

Nutzungsperspektiven der Photovoltaik in industrialisierten Ländern

von Frithjof Staiß
und Georg Hille

Überblick

Der Weltmarkt für photovoltaische Systeme entwickelt sich seit vielen Jahren mit Zuwachsraten von 15% p.a. In vielen dezentralen Anwendungen ist die Photovoltaik heute bereits wirtschaftlich. Energiewirtschaftliche Bedeutung wird sie jedoch nur erlangen, wenn auch der Markt für netzgekoppelte Anlagen in Industrieländern erschlossen werden kann, der bislang auf eine finanzielle Förderung angewiesen ist. Der Beitrag diskutiert für diesen Anwendungsbereich die Perspektiven bis zum Jahr 2010.

Since many years the world market of photovoltaic systems has been growing at rates of 15% p.a. Today, photovoltaics is cost-competitive in many decentralized applications. However, photovoltaics can achieve economic relevance only if the market for grid-connected systems in industrialized countries can be tapped which still depends on financial support. For this area of application the paper discusses the perspectives until the year 2010.

1. Einführung

Es besteht heute Konsens darüber, daß erneuerbare Energiequellen zu einer tragenden Säule der Energieversorgung des 21. Jahrhunderts auszubauen sind. Die Stromerzeugung aus Sonnenenergie mittels Solarzellen (Photovoltaik) wird dabei aufgrund ihrer besonderen Eigenschaften häufig als eine der Schlüsseltechnologien bezeichnet:

- keine Ressourcenbegrenzung – Sonnenenergie bietet von allen Energiequellen mit Abstand die größten Nutzungspotentiale, die zudem relativ homogen über die Erde verteilt sind. Sie reichen aus, um langfristig erhebliche Anteile des Weltenergiebedarfes zu decken.
- Umweltverträglichkeit – die Photovoltaik (PV) gilt als sehr umweltfreundlich, da während des Betriebes der Anlagen weder Schadstoffe noch Lärm entstehen und die verwendeten Materialien am Ende ihrer Lebensdauer rezykliert werden können. Der Energiebedarf zur Herstellung der Anlagen ist sehr viel geringer als die erzeugte Nutzenergie. Hinzu kommt, daß die solare Strom-

erzeugung zu keinem zusätzlichen Flächenverbrauch führen muß, da die Anlagen auf Dächern oder an Gebäudefassaden montiert werden können.

- enormes Anwendungsspektrum – durch die extreme Modularität der PV lassen sich elektrische Leistungen von wenigen Milliwatt (z.B. Taschenrechner, Armbanduhren) ebenso realisieren wie große Solarkraftwerke im Multi-Megawatt-Bereich.

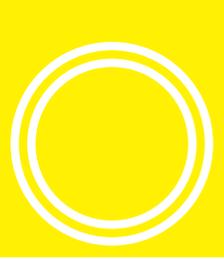
2. Bisherige Entwicklung des Photovoltaikmarktes

Um diese Stärken in die Praxis umzusetzen, wurde der Aufschwung der PV in den frühen 80er Jahren durch öffentlich geförderte Projekte getragen. Es handelte sich zumeist um netzgekoppelte Anlagen auf Gebäuden oder um größere Anlagen auf Freiflächen ([Abbildung 1](#)). Zusammen mit einer intensiven Forschung und Entwicklung konnte so auch der Weg für die Erschließung erster lukrativer Marktsegmente geebnet werden, die ohne staatliche Förderung auskommen. Dieser kommerzielle Markt macht heute etwa 70% aller Anwendungen aus und umfaßt ausschließlich kleine dezentrale Energieanwendungen mit elektrischer Leistung von unter einem Watt bis zu einigen Kilowatt. Die wichtigsten Marktsegmente sind der sog. Konsumer- (Taschenrechner, Armbanduhren) und Freizeitbereich (Camping, Garten, Hobby), der professionelle Kleinsystememarkt (Telekommunikationseinrichtungen, Parkscheinautomaten, Verkehrsüberwachungssysteme, etc.) und der typische Markt in Entwicklungsländern, in dem ca. ein Drittel der Produktion abgesetzt wird ([Abbildung 2](#)).

