

Entwicklung neuer Produktionstechnologien für die Solarenergienutzung im ForschungsVerbund Sonnenenergie

Prof. Dr. Rolf Brendel
ISFH
rolf.brendel@isfh.de

Erneuerbare-Energien-Gesetz als Technologieentwicklungsinstrument

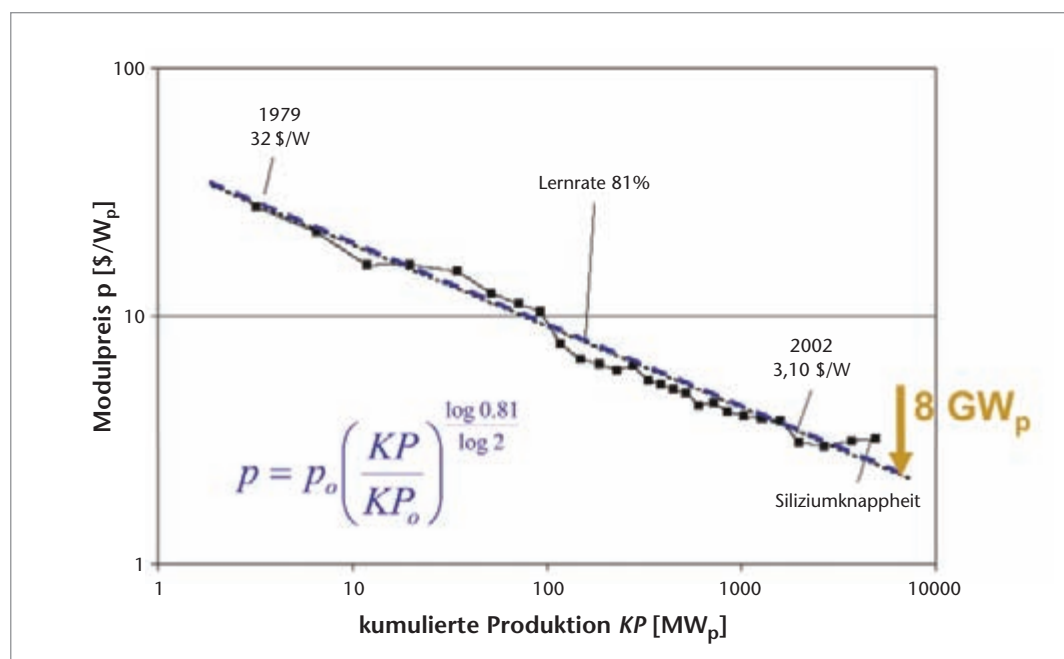
Durch die Förderung der erneuerbaren Energien im Strombereich konnten im Jahr 2006 rund 44 Mio. Tonnen CO₂ eingespart werden [1]. Das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) hat sich damit als effektives Klimaschutzinstrument bewährt. Und nicht nur das. Auch die Technologieentwicklung wurde beschleunigt. Die deutschen Forschungsinstitute des Forschungsverbunds Sonnenenergie (FVS) haben durch das EEG einen Entwicklungsschub erhalten, der durch mehr Forschungsförderung allein nicht eingetreten wäre. Die gestiegene Nachfrage der Wirtschaft nach Forschungs- und Entwicklungsleistungen hat die Anzahl und die Größe der Forschungsprojekte erhöht und so intensiver als bisher zu einer dringend benötigten Verkürzung

von Innovationszyklen geführt. Dies hat zu einer Stärkung des Forschungsstandorts Deutschland beigetragen und unsere Stellung im internationalen Wettbewerb verbessert. Der hohe Qualifikationsgrad von Forschungspersonal für den Bereich erneuerbarer Energien in Deutschland wird durch die Ausbildungsleistung des Forschungsverbunds Sonnenenergie gestützt und ist für in- und ausländische Unternehmen ein wichtiger Standortfaktor.

