

Photovoltaik – Neue Horizonte

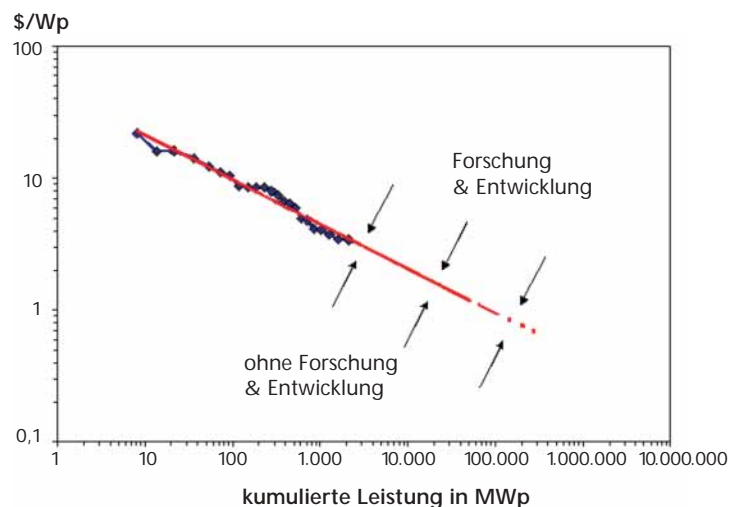
Für ein neues Energieforschungsprogramm der Bundesrepublik [1] fordert der FVS • Forschungsverbund Sonnenenergie in seinem Eckpunkte-papier eine Verdopplung der Fördermittel des Bundes im Bereich Erneuerbare Energien innerhalb der nächsten fünf Jahre. Eine derartige Forderung zur Erhöhung von Finanzmitteln in diesem Forschungs- und Entwicklungsfeld ist – nach Meinung des FVS – unabdingbar, um die folgenden drängenden Problemkreise mit der unbedingt notwendigen Geschwindigkeit anzugehen:

- Schutz unserer natürlichen Lebensgrundlage
- Bekämpfung der Energiearmut in weiten Teilen der Welt
- Verringerung des geopolitischen Konfliktpotenzials
- Erzeugung neuer Produkte für den Markt

Zielgerichtete und durch Strategien untermauerte, wachsende Anstrengungen im Bereich Forschung und Entwicklung sind die Basis für Lösungen in den ersten drei genannten Problemfeldern. Darüber hinaus schaffen Forschung und Entwicklung im Bereich der erneuerbaren Energien auch neue Produkte für den Markt und helfen so, die Gewinnmöglichkeiten von Unternehmen zu stärken und Arbeitslosigkeit zu bekämpfen. Zusätzlich schaffen industrielle Umsätze in Bereichen, die nicht der großmaßstäblichen Energieversorgung zuzurechnen sind – zum Beispiel die Stromversorgung industrieller Geräte durch Solarzellen – ein zusätzliches Marktvolumen, das zu verstärkten Kostenreduktionen führt und somit die ökonomische Situation der erneuerbaren Energien auch im eigentlichen Energiebereich signifikant verbessert.

Anwendungsorientierte Forschung im Bereich der Photovoltaik muss in erster Linie auf eine drastische Kostenreduktion hinzielen. Wege dazu sind: geringerer Materialverbrauch, höherer Wirkungsgrad bei der Energiekonversion und die Realisierung innovativer Photovoltaikkonzepte mit hohem Kostensenkungspotenzial.

Industrie und Forschung sind hier – mit Unterstützung durch staatliche Fördermittel – in den vergangenen 10 bis 20 Jahren sehr erfolgreich gewesen. Dies verdeutlicht die Preis-Erfahrungskurve photovoltaischer Module (*Abb. 1*).



Die Steigung der Kurve in *Abb. 1* zeigt, dass sich die Preise bei jeder Verdopplung des Marktvolumens bisher um etwa 20% verringert haben. Aufgetragen ist der mittlere Preis von Modulen in doppeltlogarithmischem Maßstab über der gesamten, weltweit verkauften Menge. Dies ist für Industrieprodukte ein hervorragend günstiger Wert. Die gesamte, Ende 2002 installierte, Nennleistung an photovoltaischen Modulen betrug 2,1 Gigawatt (GW).

