

Trends und Rahmenbedingungen für das Innovationssystem Farbstoffsolarzelle – Perspektive 2020

Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit

Dr. Severin Beucker

Dr. Klaus Fichter

unter Mitarbeit von: Maik Eimertenbrink (Borderstep), Nico Pastewski (Fraunhofer IAO), Dr. Andreas Hinsch (Fraunhofer ISE) und Rolf Veit (Engcotec)

© 2007 Borderstep Institut



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	Politische, rechtliche und wirtschaftliche Rahmenbedingungen der Photovoltaik	6
2.1	Entwicklungen in europäischen Staaten	6
2.1.1	Deutschland	6
2.1.2	Andere europäische Staaten.....	9
2.2	Entwicklungen in Nordamerika und Asien	10
2.1.3	USA.....	10
2.1.4	Kanada.....	11
2.1.5	Japan	11
2.1.6	China.....	12
3	Photovoltaik und ihre Anwendungsfelder	13
3.1	Technische Ansätze der Photovoltaik	13
3.1.1	Kristalline Siliziumzellen.....	14
3.1.2	Dünnschichtsolarzellen	16
3.1.3	Farbstoffsolarzellen.....	21
3.1.4	Organische Solarzellen	23
3.1.5	Neue technische Ansätze	24
3.1.6	PV-Systemkomponenten	26
3.1.7	Zusammenfassung wichtiger Parameter verschiedener Dünnschichttechnologien	27
3.2	Anwendungsfelder der Photovoltaik.....	29
3.2.1	Unterteilung von Anwendungsfeldern der Photovoltaik.....	29
3.2.2	Gebäudeintegrierte Photovoltaik.....	31
3.3	Innovationsdynamik	32
3.3.1	Patententwicklung.....	32
3.3.2	Forschungsdynamik	36

4	Entwicklung des Photovoltaikmarktes.....	38
4.1	Anteil der Photovoltaik an der Energieerzeugung	38
4.2	Zentrale Wachstumsregionen des Photovoltaikmarktes: Perspektive 2020	40
4.2.1	Deutschland	40
4.2.2	Sonstiges Europa	42
4.2.3	USA.....	42
4.2.4	Japan	43
4.2.5	Sonstiges Asien	43
4.3	Marktanteile einzelner Technologien und ausgewählter Anwendungsfelder (Perspektive 2020)	44
4.3.1	Marktanteile verschiedener Photovoltaiktechnologien	44
4.3.2	Marktanteile potenzieller Anwendungsfelder von Dünnschicht und Farbstoffsolarzellen, Marktpotenzial für gebäudeintegrierte Photovoltaik.....	46
4.4	Zwischenfazit	48
5	Wertschöpfungsketten und Akteure der Photovoltaikwirtschaft.....	49
5.1	Wertschöpfungskette der Photovoltaikwirtschaft.....	49
5.1.1	Wertschöpfungskette von Siliziumzellen	49
5.1.2	Wertschöpfungskette von Dünnschichtzellen.....	53
5.2	Zentrale Akteure der Photovoltaikwirtschaft und deren Positionierung	55
5.2.1	Positionierung von Unternehmen klassischer Photovoltaiktechnologie	55
5.2.2	Positionierung von Unternehmen aus den Dünnschichttechnologie und neuer technologischer Ansätze	57
5.2.3	Positionierung von Akteuren im Umfeld der Farbstoffsolarzelle.....	60
5.2.4	Investitionen in PV-Unternehmen.....	62
5.3	Zwischenfazit	63

6	Schlussfolgerungen für den Einsatz und das Marktpotenzial von Farbstoffsolarzellen (Perspektive 2020)	64
7	Quellen	66

1 Einleitung

Die Photovoltaikindustrie hat sich in den letzten Jahren zu einem profitablen, schnell wachsenden Markt entwickelt. Dies gilt in besonders starkem Maß für den deutschen Photovoltaikmarkt, der weltweit vor den USA und Japan der größte und umsatzstärkste ist (vgl. z.B. Frede 2006).

Zu dem raschen und stabilen Wachstum hat eine Reihe von Faktoren beigetragen. Durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) werden in Deutschland auf 20 Jahre festgelegte Einspeisevergütungen für Solarstrom garantiert. Diese haben in Verbindung mit stetig steigenden Energiepreisen eine zentrale Voraussetzung für die Absicherung langfristig ausgerichteter Investitionen zur Errichtung von Photovoltaikanlagen und Kraftwerken geliefert.

Durch zahlreiche technische Neuentwicklungen und Verbesserungen in den letzten Jahren konnte der Wirkungsgrad von Solarzellen kontinuierlich optimiert und ihre energetische Amortisationszeit verbessert werden. Die großserielle Fertigung von Photovoltaikzellen und -modulen hat die Fertigungskosten verringert, so dass mittel- bis langfristig mit sinkenden Preisen für PV-Module gerechnet werden kann (Bernreuter 2006a).

Zusätzlich wird der Markt durch leistungsfähige neue Photovoltaiktechnologien belebt, die ohne das bislang teure und knappe Polysilizium auskommen. Dünnschichttechnologien, basierend auf neuen Halbleitersystemen und organische Solarzellen und Farbstoffsolarzellen entwickeln sich zunehmend zu alternativen Ansätzen der photovoltaischen Stromerzeugung, die neben neuen Rohstoffen auch andere Fertigungsstrukturen und Wertschöpfungsketten erfordern.

Ziel des Vorhabens ColorSol ist u.a. die Identifizierung und Entwicklung von Anwendungsfeldern für Farbstoffsolarzellen (z.B. im Bereich Fassaden) sowie die Herausarbeitung von Erfolgsfaktoren für Produktinnovation in der Solarwirtschaft. Dafür werden im Folgenden zentrale Trends der Photovoltaikindustrie, ihre Rahmenbedingungen sowie die Entwicklung der wichtigsten Technologielinien erfasst, um so Chancen und Potenziale der Farbstoffsolarzellentechnologie und zukünftiger Marktszenarien besser abschätzen zu können.

2 Politische, rechtliche und wirtschaftliche Rahmenbedingungen der Photovoltaik

2.1 Entwicklungen in europäischen Staaten

In den europäischen Staaten gilt seit September 2001 die EU-Richtlinie zur Förderung Erneuerbarer Energien. In ihr werden für den Strombereich die Grundlagen für eine Verdopplung des Anteils erneuerbarer Energien auf 12 % bis 2010 am gesamten EU-Energieverbrauch geschaffen.

Um dieses Ziel zu erreichen, wurden für alle Mitgliedsstaaten indikative Richtziele für den Anteil erneuerbarer Energien am Stromverbrauch festgelegt. Der Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromproduktion der gesamten EU soll danach von knapp 14 % im Jahr 1997 auf ca. 22 % im Jahr 2010 steigen. Den Mitgliedsstaaten ist es dabei freigestellt, welche Instrumente sie zur Erreichung ihrer jeweiligen Richtziele einsetzen (BMU 2001).

Für Deutschland besteht das Richtziel der Steigerung auf 12,5 % bis 2010. Dies entspricht einer Verdoppelung gegenüber rund 6,25 % im Jahr 2000.

2.1.1 Deutschland

Klima- und Energiepolitische Zielsetzungen der Bundesregierung

Die Bundesregierung hat sich mit der Ratifizierung des Kyoto-Protokolls zu einer Reduktion der Treibhausgasemissionen von 21 % bis zum Jahr 2012 gegenüber den Emissionen von 1990 verpflichtet. Diese Verpflichtung bildet in Verbindung mit den Zielen der europäischen Klimapolitik und den energie- und umweltpolitischen Zielsetzungen der Bundesregierung, den Hintergrund für den Ausbau der regenerativen Energien in Deutschland.

Im Rahmen der aktuell stattfindenden Energiegipfel wurden die Reduktionsziele der Bundesregierung noch einmal bekräftigt, nach aktuellen Plänen der Regierung soll in Deutschland insbesondere der Kohlendioxid-Ausstoß in den kommenden Jahren deutlich gesenkt werden, nach aktueller Diskussion soll er bis 2020 gegenüber 1990 um 40 Prozent reduziert werden¹.

¹ Siehe die nationale Strategie der Bundesregierung zum Klimaschutz <http://www.bundesregierung.de/Content/DE/StatistischeSeiten/Breg/ThemenAZ/klimaschutz-2006-07-27-die-nationale-strategie.html> (letzter Abruf Juli 2007)

Das Erneuerbare-Energien-Gesetz

Für die Förderung der Energieerzeugung aus regenerativen Energiequellen wurde im Jahr 2000 das „Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien“, kurz Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), verabschiedet. Ziel des Gesetzes ist es, über die Gewährung einer über einen definierten Zeitraum festgelegten Einspeisevergütung, den wirtschaftlichen Betrieb von Anlagen zur Stromerzeugung aus Photovoltaik, Wind, Wasserkraft und Geothermie zu sichern. Der für neu installierte Anlagen festgelegte Satz sinkt dabei jährlich um einen definierten Prozentsatz (Degression), um einen Anreiz für Kostensenkungen zu schaffen. Die Differenz zwischen Vergütungssatz und Marktpreis des Stroms, werden unter den deutschen Energieversorgungsunternehmen über eine bundesweite Ausgleichsregelung gleichmäßig aufgeteilt und auf den Energiepreis aufgeschlagen.

Für Photovoltaikanlagen gibt das EEG gestaffelte Einspeisevergütungen vor, die sich nach der Installationsart (Freifläche, Gebäude oder Lärmschutzwand) und der Leistungsfähigkeit der Anlage unterscheiden. Die Vergütung für eine Anlage bleibt über 20 Jahre konstant, der Vergütungssatz sinkt jedoch jährlich um jeweils 5 Prozent (für Freiflächenanlagen seit 2006 um 6,5 Prozent), gemessen an den Werten des jeweiligen Vorjahres.

Das EEG zielt darauf ab, die Kosten für die Stromerzeugung aus regenerativen Energien durch die Schaffung einer leistungsfähigen Photovoltaikindustrie mittel- bis langfristig zu senken. Der Bundesverband für Solarwirtschaft (BSW) schätzt, dass je nach Anlagenart und bei einem prognostizierten jährlichen Strompreisanstieg von 3 %, die Vergütung für Freiflächenanlagen im Jahr 2013 und für Gebäudeanlagen im Jahr 2017/18 unterschritten wird (siehe Abbildung 1).

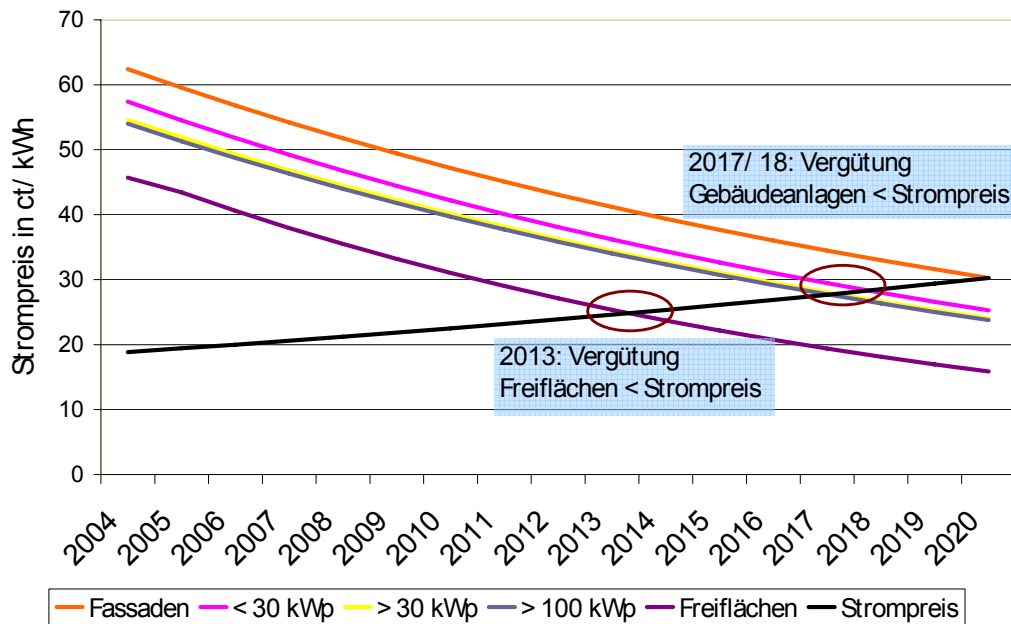


Abbildung 1: Entwicklung von EEG-Vergütungssätzen und Strompreis in Deutschland (nach Stryi-Hipp: 5)

Das deutsche EEG hat die Ausgestaltung der EU-Richtlinie zur Förderung der Erneuerbaren Energien maßgeblich mitbestimmt und diente vielen europäischen Einspreisregelungen als Vorlage (BMU 2001).