Netzgekoppelte Anlagen sind heute noch auf Fördermittel angewiesen. Dennoch wurden bislang in den USA, Japan und Europa (primär Deutschland) einige tausend Anlagen im Leistungsbereich von 1-5 kW_p (elektrische Spitzenleistung) auf Gebäuden errichtet. Hinzu kommen einige größere Demonstrationsanlagen im Leistungsbereich von einigen hundert Kilowatt bis wenigen Megawatt. Die größten Anlagen sind international Carrisa Plains, USA (installierte Leistung ursprünglich 6,5 MW_p) und

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Frithjof Staiß ist Leiter des Fachgebiets Systemanalyse am Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW), Stuttgart.

Dipl.-Ing. Georg Hille ist wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Photovoltaische Systeme und Meßtechnik im Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (Fraunhofer ISE), Freiburg.



4. Nutzungspotentiale netzgekoppelter Photovoltaikanlagen

Trotz des relativ dynamischen Wachstums des Photovoltaikmarktes, ist der Absatz von derzeit 120 MW_p p.a. verglichen mit dem weltweiten Zubau an konventioneller Kraftwerksleistung von 50.000 MW p.a. [5] vernachlässigbar. Der Anteil der Stromerzeugung aus Sonnenenergie beträgt heute deutlich weniger als ein Promille. Dies verdeutlicht die große Lücke zwischen der Realität und dem Anspruch, die Photovoltaik zu einer bedeutenden Energietechnologie des 21. Jahrhunderts auszubauen. Sie läßt sich nur erschließen, wenn einerseits der enorme Zubau konventioneller Kraftwerke reduziert und andererseits die Nutzung erneuerbarer Energiesysteme sehr stark beschleunigt wird.

Um die „sub-Promille“-Energietechnik Photovoltaik zu einer „Prozent“-Energietechnik auszubauen, führt der Weg in den Industrieländern zwingend über den Einsatz netzgekoppelter Systeme. Eine Grundvoraussetzung dafür ist das Vorhandensein ausreichender und geeigneter Flächen. Der Nachweis dafür läßt sich leicht erbringen, wenn man nur die ohnehin vorhandenen Flächen auf Gebäuden betrachtet [6]: Allein in Deutschland könnten bei einer vorsichtigen Abschätzung etwa 800 km² Modulfläche installiert werden, was bei der heute verfügbaren Technik einer Leistung von 80.000 MW_p entspricht (für die OECD-Länder wird das Potential auf etwa 1 MioMW_p geschätzt [7]). Rechnerisch ließen sich so etwa 70 TWh oder etwa 15% des Strombedarfes erzeugen, ohne daß dies einen zusätzlichen Flächenverbrauch nach sich zöge. Unter Berücksichtigung zukünftig verbesserter Technik und den zusätzlich vorhandenen Potentialen an Gebäudefassaden, Schallschutzwänden und Freiflächen lassen sich noch deutlich höhere Anteile ausweisen.

Daß die Erschließung dieses Potential technisch möglich ist, belegen die Betriebserfahrungen mit einigen tausend netzgekoppelten Anlagen. Auch die Integration großer PV-Leistungen in Stromnetze, die aufgrund des z.T. stark schwankenden solaren Energiedargebots höhere Anforderungen an den Betrieb elektrischer Verbundsysteme stellt, dürfte technisch beherrschbar sein [8].

5. Kostenperspektiven

Die zukünftige Rolle der PV in der Stromerzeugung hängt somit entscheidend von der Frage der wirtschaftlichen Konkurrenzfähigkeit netzgekoppelter Systeme ab. Dabei darf nicht vergessen werden, daß beide Seiten der Preisrelation zwischen erneuerbaren und konventionellen Energien veränderbar sind (vgl. z.B. die Diskussion über die Einführung von Energie- und/oder CO₂-Steuern). Dennoch, und dies gilt speziell für die Photovoltaik, muß alles getan werden, um die vorhandenen Kostenreduktionspotentiale auszuschöpfen. Bestimmende Faktoren hierfür sind technologische Entwicklungen und die Rationalisierungspotentiale in der industriellen Produktion und bei der Errichtung der Anlagen.

