Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 90 (1999)

Heft: 10

Artikel: Photovoltaik in der Schweiz : technologischer Stand und Aussichten

Autor: Nowak, Stefan

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-901939

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 17.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Photovoltaik in der Schweiz – Technologischer Stand und Aussichten

Die Photovoltaik erfreut sich allgemein eines zunehmenden Interesses, sowohl in der Öffentlichkeit wie in Fachkreisen von Hoch- und Fachhochschulen, Industrie und Elektrizitätswirtschaft. Im vorliegenden Beitrag wird der technologische Stand der Photovoltaik in der Schweiz beschrieben und in den internationalen Zusammenhang gestellt. Anhand dieser Feststellungen werden kritische Elemente in Bezug auf die Photovoltaik identifiziert und daraus die künftigen Herausforderungen formuliert. Dabei wird die Photovoltaik, gemäss der Definition im Schweizer Photovoltaik-Programm, als Energiesystem diskutiert. Der Stand von Forschung und Technologie wird deshalb mit klarem Bezug auf die Anwendung besprochen und der Entwicklungsbedarf aus diesen Erkenntnissen abgeleitet.

■ Stefan Nowak

Einleitung

Das weltweite Marktvolumen der Photovoltaik war 1998 in der Grössenordnung von 150 MW_p (MW_p = Megawatt peak, Leistung unter Standardbedingungen) und nimmt zurzeit jährlich um 20 bis 30% zu. Damit wird belegt, dass die Photovoltaik einerseits bereits heute für einen rasch wachsenden Markt technisch reif ist und in kleinem Massstab zuverlässig Energie produzieren kann, andererseits aber im Sinn der Energiewirtschaft noch keine quantitative Bedeutung erlangt hat. In der Schweiz wurden 1998 rund 2 MW_p installiert, wobei hier aufgrund neuer Finanzierungsmöglichkeiten (Solarstrom vom Elektrizitätswerk) und Subventionen des Bundes eine starke Steigerung eingetreten ist. Die Energiepreise, welche mit heutiger Technologie und dem vergleichsweise kleinen Marktvolumen erzielt werden können, sind für eine breite Anwendung zwar noch nicht konkurrenzfähig, in bestimmten Segmenten aber bereits heute wirtschaftlich (insbesondere autonome Systeme). Als Haupthindernisse gelten zum einen die Wirtschaftlichkeit, zum anderen aber auch die Finanzierbarkeit.

Weltweit ging man lange Zeit davon aus, dass die Photovoltaik für wirtschaftliche Anwendungen in Grossanlagen eingesetzt wird, welche entsprechend viel freistehende Fläche beanspruchen. Dieser Umstand hat immer wieder zu Kontroversen geführt. Parallel dazu wurden Lösungen entwickelt für kleine Inselanwendungen ohne Netzversorgung. Erste Anwendungen in der Gebäudeintegration wurden 1989 erstellt, wobei diese Entwicklung massgeblich von der Schweiz ausging. Ab 1990 fand eine neue Sicht der Marktentwicklung statt, in welcher der Photovoltaik-Markt durch ein Diffusionsmodell beschrieben wird. In diesem Modell werden die verschiedenen Anwendungen mit unterschiedlicher Wirtschaftlichkeit zu verschiedenen Zeitpunkten marktreif und entsprechend erschlossen. In den 90er Jahren fand eine starke Entwicklung mit zunehmenden marktorientierten Förderprogrammen statt, insbesondere ab 1995. Damit einhergehend fand auch eine massive Erweiterung der Produktionskapazität statt, wodurch die Industrialisierung der Photovoltaik vorangetrieben wurde.

Netzgekoppelte, gebäudeintegrierte Systeme, für die Schweiz von besonderer Bedeutung, werden voraussichtlich bei günstigen Rahmenbedingungen gegen Ende des nächsten Jahrzehnts in den Bereich der Wirtschaftlichkeit gelangen. Die Preise konnten in den vergangenen Jahren kontinuierlich und substantiell gesenkt werden – in der Grössenordnung von 25% über die letzten fünf Jahre. Das Potential der Photovoltaik wird allgemein als beträchtlich erachtet – für mitteleuropäische Verhältnisse kann der Beitrag langfristig zwischen 20 und 30% des heutigen Elektrizitätsverbrauchs bestreiten, dies ohne neue und unverbaute Flächen zu beanspruchen. Das zuweilen erwähnte Speicherproblem – wenngleich prinzipiell wichtig – dürfte sich noch lange nicht als von praktischer Bedeutung erweisen. Bis der Photovoltaik diese Rolle zukommen kann, braucht es noch Jahre intensiver technischer Forschung und Entwicklung sowie das Entstehen eines massiven Marktes. Die Weichen für diese Entwicklung werden aber bereits heute gestellt.

Weltweite technologische Entwicklung der Photovoltaik

Die Photovoltaik-Technologie kann nach über zwanzigjähriger terrestrischer Anwendung und intensiven Forschungs- und Entwicklungsarbeiten ausgereifte Produkte ausweisen, welche zunehmend mit industriellen Verfahren hergestellt werden. In der Anwendung am meisten verbreitet ist die Technologie des kristallinen Siliziums.

