

Dünnschicht-Photovoltaik entlang der Wertschöpfungskette: Status und Strategien der FVEE-Mitgliedsinstitute



HZB

Prof. Dr. Martha Ch. Lux-Steiner
lux-steiner@helmholtz-berlin.de

FZ Jülich

Dr. Jürgen Hüpkas
j.huepkas@fz-juelich.de

Bosch Solar

Axel Jasenek
axel.jasenek@de.bosch.com

ISFH

Dr. Sarah Kajari-Schröder
kajari-schroeder@isfh.de

Fraunhofer ISE

Dr. Stefan Reber
stefan.reber@ise.fraunhofer.de

HZB

Prof. Dr. Rutger Schlatmann
PVcomB
rutger.schatmann@helmholtz-berlin.de

ZSW

Dr. Wiltraud Wischmann
wiltraud.wischmann@zsw-bw.de

Im Wettbewerb um die Kostensenkung von Solarstrom hat die Dünnschicht-Photovoltaik dank des höchst effizienten Materialeinsatzes und des minimalen Energieeinsatzes bei der Produktion den größten Kostenvorteil, vorausgesetzt Solarmodule aus der Dünnschichttechnologie erreichen vergleichbare Wirkungsgrade und Lebensdauern wie die Module aus der herkömmlichen kristallinen Silicium-Technologie (basierend auf Siliciumwafern).

Wirkungsgrad

Gemäß theoretischer thermodynamischer Betrachtungen sind die Wirkungsgradanforderungen für alle photovoltaischen Dünnschicht-Solarzellen machbar, die von den Mitgliedsinstituten des Forschungsverbundes entwickelt werden: d. h. mit einem einfachen Zellen-Aufbau, in dem ein Lichtquant der Solarstrahlung ein Elektronen-Loch-Paar erzeugt, sollten Effizienzen über 25% erreicht werden können. Der weltweite höchste Wirkungsgrad, der in der Dünnschichttechnologie bis 2012 realisiert worden ist, liegt bei 20,3%. Er wurde vom ZSW mit der CIS-Technologie erreicht [6]. Beschleunigte Alterungstests versprechen, dass auch die Anforderung der Langlebigkeit erfüllt wird, aber aufgrund der Neuheit dieser Technologien stehen Erfahrungen über 20 Jahre im täglichen Betrieb noch aus.

Materialeinsatz

In der Photovoltaik definiert sich der Begriff der Dünnschicht nicht über die Materialdicke sondern über die Art der Prozessierung. So werden Dünnschicht-Solarzellen meist durch Abscheiden einer Folge von Schichten aus der Gasphase auf ein Trägermaterial hergestellt. Auf das Zersägen von Volumenmaterial wie Siliciumblöcken kann verzichtet werden, und die Solarzellen können schon während ihrer Prozessierung durch dazwischen geschaltete Strukturierungsschritte monolithisch zu Modulen verschaltet werden.

Um Materialeinsatz und Prozesszeiten auf ein Minimum zu trimmen, liegt es nahe, Solarzellen möglichst dünn zu fertigen. Wie dünn diese schließlich sein können, bestimmen u. a. das optische Absorptionsvermögen des Solarzellenbasismaterials – der Absorberschicht – und die Einkopplung des Sonnenlichts in diese Schicht. Aufgrund der Materialauswahl und der optischen Strukturen sind die Dünnschicht-

solarzellen von heute meist viel dünner als ein menschliches Haar, so dass abgesehen von Träger- und Verkapselungsmaterialien in einem 100 Watt Modul nur deutlich weniger als 100 Gramm Material eingesetzt werden müssen.

Neue Einsatzmöglichkeiten

Außerdem eröffnet der Einsatz flexibler Substrate (z. B. Folien oder Bänder auf metallischer bzw. organischer Basis) ein weiteres, einzigartiges Zukunftspotenzial: die Erweiterung der Anwendungsfelder wie beispielsweise die Integration in Textilien oder gewölbte Gebäudekomponenten.