Die Pfeile in *Abb. 1* sollen Kräfte andeuten, die zu einer wahrscheinlichen Änderung der Steigung der Kurve mit und ohne eine starke Forschung und Entwicklung führen können. Völlig neue photovoltaische Technologien müssen – beginnend bei kleinen Marktmengen – eine eigene Preis-Erfahrungskurve durchlaufen. Es besteht die begründete Aussicht, dass auch solche Produkte in Konkurrenz zur marktbeherrschenden Silicium-Technologie wesentliche Marktanteile erobern werden.

Natürlich ist es unsicher, solche Kurven – auch Lernkurven genannt – sehr weit in die Zukunft

Prof. Dr. Joachim Luther

Fraunhofer ISE

joachim.luther@ise.fraunhofer.de

Abbildung 1
Preis-Erfahrungskurve des globalen Marktes photovoltaischer Module, die auf der Basis von Silicium-Wafer-Solarzellen hergestellt werden.

zu extrapolieren. Insbesondere ohne die ständige Realisierung technologischer Innovationen besteht die Gefahr, dass die Geschwindigkeit der Preisreduktion merklich abnimmt. Gegenkräfte zu dieser Tendenz lassen sich über Forschung und Entwicklung mobilisieren. Forschung und Entwicklung muss dabei zum einen die Techniken optimieren, die derzeit in der industriellen Produktion sind (*linker oberer Pfeil in Abb. 1*), sie muss aber zum anderen auch neue Technologien, also „Technologieschiffe“, die derzeit am Horizont sichtbar sind, zur Industrielleife entwickeln. Essentiell zur Bewältigung der oben genannten globalen Problemfelder ist darüber hinaus eine sehr langfristig angelegte Strategie, mit einer anwendungsorientierten Grundlagenforschung als wesentlichem Element: Es müssen Technologien erforscht werden, die sich noch jenseits unseres Horizonts befinden, von denen – um im Bild zu bleiben – gerade erst die Mastspitzen sichtbar werden.

In diesem Beitrag werden Beispiele für neue Technologien diskutiert, die heute bereits am Horizont sichtbar sind, für deren Überführung in die industrielle Anwendung aber noch beträchtlicher Forschungs- und Entwicklungsaufwand notwendig sein wird. Es ist sehr wahrscheinlich, dass eine Aktivierung entsprechender Innovationspotenziale dafür sorgt, dass zum einen bei der derzeit marktbeherrschenden Silicium-Wafer-Technologie (*Abb. 2*) die beeindruckenden Fortschritte bei der Preissenkung auch in der mittelfristigen Zukunft aufrechterhalten werden und, dass zum

anderen neue photovoltaische Technologien den Markt erobern.

In *Abb. 2* werden Solarzellentechnologien mit Marktvolumina größer als 3 MW/a gezeigt. Die neuen Technologien mit geringeren Marktvolumina, die heute am Horizont sichtbar sind, werden in diesem Beitrag anhand von Beispielen behandelt. Photovoltaische Module aus monokristallinem, multikristallinem und Band-Silicium machen heute über 90% des Weltmarktes für Leistungsmodule aus. Als Dünnschichttechnologie besitzt das amorphe Silicium einen relevanten Marktanteil.

Generell lässt sich aus heutiger Sicht sagen, dass in der Photovoltaik vor allem durch Innovationen „vom Horizont an Land“ gebracht werden können. Folgende Technologiegebiete haben einen besonders hohen Forschungs- und Entwicklungsbedarf:

- Entwicklung von solarspezifischen Materialien (derzeit werden im Wesentlichen teure Materialien aus der Elektronikindustrie für die photovoltaische Massenproduktion eingesetzt).
- Reduktion des Materialbedarfs: dünnere Wafer für die Siliciumphotovoltaik, Dünnschichtsolarzellen (*Abb. 3 bis 6*).
- Höhere Wirkungsgrade photovoltaischer Energiekonverter. Obwohl der „Brennstoff“ der Solarzellen – das Sonnenlicht – kostenlos zur Verfügung steht, sind mit der photovoltaischen Energiekonversion viele flächenproportionale Kosten verbunden. Dies macht die Steigerung der Flächenenergieerträge unbedingt erforderlich (*Abb. 7 bis 9*).
- Extrem langlebige Module: Verkapselungstechniken für die Photovoltaik, die eine technische Lebensdauer dieser Komponenten von deutlich über 30 Jahren zulassen.
- Innovative Fertigungstechnologien: Hochratenbeschichtungstechnologien für Dünnschichtsolarzellen, Handhabung von papierdünnen Siliciumwafern in der Produktion, etc.