Kostenreduktion durch innovative Produktionstechnologie

Die Mitgliedsinstitute des Forschungsverbunds Sonnenenergie widmen sich zusammen mit ihren Industriepartnern der angewandten Forschung für erneuerbare Energien. Die Jahrestagung „Produktionstechnologien für die

Abbildung 1
Reduktion des Modulpreises p mit der weltweit kumulierten Produktion KP . Diese so genannte Lernkurve zeigt, dass eine Verdoppelung der Produktion in der Vergangenheit jeweils zu einer Kostenreduktion um 20% führte.



Solarenergie“, über die der vorliegende Band berichtet, fand im September 2007 an der Leibniz Universität in Hannover statt und befasst sich thematisch mit Photovoltaik, Niedertemperatur-Solarthermie und solarthermischen Kraftwerken, denen der FVS insgesamt etwa 40 % seiner Forschungskapazitäten widmet. Dabei wird der größte Teil in die dringend erforderliche weitere Kostenreduktion durch verbesserte Produktionstechnologien der solaren Energiesysteme investiert.

Abbildung 1 illustriert am Beispiel von Photovoltaikmodulen den Erfolg der bisherigen Optimierung von Material-, Prozess- und Produktionstechnologie. Während der Ölpreis von 1979 bis heute um den Faktor zwei gestiegen ist, sind die Preise für Photovoltaikmodule im gleichen Zeitraum um mehr als einen Faktor 10 gesunken [2]. In Kürze werden weltweit etwa 8 Gigawatt (GWp) an PV-Modulen installiert sein. Für 1000 Sonnenstunden pro Jahr entspricht dies einer jährlichen Stromproduktion von 8 Terrawattstunden (TWh).¹

Eine ähnlich schnelle Preisdegression wurde für Wechselrichter erzielt [3], die notwendig sind, um den Gleichstrom aus den Solarzellen in Wechselstrom umzuwandeln. Eine Kostenreduktion ist sehr wichtig, weil alle Komponenten eines Photovoltaiksystems billiger werden müssen, um die Preise pro Kilowattstunde erheblich zu senken.

Trotz des bisher schon erreichten Fortschritts müssen die Anstrengungen für die Kostenreduktion weiter verstärkt werden. Denn die Kosten für solare elektrische Energie, müssen nach den Empfehlungen des Bundesumweltministeriums (Entwurf des EEG-Erfahrungsberichts vom 5. Juli 2007) bereits innerhalb von sechs Jahren um einen Faktor zwei reduziert werden. Das jetzige Marktwachstum sollte jedoch aufrecht erhalten werden. Die dafür erforderliche Kostenreduktion könnte durch eine Verdoppelung des Energiewandlungswirkungsgrades oder durch eine Halbierung der Produktionskosten erreicht werden. Da die physikalischen Prinzipien der solaren Energiewandlung im Wesentlichen schon sehr gut verstanden sind, ist eine

drastische Reduktion der Produktionskosten zwar schwierig – aber dennoch viel leichter zu erreichen, als eine drastische Steigerung des Wirkungsgrades in so kurzer Zeit. Das unterstreicht die große Bedeutung einer optimierten Produktionstechnik.

Bei der derzeit anlaufenden Massenproduktion von Komponenten für die Solarenergie lohnen sich oft schon sehr kleine Verbesserungen, die sich manchmal auch ohne neue Produktionstechniken allein durch eine Feinabstimmung der bekannten Fertigungsprozesse realisieren lassen. Diese Arbeiten werden schwerpunktmäßig von den produzierenden Firmen selbst durchgeführt.

Die FVS-Mitgliedsinstitute hingegen legen den Schwerpunkt der Kooperation mit der Solarwirtschaft meist auf die Entwicklung kostengünstiger Produkte durch neue Produktionstechniken. Nachfolgend werden einige Beispiele für die erfolgreiche Entwicklung optimierter Produktionstechniken in den FVS-Mitgliedsinstituten präsentiert, die alle in gemeinsamer Arbeit mit der deutschen Solarindustrie entstanden sind.

