

■ Innovative Prozesse – Neue Materialien

- Neue Silicium-Solarzellenstrukturen für höhere Wirkungsgrade
- Dünnschicht-Solarzellen aus Silicium
- III-V Halbleiter Konzentrazorzellen
- Neue Chalkopyrit (CIS)-Dünnschicht-Solarzellen – flexibel, leicht, effektiv

Neue Silicium-Solarzellenstrukturen für höhere Wirkungsgrade

Einführung

Um die Kosten des Solarstromes zu senken, wird gegenwärtig der Weg verfolgt, durch Massenfertigung und weitgehende Automatisierung den Preis der mit über 85 % Marktanteil dominierenden kristallinen Silicium-Solarzellen zu senken. Um die Konkurrenzfähigkeit mit den fossilen Energieträgern zu erreichen, müssen außerdem durch innovative Konzepte drastische Erhöhungen des Wirkungsgrades erzielt und kostengünstige Materialien verwendet werden. Grundbedingung für eine Massenproduktion großflächiger Solarzellen ist, dass vergleichsweise einfache, energie- und zeiteffiziente Fabrikationsprozesse zur Anwendung kommen. Komplizierte Justiervorgänge, Masken und Photolithographie, wie sie bisher zur Herstellung höchsteffizienter Laborzellen benötigt werden, sind dabei ausgeschlossen.

Der Wirkungsgrad hat erheblichen Einfluss auf die Kosten eines Photovoltaiksystems. Mit steigendem Wirkungsgrad erhöht sich die Ausgangsleistung einer Solarzelle und damit ist eine erhebliche Kostensenkung für den Solarstrom zu erreichen, wenn der Herstellungsaufwand nicht unverhältnismäßig stark zunimmt. Durch einen höheren Wirkungsgrad kann die gleiche elektrische Leistung mit weniger Solarzellen- bzw. Modulfläche erzielt werden. Hiermit geht also automatisch eine Verringerung aller

flächenproportionalen Kosten einher. Letztere machen mehr als 70 % der Kosten eines PV-Systems aus. In *Tab. 1* sind Beispiele von Komponenten eines kristallinen Silicium-PV-Systems angeführt, deren Kosten flächenabhängig sind. Es ist anzumerken, dass allein die Siliciumscheiben 50 % der Modulkosten ausmachen. Mehr Leistung mit weniger Silicium zu erzielen ist daher eine der wichtigen Konsequenzen der Wirkungsgraderhöhung.

Gegenwärtig liegt der Laborspitzenwert kleinflächiger, sehr kompliziert herzustellender einkristalliner Silicium-Solarzellen bei knapp 25 %. Die kommerziellen Solarzellen erreichen jedoch nur Wirkungsgrade zwischen 14 und 16 %. In jüngster Zeit hat das Interesse der Industrie an höchsteffizienten Silicium-Solarzellen zugenommen [1]. Von der japanischen Firma Sanyo (HIT-Zelle) und der US Firma Sun Power wird die Produktion von Solarzellen mit Wirkungsgraden um 20 % angekündigt.

Unserer Meinung nach sollten künftige industrielle Silicium-Solarzellen Wirkungsgrade über 20 % erreichen, wobei Fertigungsprozesse zum Einsatz kommen müssen, die möglichst nicht kostspieliger sind als die herkömmlichen, um den Kostenvorteil durch die Wirkungsgraderhöhung voll nutzen zu können.

Prof. Dr. Rudolf Hezel
ISFH
hezel@isfh.de

Stefan Glunz
Fraunhofer ISE
stefan.glunz@ise.fraunhofer.de

Si-Grundmaterial	Scheibenerstellung	Solarzellenprozess	Modulfertigung	Installation	Wartung
Höchstreines Si	Kristallziehen	Reinigung	Zellenverschaltung	Transport	Reinigung
Reinigungs- u. Abscheideprozesse	Sägen	Schichtabscheidung	Laminieren	Aufständering	Reparatur
	Ätzen	Diffusion	Glas, EVA, Tedlar	Verdrahtung	
Chemikalien		Ätzen	Rahmen		
		Metallisierung	Anschlussbox		
		Messung	Testen		
			Verpacken		

Tabelle 1
Beispiele von Komponenten eines PV-Systems (kristallines Silicium), deren Kosten flächenabhängig sind. Die Kosten von Wechselrichter, Schaltern, Zählern, Sensoren etc. sind weitgehend leistungsabhängig.

In diesem Artikel werden innovative Solarzellenstrukturen mit hohem Wirkungsgradpotenzial, industrieller Umsetzbarkeit und vergleichsweise niedrigen Kosten vorgestellt. Die Forschungsarbeiten erstrecken sich von frontseiten- über rückseitenkontaktierte und damit doppelseitig (bifacial) nutzbare Zellen bis hin zu neuen Bifacialanwendungen, wodurch eine Steigerung der Ausgangsleistung um über 60% durch zusätzliche Nutzung des auf die Rückseite auffallenden Lichtes erreichbar ist. Weiterhin wird eine neue, für industrielle höchsteffiziente Solarzellen vorteilhaft einsetzbare Rückseitenkonfiguration sowie deren Anwendung für sehr dünne Si-Solarzellen vorgestellt.

OECO-Solarzellen – höchste Wirkungsgrade in der Massenfertigung

Vom ISFH wird ein neuer Weg zu Spitzenwirkungsgraden kristalliner Silicium-Solarzellen in der Massenfertigung besprochen. Die innovative Technik beruht auf einer maskenfremen selbstjustierenden Methode der Kontaktherstellung in Verbindung mit einer strukturierten Zellenoberfläche. Dieses Verfahren beruht unter Ausnutzung des Selbstabschattungseffektes auf der Schrägaufdampfung der Kontaktfinger im Vakuum (Obliquely Evaporated COntacts). Daher wurde für die auf diese Weise hergestellten Bauelemente die Bezeichnung „OECO-Solarzellen“ eingeführt. Sie zeichnen sich durch das

Potenzial für sehr hohe Wirkungsgrade (> 20%), eine relativ einfache Prozessierung und Umweltfreundlichkeit bei Herstellung, Betrieb und Entsorgung aus.

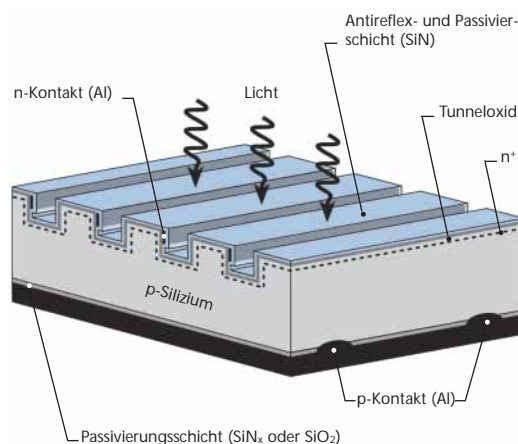
Die Standard-OECO-Solarzelle

In *Abb. 1* ist die Struktur der Standard-OECO-Solarzelle schematisch dargestellt. Die charakteristischen Merkmale sind [2]:

- Eine mechanisch erzeugte Oberflächenstruktur, die es erlaubt, die Vorderseitenkontakte an senkrecht verlaufenden Grabenflanken anzubringen. Dadurch sind die Abschattungsverluste durch die Metallfinger auf ein Minimum begrenzt.
- Ein flacher homogener Emitter mit hoher Quantenausbeute im kurzwelligen Bereich des Sonnenspektrums, wird durch eine einstufige Diffusion erzeugt (kein selektiver Emitter).
- Durch Schrägaufdampfung von Aluminium im Vakuum und Erzeugung eines ultradünnen Tunneloxids maskenlos hergestellte hochwertige MIS-Kontakte
- Optimale Passivierung der Solarzellenoberflächen durch im Plasma abgeschiedenes Siliciumnitrid bzw. thermisches Oxid

Der für Höchsteffizienz solarzellen relativ einfache Herstellungsprozess basiert neben den üblichen Reinigungsvorgängen im Wesentlichen auf den vier obigen unkompliziert und auch großflächig durchführbaren technologischen Schritten: Oberflächenstrukturierung, Phosphordiffusion, Metallisierung durch Schrägbedampfung und Oberflächenpassivierung.

Abbildung 1
Die Standard-OECO-MIS-n⁺p-Solarzelle mit mechanisch erzeugter Oberflächenstruktur und maskenlos schräg aufgedampfter Vorderseitenmetallisierung



Am ISFH wurden im Rahmen des Aufbaus einer Pilotlinie neue kostengünstige und einfach automatisierbare Produktionsanlagen- und prozesse einschließlich einer neuartigen Verbindungstechnik unter Verwendung von leitfähigen Klebstoffen entwickelt. Als entscheidender Erfolg ist zu werten, dass es gelang, den bereits im Labormaßstab erreichten Wirkungsgrad von 20% auf einer Solarzellenfläche von 10 cm x 10 cm trotz drastisch gesenkter Prozesskosten aufrecht zu erhalten. Für 4 cm² große Zellen wurde ein Wirkungsgrad von 21,1% erreicht [2].

Die rückseitenkontaktierte bifaciale OEKO-Solarzelle

Die wohl eleganteste Anwendung der OEKO-Technik besteht darin, beide Kontaktsysteme auf einfache Weise auf der Rückseite der Solarzelle anzubringen (BACK OEKO). Es ergeben sich folgende Vorteile [1], [3]: keine Abschattung durch das Frontkontaktgitter, Vereinfachung der Modulfertigung, besseres Erscheinungsbild sowie doppelseitige Lichtempfindlichkeit ohne Zusatzaufwand. In Abb. 2 ist eine Ausführungsform der neuen rückseitenkontaktierten OEKO-Solarzelle schematisch dargestellt.

Die Hocheffizienzeigenschaften entsprechen, abgesehen von der abschattungsfreien Vorderseite, weitgehend denen der Standard-OEKO-Solarzelle. Als besonderes Merkmal kommt hinzu, dass als Option auch das auf die Rückseite auffallende Licht sehr effizient genutzt werden kann. Was den kostengünstigen Herstellungsprozess betrifft, so sind viele Schritte identisch mit denen der Standard-OEKO-Zelle. Es ist jedoch von entscheidender Bedeutung, dass beide Kontaktsysteme mit Hilfe der Schrägbedampfungsmethode ohne Masken oder Justierung, automatisch exakt voneinander getrennt, auf der Rückseite erzeugt werden. Die Vorgehensweise ist in Abb. 3 dargestellt.

Schon in sehr kurzer Zeit konnte für die Vorderseite ein Wirkungsgrad von 18,3%, für die Rückseite 17,6% erzielt werden. Aus Simulationsrechnungen geht hervor, dass Wirkungsgrade um 22% für Vorder- und Rückseite möglich sind, so dass es sich hier um eine höchsteffiziente symmetrische bifaciale Solarzelle handelt. Sie wird zusammen mit den beiden eingangs genannten Solarzellen von Sanyo und Sun Power als Kandidat für den künftigen industriellen Wirkungsgradbereich über 20% diskutiert [1].

Neue Anwendungen von Bifacial-Solarzellen

Am ISFH wurden kürzlich innovative Anwendungen von Bifacial-Solarzellen entwickelt [4]: In Abb. 4 handelt es sich um eine multifunktionale Sonnenschutzmarkise mit parallelen Strings

von Bifacial-Solarzellen und einer weißen semi-transparenten Reflektorplatte. Abb. 5 zeigt eine Anordnung von schmalen Bifacialmodulen vor einer weißen Fassade. In beiden Fällen sind auf einfache Weise Steigerungen der Ausgangsleistung um mehr als 60% im Vergleich zur rein vorderseitigen Nutzung der Zellen möglich. Mit diesen Anordnungen wird daher für die obige rückseitenkontaktierte Bifacial-OEKO Solarzelle nach Optimierung eine Ausgangsleistung erwartet, die einer gleich großen monofacialen Zelle mit 30% Wirkungsgrad entspricht.

