

# Dünnschichtphotovoltaik – Technologien für die Energiewende



## HZB

Dr. Björn Rau  
bjoern.rau@helmholtz-berlin.de

Dr. Eva Unger  
eva.unger@helmholtz-berlin.de

## FZ Jülich

Prof. Dr. Thomas Kirchartz  
t.kirchartz@fz-juelich.de

## Fraunhofer IEE (vorm. IWES)

Dr. Norbert Henze  
norbert.henze@iee.fraunhofer.de

## KIT

PD Dr. Alexander Colsmann  
alexander.colsmann@kit.edu

## ZAE Bayern

Dr. Andreas Baumann  
andreas.baumann@zae-bayern.de

## ZSW

Prof. Dr. Michael Powalla  
michael.powalla@zsw-bw.de

Dr. Friedrich Kessler  
friedrich.kessler@zsw-bw.de

## 1. Einleitung

Photovoltaik (PV), also die direkte und emissionsfreie Erzeugung von elektrischer Energie aus Sonnenlicht, hat in den letzten Jahrzehnten weltweit ein rasantes Wachstum erfahren. So stieg in Deutschland die durch PV-Anlagen installierte Leistung bis Ende 2016 auf etwa 41 GWp und weltweit auf über 320 GWp. Sie entspricht einem Anteil am Nettostromverbrauch in Deutschland von etwa 6,9% bzw. weltweit von etwa 1,3% [1]. Eine wesentliche Grundlage für dieses Wachstum war und ist die stete Verbesserung von Technologien, Prozessen und Produkten insbesondere in Hinblick auf Effizienz und Kosten der Solarmodule und der weiteren systemseitigen Komponenten. Dies zeigt sich beispielsweise bei den Preisen für Solarmodule, die in einem Zeitraum von ca. 30 Jahren eine Reduktion um Faktor 53 auf 0,44 €/Wp im Jahr 2016 erfuhren. [1] [2]

Ermöglicht wurde die Entwicklung der PV vor allem durch eine intensive, auch öffentlich geförderte Zusammenarbeit von Forschung und Industrie sowie richtungsweisende politische Rahmenbedingungen (z. B. Einspeisevergütungen).

Technologisch gesehen, ist das Kosteneinsparpotenzial für solaren Strom auch weiterhin sehr groß. Neben zu erwartenden Skalierungseffekten in der Massenproduktion und Reduktion der Systemkosten sind technische Innovationen der Treiber für weiteres Wachstum der Photovoltaik. Dabei werden für das Gelingen der Energiewende neben klassischen PV-Kraftwerken auch PV-Anlagen im Fokus stehen, die im urbanen Raum, z. B. in Bauwerken, integriert sind und vor Ort dezentral und emissionsfrei Strom erzeugen.

Der überwiegende Teil der verwendeten Solarmodule beruht heutzutage auf kristallinen Silizium-solarzellen. Ihr Anteil an der Gesamtproduktion lag im Jahr 2016 bei etwa 94%. Der Marktanteil der sogenannten Dünnschichtmodule betrug dagegen nur etwa 6%. [1]

Schwerpunkt des *Technologieberichtes Photovoltaik* ist dementsprechend auch die kristalline PV, deren Stand in einem separaten Beitrag diskutiert wird. Im Rahmen dieses Artikels werden im Folgenden Dünnschichttechnologien diskutiert, die zwei zentrale Herausforderungen des 6. Energieforschungsprogramms der Bundesregierung adressieren: Erhöhung des Solarzellen-Wirkungsgrades und Reduzierung der Herstellungskosten [3].

## 2. Dünnschichtsolarmodule – etablierte Technologien

Dünnschichtsolarmodule sind Photovoltaikmodule, bei denen sehr dünne photoaktive Schichten auf Trägermaterialien, wie z. B. Glas oder Folien, aufgebracht wurden. Diese Schichten sind im Vergleich zu klassischen, Wafer-basierten Solarzellen etwa um den Faktor 50 bis 100 (im Fall organischer PV sogar bis Faktor 1000) mal dünner und bieten dadurch neben der Materialersparnis vor allem Vorteile in der Herstellung und der Gestaltung der Module. So kommen in der Produktion kostengünstige Verfahren zur Beschichtung von großen Flächen zum Einsatz (z. B. analog zur Architekturglasbeschichtung bzw. im Rolle-zu-Rolle-Verfahren). Inline-Produktionstechnologien ermöglichen eine voll integrierte Herstellung, an deren Anfang das Substrat, beispielsweise das Glas/die Folie, und an deren Ende das verkapselte Modul steht.

