlässiger Last- und PV-Leistungsprognosen) kann einerseits eine verbesserte Anpassung von volatiler PV-Stromerzeugung und fluktuierendem Stromverbrauch in einem relevanten Maßstab erreicht werden. Andererseits kann durch die netzentlastende Wirkung und einen hohen Eigenverbrauch des selbsterzeugten Stroms die

Wirtschaftlichkeit des PV-Anlagenbetriebs erheblich gesteigert werden. Das größte Potenzial hierfür besteht im gewerblichen Bereich, das es zu erschließen gilt. In Anbetracht der hohen Komplexität und Unterschiedlichkeit der konkreten Einsatzfälle stellt das eine große Herausforderung dar. Gleiches gilt für die Sektorkopplung durch PV-Strom-Wärme-Kombisysteme unter Einbeziehung der Elektromobilität in den Bereichen des Wohnungsbaus vom Einfamilien- bis zum Mehrfamilienhaus sowie der Quartiersenergieversorgung.

■ FORSCHUNGSINHALTE

Benötigt wird ein wissenschaftlich evaluierter Breitentest des dynamischen Verhaltens, des Anwendernutzens und der Netzauswirkungen, zum einen von 1.000 PV-Energiemanagementsystemen im gewerblichen Bereich, zum anderen von je 100 Systemlösungen im Ein- und Mehrfamilienhaus-Wohnungsbau. Der besondere Fokus liegt dabei auf gewerblichem Eigenverbrauch mit Peak-Shaving bei PV-Speicher-Energiemanagementsystemen, bezogen auf Applikationen mit energetischem solarem Deckungsanteil über 10 Prozent und für PV-Anlagen über 30 Kilowatt. Im Ein- und Mehrfamilienhaus-Bereich liegt der Untersuchungsschwerpunkt insbesondere bei der Systemeinbindung in den Energiehandel (Mieterstrom, Quartiersmanagement), solaren Deckungsanteilen, Batterieintegration sowie Netzrückwirkungen und ihrer Beeinflussung. Auf den Ergebnissen einer ersten (mehrjährigen) Phase des Breitentests bauen die anschließende Entwicklung einer zweiten, verbesserten Generation von Systemlösungen (inkl. neuer Methoden zur PV-Leistungsprognose) sowie eine zweite Evaluationsphase auf.

■ ERGEBNISSE

Es werden wissenschaftlich und statistisch belastbare Erkenntnisse zum Anwendernutzen der existierenden Systemlösungen erarbeitet und Anknüpfungspunkte für Verbesserungen identifiziert. Die Netzbetreiber erhalten Kenntnisse zu den dynamischen Auswirkungen solcher automatischer Systeme auf den Netzbetrieb und die Batteriehersteller auf das Management und die Lebensdauer der Batterie. Energiemanagement-Systemlösungen werden in der Weiterentwicklungsphase deutlich verbessert, inklusive besserer PV-Leistungsprognosen und Batterieintegration. Zudem werden Daten und Erkenntnisse für die volkswirtschaftlich optimierte Gestaltung des regulatorischen Rahmens und die Energiemärkte erarbeitet.

Erste Erkenntnisse werden ab 2020 und verbesserte, evaluierte, technische Lösungen mit einem Zeithorizont bis 2025 zur Verfügung stehen.

■ ART DER FORSCHUNG

Es handelt sich um ein Demonstrations- und Breitentest-Evaluationsprogramm zzgl. Anteile angewandter Forschung.

AG 4 – 3. Systemoptimierte PV-Kleinstanlagen, PV-Modul-integrierte Leistungselektronik

Eine typische PV-Anlage besteht jeweils aus einer Vielzahl von PV-Modulen, die über einen oder mehrere zentrale Wechselrichter den Strom ins Verbundnetz einspeisen. Der Wechselrichter übernimmt darüber hinaus auch vielfältige Aufgaben der Anlagenregelung, Überwachung und Netzstützung. Ein alternatives Konzept ist der Anlagenaufbau mit – oftmals auch direkt ins PV-Modul integrierten – Kleinstwechselrichtern, sodass jedes Modul über einen eigenen Wechselrichter verfügt. Dies ermöglicht einerseits eine optimale Regelung mit maximalem Energieertrag, eine direkte Modulüberwachung und einen sehr einfachen Anlagenaufbau, führt andererseits aber zu deutlichen Mehrkosten. Daher sind solche Systeme bisher zu teuer und verfügen darüber hinaus auch noch nicht über alle nötigen Netzstützungsfunktionalitäten.