Es ist nicht auszuschließen, daß es – wie von Zeit zu Zeit in den Medien angekündigt – durch technische Innovationen zu einer Revolutionierung der Photovoltaik kommt. Für die nächsten Jahre ist dies jedoch eher unwahrscheinlich. Andererseits kann bei einer erfolgreichen Kommerzialisierung der neuen Dünnschichtsolarzellen (z.B. Kupfer-Indium-Selenid CIS, Cadmium-Tellurid CdTe oder dünnem kristallinen Silicium), die gegenüber dem heute dominierenden kristallinen Silicium erhebliche Materialeinsparung bei gleichzeitig hohem Wirkungsgrad und preiswerter Fertigung versprechen, innerhalb der nächsten 5 Jahre ein wichtiger Meilenstein erreicht werden. Die Frage, ob dies tatsächlich gelingt, kann erst beantwortet werden, wenn Erfahrungen aus den zur Zeit sowohl in den USA als auch in Japan und Deutschland geplanten Produktionsanlagen vorliegen.

Neben der technologischen Entwicklung können auch durch den Aufbau größerer Produktionsanlagen erhebliche Kostensenkungspotentiale erschlossen werden. Fertigungskapazitäten von mindestens 10 MW_p pro Jahr sind für die Dünnschichttechnik eine Grundvoraussetzung, um die anvisierten Herstellungskosten von etwa 2 DM/W_p zu erreichen (zu Kosten und Preisen siehe Exkurs). Rationalisierungspotentiale bestehen aber auch im Bereich der klassischen kristallinen Solarmodule. Mit den geplanten

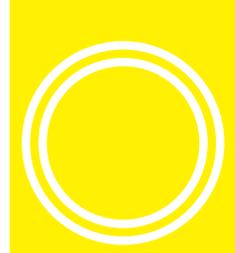
neuen Produktionsanlagen dürften sich auch hier die Kosten um 20–30% reduzieren lassen.

Anhand dieser aktuellen Trends kann davon ausgegangen werden, daß die durchschnittlichen Herstellungskosten für PV-Module gegenüber heutigem Standard durchaus in einem Zeitraum von 10 Jahren auf etwa 2–3 DM/W_p halbiert werden können.

Von den Kosten netzgekoppelter PV-Systeme entfallen heute jedoch nur etwa zwei Drittel auf Module. Das verbleibende Drittel muß für Wechselrichter, Tragestrukturen und Montage aufgewendet werden. Durch technische Weiterentwicklungen (Wechselrichter), die Vormontage von dachintegrierten Anlagen („solar roofs“), Standardisierung, etc., dürften sich aber auch in diesem Bereich die Kosten um etwa 40% senken lassen.

Exkurs: Kosten und Preise von Photovoltaikmodulen

Im wesentlichen ist zwischen den Herstellkosten, den Ein- und Verkaufspreisen des Handels und den Kosten für den Endkunden zu unterscheiden. Die Herstellkosten umfassen alle Kosten, die in Verbindung mit der Produktion von Photovoltaikmodulen anfallen (Material, Löhne, Abschreibung von Produktionsanlagen, Teile der Gemeinkosten, usw.). Zusätzlich Vertriebskosten und Gewinnaufschlägen lassen sich anhand der Produktionsmengen die Verkaufspreise der Hersteller kalkulieren. Diese stellen (sofern sich nicht höhere oder geringere Preise durchsetzen lassen) gleichzeitig die Einkaufspreise des Großhandels dar, dessen Verkaufspreise wiederum die Einkaufspreise des Einzelhandels oder des Handwerks. Deren Verkaufspreise entsprechen normalerweise den Kosten für den Endkunden. Die Höhe der Kosten kann in der Praxis von Fall zu Fall stark variieren und hängt von der Bezugsquelle, der Abnahmemenge, der allgemeinen Angebots- und Nachfragesituation, usw., ab. Als grobe Orientierungsgröße für hochwertige, kristalline Silicium-Standardmodule kann davon ausgegangen werden, daß die Herstellkosten heute etwa 5 DM/W_p



(±1 DM/W_p) betragen. Die Produzentenerlöse im Großhandel liegen je nach Produkt zwischen 6 und 7 DM/W_p. Die Großhandelsverkaufspreise betragen je nach Rabatt 8 bis 10 DM/W_p, die Endkundenpreise 10 bis 12 DM/W_p (einschl. MWSt!) für ein einzelnes (50 W_p -) Modul. Daraus folgt, daß die Herstellungskosten durchaus um den Faktor 2 niedriger sein können als die Kosten für (private) Endkunden.