Auch die elektrischen Eigenschaften der Dünnschichtmodule bieten bestimmte Vorteile gegenüber der klassischen Konkurrenz. Ein niedriger Temperaturkoeffizient<sup>1</sup> und eine vergleichsweise gute Energieausbeute bei niedrigen Bestrahlungsstärken ermöglichen gute Leistungserträge, insbesondere gemittelt über die Jahreszeiten und in Regionen mit einem hohen Anteil an indirekter (diffuser) Einstrahlung [4].

Die Herstellungstechnologien für Dünnschichtmodule erlauben die Beschichtung von verschiedenen Substratformen, sodass „maßgeschneiderte“ und sogar mechanisch flexible Module möglich sind. Gleichzeitig lassen sich Transparenz und Farbe variieren. Damit eignet sich diese Art von Modulen besonders für die Integration in Gebäudehüllen (BIPV – bauwerkintegrierte PV). Während die klassische Solarzellentechnik für das lichtabsorbierende Material ausschließlich auf den Halbleiter Silizium zurückgreift, kommen in den Dünnschichttechnologien verschiedene organische und anorganische Halbleiter und Halbleiterverbindungen zur Anwendung.

Eine Herausforderung für alle Dünnschichttechnologien ist der immer noch vergleichsweise geringere Wirkungsgrad gegenüber den Siliziumwafer-basierten (insbesondere monokristallinen) Solarmodulen. Betrachtet man jedoch die Entwicklung der Solarzel-

<sup>1</sup> Temperaturkoeffizient meint hier die relative Veränderung des Wirkungsgrades bei Änderungen der Temperatur.

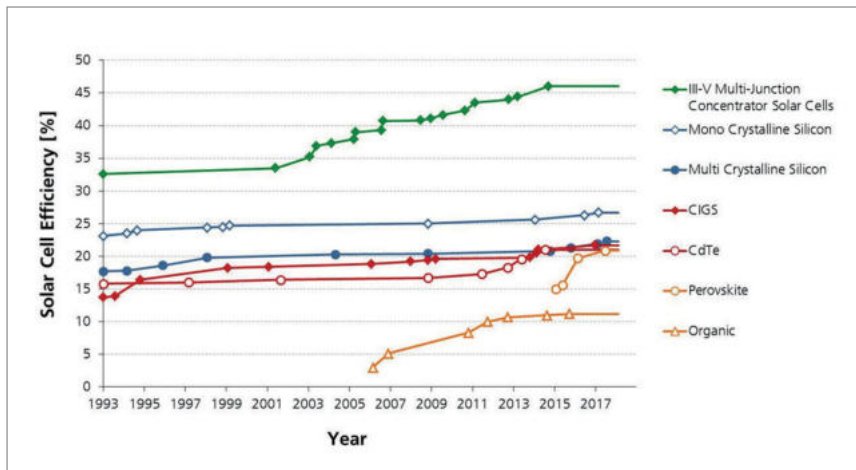


Abbildung 1

**Entwicklung der Solarzellenwirkungsgrade verschiedener Zelltechnologien über die Zeit.** Hier diskutierte Dünnschichttechnologien: in Rot: CIGS und CdTe in Orange: Perovskite und organische Photovoltaik (Stand Feb. 2018, Quelle: [1]).

leneffizienz, insbesondere in den letzten 5-10 Jahren, ist eine deutliche Steigerung des Wirkungsgrades aller Dünnschichttechnologien zu sehen.

► **Abbildung 1** zeigt diese Entwicklung für alle gängigen Solarzellentechnologien [1].

Blau dargestellt sind die klassischen Silizium-Wafer, rot die etablierten Dünnschichttechnologien CIGS (Kupfer-Indium-Gallium-Selenid/Sulfid) und CdTe (Cadmiumtellurid).

Die orangen Kurven zeigen die Entwicklung der aktuell besonders vielversprechenden Perovskite und der organischen Solarzellen, zweier Materialgruppen, die sich insbesondere durch ihre einfache und kostengünstige Herstellungsweise auszeichnen.

