

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

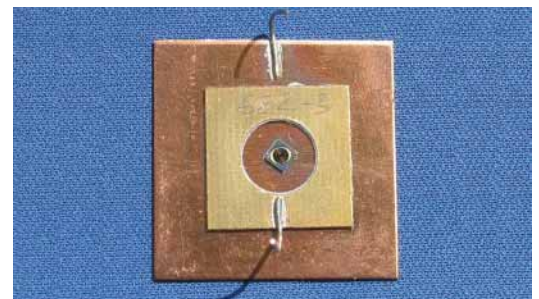
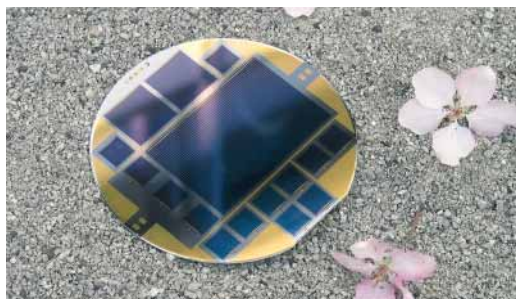
Zwei Verlustmechanismen begrenzen den Wirkungsgrad von herkömmlichen Solarzellen mit einem pn-Übergang: Die Thermalisierung (Wärmeerzeugung) heißer Ladungsträger, erzeugt durch Photonen mit einer Energie, welche größer ist als die Bandlücke, und die Transmission (Nicht-Absorption) von Photonen mit einer 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 abgeschlossen 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.

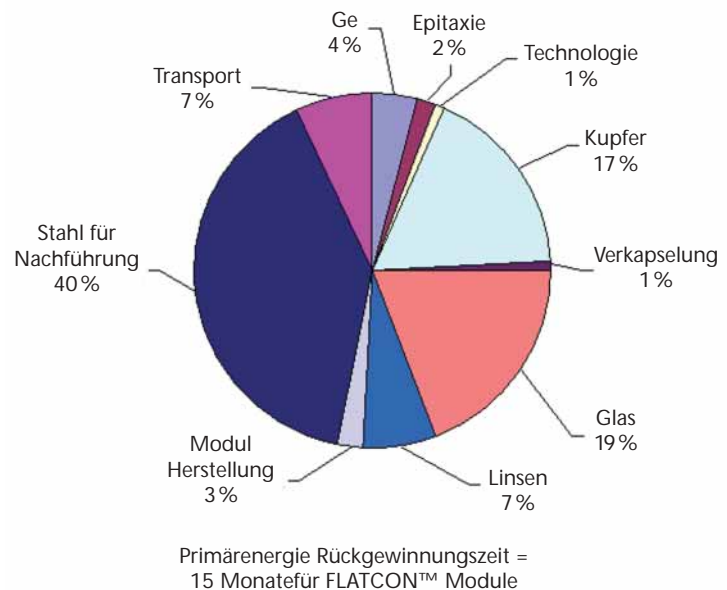
Weiter ließe sich die Produktion solcher Systeme kurzfristig bis in den GW-Bereich ausdehnen. Der Grund hierfür ist die geringe Menge an verarbeiteter Halbleiterfläche. Für eine Fabrik zur Herstellung von 20 MW FLATCON™ Systemen pro Jahr würden 4–5 Anlagen zur Abscheidung der Halbleiterschichten mit 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 Konzentrosolarzelle 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>