Die Bandbreite der Stromgestehungskosten netzgekoppelter Anlagen könnte dann um das Jahr 2010 (ohne finanzielle Förderung) zwischen 0,80 DM/kWh für Hausdachanlagen in Mitteleuropa und 0,30 DM/kWh für größere Anlagen auf Freiflächen an einstrahlungsreichen Standorten in Europa oder den USA liegen (Abbildung 3). In diesem Fall ließen sich im Bereich der Spitzenstromerzeugung und der Gebäudeintegration beträchtliche Marktzuwächse erreichen, vor allem dann, wenn parallel auch die Preise für konventionelle Energieträger steigen.

Langfristig (>10 Jahre) scheint eine weitere Kostenreduktion bei PV-Modulen in erster Linie durch den Aufbau sehr großer Fertigungsanlagen mit einer Jahreskapazität von deutlich über 100 MW_p möglich. Modulkosten von 1-1,50 DM/W_p wären dann vorstellbar [7].

6. Absatzperspektiven netzgekoppelter Anlagen

Daß eine Halbierung der Kosten photovoltaischer Systeme erreichbar ist, läßt sich relativ belastbar begründen. In welchen Zeiträumen dies möglich ist, hängt jedoch sehr stark von der Nachfrageentwicklung ab. Denn ohne eine entsprechende Nachfrage lassen sich weder Lerneffekte noch die Rationalisierungspotentiale aus dem Übergang zu größeren Fertigungskapazitäten und aus der Entwicklung neuer und leistungsfähigerer Produkte mobilisieren.

Der Bereich der dezentralen, wettbewerbsfähigen PV-Anwendungen unterliegt inzwischen einem quasi autonomen Marktwachstum, so daß die Wachstumsraten der vergangenen

Jahre von 15% p.a. auch in der nächsten Dekade beibehalten werden können. Im Bereich der netzgekoppelten Anlagen ist die Nachfrageentwicklung sehr viel schwieriger vorhersehbar, da diese Systeme auf absehbare Zeit von einer finanziellen Förderung abhängen werden. Ein weiterer Ausbau ist hier nur vorstellbar, wenn öffentliche und private Förderung zunehmend Hand in Hand gehen.

Es kann erwartet werden, daß sich gewerbliche Kunden wie bisher primär unter ökonomischen Gesichtspunkten für oder gegen die Errichtung einer

berwachung) oder die Bereiche konzentrieren, in denen PV-Systeme einen Mehrfachnutzen erlauben (Fassadenelemente, Überdachungen, Lärmschutzwände, etc.). Gerade der Absatz von PV-Fassaden, die zumeist an öffentlichen Gebäuden oder Verwaltungsgebäuden von Unternehmen errichtet werden, zeigt jedoch, daß neben den objektiven ökonomischen Kriterien Entscheidungen auch durch andere Faktoren beeinflusst werden. So soll mit den Systemen auch Innovationsfähigkeit, Umweltbewußtsein und gesellschaftliche Verantwortung demonstriert werden.