■ MOTIVATION

Der weltweite Markt für Leistungselektronik auf PV-Modulebene wird nach Analysen von Frost & Sullivan bis 2021 jährlich um 12,4 Prozent (CAGR) auf 1,16 Milliarden US-Dollar wachsen. Heute teilen sich zwei Firmen 88 Prozent des Marktes. Deutsche Unternehmen spielen dabei kaum eine Rolle. Gleichzeitig steigt aber auch in Deutschland die Nachfrage nach PV-Kleinstanlagen. Um die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Wirtschaft zu steigern, sind Lösungen zu entwickeln, die zu einer signifikanten Kostenreduktion für PV-Strom aus kleinen und kleinsten PV-Anlagen führen, sowie deren Netzintegration durch netzstützendes Verhalten verbessern. Ein allgemeines Interesse besteht auch bei der Erarbeitung von Sicherheitsstandards und Normanforderungen.

■ FORSCHUNGSINHALTE

Gegenstand der Forschung sind systemoptimierte PV-Kleinstanlagen bis ca. 1 Kilowatt wie z. B. PV-Module mit integrierten Wechselrichtern bzw. Power-Optimizern. Dies können aber auch Systeme zur autonomen Versorgung z. B. von Geräten oder Sensoren sein (Energy Harvesting). Daneben können auch kleine PV-Systeme bis ca. 5 Kilowatt betrachtet werden, die mehrere Wechselrichter für einzelne Module oder Mini-Strings beinhalten, auch in Verbindung mit Batteriespeichern. Die Forschungsaktivitäten sind entlang der Wertschöpfungskette (Entwicklung – Produktion – Installation – Betrieb) angesiedelt. Sie müssen einen messbaren Beitrag zu einem oder mehreren der folgenden Aspekte liefern: Kostenreduktion, Zuverlässigkeit, Sicherheit und/oder Systemdienstleistungen. Forschungsinhalte sind:

- optimale Anpassung zwischen PV-Modul, Leistungselektronik und ggf. Batterie sowie optimale Systemkonzepte (modulnahe vs. modulintegrierte Leistungselektronik)
- Kostenreduktion und Installationsvereinfachung bei gleichzeitig hoher Zuverlässigkeit
- Erhöhung der Lebensdauer aller Systemkomponenten, insbesondere auch von Batterien
- Hochintegrierte Wechselrichter mit wenig Bauteilen, ggf. unter Verwendung neuer Halbleitertechnologien (Wide Bandgap Semiconductor) und für vollautomatisierte Fertigung
- Umsetzung von zukünftigen Netzstützungsanforderungen
- IKT-Lösungen zur sicheren und effizienten Anbindung einer Vielzahl von Geräten unter Berücksichtigung von Ertragsprognosen und Einbindung in ein Energiemanagement

■ ERGEBNISSE

Das Ziel der Forschungsaktivitäten ist die Entwicklung von kostengünstigen, zuverlässigen, weltweit einsetzbaren, wettbewerbsfähigen und zukunftssicheren Systemlösungen und Komponenten, die Massenprodukt-tauglich sind, um die notwendigen Skalen- und Zuverlässigkeitseffekte zu erzielen. Für die Markterschließung wird der Zeitraum von 2020 bis 2025 angestrebt.

■ ART DER FORSCHUNG

Zielführend zur Erreichung der Ergebnisse ist vor allem angewandte Forschung mit interdisziplinärer Kooperation zwischen Industrie und Forschungseinrichtungen. Die Verwendung neuartiger Technologien oder Konzepte kann auch im Rahmen einer Vorlauftforschung erfolgen.

AG 4 – 4. PV-Komponenten-Integration und Design

Neben den klassischen PV-Anlagen, sei es als PV-Kraftwerk auf Freiflächen oder als netzgekoppelte Aufdachanlage, lässt sich die PV auch direkt in Anwendungssysteme integrieren (z. B. PV-versorgte Kühlcontainer), mit anderen Technologien auf PV-Modulebene kombinieren (z. B. kombinierte PV-Solarthermie-Kollektoren oder als fassadenintegriertes Gebäudeelement) oder mit anderen energietechnischen Systemen koppeln (z. B. solare Wasserstoffherzeugung). Solche Formen der Integration von PV-Komponenten in stationäre oder mobile Systeme ermöglichen die Reduktion des Gesamtenergiebedarfs oder die Sektorkopplung auf der Komponentenebene. In der Regel können hierzu jedoch keine PV-Standardkomponenten verwendet werden und es bedarf neuer verbesserter Lösungsansätze.