Energieeffizienz und Versorgungssicherheit

Ziel der Bundesregierung ist es, eine umwelt- und klimafreundliche sowie effiziente und sichere Energieversorgung zu garantieren. Bisher bestimmt eine auf große zentrale Stromerzeuger und wenige Energiequellen (in erster Linie Gas, Kohle und Uran) ausgerichtete Energiewirtschaft die deutsche Energieversorgung. Die deutsche Energiepolitik möchte zudem durch einen vielfältigen Mix der Energieträger und die sparsamere Energieverwendung und umweltfreundlichere Energiegewinnung die Versorgungssicherheit garantieren und erhöhen². Hierzu leisten erneuerbare Energien einen wichtigen Beitrag, da sie zu einer größeren Unabhängigkeit von fossilen Energieträgern und Kernenergie sowie zu einer dezentralen und effizienten Energieversorgung mit geringeren Wandlungs- und Leitungsverlusten beitragen.

Im Jahr 2006 trugen erneuerbare Energien mit 7,4 % zum Gesamtenergieverbrauch und mit 11,6 % zum Stromverbrauch in Deutschland bei. Der durch sie vermiedene

² Zu den energiepolitischen Zielen der Bundesregierung siehe <http://www.bmwi.de/BMWi/Navigation/Energie/ziele-der-energiepolitik.html> (letzter Abruf Juli 2007)

CO₂-Ausstoß wird auf 97 - 100 Mio. Tonnen beziffert. Der Anteil der Photovoltaik an der regenerativen Energieerzeugung betrug 2006 ca. 2,8 %³.

Technologisch gesehen steht die deutsche Energiewirtschaft vor der Herausforderung, dass auf die zentrale Versorgung über Großkraftwerke ausgelegte Stromnetz in den kommenden Jahren stärker an die kurzfristig verfügbaren Kapazitäten aus erneuerbaren Energien anzupassen. Erfahrungen aus anderen europäischen Ländern (z.B. Dänemark) zeigen, dass eine solche Steuerung auch bei weitaus höheren Anteilen z.B. von 20 % Strom aus Windkraft möglich ist⁴.

2.1.2 Andere europäische Staaten

Eine Reihe europäischer Staaten haben ebenfalls nationale Einspeisegesetze erlassen, die den Ausbau der regenerativen Energieerzeugung unterstützen sollen. Im Folgenden werden die aufgrund ihrer Förderbedingungen attraktivsten Länder mit ihren jeweiligen Regelungen vorgestellt. In vielen weiteren europäischen Staaten so z.B. Großbritannien, Schweden, Portugal, Frankreich und Tschechien werden ebenfalls Einspeisevergütungen garantiert.

Italien

Italien verfügt seit dem Jahr 2005 über ein nationales Gesetz zur Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen (siehe SWW 3/2006: 66 f). Die Vergütung für den eingespeisten Strom, der so genannten Anreiztarif, richtet sich nach der Größe der installierten Leistung und liegt zwischen 44 und 49 Cent je kWh. Für alle Größenklassen wird eine Vergütung von 20 Jahren gewährleistet. Für gebäudeintegrierte Anlagen wird ein Aufschlag von 10 % gewährt. Ab 2007 wird sie bei neu beantragten Anlagen jährlich um 5 % gesenkt und an die Inflation angepasst. Zusätzlich zu dem Anreiztarif wird der in das Netz eingespeiste Strom abhängig von der Größe und der Art der Anlage zu garantierten Preisen abgenommen, die zwischen 7 und 15 Cent je kWh liegen. Bis zum Jahr 2015 sollen über das Gesetz Anlagen mit einer Gesamtkapazität von bis zu 1.000 MW_p gefördert werden. Das italienische Einspeisegesetz wird trotz seiner Komplexität und bürokratischer Hürden bei der Beantragung der Förderung als erfolgreich bewertet. Derzeit wird es von der italienischen Regierung über-

3 Alle Daten siehe: <http://www.unendlich-viel-energie.de/index.php?id=8> und Photon 2/2007: 17 (letzter Abruf April 2007)

4 Vgl. hierzu die Informationen des Bundesverband Windenergie e.V. unter <http://www.windenergie.de/de/themen/windenergie-im-stromnetz/> (letzter Abruf April 2007)

arbeitet. Es wird eine Absenkung der Einspeisevergütung um ca. 20 - 30 % erwartet (Hirshmann 2007: 18).

Spanien

In Spanien gibt es seit dem Jahr 1998 eine Einspeiseregulierung für Solarstrom, die im Jahr 2004 überarbeitet wurde (SWW 3/2006:68 f). Die Vergütung des eingespeisten Solarstroms ist abhängig von der Größe der Anlage (zwischen 20 und 44 Cent je kWh) und fußt auf einem Referenztarif, der anhand der allgemeinen Strompreisentwicklung jährlich neu festgelegt wird. Für neu an das Netz gehende Anlagen bis 100 kW_p beträgt er aktuell 44 Cent pro kWh. Die Vergütung wird für eine Laufzeit von 25 Jahren garantiert und beträgt danach 80 % der ursprünglichen Höhe bis zum Ende der Lebensdauer der Anlage. Eine jährliche Degression der Tarife wie in Deutschland ist bislang nicht vorgesehen. Bis zum Jahr 2010 möchte die spanische Regierung so Photovoltaikanlagen mit einer Gesamtleistung von bis zu 400 MW_p unterstützen. Nach einer starken Zuwachsphase in den Jahren 2003 und 2004 hat sich die Installation neuer Photovoltaikkapazitäten in Spanien wieder abgeschwächt. Hierfür werden u.a. der bürokratische Aufwand für die Beantragung der Einspeisung sowie die begrenzte Verfügbarkeit einer staatlich unterstützten, zinsgünstigen Finanzierung verantwortlich gemacht (SWW 3/2006: 70).

Griechenland

Seit Juli 2006 verfügt Griechenland über ein eigenes Einspeisegesetz mit dem die Photovoltaik auf 700 MW_p Gesamtleistung bis zum Jahr 2020 ausgebaut werden soll. Abhängig von der Größe und dem Standort der Anlage (Festland oder Inseln) werden bis zu 50 Cent je kWh vergütet. Griechenland gilt aufgrund der guten Förderbedingungen und der hohen solaren Einstrahlung als ein wichtiger zukünftiger Photovoltaikmarkt (SWW 2/2006: 67).

2.2 Entwicklungen in Nordamerika und Asien

2.1.3 USA

In den USA wird die Photovoltaik auf nationaler Ebene durch das Programm „Solar America Initiative (SAI)“ gefördert. Das durch das U.S. Department of Energy (DOE) aufgelegte Programm fördert Forschungsprojekte in den Feldern: Markttransformation, Forschung und Entwicklung neuer technologischer Ansätze und Prozesse der PV, Pilotfertigungen zu effizienteren und verbesserten Fertigungsansätzen für PV-

Technologien und deren Komponenten sowie kollaborative Forschungsaktivitäten zwischen Universitäten und Industrie⁵.

Eine nationale Einspeisevergütung für Strom aus regenerativen Energien und Photovoltaik existiert in den USA nicht. Erwartet wird aber, dass sich das kürzlich verabschiedete Energiegesetz (Energy Bill) positiv auswirkt, weil es für die Jahre 2006 und 2007 Steuervergünstigungen für Solaranlagen von 30 Prozent vorsieht⁶. Rund 20 US-Bundesstaaten haben eigene Förderprogramme zu regenerativen Energien aufgelegt. An erster Stelle ist Kalifornien zu nennen, in dem sich aufgrund gezielter Förderprogramme derzeit bereits 80 Prozent des US-Photovoltaikmarktes konzentrierten. Januar 2007 trat die „California Solar Initiative (CSI)“ in Kraft, mit der bis zum Jahr 2017 eine Million Solardächer geschaffen werden sollen (Morris 2007). Eine stärkere Wachstumsdynamik wird auch in den Bundesstaaten Arizona und New Jersey erwartet, die Quoten für die Förderung der Photovoltaik durch Energieversorgungsunternehmen eingeführt haben. Als starke Impulsgeber gelten zudem die Bundesstaaten Pennsylvania und Colorado (Auer 2005: 7).

2.1.4 Kanada

Kanada hat im April 2007 das Programm ecoEnergy aufgelegt, mit dem der Einsatz erneuerbarer Energien auf insgesamt 14,3 TWh gesteigert werden soll. Bewerben können sich Unternehmen, Kommunen sowie Institutionen und Organisationen, die je eingespeister kWh eine Vergütung von einem Cent erhalten. Speziell private Hausbesitzer hat der kanadische Staat das Programm „ecoENERGY Retrofit“ eingeführt, das auf die energetische Sanierung und Optimierung von Privathäusern und kleinen Unternehmen abzielt. Im Rahmen dieses Programms wird auch die Errichtung von Solaranlagen gefördert⁷.

2.1.5 Japan

Japan besitzt eine lange Förder- und Unterstützungsgeschichte der Photovoltaik, die bis in die frühen 90er Jahre zurückreicht. Durch das „New Sunshine Project“ und das Anreizprogramm "Residential PV System Dissemination Program" (auch als 70.000

5 Siehe hierzu die Webseite des U.S. Department of Energy unter: http://www1.eere.energy.gov/solar/solar_america/ (letzter Abruf April 2007)

6 Für weitere Informationen zur Energy Bill siehe: <http://www.whitehouse.gov/news/releases/2005/07/20050729-9.html> (letzter Abruf April 2007)

7 Für weitere Informationen siehe die Webseite: <http://ecoaction.gc.ca/ecoenergy-ecoenergie/renewable-renouvelable-eng.cfm>

Dächer-Programm bezeichnet) wurde ein selbst tragender Markt geschaffen und der Einstieg in die Kommerzialisierung erreicht. Seit 2003/2004 hat die japanische Regierung die Förderung für Photovoltaik sukzessive reduziert. Japan ist damit auf dem Weg zu einem subventionsfreien Solarmarkt. Bis zum Jahr 2010 soll ein Ausbau von 5 Gigawatt solarer Spitzenleistung verwirklicht werden. Die japanische Regierung hat zudem angekündigt, bis zum Jahr 2030 ein Zehntel des Energiebedarfs aus erneuerbaren Energien decken zu wollen. Die Hälfte davon soll durch Photovoltaik bereitgestellt werden (Auer 2005: 7).

Nach einem aktuellen Bericht der Bundesagentur für Außenwirtschaft (BFAI)⁸ wird erwartet, dass der Markt für Photovoltaik-Technologie in Japan bis 2008 um 30 - 40 % zulegt. Dieser Anstieg wird auf eine starke Nachfrage privater und insbesondere industrieller Anwender zurückgeführt, die im Rahmen der im Kioto-Protokoll festgehaltenen Verpflichtungen ihrer Treibhausgasemissionen verringern müssen. Ein weiterer Grund für den Ausbau der Photovoltaik in Japan kann in den relativ hohen Strompreisen gesehen werden, die alternative Energieerzeugungsformen attraktiv machen (Auer 2005: 7). Von dem starken Zuwachs wird mit großer Wahrscheinlichkeit die starke japanische Solarindustrie profitieren. Um den erwarteten Nachfragesteigerung nachzukommen, hat Mitsubishi Heavy Industries im Februar 2006 angekündigt eine neue Solarfabrik mit einem Investitionswert von 10 Mrd. Yen (ca. 72 Mio. Euro) zu bauen und auch Honda Motor plant mit einer vergleichbaren Investition in den Markt für Solarzellen einzusteigen.