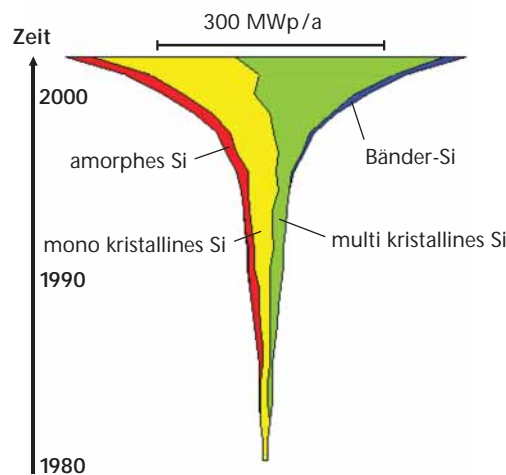


Abbildung 2
Stammbaum der
Photovoltaik: Markt-
anteile der einzelnen
Technologien
(Si = Silicium)

- Fortschrittliche elektrische Systemtechnik: Leistungselektronik zur Einspeisung von Photovoltaikstrom in Netze, die im Zusammenspiel vieler Anlagen eine gute Netzqualität und eine hohe Versorgungssicherheit garantieren (Abb. 10).
- Angepasste Stromnetze: Entwicklung einer intelligenten Netzstruktur, die die flexible Einbindung unterschiedlichster Stromerzeuger gestattet und gleichzeitig Stromqualität und Sicherheit garantiert (Abb. 10).

Beispiele für neue Forschungs- und Entwicklungshorizonte der Photovoltaik:

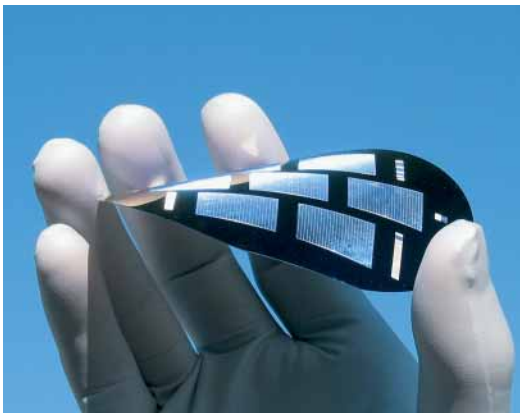


Abb. 3 zeigt, dass sich Solarzellen mit Wirkungsgraden von 20% mit industrietauglichen Verfahren auf 50 µm dicken Wafern prozessieren lassen [2]. Für eine kostengünstige Massenproduktion dieser papierdünnen Wafer müssen aber über Forschung und Entwicklung noch

geeignete Verfahren entwickelt werden. Diverse Ansätze sind derzeit in der Entwicklung.

In der Abb. 4 entspricht die vertikale Richtung der Zeitachse. Über 90% der photovoltaischen Leistungsmodule werden derzeit über die Wafer-Siliciumtechnologie hergestellt (linker blauer Dreizack). Daneben sind in der Abbildung Dünnschichtmaterialien dargestellt, auf deren Basis bereits seit längerem industriell produziert wird (a-Si – amorphes Silicium) beziehungsweise diejenigen, die sich seit einigen Jahren in der Pilotproduktionsphase befinden (CIS, CdTe-Cadmiumtellurid). Für Dünnschichtsolarzellen auf der Basis von kristallinem Silicium (CVD-Si)¹ ist noch eine längere Forschungs- und Entwicklungsphase vor der industriellen Einführung vonnöten.