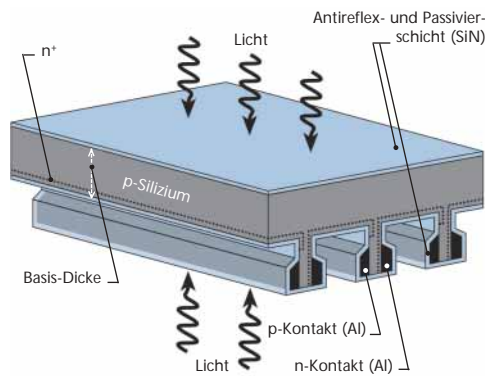


Abbildung 2 Schematischer Aufbau der rückseitenkontaktierten bifacialen OEKO-Solarzelle

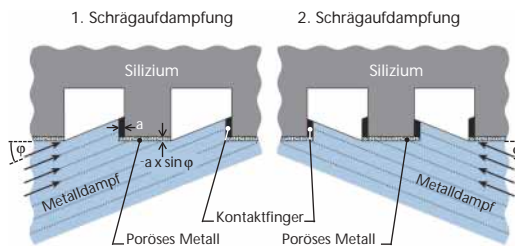


Abbildung 3 Prinzip der selbstjustierenden Kontaktherstellung auf der Rückseite von BACK-OEKO-Solarzellen durch Schrägaufdampfung von Metall auf beide Seiten der Flanken. Es wird eine exakte Trennung der n- und p-Kontakte erreicht.



Abbildung 4 Multifunktionale Sonnenschutzmarkise mit doppelseitig lichtaufnehmenden Solarzellen und weißer, semitransparenter Rückwand

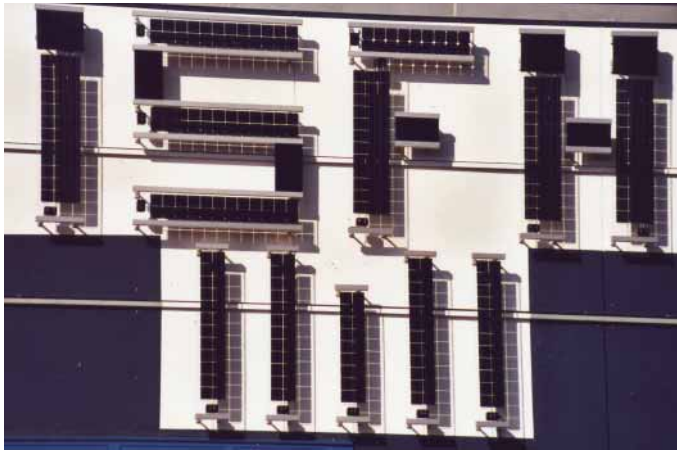


Abbildung 5
Bifaciale PV-Module
vor weißem Hinter-
grund an der Fassade
des ISFH-Gebäudes

Innovative Solarzellenrückseite für hohe Wirkungsgrade – Laser-Fired Contacts

Voraussetzung zur Erzielung hoher Solarzellenwirkungsgrade ist eine sehr gute Passivierung der rückseitigen Oberfläche sowie möglichst kleine Kontaktflächen, um die Rekombination der lichterzeugten Ladungsträger zu reduzieren. Zur Oberflächenpassivierung werden dielektrische Schichten aus Siliciumoxid oder Siliciumnitrid aufgebracht. Um Kontaktöffnungen in diese Isolatorschichten einzubringen, wird bei den bisherigen Labor-Höchsteffizienz-Solarzellen aufwändige Photolithografiertechnik verwendet, die für eine industrielle Produktion nicht geeignet ist. Am Fraunhofer ISE wurde das sogenannte Laser-Fired-Contacts (LFC)-Verfahren entwickelt. Mit diesem Verfahren kann ohne Öffnung der Passivierungsschicht eine ideale Rückseite mit nur drei Prozessschritten hergestellt werden [5]:

1. Passivierung (SiO_2 , SiN)
2. ganzflächige Metallisierung (Al)
3. Laserfeuern der Punktkontakte

Diese Anordnung ist in *Abb. 6* dargestellt. Es wurde ein automatisiertes Pilotlinien-Laser-

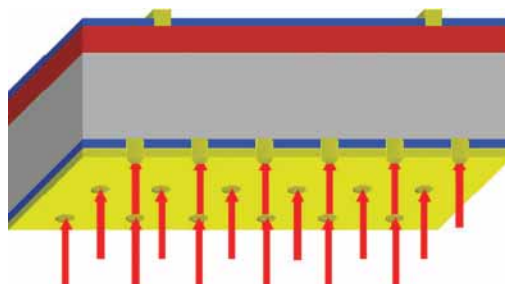


Abbildung 6
Innovative Solarzellen-
rückseite: Laser-Fired
Contacts (LFC)

system (Nd-YAG) aufgebaut, mit dem auf einer $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ Solarzelle 10000 LFC-Punkte in ca. 1 Sekunde prozessiert werden können. Die Ablenkung des Laserstrahls erfolgt über ein sehr schnelles Spiegelsystem. Der beste bisher mit der LFC-Methode erreichte Solarzellen-Wirkungsgrad liegt bei 21,3%.

Durch den Laserprozess wird unter anderem die Wirksamkeit der Aluminium-Rückkontakte verbessert, was insbesondere bei niedrigen Dotierkonzentrationen von großem Vorteil ist [6]. Eine weitere Maßnahme zur Kostensenkung von Solarzellen stellt die Verwendung von dünnen Siliciumscheiben dar, um damit teures Halbleitermaterial einzusparen. Hierbei ist zur Erzielung hoher Wirkungsgrade eine gute Rückseitenpassivierung von besonderer Bedeutung. Allerdings ist es mit der momentan üblichen Siebdrucktechnologie nicht möglich, sehr dünne Wafer zu prozessieren, da es hierbei zu einer starken Verbiegung der Wafer kommt. Mit der am Fraunhofer ISE patentierten LFC-Technologie gelang es hingegen, sowohl auf $90\text{ }\mu\text{m}$ dickem industriellen Czochralski-Siliciumsubstrat als auch auf $50\text{ }\mu\text{m}$ dickem zonengezogenem Silicium, Solarzellen mit einem Wirkungsgrad von 20% herzustellen. Diese dünnen Zellen zeichnen sich durch höhere Biegsamkeit aus und können deshalb auch gekrümmten Oberflächen angepaßt werden.

Schlussfolgerung

Es wurden neuartige Solarzellenstrukturen entwickelt, bei denen Hocheffizienzmerkmale mit einfachen und kostengünstigen Herstellungsverfahren verknüpft sind. Mit diesen schon teilweise automatisierten Produktionsanlagen wird gezeigt, dass unter ökonomisch und ökologisch vertretbaren Bedingungen in einem industriellen Prozess Wirkungsgrade über 20% möglich sind. Mit einer neuen Rückseitenkonfiguration wurde – selbst für sehr dünne Silicium-Solarzellen – die Erreichbarkeit dieser hohen Wirkungsgrade aufgezeigt. Damit dürften diese innovativen Solarzellenstrukturen zu den aussichtsreichen Kandidaten gehören, die mittelfristig einen bedeutenden Beitrag zur Kostensenkung des Solarstromes leisten können.

Literatur

- [1] J. Bernreuter, Photon 5/2003 und Photon International 5/2003, Solar Verlag GmbH, Aachen
- [2] R. Hezel, Solar Energy Materials and Solar Cells 74 (2002), S. 25-33
- [3] J. W. Mueller, A. Merkle and R. Hezel, Proc. 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Osaka, Japan 2003
- [4] R. Hezel, Progress in Photovoltaics 12, 01/2004
- [5] E. Schneiderlöchner, R. Preu, R. Lüdemann und S. W. Glunz, Progress in Photovoltaics 10, 29-34, 2002
- [6] S. W. Glunz, A. Grohe, M. Hermle, E. Schneiderlöchner, J. Dicker, R. Preu, H. Mäckel, D. MacDonald and A. Cuevas, Proceedings of the 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Osaka, Japan, 2003

Dünnschicht-Solarzellen aus Silicium

Prof. Dr. Walther Fuhs
HMI
fuhs@hmi.de

Dr. Helmut Stiebig
FZJ
h.stiebig@fz-juelich.de

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

Silicium-Dünnschicht-Solarzellen stellen eine besonders attraktive Option für eine zukünftige PV-Technologie dar:

- Silicium (Si) hat grundsätzlich das Potenzial zu hohen Wirkungsgraden.
- Si steht praktisch unbegrenzt zur Verfügung.
- Die beteiligten Materialien und Prozesse sind nicht-toxisch und ökologisch unbedenklich.
- Si-Technologien sind eingeführt und als zuverlässig bekannt.
- Vielfältige Anwendungen von Silicium bewirken eine breite Kenntnis der Materialien und Bauelemente.

Unter den verschiedenen Ansätzen für Dünnschicht-Solarzellen aus Silicium ist die Technologie des hydrogenierten amorphen Silicium a-Si:H (Abb. 1a) am weitesten fortgeschritten. Module werden von mehreren Herstellern mit Wirkungsgraden von 6–8% gefertigt. Dies ist die einzige Dünnschicht-Technologie, die bislang einen nennenswerten Anteil am Weltmarkt erlangt hat (um 8%).

Abbildung 1a und b Netzwerkstruktur (random network) von amorphem Silicium (a-Si:H) und (b) Morphologie von mikrokristallinem Silicium

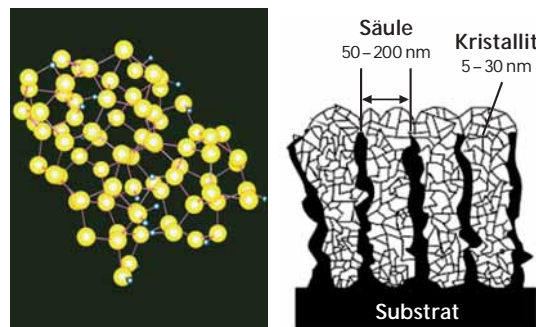
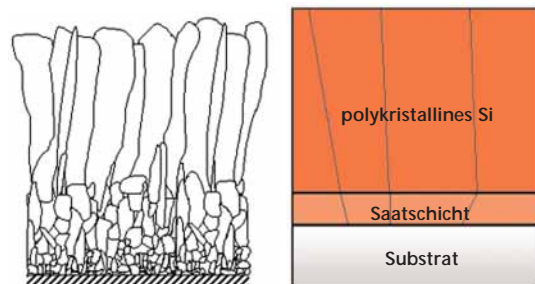


Abbildung 2a und b Morphologie von polykristallinem Silicium bei Abscheidung aus der Gasphase auf Fremdsubstrat. (b) Saat-schichtkonzept: In einem ersten Schritt wird eine polykristalline Si-Schicht hergestellt, auf der dann die Absorberschicht epitaktisch abgeschieden wird.

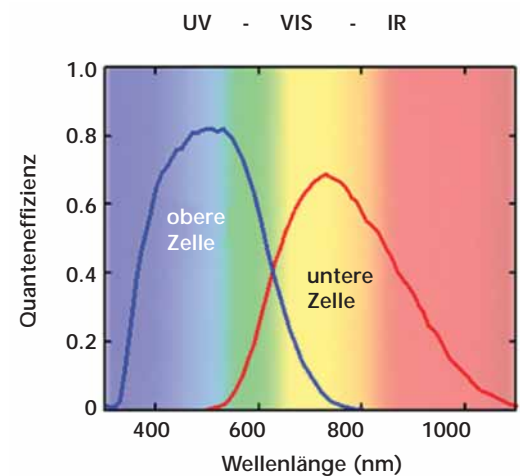
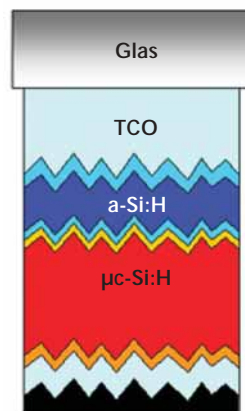


Kristalline Si-Dünnschichttechnologien versprechen aber höhere Modulwirkungsgrade. Deshalb werden weltweit große Forschungsanstrengungen zur Entwicklung solcher Solarzellen unternommen. Die verschiedenen Forschungs- und Entwicklungsansätze unterscheiden sich grob durch ihre Prozesstemperaturen. Im Temperaturbereich unterhalb von 300 °C lässt sich mikrokristallines Silicium ($\mu\text{-Si:H}$) mit den gleichen Abscheidungsverfahren (Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD) oder Hot Wire Deposition) wie a-Si:H herstellen. Charakteristisch für die Abscheidungsbedingungen ist der Einbau von Wasserstoff, der eine effektive Defektpassivierung bewirkt. Dieses kristalline Dünnschichtmaterial hat eine sehr komplexe heterogene Struktur. Es besteht aus nanokristallinen Bereichen, die in Säulen angeordnet und von ungeordneten Bereichen umgeben sind (Abb. 1b).