Die Photovoltaik-Technologie zeigt heute eine klare Tendenz in Richtung Dünnschichtzellen. Diese werden die gegenwärtige Marktsituation allerdings nicht unmittelbar verändern, sondern es wird ein langsamer Übergang stattfinden. Voraussetzung dafür ist ein Wirkungsgrad von mindestens 10%. Trotz geringerer Wirkungsgrade wird von ihnen eine höhere Wirtschaftlichkeit aufgrund des kostengünstigeren Herstellungsverfahrens erwartet. Generell werden zurzeit umfangreiche Investitionen in die Ent-

Adresse des Autors
Dr. *Stefan Nowak*
Programmleiter Photovoltaik BFE
c/o NET Nowak Energie & Technologie AG
Waldweg 8, 1717 St. Ursen
E-Mail: stefan.nowak.net@bluewin.ch

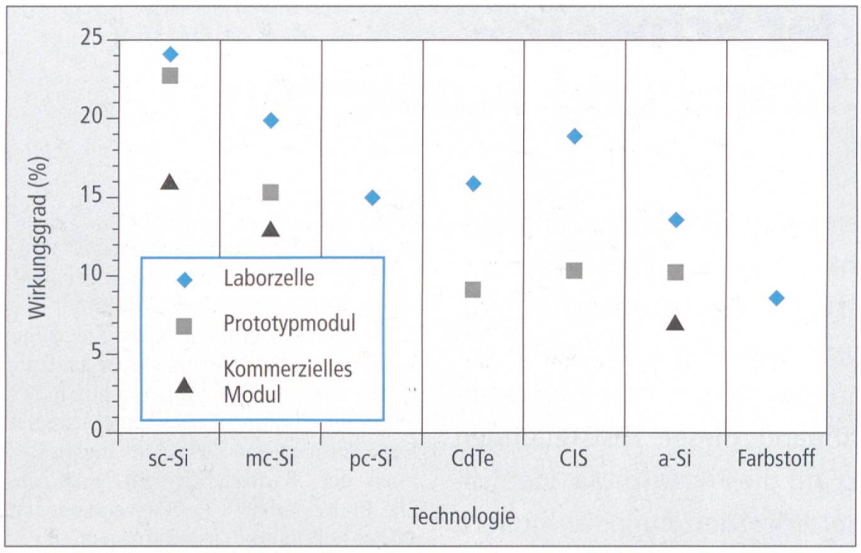

Bild 1 Wirkungsgrade ausgewählter Solarzellen-Technologien, vom Labor zum kommerziellen Produkt.

wicklung der industriellen Produktion von Solarzellen und -modulen getätigt, so dass hier bedeutende Fortschritte möglich sind.

Die gebäudeintegrierte Anwendung ist ein verhältnismässig junger Zweig der Photovoltaik und weist dementsprechend ein grosses Entwicklungspotential auf. Nicht zuletzt wegen des Standardisierungsbedarfs können hier bedeutsame Fortschritte erwartet werden.

Insgesamt ist die technologische Entwicklung in vollem Gang, und es werden gegenwärtig viele neue, auf die Anwendung ausgerichtete industrielle Lösungen vorgestellt und umgesetzt. Eine besondere Eigenschaft der Photovoltaik ist die Tatsache, dass erfolgreiche Lösungen nicht im Labor allein entwickelt werden, sondern häufig mit einem starken Anwendungsbezug erfolgen. Aus diesem Grund ist ein anwendungsnaher Markt auch für den technischen Fortschritt von grosser Bedeutung. Es zeigt sich aber auch, dass bezüglich grossen Ankündigungen und kurzfristigen Erfolgsmeldungen eine kritische Haltung angebracht ist. In der Regel nehmen die erwarteten Entwicklungen deutlich mehr Zeit in Anspruch.

Solarzellen und Solarmodule

Mit klarem Abstand ist die Technologie des kristallinen Siliziums am meisten ausgereift und verbreitet. Ihr Umsatzanteil liegt bei rund 80% aller Solarzellentechnologien, wovon zwei Drittel auf Zellen mit monokristallinem Silizium entfallen. Die typischen Wirkungsgrade betragen für kommerziell erhältliche monokristalline (sc-Si) Silizium-Solarzellen 14 bis 17%, für multikristalline (mc-Si) 12 bis 14%. Es entsteht aber auch der Eindruck, dass das kristalline Silizium technologisch weitgehend ausgereizt ist und weitere technologische Verbesserungen nur noch punktuell erfolgen. In der Produktion sind jedoch aufgrund von Skalenerträgen noch bedeutende Fortschritte möglich.

Unter den Dünnschicht-Technologien nimmt ebenfalls das Silizium die Spitzenposition ein. Als amorphes Silizium (a-Si) wird es heute industriell in Modulen gefertigt. Diese werden zunehmend für Energieanwendungen zum Einsatz gelangen. In die Dünnschicht-Technologie werden allgemein viele Hoffnungen für die Zukunft gesetzt, doch schreitet die Entwicklung nicht so schnell voran, wie oft erwartet wird. Trotzdem dürfte sich der Trend in Richtung Dünnschicht-Technologie in den nächsten Jahren verstärken. Die Modulproduktion von Dünnschichttechniken mit Cadmium-Tellurid (CdTe) oder Kupfer-Indium-(Gallium)-Diselenid (CIS bzw. CIGS) läuft eher langsam an. Weitgehend im Laborstadium befinden sich noch die Graetzel- und die polykristalline (pc-Si) Silizium-Dünnschichtzelle, was ihren möglichen Einsatz für Energieanwendungen anbetrifft. Unter den verschiedenen neueren Technologien kann heute noch kein Gewinner ausgemacht werden. Es ist zudem durchaus denkbar, dass für unterschiedliche Anwendungen verschiedene Technologien zum Einsatz kommen, in Abhängigkeit von Wirkungsgrad, Flächenkosten usw.