Ebenfalls dargestellt (in Grün) sind auch die Wirkungsgrade sogenannter III-V-Stapelzellen, also Solarzellen, die aus Elementen der III. und V. Hauptgruppe des Periodensystems hergestellt wurden (z. B. GaAs, InP) und aus mehreren übereinandergestapelten Solarzellen bestehen. Aufgrund der hohen Herstellungskosten sind diese Materialien für eine flächenhafte, terrestrische Anwendung eher ungeeignet und finden vor allem in der Raumfahrt Anwendung sowie in Konzentrator-Anlagen. Letztere unterscheiden sich technologisch von der klassischen PV und verlangen beispielsweise immer eine direkte Sonneneinstrahlung und somit aufwendige Nachführsysteme. Diese Technologien werden in diesem Artikel nicht weiter diskutiert. ► **Abbildung 1** zeigt

außerdem, dass sowohl CIGS- als auch CdTe-Solarzellen (rote Kurven) die Wirkungsgrade von multikristallinem Silizium (blaue Kurve) im Labor erreicht bzw. übertroffen haben und damit ein sehr hohes Potenzial für effiziente Modultechnologien besitzen.

Während die Solarzellenwirkungsgrade die material-spezifischen Potenziale der einzelnen Technologien andeuten, zeigt ► **Tabelle 1** die Dünnschichtkonzepte, die bereits erfolgreich am Markt vertreten sind. Zum Vergleich sind auch die klassischen Wafer-basierten Technologien aufgeführt.

Der Marktführer CdTe hat hierbei den mit Abstand größten Anteil von etwa 60%. Der höchste Wirkungsgrad für ein CdTe-Modul liegt bei 18,6% und stammt von der Firma First Solar, USA [5], die auch der Vorreiter dieser Technologie ist und den Markt dominiert (installierte Produktionskapazität von 3 GW/a und Ankündigungen von weiteren 2,4 GWp/a bis 2020 [6]). Aufgrund der sehr niedrigen ausgewiesenen Kosten (<1US\$/Wp) kann First Solar auch als der Vorreiter aller Dünnschichttechnologien bezeichnet werden. Als Nachteil dieses Konzeptes wird im Allgemeinen das enthaltene Schwermetall Cadmium betrachtet, welches das Erschließen bestimmter Märkte (z. B. im asiatischen Raum) erschwert oder gar verhindert und das auf lange Sicht ein wirtschaftliches Risiko darstellt.

Technologie	Marktanteil der Technologie an Dünnschicht-PV (2017) [2]	Modulwirkungsgrad (Rekordwerte)
CdTe	60%	18,6% (First Solar) [4]
CIGS	25%	17,5% (Solibro GmbH) [6]
amorphes Si	15%	12,3% (Tokyo Electron) [4]
monokristallines Si		24,5% (Kaneka) [4]
multikristallines Si		19,9% (Trina Solar) [4]

Tabelle 1

**Marktanteil und Modulwirkungsgrad der am Markt am weitesten verbreiteten Dünnschichttechnologien im Vergleich zu klassischen, kristallinen Siliziumsolarmodulen**

Die zweithäufigste Dünnschichttechnologie mit einem Marktanteil von etwa 25% nutzt CIGS. Der Rekordwirkungsgrad für ein solches Solarmodul stammt von der deutschen Firma Solibro und beträgt 17,5% [7]. Marktführer mit Produktionskapazitäten von über 1 GWp/a ist der japanische Hersteller Solar Frontier. Weltweit lag die Produktionskapazität bei etwa 2 GWp/a [4]. Der Fokus der vergleichsweise jungen CIGS-Industrie liegt zum einen auf der Steigerung der Modulwirkungsgrade und damit verbunden auf der Reduktion der sogenannten Total Cost of Ownership (TCO) („Gesamtbetriebskosten“). Im „CIGS white paper“ [4], einer gemeinsamen Initiative der wichtigsten Vertreter der CIGS-Industrie und -Forschung, wird anhand einer klaren Roadmap gezeigt, wie die aktuellen TCO von 0,40 US\$/Wp auf unter 0,25 US\$/Wp gesenkt werden können.

Die amorphe Siliziumtechnologie gilt als die „Pioniertechnologie“ der Dünnschichtphotovoltaik. Sie ist bereits seit Jahrzehnten am Markt. Ausgehend von Kleingeräteanwendungen (Solartaschenrechner, Solaruhren, etc.) hat sie sich hin zu wahlweise flexiblen oder glasbasierten Solarmodulen weiterentwickelt. Der Vorteil dieser Technologie ist die Verfügbarkeit des Halbleiters Silizium und die Ungiftigkeit der verwendeten Materialien. Nachteil ist vor allem der relativ geringe Wirkungsgrad dieses Solarzellentyps. Der Rekordwirkungsgrad für eine amorph/nanokristalline Stapelsolarzelle von 12,7% (AIST) verglichen mit einem Rekordmodulwirkungsgrad von 12,3% (Tokyo Electron) [5] zeigt die Grenzen dieses Materialsystems. Amorphes Silizium hat aktuell (2016) noch einen Marktanteil von 15%, wird aber tendenziell zu Gunsten der anderen genannten Technologien an Bedeutung verlieren.