Produktionstechnologie für die Niedertemperatur-Solarthermie

Die Kosten solarthermisch erzeugter Wärme sinken, wenn der Kollektor mehr Solarstrahlung aufnimmt. Um möglichst viel Solarstrahlung aufzunehmen, kann die Glasabdeckung beidseitig mit einer Antireflexionsschicht beschichtet werden [4]. Hohe optische Qualität, Langzeitstabilität und niedrige Produktionskosten müssen gleichzeitig realisiert werden.

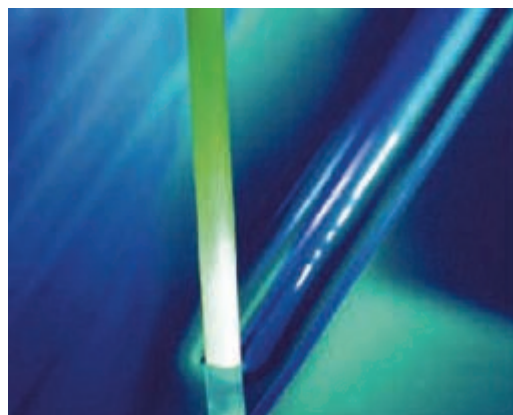


Abbildung 2
Sol-Gel-Beschichtung großer Gläser für die Kollektorabdeckung. Das FVS-Institut Fraunhofer ISE unterstützt die Entwicklung der Tauchbeschichtung.

Bildquelle:
Fraunhofer ISE

¹ Dies entspricht 0,05 % der Welt-Stromproduktion.

Abbildung 3
Solarthermisches
Kraftwerk Andasol in
Spanien. Das FVS-
Institut DLR entwickelt
Methoden zur Justage
der Spiegel.

Bildquelle: DLR



Dieses Ziel hat das Fraunhofer ISE mit seinen Industriepartnern durch die Entwicklung eines SolGel Beschichtungsverfahrens erreicht.

Abbildung 2 zeigt den Beschichtungsprozess, der aufgrund der porösen Struktur der Antireflexionsschicht eine Steigerung der solaren Transmission von 90 % auf 95 % erlaubt [5].

Produktionstechnik für solarthermische Kraftwerke

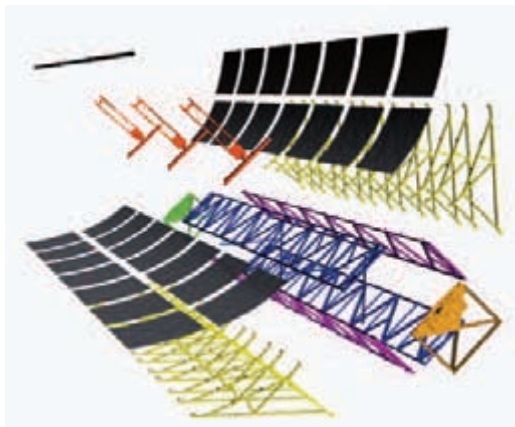
In solarthermischen Kraftwerken wird Solarstrahlung optisch auf ein Arbeitsmedium konzentriert. Das erhitzte Arbeitsmedium treibt eine Dampfturbine an und ein Generator erzeugt elektrische Leistung. Beim großtechnischen Einsatz der Solarenergie müssen sehr große Flächen mit optischen Konzentratoren belegt

werden. Das 50 MWp Solarkraftwerk Andasol in Spanien verwendet 7.488 Module von der in *Abbildung 3* gezeigten Art.

Abbildung 4 zeigt die Komponenten eines Moduls. Alle Module des Kraftwerks zusammen bestehen aus 210.000 Spiegeln die von 840.000 Montagepunkten gehalten werden. Das DLR hat die wissenschaftlich-technische Entwicklung vom Prototypen bis zur Serienfertigung begleitet. Eine besondere produktionstechnische Herausforderung besteht darin, alle Montagepunkte mit einer Genauigkeit von 0,5 mm in kostengünstiger Weise zu positionieren. Zur Kontrolle und Justage haben die DLR-Forscher neue optische Messmethoden entwickelt, mit denen die Position der Montagepunkte und die Form der Spiegel präzise und schnell gemessen werden können [6]. Eine schnelle Messung der Moduloptik ist beispielsweise durch Beobachtung des Receiverabbildes mit einer in der Ferne positionierten Kamera möglich.