Die Modulwirkungsgrade sind seit 1980 stark gestiegen. Erreichten sie 1980 noch rund 3%, so sind es gegenwärtig bis zu 17%. Technologische Durchbrüche lassen sich in der Regel nicht genau voraussagen. Die Erfahrung zeigt jedoch, dass von einer erfolgsversprechenden Laborzelle bis zum kommerziellen und marktfähigen Modul fünf bis zehn Jahre verstreichen. Beim Vergleich der zitierten Wirkungsgrade ist zudem zu berücksichtigen, dass zwischen den im Labor erzielten Resultaten, einem Prototypen und einer Serienfertigung, deutliche Unterschiede bestehen. Einen Überblick über die aktuell erreichten Wirkungsgrade zeigt Bild 1.

Für die Weiterentwicklung kann auf die bisherigen Fortschritte und auf die theoretischen maximalen Wirkungsgrade abgestützt werden. Demnach werden die Wirkungsgrade aller Solarzellentechnologien in den nächsten zehn Jahren nicht mehr so ausgeprägt stark, aber dennoch um einige wenige Prozentpunkte steigen.

Für den Markterfolg ist allerdings nicht ein hoher Wirkungsgrad allein erforderlich. Gerade in der Dünnschichttechnologie ergeben sich weit günstigere Herstellungsverfahren. Damit können Module produziert werden, die bezogen auf die Leistung in W_p günstiger sind als die die klassischen kristallinen Module. Dies wird beispielsweise auch vom bandgezogenen kristallinen Silizium erhofft.

Eine Übersicht über die technische Reife der verschiedenen Material-Technologien zeigt Tabelle I.

Gebäudeintegration

Die gebäudeintegrierte Photovoltaik ist erst vor gut zehn Jahren aufgekommen und hat als verhältnismässig junger Zweig der Photovoltaik-Industrie dementsprechend noch viel Entwicklungspotential. Schwerpunkte werden die Produktevielfalt, die Verbesserung der Montagetechniken und die Abstimmung der Systembestandteile sein. Auf diese Art werden gegenwärtig viele neue Dach- und Fassadensysteme entwickelt, welche die möglichen Lösungsvarianten erweitern.

Die Produktepalette umfasst bereits zahlreiche Systeme. Wichtige Anforderungen an diese Systeme sind einerseits die technische Zuverlässigkeit und Performanz, andererseits die architektonisch-ästhetische Integration sowie eine weitere Kostenreduktion (Komponenten und Montage). Während die technischen Aspekte relativ gut objektivierbar und erfassbar sind, bleiben die ästhetischen Aspekte eine eher subjektive Geschmackssache.

Die Produkte unterscheiden sich je nachdem, ob eine Anlage auf ein bestehendes Gebäude aufgesetzt oder in einem Neubau bzw. bei einer umfassenden Sanierung echt in das Gebäude integriert

wird. Der Markt verlangt hier beide Möglichkeiten.

Die Lebensdauer der Photovoltaik-Systeme wird mit 20 bis 30 Jahren angegeben, was von zuverlässigen Anlagen nach bisherigen Erfahrungen erreicht werden sollte. Für die Architektur bietet die Photovoltaik interessante und attraktive Lösungen und neue Akzente. Im Bereich der ästhetischen Verträglichkeit sind teilweise zusätzliche Anstrengungen nötig und Fortschritte möglich.

«Balance-of-System»-Komponenten

Die Balance-of-System(BOS)-Komponenten umfassen Wechselrichter, Speicherbatterien, Kontrollsysteme, Kabel, Stecker, Schalter usw. Die vielfältige und innovative BOS-Industrie bringt fortwährend verbesserte Produkte auf den Markt. Besonderes Gewicht wird hierbei auf Betriebssicherheit, Standardisierung und Qualitätssicherung gelegt.

Eine Grosszahl der festgestellten und teilweise noch bestehenden Systemmängel (Ausfälle, Leistungsabfall usw.) sind auf BOS-Komponenten zurückzuführen. Bei netzgekoppelten Anlagen lag in der Vergangenheit die Schwachstelle häufig beim Wechselrichter. Diese weisen jedoch heute dank intensiver Forschungs- und Entwicklungsarbeiten eine verbesserte Betriebszuverlässigkeit auf und werden zum Teil in grösseren Serien angefertigt. Von grösseren Leistungseinheiten ausgehend, wurden im Verlauf der Zeit ein- und dreiphasige Produkte, mit und ohne Transformator, von immer kleineren Einheiten (Strang- und Modulwechselrichter) vorgestellt. Während für die mittleren und grösseren Wechselrichter längere Betriebserfahrungen vorliegen, befinden sich die kleinen Geräte noch weitgehend in der Erprobungsphase.