2.1.6 China

China wird aufgrund seines Energiebedarfs und der notwendigen Elektrifizierung ländlicher Gebiete als ein Zukunftsmarkt für die Photovoltaik gesehen (Auer 2005: 7). Im Jahr 2006 trat in China ein Gesetz zur Förderung erneuerbarer Energien in Kraft, das sich stark am deutschen EEG orientiert⁹. Die chinesische Regierung hat sich zum Ziel gesetzt, den Anteil erneuerbarer Energien am Mix auf 15 % zu verdoppeln. Bis zum Jahr 2020 sollen 20 Gigawatt Leistung aus regenerativen Energien erzeugt werden.

Seit dem Jahr 1996 ist zudem das so genannte „Brightness-Programm“ in Kraft. Mit ihm soll durch ein gesamtes Fördervolumen von 3,5 Mrd. Euro bis zum Jahr 2010 rd. 23 Mio. Menschen in entlegenen ländlichen Regionen der westlichen Provinzen durch

8 Siehe http://www.bfai.de/DE/Content/_SharedDocs/Links-EinzeldokumentenDatenbanken/fachdokument.html?fdent=MKT20060510104640 (letzter Abruf April 2007)

9 Siehe hierzu: http://www.epo.de/index.php?option=com_content&task=view&id=190&Itemid=68 (letzter Abruf April 2007)

dezentrale Energieversorgungssysteme, d.h. hauptsächlich durch Photovoltaik-, Wind- und Wasserkraftanlagen, an die Stromversorgung angeschlossen werden. In einer Pilotphase von 1999 - 2002 wurden zunächst rund 12.000 Solar-Home-Systeme installiert. In einer zweiten Phase von 2002 - 2004 mit einem Investitionsvolumen von etwa 470 Mio. Euro, wurden fast 1.000 Stadt-Gemeinden in acht Provinzen mit eigenen Stromversorgungsanlagen aus regenerativen Energiequellen versehen (Haugwitz 2007). China entwickelt sich somit trotz seines vergleichsweise späten Einstiegs in die Photovoltaik zu einem wichtigen Markt und Technologieanbieter (siehe auch Kap. 4.2).

3 Photovoltaik und ihre Anwendungsfelder

3.1 Technische Ansätze der Photovoltaik

Solarzellen nutzen Licht (griechisch: Photo) und wandeln dieses in elektrische Energie um. Das der Umwandlung zugrunde liegende Prinzip wird photovoltaischer Effekt genannt und ist seit 1839 bekannt. In der Photovoltaik werden verschiedene Halbleitermaterialien zur Energieerzeugung genutzt. Am bekanntesten und weitesten verbreitet ist heute das siliziumbasierte Halbleitersystem. Diese Technologie ist Grundlage von über 90 % der heute verwendeten Solarzellen. Neue Dünnschichttechnologien nutzen neben dem bekannten Halbleiter Silizium z.B. Materialkombinationen aus Cadmium-Tellurid (CdTe) oder Kupfer-Indium(Gallium)-Diselenid (CIS oder CIGS). Dünnschichttechnologien stellen aufgrund der verwendeten Rohstoffe und effizienten Produktionsverfahren eine zunehmende Konkurrenztechnologie für Solarzellen aus Silizium dar (Klenk 2002: 193 f). Dies wird unter anderem auch durch die wachsenden Kosten von Roh- bzw. Polysilizium begründet (siehe auch Kap. 5.1.1), die für die steigenden Preise von Solarzellen verantwortlich gemacht werden (Bernreuter 2006a).

Neben den genannten Siliziumzellen und Dünnschichttechnologien befinden sich weitere PV-Technologien in der Forschungs- bzw. Erprobungsphase. Die wichtigsten PV-Technologien werden im Folgenden kurz vorgestellt und hinsichtlich ihrer wesentlichen Leistungsmerkmale bzw. Vor- und Nachteile miteinander verglichen. Die dabei angegebenen Wirkungsgrade beziehen sich, soweit nicht anders vermerkt, auf die Leistung, die unter realen Einsatzbedingungen im Modul erreicht werden (Modulwirkungsgrade), nicht auf die unter Laborbedingungen maximal erreichbaren Wirkungsgrade (Zellwirkungsgrade).

Abschließend werden weitere wichtige Komponenten von PV-Systemkomponenten erläutert.

3.1.1 Kristalline Siliziumzellen

Kristalline Siliziumzellen lassen sich entsprechend dem verwendeten Ausgangsmaterial in monokristalline (c-Si) und polykristalline (p-Si) Zellen unterscheiden.

Monokristalline (c-Si) Zellen

Ausgangsmaterial für monokristalline PV-Zellen bilden Siliziumeinkristalle, die in dünne Scheiben von 0,2 bis 0,4 mm (engl. Wafer) geschnitten werden. Die Herstellung von Siliziumeinkristallen ist ein aufwendiger und energieintensiver Prozess. Weltweit werden die Wafer von wenigen Produzenten aus hochreinem Polysilizium hergestellt (siehe auch Kap. 5.1.1). Dasselbe Ausgangsmaterial dient auch in der Computerindustrie zur Herstellung von Prozessoren. Bei der klassischen Siliziumzelle werden die beiden Seiten des Wafers unterschiedlich dotiert. Die sonnenzugewandte Seite ist mit Phosphor negativ und die sonnenabgewandte Seite mit Bor positiv dotiert. Diese unterschiedliche Dotierung macht das kristalline Silizium zu einem Halbleitermaterial, das bei Lichteinstrahlung als Ladungsquelle genutzt werden kann.

Für die Weiterverarbeitung zu Solarzellen werden die Wafer in unterschiedliche Formen (Pseudosquare oder Quadrate) geschnitten, mit Kontaktgittern versehen und einer Antireflexschicht überzogen, die ihnen ihre dunkelblaue bis schwarze Farbe verleiht. Aufgrund ihrer Empfindlichkeit müssen die Zellen durch eine stabile, starre, durchsichtige und dichte Abdeckung (Glas oder Kunststoff) geschützt werden.

Monokristalline Zellen besitzen aktuell einen Modulwirkungsgrad von bis zu 16 % und sind sehr langzeitstabil. Sie werden deshalb vor allem dort eingesetzt, wo nur eine begrenzte Fläche zur Verfügung steht und eine hohe Leistungsdichte benötigt wird.

Vorteile	Nachteile
- Hoher Wirkungsgrad	- hohe Anforderungen an Ausgangsmaterial, aufwendiger, material- und energieintensiver Produktionsprozess
- Sehr gute Langzeitstabilität	- Leistungsabfall bei Erwärmung, geringe Verschattungstoleranz
	- empfindliche Zellen
	- nur begrenzte Form- und Farbgebung möglich, bedingte Transparenz möglich
Aktueller Wirkungsgrad	
Bis zu 16 % (Modulwirkungsgrad)	
Prognostizierter Wirkungsgrad 2020	
22 % (Modulwirkungsgrad) ¹⁰	

Tabelle 1: Zusammenfassung Monokristalline (c-Si) Zellen

Polykristalline (p-Si) Zellen

Polykristalline Zellen gleichen hinsichtlich ihrer mechanischen und elektrochemischen Eigenschaften den monokristallinen Siliziumzellen. Ihr Ausgangsmaterial bildet das aus hochreinem Polysilizium gewonnene polykristalline Silizium, das in Blöcke gegossen und ähnlich weiterverarbeitet wird, wie das monokristalline Silizium. Polykristalline Zellen sind leicht an der unregelmäßigen perlmutartigen und bläulich schimmernden Oberfläche zu erkennen.

Der Fertigungsaufwand für die Herstellung des polykristallinen Siliziums ist deutlich geringer als im Fall der monokristallinen Zelle. Das Silizium wird in diesem Fall nicht zu Einkristallen gezüchtet, sondern in geschmolzenem Zustand in Blöcke gegossen. Allerdings besitzen polykristalline Zellen mit derzeit maximal 11 - 13% auch einen geringeren Modulwirkungsgrad.

¹⁰ siehe EPIA Roadmap 2005: 24

Vorteile	Nachteile
- Sehr gute Langzeitstabilität	- hohe Anforderungen an Ausgangsmaterial - aufwendiger, material- und energieintensiver Produktionsprozess
- kostengünstige Herstellung	- Leistungsabfall bei Erwärmung, geringe Verschattungstoleranz
- mittlerer Wirkungsgrad	- empfindliche Zellen
	- nur begrenzte Form- und Farbgebung möglich, bedingte Transparenz möglich
Aktueller Wirkungsgrad	
Bis zu 11 – 13 % (Modulwirkungsgrad)	
Prognostizierter Wirkungsgrad 2020	
20 % (Modulwirkungsgrad) ¹¹	

Tabelle 2: Zusammenfassung Polykristalline (p-Si) Zellen

3.1.2 Dünnschichtsolarzellen

Dünnschichtsolarzellen sind im Vergleich zu Siliziumzellen eine relativ junge Technik, für deren Herstellung verschiedene technische Ansätze und Halbleitermaterialien existieren. Wesentlicher Unterschied und Vorteil der Dünnschichtzellen im Vergleich zur klassischen Siliziumzellen ist der geringere Materialaufwand und die daraus resultierenden Kostenvorteile in der Produktion. Dünnschichtmodule besitzen zudem eine Reihe spezifischer Eigenschaften bezüglich Farb-, Formgebung und Transparenz, die sie für die Fassaden- und Gebäudeintegration interessant machen.

Bei der Dünnschichttechnologie werden sehr dünne photochemisch aktive Schichten auf ein Trägermaterial (z.B. Glas oder Kunststoff) aufgebracht. Die wichtigsten Dünnschichttechnologien werden im Folgenden vorgestellt.

¹¹ siehe EPIA Roadmap 2005: 24

Amorphe Silizium(a-Si)-Dünnschichtzellen

Bei der Herstellung amorpher Silizium Dünnschichtzellen werden wenige Mikrometer starke Schichten aus amorphem gasförmigem Silizium auf einem Trägermaterial (z.B. Glas) aufgebracht. Im Gegensatz zur Herstellung klassischer Siliziumzellen ist man dabei nicht an Formgebung und Strukturierung der Wafer gebunden. Amorphe Silizium-Dünnschichtzellen können in unterschiedlichen Größen und Formen hergestellt werden. Größe, Strukturierung und Verschaltung der Module werden durch den Herstellungsprozess bestimmt. Insgesamt ist der Herstellungsprozess von Silizium-Dünnschichtzellen weniger material- und energieaufwändig als klassische Siliziumverfahren. Je nach aufgetragener Schichtdicke des Siliziums sind die Zellen rote bis braun gefärbt. Je nach verwendetem Trägermaterial und Form der Strukturierung können die Zellen semitransparent und flexibel sein. Ihr Wirkungsgrad liegt bei bis zu 7,4 % (siehe z.B. Siemer 2007: 64 f).

Neuere Ansätze von Silizium Dünnschichtzellen nutzen mehrere dünne Schichten verschieden strukturierten Siliziums (siehe auch Abschnitt Tandemzellen in Kap. 3.1.5) um das Absorptionsspektrum und damit den Wirkungsgrad zu erhöhen. Erste auf dem Markt erhältliche Tandemzellen, auch mikromorphe Zellen genannt, aus amorphem Silizium (a-Si) und mikrokristallinem (μ -Si) erreichen Wirkungsgrade von bis zu 8,5 % und werden z.B. durch die Firma Sharp angeboten (Siemer 2007: 76).