Abbildung 4
Explosionszeichnung
eines Konzentrator-
moduls.

Bildquelle: DLR



Produktionstechnik für die Silizium-Wafer-Photovoltaik

Photovoltaikmodule wandeln Sonnenstrahlung mit Solarzellen in elektrischen Strom. Die Wertschöpfungskette besteht aus diesen Schritten:

- Gewinnung des Rohstoffs Silizium
- Herstellen von Siliziumkristallen und Siliziumwafern

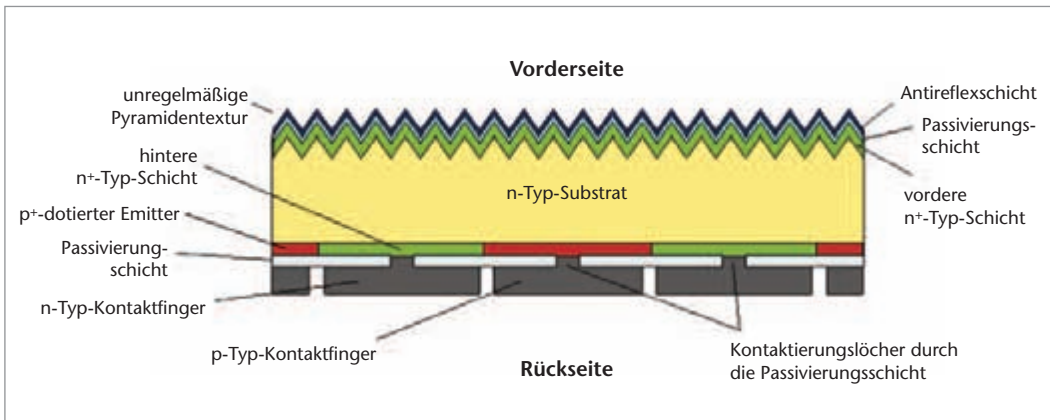


Abbildung 5
Rückkontaktsolarzelle der Q-Cells AG, die mit Unterstützung der zwei FVS-Mitgliedsinstitute ISFH und Fraunhofer ISE entwickelt wurde und im Labor einen Wirkungsgrad von 21,8% erreicht.

Bildquelle: Q-Cells AG

- Prozessieren der Wafer zu Solarzellen
- Verbinden und Laminieren der Zellen zu Modulen
- Herstellen von Invertern
- Installation der Photovoltaikmodule auf den Dächern.

In allen diesen Bereichen sind zukünftig weitere Kostenreduktionen nötig und möglich.

Die Stromausbeute von Solarzellen kann zum Beispiel dadurch gesteigert und die Stromkosten gesenkt werden, dass Abschattungen des Sonnenlichts durch die Kontaktfinger auf der Vorderseite der Solarzelle vermieden werden. Dies wird dadurch erreicht, dass beide Kontakte der Solarzelle auf der Rückseite angebracht werden. Diese neue Kontaktgeometrie verändert den Herstellungsprozess der Solarzelle erheblich. Die Firma Q-Cells AG hat gemeinsam mit dem ISFH und dem Fraunhofer ISE das in

Abbildung 5 skizzierte Zellkonzept entwickelt, das in die Massenfertigung der Q-Cells AG überführt wird. Die neuen Herstellungsverfahren bearbeiten die Materialien mit modernen Lasersystemen. Ergebnis: Auf einem Substrat der Fläche 100 cm² (designated area) wurde ein Wirkungsgrad von 21,8% erreicht bei einer Scheibendicke von nur 130 µm.