■ MOTIVATION

Die Verbesserung der Energieeffizienz von Fahrzeugen, Geräten und Gebäuden durch integrierte PV ist notwendig für eine erfolgreiche Energiewende. Hierfür ist der Transfer von innovativen PV-Technologien zur Integration in marktfähige Anwendungen notwendig. Heutige Nischenmärkte können sich so zu Markttreibern entwickeln (z. B. BIPV durch Forderung nach Quasi-Null-Energiegebäuden ab 2018/2020). Dies erfordert flexible Designanpassung kostengünstiger Speziallösungen. Durch die PV-Kostenreduktion und neue, technologische Ansätze erscheint ein wirtschaftlich tragfähiger Markt greifbar. Entscheidend ist die technologieoffene Fokussierung auf die Integration in der finalen Anwendung.

■ FORSCHUNGSINHALTE

Entwicklung von PV-Komponenten der nächsten Generation für den Einsatz in

- Gebäudeintegrierter PV (BIPV): Die Doppelfunktion als PV-Modul und Gebäudeteil, sowie die Überwachungs-, Regelungs- und Speichertechnik muss berücksichtigt werden.

- PV in mobilen Anwendungen (VIPV): PV-Komponenten sollen in den Verkehrssektor integriert werden (besonders in den Bereich der Logistik, aber auch etwa in den Bereichen Personentransport, Busse, Boote, Raumfahrt).
- der Sektorenkopplung: Forschungsthemen hierbei sind PVT-Kollektoren, lokale H₂-Gewinnung durch solare H₂O-Spaltung oder die Verknüpfung von stationären und mobilen Speichersystemen mit PV.

■ ERGEBNISSE

BIPV: Entwicklung von PV-Systemen mit kundenspezifischem Design (inkl. Regelung und Speicherung) für Integration in Baustoffe und Gebäudekomponenten als aktive energieerzeugende Elemente in der Gebäudehülle. Die Zeitskala hierfür beträgt weniger als vier Jahre.

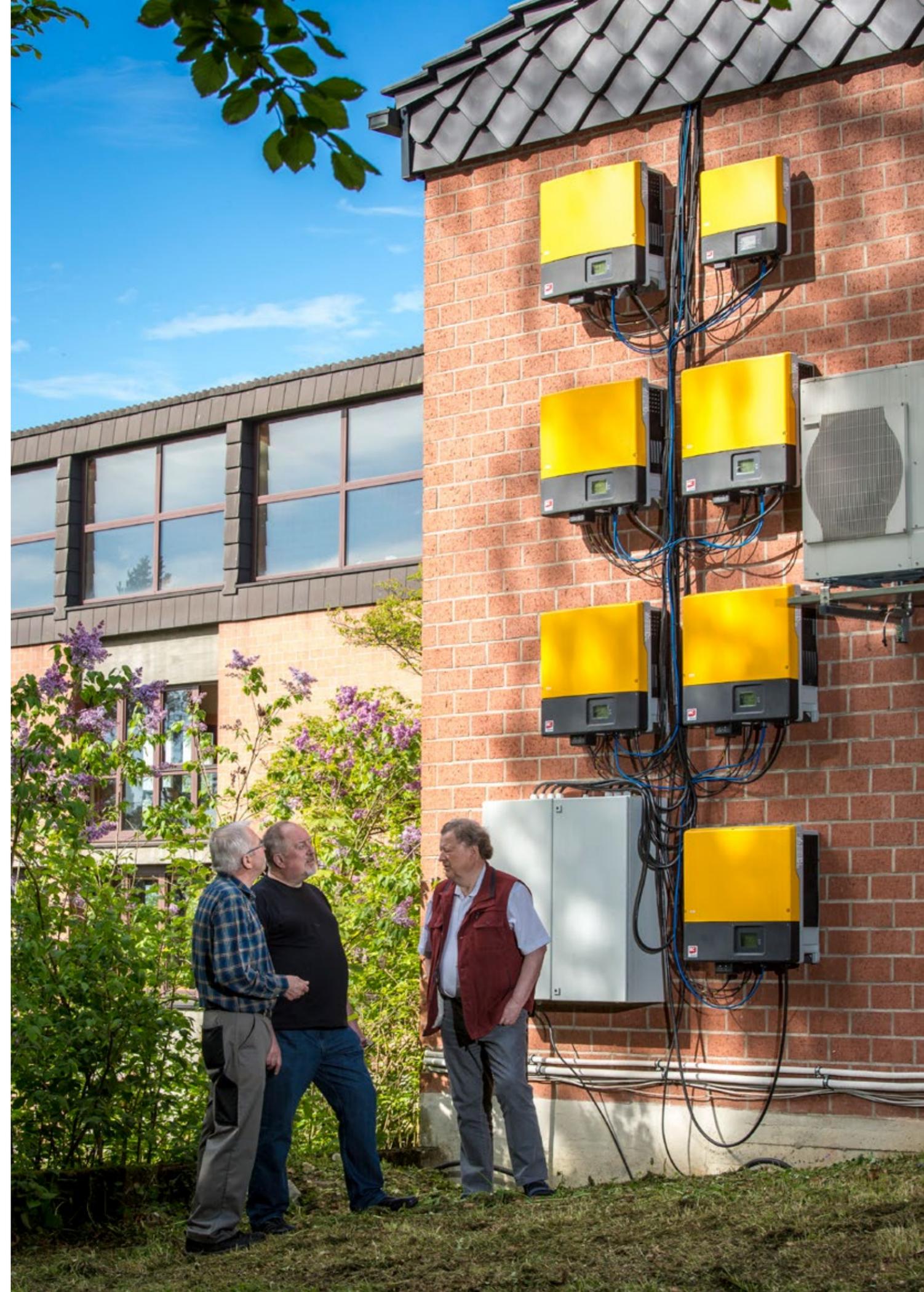
VIPV: Integration und Design von PV-Systemen für Integration in diverse mobile Anwendungen gemäß sich aus der Anwendung ergebender Spezifikationen. Entwicklungsfreiräume durch nicht relevante Anforderungen wie z. B. Netzkonformität werden genutzt (Zeitskala: vier bis sechs Jahre).