### 3. Dünnschichtsolarzellen – neuartige Konzepte

Neben den etablierten PV-Technologien werden weltweit noch einige andere vielversprechende Konzepte erforscht und entwickelt.

#### Perowskitesolarzellen

Insbesondere die sogenannten Perowskite erregen seit 2012 großes Interesse in der Fachwelt. Diese Materialgruppe besteht in der Regel aus hybriden organisch-anorganischen Halbleitern, basierend auf Blei oder Zinn sowie Halogenen (Iod, Chlor, Brom). Sie sind mit sehr einfachen Mitteln kostengünstig herzustellen. Verifizierte Wirkungsgrade von 22,7% konnten schon demonstriert werden [8].

Durch Änderungen der chemischen Zusammensetzung können Perowskite in ihrer Bandlücke variiert werden [9]. Damit eignen sie sich besonders gut für Stapelzellenkonzepte bei denen die Perowskitesolar-

zelle der Sonne zugewandt ist und den hochenergetischeren, also kurzwelligeren Anteil des Sonnenspektrums absorbiert. Dahinter absorbiert eine Basiszelle (beispielsweise eine klassische Silizium-solarzelle oder eine CIGS-Solarzelle) den langwelligen Teil des Lichtes, den die Perowskitesolarzelle durchlässt. Mit solchen Stapelzellenkonzepten ist es möglich, die theoretischen Wirkungsgradbegrenzungen der verschiedenen Einzelzellenkonzepte zu übertreffen. Erste erfolgreiche Umsetzungen zeigen z.B. eine monolithisch integrierte Perowskit-Silizium-Tandemsolarzelle mit einem stabilisierten Wirkungsgrad von 23,6% [10] und eine sogenannte 4-Terminal-Perowskit-Silizium-Tandem Solarzelle mit sogar 26,7% [11]. Auch reine Perowskite-Dünnschicht-Konzepte, wie z. B. ein 4-Terminal-Perowskit-CIGS-Tandem-Minimodul mit 17,8% konnten schon gezeigt werden [12]. Die zentralen Forschungsthemen bei den Perowskiten sind ihre Langzeitstabilität und die Skalierung der Technologie. Außerdem stehen die weitere Verbesserung des Wirkungsgrades (z. B. durch Analyse der Defektmechanismen) und die Substitution des giftigen und wasserlöslichen Bleisalzes, das im Perowskitkristall verbaut wird, im Vordergrund.

#### Organische Photovoltaik

Eine andere besonders attraktive Solarzellentechnologie basiert auf organischen, also Kohlenwasserstoffbasierten Materialien. Die organische Photovoltaik zeichnet sich vor allem durch mechanisch hochflexible Module, eine große Farbvariabilität und optional eine hohe Transparenz aus. Organische Solarzellen können vollständig aus umweltfreundlichen Materialien hergestellt werden und besitzen eine konkurrenzlos niedrige Energierücklaufzeit von nur wenigen Monaten. Kommerzielle Anwendungen insbesondere im Consumer-Bereich (mobile Elektronik, ...) [13] sowie im Bereich der Bauwerksintegration [14] sind bereits erhältlich. Im Vergleich zu anderen Solarzellenkonzepten ist der Wirkungsgrad organischer Solarzellen derzeit noch geringer (13,2%) [15] und genau wie bei den Perowskiten ist die Langzeitstabilität ein zentrales Thema aktueller Forschungen.

#### Neuer Silizium-basierter Dünnschichtansatz

Neben den oben aufgeführten, neuartigen Materialsystemen wird auch noch ein weiterer, auf Silizium basierender Dünnschichtansatz verfolgt. Dabei wird eine dünne amorphe oder nanokristalline Siliziumschicht auf ein Trägermaterial (üblicherweise Glas) aufgebracht. Im Anschluss wird Laserlicht oder ein Elektronenstrahl über das Material geführt und schmilzt dieses kurzzeitig auf. Im darauffolgenden Erstarrungsprozess kristallisiert das Silizium zu größeren, geordneten Kristallen. Das Ergebnis ist eine dünne (ca. 10 bis 15 µm) Siliziumschicht, deren

elektrische Eigenschaften denen von hochreinem, defektarmen Silizium ähneln. Ein Wirkungsgrad von 14,2% wurde auf diese Weise bereits demonstriert [16]. Dieses Solarzellenkonzept verbindet das Potenzial hoher Wirkungsgrade der Silizium-Wafer-technologie mit den kostengünstigen Vorteilen einer Dünnschichttechnologie. Damit ist es auch besonders vielversprechend für den Einsatz als Basissolarzelle in Stapelzellkonzepten (z. B. in Kombination mit Perowskitsolarzellen).