Üblicherweise werden PV-Module wie folgt hergestellt: Zunächst werden die einzelnen Solarzellen durch das Anlöten von Verbindern miteinander in Reihe geschaltet. Die so entstandenen Strings werden von einem Roboter auf eine Glasscheibe aufgelegt, die mit einer transparenten Kunststoffschicht aus Ethylenvinylacetat (EVA-Folie) belegt ist, in die die Solarzellen eingebettet werden. Weil Solarzellen zur Materialersparnis immer dünner werden, besteht bei der Handhabung der Strings ein Risiko, dass Solarzellen brechen. Forschern des

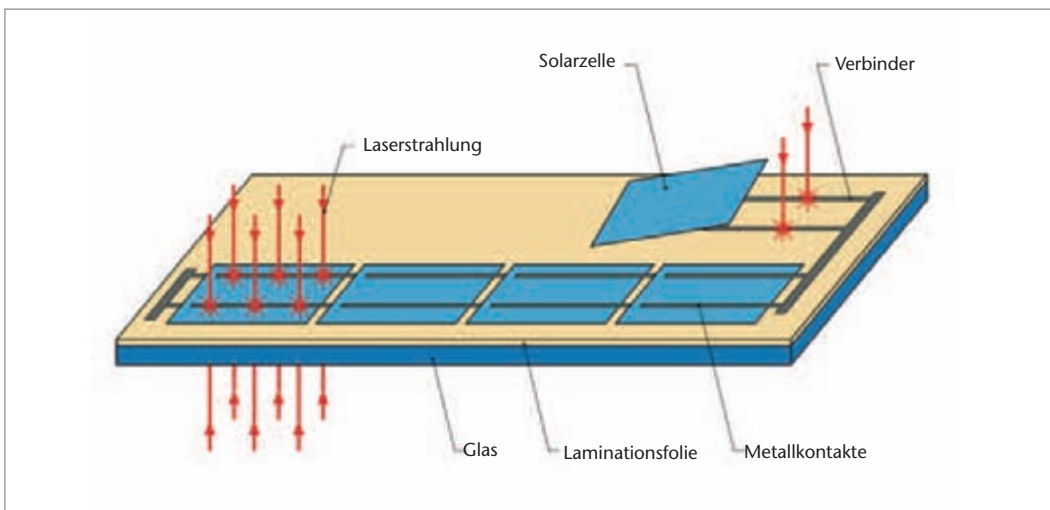


Abbildung 6
Auf-Laminat-Laserlöten (OLLS) zur Vermeidung des „Handlings“ von Strings mit dem Roboter.

Bildquelle: ISFH

Abbildung 7

Ein Roboter gibt eine Glasscheibe in die Produktionsstraße. Auf der Scheibe wird ein CIGS-Dünnschicht-PV-Modul hergestellt. Die Technologie hierfür wurde vom FVS-Mitgliedsinstitut ZSW entwickelt.

Bildquelle: ZSW



ISFH ist es nun gelungen, durch den Einsatz von Lasern, die Handhabung von Strings mit Robotern ganz zu eliminieren.

Wie in *Abbildung 6* dargestellt, werden die Solarzellen dafür direkt auf die EVA-Folie und die Modulglasscheibe gelegt und dort durch Laserlöten miteinander verbunden. Weil der Laserlötprozess sehr schnell ist, wird die EVA-Folie nicht geschädigt [7]. Es wird erwartet, dass mit diesem neuen so genannten „On-Laminat-Laser-Soldering“ (OLLS) die Ausbeute des Modulherstellungsprozesses gesteigert werden kann.

Produktionstechnik für die CIGS-Dünnschicht-Photovoltaik

Ein weiterer Ansatz zur Kostenreduktion ist das Einsparen teurer Materialien. Während kristalline Siliziumsolarzellen etwa 200 bis 250 µm dick sind, ist es heute möglich, auch mit nur wenigen Mikrometer dicken Halbleiterschichten PV-Module mit wirtschaftlich attraktiven Wirkungsgraden herzustellen. Neben der Materialersparnis ist ein weiterer Vorteil dieser Techniken, dass alle Prozessschritte direkt auf der großen Glasscheibe gefahren werden und somit relativ kostengünstig durchgeführt werden können.