Als besonders aussichtsreich gelten a-Si:H/ $\mu\text{-Si:H}$ -Stapelzellen wie sie in Deutschland am Forschungszentrum Jülich entwickelt werden. Erhöht man die Prozesstemperaturen, so ergeben sich bei Abscheidung auf Fremdsubstraten feinkristalline, sehr heterogene Morphologien, die sich wegen der hohen Korngrenzendichten nicht für Solarzellen eignen (Abb. 2a). Deshalb werden Technologien verfolgt, bei denen zunächst eine grob-polykristalline Saat-schicht hergestellt wird, auf der dann die elektronisch aktive Absorberschicht epitaktisch abgeschieden wird (Abb. 2b).

Das HMI verfolgt dabei einen Ansatz zu einer polykristallinen Dünnschichtzelle auf Glassubstraten und arbeitet deshalb mit Temperaturen $T < 600$ °C. In diesem Temperaturbereich liegt das zu lösende Problem in der Realisierung von epitaktischem Wachstum durch Verwendung von Ionen-gestützten Abscheidungsverfahren, bei denen die Energie für das Schichtwachstum durch Ionenbombardment kontrolliert eingebracht wird.

Die epitaktische Abscheidung bei hohen Substrattemperaturen $T > 1100\text{ °C}$ wird mit CVD-Verfahren durchgeführt. Dabei kann ein epitaktisches Wachstum mit Wachstumsraten von bis zu $10\text{ }\mu\text{m}/\text{min}$ realisiert werden. Das Fraunhofer ISE verfolgt hierbei ein Verfahren, bei dem zunächst die Saatschicht durch ein Zonenschmelzverfahren realisiert wird, auf die dann epitaktisch die Schichten bei Temperaturen um 1100 °C abgeschieden werden.



Dünnschicht-Solarzellen aus amorphem und mikrokristallinem Silicium

Dünnschicht-Solarzellen aus amorphem (a-Si:H) und mikrokristallinem Silicium ($\mu\text{c-Si:H}$) können durch PECVD- oder Hot-Wire-CVD-Verfahren bei Temperaturen von $100\text{--}300\text{ °C}$ abgeschieden werden, was die Nutzung billiger Substrate (Glas, Stahlfolien, Kunststoff) erlaubt. Ein Nachteil dieser Dünnschichtmethoden ist jedoch die geringe Qualität des hergestellten Materials. So liegt die Lebensdauer der Ladungsträger für mikrokristallines Silicium mehr als drei Größenordnungen unterhalb der von kristallinem Silicium. Deshalb werden die Solarzellen als p-i-n¹ oder n-i-p Schichtenfolgen hergestellt und Teilsolarzellen mit unterschiedlicher spektraler Empfindlichkeit zu Tandem- oder Tripelzellen kombiniert [1]. Der schematische Aufbau einer solchen Tandemstruktur ist in Abb. 3 gezeigt. Dieser Aufbau hat zwei signifikante Vorteile:

- Die p- und n-Schichten (typischerweise etwa 10 und 20 nm dick) erzeugen ein elektrisches Feld, welches sich über die undotierte Schicht (i-Schicht) erstreckt und zu einer effizienten Sammlung der in der i-Schicht absorbierten Ladungsträger führt.
- Durch die Verwendung von zwei Absorbermaterialien mit unterschiedlicher Energielücke wird das Sonnenspektrum selektiv genutzt.

Da in einem solchen Schichtsystem die Thermalisierungsverluste reduziert werden, haben Multispektralzellen einen höheren theoretischen

Wirkungsgrad. Als Basismaterial der p-i-n oder n-i-p Schichtenfolgen dienen a-Si:H und $\mu\text{c-Si:H}$ -Schichten mit einer Bandlücke von etwa 1,8 und 1,1 eV. Abb. 3 zeigt die spektrale Empfindlichkeit einer solchen amorphen/mikrokristallinen Tandemsolarzelle, die auf rauen transparent leitfähigen Metalloxidschichten (TCO) abgeschieden wurde. Das Licht fällt durch das Glassubstrat in die a-Si:H-Zelle (Topzelle) ein, die eine Schichtdicke von einigen 100 nm besitzt und den kurzwelligen Teil des Sonnenspektrums absorbiert. Die untere Zelle (Bottomzelle), die das langwellige Licht absorbiert, hat eine Dicke von einigen Mikrometern (μm). Den Frontseitenkontakt des Bauelements bilden ebenfalls transparente leitfähige Metalloxidschichten (TCOs), die zusätzlich in Kombination mit einem Metall auch als hochreflektierender Rückkontakt benutzt werden. Dieses Solarzellenkonzept führte bislang für große Module zu Wirkungsgraden von 9–10% (Kaneka Corp.). Für Laborzellen wurden ca. 12% erreicht.

Die extrem dünnen Schichten einer solchen a-Si:H/ $\mu\text{c-Si:H}$ -Zelle würden bei einfachem Lichtdurchgang nur einen sehr geringen Kurzschlussstrom ermöglichen, da der langwellige Spektralanteil nur unzureichend absorbiert wird. Hohe Wirkungsgrade lassen sich deshalb nur erreichen, wenn eine effektive Lichteinkopplung realisiert wird (light trapping). Um die Lichtausbeute zu erhöhen, werden daher TCO-Substrate mit rauen Oberflächen verwendet. Diese rauen Grenzflächen führen zu einer ver-

Abbildung 3
Schema einer Tandemstruktur aus amorphen und mikrokristallinen p-i-n-Strukturen (a-Si:H/ $\mu\text{c-Si:H}$ -Tandem) sowie Quantenausbeuten der oberen und unteren Zelle [1]. (Zu beachten: Licht fällt durch das Glassubstrat ein.)

¹ p-Schichten sind Löcher leitende Siliciumschichten, n-Schichten sind Elektronen leitende Siliciumschichten und i-Schichten sind elektrisch isolierende Siliciumschichten.

besserten Lichteinkopplung in die Solarzelle als Folge einer effektiven Brechungsindexgradierung am Übergang zwischen der TCO-Schicht und der p-Schicht. Darüber hinaus bewirken TCO-Substrate eine bessere Lichtstreuung und führen damit zur Verlängerung des Lichtabsorptionswegs in der Solarzelle. Bei Streuung oberhalb des Winkels der Totalreflexion kann das Licht mehrfach in der Solarzelle zwischen Rück- und Frontkontakt hin- und herreflektiert werden. Am FZ-Jülich wurde ein Prozess entwickelt, der durch eine nasschemische Behandlung von Zinkoxid (ZnO)-Schichten ein TCO-Substrat mit „random“-texturierter Oberfläche und hervorragenden Lichtstreuungseigenschaften erzeugt.

Schwerpunkte der Forschungsaktivitäten liegen derzeit in der Erhöhung der Depositionsraten, Steigerung des Wirkungsgrads durch Realisierung neuer Methoden zum Lichteinfang (Photonenmanagement) und der Implementierung neuer Materialien in ein erweitertes Mehrschicht-Konzept. Besondere Bedeutung haben die Fragen der Entwicklung industriemäßiger Herstellungsprozesse und die Übertragung der Solarzellenstrukturen auf Module.

Kristalline Si-Dünnschicht-Solarzellen auf Fremdsubstrat (Niedertemperaturpfad)

Das zentrale Problem der Entwicklung einer polykristallinen Dünnschichtsolarzelle auf kostengünstigen Substraten wie Glas ist die Herstellung einer kristallinen Schicht mit großer Korngröße. Dies gilt vor allem bei der Verwendung von Glas, weil dabei die Prozesstemperaturen auf Werte unterhalb der Erweichungstemperatur von etwa 600 °C begrenzt sind. Um Wirkungsgrade im Bereich von 15 % zu erreichen, muss die kristalline Siliciumschicht Korngrößen haben, die deutlich größer als die Dicke der Absorberschicht in der Zelle (wenige Mikrometer) sind. Große Kristallitgrößen lassen sich erreichen, indem man zunächst amorphes Silicium abscheidet und dieses dann durch verschiedene Verfahren rekristallisiert. Folgende Verfahren sind in der Entwicklung:

- thermische Kristallisation (SPC)
- Laserkristallisation (LC)
- metallinduzierte Kristallisation (MIC)

Sehr gute Resultate wurden bereits mit dem SPC-Verfahren erreicht. Sanyo Corporation hat mit einem solchen Prozess im Labor eine polykristalline Si-Zelle mit einem Wirkungsgrad von 9,5 % vorgestellt. Ein Modul mit einem Wirkungsgrad von 8,2 % wurde kürzlich von Pacific Solar präsentiert, welches ebenfalls in einem SPC-Verfahren hergestellt wurde.

Die Laserrekristallisation wurde bislang vor allem zur Herstellung von Saatschichten verwendet. Erste Ansätze eine komplette Zelle durch Laserkristallisation zu erzeugen, werden am Institut für Physikalische Hochtechnologie (IPHT) in Jena untersucht.

Das HMI verfolgt ein Verfahren, bei dem die elektronisch aktive polykristalline Si-Schicht in einer Dicke von 2–3 µm durch epitaktisches Wachstum auf einer polykristallinen Saatschicht erzeugt wird [2]. Bei diesem Ansatz wird die Saatschicht durch einen MIC-Prozess mit Aluminium (Al) erzeugt, wobei eine Schichtfolge Glas/Al/a-Si durch eine Temperung bei 400–500 °C in eine Schichtfolge Glas/poly-Si/Al(Si) umgewandelt wird (Abb. 4). Nach chemischem Ablösen der Al(Si)-Schicht erzeugt man so eine kristalline Siliciumschicht mit einer Korngröße von 10–20 µm und einer Vorzugsorientierung mit einer (100) Flächennormalen. Diese Schicht ist stark p-leitend und kann als Rückkontakt einer p⁺pⁿ⁺-Zelle verwendet werden. Die (100)-Vorzugsorientierung ist eine wichtige Voraussetzung für den schwierigsten Prozessschritt nämlich das epitaktische Wachstum in diesem Niedertemperaturbereich. Wegen der niedrigen Abscheidetemperaturen werden dazu Abscheidungsverfahren benötigt, die es ermöglichen, während des Schichtwachstums Energie in die wachsende Schichtoberfläche einzukoppeln. Dies ist beispielsweise möglich durch geeigneten Ionenbeschuss während der Abscheidung. Die oberste Emitterschicht einer solchen Zelle muss ebenfalls in einem Niedertemperaturschritt realisiert werden.