Materialsysteme

Auf der Basis all dieser Betrachtungen beschäftigen sich die FVEE-Mitgliederinstitute mit der Erforschung von Solarzellen aus unterschiedlichen Materialien. Die Silicium-Photovoltaik arbeitet mit Dünnschicht-solarzellen und Photovoltaik-Modulen auf der Basis von kristallinem Silicium (c-Si) sowie von amorphem Silicium (a-Si:H) und mikrokristallinem Silicium ($\mu\text{c-Si:H}$) – einzeln wie auch in Kombination. Andere Materialentwicklungen konzentrieren sich auf Solarzellen auf der Basis von Kupfer-Indium-(Gallium)-Schwefel-Selen-Verbindungen (Chalkopyrit- oder auch CIGS-Solarzelle bzw. CIS-Zellen genannt, wobei je nach chemischer Zusammensetzung S für Schwefel oder Selen stehen kann) und den strukturell verwandten Kupfer-Zinn-Schwefel-Selen-Verbindungen (Kesterit- oder kurz CZTS-Solarzellen genannt).

Technologietransfer

Durch die Hochskalierung von Quadratmeter großen Zellen über Module im Technikums-Maßstab und der quadratmetergroßen Pilotierungsphase bis hin zur großflächigen industriellen Fertigung erfolgt der Technologietransfer von der ersten Erfindung im Labor zur Massenproduktion.

Forschungsstrategien und Entwicklungsschwerpunkte im FVEE

Prioritär gilt es, das hohe Effizienzpotenzial der Dünnschicht-Photovoltaik zu nutzen und dabei skalierbare kosteneffiziente Produktionsprozesse einzusetzen.

Das Institut für Solarenergieforschung in Hameln (ISFH) und das Fraunhofer-Institut für Solare Energie-

systeme (Fraunhofer ISE) setzen dabei die F&E-Schwerpunkte auf Weiterentwicklung ihrer kristallinen Silicium-Dünnschichttechnologie, um das hohe Wirkungsgradpotenzial des kristallinen Siliciums bei gleichzeitiger signifikanter Kostenreduktion durch Materialeinsparungen auszuschöpfen.

Institut für Solarenergieforschung in Hameln (ISFH)

Um den Kostenanteil des Basismaterials und der Kristallisation in siliciumbasierten Solarzellen deutlich zu reduzieren, arbeitet das ISFH an einem sägefrees (kerfless) Verfahren, um c-Si Dünnschicht solarzellen herzustellen. Eine dicke einkristalline Silicium-Scheibe kann im sogenannten porösen Silicium (PSI) Prozess vielfach als Muttersubstrat für die Herstellung epitaktisch gewachsener Silicium-Absorber verwendet werden. In das Muttersubstrat wird vor der epitaktischen Deposition elektrochemisch eine poröse Doppelschicht geätzt. Diese bildet eine Sollbruchstelle aus und erlaubt ein Ablösen der epitaktischen Schicht (Schichttransfer). So können einkristalline Siliciumabsorber mit Dicken unter 50 µm hergestellt werden. Aus diesen können unter Verwendung von Prozessen aus der waferbasierten Photovoltaik Solarzellen hergestellt werden. Am ISFH wurde eine beidseitig kontaktierte Solarzelle mit einer finalen Dicke von 43 µm und einer Fläche von 2 x 2 cm² hergestellt, die einen Wirkungsgrad von 19,1 % aufweist [1] (Abbildung 1).

Die Modulintegration der ultradünnen Solarzellen erfordert die Entwicklung neuartiger Verschaltungstechnologien, die die mechanischen Spannungen in den dünnen Solarzellen minimiert. Hierzu entwickelt das ISFH einen Laserschweißprozess (AMELI – Aluminium-based Mechanical and Electrical Laser Interconnection). Bei diesem Prozess wird die Aluminiummetallisierung auf einer Solarzelle mit einer Alumi-

umfolie zur Verschaltung der Solarzellen mit einem Laser verschweißt. Erste kleine Module erreichten einen Wirkungsgrad auf Zellfläche von 20,4 % [2].