Eine besonders attraktive Dünnschichttechnik setzt als Halbleiter eine Kupfer-Indium-Gallium-

Diselenid (CIGS)-Verbindung ein. Das ZSW hat für diese Technologie einen Abscheideprozess entwickelt, der in Kooperation mit der WÜRTH SOLAR GmbH & Co.KG zunächst in die Pilotierung [8] und jetzt in die Massenfertigung gebracht wurde. Die Eröffnung der Würth Solar CISfab im Oktober 2006 in Schwäbisch-Hall markiert die erste „full scale“ Produktionsstätte für PV-CIS-Module weltweit. Die Entwicklungen hierfür wurden in den siebziger Jahren an der Universität Stuttgart begonnen und seit den neunziger Jahren vom ZSW mit dem Ziel der großtechnischen Umsetzung konsequent weiterverfolgt. Dies zeigt deutlich, welchen langen Atem eine erfolgreiche Technologieentwicklung von der universitären Grundlagenforschung bis zum Einstieg in die Massenfertigung benötigt. Diese CIS-Solarzellenfabrik gibt 140 Menschen einen Arbeitsplatz.

Solche erfolgreichen Kooperationen zwischen Industrie und Forschung sind kein Einzelfall: In ähnlicher Weise unterstützt das HMI die Kommerzialisierung der SulfurCell Solartechnik GmbH in Berlin, die PV-Module aus Kupfer-Indium-Sulfid produziert. Auch hier sind die Impulse aus der Grundlagenforschung der 90er Jahre für den wirtschaftlichen Erfolg von zentraler Bedeutung. Beispielsweise haben die Forscher des HMI durch die während der Sulfurisierung von Vorläuferschichten gemessenen Röntgenbeugungsspektren das Verständnis der Phasenbildung im Absorber ermöglicht [9].

Produktionstechnik für die PV-Systemtechnik

Eine Kostenreduktion bei den Wechselrichtern wurde in der Vergangenheit außer durch größere Stückzahlen in der Produktion insbesondere durch die funktionale Integration erzielt. Das Aluminium-Druckgussgehäuse ist heute nicht nur das Wechselrichtergehäuse sondern gleichzeitig Kühlkörper, Griff, und Lüfterhalter. Intensive Qualitätskontrollen durch geeignete Tests von Wechselrichtern unter verschiedenen klimatischen Bedingungen (Abb. 8) garantieren lange Lebensdauern der Wechselrichter und niedrige Stromgestehungskosten.



Abbildung 8
Wechselrichter in einer Klimakammer.

Bildquelle: SMA

Über die Verbilligung der Einzelkomponenten eines erneuerbaren Energiesystems hinaus müssen alle Komponenten optimal miteinander zusammenarbeiten, damit das Potenzial der erneuerbaren Energiesysteme auch ausgeschöpft werden kann. Das ISET widmet sich schwerpunktmäßig diesen systemtechnischen Fragen erneuerbarer Energiesysteme.