#### 4. Multikriterienanalyse der Dünnschicht-Photovoltaik

Im Rahmen des Forschungsprojektes „Technologieforschung für die Energiewende“ wurden die einzelnen Technologiefelder einer Multikriterienanalyse unterzogen. Im Folgenden wird nun die Dünnschicht-PV hinsichtlich ausgewählter Kriterien dieser Analyse beschrieben.

#### Kriterium 2 Forschungs- und Entwicklungsrisiken

Die hier bereits aufgeführten Dünnschichttechnologien befinden sich in verschiedenen Entwicklungsstadien. Zur Einordnung wird das international verwendete Konzept der Technology Readiness Level (TRL) verwendet. ► *Abbildung 2* zeigt die einzelnen Technologien bezogen auf ihr TRL. Dabei werden die Bezeichnungen aus dem Forschungsbericht beibehalten. Es ist zu beachten, dass bei allen Ansätzen die Einordnung bis in hohe TRL auch beinhaltet, dass Forschungsfragen auf niedrigerem TRL bestehen. Die bereits diskutierten, vielversprechenden Perowskite wurden im Technologiebericht an dieser Stelle nicht separat aufgeführt. Ihre Zuordnung fließt je nach Anwendungsziel zum einen in „A2 Stapelzellen auf c-Si und Module“ und in „A3 Dünnschicht-Si auf Glas, GaAs, ...“ mit ein.

Die Einordnung der Technologien hinsichtlich bestehender Risiken für Forschung und Entwicklung (F&E) ist in ► *Abbildung 3* dargestellt.

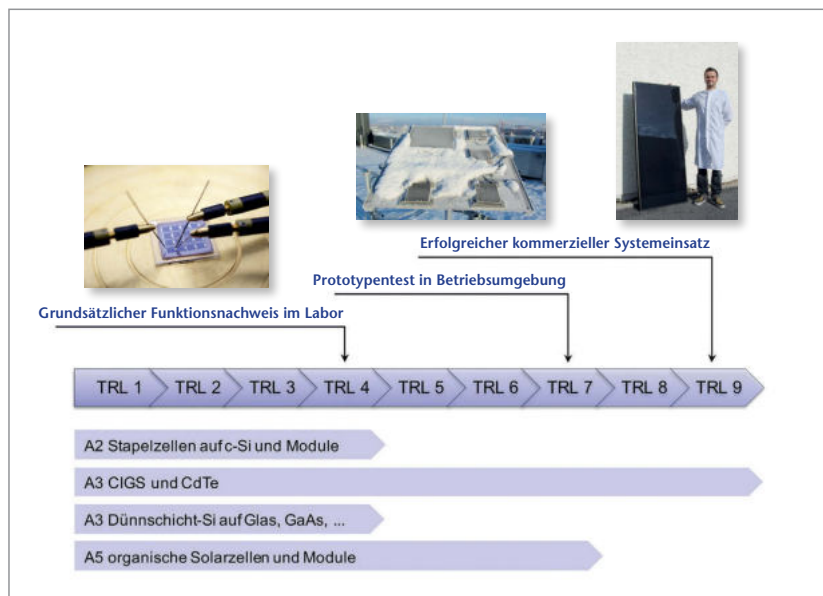


Abbildung 2  
**Technology Readiness Level (TRL)**  
der verschiedenen Dünnschichttechnologien