Vorteile	Nachteile
- geringer Material und Energieverbrauch bei der Herstellung	- relativ geringer Wirkungsgrad (gilt nicht für Tandemzellen)
- effizientes Herstellungsverfahren durch Integration der Verfahrensschritte Verschaltung und Strukturierung	- relativ geringe Langzeitstabilität
- Anpassung von Größe, Formgebung, Transparenz in geringem Umfang möglich	
- höhere Abschattungstoleranz und geringe Temperaturempfindlichkeit, empfindlicher bei diffusen Lichtverhältnissen	
Aktueller Wirkungsgrad	
Bis zu 7,4 % (Modulwirkungsgrad), mikromorphe Zellen bis 8,5 %	
Prognostizierter Wirkungsgrad 2020	
15 % (Modulwirkungsgrad) ¹²	

Tabelle 3: Zusammenfassung amorphe Silizium (a-Si) Dünnschichtzellen

Cadmium-Tellurid(CdTe)-Dünnschichtzellen

Cadmium-Tellurid-Dünnschichtzellen basieren auf mehreren, wenigen Mikrometer starken Schichten aus Cadmiumsulfid (CdS) und Cadmiumtellurid (CdTe), die auf ein Trägermaterial (z.B. Glas) durch Vakuumverdampfung aufgebracht werden. Wie auch im Fall der amorphen Siliziumdünnschichtzellen sind in die Fertigung neben dem Beschichten auch die Schritte, der Verschaltung und der Strukturierung integriert. Die Solarzellen werden abschließend durch die Auflaminierung gleichgroßer Glasplatten hermetisch versiegelt. Hinsichtlich der Größe der Zelle bestehen ähnliche Freiheitsgrade wie bei anderen Dünnschichttechnologien. CdTe- Zellen besitzen eine dunkelgrüne bis schwarze Oberfläche. Mit derzeit erhältlichen Modulen werden Wirkungsgrade bis zu 9,7 % erreicht (siehe z.B. Siemer 2007: 64 f).

¹² siehe EPIA Roadmap 2005: 29

Cadmium-Tellurid Module beinhalten wie der Name sagt das Schwermetall Cadmium. Die verwendete Cadmiummenge pro m² ist sehr gering (vergleichbar mit dem Cadmium-Gehalt einer kleinen Batterie). Zudem ist das Cadmium unlöslich in den Werkstoff eingebunden. Die Verwendung von Cadmium muss jedoch mit Hinblick auf die europäischen Verordnungen zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten (RoHS) sowie der Richtlinie über Elektro- und Elektronik-Altgeräte (WEE) kritisch bewertet, da diese den Einsatz von Cadmium in Elektro- und Elektronikgeräten stark reglementieren. Bisher fallen PV-Module nicht unter die in den genannten Verordnungen definierten Gerätelisten (Ökopol, IE 2004).

Vorteile	Nachteile
- geringer Material und Energieverbrauch bei der Herstellung	- geringer Wirkungsgrad
- effizientes Herstellungsverfahren durch Integration der Verfahrensschritte Verschaltung und Strukturierung	- toxische Inhaltsstoffe
- Variable Zellgröße	
- höhere Abschattungstoleranz und geringe Temperaturempfindlichkeit, empfindlicher bei diffusen Lichtverhältnissen	
Aktueller Wirkungsgrad	
Bis zu 9,7 % (Modulwirkungsgrad)	
Prognostizierter Wirkungsgrad 2020	
15 % (Modulwirkungsgrad) ¹³	

Tabelle 4: Zusammenfassung Cadmium-Tellurid (CdTe) Dünnschichtzellen

Kupfer-Indium (Gallium)-Diselenid Dünnschichtzellen

Kupfer-Indium-Selenid (CIS) ist ein weiteres Halbleitermaterial für die Produktion von Dünnschicht-Solarmodulen. Es gibt diverse CIS-Material-Untergruppen, die entweder

¹³ siehe EPIA Roadmap 2005: 29

in Produktion oder Erforschung sind, z.B. Kuper-Indium-Gallium-Diselenid (CIGS) und Kupfer-Indium-Sulfit. Eine weitere Variante stellt CIGS_{Se} dar, in der die Materialien Kupfer, Indium, Gallium, Schwefel und Selen zu einem Halbleiter kombiniert werden.

Der Herstellungsprozess für CIS-Module nutzt wie auch bei den CdTe-Zellen die Verdampfung im Hochvakuum für das Abscheiden verschiedener, Mikrometer starker Schichten auf einem Trägermaterial (z.B. Glas). Der derzeitig erreichbare Modulwirkungsgrad von CIS-Zellen wird mit max. 11,1 % (Siemer 2007: 64 f) angegeben. CIS-Solarmodule haben vorderseitig ein schwarzes opakes Aussehen, während die Rückseite homogen und aluminiumfarben spiegelnd ist. Durch Musterung können auch semitransparente oder farblich hinterlegte Zellen erzeugt werden, dabei sind Transparenzgrade von 0 % bis 50 % möglich.

Die Größe der Zellen kann relativ frei gewählt werden. Die Produktion erfolgt in integrierten Prozessabläufen, die neben der Beschichtung das Kontaktieren, Verschalten und Laminieren beinhalten.

Einen potenziellen Engpass für CIS-Module können zukünftig die benötigten seltenen Metalle (Indium, Gallium, Selen) darstellen. Insbesondere Indium und Gallium, die auch für die Herstellung von Flüssigkristall- und OLED-Bildschirmen sowie Leuchtdioden benötigt werden, werden in den letzten Jahren stark nachgefragt¹⁴.

14 Siehe aktuelle Daten des U.S Geological Survey unter <http://www.usgs.gov/>

Vorteile	Nachteile
- geringer Material und Energieverbrauch bei der Herstellung	- Eventuell zukünftige Engpässen in der Versorgung mit wichtigen Rohstoffen (Indium, Gallium, Selen)
- effizientes Herstellungsverfahren durch Integration der Verfahrensschritte Verschaltung und Strukturierung	
- Freiheiten hinsichtlich Zellgröße	
- höhere Abschattungstoleranz und geringe Temperaturempfindlichkeit, empfindlicher bei diffusen Lichtverhältnissen?	
Aktueller Wirkungsgrad	
Bis zu 11,1 % (Modulwirkungsgrad)	
Prognostizierter Wirkungsgrad 2020	
15 % (Modulwirkungsgrad) ¹⁵	

Tabelle 5: Zusammenfassung Kupfer-Indium (Gallium)-Diselenid Dünnschichtzellen

3.1.3 Farbstoffsolarzellen

Farbstoffsolarzellen werden in Anlehnung an ihren Entdecker Prof. Grätzel auch als Grätzel-Zelle bezeichnet. Die Farbstoffsolarzelle nutzt die Lichtabsorption von Farbstoffen zur Stromerzeugung. Theoretisch ist für dieses Prinzip eine Reihe von organischen Farbstoffen nutzbar, aufgrund ihrer Beständigkeit kommen jedoch in erster Linie Komplexe des seltenen Metalls Ruthenium zum Einsatz. Als Halbleitermaterial in der PV-Zelle wird z.B. Titandioxid genutzt. Gefertigt werden kann die Farbstoffsolarzelle durch Siebdruck- und Glassintertechnik oder auch im Roll-to roll-Verfahren auf Polymerbasis, was sie im Vergleich zur Silizium- und Dünnschichttechnologie potenziell zu einem kostengünstigen Verfahren macht.

¹⁵ siehe EPIA Roadmap 2005: 29

Mit bisherigen Zellen werden Zellwirkungsgrade von bis zu 10 % erreicht. Große Vorteile werden für diesen Zelltyp in den Gestaltungsmöglichkeiten hinsichtlich Farben, Muster und Transparenz gesehen. Farbstoffsolarzellen können daher ein interessantes Material für unterschiedliche Anwendungen in Gebäuden und Architektur (Fassaden, Überkopfverglasung, etc.) darstellen.

Einen potenziellen Kostenfaktor für die Herstellung von Farbstoffsolarzellen stellt das für den Farbstoff benötigte seltene Metall Ruthenium dar. Ruthenium wird zurzeit insbesondere als Katalysator in der chemischen Industrie sowie als Legierungsbestandteil in Platin- und Palladiumlegierungen genutzt¹⁶. Für das Metall Ruthenium zeichnet sich, da es ein Beiprodukt der Platinförderung ist und bisher noch nicht in großen Mengen nachgefragt wird, bisher keiner Knappheit ab. Es unterliegt jedoch starken Preisschwankungen, die insbesondere auf die sich verändernde Nachfrage zurückgeführt werden. In den kommenden Jahren ist mit einer verstärkten Nachfrage von Ruthenium durch die Halbleiter- und Brennstoffzellenindustrie zu rechnen. Da jedoch aufgrund der hohen Platinnachfrage auch weiterhin mit einem Angebotsüberschuss von Ruthenium gerechnet wird, muss der steigende Rutheniumbedarf nicht mit einer Preiserhöhung einhergehen (Lutz, Heubach, Lang-Koetz 2007: 42 f).

Für die industrielle Fertigung von Farbstoffsolarzellen wird ein Lieferant für Rutheniumfarbstoff mit gleich bleibender Qualität und möglich konstantem, niedrigem Preisniveau benötigt. Der bisher in Forschungsvorhaben verwendete Farbstoff wird von unterschiedlichen Forschungseinrichtungen im Batchansatz hergestellt und ist für die serielle Anwendung zu teuer.

Farbstoffsolarzellen befinden sich in der Phase der Kommerzialisierung. Erste Produkte mit polymerbasierten Farbstoffsolarzellen sollen Ende 2007 auf dem Markt erhältlich sein (siehe auch Kap. 5.2.3)

16 Zu den Anwendungen von Ruthenium siehe auch <http://www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/Ruthenium>

Vorteile	Nachteile
- einfaches und kostengünstiges Fertigungsverfahren, weitestgehend preiswerte Ausgangsmaterialien (Ausnahme: Farbstoff)	- vergleichsweise niedriger Wirkungsgrad
- gestalterische Spielräume hinsichtlich Farben, Mustern und Transparenz	- Preisschwankungen von Ruthenium
- höhere Abschattungstoleranz und geringe Temperaturempfindlichkeit, empfindlicher bei diffusen Lichtverhältnissen	
Aktueller Wirkungsgrad	
Bis zu 10 % (Zellwirkungsgrad)	
Prognostizierter Wirkungsgrad 2020	
Bis zu 15 %	

Tabelle 6: Zusammenfassung Farbstoffsolarzellen

3.1.4 Organische Solarzellen

Das Prinzip der organischen Solarzelle basiert auf lichtabsorbierenden Polymeren, die Kohlenwasserstoffverbindungen mit elektrisch halbleitenden Eigenschaften enthalten. Eine Vielzahl von Polymeren befindet sich derzeit in der Forschung und Erprobung. Ziel der Arbeiten ist es eine Technologie zu entwickeln, mit der die Zellen im kostengünstigen Verfahren auf Folien gedruckt oder durch Vakuumverdampfung aufgebracht werden können. Eine solche kostengünstige, leichte und flexible Solarzelle würde eine Vielzahl neuer Einsatzgebiete, wie z.B. Spannungsquellen für kurzlebige Produkte oder auch Integrationsmöglichkeiten in Verpackungsmaterialien und Textilien eröffnen.

Derzeit existierende Prototypen organischer Solarzellen besitzen einen Zellwirkungsgrad von 3 - 5 %. Zentrale Herausforderungen in der Forschung stellen die Stabilisierung der Zelle (Versiegelung), eine Wirkungsgradsteigerung und eine Senkung der Fertigungskosten dar. Große Überschneidungen ergeben sich mit vielen Teilforschungsgebieten in der Polymerelektronik, z.B. der Forschung zu Photodetektoren sowie Displays auf Polymerbasis (OLED's), die aus chemisch ähnlichen, halbleitenden, organischen Materialien hergestellt werden.