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE)

Das ISE legt seinen F&E-Schwerpunkt bei hocheffizienten c-Si-Dünnschicht-Solarzellen auf Mittel- und Hochtemperaturprozesse mit Fokus auf die chemische Gasphasenepitaxie, um möglichst hohe Schichtqualitäten zu erreichen. Als spezielle wissenschaftlich-technologische Herausforderung steht eine schnelle Schichtformierung, um später in der Massenproduktion durch großen Durchsatz Prozessierungskosten zu minimieren. Neue Beschichtungsanlagen dazu sind gefragt. Zusammen mit interessierten Firmen entwirft und entwickelt das ISE die Anlagen selbst und bringt sie als ProConCVD zur kommerziellen Reife.

Die Verfahrenstechnologie im Labor ist dazu parallel so weit vorangetrieben worden, dass neue Typen von kristallinen Silicium-Solarzellen entworfen und erste Prototypen einer komplett rückseitig kontaktierten Solarzelle wie die EpiWT-Solarzelle (Epitaxy Wrap-Through) realisiert werden konnten. Der präparative Ansatz ist vollständig neu, da dieses Zellenkonzept für Silicium erstmals ein 3D epitaktisches Schichtwachstum durch die Kontaktierungslöcher verlangt. Eine neue 3D-Architektur mit entsprechenden Verfahrensschritten zur monolithischen Verschaltung kristalliner Si-Dünnschichtzellen zu Solarmodulen auf isolierender Unterlage, die in die Prozessierungskette integriert werden kann (Abbildung 2), wurde vom ISE kürzlich patentiert (WO2012168191 (A1) 2012-12-13) [3].

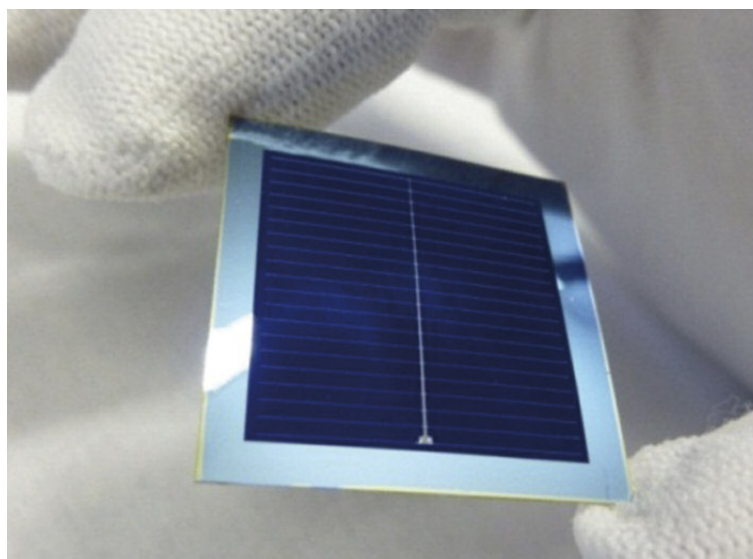


Abbildung 1
Si-Schicht-Transferzelle
mit 19,1% Wirkungs-
grad
(ISFH)