Generell lässt sich feststellen, dass es eine Einheitslösung nicht gibt und auch in der nächsten Zeit nicht geben wird. Dies ändert jedoch nichts an der Tatsache, dass ein beträchtlicher Standardisierungsbedarf besteht, welcher inskünftig zu einer bedeutenden Optimierung und günstigeren Gestaltung der BOS-Komponenten und der Photovoltaik-Systeme als Ganzes führen wird.

Photovoltaik-Technologie in der Schweiz

In der Schweiz hat im Verlauf der letzten 15 Jahre eine kontinuierliche Entwicklung der Photovoltaik stattgefunden, welche sowohl in Forschung und Technologie wie auch in der Anwendung eine international führende Stellung ermöglicht hat. Die Fragen, auf welche sich Forschung und Entwicklung konzentrieren, betreffen eine absolut notwendige weitere Kostenreduktion und eine verbesserte Produktevielfalt. Mit zunehmender Markteinführung erhält die Qualitätssicherung eine wachsende Bedeutung. Technologisch von Bedeutung sind in diesem Zusammenhang der erzielbare Wirkungsgrad und die Zelltechnologien für eine breite Massenherstellung und -anwendung. Im Systembereich sind ebenfalls, auch kurzfristig, weitere Kostensenkungen möglich. In den verschiedenen Schwerpunktbereichen des Schweizer Photovoltaik-Programms sollen entsprechende Lösungen zur Kostenreduktion des Energiesystems Photovoltaik erarbeitet und die Voraussetzung zu deren Umsetzung geschaffen werden. Die Anwendungsbereiche, welche im Vordergrund stehen, sind netzgekoppelte, gebäudeintegrierte Photovoltaik-Systeme sowie neue Nischenanwendungen für Inselsysteme.

Unter dem übergeordneten Ziel, vielversprechende Konzepte zur Kostenreduktion des Energiesystems Photovoltaik zu identifizieren, technisch weiterzuentwickeln und diese mit einer konsequenten Umsetzung in der Industrie strategisch weiterzuverfolgen, wurden hinsichtlich der beschriebenen Anwendungen folgende Ziele formuliert:

- Kostenreduzierende Lösungen
- Verbesserte Wirkungsgrade
- Industriell (technisch und ökonomisch) umsetzbare Lösungen
- Wirtschaftliche Bedeutung
- Verbesserte Energierücklaufzeiten und Umweltimmissionen
- Kompetenz und Führung

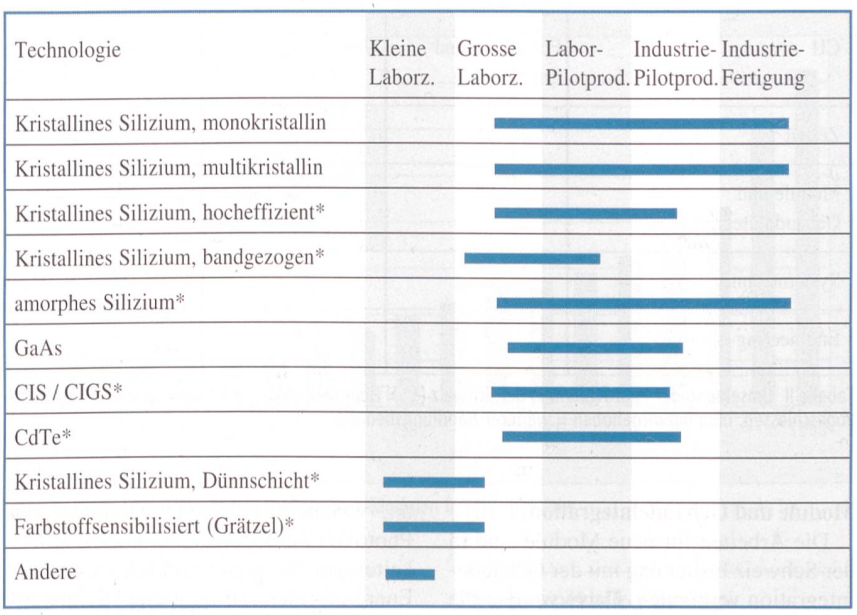

Tabelle I Materialspezifische Unterscheidung verschiedener Solarzellen-Technologien (Darstellung gemäss W. Wettling, FhG-ISE), [* = Forschungs-Aktivitäten in der Schweiz].

Zurzeit laufen in der Schweiz rund 80 Photovoltaik-Projekte in den Bereichen Forschung, Entwicklung sowie Pilot- und Demonstrationsprojekte, wobei die Marktförderung hier nicht eingeschlossen ist. Die Projekte werden durch verschiedene Stellen des Bundes, den Kantonen und einzelnen Gemeinden sowie von der Privatwirtschaft (Forschungsfonds, Eigenleistungen) getragen. Die Programmkoordination erfolgt durch das Bundesamt für Energie (BFE). Die Projekte umfassen die folgenden Bereiche:

Solarzellen

Bezüglich der Solarzellenforschung besteht in der Schweiz eine sehr breite Materialvielfalt, angefangen bei dünnen kristallinen Siliziumzellen, dem Bandsilizum, den amorphen und mikrokristallinen Dünnschicht-Siliziumzellen, den Verbindungshalbleitern sowie den nanokristallinen Farbstoffzellen (Tabelle I). Die breite Vielfalt der Materialien ist unter anderem auf erfolgreiche Beteiligungen an internationalen Forschungsprojekten im Rahmen der EU zurückzuführen. In der Programmphase 1996–1999 werden die Möglichkeiten einer industriellen Umsetzung dieser Forschungsarbeiten mit Nachdruck verfolgt. Dünnschicht-Siliziumzellen bilden dabei den eigentlichen Schwerpunkt. In einzelnen Materialtechnologien gelten die Arbeiten aus den Schweizer Photovoltaik-Labors als wegweisend und weltweit führend.