Vorteile		Nachteile	
- prognostizierte geringe Produktionskosten		- bisher niedriger Wirkungsgrad	
- leichte flexible Solarzellen auf Folienbasis		- bisher geringe Langzeitbeständigkeit	
Aktueller Wirkungsgrad			
Bis zu 5 % (Zellwirkungsgrad)			
Prognostizierter Wirkungsgrad 2020			
Bis zu 10 % (Modulwirkungsgrad)			

Tabelle 7: Zusammenfassung organische Solarzellen

3.1.5 Neue technische Ansätze

In der Forschung werden, neben den oben genannten Technologien weitere neue photovoltaische Ansätze sowie eine Vielzahl von Verfahren zur Optimierung der traditionellen Siliziumtechnik verfolgt. Im Folgenden sollten einige Beispiele vorgestellt werden, die sich noch weitestgehend in der Phase der Forschung befinden (siehe hierzu z.B. Haselhuhn 2006: 133 f, Hagemann 2002: 42 f):

- **Oberflächenstrukturierung zur Verminderung von Reflexionsverlusten:** Um Reflexionsverluste von Solarzellen zu mindern, wird die Oberflächenstruktur der photovoltaisch aktiven Schicht optimiert. So werden beispielsweise Pyramidenstrukturen erforscht, die einfallendes Licht mehrfach reflektieren sollen und somit den Wirkungsgrad der Zelle erhöhen.
- **Konzentratorzellen:** Bei diesem Ansatz wird durch die Verwendung von Spiegel- und Linsensystemen (Fresnel-Linsen) eine höhere Lichtintensität auf die Solarzellen fokussiert. Durch die Fokussierung sollen deutlich höherer Modulwirkungsgrade von bis zu 28 % erreicht werden. Zusätzlich werden leistungsfähige Halbleitermaterialien eingesetzt und die Module der Sonne nachgeführt, um stets die direkte Strahlung auszunutzen. Erste Anlagen sind beispielsweise

von der Firma Concentrix entwickelt worden. Ab 2008 soll die Technologie kommerziell verfügbar sein¹⁷

- **Tandem- oder Stapelzellen:** Um ein breiteres Strahlungsspektrum nutzen zu können, werden unterschiedliche Halbleitermaterialien, die für verschiedene Spektralbereiche geeignet sind, übereinander angeordnet. Diese Technologie ist bereits in ersten am Markt erhältlichen Produkten enthalten, so z.B. in den beschriebenen Konzentratorzellen von Concentrix oder auch den Silizium-Tandemzellen der Firmen Sharp.
- **Spheral Solar Zelle:** Kleine kristalline Siliziumkugeln werden in eine perforierte, doppelschichtige Aluminiumfolien eingepresst. Dadurch erhält man leichte, flexible und verformbare Solarzellen beliebiger Größe. Als Ausgangsmaterial wird günstigeres, metallurgisches Silizium verwendet. Bisher werden Wirkungsgrade von 10 % erreicht.
- **MIS-Inversionsschicht-Zellen:** In der MIS-Inversionsschicht-Zelle wird das elektrische Feld nicht wie in der klassischen Siliziumzelle durch einen p-n-Übergang im Halbleiter sondern durch den Übergang einer dünnen Oxidschicht zu einem Halbleiter erzeugt. Vorteil dieser Technologie ist, das n-Siliziumwafer aus kostengünstigerem Material statt teure p-Siliziumwafer verwendet werden können.
- **Neue Materialien:** Durch den Einsatz neuer Materialien wird versucht, das Halbleitersystem klassischer Silizium- bzw. von Dünnschichtzellen zu verbessern. In der Erprobung sind z.B. Galliumarsenid (GaAs) oder Germanium basierte Halbleiter. Aufgrund des hohen Preises von Galliumarsenid wird diese Technologie mit großer Wahrscheinlichkeit auf Hochleistungsanwendungen wie z.B. in Konzentratorzellen oder der Stromversorgung von Satelliten begrenzt bleiben. Zu den potenziell kostengünstigen neuen Halbleitermaterialien zählen die lichtabsorbierenden Polymere (siehe auch Kap. 3.1.4).
- **LED Solarzelle:** Anfang der 90er Jahre wurde entdeckt, dass „Super-bright emitting diodes“ (SB-LED) einen photovoltaischen Effekt besitzen und sich damit als Solarzellen nutzen lassen können. Dieser Ansatz befindet sich derzeit in der Erprobung und könnte beispielsweise für Anzeige- und Werbetafeln aus LED`s genutzt werden, die tagsüber Energie gewinnen und diese in der Nacht für die eigene Beleuchtung nutzen.

¹⁷ siehe Webseite der Firma Concentrix unter <http://www.concentrixsolar.de/> (letzter Abruf Juli 2007)

- **Fluoreszenzzelle:** Hier wird die einfallende Strahlung in einer Kunststoffplatte eingefangen. Der Kunststoff ist mit fluoreszierenden Farbstoffen dotiert. Die Solarstrahlung wird vom Farbstoff absorbiert und regt diesen zum Leuchten an. Die dabei emittierte, langwelligere Strahlung verlässt die Platte hauptsächlich an einer Stirnseite, an allen anderen Seiten wird sie durch Totalreflexion oder Spiegelung weitestgehend im Material gehalten. Die entsprechende Stirnseite wird mit Solarzellen bestückt, die optimal auf die durch den Farbstoff emittierte Wellenlänge abgestimmt werden können. Durch das Stapeln mehrerer verschiedener Kunststoffplatten, die jeweils auf einen anderen Wellenlängenbereich optimiert werden, kann der Wirkungsgrad erhöht werden. Bisher wurden Wirkungsgrade von bis zu 5% erreicht.
- **3-D-Solarzelle:** Auf einem Siliziumwafer werden dreidimensionale Kohlenstoff-Nanoröhrchen erzeugt, deren Oberfläche dann mit einem Halbleitermaterial z.B. Cadmiumtellurid und Cadmiumsulfid beschichtet werden. Durch die dreidimensionalen Strukturen der Kohlenstoffröhrchen und die damit verbundene Oberflächenvergrößerung soll schräg einfallendes Licht besser genutzt werden können. Die Technologie befindet sich noch im Forschungsstadium, erste Laborzellen erreichen Wirkungsgrade von bis zu 7 %¹⁸.

3.1.6 PV-Systemkomponenten

PV-Modul

Die photovoltaisch aktive Komponente, die Solarzelle in ihren unterschiedlichen Ausprägungen, wurde im vorangegangenen Abschnitt vorgestellt. Für die Stromerzeugung und die Integration der Zelle in Gebäude und andere Anwendungen werden weitere Komponenten benötigt, die im Folgenden kurz vorgestellt werden. Üblicherweise werden Solarzellen in miteinander verschalteten Gruppen zu Modulen zusammengefasst. Die Module haben für ihre Nutzung eine Reihe von Anforderungen zu erfüllen, dazu zählen (vgl. z.B. Hagemann 2002):

- Gewährleistung von Langlebigkeit und Stabilität
- Schutz vor schädigenden Umwelteinflüssen (z.B. UV-Strahlung, Feuchtigkeit, Wärme, Korrosion, Mikroorganismen, Hagel, etc.)
- Sicherung von mechanischer Stabilität und elektrischer Sicherheit

¹⁸ Siehe Financial Times Deutschland vom 2. Juli 2007, S. 8, „Kluge Fallen sammeln Sonnenstrahlen“

- Förderung der Selbstreinigung
- Integrationsfähigkeit in Gebäudehüllen, Fassaden, etc.

Übliche Standardmodule aus Silizium bestehen meist aus den Komponenten Rahmen, Glas, transparente Laminierungsfolie, PV-Zellen, transparente Laminierungsfolie, farbige Verbundkunststoffolie, Glas und Modulanschlussdose.

Wechselrichter

Aufgabe des Wechselrichters ist es, den vom PV-Modul erzeugten Gleichstrom in netzkonformen Wechselstrom zu wandeln. Darüber hinaus übernehmen Wechselrichter in einer PV-Anlage aber auch andere Aufgaben, wie z.B.:

- Steuerung des Betriebsablaufs der PV-Anlage
- Schutz des Stromnetzes und der PV-Anlage
- Kommunikationsschnittstelle zur Bedienung und Überwachung der PV-Anlage

Zu einer kompletten PV-Anlage gehören zudem die Verkabelung und gegebenenfalls eine Speichereinheit (Batterie) mit Laderegler.

3.1.7 Zusammenfassung wichtiger Parameter verschiedener Dünnschichttechnologien

Für das Forschungsvorhaben ColorSol und die Entwicklung von Farbstoffsolarzellen ist insbesondere der Vergleich mit anderen Dünnschichttechnologien von Bedeutung, da diese aufgrund ihrer Leistungscharakteristika und Fertigungsverfahren am stärksten mit der Farbstoffsolarzelle konkurrieren.

Ein Vergleich zentraler Parameter der einzelnen Techniklinien ist in der folgenden Tabelle enthalten:

	a-Si	CdTe	CIS- Technolog.	FSZ	Organ. SZ
Aktueller Wirkungsgrad	max. 7,4 % (Modul)	max. 9,7 % (Modul)	max. 11,1 % (Modul)	max. 10 % (Zelle)	max. 5 % (Zelle)
Prognost. Wirkungsgrad 2020	15 %	15 %	15 %	15 %	ca. 10 %
Herstellungsprozess	thermisches Verdampfen im Vakuum	thermisches Verdampfen im Vakuum	Verdampfen im Hochvakuum	Siebdruck auf Glas oder roll-to-roll Prozess	Laborstadium
Substrat/ Trägermaterial	Glas oder Polymer	Glas	Glas	Glas oder Polymer	Polymer
Farbe/ Struktur	rot/braun (homogen)	Dunkelgrün bis schwarz (homogen)	Schwarz, opak (homogen)	rot/bernstein (charakt. Struktur)	?
Transparenz	teilweise	-	teilweise	veränderbare Transparenz durch Streuschicht	-
Erwartete Lebensdauer	ca. 10 Jahre	> 15 Jahre	> 15 Jahre	Glas > 10 Jahre, Polymerfolie ca. 1-2 Jahre	ca. 1-2 Jahre

Tabelle 8: Vergleich zentraler Parameter ausgewählter Photovoltaik-Techniklinien

Gemeinsam ist den Dünnschichttechnologien, dass sie mit Ausnahme der amorphen Si-Dünnschichtzellen eine höhere Toleranz gegenüber Teilverschattung und einer steigender Umgebungstemperatur zeigen, als dies bei Siliziumzellen der Fall ist. Daraus folgt, dass sie im Vergleich mit den Siliziumzellen einen weniger starken Abfall des Wirkungsgrades aufweisen.

Differenziert muss auch das Kriterium der Transparenz betrachtet werden. Zwar können die meisten Dünnschichttechnologien, wie auch Standardsiliziumzellen durch Entfernung oder Auslassung der photovoltaisch aktiven Schicht teilweise transparent ges-

taltet werden, dies führt jedoch gleichzeitig zu einer Minderung des Wirkungsgrades des Moduls. Im Gegensatz dazu kann die Transparenz der Farbstoffsolarzellen ohne deutliche Einbußen im Wirkungsgrad durch eine zusätzliche Streuschicht stärker variiert werden. Gleichzeitig können über die Strukturierung der Streuschicht Muster erzeugt werden.

Bezüglich des Herstellungsprozesses bieten die Farbstoffsolarzelle und die organische Solarzelle die größten Kostensenkungspotenziale für den Herstellungsprozess. Aufgrund der verwendeten Siebdruck- und Roll-to-roll-Verfahren können im Vergleich zu anderen Halbleitermaterialien, die durch Verdampfung im Vakuum oder vergleichbaren Schritten aufgebracht werden, größere Energie- und Kostenpotenziale erschlossen werden.