Lokale Sektorenkopplung: Konzeptarbeiten und -studien, aber auch die konkrete Entwicklung von notwendigen Komponenten, z. B. integrierte Elemente zur solaren Wasserstofferzeugung oder für kombinierte PV und Solarthermie (PVT). Die Zeitskala hierfür beträgt fünf bis zehn Jahre.

Generell ist jede Entwicklung durch Wirtschaftlichkeitsanalysen zu stützen.

■ ART DER FORSCHUNG

Das komplette Spektrum von der industriellen Vorlauforschung über die angewandte Forschung, bis hin zum Pilot- bzw. Demoprojekt ist erforderlich.



AG 5 ÖKONOMIE, METROLOGIE/ CHARAKTERISIERUNG

Quantitative Methoden sind das entscheidende Mittel, um neue Technologien oder Prozesse hinsichtlich Ihrer Leistungsfähigkeit, Rentabilität und Zuverlässigkeit zu beurteilen. Sie bilden daher die Grundlage dafür, darüber zu entscheiden, ob eine neue Entwicklung in die Anwendung überführt werden sollte oder nicht.

Die Entwicklung von Methoden zur quantitativen Analyse der Photovoltaik beinhaltet sowohl neue Messmethoden und Messgeräte sowie deren Überführung in Standards und Normen als auch die quantitative Beschreibung der Alterung und Degradation sowie der Ökonomie durch Kosten- und Ertragsmodelle. Alle vier Themen der AG (Messtechnik, Degradation, Ökonomie, Normung) schaffen die Grundlage („enabling technology“) für jegliche Technologieentwicklung und deren wirtschaftliche Verwertung und stellen somit ein essenzielles Forschungsfeld dar, ohne das Fortschritte in anderen Bereichen nicht möglich wären.

Aufbauend auf früheren Entwicklungen in diesen Bereichen sollen nun vor allem Methoden entwickelt werden, die eine ganzheitliche Betrachtung und Analyse der Photovoltaik von der Zelle bis zum Megawatt-Park erlauben und somit neue, wertschöpfungsstufenübergreifende Synergien aktivieren. Durch diese Synergien werden Innovationen ermöglicht, die zu einem Technologievorsprung deutscher Unternehmen führen und gleichzeitig dazu beitragen werden, die Klimaziele zu erreichen.

AG 5 – 1. Entwicklung von Messtechniken und -methoden für die gesamte Wertschöpfungskette (mW->GW)

Es wird Messtechnik für die gesamte PV-Wertschöpfungskette von der Analyse einer Zelle bis zur Analyse von Megawatt-Parks entwickelt. Es werden eine Infrastruktur sowie Methoden geschaffen, die es erlauben, Zusammenhänge und Abhängigkeiten zu analysieren, die über mehrere Wertschöpfungsstufen hinweg wirken. Somit werden Synergien entlang der ganzen Wertschöpfungskette aktiviert.