CH	Forschung und Entwicklung	Umsetzung	Industrielle Produkte
Zellen	**	*	
Module und Gebäudeintegration	**	**	*
Systemtechnik	✓	**	**
Engineering	✓	**	**

Tabelle II Umsetzung der Photovoltaik in der Schweiz (= Hauptaktivität, * = im Aufbau, ✓ = weitgehend abgeschlossen, blau hervorgehoben = weiterer Handlungsbedarf).**

Module und Gebäudeintegration

Die Arbeiten für neue Module sind in der Schweiz bisher eng mit der Gebäudeintegration verbunden. Dabei werden die Möglichkeiten von neuen Materialien und Verfahren für die Einkapselung der Solarzellen abgeklärt. Die Verfahrenstechnik zur Modulherstellung und -befestigung wird auf weitere Kostensenkungen überprüft. Im Vordergrund steht die Erhöhung der Produktevielfalt für die Anwendung der Gebäudeintegration. Hierzu wird eine vertiefte Zusammenarbeit mit der einschlägigen Industrie verfolgt. Ziel dieser Tätigkeiten ist die Verfügbarkeit von Photovoltaik-Bauelementen und -Systemen für Dächer, Fassaden, Oberlichter, Lärmschutzeinrichtungen usw. Allgemein liegt in diesem Bereich, was die technische Lösung anbetrifft, das kurzfristig grösste Kostenreduktionspotential.

Systemtechnik

Die elektrische Systemtechnik ist bereits weit fortgeschritten, durch die Modularisierung und die Standardisierung werden jedoch weitere Kostensenkungen möglich. Auch hier wird ein verstärkter Bezug zur entsprechenden, bereits bestehenden Industrie (Elektrotechnik) angestrebt. Die Arbeiten im Bereich der Systemkomponenten sind durch Projekte zur Verbesserung und durch neue Nischenanwendungen von Inselsystemen zu ergänzen. Dabei stehen spezifische Anwendungen von Inselsystemen in netzfernen Gegenden der Schweiz wie auch Inselsysteme für Anwendungen in Entwicklungsländern im Vordergrund. In diesen Bereich fällt ausserdem auch die Qualitätsprüfung der erarbeiteten Produkte und Systeme; diese wird vorwiegend an den Fachhochschulen betrieben.

In ergänzenden Studien werden allgemeinere und nichttechnische Aspekte der Photovoltaik behandelt. Im Vordergrund stehen Abklärungen und Hilfsmittel, welche die Marktentwicklung der Photovoltaik begünstigen. Die Möglichkeiten zur Synergie mit anderen solaren Energieformen (thermische Solarenergie, Solararchitektur, rationelle Energienutzung) sowie anderen Energieträgern (z.B. Wasserstoff, Thermophotovoltaik) werden zusammen mit den entsprechenden Forschungsprogrammen abgeklärt.

Stand von Forschung und Technologie

Im Verlauf der 13 Jahre seit dem eigentlichen Bestehen des Programms Photovoltaik wurden sukzessive nationale Kompetenzzentren in den verschiedenen Bereichen definiert: die Universität Neuenburg für Dünnschicht-Siliziumzellen, das PSI für dünne kristalline Zellen, die EPFL für die nanokristallinen Zellen, das LESO an der EPFL für die Photovoltaik-Gebäudeintegration, das TISO an der Fachhochschule in Lugano für die Modulcharakterisierung sowie die Fachhochschule Burgdorf für Wechselrichter und Systemtechnik.

Zusammen mit verschiedenen Ingenieurunternehmungen und der Industrie konnten über die Jahre zahlreiche innovative Ideen und Produkte entwickelt werden, welche der Schweiz hohes internationales Ansehen brachten. Unser Land hat sich mit seinen frühen pionierhaften Ansätzen, zum Beispiel in der Gebäudeintegration, einen festen Platz in der weltweiten Photovoltaik-Szene erarbeitet. In der Schweiz wurde sehr früh erkannt, dass anwendungs- und systemorientierte Strategien zu erfolgreichen Ansätzen führen können. Diese Tatsache soll aber nicht darüber hinwegtäuschen, dass im Verlauf der letzten fünf Jahre weltweit eine enorme Bewegung mit wachsender Geschwindigkeit eingetreten ist, welche auch unser Land und seine Photovoltaik-Gemeinschaft vor zunehmende Herausforderungen stellt.