Solarzellen aus GaAs und verwandten Materialsystemen (III/V-Materialien)² werden derzeit verstärkt in der Raumfahrt eingesetzt. Auch für ihren Einsatz in optisch konzentrierenden terrestrischen Kraftwerken wird heute intensiv geforscht und neue Technologien entwickelt (Abb. 9). Farbstoff- und organische Solarzellen versprechen eine sehr preisgünstige Herstellung photovoltaischer Energiekonverter. Nach heutigem Stand der Kenntnis werden ihre Anwendungen vor allem im Gebäude-Fassadenbereich und in der Geräteintegration liegen (Abb. 6). In allen hier erwähnten Technologiefeldern sind innovative Fertigungstechnologien von entscheidender Bedeutung.

Abbildung 3
Papierdünne und flexible Silicium-Wafer-solarzellen

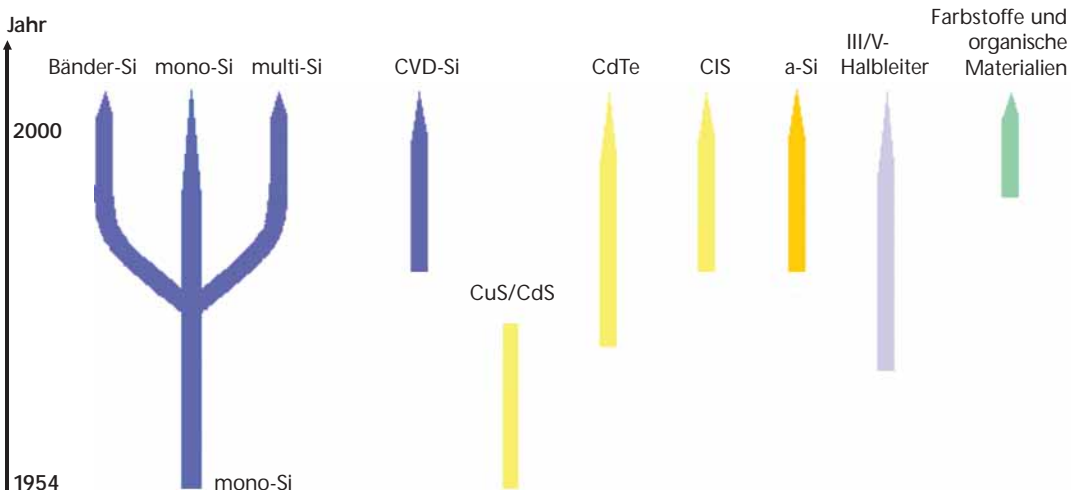


Abbildung 4
Evolution photo-voltaischer Energie-konversion
Si = Silicium
CIS = Kupfer-Indium-Diselenid

¹ CVD – Chemical Vapor Deposition ist eine Herstellungsmethode für Silicium Dünnschichtsolarzellen.

² III/V-Materialien bestehen aus Elementen der III. und V. Hauptgruppe des Periodensystems der Elemente.

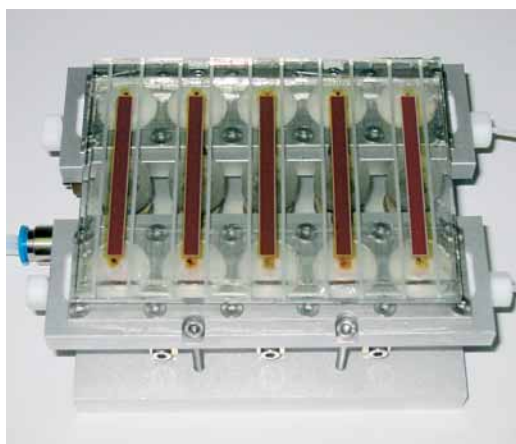
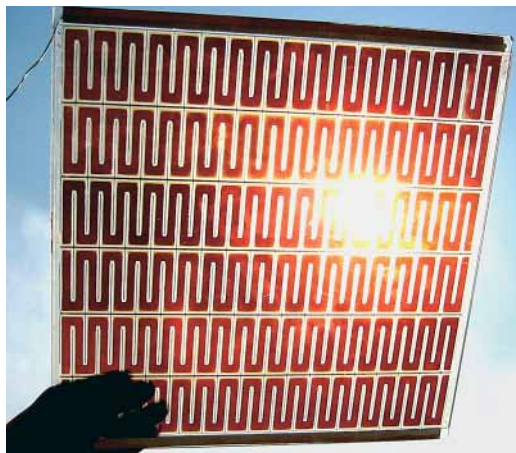
Abbildung 5
Flexibles Dünnschicht-
modul auf Kupfer-
Indium-Diselenid
(CIS)-Basis