Der vielversprechendste Weg ist derzeit eine Heterostruktur mit a-Si:H. Solche Hetero-

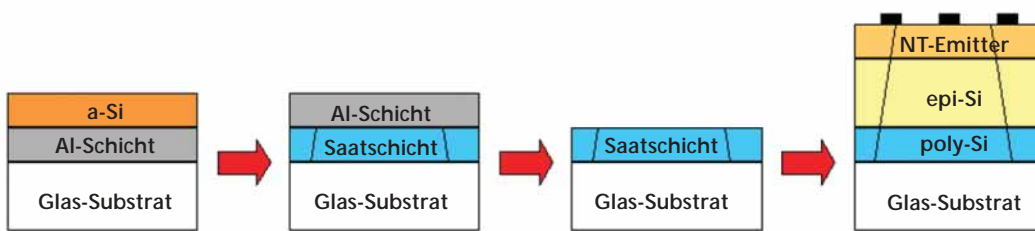
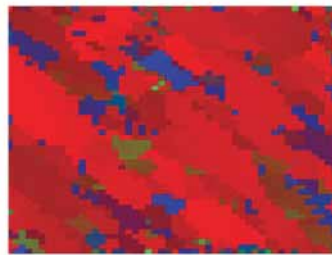


Abbildung 4a
Schema der Methode zur Herstellung einer polykristallinen Si-Dünnschichtzelle auf Glassubstrat



REM



EBSD

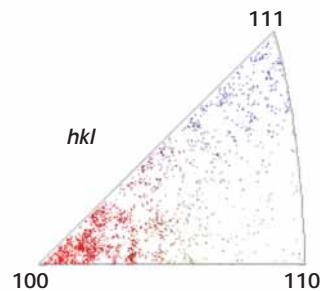


Abbildung 4b
Struktur einer durch Al-induzierten Kristallisation hergestellten polykristallinen Si-Saatschicht: REM-Bild der Oberfläche, Mapping der Oberflächenorientierung durch Electron Backscattering Diffraction (EBSD), Polfigur. Rot markiert: Orientierung nahe an (100) [2]

übergänge lassen sich inzwischen in so hervorragender Qualität herstellen, dass der Wirkungsgrad von Heterostruktur-Solarzellen nicht durch die Qualität der Grenzfläche begrenzt ist. Die Realisierung einer solchen polykristallinen Si-Solarzelle liegt dennoch in der Zukunft. Ihre Verwirklichung erfordert langzeitorientierte Forschung z. B. die Entwicklung von Prozessen und Abscheideverfahren mit ausreichend hoher Depositionsrate, eine Beherrschung der Defektpassivierung und Techniken für den Lichteinfang.

Kristalline Si-Dünnschicht-Solarzellen auf Fremdsubstrat (Hochtemperaturpfad)

Der sogenannte „Hochtemperaturansatz“ erhält seinen Namen durch die Erweiterung der Temperaturgrenze bis über den Schmelzpunkt von Silicium bei 1400 °C hinaus. Dies hat erhebliche Auswirkungen: Abscheidungen von Silicium können sehr schnell (bis ca. 10 µm/min) und mit hoher Qualität epitaktisch durchgeführt werden. Als Ausgangsmaterial kann das kostengünstige Trichlorsilan eingesetzt werden, welches in ausreichendem Umfang verfügbar ist. Alle Solarzellenprozesse der Wafer-Solarzellen-

technologie können mehr oder weniger unverändert übernommen werden. Diesen Vorteilen steht aber auch ein großer Nachteil gegenüber: Das kostengünstige Substratmaterial Glas kann nicht eingesetzt werden, es muss stattdessen auf andere, hochtemperaturfeste Materialien zurückgegriffen werden, die aber trotzdem die anspruchsvollen Kostenziele erreichen müssen.

Zur Verwirklichung des Hochtemperaturansatzes werden mehrere Wege beschritten, von denen zwei hier näher erläutert werden: Beide nutzen die Idee des „Waferäquivalents“, d. h. die erzeugten Substrat/Schicht-Kombinationen sollen genauso wie ein Siliciumwafer zu Solarzellen prozessiert werden können. Abb. 5 zeigt den Schichtaufbau der beiden Wege. Das „epitaktische Waferäquivalent“ (links) wird durch eine epitaktische Abscheidung von Silicium auf einem kostengünstigen, kristallinen Si-Substrat erzeugt.

Für das „rekristallisierte Waferäquivalent“ (rechts) wird zunächst auf beliebigen hochtemperaturfesten Substraten eine Saatschicht unter Einbeziehung eines zusätzlichen Zonenrekristallisations-Schritts hergestellt, auf die dann epitaktisch abgeschieden wird. Aufgrund der unterschiedlichen Komplexität der beiden Waferäquivalent-Konzepte ist ihr jeweiliger Entwicklungs-

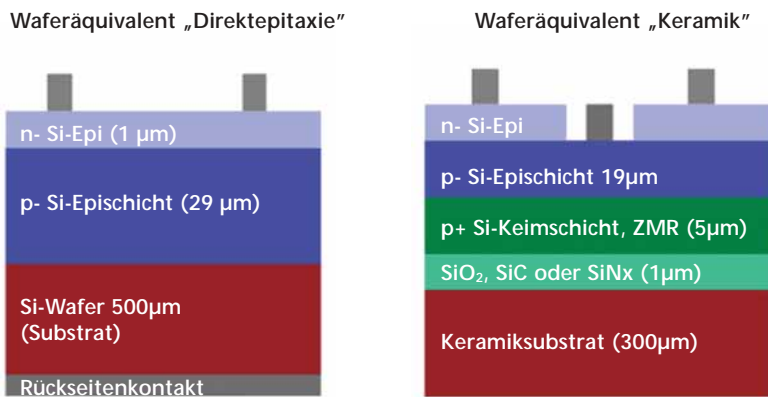


Abbildung 5
 Schema der Waferäquivalente „Direktepitaxie“ und „Keramik“ durch CVD-Abscheidung auf einen Si-Wafer oder ein Keramiksubstrat. In beiden Fällen kann die Prozessierung zu Solarzellen ähnlich wie bei der üblichen Si-Wafertechnologie durchgeführt werden [3].

stand verschieden. Das einfacher aufgebaute epitaktische Waferäquivalent „Direktepitaxie“ führt inzwischen mit Standard-Siebdrucktechnologien zu Solarzellen. Die entsprechenden Solarzellenparameter entsprechen denen von Wafersolarzellen, mit Ausnahme des Kurzschlussstroms, welcher durch die Anzahl absorbiertes Photonen bestimmt wird. Bei epitaktischen Waferäquivalenten durchdringen 10–20% der einfallenden Photonen die aktive Siliciumschicht ohne absorbiert zu werden und gehen im Substrat verloren. Dies verringert den Wirkungsgrad. Trotzdem betragen die Wirkungsgrade je nach angewandter Technologie zwischen 12% und 15% auf Flächen um 25 cm².

Beim rekristallisierten Waferäquivalent sind die bisherigen Solarzellenflächen im Bereich von 1–10 cm² noch deutlich kleiner. Obwohl die Substratgrößen durchaus über 10 cm x 10 cm groß sein können, führt der Schichtaufbau zu Schwierigkeiten beim Zellprozess, insbesondere wenn nichtleitfähige Substrate und Zwischenschichten verwendet werden. Entsprechend sind die erreichten Wirkungsgrade etwas niedriger als beim epitaktischen Waferäquivalent. Je nach Substrat schwanken diese zwischen 10,7% (SiSiC-Keramik mit SiO₂-/SiNx-Zwischenschicht) und 13,5% (mc-Si mit SiO₂-Zwischenschicht) [3].

Ein wesentlicher Schwerpunkt zukünftiger Arbeiten ist die Skalierung der Zellen auf Flächen um 100–200 cm². Nur dadurch lässt sich die Idee des Waferäquivalents auch tatsächlich in produktionsnahen Umgebungen verwirklichen. Eine Grundvoraussetzung für die Skalierung ist die erfolgreiche Entwicklung von hochproduktiven Abscheidungsverfahren für Silicium hoher

Kristallqualität. An dieser technologischen Fragestellung wird in mehreren Forschungsinstituten Europas intensiv gearbeitet. Auch die Entwicklung wichtiger Prozessschritte wie z. B. Abscheidung leitfähiger Zwischenschichten, die die strengen Prozessanforderungen erfüllen, ist Gegenstand intensiver Forschungs- und Entwicklungsarbeit.

Schließlich ist die Anpassung der Solarzellen-Herstellungsprozesse insbesondere beim rekristallisierten Waferäquivalent eine bedeutsame Aufgabe, die die Metallisierung auf unebenen Schichtoberflächen, oder die effektive Wasserstoffpassivierung defektreicher Si-Schichten umfasst. Durch das Konzept der Waferäquivalente ergibt sich eine reelle Chance, kristalline Si-Dünnschicht-Solarzellen ohne die Notwendigkeit enormer Investitionen graduell in die Solarzellenproduktion einzuführen. Während das epitaktische Waferäquivalent in einem Zeitraum von nur wenigen Jahren die Produktionstauglichkeit erreichen kann, besitzt das rekristallisierte Waferäquivalent eine etwas längerfristige Perspektive.

Tab. 1 fasst die Charakteristika der verschiedenen Ansätze für Dünnschicht-Solarzellen zusammen. Neben den hier dargestellten Ansätzen sind in der Tabelle auch Daten für Zellen und kleine Module angegeben, die mit Hilfe einer Transfer-technologie hergestellt wurden, die zu einer monokristallinen Si-Zelle auf einem Fremdsubstrat führen. Solche Ansätze werden am Zentrum für Angewandte Energietechnik (ZAE) in Erlangen [4] und am Institut für Physikalische Elektronik der TU Stuttgart [5] verfolgt. Diese Verfahren, beruhen darauf, dass zunächst auf einem Einkristall eine poröse Trennschicht gebildet wird, auf die dann in einem Hochtemperaturschritt epitaktisch mit CVD-Verfahren eine monokristalline Si-Schicht mit einer Dicke von 25–50 µm abgeschieden wird. Diese monokristalline Schicht kann ähnlich wie ein Si-Wafer zu einer Solarzelle prozessiert werden, nachdem sie vom Einkristall längs der porösen Si-Schicht getrennt und auf ein anderes Substrat (Glas oder Plastik) übertragen (PSI-Prozess) wird. Der Vorteil solcher Techniken liegt in der mehrfachen Wiederverwendbarkeit des einkristallinen Substrats. Diese Lift-off-Techniken und die Si-Zellen des Hochtemperaturpfads befinden sich mit Absorber-

Technologie	Status	Herstellung	Herausforderung
a-Si:H $\mu\text{c-Si:H}$ a-Si:H/ $\mu\text{c-Si:H}$	L 13,2% M 6–8% L 9,1% L 12% M 9–10%	PECVD Glas, Plastik, Metall R = 30 nm/min $T_S = 100\text{--}300\text{ }^\circ\text{C}$ D = 1–3 μm pin-Struktur	Fläche Depositionsrate Wirkungsgrad Tripel Tandem Photon-Management
polykristallines Silicium Niedertemperaturpfad	L 9,2% (SPC) M 8,2% (SPC)	ionengestützte Abscheidung Glas R = 30–100 nm/min $T_S < 600\text{ }^\circ\text{C}$ D = 2–5 μm p^+pn^+ -Struktur	Machbarkeit Depositionsverfahren für Epitaxie Depositionsrate Defektpassivierung Lighttrapping
multikristallines Si Hochtemperaturpfad	L 8–11% [3]	CVD-Verfahren Keramik R bis zu 10 $\mu\text{m}/\text{min}$ $T_S > 1100\text{ }^\circ\text{C}$ D = 20–30 μm pn-Übergang	HT-Substrate Zwischenschichten Flächen Durchsatz
monokristallines Si	L 15,4% (oL) [4] L 16,6% (mL) [5]	Lift off (PSI – Prozess mit porösem Si) D > 25 μm , pn-Übergang	Flächen Industrielle Prozesse Durchsatz

Tabelle 1

Charakterisierung der Ansätze für Si-Dünnschicht-Solarzellen. *R* Depositionsrate, T_S Abscheidetemperatur, *D* Dicke der elektronisch aktiven Schicht der Zelle, *L* Laborzelle, *M* Industriemodul, *oL* und *mL* ohne bzw. mit Photolithographie

dicken um 25–50 μm nahe an dem Forschungstrend zu dünneren Si-Wafern und schließen damit die Lücke zwischen den Dünnschichttechnologien und den ultradünnen Si-Wafern.