Dies bedeutet, dass gute Ideen und hervorragende Forschung allein nicht genügen, um im internationalen Umfeld zu bestehen. Es braucht eine konsequente Umsetzung in industrielle Produkte, welche dem zunehmenden Konkurrenzdruck standhalten. Betrachtet man die verschiedenen erwähnten Bereiche im einzelnen, so ergibt sich bezüglich dem Übergang von Forschung in industrielle Produkte für die Schweiz das Bild in Tabelle II und damit entsprechender Handlungsbedarf. Um in allen Bereichen entsprechende Schweizer Produkte zur Verfügung stellen zu können, sind weitere Anstrengungen in den Bereichen Zellen, Module und Gebäudeintegration notwendig

Die hohe Qualität der Schweizer Photovoltaik-Aktivitäten wird auch durch die zunehmende internationale Zusammenarbeit belegt. Das Jahr 1998 brachte in dieser Hinsicht mit mehreren neuen Projekten erfreuliche Erfolge in den laufenden Programmen der Europäischen Kommission. Damit belegt die Photovoltaik in der Forschungszusammenarbeit mit der EU einen überdurchschnittlichen Platz. Ebenso erfolgreich ist die Zusammenarbeit im Rahmen des Photovoltaik-Programms der IEA, bei welchem die Schweiz zu einem geschätzten Partner geworden ist.

Seitens der öffentlichen Hand werden insgesamt, das heisst von allen betroffenen Stellen des Bundes, der Kantone und der Gemeinden pro Jahr rund 15 Mio. Fr. für Forschung, Entwicklung und Demonstration in der Photovoltaik ausgegeben. Die Privatwirtschaft investiert ihrerseits auf diesem Gebiet ungefähr den gleichen Betrag.

Marktentwicklung

Die Entwicklung der Photovoltaik wird massgeblich vom Weltmarkt bestimmt. In den letzten zwölf Jahren ist der Photovoltaik-Markt weltweit stetig gewachsen (Bild 2). Die Steigerungsrate betrug durchschnittlich 15%, wobei festgestellt werden kann, dass die Wachstumsraten in letzter Zeit stark im Zunehmen begriffen sind. 1997 wurde mit 120 MW_p Modulumsatz erstmals die 100 MW_p-Grenze überschritten, für 1998 rechnet man mit etwa 145 MW_p. Ebenso markante Steigerungsraten ergeben sich bei der Produktionskapazität von Photovoltaik-Modulen. Diese hohen Steigerungsraten können sich allerdings in den nächsten Jahren wieder etwas nach unten korrigieren.

Der Photovoltaik-Weltmarkt umfasst zu grossen Teilen (rund 70%) netzunabhängige Anlagen. Es sind letztlich diese netzunabhängigen Anlagen, die dank

ihrer Kosteneffizienz das beträchtliche Wachstum des Photovoltaik-Weltmarkts ermöglichen. In den Ländern der IEA ist dieser Sachverhalt weniger ausgeprägt. Interessanterweise gewinnen die netzgekoppelten Anlagen zunehmend an Bedeutung, insbesondere in Europa, welches den grössten regionalen Photovoltaik-Markt darstellt. Ihr relativer Anteil hat sich in den IEA-berichtenden Ländern in den Jahren 1990 bis 1997 versechsfacht (Tabelle III). Die Preis- und Kostenentwicklung der netzgekoppelten Photovoltaik-Anlagen hängt jedoch wiederum vom gesamten Markt ab, machen doch die Module rund die Hälfte der derzeitigen Anlagenkosten aus.

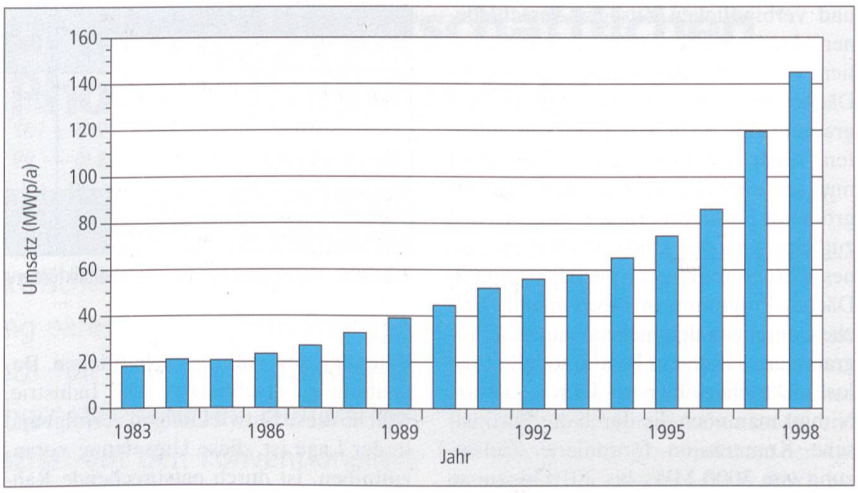

Bild 2 Weltweiter Umsatz von Photovoltaik-Modulen in MW_p pro Jahr.

Wirtschaftlichkeit

Die Nachfrage, die übergeordneten wirtschaftlichen Entwicklungen in den einzelnen Märkten sowie die Kapazitätsauslastung wirken sich auf die Preise aus. Allgemein lässt sich sagen, dass die Herstellungskosten für Photovoltaik-Module in den letzten Jahrzehnten stark gesunken sind. Zwischen 1972 und 1992 wurden sie um mindestens einen Faktor 20 reduziert. Dementsprechend sind auch die Anlagekosten stark gefallen und für terrestrische Energieanwendungen attraktiv geworden.