3.2 Anwendungsfelder der Photovoltaik

3.2.1 Unterteilung von Anwendungsfeldern der Photovoltaik

Die photovoltaische Stromerzeugung kann theoretisch in einer Vielzahl von Anwendungen genutzt werden, die von portablen Geräten, wie z.B. Taschenrechnern bis zu solaren Kraftwerken reichen. Erstmals genutzt wurden Photovoltaikzellen zur Stromversorgung in Satelliten in den 50er Jahren. Seitdem ist die Photovoltaik, bedingt durch technologische Entwicklungen, steigende Energiepreise und eine gezielte Förderpolitik für eine Vielzahl von Anwendungsfeldern attraktiv geworden, die man wie folgt unterscheiden kann (siehe hierzu z.B. Stryi-Hipp und Hoffmann 2004a):

- **Netzgebundene Systeme:** Darunter fallen alle Anwendungen von Photovoltaik, die den erzeugten Strom in das öffentliche Stromnetz einspeisen. Hierzu zählen sowohl solare Kraftwerke, als auch alle Anwendungen in Bauwerken (z.B. Dächern, Fassaden, etc.) und vergleichbaren Installationen.
- **Netzunabhängige Systeme:** Hierzu zählen PV-Anlagen die nicht an das öffentliche Stromnetz angeschlossen sind. Sie können unterschiedlich groß und leistungsfähig sein und können beispielsweise für die Stromversorgung einzelner Geräte, Anlagen (z.B. Sendeeinrichtungen für Telekommunikation) und Häuser genutzt werden. Eine Herausforderung stellt in diesem Zusammenhang nach wie vor die effiziente Speicherung der Energie bzw. die Kopplung mit anderen Energiequellen dar.
- **Kleinsysteme:** Kleinsysteme sind häufig mobile, netzunabhängige PV-Anwendungen in Konsumerprodukten wie z.B. Uhren, Taschenrechnern, Ladegeräten, etc.

Die netzgekoppelte Photovoltaiksysteme können wiederum in drei weitere Untergruppen unterteilt werden (Stryi-Hipp und Hagemann 2002):

- **Freiflächenanlagen und Kraftwerke:** Dazu werden netzgekoppelte Anlagen gezählt, die auf freien Flächen (z.B. Grün- oder Nutzflächen) installiert werden. Es kann sich dabei sowohl um kleinere Anlagen als auch PV-Kraftwerke handeln.
- **Gebäudeintegrierte Anlagen:** Zu den gebäudeintegrierten Anlagen werden PV-Systeme gezählt, die in Dächern, Oberlichtern, Außenwänden, Glassfassaden und Verglasungen sowie zum Sonnenschutz in und an Gebäuden zum Einsatz kommen.
- **Sonstige Bauwerke:** Hierzu werden sonstige bauwerksgestützte PV-Anwendungen, wie z.B. in Schallschutzwänden, Zeltdachkonstruktionen, Bushaltestellen, etc. gezählt.

Von den genannten Anwendungsfeldern spielen die netzgekoppelten Photovoltaikanlagen mengenmäßig die wichtigste Rolle (siehe Abbildung 2). Dies liegt unter anderem auch an der Förderpolitik in den zentralen Photovoltaikmärkten, die einen Anschluss an das Stromnetz durch Einspeisevergütungen regeln (siehe Kap. 2).

Netzunabhängige Systeme spielen vor allem in Schwellenländern eine größere Rolle, in denen sie die Elektrifizierung weit abgelegener Siedlungen ermöglichen (vgl. auch Kap. 4.2).

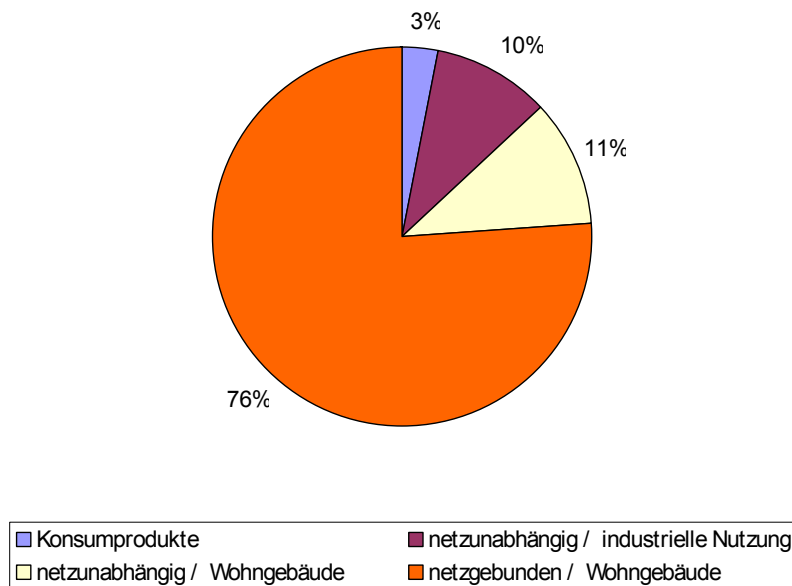


Abbildung 2: Anteile von PV-Anwendungen am Gesamtmarkt (nach Daten von Hoffmann 2004b: 10)

3.2.2 Gebäudeintegrierte Photovoltaik

Das Forschungsvorhaben ColorSol beschäftigt sich aufgrund der spezifischen physikalischen Eigenschaften von Farbstoffsolarzellen und den daraus resultierenden Gestaltungsmöglichkeiten schwerpunktmäßig mit gebäudeintegrierten Anwendungen der Photovoltaik. Hierzu zählen z.B. alle PV-Anwendungen, die in Form von Dach- oder Fassadenkonstruktionen in die Gebäudehülle integriert werden (siehe Kap. 3.2.1). Eine zentrale Annahme des Projektes ist, dass gestalterische Anforderungen für die Gebäudeintegration, wie z.B. strukturelle Erscheinung und Oberfläche, Textur, Farbe und Kontrast (vgl. Rexroth 2005:18) eine wichtige Rolle spielen und durch Farbstoffsolarzellen erfüllt werden können.

Die netzgekoppelte, gebäudeintegrierte Photovoltaik nimmt aber aus weiteren Gründen eine wichtige Stellung unter den Photovoltaikanwendungen ein. Hagemann (2002) führt hierfür die folgenden Gründe an:

- **Ökonomische Vorteile:** Für den aus gebäudeintegrierter Photovoltaik erzeugten Strom wird durch das EEG eine langfristige Vergütung garantiert. Gebäudeintegrierte Photovoltaikanlagen können zudem wirtschaftlich eher konkurrenzfähig als freistehende Anlagen sein, wenn ungenutzte Gebäudeflächen genutzt und die Material- und Installationskosten durch die Integration in das Gebäude gering gehalten werden. Dies gelingt insbesondere dann, wenn gebäudeinteg-

rierte Photovoltaik als integratives Element eines Gebäudes geplant wird und dadurch mehrfache Funktionen übernimmt (siehe auch nächster Punkt).

- **Mehrfachfunktion:** Photovoltaik nimmt bei der Gebäudeintegration eine Mehrfachfunktion ein. Neben der Energieerzeugung erfüllt sie auch eine gestalterische und bautechnische Funktion, wie z.B. Wetter- und Blendschutz. Diese Multifunktionalität ist für den wirtschaftlichen Vergleich mit anderen Baumaterialien, die einen vergleichbaren Zweck erfüllen sollen entscheidend (hwp/ ISET 2006: 82).

Rexroth (2005: 18) unterscheidet aus architektonischer Sicht zudem drei Stufen der baulichen Integration von Photovoltaik. Stufe I: Applikation entspricht der rein visuellen Integration der Technologie. Stufe II ist die konstruktive Addition und beinhaltet zusätzlich die funktionelle Integration der Technologie in die Fassade (z.B. als Witterungsschutz in einer Kaltfassade). Stufe III der konstruktiven Integration umfasst die konstruktive und gestalterische Substitution von Fassaden oder Dachelementen durch Photovoltaik.

Eine detailliertere Betrachtung der jeweiligen Marktpotenziale der einzelnen Photovoltaikanwendungen und auch speziell der gebäudeintegrierten Nutzungen wird in Kap. 4.3 vorgenommen.

3.3 Innovationsdynamik

Im Folgenden wird die Innovationsdynamik verschiedener PV-Technologien anhand von Patenten und Investitionen in Form von F+E- Mitteln analysiert.

3.3.1 Patententwicklung

Das Jahr mit der weltweit größten Anzahl an Patentanmeldungen in der Photovoltaik ist das Jahr 2005 mit über 3.200 Patenten. Durchschnittlich sind in den letzten 10 Jahren die Anzahl der Patente um 40 % pro Jahr gewachsen. Als Gründe für diesen starken Anstieg werden zum einen die weltweiten staatlichen Fördermaßnahmen sowie die steigenden Energiepreise genannt, die PV-Technologien zunehmend attraktiver machen (Kämper 2006: 5).

Herkunfts- und Zielländer

Bei den Herkunftsländern der Photovoltaikpatente dominiert Japan mit großem Abstand zu den USA an zweiter und Deutschland an dritter Stelle (siehe folgende Abbildung).

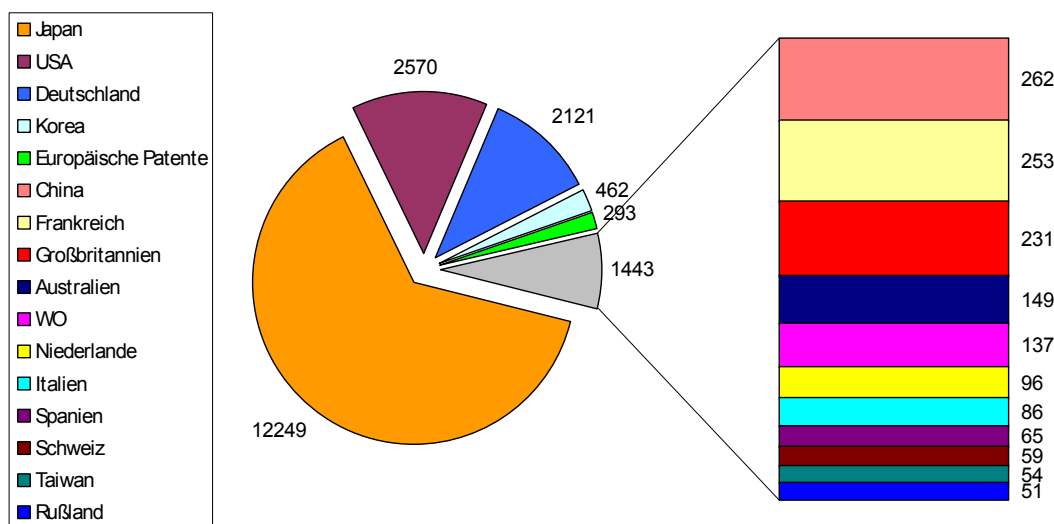


Abbildung 3: Anzahl und Herkunftsländer von Photovoltaikpatenten (nach Kämper 2006: 13, [WO - World Intellectual Property Organisation, Genf])

Kämper (2006: 13) verweist jedoch darauf, dass die Höhe der japanischen Anmeldungen irreführend ist, da das japanische Patentrecht den Anmelder zwingt, seine Erfindung in viele Einzelkomponenten zu zerlegen. Umstritten ist jedoch wie hoch ein anzusetzender Korrekturfaktor sein sollte. Zu den weiteren relevanten Herkunftsländern von Photovoltaikpatenten zählen Korea, China und Frankreich. Eine Analyse der Patentanmeldungen über den Zeitverlauf zeigt, dass in den USA eine deutliche Steigerung der Aktivitäten in den Jahren 2000 bis 2003 stattgefunden hat. In Deutschland haben die Anmeldungen stagniert und in Korea haben sie die Patentaktivitäten im gleichen Zeitraum verfünffacht. Daraus folgt, dass hier zum einen ein Mitbewerber und zum anderen ein neuer Markt entstehen können. Auch China kann aufgrund seiner steigenden Patentaktivitäten als ein wichtiger neuer Akteur gesehen werden (Kämper 2006: 11), wengleich die Marktsituation hier sehr schwierig abzuschätzen ist (siehe auch Kap. 5.2).