■ MOTIVATION

Messtechnik quantifiziert die Wirkung von PV und ist das Rückgrat jeder Entwicklung und Überwachung. Entwicklungen sind oft durch Messtechnik limitiert, da Zusammenhänge nicht analysierbar sind. Messungen finden in der Regel nur auf einzelnen Wertschöpfungsstufen statt. Parameter früherer Stufen liegen den nachfolgenden nicht vor und limitieren diese. Bildgebende Verfahren stehen für die Produktion zwar zur Verfügung, liefern mangels geeigneter Algorithmen aber kaum Vorhersagen zum Endprodukt. Spezialisierte Methoden mit Big-Data-Analyse und Vernetzung innerhalb/zwischen Wertschöpfungsstufen stärken die Position deutscher Messtechnikhersteller sowie Neuentwicklungen und Produktion in Deutschland.

■ FORSCHUNGSINHALTE

- Schnellere, präzisere Messverfahren, Hochdurchsatzverfahren
- Automatisierte, quantitative Datenanalyse und -korrelation innerhalb einer bzw. über mehrere Wertschöpfungsstufe/n (Inter-Fab MES), ggf. mit Sensitivitäts-/Potenzialanalysen
- Big Data, Industrie 4.0, cradle-2-grave-traceability
- Automatisierte Defektidentifikation/-klassifikation und Vorhersagemodelle der Defektwirkung (Mustererkennung, Machine-Learning)
- Bildgebende Verfahren, Layeraufgelöste Analyse v. Tandem-/Multijunction-Devices
- Messtechnik und Charakterisierung für Materialverbünde (z. B. Glas/Folie)
- O&M-Strategie für PV-Anlagen-Monitoring inkl. zerstörungsfreie Outdoor-Messtechnik
- Minimierung des O&M-Serviceaufwands, automatisierte Fehlerlokalisierung/-diagnostik

THEMEN | AG 5

- AG 5 – 1. Entwicklung von Messtechniken und -methoden für die gesamte Wertschöpfungskette (mW->GW)
- AG 5 – 2. Aufklärung von Degradationseffekten über die gesamte Wertschöpfungskette
- AG 5 – 3. Ökonomie von PV-Systemen
- AG 5 – 4. Pränormative Forschung zur Qualitätssicherung in der Energiewende

Mentoren AG 5: Prof. Dr. Christoph Brabec und Dr. Peter Fath

■ ERGEBNISSE

Wertschöpfungsstufenübergreifende Big-data-basierte Datenanalyse (Zeitskala: drei bis fünf Jahre) und Ansätze für die Nutzung dieser Daten (Zeitskala: mehr als fünf Jahre). Messmethoden sollen auf allen Ebenen mit minimaler Messunsicherheit und -zeit automatisiert und zerstörungsfrei sein. Erfolgreiche Methoden sollen auf anderen Ebenen nutzbar werden (Zeitskala: drei bis fünf Jahre). Normung wird bereits auf der Ebene von Forschung und Entwicklung initiiert (Zeitskala: mehr als drei Jahre).

■ ART DER FORSCHUNG

Es wird eine Kombination aus Vorlaufforschung, angewandter Forschung sowie Pilot- und Demonstrationsprojekten benötigt. In der Vorlaufforschung werden etwa Messmethoden für bislang nicht zugängliche Probleme untersucht oder Simulationsanalysen mittels First-Principle-Methoden durchgeführt. Die angewandte Forschung widmet sich der Entwicklung mobiler Messmethoden, dem Machine-Learning für Qualitätssicherung und Produktion, automatisierter Datenanalyse, der Integration von Simulation in Messmethoden, der Automatisierung von Labormethoden für Hochdurchsatz sowie der Präzisionstechnik für Referenzmessungen. Als Pilot- bzw. Demonstrationsprojekt steht Industrie 4.0 im Mittelpunkt: Vernetzte Produktion über mehrere Wertschöpfungsstufen, O&M-Strategien für PV-Anlagen der Zukunft inkl. Monitoring auf Einzelmuldskala.

AG 5 – 2. Aufklärung von Degradationseffekten über die gesamte Wertschöpfungskette

Es werden Degradation/Alterung von Zellen, Modulen, Komponenten und Systemen untersucht sowie Methoden zur Verbesserung der Lebensdauer(prognose) von PV-Elementen entwickelt. Dabei sollen sowohl differenzierte Modelle zu Standort- und Klimaeinflüssen als auch neue Alterungsmethoden entwickelt und etabliert werden.