Literatur

- [1] B. Rech, J. Müller, T. Repmann, O. Kluth, T. Roschek, J. Hüpkes, H. Stiebig, W. Appenzeller: „Amorphous and microcrystalline silicon based solar cells and modules on textured substrates“, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 762 A3.1
- [2] S. Gall, J. Schneider, J. Klein, M. Muske, B. Rau, E. Conrad, I. Sieber, W. Fuhs, C. Ornaghi, D. Van Gestel, I. Gordon, K. van Nieuwenhuysen, G. Beaucarne, J. Portmans, M. Stöger-Pollach, J. Bernardi, P. Schattschneider, O. Van der Biest: „Crystalline Silicon Thin-Film Solar Cells on Foreign Substrates: The European Project METEOR“, European Photovoltaic Solar Energy Conference, Paris 2004 (eingereicht)
- [3] T. Kieliba, J. Pohl, A. Eyer, C. Schmiga: „Optimization of c-Si Films formed by Zone-Melting Recrystallization for Thin-Film Solar Cells“, Proceedings of the 3rd World Conference on Solar Energy Conversion, Osaka, Japan, 2003
- [4] R. Brendel, K. Feldrapp, R. Horbelt, R. Auer: „15,4% efficient and 25 μm thin crystalline Si solar cell from layer transfer using porous silicon“, phys. stat. sol [a] 197 (2003) 497
- [5] R. B. Bergmann, C. Berge, T. J. Rinke, J. Schmidt, H. J. Werner: „Advances in Monocrystalline Si Thin Film Solar Cells by Layer Transfer“, Solar Energy Materials and Solar Cells 74 (2002) 213

III-V Halbleiter Konzentratorzellen

Dr. Frank Dimroth
Fraunhofer ISE
dimroth@ise.fraunhofer.de

Dr. Andreas Bett
Fraunhofer ISE
andreas.bett@ise.fraunhofer.de

Einleitung und Geschichte

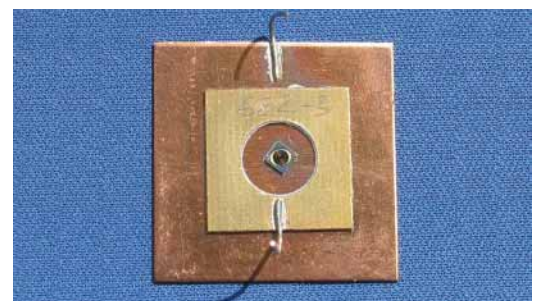
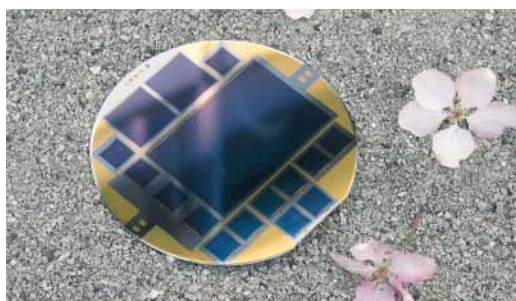
Zwei Verlustmechanismen begrenzen den Wirkungsgrad von herkömmlichen Solarzellen mit einem pn-Übergang: Die Thermalisierung (Wärmeerzeugung) heißer Ladungsträger, erzeugt durch Photonen mit einer Energie, welche größer ist als die Bandlücke, und die Transmission (Nicht-Absorption) von Photonen mit einer Energie, welche kleiner ist als die Bandlücke des verwendeten Halbleiters. Diese beiden Verlustmechanismen können erheblich reduziert werden, indem man das Sonnenspektrum auf mehrere Solarzellen aus Halbleiterschichten mit unterschiedlicher Bandlückenenergie aufspaltet. Es gibt verschiedene Verfahren dies zu erreichen. Eine Möglichkeit besteht zum Beispiel darin, das Sonnenspektrum mit Prismen in mehrere energetische Bereiche aufzuspalten und dann auf entsprechend angepasste Solarzellen zu leiten. Oder es lassen sich mehrere voneinander getrennte Solarzellen mit wachsender Bandlückenenergie so übereinander anordnen, dass die oberste Zelle den blauen und die unterste Zelle den roten Anteil des Sonnenlichts absorbiert. Die oben liegenden Solarzellen sind dabei für das rote Licht transparent. Man spricht in diesem Fall von sogenannten Stapel-Solarzellen. Das wohl erfolgreichste Konzept ist das Stapeln von mehreren Solarzellen auf einem einzigen Substrat (monolithisch), wobei die Teilzellen in diesem Fall in nur einem einzigen Prozess übereinander abgeschieden werden. Die monolithische Stapelzelle gleicht nach der Her-

stellung äußerlich einer herkömmlichen Solarzelle mit nur einem pn-Übergang (*Abb. 1*). Die höchsten Wirkungsgrade solcher Stapel-solarzellen werden heute mit sogenannten III-V Halbleitern erreicht. Man verwendet hierbei die verschiedenen Elemente der III. und V. Gruppe des Periodensystems, wie z. B. Gallium (Ga), Indium (In), Arsen (As), Phosphor (P), Antimon (Sb), Aluminium (Al) für die Herstellung von Mischkristallen, deren Absorptionskante zwischen 500–6000 nm eingestellt werden kann. Die meisten dieser Verbindungen besitzen zudem den Vorteil einer extrem hohen Absorption, was zur Folge hat, dass dünne Schichten von nur einigen Mikrometern ausreichen, um das nutzbare Licht zu absorbieren.

1984 wurde erstmals am National Renewable Energy Laboratory (NREL) in Golden, Colorado eine Materialkombination aus GaInP und GaAs für eine monolithische Stapelzelle aus III-V Halbleitern vorgeschlagen und untersucht. Nach Jahren der intensiven Forschung wurden 1994 bereits Wirkungsgrade von bis zu 29,5% (AM1,5g)¹ erzielt [1]. Die erste Kommerzialisierung des Produkts begann 1996 durch die beiden Firmen Tecstar und Spectrolab in USA, welche die beiden ursprünglichen Teilzellen noch durch eine dritte, im infraroten absorbierende Germanium (Ge)-Teilzelle ergänzten.

Eines schien jedoch von Anfang an klar: Die hier entwickelten Solarzellen würden für die terrestrische Anwendung in Flachmodulen immer zu

Abbildung 1a und b Weltraum- und Konzentratorsolarzelle aus III-V Halbleitern, wie sie am Fraunhofer ISE entwickelt werden



¹ AM 1,5g bezeichnet die Luftmasse (air mass), die das Sonnenlicht durchqueren muss, bevor es auf die Solarzellen fällt. g = global, d.h. es wird ein mittlerer Wert, der für Deutschland typisch ist, genommen.

teuer sein. Aus diesem Grund lag die Anwendung zunächst in der Versorgung von Satelliten mit hohem Leistungsbedarf. Die monolithischen Stapelzellen aus GaInP/GaAs/Ge haben hier innerhalb weniger Jahre die Si-Solarzelle weitgehend aus dem Markt verdrängt. Die Spitzenwirkungsgrade wurden mit dem wachsenden Verständnis des Kristallwachstums und der Weiterentwicklung der involvierten Technologie stetig verbessert und erreichen heute etwa 32% (AM1,5) [2].

Die Arbeiten in Europa liegen noch hinter diesen Ergebnissen zurück [3]. Die Kommerzialisierung von dreifach Solarzellen soll erst in 2003 von der Firma RWE Space Solar Power erfolgen. Das Fraunhofer ISE arbeitet hierbei eng mit den beteiligten Firmen und Weltraumorganisationen zusammen und forscht bereits an einer nächsten Generation von Stapelzellen mit 5 bzw. 6 pn-Übergängen [4].

Mit den steigenden Wirkungsgraden und der voranschreitenden Kommerzialisierung der III-V Solarzellen stellt sich erneut die Frage nach möglichen Synergien mit einer terrestrischen Anwendung. Dies haben auch die amerikanischen Firmen erkannt und forschen nun seit einigen Jahren intensiv an der Anwendung der monolithischen Stapelzellen in konzentrierenden Systemen. Hierbei müssen die Weltraumsolarzellen auf die neuen spektralen Anforderungen angepasst werden. Auch hier beweist die Weltfirma Spectrolab in USA wieder ihren technologischen Vorsprung mit einem kürzlich erreichten Zellwirkungsgrad von 36,9% für die derzeit beste dreifach Stapelzelle unter konzentriertem Licht [5].

Am Fraunhofer ISE wurde bisher zunächst eine spezielle 2-fach Solarzelle aus den Materialien GaInP und GaInAs entwickelt (siehe Abb. 1). Diese Zelle eignet sich besonders für Anwendungen unter sehr hoher Konzentration von 300–1200 Sonnen und weist in diesem Bereich europäische Spitzenwirkungsgrade von 30–31% auf [6]. Die nächste Generation von III-V Konzentratorenzellen muss jedoch noch höhere Wirkungsgrade erzielen. Hierzu wird eine dritte Germanium-Solarzelle der bisherigen Struktur hinzugefügt, die gleichzeitig auch ein erheblich günstigeres Substratmaterial darstellt. Das Ent-

wicklungspotenzial ist in diesem, im Vergleich zu Silicium noch jungen, photovoltaischen Forschungsbereich groß und es kann mit steigenden Wirkungsgraden bis zu 40% in den nächsten Jahren gerechnet werden.

Konzentratorentwicklung am Fraunhofer ISE

Am Fraunhofer ISE wird seit 1984 die Anwendung von III-V Solarzellen in Konzentratoren Systemen untersucht. Hierbei wird das Sonnenlicht mit Hilfe von Fresnel-Linsen um einen Faktor 300–1000 auf einen winzigen Brennfleck fokussiert, in dem sich dann eine nur noch 2–10 mm² kleine Solarzelle befindet. Der Sinn



Abbildung 2a
FLATCON™ Konzentratoren mit 2-fach Stapelsolarzellen



Abbildung 2b
FLATCON™ Konzentratoren mit Testmodul

dieses Vorgehens ist, die teure Halbleiterfläche der III-V Stapelzellen durch eine vergleichsweise günstige Optik zu ersetzen und somit die Anwendung dieser erfolgreichen Weltraumtechnologie auch auf der Erde gewinnbringend zu machen. Der Wirkungsgrad einer Solarzelle steigt logarithmisch mit der Konzentration des Sonnenlichts an bis er durch Widerstandsverluste begrenzt wird. Dieses physikalische Gesetz erlaubt es sogar, noch höhere Effizienzen unter dem konzentriertem Sonnenlicht zu erreichen als gegenwärtig. Um den Brennfleck der Linsen auf der Solarzelle zu halten, müssen Konzentratormodule der Sonne nachgeführt werden. Hierzu wird ein sogenannter Tracker verwendet. Die Stromgestehungskosten eines Konzentratormoduls hängen stark von dessen Konzentrationsfaktor ab. Bei steigender Konzentration sinkt der Kostenanteil der Solarzelle, dafür steigen die Kosten für Justage und für den Tracker aufgrund der höheren Anforderungen an die Genauigkeit der Nachführung. Weiter spielen Faktoren wie das thermische Verhalten und die Qualität der Linsen eine wesentliche Rolle.

Am Fraunhofer ISE wurde in einer langjährigen Zusammenarbeit mit dem Ioffe Institut in St. Petersburg ein Fresnel-Konzentrator mit dem Namen FLATCON™ (Abb. 2) entwickelt [7]. Dieses Konzentratormodul verwendet monolithische zweifach Stapelzellen aus III-V Halbleitern zusammen mit Fresnellinsen bei einer geometrischen Konzentration von 500 in einem komplett hermetisch abgeschlossenen System aus Glas. Ein Tracker mit einer Fläche von 30 m² wird momentan auf einer Testwiese installiert und mit Modulen mit einer prognostizierten Leistung von 5 kW bestückt. Im Bereich der Systemtechnik für hochkonzentrierende Photovoltaik gibt es bislang nur wenig Erfahrung und hier liegen wohl auch die größten Herausforderungen.

Die zentrale Frage ist dabei, welche Kosten langfristig für die Optik und Nachführung eines solchen Systems zu erwarten sind. Diese Frage ist sicher nicht pauschal zu beantworten, da die Anforderungen von System zu System sehr unterschiedlich sein können. Am Fraunhofer ISE wird momentan eine Studie durchgeführt, um die zukünftigen Kosten eines FLATCON™ Systems mit einer Konzentration von 500 Sonnen bestückt mit dreifach Solarzellen zu untersuchen.