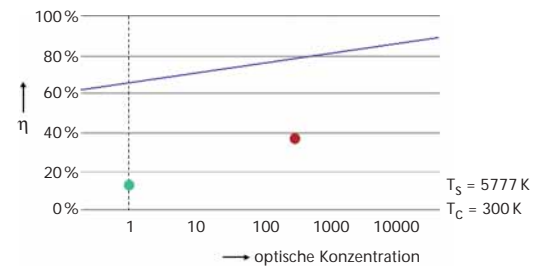
Abbildung 7
Darstellung des hohen
Entwicklungspotenzials
der Photovoltaik
anhand der thermo-
dynamischen
Wirkungsgradgrenzen
photovoltaischer
Energiekonversion [4]

Flexible Module auf Kupfer-Indium-Diselenid (CIS)-Basis wie in Abb.5 dargestellt haben voraussichtlich überall dort einen Markt, wo es auf geringes Gewicht, Robustheit und Biegsamkeit ankommt: in der Raumfahrt, im Freizeitbereich, in gewölbten Glasflächen. Die Herstellung von Solarmodulen direkt auf flexiblen und damit aufrollbaren Trägerfolien verspricht zudem eine deutliche Senkung der Fertigungskosten [3].

Abbildung 6
Farbstoffsolarzellen,
ein 30 cm x 30 cm-
Modul, darunter La-
bortestzellen



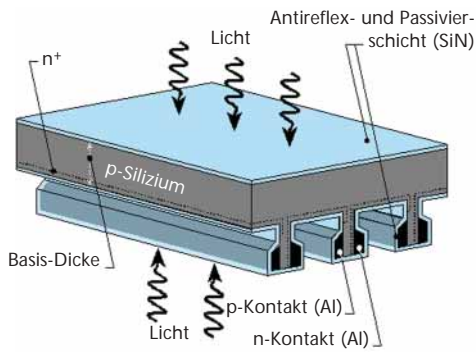
Farbstoffsolarzellen (Abb. 6) haben unter Umständen – ebenso wie die organischen Solarzellen – das Potenzial einer beträchtlichen Kostensenkung. Vor einer großmaßstäblichen industriellen Umsetzung sind allerdings noch umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen notwendig.



Für die thermodynamischen Rechnungen wurde eine Temperatur der Photosphäre der Sonne von $T_S = 5777\text{ K}$ und eine Temperatur der Solarzellen von $T_C = 300\text{ K}$ angenommen. η = Wirkungsgrad

Wie in Abb. 7 dargestellt, hängen die prinzipiell erreichbaren Wirkungsgrade photovoltaischer Energiekonversion vom verwendeten physikalischen Prinzip der Konverter („Architektur“ der Solarzellen) und von der Intensität der solaren Bestrahlungsstärke ab. Bei der heute verwendeten Architektur industrieller Solarzellen liegt ohne optische Konzentration die prinzipielle Wirkungsgradgrenze bei etwa 30%. Die besten hocheffizienten industriellen Solarzellen zeigen in der Massenproduktion Wirkungsgrade von etwa 16% (grüner Punkt). Es wird erwartet, dass ein Wirkungsgrad von 20% auf der Basis von Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen in der industriellen Produktion erreicht wird. Mit dem Konzept der Tandemsolarzelle, bei dem mehrere für einzelne Spektralbereiche des Sonnenlichtes optimierte Solarzellen monolithisch übereinander angeordnet werden, lassen sich die Wirkungsgrade beträchtlich steigern bis zur theoretischen Grenze, die als obere blaue Linie eingezeichnet ist. Bei einer optischen Konzentration um den Faktor 300 und einer dreifach Tandemzelle lassen sich heute Zellwirkungsgrade von knapp 37% (roter Punkt) erreichen [5].

Die Abbildung demonstriert eindrücklich das hohe Entwicklungspotenzial der Photovoltaik. Wirkungsgradsteigerungen müssen allerdings auch – und vor allem – in Kostenreduktionen umgesetzt werden.