Vergleicht man die Daten der Herkunftsländer mit denen der Zielländer, also den Ländern in denen die Technologien aus Sicht der Hersteller angeboten werden können, so zeigt sich ein leicht verändertes Bild. Es wird deutlich, dass die USA ein ausgeprägter

Zielmarkt ist, da doppelt so viele Photovoltaikpatente in den USA angemeldet werden wie aus dem eigenen Land kommen. Der größte Teil der deutschen Patente zielt auf den heimischen Markt ab, während in Australien, China und Korea die Patente trotz starker eigener Aktivitäten von außerhalb überwiegen (Kämper 2006: 16). Überraschend niedrig sind dagegen nach Kämper (2006: 18) die Anmeldungen von Technologieführern der Photovoltaik in wichtigen Zukunftsmärkten wie Spanien, Italien, Brasilien, Mexiko und der Türkei.

Techniklinien

Der größte Anteil der angemeldeten Patente stammt aus dem Umfeld der Siliziumtechnologien. Dies ist wenig überraschend, machen diese Technologien doch bisher den überwiegenden Marktanteil aus (siehe Kap. 4.3). Kämper (2006: 19) hat die über Internationale Patentklassen (IPC) erfassbaren 19.260 Photovoltaikpatente analysiert. Die überwiegende Anzahl der Anmeldung (ca. 41 %) wurde bei strahlungsempfindlichen Halbleitern vorgenommen, dem eigentlichen Kernfeld der Photovoltaik. Danach folgen mit rund 13 % Anordnungen von photoelektrischen Zellen.

Kämper (2006: 19) verweist zudem darauf, dass neue Photovoltaiktechnologien, wie z.B. CIS-Technologien oder organische Photovoltaik über die bestehenden Patentklassen nicht ausreichend differenziert erfasst. Sie müssen über Schlagwortsuchen in die Analyse einbezogen werden, da sich diese Technologien in den alten Patentklassifikationen der Jahre 1995 bis 2000 nicht widerspiegeln. Nach seiner Aussage besitzt Deutschland einen klaren Vorsprung im Bereich der chemisch-organischen Solarzellen während diese Techniklinien international keine nennenswerte Rolle spielt. Vergleichbar stellt sich die Situation bei den Dünnschichttechnologien dar, die sowohl siliziumbasierte wie auch siliziumfreie Varianten umfasst. Im Bereich der Dünnschichttechnologien wurden insgesamt 3.200 Patente analysiert, von denen fast 1.200 auf siliziumbasierten Konzepten beruhen. Auch hier zeigt sich das der überwiegende Anteil der Patentanmeldungen (ca. 47 %) in der Klasse der strahlungsempfindlichen Halbleiter gemacht wurde, gefolgt von Patenten zur gasförmigen Verbindungen und deren chemischer Ablagerung (ca. 15 %). Bei letzteren handelt es sich um Technologien, die zur Beschichtung der Trägermaterialien mit dem Halbleiter benötigt werden. Zu CIS-Halbleitern gibt es nach der Auswertung von Kämper (2006: 23) zwar 6.900 Patente, davon besitzen aber nur 162 einen Bezug zur Photovoltaik.

Eine genauere Analyse der thematischen Verteilung der deutschen Photovoltaikpatente zeigt, dass die Mehrheit der in Deutschland angemeldeten Erfindungen sich auf die Herstellung von Solarzellen und Modulen konzentrieren. Keine expliziten Informationen enthält die Patentanalyse zu Verteilung der Patente im Bereich von neuen photovoltaik-

schen Technologien in Deutschland bzw. zur Patentverteilung im Bereich von Farbstoffsolarzellen. Die Analyse der deutschen Photovoltaikpatente weist zwar eine Gruppe zu Farbstoffe und makromolekularen Verbindungen aus, diese wird jedoch nicht näher spezifiziert oder erläutert (siehe Kämper 2006: 24).

Eine eigene Patentanalyse des Projektkonsortiums ColorSol ergab, dass die Mehrzahl der Patente sich auf die Bereiche Produktionsmethoden (einer Zelle oder Teilkomponenten) und Gesamtzelle (neuartige Wirkprinzipien) beziehen. Daneben existieren diverse Patente bzgl. spezieller Komponenten, wie Farbstoffe, Elektroden, Nanopartikel und Elektrolyt etc., Verfahren (z.B. Beschichtung) oder auch spezieller Anwendungen (z.B. Integration in einem Karosserieteil bei Daimler Chrysler).

Technologieführer

Entsprechend der starken Konzentration von Patenten sind die Technologieführer siliziumbasierter Photovoltaiktechnologie in Japan angesiedelt. Kämper (2006: 25) hat, gemessen an den Photovoltaikpatenten im engeren Sinne, die 10 stärksten und innovativsten Photovoltaikunternehmen ausgewertet. Diese sind in absteigender Reihenfolge Canon, Sharp, Kyocera, Sanyo, Kaneka, Mitsubishi, Fuji Electric, Matsushita Denki, Fuji Photo Film, Matsushita Electric Works (siehe Abbildung 4). Deutsche Forschungsorganisationen und Unternehmen kommen in Summe auf 11 % der weltweiten Photovoltaikpatente.

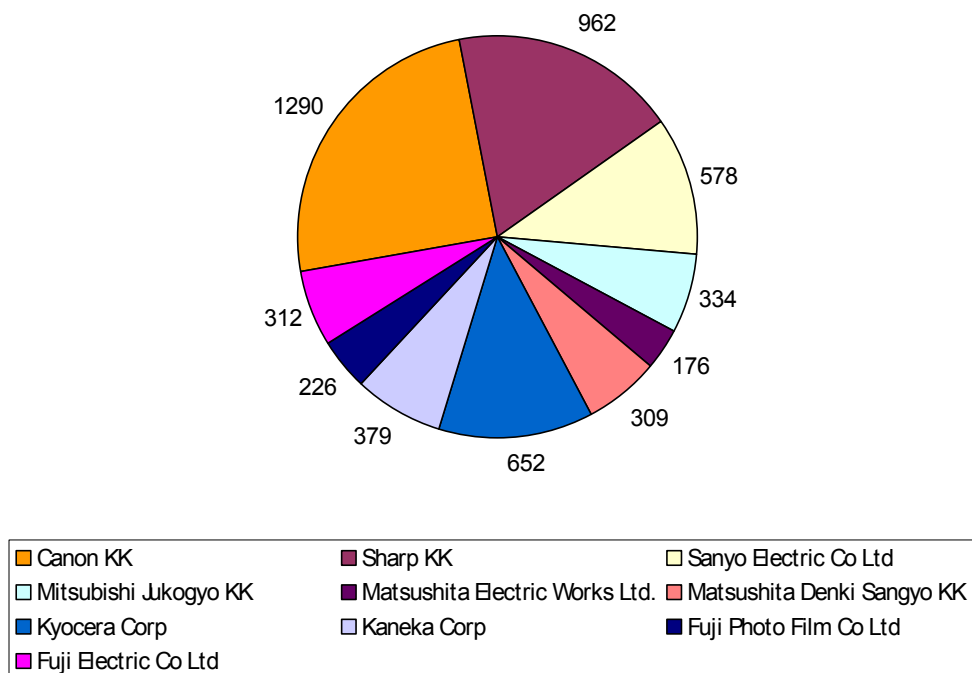


Abbildung 4: Die zehn größten Anmelder von Photovoltaikpatenten (Kämper 2006: 25)

Weniger eindeutig ist die Patentsituation bei den neuen Photovoltaiktechnologien, wie z.B. den verschiedenen Dünnschichttechnologien sowie den organischen Solarzellen und Farbstoffsolarzellen. Nach Kämper (2006: 38) besitzt Deutschland mit seinen Forschungsorganisationen, wie z.B. der Fraunhofer Gesellschaft und dem Unternehmen Covion Organic Semiconductors GmbH eindeutige Stärken im Bereich von Dünnschichttechnologien sowie organischen Solarzellen, ohne dass diese genauer erläutert werden.

Auch hinsichtlich der Technologieführer wurde vom ColorSol Projektkonsortium eine eigene Patentanalyse durchgeführt. Diese ergab, dass zu den international aktivsten Unternehmen im Bereich der Farbstoffsolarzelle Konarka, Samsung, Dyesol, Fujikura Ltd. und Sony zählen. In der Forschung und Entwicklung von Farbstoff-Solarzellen sind Japan und die USA aber auch Süd-Korea, Deutschland und die Schweiz führend. Darüber hinaus gibt es auch Aktivitäten in Frankreich und der Türkei.

3.3.2 Forschungsdynamik

In Kap. 2 wurden bereits die nationalen Rahmenbedingungen für die Förderung der Photovoltaik in zentralen Ländern und Regionen vorgestellt. Auf die wirtschaftliche Wachstumsprognose wird dagegen in Kap. 4.2 eingegangen. Für die Bewertung der weltweiten Innovationsdynamik der Photovoltaik ist darüber hinaus die Forschungsdy-

namik, d.h. die in der Photovoltaik investierten F+E Mittel und ihr Verwendungszweck von Interesse, da sie Rückschlüsse über die zukünftige technologische und wirtschaftliche Stärke eines Landes oder einer Region zulassen.

Einen umfassenden Überblick zu den öffentlichen Ausgaben für Forschung, Demonstrationsvorhaben und Marktentwicklung in der Photovoltaik aus dem Jahr 2002 stammt von der Europäischen Kommission (siehe Tabelle 9). Aktuellere Erhebungen sind seitdem von EU nicht veröffentlicht worden. In der Tendenz werden sie jedoch durch aktuelle Daten bestätigt (siehe Kap. 2).

Mio. US \$	F + E	Demonstrationsprojekte	Marktentwicklung	Summe
Japan	59	36	185	280
Europa	58	11	62	131
USA	35	0	80	115
Rest	20	9	13	42
Summe	172	56	340	568

Tabelle 9: Öffentliche Ausgaben für Photovoltaikforschung und Marktentwicklung in US \$ im Jahr 2002 (EC 2005: 17)

Die Zahlen unterstreichen die starke Position Japan, Europas und der USA und zeigen, dass Japan mit weitem Abstand das größte Budget in Forschung und Marktentwicklung investiert. Die gute Positionierung der japanischen Forschung und Wirtschaft in der Photovoltaik kann als direktes Resultat dieser Konzentration gesehen werden. Sie hat zu einer weitestgehend selbst tragenden Photovoltaikindustrie im Land geführt und die japanische Regierung dazu veranlasst, die aktuelle Förderung tendenziell zu senken (siehe Kap. 2.1.5).

Europas Position hat sich seit der Erhebung wenig verändert. Eine stark unterstützende Funktion übernehmen jedoch die Einspeiseregulungen verschiedener europäischer Länder, die sich maßgeblich auf die Stärkung des europäischen und deutschen Photovoltaikmarktes auswirken (siehe auch Kap. 2.1).

Die relativ hohen Aufwendungen der USA für die Marktentwicklung setzen sich aus einer Vielzahl von Einzelprogrammen auf Bundesstaatenebene zusammen, die nicht weiter differenziert werden. Die durch die US-amerikanische Bundesregierung zur Ver-

fügung gestellten F+E Mittel rangieren im Mittelfeld und sind seit der Erhebung im Jahr 2002 tendenziell eher zurückgegangen (siehe Kap. 2.2).

Die Erhebung lässt keine Aussagen zu den Forschungsausgaben der chinesischen Regierung zu. Aktuelle Zahlen belegen jedoch, dass auch in China mit hohen staatlichen Investitionen zur Förderung erneuerbarer Energien und der Photovoltaik zu rechnen ist. Im Rahmen des so genannten „Brightestess Programms“ sollen bis zum Jahr 2010 bis 3,5 Mrd. Euro in den Ausbau erneuerbarer Energien investiert werden (siehe Kap. 2.1.6).

Zu den größten deutschen Forschungsorganisationen und Akteuren zählen: das Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR), das Forschungszentrum Jülich (FZJ), das Fraunhofer Institut für solare Energiesysteme (ISE) in Freiburg, das Hahn-Meitner-Institut (HMI) Berlin, die Helmholtz Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren, das Institut für Solarenergieforschung (ISFH) in Hameln/Emmerthal, das Institut für Solare Energieversorgungstechnik (ISET) in Kassel sowie das Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW) in Stuttgart.