Ziel muss es sein, Systeme zu entwickeln, die schon heute auf dem Markt konkurrenzfähig sind. Dies ist eine große Herausforderung für jede Zukunftstechnologie im Bereich der Photovoltaik, da die Si-Solarzelle auf eine fünfzigjährige Geschichte und ein Marktvolumen von mehreren Hundert MWp jährlich installierter Leistung zurückblicken kann. Die Entwicklung im Bereich der konzentrierenden Photovoltaik steht hingegen erst am Anfang und viele der technologischen Möglichkeiten gilt es in Zukunft erst zu erforschen.

Vorteile hochkonzentrierender Systeme

Der Einsatz von hochkonzentrierenden Photovoltaiksystemen zur Stromerzeugung weist bei einer großflächigen Nutzung folgende Vorteile auf:

- hohes Wirkungsgradpotenzial ermöglicht Kostenreduktion
- Skalierbarkeit bis in den Gigawatt- Bereich möglich ohne Rohstoffproblem
- kurze energetische Amortisationszeit

Wegen einer höheren Komplexität von hochkonzentrierenden PV-Systemen im Vergleich zu konventionellen Flachmodulen eignen sich erstere insbesondere für den Einsatz im Kraftwerksbereich. Ein gewisses Maß an Wartung ist wegen der geregelten Nachführung und einer möglichen Verschmutzung der Optik notwendig.

Die noch junge Technologie birgt ein hohes Wirkungsgradpotenzial von hochkonzentrierenden Photovoltaiksystemen. Sowohl auf der Systemseite, als auch auf der Zelleseite sind noch erhebliche Verbesserungen zu erwarten. Gerade im Bereich der III-V Verbindungshalbleiter entwickeln sich die technologischen Möglichkeiten und die Qualität der Materialien überdurchschnittlich schnell. Ein wirklicher Durchbruch könnte z. B. dann erfolgen, wenn diese hocheffizienten III-V Solarzellenstrukturen auch auf Silicium abgeschieden werden können. Die Zell- und Systemwirkungsgrade sind auf jeden Fall ein sehr wichtiger Faktor für die Reduktion der Energiegestehungskosten in hochkonzentrierenden Photovoltaiksystemen.

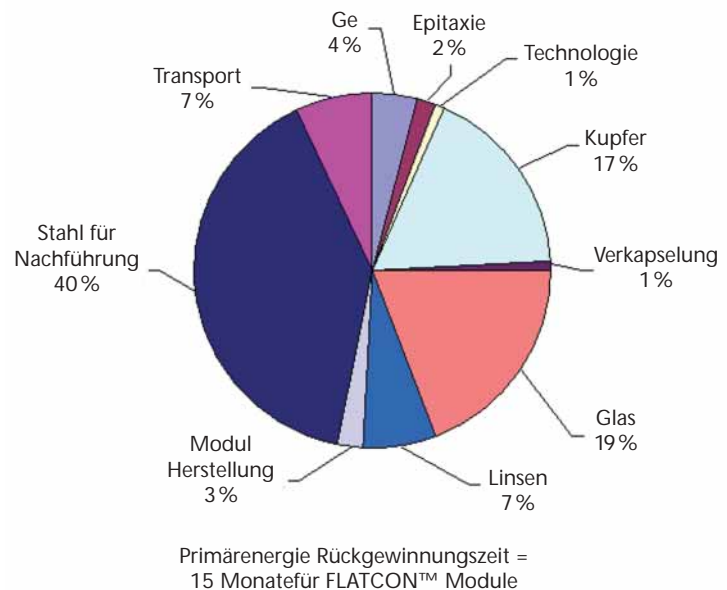
Weiter ließe sich die Produktion solcher Systeme kurzfristig bis in den GW-Bereich ausdehnen. Der Grund hierfür ist die geringe Menge an verarbeiteter Halbleiterfläche. Für eine Fabrik zur Herstellung von 20 MW FLATCON™ Systemen pro Jahr würden 4–5 Anlagen zur Abscheidung der Halbleiterschichten mit einem Flächenbedarf von nur etwa 500 m² ausreichen. Es würden nur etwa 400 kg Germanium (Ge) in Form von Ge-Wafern benötigt. Der wesentliche Aufwand für die Produktion solcher Systeme liegt demnach im Bau der Nachführeinheiten und der Glasmodule mit den darauf geprägten Linsen. So müssten in einer 20 MW Fabrik etwa 3500 Tonnen Stahl und 2500 Tonnen Glas jährlich verarbeitet werden. Dies sind jedoch Zahlen, die von der Automobilindustrie um Größenordnungen übertroffen werden und auch einem Ausbau der Fabrikation in den GW-Bereich hinein nicht behindern sollten.

Schließlich spricht noch ein weiteres Argument für die hochkonzentrierende Photovoltaik und dies sind die vergleichsweise kurzen projektierten Energie-Rückgewinnungszeiten. Für das FLATCON™ System wurde für einen sonnenreichen Standort im Süden Europas eine energetische Amortisationszeit von nur 15 Monaten berechnet (Abb. 4). Hierzu wurden Angaben für den Energieaufwand zur Herstellung der wesentlichen Materialien aus [9–11] verwendet. Es wurde ein Transport der Systeme über 2000 km angenommen. Einige kleinere Verbrauchsmaterialien, der Wechselrichter, die Wartung der Anlage, sowie das Recycling der Module wurden in dieser Rechnung noch nicht berücksichtigt. Eine detaillierte Beschreibung soll an anderer Stelle veröffentlicht werden.

Zusammenfassung

Hochkonzentrierende Photovoltaiksysteme sind der Versuch, die Erfolge in der Weltraumanwendung auch auf der Erde nutzbar zu machen. Sie sind die Verbindung aus einem winzigen hochtechnologischen Halbleiter-Chip mit einer kostengünstigen, präzisen Optik und Mechanik.

Der Einsatz hochkonzentrierender Photovoltaiksysteme in Kombination mit III-V Solarzellen



hat eine realistische Chance, sich einen Markt bei Kraftwerksanwendungen sichern zu können, wenn zuverlässige Systeme mit konkurrenzfähigen Stromgestehungskosten verfügbar sind. Hierzu sind höchste Modul- und Zellwirkungsgrade erforderlich.

Im Moment liegt der Wirkungsgrad der besten am Fraunhofer ISE hergestellten Konzentratormodulsolarzelle mit 2 pn-Übergängen bei 31 %, der des besten Testmoduls bei 24,8 % [8]. Letzteres stellt im internationalen Vergleich einen Spitzenwert dar. In USA [5] und Japan wurden kürzlich Zellwirkungsgrade von 36 % mit dreifach Zellen unter konzentriertem Licht gemessen, trotzdem übersteigen die Modulergebnisse nicht den vom Fraunhofer ISE erreichten Wert. Dies zeigt wie wichtig die Entwicklungen im Bereich der Systemtechnik sind. Hier liegt sicher eine große Herausforderung für die Zukunft.

Abbildung 4
 Prozentuale Aufteilung des Primär-Energieaufwands auf die verschiedenen Komponenten eines hochkonzentrierenden FLATCON™ Systems

Danksagung

Wir danken den Bundesministerien und dem Projektträger Jülich für die finanzielle Förderung.

Literatur

- [1] K. A. Bertness, S. R. Kurtz, D. J. Friedman, A. E. Kibbler, C. Kramer, and J. M. Olson, *Appl. Phys. Lett.* 65 (1994) 989-991
- [2] R. R. King, C. M. Fetzer, P. C. Colter, K. M. Edmondson, D. C. Law, A. P. Stavrides, H. Yoon, G. S. Kinsey, H. L. Cotal, J. H. Ermer, R. A. Sherif, K. Emery, W. Metzger, R. K. Ahrenkiel, and N. H. Karam, *Proceedings of the 3st World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Osaka 2003*
- [3] G. Strobl, R. Dietrich, J. Hilgarth, W. Köstler, R. Kern, M. Nell, S. Rothenbacher, A. W. Bett, F. Dimroth, M. Meusel, R. Campesato, C. Flores, G. Timò, G. Smekens, J. Vanbegin, G. Raskin, W. Geens, G. LaRoche, G. Hey, C. Signorini, and S. Taylor, *Proceedings of the 3st World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Osaka 2003*
- [4] F. Dimroth, C. Baur, M. Meusel, S. v. Riesen, and A. W. Bett, *Proceedings of the 3st World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Osaka 2003*
- [5] <http://www.solarbuzz.com/News/NewsNATE12.htm>
- [6] F. Dimroth, R. Beckert, M. Meusel, U. Schubert, and A. W. Bett, *Progress in Photovoltaics* (2001) 165-178
- [7] weitere Informationen unter www.flatcon.de
- [8] A. W. Bett, F. Dimroth, M. Hein, G. Lange, M. Meusel, U. Schubert, and G. Siefer, *29th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, New Orleans, Louisiana (2002)*, 844-47
- [9] E. Streicher, W. Heidemann, H. Müller-Steinhagen, OTTI – 12. Symposium Thermische Solarenergie, www.itw.uni-stuttgart.de/ITWHHomepage/TZS/Literatur/Otti2003_az.pdf (2002)
- [10] Information von Umicore Electro-Optic Materials, Belgien
- [11] http://www.voestalpine.com/downloads/download/vaag/00-ag-umwrep_de.pdf
<http://www.stinnes-freightlogistics.de/deutsch/produkteServices/umwelt/umweltbilanzierung/grundlagenbericht.html>

Neue Chalkopyrit (CIS)-Dünnschicht-Solarzellen – flexibel, leicht, effektiv

Einführung

Flexible Chalkopyrit-Photovoltaikmodule können die Anwendungsfelder von Dünnschichtsolarmodulen erheblich erweitern. Während im Architekturbereich (z. B. Dach, Fassade) die ästhetische Erscheinung und optimale Integration eine entscheidende Rolle spielen, kommt es für potenzielle Anwendungen im mobilen Bereich (Fahrzeuge, Luft- und Raumfahrt, Camping) eher auf geringes Gewicht und gute Transportierbarkeit an. Der schon seit nahezu 20 Jahren auf dem Markt befindliche flexible Solarzellentyp (amorphes Silicium) kann die gestellten Anforderungen aufgrund des relativ geringen Wirkungsgradniveaus jedoch nur teilweise erfüllen, so dass ein Interesse an Alternativen besteht.

Dünnschichtsolarmodule der Verbindungsklasse der Chalkopyrite haben die allgemeine chemische Formel $\text{Cu}(\text{InGa})\text{Se}_2$. Sie werden abgekürzt als CIS-Solarzellen bezeichnet und zeichnen sich durch ein hohes Wirkungsgradpotenzial aus. Der maximal erreichte Kleinzellen-Wirkungsgrad von CIS-Dünnschichtsolarmodulen liegt derzeit bei 19,2% [1]. Außerdem haben sie auch eine ausgeprägte Stabilität gegenüber Elektronen- und Protonenbestrahlung, wie unter anderem am IPE der Universität Stuttgart nachgewiesen werden konnte [2]. In Kombination mit einem geringen Gewicht und Kosten, die deutlich unter denjenigen von kristallinem Silicium- oder GaAs-Hocheffizienzsolarmodulen liegen, werden CIS-Solarzellen damit auch für Weltraumanwendungen sehr attraktiv. Daher hat sich die europäische Weltraumbehörde ESA nach einer eingehenden Evaluierungsphase inzwischen für die CIS-Solartechnologie entschieden. Werden alle genannten und potenziell realisierbaren Eigenschaften kombiniert, können CIS-Module herkömmliche und deutlich effizientere Weltraummodule verdrängen, da diese während der vorgesehenen Lebensdauer im Weltraum eine wesentlich geringere Bestrahlungsresistenz aufweisen, d. h. ihr ursprünglicher Wirkungsgrad η_{BOL} (BOL – „beginning of life“) degradiert auf

einen ähnlichen Wert η_{EOL} (EOL – „end of life“) wie er von CIS-Solarzellen unter gleichen Bedingungen permanent aufrechterhalten wird.