Analysen der typischen Systemkosten zeigen, dass die Module rund die Hälfte ausmachen. In den letzten Jahren wurden bei den BOS-Systemkosten schnellere Fortschritte erzielt als bei den Modulen, bei welchen die Kostenreduktion ein längeres Unterfangen darstellt. Aufgrund der zahlreichen installierten Photovoltaik-Anlagen in der Schweiz liegen Erfahrungswerte über die Systemkosten für unterschiedliche Systemgrössen vor (Tabelle IV).

Jahr	Netzgekoppelte Anlagen (in %)
1990	7
1991	10
1992	30
1993	32
1994	33
1995	36
1996	37
1997	42

Tabelle III Anteil netzgekoppelter Photovoltaik-Anlagen in den IEA-berichtenden Ländern.

Die zukünftige wirtschaftliche Entwicklung

Die bisherige wirtschaftliche Entwicklung mit einem starken Wachstum in der Modulproduktion und sinkenden Preisen dürfte sich in den kommenden Jahren fortsetzen.

Die Antriebsmotoren für den wachsenden Photovoltaik-Markt bilden die Nachfrage – grob unterteilt – aus Entwicklungsländern nach netzunabhängigen Photovoltaik-Anlagen und aus den Industrieländern nach netzunabhängigen und netzgekoppelten Photovoltaik-Anlagen, wobei bei letzteren insbesondere Regierungsprogramme und Elektrizitätswerke eine aktive Rolle spielen.

Die Photovoltaik kann im Kontext des enormen «Energiehungers» in den Entwicklungsländern und der Tendenz zu mehr Nachhaltigkeit in den Industrieländern als eine interessante Option für die zukünftige Energiewirtschaft betrachtet werden.

Über zwei Milliarden Menschen sind derzeit ohne Stromanschluss. Für einen Grossteil von ihnen stellen photovoltaische Anlagensysteme bereits heute eine der interessantesten Stromversorgungsoptionen dar.

Für netzgekoppelte Photovoltaik-Anlagen wird eine deutlich verbesserte Kosteneffizienz in den Industrieländern bis ins Jahr 2010 vorausgesagt.

Wichtigstes Hindernis zur weiteren Entfaltung ist, je nach Anwendung, die Wirtschaftlichkeit bzw. die Finanzierbarkeit der Photovoltaik.

Bei aktuellen wirtschaftlichen Betrachtungen gewinnen neue Wertvorstellungen nachweislich zunehmende Bedeutung; diese können in werteorientierten Märkten interessante Geschäftsfelder eröffnen.

Photovoltaik-Förderprogramme im Ausland

In den vergangenen Jahren wurden in verschiedenen Ländern grössere Förderprogramme angekündigt bzw. in die Tat umgesetzt. Nachdem sich anfangs der 90er Jahre das Deutsche 1000-Dächer-Programm als erfolgreich erwies, initiierte Japan ein 70 000-Dächer-Programm. Darüber hinaus sollen in Japan bis 2010 insgesamt 5000 MW_p installiert werden. Obwohl die allgemeine wirtschaftliche Entwicklung im asiatischen Raum hier einen spürbaren Dämpfer aufgesetzt hat, wird das Programm weiterhin massiv unterstützt. Ein grosses Ziel von einer Million Solardächern bis 2010 wurde in den USA angekündigt. Dieses Programm muss allerdings im bestehenden Haushaltsbudget abgewickelt werden, wodurch die Umsetzung erschwert wird. Trotz grosser allgemeiner Skepsis scheint das Programm aber mit zahlreichen Zusagen der verschiedenen Zielgruppen voranzukommen. In Europa besteht in Holland ein hochgestecktes Ziel von 250 MW_p bis 2010; das Programm ist durch eine langfristige Energiepolitik

Systemgrösse	Spezifische Kosten
1 – 2 kW_p	15 470 Fr. / kW_p
2 – 4 kW_p	14 040 Fr. / kW_p
4 – 10 kW_p	13 100 Fr. / kW_p
10 – 50 kW_p	12 570 Fr. / kW_p
50 – 100 kW_p	11 960 Fr. / kW_p

Tabelle IV Mittlere Systemkosten von Photovoltaik-Anlagen in der Schweiz (Erfahrungswerte gemäss den 1997–1998 geförderten Anlagen durch das BFE).

und verbindlichen Zusagen verschiedener Akteure vorderhand gesichert. In Italien wird seit einiger Zeit ein 10 000-Dächer-Programm angekündigt; das Programm sollte noch in diesem Jahr anlaufen. Auch in Grossbritannien diskutiert man seit einiger Zeit über ein mögliches grösseres Förderprogramm. Jüngstes und zugleich grösstes konkretes Beispiel eines Förderprogramms ist das 100 000-Dächer-Programm in Deutschland, welches, entgegen den meisten anderen Programmen, auf einem Kreditmodell (zinsloses Darlehen über 10 Jahre) aufbaut. Nimmt man noch die durch die Europäische Kommission formulierte Zielsetzung von 3000 MW_p bis 2010 hinzu, so kann insgesamt von sehr hochgesteckten Zielen gesprochen werden. Interessant ist in diesem Zusammenhang, wie sich die Förderung rückblickend tatsächlich entwickelt hat. Es zeigt sich, dass in den letzten Jahren in der Tat wesentlich mehr Mittel für die Marktförderung bereitgestellt wurden (Tabelle IV).