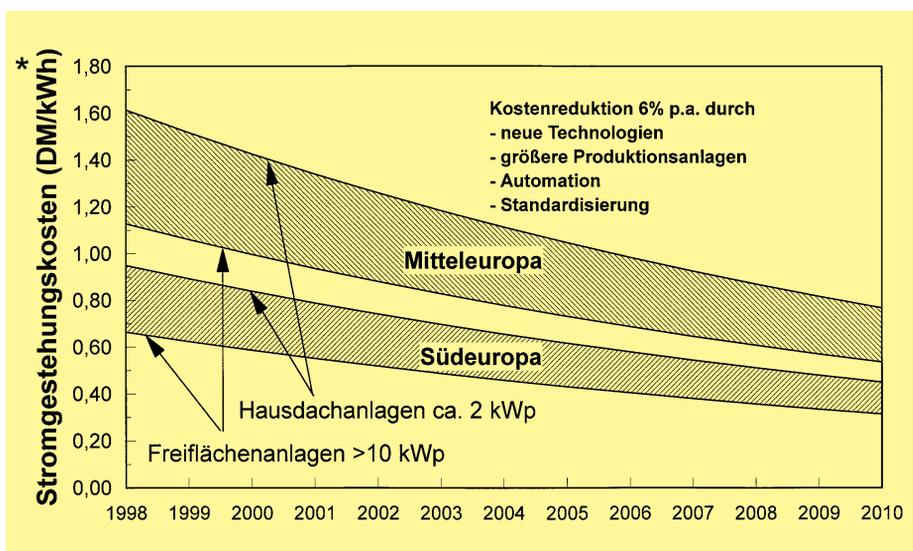
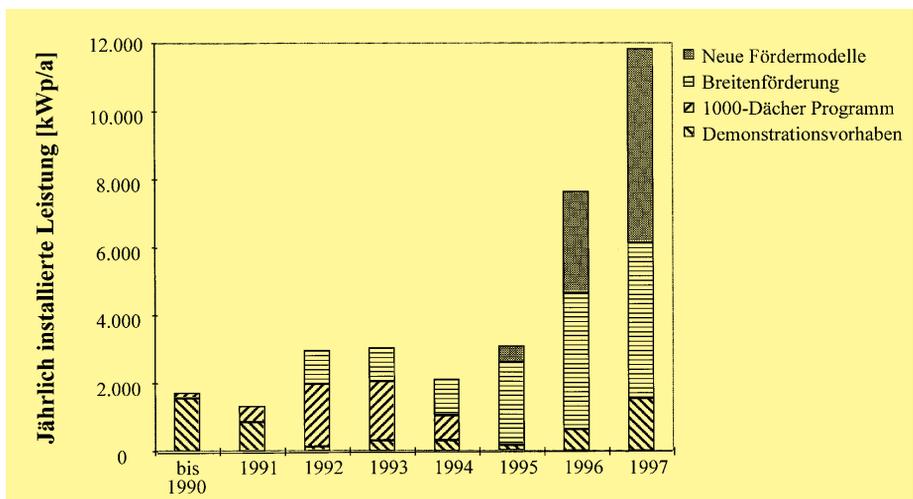


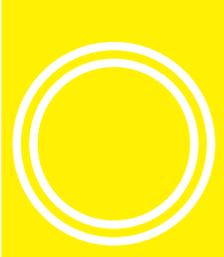
Abbildung 3: Kostenperspektiven netzgekoppelter Photovoltaikanlagen

Abbildung 4: Entwicklung netzgekoppelter Anlagen in Deutschland nach Fördermodellen [9]



PV-Anlage entscheiden. Daher wird sich der Absatz vorrangig auf die Gebäudetechnik (z.B. Abschattungselemente, Lichtlenksysteme, Gebäudeü-

Die Hauptzielgruppe für netzgekoppelte Anlagen werden in der nächsten Dekade jedoch private Haushalte sein, die bereit sind, Sonnenenergie zu nut-



zen und dafür z.T. deutlich mehr zu zahlen (Abbildung 4).

In den letzten drei Jahren haben sich neben der öffentlichen Förderung auch neue, von der öffentlichen Hand weitgehend unabhängige Finanzierungsinstrumente entwickelt. Besondere Beachtung verdient die sogenannte „kostendeckende Vergütung“, die seit 1995 in 32 Kommunen eingeführt wurde [2,10]. Danach wird einem Anlagenbetreiber für jede ins Stromnetz eingespeiste kWh Solarstrom ein Betrag von etwa 1,80 DM bezahlt. Die Höhe der Vergütung variiert je nach angenommener Investition und Zins und wird für neue Anlagen jährlich neu festgelegt, z. B. durch eine Musterrechnung der Strompreisaufsicht Nordrhein-Westfalen.

Über die kostendeckende Vergütung (bzw. kostenorientierte Vergütung) wurde allein im letzten Jahr eine PV-Leistung von insgesamt 3,4 MW_p in Deutschland errichtet. Weiterhin besteht für potentielle Investoren auch die Möglichkeit, Anteile an Gemeinschaftsanlagen oder an Fonds zu erwerben. Die Mindesteinlagen sind dabei vergleichsweise gering (üblicherweise ab 500 DM). Wachsende Bedeutung können – nicht nur in Deutschland sondern auch in Europa und den USA – auch sogenannte grüne Tarife erlangen, bei denen Stromkunden freiwillig einen Aufschlag auf die Strompreise zahlen, der für die Errichtung erneuerbarer Energiesysteme verwendet wird [9].