Die Markteinführung von CIS-Solarzellen auf Glassubstraten steht noch am Anfang. Daher könnte die Entwicklung und Produktion flexibler, leistungsfähiger Weltraumsolargeneratoren auf CIS-Basis als Spin-Off-Effekt die Etablierung der CIS-Technologie unterstützen. Der Bedarf an Weltraummodulen erwächst im Wesentlichen durch die Anforderungen aus dem Telekommunikationsbereich (z. B. UMTS, europäisches Positioniersystem). Das für die nächsten 10 Jahre abgeschätzte Marktpotenzial von ca. 100 kW/Jahr [3] für Europa in diesem Bereich ist allerdings relativ klein.

Herausforderungen

Die positiven Eigenschaften von Glas wie extrem glatte Oberflächen, Absorberdotierung mit Natrium, das aus dem Glas diffundiert, und relativ geringe Kosten werden allerdings durch seine Brüchigkeit und fehlende Flexibilität relativiert. Während ein typisches „Standard“ CIS-Modul, z. B. von Würth Solar, auf Natriumhaltigem Glas hergestellt und mit einer starren Glasscheibe verkapselt wird, müssen zur Herstellung eines flexiblen Moduls sowohl Träger- als auch Frontglas durch eine geeignete Folie ersetzt werden.

Substratfolie: Der Substratfolie fällt dabei besondere Bedeutung zu, da sie den gesamten Solarzellenherstellungsprozess durchläuft und z. B. durch ihre thermische Ausdehnung während der CIS-Absorberabscheidung und durch ihre chemische Aktivität und Oberflächenbeschaffenheit die Eigenschaften des Schichtverbunds beeinflusst. Schichthaftung, erzielter Wirkungsgrad, die Möglichkeit einer monolithischen Zellverschaltung können damit entscheidend vom Substrat bestimmt werden.

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

Dr. Roland Scheer
HMI
scheer@hmi.de

Marc Köntges
ISFH
m.koentges@isfh.de

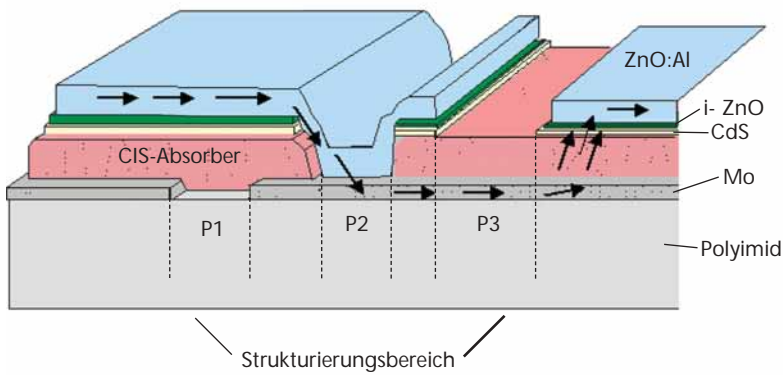


Abbildung 1
Strukturierungslinien P1, P2 und P3 auf Polyimidfolie. Im Gegensatz zu Glassubstraten wurde auf Folien P3 nicht bis auf das Molybdän durchgezogen.

Da bei der CIS-Herstellung im Standardprozess Temperaturen um 550 °C auftreten, ist die Auswahl von Substratfolien stark eingeschränkt. So ist Polyimidfolie die einzige geeignete, kommerziell erhältliche Polymerfolie, die Temperaturen bis $T \leq 450 \text{ °C}$ standhält. Dadurch sinkt der maximal erreichbare Wirkungsgrad ab, wie z. B. ein Vergleich der maximal erzielten Werte von $\eta = 12,8\%$ auf Polyimid- [4] und $17,4\%$ auf Stahlfolie [5] zeigen. Neben Polymerfolien kommen insbesondere Metallfolien in Betracht, z. B. aus Edelstahl oder Titan, die einen guten Kompromiss aus Wirtschaftlichkeit und physikalisch/chemischer Eignung darstellen. Die Auswahl an technologisch einsetzbaren Metallen oder deren Legierungen ist vergleichsweise groß. Kostenargumente sprechen zwar eindeutig für Aluminiumfolien, aufgrund des im Vergleich zu den Solarzellenschichten sehr hohen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von $\alpha = 23,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (vgl. Mo-Rückkontakt: $\alpha = 5,1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) und der damit verbundenen schlechten Schichthaltungen scheidet Aluminium jedoch als Substrat aus.

Die wichtigsten Eigenschaften von Polymer- und Metallfolien sind in nachfolgender Tabelle zusammengestellt.

Der Nachteil der geringeren Temperaturstabilität und damit des geringeren Wirkungsgradpotenzials von Polyimidfolie im Vergleich zu Metallfolie wird kompensiert durch den Vorteil von geringem Gewicht (Dichte), geringer Oberflächenrauheit und elektrisch isolierender Eigenschaft. Dadurch ist eine monolithisch integrierte Zellenverschaltung, wie sie auf Glassubstrat üblich ist, auf Polymerfolie leichter zu realisieren als auf Metallfolie. Beide Substrattypen eignen sich für eine Rolle-zu-Rolle Beschichtung, die im Allgemeinen als Voraussetzung für eine kostengünstige Produktion angesehen wird. Je nach Einsatzbereich des fertigen Produkts und dem Ziel der Entwicklung z. B. Effizienz pro Fläche, Effizienz pro Masse, hohe elektrische Spannung bei kleiner Fläche, minimale Kosten pro Watt, kann auf eine monolithische Verschaltung verzichtet und stattdessen die Solarzellenfläche vergrößert werden (große Einzeller).

Monolithische Verschaltung: Ein Vorteil von Dünnschichtmodulen ist die Möglichkeit, auf einem gemeinsamen, elektrisch isolierenden Substrat einzelne Zellen bereits während des Herstellungsprozesses in Serie zu verschalten. Für eine Serienschaltung sind dabei drei Strukturierungsschritte notwendig (siehe Abb. 1 von links nach rechts):

- Nach Abscheidung des Molybdän (Mo)-Rückkontaktes wird dieser in einzelne, elektrisch voneinander getrennte Zellen aufgeteilt (P1).

Tabelle 1
Vergleich von Polymer- und Metallfolien

Vergleich von Polymer- und Metallfolien			
Eigenschaft	Metall	Polymer	Einfluss auf
Temperaturstabilität	> 600 °C	≤ 450 °C	→ Wirkungsgrad
elektr. Leitfähigkeit	leitend	isolierend	→ monolithische Verschaltung
Oberflächenrauheit	rau [µm]	glatt [nm]	→ Strukturierbarkeit
Dichte	Al - Mo 2,7–10,2g/cm ³	Polyimid 1,4 g/cm ³	→ Modulgewicht
Härte und Zähigkeit	hoch	gering	→ Foliendicke (Kosten)

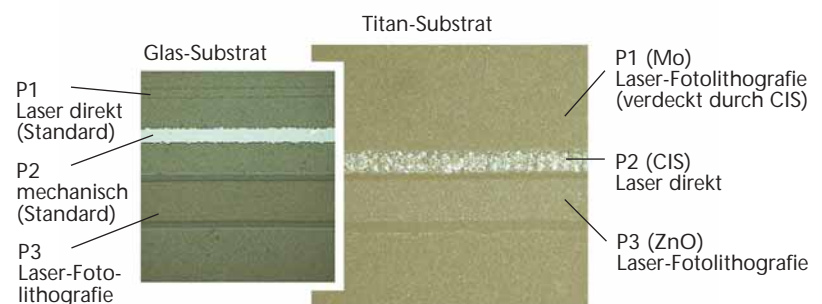
- Nachdem CIS-Absorber, Puffer-, sowie die (i-)ZnO-Schicht¹ aufgebracht sind, werden die Schichten auf dem Rand der Nachbarzelle bis zum Molybdän durchtrennt (P2). Am Ende dieses zweiten Strukturierungsschrittes erfolgt die Abscheidung der elektrisch leitfähigen, transparenten ZnO:Al-Schicht, die den Frontkontakt der einen Zelle mit dem Rückkontakt der Nachbarzelle verbindet.
- In einem dritten Strukturierungsschritt (P3) muss dann nur noch das leitfähige ZnO:Al aufgetrennt werden, um die kurzgeschlossenen Zellen wieder aufzuteilen.

(Bei Glasmodulen erfolgt P1 typischerweise mittels Laser, während P2 und P3 mit einem mechanischen Meißel vorgenommen werden).

Soll die Strukturierung auf weichen Polyimid-Substraten oder empfindlichen, mit einer elektrischen Isolationsbarriere (z. B. SiO₂) versehenen Metallfolie erfolgen, müssen die Strukturierungsmethoden modifiziert oder gänzlich neu entwickelt werden. Während die Mo-Auftrennung auf Polymer-Substrat noch direkt, z. B. mittels angepasstem Nd-YAG-Laser mit einer Wellenlänge von 1064 nm erfolgen kann, ist die Methode auf Metallfolie nicht einsetzbar, ohne die darunter liegende elektrische Isolationsschicht zu beschädigen. Ebenso kann die mechanische, selektive Durchtrennung des CIS-Absorbers (P2) oder des ZnO-Fensters (P3) nicht, wie auf Glas, mittels Meißel erfolgen, sondern muss durch ein schonenderes Verfahren ersetzt werden.

Um auch wellige, raue, empfindliche Substrate strukturieren zu können, sollten die verwendeten Methoden möglichst berührunglos und selektiv wirken. Am ZSW hat sich die schonend und einfach durchzuführende laserunterstützte Photolithografie etabliert. Bei dieser Methode wird nach Aufbringen des Fotolacks ein kurzwelliger Laser (409 nm) als Belichter eingesetzt. Im Gegensatz zur direkten Laserstrukturierung wird der Schichtstapel damit thermisch nicht belastet. Mit dieser Methode konnte auf isolierten Metallfolien sowohl der Mo-Rückkontakt (P1), als auch der ZnO-Frontkontakt (P3) erfolgreich aufgetrennt werden. Die Strukturierungslinien

zeichnen sich durch sehr präzise verlaufende und sanft ansteigende Ränder aus, so dass etwa nach einer CIS-Beschichtung des P1-Grabens dieser so gut bedeckt wird, dass er auch mit Hilfe eines Lichtmikroskops nicht mehr gesehen werden kann (siehe Abb. 2). Die P2-Strukturierung des CIS-Absorbers lässt sich prinzipiell ebenfalls mittels Laser-Fotolithografie durchführen; allerdings kann der Absorber auch direkt und damit einfacher durch einen Nd-YAG-Laser aufgetrennt werden, so dass vorrangig diese Methode eingesetzt wird (Abb. 2).



Sowohl auf Polyimidfolie, als auch auf elektrisch isolierter Metallfolie konnten erste ermutigende monolithisch integrierte CIS-Module mit einigen Prozent Wirkungsgrad hergestellt werden. Eine wesentliche Herausforderung für die Herstellung auf Metallsubstraten bildet neben der Strukturierung die flächenhaft einwandfreie elektrische Isolation der rauen Oberfläche. Hier wurden mit relativ dünnen ($\approx 3 \mu\text{m}$), aber dichten SiO_x-Schichten, die sowohl den CIS-Abscheidprozess bei 550 °C in Selen-Atmosphäre, als auch drei Strukturierungsschritte überstehen, entscheidende Fortschritte gemacht (siehe auch Artikel „Isolations- und Diffusionsbarrieren für Solarzellen auf großen Flächen“ von D. Hermann et. al in diesem Heft [6] Seite 96).