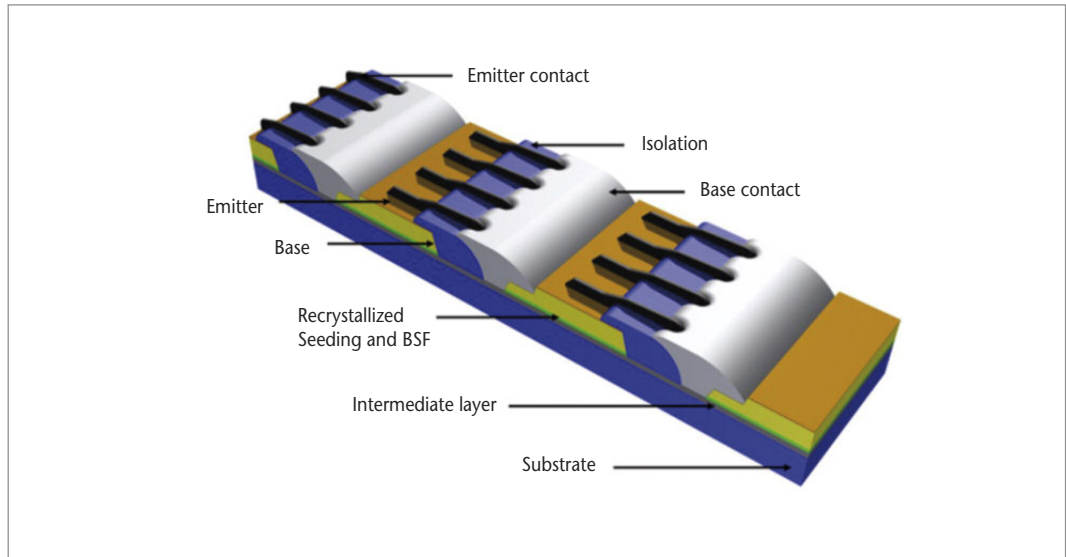


Abbildung 2
 Skizze eines Silicium-Dünnschichtmoduls mit monolithischer Integration [2]
 (Fraunhofer ISE)

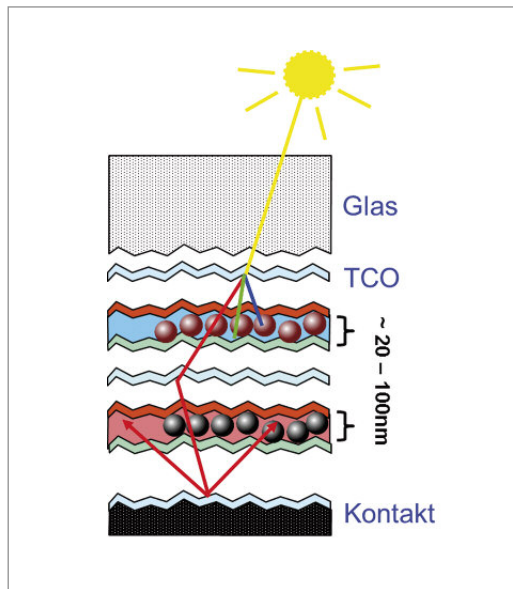


Abbildung 3
 Skizze eines neuen Hocheffizienz-Konzepts:
 Ultradünne Tandemsolarzellen kombiniert mit Partikeln hochabsorbierender Materialien [5]

Forschungszentrum Jülich (Jülich)

Jülich setzt in der Silicium-Dünnschichtphotovoltaik seinen Schwerpunkt in der Materialforschung auf die sogenannten „ungeordneten Halbleiter“. Das sind Materialien, bei denen die periodische Anordnung der Atome über weite Bereiche, wie sie in einem Kristall existiert, nicht mehr vorkommt.

Im Mittelpunkt der Forschung stehen amorphe und mikrokristalline Materialien wie a-Si:H und $\mu\text{-Si:H}$ sowie a/ $\mu\text{-SiGe:H}$, a/ $\mu\text{-SiO:H}$ und a/ $\mu\text{-SiC:H}$. Bei vergleichsweise moderaten Prozesstemperaturen (um 200 °C) werden dünne Schichten dieser Materialien aus gasförmigen Ausgangsstoffen auf Glas-, Metall- oder Kunststoff-Substrate abgeschieden. Zur gezielten Optimierung der photovoltaisch wichtigen Schichteigenschaften haben sich die chemischen Gasphasen-Verfahren (Plasma-Enhanced Chemical

Vapour Deposition und Hot-Wire Chemical Vapour Deposition) besonders erfolgreich erwiesen. Im Vorfeld dazu mussten die Anlagen erst in enger Zusammenarbeit mit der Industrie entwickelt werden.