7. Die Rolle der Politik

Geht man davon aus, daß sich der Markt für dezentrale PV-Systeme wie bisher entwickeln wird, daß sich technische Innovationen umsetzen lassen und sich die neuen privaten Fördermodelle positiv entwickeln, so kann auch bei einer relativ eingriffslosen Politik erwartet werden, daß sich der Photovoltaikmarkt insgesamt mit zweistelligen Zuwachsraten weiterentwickelt (Abbildung 5). Darauf deutet auch der weltweite Ausbau der Produktionskapazitäten hin (siehe Abbildung 2).

Trotz dieser auf den ersten Blick erfreulichen Entwicklung sei nochmals daran erinnert, daß innerhalb der nächsten 10 Jahre weltweit mehrere

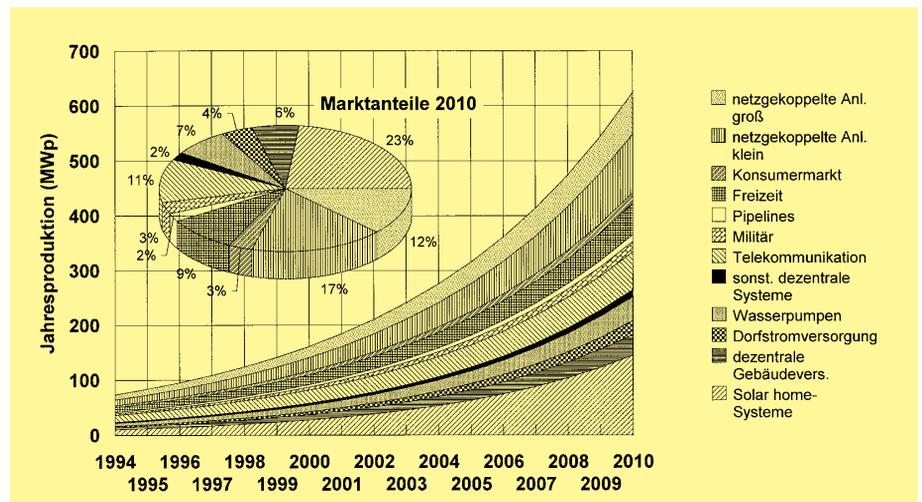


Abbildung 5: Mögliche Trendentwicklung der Photovoltaik weltweit bis zum Jahr 2010 [7]

100.000 MW an konventioneller Kraftwerksleistung zugebaut werden. Entsprechend dem eingangs genannten Leitbild für die Energieversorgung im 21. Jahrhundert, mangelt es daher auch nicht an politischen Absichtserklärungen, den Ausbau der PV deutlich zu beschleunigen: Sei es die Eine-Million-Solardächer-Initiative in den USA oder das Weißbuch der EU-Kommission, nach dem die installierte PV-Leistung in der EU von 30 MW_p im Jahr 1995 auf 3000 MW_p im Jahr 2010 erhöht werden soll [12]. Auch in Japan wird, über das 1993 initiierte 70.000-Dächer-Programm hinaus, eine Leistung von 4600 MW_p bis zum Jahr 2010 angestrebt.

Ohne solche weitreichenden Maßnahmen, die auch eine verstärkte Zusammenarbeit mit Entwicklungs- und Schwellenländern einschließen müssen, wird die PV aber weder in 10 noch in 20 Jahren den Sprung von der „sub-Promille“-Energietechnik in die „Prozent“-Energietechnik schaffen.

8. Fazit aus deutscher Sicht

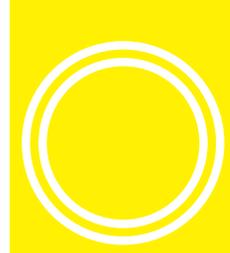
Deutschland zählt neben Japan und den USA seit vielen Jahren zu den technologisch führenden Nationen in der Photovoltaik. Mit den Produktionsanlagen, die derzeit in Deutschland aufgebaut werden, kann der Rückstand in der industriellen Umsetzung dieses Know-hows aufgeholt werden. Die Unternehmen werden sich vorrangig im Export behaupten müssen, sie fordern aber zu Recht flankierende Maßnahmen der Politik für die Entwick-

lung eines Binnenmarktes. Langfristig verlässliche Randbedingungen zum Ausbau der Photovoltaik fehlen jedoch ebenso wie für die erneuerbaren Energiequellen insgesamt (von wenigen Ausnahmen abgesehen), obwohl es an konsistenten Konzepten nicht mangelt [13,14].