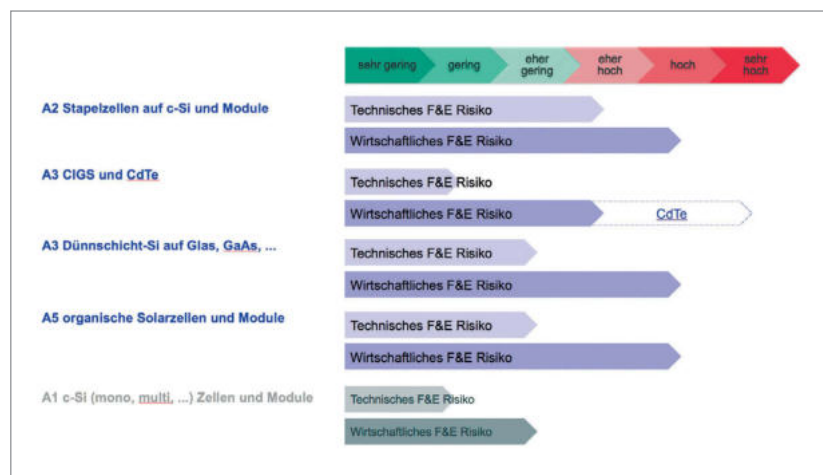


Abbildung 3  
**Risikobewertung**  
Bewertung der verschiedenen Dünnschichttechnologien hinsichtlich bestehender technischer und wirtschaftlicher Risiken für F&E im Vergleich zur kristallinen Siliziumtechnologie

Es wurden sowohl das technische als auch das wirtschaftliche F&E Risiko bewertet.

Das technische Risiko bezeichnet dabei die Einschätzung inwieweit ein Konzept aus technischen Gründen nicht erfolgreich sein könnte. Dazu zählen beispielsweise Fragen der Materialstabilität, Skalierbarkeit, material- oder prozessspezifischer Limitierungen. Ein geringes Risiko drückt dabei eine eher geringe Wahrscheinlichkeit aus, dass eine Entwicklung am Ende technisch nicht umsetzbar sein könnte. Ein hohes Risiko sieht technische/technologische Gründe für ein Scheitern eines Ansatzes als sehr wahrscheinlich an.

Das wirtschaftliche Risiko beinhaltet vor allem marktspezifische Aspekte, wie allgemeine Marktentwicklungen, Ressourcenverfügbarkeit, wirtschaftspolitische Rahmenbedingungen und anderes. Exemplarisch sei hier auf die wirtschaftlichen Risiken für CIGS und CdTe eingegangen. Obwohl beide Technologien bereits am Markt etabliert sind, müssen sie sich gegen eine dominante kristalline Siliziumtechnologie behaupten. Hier ist beispielsweise eine offene Frage, inwieweit CIGS seine Vorteile für BIPV-Technologien nutzen kann. Ein weiteres Thema sind mögliche Restriktionen hinsichtlich der Verwendung von Schwermetallen (z. B. Cd). Verschärfende (z. B. europäische) Richtlinien könnten hier einen Einfluss haben. Zum Vergleich ist in der Abbildung auch die Einschätzung für kristallines Silizium angegeben.

### Kriterium 3 Marktpotenziale

Photovoltaik hat in den vergangenen Jahren ein sehr starkes Wachstum erfahren. So betrug zwischen den Jahren 2000 und 2015 die jährliche Wachstumsrate der weltweiten PV-Installationen 42%. Der Anteil der PV an der weltweiten Stromproduktion beträgt aktuell rund 1% (235 TWh) und in Deutschland rund 7% (38,4 TWh). Allgemein wird der PV auch weiterhin ein starkes Wachstum vorhergesagt. Studien gehen davon aus, dass zukünftig ein deutlicher Anstieg des Anteils der PV an der weltweiten Stromerzeugung auf einen Anteil von 10% bis 25% zu verzeichnen sein wird [2].

In dieser Entwicklung wird sich die Dünnschichtphotovoltaik auch weiterhin in starker Konkurrenz zu den etablierten kristallinen Silizium-Technologien befinden, bei denen ebenfalls eine Weiterentwicklung hin zu effizienteren und kostengünstigeren Produkten erwartet werden kann. Es ist daher nicht davon auszugehen, dass die aktuellen Dünnschichtkonzepte auf dem klassischen Solarstrommarkt (Freiflächenanlagen und Dachinstallationen) die kristallinen Technologien verdrängen werden oder ihnen kurz- bis mittelfristig Marktanteile abringen können. Jedoch bieten gerade Stapelzellenkonzepte in Verbindung

von Dünnschichttechnologien wie Perowskite mit kristallinen Siliziumsolarzellen auch in diesem Markt ein hohes Potenzial.