Um das Sonnenspektrum optimal zu nutzen und in den photovoltaischen Bauelementen höhere Wirkungsgrade zu erzielen, arbeitet Jülich nicht nur an Einfachzellen, sondern verstärkt auch an Stapelsolarzellen. Um diese ultradünn zu gestalten und Prozesszeiten zu kürzen, wird ein neues Solarzellenkonzept (Abbildung 3) erforscht, das nicht nur durch reflektierende und streuende Maßnahmen den effektiven Lichtweg in den Absorbermaterialien verlängert, sondern durch gezieltes Einbringen hochabsorbierender Nanopartikel auch die lokale optische Absorption verstärkt [5].

Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW)

Das ZSW richtet sein Hauptaugenmerk in der photovoltaischen Materialforschung und Solarmodulentwicklung auf die Chalkopyrit-Dünnschichttechnologie. Dabei hat das ZSW einerseits das Ziel, hohe Umwandlungswirkungsgrade zu erreichen und konnte dies in einem statischen CIGS-Koverdampfungsprozess mit einem Wirkungsgrad von 20,3 % für 0,5 cm² große Solarzellen eindrucksvoll nachweisen [6]. Andererseits sollen diese Prozesse industriell umgesetzt werden und müssen daher unter Kostenaspekten auf industrierelevante Prozessführung angepasst werden. Der Transfer einer dynamischen inline CIGS-Koverdampfung führte beim Industriepartner Manz an Modulen einer Größe von 60x120 cm² zu einem Wirkungsgrad von 14,6%.

Weiterführende Themen in der Materialforschung sind darüber hinaus beispielsweise Cadmium-freie Pufferschichten wie Zinkoxysulfid Zn(S,O) oder In-



Abbildung 4
Anlage für Rolle-zu-Rolle-Verfahren für die CIS-Technologie (ZSW)

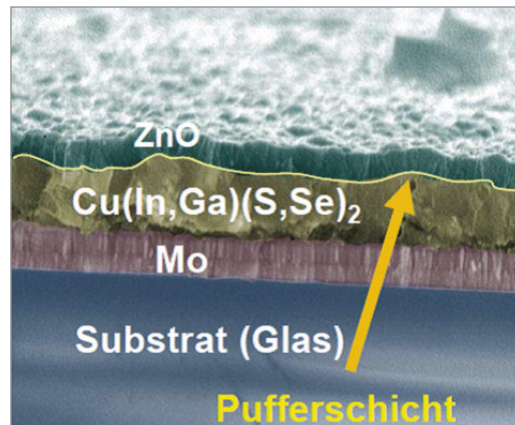
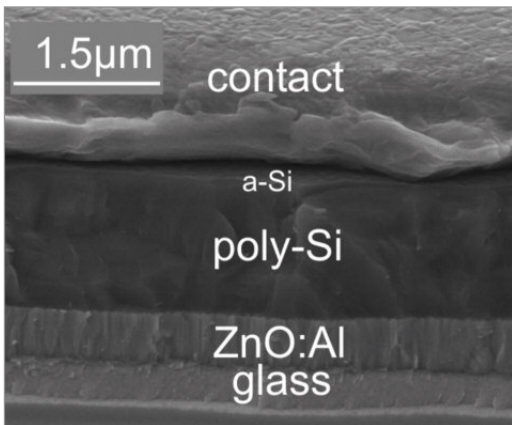


Abbildung 5
Querschnitte von hoch-effizienten Dünnschicht-Schichtsolarzellen
(a) auf Si-Basis
(b) auf Chalkopyrit-Basis

dium-freie Absorbermaterialien wie CZTS. Als Fortentwicklung der klassischen inline Glas-Produktionstechnologie wird das Potenzial von flexiblen Substraten und die damit einsetzbare Rolle-zu-Rolle-Prozesstechnologie (Abbildung 4) evaluiert. Ausgehend von den im Rolle-zu-Rolle-Verfahren aktuell noch eingesetzten vakuum-basierten Prozessen sollen zukünftig vakuumfreie Prozesse etabliert werden.

Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie (HZB)

Das HZB setzt den Schwerpunkt seiner technologieorientierten Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der Dünnschichtphotovoltaik auf hocheffiziente Zellenkonzepte, die bei Temperaturen unterhalb der Schmelztemperatur von Glas in verhältnismäßig kurzen Prozesszeiten realisiert werden können. Dabei hält sich das HZB die Möglichkeit offen, sowohl Silicium als auch Chalkopyrit-Halbleiter und deren Verwandte als Solarzellen-Absorbermaterialien einzusetzen. Die applizierten Beschichtungsverfahren für die photovoltaisch relevanten Schichten sind wiederum komplementär zu denjenigen der FVEE-Partnerinstitute.

Deutlich schneller als die Methode der Gasphasenepitaxie für Si-Dünnschichten ist die Elektronenstrahl-

verdampfung, ein Verfahren, welches das HZB erforscht und zum industriellen Einsatz bringen will. Mit hohen Abscheideraten auf kostengünstigen Substraten wie Glas verspricht dieses Verfahren preislich hochattraktive Produkte. In der Regel sind die Siliciumschichten nach der Abscheidung jedoch amorph und werden je nach Materialanforderung anschließend mit Verfahren wie der Laser- oder Festphasenkristallisation noch kristallisiert. Veränderte Prozessbedingungen führen jedoch direkt zum Wachstum poly-kristalliner Silicium-Schichten. Damit stehen eine Serie von kombinierbaren Prozessschritten für Si-Dünnschichtsolarzellen zu Verfügung (Abbildung 5a).

In der Chalkopyrit-Technologie hat sich das HZB der Hocheffizienz unter ökologisch und ökonomisch optimierten Aspekten verschrieben und verfolgt deshalb die beiden Konzepte Cadmium-freie Tandemzellen und Konzentratorzellen. So betrifft die Weiterentwicklung des konventionellen Zellaufbaus (Abbildung 5b) diese Forschungsansätze:

- für eine verbesserte Ökologie: die Substitution der Cadmiumsulfid-Pufferschicht ohne Einbußen des Wirkungsgrades bei gleichbleibender Zellenarchitektur
- für ein der Einfachzelle überlegenes Tandemkonzept: die Entwicklung einer hocheffizienten Front-

zelle im hochenergetischen sichtbaren Spektralbereich jedoch mit hoher Infrarot-Transparenz

- für ein der Einfachzelle überlegenes Konzentratorkonzept: Solarzellen im Mikrometermaßstab mit integrierter (beispielsweise 100-fach) konzentrierender Optik
- zur Ressourcenschonung (insbesondere von Indium): die Absorptionsverstärkung von ultradünnen Absorberschichten mittels plasmonischer und photonischer Effekte. Effizienzsteigerung um mehr als 20%, Materialersparnisse bis zum Hundertfachen sowie die Einsatzbarkeit verlässlicher skalierbarer Verfahren mit Minutentakt werden als erreichbare Ziele angesehen.

F&E-Randbedingungen für einen erfolgreichen Technologietransfer

Damit erfolgsversprechende Ideen aus den Forschungslabors in der industriellen Massenproduktion ihren Platz finden, bedarf es einer starken Wechselwirkung zwischen Angebot und Nachfrage. Dies gilt auch für die Dünnschicht-Solarzellenkonzepte, die in den Mitgliedsinstituten des Forschungsverbundes identifiziert und mittels Charakterisierung und Modellierung optimiert werden.