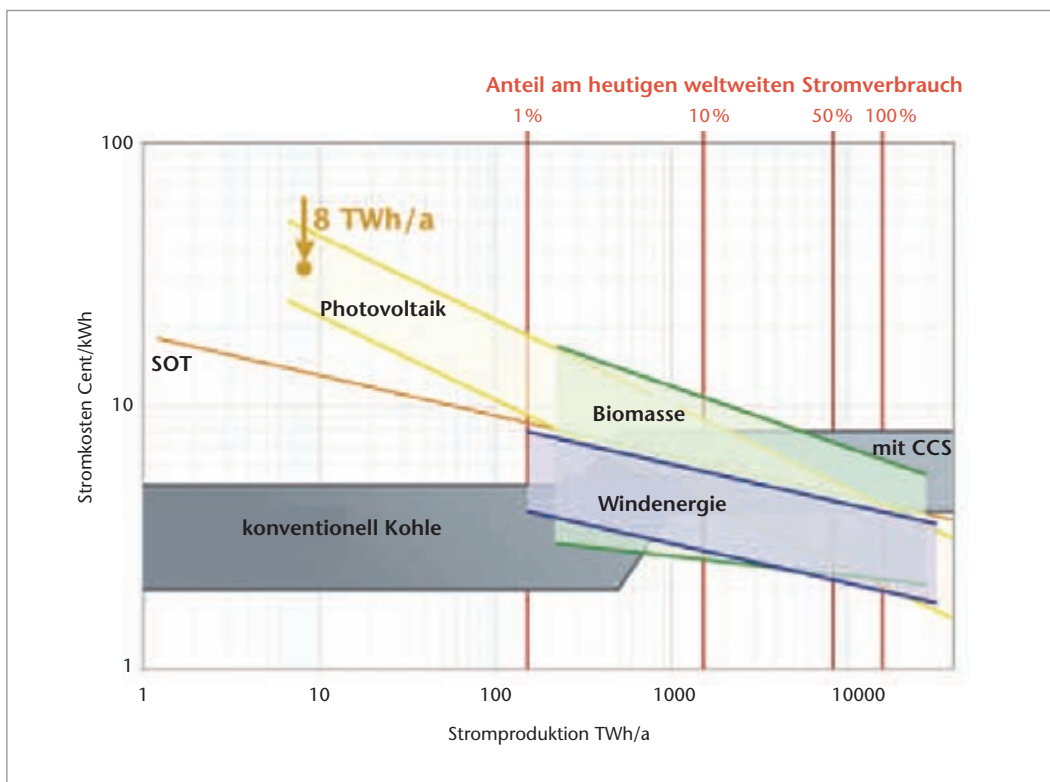


Abbildung 9
Entwicklung der Stromerzeugungskosten als Funktion der globalen jährlichen Stromproduktion in doppelt-logarithmischer Auftragung im Vergleich zu als konstant angesetzten Stromkosten konventioneller Kraftwerke heute und zukünftig mit CO₂-Sequestrierung (CCS). Die Startwerte der Kostenbänder stellen die aktuellen globalen Mengen und Kosten dar, die Endwerte entsprechen den Potenzialen des exemplarischen Pfads.

Bildquelle: /10/

Zukünftige Forschungsaufgaben

Abbildung 9 vergleicht die künftig zu erwarteten Stromgestehungskosten als Funktion der produzierten Strommenge unter Zugrundelegung bisher beobachteter Lernkurven der Photovoltaik, Windenergie, solarthermischen Kraftwerken (SOT) und Strom aus Biomasse [10]. Demnach sind die Stromgestehungskosten der verschiedenen Technologien ähnlich hoch sobald sie jeweils etwa 10 % der weltweiten Stromproduktion bereitstellen. Die oben genannten 8 TWh Stromproduktion durch die Photovoltaik markieren in dieser Darstellung den Anfang der Lernkurve. Die Bandbreite der Kosten ergibt sich aus verschiedenen Standorten – zum Beispiel bei der Photovoltaik zwischen Mitteleuropa und Südeuropa. Die Gültigkeit dieser Darstellung setzt natürlich voraus, dass auch die zukünftig technologische Entwicklung ausreichend innovativ ist, um eine immer kostengünstigere Produktion der für die Solarenergienutzung erforderlichen Komponenten zu erlauben.

Die Forschung und Entwicklung im Bereich erneuerbarer Energien und insbesondere im Bereich Solarenergie wurde in der Vergangenheit durch eine gute Kooperation zwischen den Forschungsinstituten und der Solarindustrie getragen. Diese Kooperation war sehr erfolgreich. Mit diesem Erfolg wächst aber auch der Forschungsbedarf weiter an. Es gibt viele neue Firmen, die in die Entwicklung von Komponenten für die Solarenergie einsteigen und die von der Unterstützung durch die Forschung sehr profitieren. Denn es gibt viele neue, noch nicht evaluierte Entwicklungspfade, die auch in Zukunft eine rasche Kostenreduktion ermöglichen.