Deutschland verfügt über beste Voraussetzungen, sich mit leistungsfähigen Produkten in der Umwelt- und Energietechnik, einem der Wachstumsmärkte des 21. Jahrhunderts, rechtzeitig zu etablieren. Die Photovoltaik gehört zweifelsfrei dazu, selbst wenn die Entwicklung derzeit langsamer verläuft als von vielen erhofft. Ein Verzicht auf den weiteren Ausbau der PV im Inland sowie auf eine Intensivierung der Zusammenarbeit mit Entwicklungs- und Schwellenländern spart zwar Kosten, die Erfahrungen in anderen Bereichen des Umweltschutzes zeigen jedoch, daß sich eine Vorreiterrolle längerfristig sehr wohl auszahlen kann: Wäre Deutschland ohne seine (oft kritisierte) strenge Umweltgesetzgebung Exportweltmeister in der Umwelttechnik geworden?

Literatur

- [1] PV-News, Heft 2/98, Casanova, USA (1998) S.2 ff.
- [2] Photon – das Solarstrom Magazin, Heft Mai-Juni 1996, Aachen (1996)
- [3] Photovoltaic Insider's Report (Ed.: R. Curry), Dallas, USA, verschiedene Jahrgänge



- [4] G. Hille
„Wirtschaftlichkeit und Finanzierung von Photovoltaikanlagen“, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, Freiburg (1998)
- [5] Energy Statistics Yearbook 1994. United Nations, New York (1996)
- [6] F. Staiß
„Photovoltaik - Technik, Potentiale und Perspektiven der solaren Stromerzeugung“, Verlag Vieweg, Wiesbaden (1996)
- [7] European Photovoltaic Industry Association
„Photovoltaics in 2010“, Vol. 3 „The World PV Market to 2010“, Ed.: Commission of the European Union, Directorate General for Energy, Brussels (1995)
- [8] O. Langniß, J. Nitsch, J. Luther, E. Wiemken
„Strategien für eine nachhaltige Energieversorgung – Ein solares Langfristszenario für Deutschland“, Tagungsband des Workshop am 12.12.1997 in Freiburg, FORSCHUNGSVERBUND SONNENENERGIE (Hrsg.: H.P. Hertlein, P. Tolksdorf), ISSN 0949-1082, Köln (1998)
- [9] H. Gabler, K. Heidler, V.U. Hoffmann
„Grid-Connected Photovoltaic Installations in Germany – The Success Story of Green Pricing and Rate Based Incentives“, 2nd World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Wien, 6.-10.7.1998
- [10] Greenpeace
„„Cyrus“-Solarsysteme – kostengünstige und standardisierte PV-Anlagen im Überblick“, Greenpeace, Hamburg (1997)
- [11] G. Altner, H.-P. Dürr, G. Michelsen, J. Nitsch
„Zukünftige Energiepolitik – Vorrang für rationelle Energienutzung und regenerative Energiequellen“, Economica-Verlag, Bonn (1995)
- [12] „Energie für die Zukunft: Erneuerbare Energieträger – Weißbuch für eine Gemeinschaftsstrategie und Aktionsplan“, KOM(97)599 endg., Kommission der Europäischen Union, Brüssel (1997)
- [13] „Mehr Zukunft für die Erde – Nachhaltige Energiepolitik für dauerhaften Klimaschutz“, Schlußbericht, Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ des Deutschen Bundestages, Drucksache 12/8600, Bonn (1994)

Die regionale Solarstromanlage ist ein Beispiel der Nutzung der Photovoltaik in industrialisierten Ländern. Die Bevölkerung kann sich über Anteile an der Nutzung beteiligen. Die Anlage wird auf Dachflächen von öffentlichen Gebäuden oder Gewerbebetrieben bzw. in der Region errichtet. Die hier gezeigte Anlage von 93,6 kW Leistung ist auf dem Stadionsdach des FC Freiburg untergebracht und ging im September 1995 in Betrieb (insgesamt 189 Module). Der Energieertrag im Jahr 1997 betrug 89,9 MWh.