Auf Seiten der Forschungsinstitute gilt es, die Machbarkeit wettbewerbsfähiger Produkte mit industriell attraktiven Lösungsansätzen aufzuzeigen. Die Technologien müssen für die industrielle Massenproduktion nachhaltig profitabel sein und die Preise der Rohmaterialien dürfen nicht limitierend sein.

Hilfreiche Voraussetzungen für einen schnellen Fortschritt sind u. a. der Einsatz genügend personeller Ressourcen, die Kontinuität in der wissenschaftlichen und technologischen Kompetenz sowie die Verfügbarkeit verlässlicher Herstellungsverfahren und Analytikmethoden.

Eine enge Zusammenarbeit mit allen interessierten Instituten und Firmen ist eines der zielführendsten Instrumente und wirkt deshalb als Beschleuniger des Technologietransfers.

Die Industrie sucht sich wiederum Forschungspartner mit ausreichender Infrastruktur (z. B. Beschichtungstechniken mindestens bis 30 x 30 cm² und ausreichend Kapazitäten zur Charakterisierung). Die Forschungspartner sollten neben ihrer Grundlagenausrichtung auch auf industrielle Aspekte achten – wie den Einsatz günstiger Ausgangselemente, Optimierung der Materialausnutzung, Skalierbarkeit, Grenzmuster und skalierbare, robuste Prozesse.

Die Industrie erwartet außerdem, dass öffentlich geförderte Institute keine ausschließliche Bindung an einen einzigen Industriepartner aufweisen. Speziell in der Anlagenentwicklung für Dünnschichttechnologie wird erwartet, dass Synergien zwischen Dünnschicht- und Substratbeschichtungstechnologie genutzt werden (z. B. auf Glas).

Einer der wichtigsten Ansprüche zum Erfolg wird in langfristig planbaren politischen Randbedingungen gesehen. Aber auch die Förderung von Verbundprojekten mit mehreren Industriepartnern durch die öffentliche Hand wird als besonders unterstützend angesehen.

Die Beschleunigung von Technologie-Entwicklung und -Transfer in die industrielle Produktion ist heutzutage für die internationale Wettbewerbsfähigkeit essentiell. Dies gilt auch für die Dünnschicht-Photovoltaik. Die Potenziale der Wirkungsgraderhöhung (Zellen & Module) werden weiter von den Instituten ausgeschöpft. Darüber hinaus wird durch die Komplementarität der Forschungsthemen in den verschiedenen FVEE-Instituten ein breiteres Forschungsfeld abgedeckt, von dem alle für die eigenen Technologien lernen können.

Quellenangaben

- [1] J. P. Petermann, D. Zielke, J. Schmidt, F. Haase, E. Garralaga Rojas, and R. Brendel: Prog. Photovolt: Res. Appl., 20:1–5 (2011).
- [2] Schulte-Huxel, Henning; Blankemeyer, Susanne; Bock, Robert; Merkle, Agnes; Kajari-Schröder, Sarah; Brendel, Rolf (2013): Al-Foil on Encapsulant for the Interconnection of Al-Metalized Silicon Solar Cells. In JPV 3 (1), pp. 77–82.
- [3] Patentangaben: Janz, S.; Lindekugel, S.; Reber, S.; Jaus, J.; Schillinger, K., (WO2012168191 (A1) 2012-12-13)
- [4] Smirnov, Vladimir; Lambertz, Andreas; Grootoonk, Björn; Carius, Reinhard; Finger, Friedrich, Journal of Non-Crystalline Solids, Volume 358, Issue 17, 1954-1957, doi:10.1016/j.jnoncrysol.2011.12.019
- [5] Carius, Reinhard; Forschungszentrum Jülich
- [6] P. Jackson, D. Hariskos, E. Lotter, S. Paetel, R. Wuerz, R. Menner, W. Wischmann and M. Powalla: Prog. Photovolt: Res. Appl., 2011; 19:894–897
- [7] M. Schmid, R. Klenk, M. Ch. Lux-Steiner, M. Topic und J. Krc, Nanotechnology 22 (2011) 025204