■ MOTIVATION

Die hohe Innovationsdynamik in der PV erfordert die intensive Analyse von Alterungsprozessen und Wechselwirkungen in neuen Materialien, auch im Hinblick auf Märkte mit extremen Klimata. Durch Aufklärung von Degradationseffekten kann die Qualitätssicherung verbessert werden, Kostensenkung und Akzeptanz der PV können vorangetrieben werden. Produktionsprozesse und die Produktqualität können gezielt verbessert werden, wenn Degradation und ihre Ursachen verstanden sind. Eine gesicherte Aussage zur Lebensdauer von PV-Systemen wirkt sich direkt auf Bankability und ROI des Systems aus. Somit kann diese zu einer Dynamisierung des PV-Marktes durch minimiertes Investitionsrisiko und somit zu Arbeitsplätzen, Wachstum und CO₂-Reduktion führen. Ein detailliertes Verständnis der Degradation ermöglicht zudem die Entwicklung von zielgerichteten und effizienten beschleunigten Laborprüfungen für neue Materialien und Technologien. Eine unvollständige Kenntnis der Degradation stellt für Hersteller ein hohes Risiko dar und bremst Innovation.

■ FORSCHUNGSINHALTE

- Entwicklung von physikalischen Modellen für Degradationsmechanismen
- Methoden zur Klassifikation, Separation, Bewertung metastabiler Materialzustände
- Entwicklung von standortspezifischen Alterungstests und -vorhersagen
- Quantitative und mikroskopische Analyse von Alterungsursachen
- Weiterentwicklung beschleunigter Prüfungen für etablierte und neue Technologien
- Extrem beschleunigte Alterung („X-ALT“; Stunden statt Monate)
- Zerstörungsfreie und kombinierte Alterungsmethoden (UV/Bestromung/Damp-Heat etc.)

- Messmethodik für die Alterung
- Modellierung/Analyse von Komponenten- und Material(verbund)versagen

■ ERGEBNISSE

Neue Methoden (Zeitskala: drei bis fünf Jahre) zur beschleunigten Alterung sowie das Verständnis (Zeitskala: mehr als drei Jahre) der Alterungs-/Degradationsmechanismen vom System bis zum Material. Insbesondere werden schnellere und realistischere Alterungsmethoden entwickelt (Zeitskala: drei bis fünf Jahre). Standortspezifische Lebensdauerprognosen durch Verständnis des Klimaeinflusses auf die Alterung (Zeitskala: mehr als fünf Jahre).

■ ART DER FORSCHUNG

Es handelt sich sowohl um Vorlauftforschung als auch angewandte Forschung sowie Pilot- bzw. Demonstrationsprojekte. In der Vorlauftforschung werden Versagensanalysen auf Materialebene, extrem beschleunigte Alterung „X-ALT“ sowie Modellbildung genutzt. Die angewandte Forschung setzt auf neue Alterungsmethoden, standortspezifische Alterungsanalyse und Modellierung sowie die Entwicklung zerstörungsfreier Messmethodik. Als Pilot- bzw. Demonstrationsprojekt werden Netzwerke weltweiter (verschiedene Klimata) vergleichbarer Anlagen etabliert um vergleichende Experimente zu ermöglichen.

AG 5–3. Ökonomie von PV-Systemen

Für eine fundierte Entscheidungsgrundlage von Investoren werden die wesentlichen technologischen Einflussfaktoren der Ökonomie von PV-Systemen zuverlässig quantifiziert.