Die durch das EEG induzierte anwendungsnahe Forschung sollte strategisch und längerfristig ausgeweitet werden, damit neben der Begleitung laufender Entwicklungen auch neue Themenfelder aufgegriffen und qualifiziert werden können. Während derzeit weltweit mit zweistelligen Zuwachsraten Milliardenbeträge in Anlagen investiert werden, steigen die Bundesmittel für die Forschung zu erneuerbaren Energien im 5. Energieforschungsprogramm 2005 bis 2008 jährlich um lediglich fünf

Millionen Euro (sechs Prozent). Hinzu kommt, dass die Ausgaben für die Erforschung erneuerbarer Energien mit 139 Millionen Euro im Jahr 2007 nach wie vor weniger als ein Drittel der gesamten Energieforschungsausgaben des Bundes ausmachen. Gemessen an der großen Bedeutung, die den erneuerbaren Energien für einen wirksamen Klimaschutz, die langfristige Sicherung der Energieversorgung und die Schaffung zukunftsfähiger Arbeitsplätze zukommt, ist dies unzureichend.

Die dauerhafte Absicherung der Erfolge bei der Entwicklung erneuerbarer Energien muss im gemeinsamen Interesse von Energie-, Umwelt- und Industriepolitik liegen. Die geplante Aufstockung der Forschungsmittel, insbesondere durch das Bundesumweltministerium, ist ein wichtiger Schritt in die richtige Richtung. Erforderlich ist jedoch auch eine längerfristige Perspektive. Der Forschungsverbund Solarenergie empfiehlt deshalb für die nächsten fünf Jahre einen deutlichen Anstieg der Forschungsausgaben des Bundes für erneuerbare Energien um mindestens 20 Prozent pro Jahr.

Danksagungen

Die FVS-Mitgliedsinstitute danken für die Projektförderung der Bundesministerien BMU, BMWi, BMELV und BMBF, der Bundesländer, der EU sowie vieler weiterer Einrichtungen. Insbesondere sei den engagierten Mitarbeitern in den Instituten für ihren Einsatz gedankt.

Literatur

- [1] Erfahrungsbericht 2007 zum Erneuerbare-Energien-Gesetz, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, beschlossen vom Bundeskabinett am 7. November 2007, Seite 35.
www.erneuerbare-energien.de/inhalt/40342/40485/
- [2] R. M. Swanson, A vision for crystalline silicon photovoltaics, Progr. in Photovolt. 14, 443 (2006).

- [3] M. Meinhardt, A. Engler, B. Burger, PV-Systemtechnik, Ein Motor der Kostenreduktion für die photovoltaische Stromerzeugung, in diesem Band S. 76
- [4] T. Hofmann, Antireflexbeschichtete Kollektoren bringen mehr Ertrag, Erneuerbare Energien 8 (2001).
- [5] A. Gombert, W. Glaubitt, K. Rose, J. Dreibholz, B. Bläsi, A. Heinzel, D. Sporn, W. Döll, V. Wittwer, Antireflective transparent covers for solar devices, Solar Energy 68, 357 (2000).
- [6] K. Pottler, E. Lüpfer, G. H. G. Johnston, and M. R. Shortis, Photogrammetry: A powerful tool for geometric analysis of solar concentrators and their components, Journal of Solar Energy Engineering 127, 94 (2005).
- [7] M. Gast, M. Köntges, and R. Brendel, Lead-free on-laminate-laser-soldering: a new module assembling concept, Progress in Photovoltaics, 2008, in press, DOI: 10.1002/pip.782
- [8] Powalla M., Dimmler B., Schäffler R., Voorwinden G., Stein U., Mohring H.-D., Kessler F., Hariskos D. CIGS solar modules: progress in pilot production, new developments and applications, in Proceedings of the 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, (Paris, 2004)
- [9] R. Mainz, R. Klenk, M. C. Lux-Steiner, Sulphurisation of gallium-containing thin-film precursors analysed in-situ, Thin Solid Films 515, 5934 (2007).
- [10] J. Schmidt, „Neue Impulse für die Klimapolitik: Chancen der Doppelpräsidentschaft nutzen“ WBGU 21. Dezember 2006