Abbildung 2
Strukturierungslinien auf einem Glas-Substrat (Referenz) und einem Polyimid-Substrat. Die Strukturierung P1, P2 und P3 auf dem Polyimid-Substrat (rechts) wurden neu entwickelt. (P1 und P2 auf Glas: Standard; P3 auf Glas: Referenz)

Realisierungskonzepte

In Deutschland wurde mit der Herstellung flexibler CIS-Module begonnen, die auf unterschiedlichen Konzepten mit unterschiedlicher Zielsetzung beruhen:

¹ Isolierende Zinkoxidschicht (ZnO)

Abbildung 3 (links)
Hocheffizienter
Einzeller mit „Grid“
auf Titanfolie (HMI)

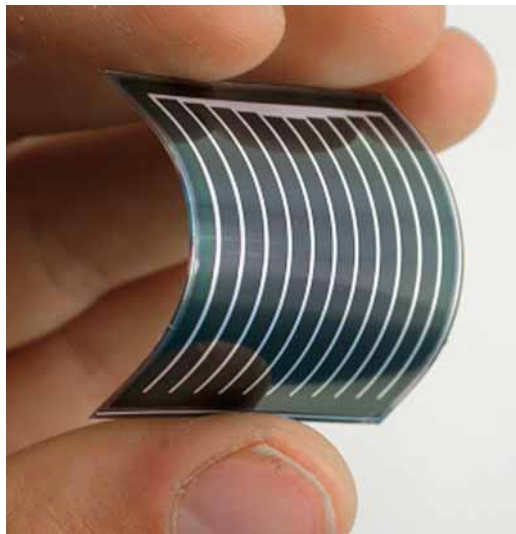
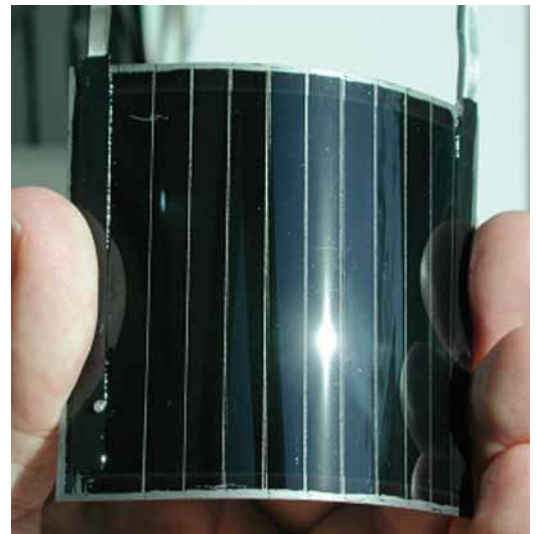


Abbildung 4 (rechts)
Kleinmodul mit 10
monolithisch verschal-
teten Zellen auf
Metallfolie (ZSW)



Hocheffizienzsolarzellen: Die höchsten CIS-Wirkungsgrade werden durch die stationäre Ko-Verdampfung von Kupfer, Indium und Gallium in Selenatmosphäre in einem 3-Stufen-Prozess erreicht. Der Cu(In,Ga)Se₂-Halbleiter wird in drei unterschiedlichen Phasen abgeschieden: Nach einer In-Ga-reichen Phase zu Beginn folgt eine Cu-reiche und am Ende wieder eine In-Ga-reiche Phase. Zur Erzielung höchster Effizienzen ist Folgendes notwendig:

- eine genaue Prozesskontrolle bereits während des Schichtwachstums notwendig (z. B. durch Messung der diffusen Laser-Lichtstreuung an der wachsenden CIS-Oberfläche [7])
- eine geeignete zerstörungsfreie Fehleranalyse des fertigen Generators (z.B. durch thermografische Aufnahmen des fertigen Moduls unter Stromdurchfluss)
- eine geeignete temperaturfeste Folie: Titan zeichnet sich dabei durch seine geringe Dichte und chemische Verträglichkeit zum Absorber aus, sowie durch seine günstige thermische Ausdehnung, die nahe bei derjenigen von Glassubstraten und CIS liegt.

Am HMI wurden unter den genannten Voraussetzungen CIS-Einzeller-Solarzellen für Weltraumanwendungen auf 25 µm dünnen

Ti-Folien hergestellt. Das in *Abb. 3* sichtbare metallische Frontgitter dient dabei der besseren Stromsammlung der Zelle. Auf einer Testzellenfläche von 0,5 cm² sowie auf einer Großzelle von 16 cm² konnten dabei unter AM 1,5¹-Beleuchtung folgende elektrische Kenndaten erzielt werden:

Kenndaten auf Titanfolie				
Zellfläche	V _{oc} [mV]	j _{sc} [mA/cm ²]	FF [%]	η
0,5 cm ²	646	31,5	77,4	15,8
16 cm ²	624	27,5	71,2	12,2

V_{oc} Leerlaufspannung (Zellspannung ohne Belastung)

j_{sc} Kurzschlussstrom

FF Füllfaktor (Verhältnis zwischen maximaler realer Leistung der Solarzelle und ideal möglicher Leistung, d. h. ohne innere Widerstände)

η Wirkungsgrad

Neben hocheffizienten Großzellen (*Abb. 3*) wurden auch erste monolithisch integrierte Kleinmodule im ZSW hergestellt. *Abb. 4* zeigt ein funktionierendes Modul auf einem mit einer SiO_x-Barriere isolierten Metallsubstrat (7 cm x 8 cm). Nach Aufbringen der Kontaktbändchen wurde das Bauteil mit einem Klarlack verkapselt. Am ZSW werden sowohl auf Metall- (Titan, Edelstahl) als auch auf Polyimidfolien flexible, monolithisch verschaltete Module bis 30 cm x 30 cm durch eine CIS-Ko-Verdampfung im „In-Line“-Verfahren (2-Stufen-Prozess) entwickelt.

¹ AM 1,5 bezeichnet die Luftmasse (air mass), die das Sonnenlicht durchqueren muss, bevor es auf die Solarzellen fällt.

CIS-Solarzellen auf Textilien: Das ISFH beschäftigt sich mit der Abscheidung von CIS-Solarzellen auf Textilien. Die relativ hohen im CIS-Prozess auftretenden Temperaturen stellen dabei keinen ernsthaften Hinderungsgrund dar, da relativ preiswerte und hochtemperaturfeste Textilien kommerziell verfügbar sind. Die größte Herausforderung liegt derzeit noch in der Notwendigkeit, die Faserstruktur durch einen geeigneten Hochtemperaturlack geringer Rauheit zu glätten. Erste Versuche mit einer Vorstufe aus Polyimid als glättendem Überzug wurden am ISFH erfolgreich durchgeführt (Abb. 5).

In Abb. 6 wird anhand eines Modells aufgezeigt, wie eine mögliche Verschaltung einzelner, separierter Solarzellen, z. B. durch Nähen erfolgen kann. Der leitfähige Faden verbindet dabei den ZnO-Frontkontakt (minus-Pol) mit dem Mo-Rückkontakt (plus-Pol) der benachbarten Zelle (von oben nach unten in Abb. 6).

Rolle-zu-Rolle Beschichtung: Am Institut für Solartechnologien in Frankfurt/Oder werden Chalkopyrit (CIS)-Solarzellen im Rolle-zu-Rolle-Verfahren erfolgreich auf 1 cm breitem Kupferband galvanisch abgeschieden. Das Cu-Band dient dabei gleichzeitig als Rückkontakt. Bei diesem „Low-Cost“-Verfahren werden die durch das Band definierten Zellen nach der Beschichtung auf eine definierte Länge geschnitten und mittels Schindeltechnik zu Modulen von bis zu 1m x 2,5m Größe verschaltet. Der erreichte Zellwirkungsgrad auf kleiner Fläche (4 cm²) liegt derzeit bei 9,2%.

Die Firma Solarion GmbH in Leipzig hat damit begonnen, CIS von Rolle-zu-Rolle auf 20 cm breite Polyimidfolie durch Ko-Verdampfung abzuscheiden. Besondere Spezialität ist dabei die ionenstrahlunterstützte Selenverdampfung, die dazu dienen soll, die Substrattemperatur auf Polyimid-verträgliche Werte zu senken ohne dies mit einer Wirkungsgradeinbuße bezahlen zu müssen. Gelingt dies auf dünner Polyimidfolie ($d = 7,5 \mu\text{m} - 25 \mu\text{m}$), so lässt sich damit ein besonders hohes Leistungs/Masse-Verhältnis erzielen, wie es bisher noch mit keiner anderen Photovoltaiktechnik erreicht werden konnte. Aufgrund des fortgeschrittenen Entwicklungsstands soll an dieser Stelle auf die Aktivitäten

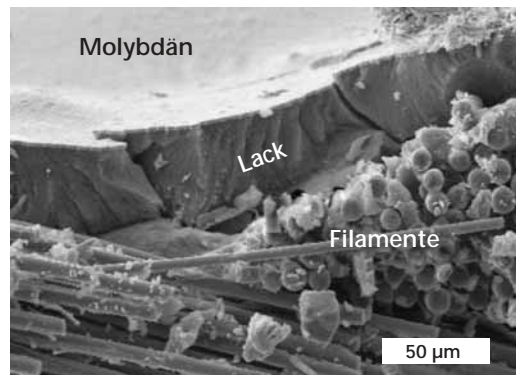
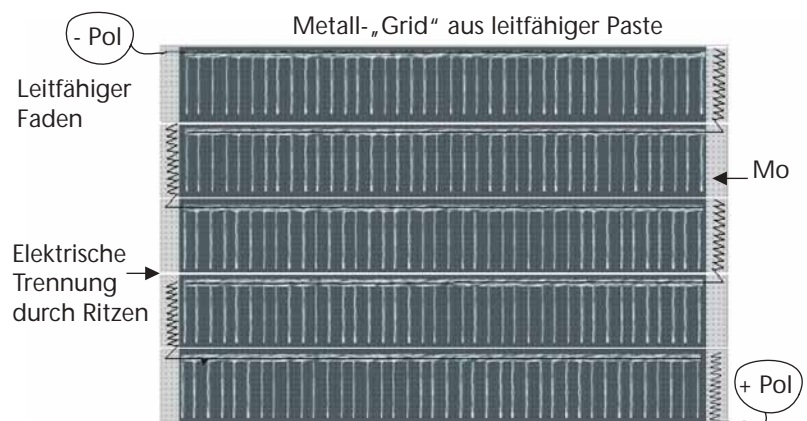


Abbildung 5
Schichtaufbau, bestehend aus Textilgewebe, Lack und Molybdän



des US-amerikanischen Instituts NREL (National Renewable Energy Laboratory) und der US-Firma Global Solar Energy (GSE) hingewiesen werden. GSE produziert mit einigen hundert kW pro Jahr im Rolle-zu-Rolle-Verfahren CIS-Einzeller auf Stahlfolie. Ebenso existieren Anlagen, in denen CIS-Zellen im Bandverfahren auf Polyimidfolie hergestellt werden [8].

Abbildung 6
Verschaltung von fünf Zellen mit „Grid“ durch einen leitfähigen Faden, d. h. durch Nähen

Schlussfolgerung

CIS-Dünnschichtsolarzellen sind zum bevorzugten Kandidaten für flexible, leichte und effiziente Module geworden. Kurz- und mittelfristig sollten erstmalig auf größeren und für den Leistungsbereich relevanten Flächen Wirkungsgrade von deutlich über 10% möglich sein.

Literatur

- [1] M. J. Romero, K. Ramanathan, M. A. Contreras, M. M. Al-Jassim, J. Abushama, R. Noufi, NCPV and Solar Program Review Meeting 2003, NREL/CD-520-33586, p. 517, 2003
- [2] A. Jasenek, A. Boden, K. Weinert, M. R. Balboul, H.-W. Schock, U. Rau, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 668, p. H3.2.1, 2001
- [3] Diskussionsergebnis ESA Workshop „Thin film solar generators for space“, Noordwijk, 27–28 February 2003
- [4] A. N. Tiwari, M. Krejci, F. J. Haug, H. Zogg, Progress in Photovoltaics: Res. & Appl. 7, p. 393, 1999
- [5] M. A. Contreras, B. Egaas, K. Ramanathan, J. Hiltner, A. Schwartzlander, F. Hasoon, R. Noufi, Prog. Photovolt: Res. Appl. 7, p. 311, 1999
- [6] D. Hermann et al. „Isolations- und Diffusionsbarrieren für Solarzellen auf großen Flächen“, FVS-Themenheft 2003 „Photovoltaic – Neue Horizonte“
- [7] R. Scheer, A. Neisser, K. Sakurai, P. Fons, S. Niki, Appl. Phys. Lett. Vol. 82, No.13, p. 2091, 2003
- [8] S. Wiedeman, M. E. Beck, R. Butcher, I. Repins, N. Gomez, B. Joshi, R. G. Wendt, J. S. Britt, Proc. of the 29th IEEE PV Specialists Conf., May 19-24, New Orleans, p. 575, 2002