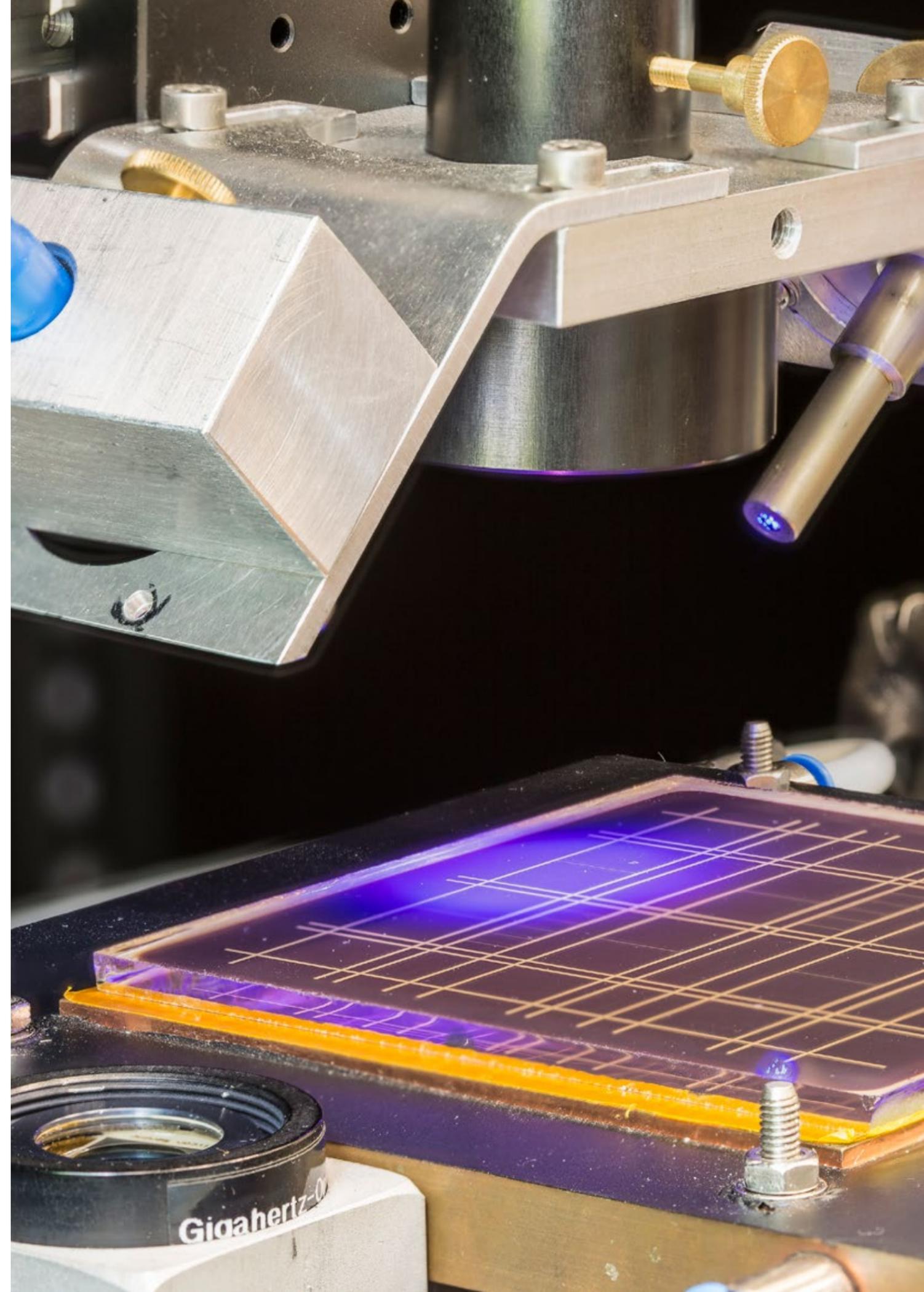
■ MOTIVATION

Die Umsetzung der Energiewende in Deutschland erfordert ca. 150–200 Gigawatt installierte PV-Leistung, mit Investitionen von über 100 Milliarden Euro. Jedes Prozent Messunsicherheit in der LCOE (Levelized Cost Of Energy) führt dabei zu einer finanziellen Unsicherheit für die privaten Investitionen von einer Milliarde Euro. Die genaue Kenntnis der LCOE ist ein wichtiger Faktor für die Energiewende und für die Mobilisierung der notwendigen privaten Investitionen. Die Prognose des Ertrags von PV-Systemen über ihre Lebenszeit verlangt eine genaue Abschätzung der Einstrahlung und klimatischer Bedingungen sowie der Performance und

Degradation von PV-Modulen und Komponenten im realen Betrieb. Eine Präzisierung der Prognosemodelle zur Senkung der Investitionsrisiken und der LCOE ist erforderlich. Präzise Prognosen erlauben eine vergleichende Bewertung alternativer PV-Technologien und die Potenzialabschätzung technischer Innovationen. Die Entwicklung und Markteinführung neuer Zell- und Modulkonzepte wie passivierte Kontakte oder Perowskite wird erleichtert. Damit deutsche Hersteller auch internationale Märkte bedienen können, sind die Prognosemodelle auf die besonderen Anforderungen sonnenreicher Klimata auszuweiten.

■ FORSCHUNGSINHALTE

- Präzise Charakterisierung und Prüfung von Zellen, Modulen und Komponenten unter betriebsrelevanten Bedingungen
- Akkurate Vorhersage des Energieertrags unter verschiedenen Klimabedingungen, inkl. Einstrahlungssummen, Soilingverluste, Degradationsverluste
- Fundierte Vorhersage des Energieertrags von neuen Technologien, wie etwa bifazialen PV-Modulen, Stapelzellen, Perowskite, etc.
- Untersuchung/Quantifizierung der Unsicherheiten/Fehlerquellen in der Ertragsprognose sowie im Monitoring
- LCOE-Betrachtungen von PV-Systemen mit Speicher
- Neue Ansätze und Methoden zum Monitoring, inkl. modulgenaues PV-Monitoring bzw. Entwicklung multifunktionaler Solarmodule (u. a. Leistungsoptimierung)
- LCOE-optimierte Moduldesigns (u. a. Modulgröße, -spannung)
- Neue Ansätze für die Reduktion der Betriebskosten, z. B. Ferndiagnose
- Life Cycle Analysis für verschiedene Technologien, inkl. end-of-life-Management
- Wirtschaftliche Aspekte des Recyclings von Solarmodulen
- CoO (Cost of Ownership)-Analysen aller gängigen PV-Technologien, Bewertung der CoO neuer Technologien (begleitend in Zusammenarbeit mit dem VDMA)