Aufgrund ihrer schon eingangs genannten spezifischen Eigenschaften haben die Dünnschicht-PV-Technologien aber inhärente Vorteile, die ihnen abseits des klassischen Solarstrommarktes vor allem andere Anwendungsfelder erschließen werden. Neben dem geringen Gewicht, das sie speziell auch für mobile Anwendungen interessant macht, ergeben sich vor allem aus der Möglichkeit der vielfältigen Gestaltung in Form, Farbe und Transparenz favorisierte Einsatzfelder mit großem Marktvolumen, wie bei der Bauwerkintegration oder auch bei mobilen Anwendungen. Im Hinblick auf die Gestaltung der Energiewende und die ambitionierten aber auch erforderlichen Ziele kommt der BIPV eine besondere Rolle zu. Allein in Deutschland gibt es etwa 2000 km<sup>2</sup> für PV-Anwendungen nutzbare Dach- und Fassadenflächen. Dies entspricht einem Anteil von nur 5% aller bebauten Flächen und bietet gleichzeitig das Potenzial bis zu 30% des Stromverbrauches in Deutschland durch BIPV zu decken [17].

Somit ist speziell für die Dünnschichtphotovoltaik ein Marktsegment für solaren Strom klar zu identifizieren.

### Kriterium 7 Inländische Wertschöpfung

Für die Beurteilung der inländischen Wertschöpfungskette der Dünnschichtphotovoltaik gilt es, die gesamte Wertschöpfungskette zu betrachten. Allgemein kann sie in zwei Abschnitte unterteilt werden. Der sogenannte „Upstream“ beschreibt die Produktion der Solarmodule vom Anlagen- und Maschinenbau über die Erzeugung der Ausgangsprodukte und Hilfsstoffe, die Solarzellen- bzw. Modulherstellung bis hin zu den erforderlichen Systemkomponenten wie z. B. Wechselrichter und Gestelle.

Der sogenannte „Downstream“ beinhaltet darüber hinaus die erforderlichen Dienstleistungen wie Installation, Monitoring und Wartung der PV-Anlagen.

Zwar ist der Upstream stark internationalisiert, jedoch kommt den deutschen Maschinenbauern der Photovoltaik eine besondere Rolle zu. Sie liefern mit einem Exportanteil von knapp 90% Produktionsanlagen und komplette „Turnkey-Systeme“ (= schlüsselfertige Produktionssysteme) weltweit [2]. Im CIGS-Bereich sind dies beispielsweise Manz CIGSfab und Solibro H-Tech, die zwar mit asiatischen Eigentümern agieren, aber auch weiterhin in Deutschland für den weltweiten Markt entwickeln und produzieren. Dünnschicht-PV-Modulhersteller wie Avancis und Solibro haben ebenfalls chinesische Eigentümer, produzieren aber ebenso in Deutschland. Sowohl die Maschinenbauer als auch die Modulhersteller haben

eine sehr starke internationale Konkurrenz aus dem asiatischen und dem US-amerikanischen Bereich vor allem für CIGS und CdTe. Trotzdem bilden die deutschen Standorte weiterhin wichtige Chancen für den heimischen Markt. Das gilt insbesondere für Hersteller, die BIPV-Produkte anbieten. In diesem Sektor ist die Nähe zum Markt eine wichtige Erfolgskomponente, da hier kundenspezifische Lösungen im Vordergrund stehen. In der organischen Photovoltaik agieren der Weltmarktführer Merck KGaA (Herstellung organischer Halbleiter) und die Solarmodul-Hersteller OPVius und Heliatek in Deutschland. Auch besitzt Deutschland eine sehr aktive und hochqualifizierte Forschungsinfrastruktur im Bereich nahezu aller Dünnschichtphotovoltaik-Technologien.

Im Downstream kann von einem rein nationalen Markt ausgegangen werden. Hier spielen vor allem die förderpolitischen und richtlinienbezogenen Randbedingungen die entscheidende Rolle für die Installationsbetriebe. Demgegenüber kommen Monitoring und Wartung bestehender Anlagen mehr und mehr eine wichtige Rolle zu. In Hinblick auf einen vermehrten Ausbau von bauwerksintegrierten PV-Lösungen ist zudem von einem steigenden Marktinteresse an entsprechend spezialisierten Planern auszugehen.

### Kriterium 8 Stand und Trends von Forschung und Entwicklung

Deutschland hat durch seine intensiven Maßnahmen der Marktförderung und der gezielten Förderung von Forschung und Entwicklung maßgeblich zu einem rasanten, weltweiten Wachstum der PV beigetragen. Motor dieser Entwicklung waren und sind die vielen Aktivitäten nationaler Forschungseinrichtungen und insbesondere ihre enge Vernetzung mit der deutschen und der internationalen Industrie entlang der gesamten Wertschöpfungskette (Upstream). So arbeiten diese auf allen Feldern der Dünnschicht-solarzellenentwicklung von Materialsynthese und -analyse, über die Identifizierung von Defektmechanismen bis hin zu Solarzellen und -modulen. Die oftmals sehr enge Verbindung mit industriellen Partnern ermöglicht dabei die anwendungsnahe Entwicklung/ Weiterentwicklung von solaren Bauelementen und Systemen. Auf den aktuellen Stand und die Trends der Dünnschichtphotovoltaik wurde bereits intensiv in den Abschnitten 2. und 3. eingegangen.