Ein Merkmal einiger dieser Förderprogramme ist die Tatsache, dass häufig ein allgemeiner energiepolitischer Rahmen fehlt und entsprechend keine umfassende Strategie identifiziert werden kann, was leicht zu einem lückenhaften Massnahmenkatalog führt.

Kategorie	1994		1995		1996		1997	
F & E	208	73 %	215	63 %	113,1	39 %	162,7	45 %
Demonstration	27	9 %	27	8 %	26,6	9 %	45,1	12 %
Marktförderung	51	18 %	99	29 %	154	52 %	158,8	43 %
Total	286		341		293,7		366,6	

Tabelle V Aufwendungen zur Photovoltaikförderung in den IEA-Ländern (in Mio. US-$).

Schlussfolgerungen – die Herausforderungen der Photovoltaik

Die Schweizer Photovoltaik-Forschung und -Technologie kann zweifellos als hochstehend und sehr innovativ eingestuft werden. Sie mag, angesichts der eingesetzten Mittel, auch als sehr effizient beurteilt werden. In den nächsten Jahren wird von entscheidender Bedeutung sein, wie weit sich diese Arbeiten in weitere industrielle Produkte umsetzen lassen. In verschiedenen Bereichen des Energiesystems Photovoltaik ist dies bereits heute erfolgreich der Fall. Dies muss in erster Linie vor dem Hintergrund weltweit wachsender Aktivitäten und Investitionen beurteilt werden. Somit besteht für die Photovoltaik-Gemeinschaft selbst die Herausforderung, weiter an einer konsequenten Umsetzung zu arbeiten und die technisch-ökonomischen Voraussetzungen für eine breite Anwendung zu schaffen.

Über den technischen Bereich hinaus besteht aber die Herausforderung darin, die weitest möglichen Teile der Wertschöpfungskette Photovoltaik in der Schweiz umzusetzen und damit auch das Potential der volkswirtschaftlichen Bedeutung zu erschliessen. Die Industrie, welche diese Entwicklungen verfolgt und in der Lage ist, diese Umsetzung voranzutreiben, ist durch entsprechende Rahmenbedingungen und einer konsequenten Energiepolitik in diese Richtung zu ermutigen. Ebenso ist eine konstruktive Zusammenarbeit mit der Elektrizitätswirtschaft im Sinne einer wichtigen Schnittstelle zum Kunden weiterzuverfolgen.

Damit ergibt sich das bekannte Spannungsfeld zwischen der Anforderung nach Kontinuität und genügenden Fördermitteln seitens der Photovoltaik-Gemeinschaft und dem Druck nach kostengünstigen und umgesetzten Lösungen seitens des Marktes. Aus Sicht der Forschungsförderung gilt es, aus diesem Spannungsfeld die erfolgversprechenden Konzepte zu identifizieren und diese in Zusammenarbeit mit Industrie und Elektrizitätswirtschaft erfolgreich und nachhaltig umzusetzen.

Entscheidende Rahmenbedingungen für diese Entwicklung sind eine kontinuierliche, mit genügenden Mitteln ausgestattete und flexible Förderung von Forschung, Entwicklung und Demonstration. Durch die Anwendungsnähe ist ein zunehmender Markt zum Einsatz der technisch ausgereiften Lösungen ebenfalls von Bedeutung. Gleichzeitig sind Ausbildung und Information in konsequenter Weise weiterzuführen. All diese Massnahmen müssen aber auch in eine konsequente und vorausschauende Energiepolitik eingebettet sein, welche den erneuerbaren Energien ihren Platz einräumt und entsprechende Strategien verfolgt.

Literaturliste

Überblicksbericht und Jahresberichte des Programms Photovoltaik 1998, Band 1: Forschung, Band 2: Pilot- und Demonstrationsprojekte, Ed. NET Nowak Energie & Technologie AG, Bundesamt für Energie, März 1999.

A. Räuber: Weltweite Perspektiven der Photovoltaik, 14. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Staffelstein, 1999.

Swiss National Report on PV Power Applications 1996–1997, Nova Energie GmbH, 1998.

Trends in photovoltaic power applications in selected IEA countries between 1992 and 1997, IEA PVPS Task I, 1998.

Energie solaire en Suisse – état de la technologie photovoltaïque et perspectives

Non seulement le public, mais aussi les milieux universitaires, industriels et l'économie électrique s'intéressent de plus en plus à l'énergie solaire. Le présent article met en évidence l'état actuel de la technologie photovoltaïque en Suisse, et en comparaison internationale. Partant de ces constatations, des éléments critiques en matière de photovoltaïque sont identifiés et les futurs défis sont formulés. Selon la définition contenue dans le programme suisse de l'énergie solaire, le système photovoltaïque est discuté en tant que *système énergétique*. L'état de la recherche et de la technologie est donc présenté sur la base de l'application et les besoins de développement en sont déduits.