■ ERGEBNISSE

Das Ziel der Forschungsaktivitäten ist die Quantifizierung der technischen, technologischen und wirtschaftlichen Parameter von PV-Systemen. Für Solarmodule im Stand der Technik erfolgt dies nach ca. zwei Jahren, für neue Konzepte beträgt die Zeitskala ca. vier Jahre.

■ ART DER FORSCHUNG

Die Forschung ist im Wesentlichen angewandt, sie dient der Methodenentwicklung und -validierung und beinhaltet Monitoringaktivitäten in verschiedenen Klimaregionen (national und international). Die neuen Ansätze zum Anlagenmonitoring werden an realen Systemen entwickelt.

AG 5 – 4. Pränormative Forschung zur Qualitätssicherung in der Energiewende

In diesem Bereich sollen Forschungsarbeiten zur Einführung neuer Charakterisierungs- und Prüfmethoden und zu innovativen Produkten (Mess- und Prüfgeräte) durchgeführt werden, die den Schritt von der Laborfertigung zur Massenproduktion beschleunigen und Risiken in den frühen Phasen der Entwicklung identifizieren und reduzieren.

■ MOTIVATION

Die Erfahrung insbesondere in der PV zeigt, dass eine unverzichtbare Voraussetzung für die Bankability, d. h. die Finanzierungsfähigkeit von mittleren und großen PV-Kraftwerken durch Banken, die Zertifizierung nach internationalen Normen ist. Hierdurch wird den Investoren eine vergleichende Bewertung unterschiedlicher Geschäftsmodelle ermöglicht. Zur Minimierung von Verwertungsrisiken muss die Normung bereits in der Phase von Forschung und Entwicklung berücksichtigt werden, da sie einen längeren internationalen Abstimmungs- und Konsensprozess erfordert. Durch die stärkere Einbindung deutscher Institutionen kann die Normung im Sinne deutscher Hersteller beeinflusst werden. Somit können der Technologietransfer und die Verwertung von Forschungsergebnissen verbessert werden. Insgesamt führt das zu einer Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit deutscher Unternehmen am Weltmarkt. Die pränormative Forschung unterstützt also die Industrialisierung neuer technologischer Konzepte, ermöglicht eine effektivere und effizientere Qualitätssicherung („Made in Germany“) und führt so zu einer Reduktion der LCOE (Levelized Cost Of Energy) durch eine verbesserte

Lebensdauer und Effizienz. Entwicklungen in der Normung, die praxisfern sind und unter Umständen bestimmte Technologien technisch unbegründet benachteiligen, können somit beeinflusst werden.

■ FORSCHUNGSINHALTE

Die Erstellung von Normen erfordert Parameterstudien und Auslotung der Robustheit von Messmethoden zur Qualitätssicherung.

■ ERGEBNISSE

Die Ergebnisse orientieren sich an Vorgehensweisen, wie sie z. B. in ISO 9001 oder ISO TS 16949 vorgegeben sind. Hier wird von der frühesten Phase bei Forschung und Entwicklung die spätere Einsatzmöglichkeit in der Fertigung eingeplant, so dass sie zeitnah als „New Work Item Proposals“ in die internationale Normung eingebracht werden können. Erfahrungsgemäß führt das zu höherer Akzeptanz und einem schnelleren Durchlauf durch das Normungsverfahren.

■ ART DER FORSCHUNG

Es handelt sich um angewandte Forschung zur Bewertung neuartiger Zell- und Modulkonzepte und zur Bestimmung der Zell-, Modul- und Komponentenalterung, mit Statistical Process Control (SPC) usw., sowie um Pilot- bzw. Demonstrationsprojekte mit Langzeit-Feldversuchen weltweit.

Bildnachweis

Titelbild: AndreasWeber/iStock/thinkstock, AG 1: BMWi/Maria Parussel, AG 2: BMWi/Holger Vonderlind, AG 3: BMWi/Holger Vonderlind, AG 4: BMWi/Holger Vonderlind, AG 5: BMWi/Holger Vonderlind