Eine bifaciale Solarzelle wie in *Abb. 8* kann sowohl Licht, das auf die Vorderseite einfällt, als auch Licht, das die Rückseite der Zelle erreicht, in elektrische Energie umwandeln. Beide elektrischen Kontakte sind auf der Rückseite angebracht, dies ergibt von der Vorderseite gesehen optisch einen sehr gleichmäßigen Eindruck. Mit dieser industrienahen Solarzellenstruktur werden bei Vorderseitenbeleuchtung Wirkungsgrade nahe 20% erreicht. Bei gleichzeitiger Beleuchtung von der Rückseite ist eine Steigerung der Ausgangsleistung um etwa 60% möglich.

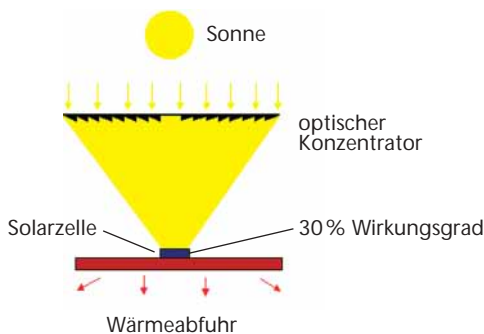


Abb. 9 symbolisiert, dass die optische Konzentration bei heutigen Laborsystemen Werte von bis zu einem Faktor 1000 erreicht. Die Fokus-

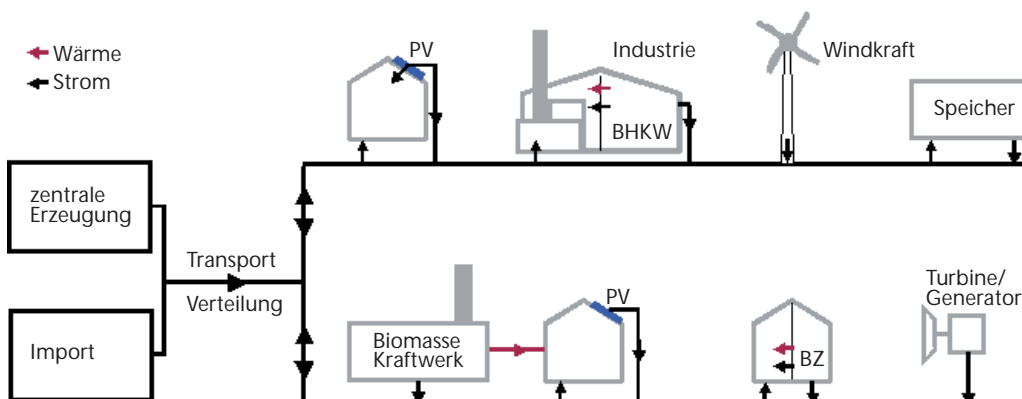
sierung des Lichtes bewirkt zum einen, dass miniaturisierte photovoltaische Elemente höchsten Wirkungsgrades, wie z. B. Tandemsolarzellen (*siehe Bildunterschrift zu Abb. 7*) verwendet werden können. Zum anderen steigt der Wirkungsgrad photovoltaischer Energiekonversion [8]. Photovoltaische Konverter dieses Typs haben das Potenzial, in größeren Kraftwerkeinheiten eingesetzt zu werden. Die geeigneten Konverter müssen dazu in geeigneten Modulen gekapselt werden. Wegen der hohen optischen Konzentration kann bei diesem Konzept nur die direkte Sonnenstrahlung in elektrische Energie umgewandelt werden. Die Systeme werden daher mit hoher Präzision der Sonne nachgeführt.

Nach dem Konzept für eine zukünftige verteilte Stromversorgung wie in *Abb. 10* dargestellt wird die Elektrizitätsbereitstellung in Mitteleuropa – aller Voraussicht nach – auf drei wesentlichen Säulen ruhen: zentrale und dezentrale Erzeugung in Mitteleuropa sowie Import solaren Stroms aus dem Mittelmeerraum. Der importierte Strom wird nach heutigem Wissensstand im Wesentlichen in photovoltaischen und solarthermischen Kraftwerken erzeugt werden. Das Konzept der verteilten Erzeugung gestattet es, eine Vielzahl von Stromquellen, die auf erneuerbaren Quellen basieren, in Netzstrukturen zu integrieren: Solarzelleneinheiten, Windenergiekonverter, Kleinwasserkraftanlagen, Biomassekraftwerke, geothermische Konverter, etc. Aber auch Stromerzeuger, die fossile Brennstoffe oder Wasserstoff umsetzen, lassen sich vorteilhaft in einem System verteilter Erzeugung einsetzen: Mikroturbinen und Blockheizkraftwerke, wie zum Beispiel Brennstoffzelleneinheiten (BZ).