## 5. Zusammenfassung

Die Dünnschichtphotovoltaik hat zwar aktuell nur einen geringen Anteil an der weltweiten Stromproduktion, sie ist jedoch trotzdem weit mehr als ein Nischenmarkt. Inhärente Vorteile wie die hohe Produktivität bei der Herstellung auf großen Flächen, die Ästhetik, die Flexibilität in Form, Transparenz und Farbe sowie vergleichsweise gute Stromausbeuten bei schwacher Lichteinstrahlung oder Verschattungen ermöglichen ein breites Anwendungsfeld neben der klassischen, kristallinen Siliziumtechnologie. Insbesondere im Consumer-Bereich, bei mobilen Anwendungen und vor allem bei der Bauwerksintegration besteht zukünftig ein hohes Marktpotenzial. Dünnschichttechnologien wie Perovskitsolarzellen spielen eine zentrale Rolle für zukünftige hocheffiziente Stapelzellenkonzepte in Kombination mit kristallinem Silizium. Die aktuellen Themen der Forschung und Entwicklung sind u. a. die Erhöhung des Solarzellen- bzw. Modulwirkungsgrades, die Kostenreduktionen in der Herstellung und teilweise die Langzeitstabilität der Materialien und Bauelemente. Verschiedene Bauelemente und Konzepte für Anwendungen jenseits klassischer Freiflächenanlagen sind dabei ein zentrales Thema.

## Referenzen

- [1] Fraunhofer ISE, *Photovoltaics Report*, 2018.
- [2] S. Phillips, A. W. Bett, B. Rau und R. Schlattmann, „Technologiebericht TF1.3 Photovoltaik (in Technologien für die Energiewende),“ 2017.
- [3] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), „Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung – Das 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung,“ 2011.
- [4] v. Autoren, „CIGS White paper,“ 2015.
- [5] M. Green und andere, „Solar cell efficiency tables (version 50),“ *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2017.
- [6] First Solar, „Press release,“ 5. Dezember 2017.
- [7] Solibro GmbH, „Pressemitteilung,“ Februar 2018.
- [8] M. Green und andere, „Solarcell efficiency tables (version 51),“ *Progress in Photovoltaics: Research and Application*, 2017.
- [9] E. Unger und andere, „Roadmap and roadblocks for the band gap tunability of metal halide perovskites,“ *J. Mater. Chem. A*, Bd. 5, pp. 11401-11405, 2017.
- [10] K. A. Bush und andere, „23.6%-efficient monolithic perovskite/silicon tandem solar cells with improved stability,“ *Nature Energy*, p. 17009, 2017.

- [11] C. O. Ramirez Quiroz und andere, „Balancing electrical and optical losses for efficient 4-terminal Si-perovskite solar cells with solution processed percolation electrodes,“ *J. Mater. Chem. A*, Nr. 6, pp. 3583-3592, 2018.
- [12] U. Pätzold und andere, „Scalable perovskite/CIGS thin-film solar module with power conversion efficiency of 17.8%,“ *J. Mater. Chem. A*, Nr. 5, pp. 9897-9906, 2017.
- [13] D. Landerer und andere, „Solar Glasses: A Case Study on Semi-transparent Organic Solar Cells for Self-Sustainable, Light-Weight and Mobile Smart Devices,“ *Energy Technol.*, Bd. 5, pp. 1936-1945, 2017.
- [14] S. Berny und andere, „Solar Trees: First Large-Scale Demonstration of Fully Solution Coated, Semitransparent, Flexible Organic Photovoltaic Modules,“ *Adv. Sci.*, Bd. 3, p. 1500342, 2016.
- [15] Heliathek, „Pressemitteilung,“ 2016.
- [16] C. T. Trinh und andere, „Potential of interdigitated back-contact silicon heterojunction solar cells for liquid phase crystallized silicon on glass with efficiency above 14%,“ *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, Bd. 174, pp. 187-195, 2018.
- [17] R. Haselhuhn, Photovoltaik: Gebäude liefern Strom., B. F. K. BINE Informationsdienst, Hrsg., Fraunhofer IRB Verlag, 2010.