Abbildung 8
Hocheffiziente Solarzellenstruktur: bifaciale photovoltaische Zelle mit Rückseitenkontakten [6]

Abbildung 9
Kombination aus optischem Konzentrator (hier Fresnel-Linse) und höchsteffizienter Tandemsolarzelle [7]

Abbildung 10
Das Konzept der verteilten Stromerzeugung



Bei den letztgenannten Systemen wird insbesondere die Nutzung der bei der Stromerzeugung anfallenden Abwärme vorort oder im Nahbereich stark erleichtert.

Bei Einsatz geeigneter Kommunikationstechnologien und maßgeschneiderter Leistungselektronik bietet die verteilte Erzeugung große Chancen, die Netzqualität, die Versorgungssicherheit und die effiziente Nutzung von Energie zu erhalten, beziehungsweise in beträchtlichem Umfang zu steigern.

Schlussfolgerung

Bei der Lösung der eingangs erwähnten vier Problemkreise muss Forschung auf dem Feld der Photovoltaik drei Entwicklungsfenster strategisch berücksichtigen:

- Weiterentwicklung der Technologie, die heute das rasante Marktwachstum trägt
- Entwicklung von Technologien, die „am Horizont“ Profil gewinnen
- Erforschung von Energiekonversionsverfahren, die teilweise noch „jenseits des Horizonts“ verborgen sind

Der vorliegende Beitrag konzentriert sich ausschließlich auf das mittlere Fenster. Ziel ist es zu zeigen, dass die Photovoltaik ein enormes physikalisches, technisches Entwicklungspotenzial besitzt (*Abb. 7*) und, dass es Technologien am greifbar „nahen Horizont“ gibt, mit denen dieses Potenzial erschlossen werden kann. Alle diese neuen Verfahren der solaren Energiekonversion bieten die Chance, die Kosten photovoltaisch erzeugten Stroms auch in Zukunft weiter drastisch zu senken.

Literatur

- [1] Eckpunktepapier des Forschungsverbunds Sonnenenergie für ein neues Energieforschungsprogramm der Bundesregierung; Berlin, Juni 2003
- [2] G. Willeke und A. Räuber, Erfolge der Photovoltaikforschung: Kristalline Silicium-Solarzellen, Themenheft 2003: „Photovoltaik – Neue Horizonte“ Jahrestagung des Forschungsverbunds Sonnenenergie, Berlin 2003
- [3] Neue Chalkopyrit (CIS)-Dünnschichtsolarzellen – flexibel, leicht, effektiv. F. Kessler, R. Scheer und M. Könges, Themenheft 2003 „Photovoltaik – Neue Horizonte“, Jahrestagung Forschungsverbunds Sonnenenergie, Berlin 2003
- [4] R. Sizmann, Solar Radiation Conversion, in Solar Power Plants, Springer 1991
- [5] Wirkungsgradrekord Tandem mit optischer Konzentration. Zitat: Photon International, Juli 2003, Seite 17
- [6] R. Hezel, Novel Back Contact Silicon Solar Cells Designed For Very High Efficiencies And Low-Cost Mass Production, Proc. 29th IEEE Photov. Spec. Conf. New Orleans, 2002, S. 114
- [7] A. W. Bett, C. Baur, R. Beckert, F. Dimroth, G. Letay, M. Hein, M. Meusel, S. Riesen v., U. Schubert, G. Siefert, O. V. Sulima, T. N. D. Tibbits, Development of High-Efficiency GaInP/GaInAs-GaSb Triple-Junction Concentrator Solar Cells, Proceedings of the 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Munich, Germany, 2001, pp. 84 – 87
- [8] P. Würfel, Physik der Solarzellen, Spektrum Akademischer Verlag, 1995