Weitere wichtige Forschungsinstitutionen finden sich in den europäischen Nachbarländern Italien, Spanien, Frankreich, den Niederlanden, etc. Darüber hinaus gibt es eine ausdifferenzierte Forschungslandschaft in Japan und den USA.

4 Entwicklung des Photovoltaikmarktes

4.1 Anteil der Photovoltaik an der Energieerzeugung

Regenerative Energien tragen in Deutschland mittlerweile zu einem nennenswerten Anteil der Energieerzeugung bei. Ihr Anteil am Endenergieverbrauch wird für das Jahr 2006 mit 7,4 % angegeben, der Anteil am Stromverbrauch beträgt mittlerweile 11,8 %. Das Bundesumweltministerium beziffert die aktuelle CO₂- Minderung durch erneuerbare Energien auf rund 97 Mio. t (BMU 2007: 3). Für das Jahr 2007 wird der Anteil des aus erneuerbaren Energien erzeugten Stroms voraussichtlich auf über 12,5 % steigen. Dabei soll der Preis je erzeugter Kilowattstunde von rund 55 Cent im Jahr 2006 auf schätzungsweise 45 Cent sinken¹⁹.

Der Anteil des durch Photovoltaik erzeugten Stroms an der gesamten Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien lag im Jahr 2006 mit 2 TWh bei ca. 1%. Neben der Wind-

¹⁹ Für aktuelle Daten siehe BMU (2007) und <http://www.unendlich-viel-energie.de/> bzw. <http://www.bee-ev.de/> (letzter Abruf April 2007).

energie weist die Photovoltaik jedoch mit einer Wachstumsrate von über 50 % das prozentual stärkste Wachstum unter den erneuerbaren Energien auf (BMU 2007: 5).

Insgesamt ist das deutliche Wachstum der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Deutschland (siehe Abbildung 5) auf das Erneuerbaren-Energien-Gesetzes (EEG) und seinen Vorläufer das Stromeinspeisegesetz zurückzuführen (Nitsch 2007: 11).

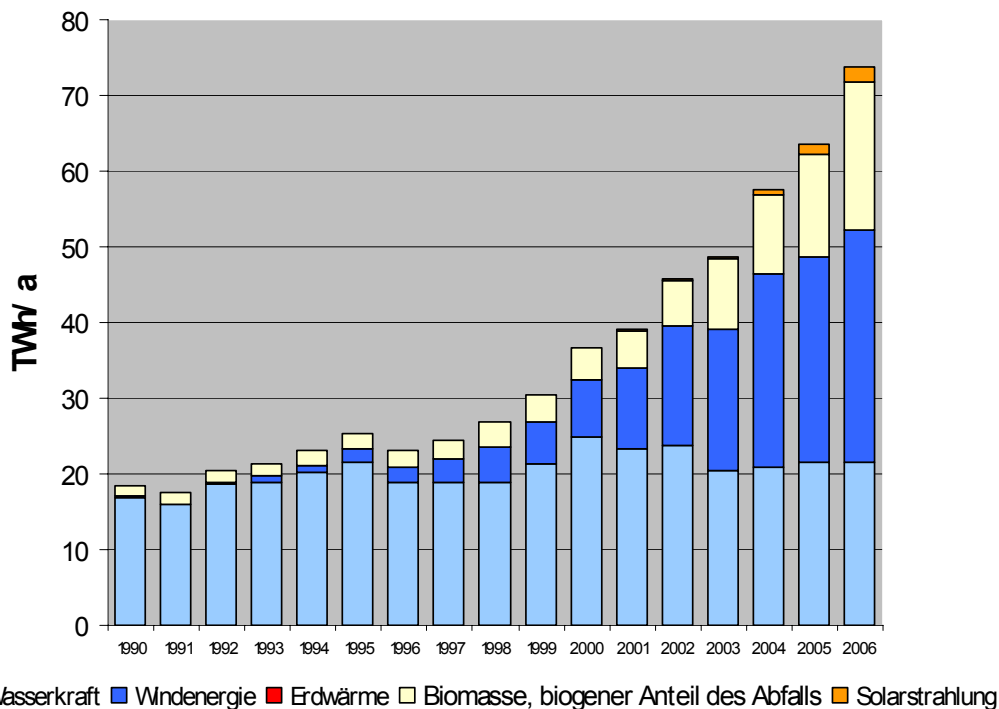


Abbildung 5: Anteile der Stromerzeugung durch erneuerbare Energien in Deutschland (nach Nitsch 2007: 10)

Die durch das EEG garantierte Einspeisevergütung für den Strom aus Photovoltaikanlagen hat Deutschland weltweit zu dem Land mit der höchsten installierten Photovoltaikleistung gemacht. Da weitere europäische Staaten (z.B. Italien, Spanien und Griechenland) nach dem Vorbild des EEG nationale Gesetze zur Einspeisevergütung von Strom aus regenerativen Energiequellen verabschiedet haben (siehe Kap. 2.1.2), wird in diesen Ländern in den kommenden Jahren ebenfalls ein deutlicher Anstieg des durch Photovoltaik gewonnenen Stroms erwartet (Bernreuter 2006b: 66 ff). Die wichtigen globalen Wachstumsregionen und Marktanteile der Photovoltaik werden im folgenden Kapitel vorgestellt.

4.2 Zentrale Wachstumsregionen des Photovoltaikmarktes: Perspektive 2020

Aus den vorangegangenen Abschnitten wurde bereits deutlich, dass der Photovoltaikmarkt eine hohe Wachstumsdynamik besitzt. Auf unterschiedlichen nationalen Märkten wurden in den letzten Jahren Wachstumsraten zwischen 15 und 60 % erzielt (Fawer 2006). Über drei Viertel der weltweit installierten Photovoltaikleistung finden sich allein in den Staaten Deutschland, Japan und den USA. Sie stellen die aktuell wichtigsten Märkte für die Photovoltaikindustrie dar (siehe Abbildung 6).

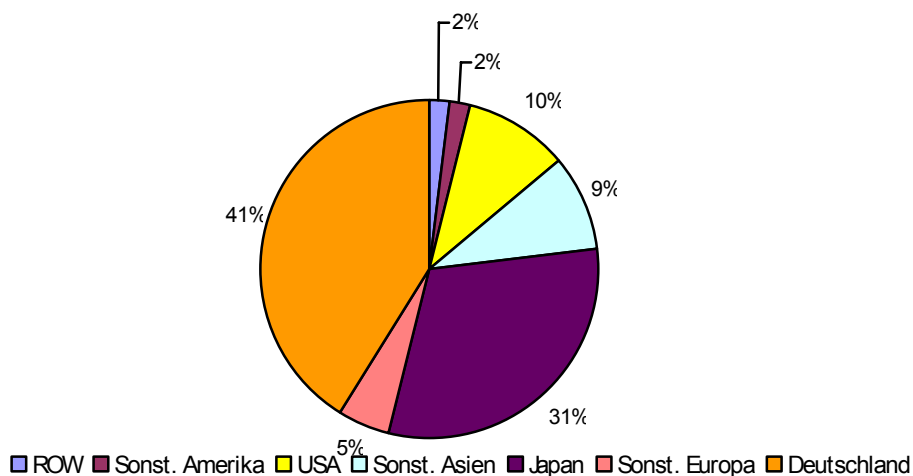


Abbildung 6: Marktanteile der Photovoltaik in zentralen Wachstumsregionen (nach LBBW 2005: 7)

Im Folgenden werden die zentralen Wachstumsregionen des Photovoltaikmarktes mit einer Perspektive bis zum Jahr 2020 erläutert. Dafür werden die Rahmenbedingungen der Photovoltaikindustrie in der jeweiligen Region aufgegriffen (siehe Kap. 2) und für die Abschätzung der weiteren Marktentwicklung Roadmapinitiativen der einzelnen Staaten sowie der EU ausgewertet.

4.2.1 Deutschland

Deutschland ist aktuell die wichtigste Wachstumsregion für den weltweiten Photovoltaikmarkt. Die stabile und ökonomisch attraktive Einspeisevergütung, die durch das EEG garantiert wird, hat zu einem starken Marktwachstum geführt (siehe Kap. 2.1.1). Aufgrund erwarteter Kostensenkungen in der Produktion von Photovoltaikmodulen wird auch für die kommenden Jahre ein deutliches Marktwachstum erwartet (Frede 2006: 50). In Deutschland wird im Zeitraum 2004 bis 2010 mit einem durchschnittlichen jähr-

lichen Wachstum der Neuinstallation von Photovoltaikanlagen von 40 % ausgegangen (Auer 2005: 7).

Laut einer Leitstudie des Bundesumweltministeriums, die die Ausbaustrategie Deutschlands für erneuerbare Energien in Szenarien²⁰ mit den Zeithorizonten 2020, 2030 und 2050 bewertet, wird von einer deutlichen Zunahme des Anteils erneuerbaren Energien an der Gesamtenergieerzeugung ausgegangen. Auch für die Photovoltaik werden steigende Anteile erwartet, wobei sich die jährlichen Ausbaumengen gegenüber dem aktuellen Stand abschwächen werden (siehe Abbildung 7). Für das Jahr 2020 wird von einer kumulierten photovoltaischen Gesamtleistung von 10 GW ausgegangen (Nitsch 2007: 32). Der Anteil der Photovoltaik an der Gesamtstromerzeugung würde damit 1,56 % betragen.

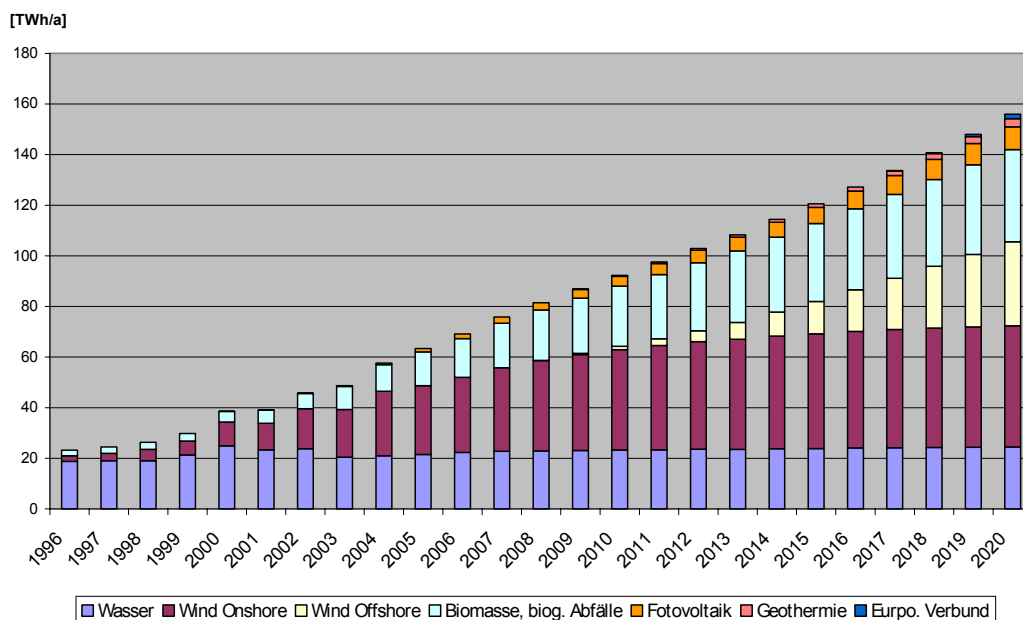


Abbildung 7: Entwicklung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien bis 2020 (Nitsch 2007: 31)

Auch Fawer (2006: 21 f) hält ein stetiges Wachstum des deutschen PV-Marktes bis 2020 für realistisch, verweist aber auf die Abschwächung der inländischen Nachfrage zugunsten schnell wachsender Märkte in Südeuropa (Italien, Spanien, Portugal, etc.) und Asien (China, Indien, Südkorea, etc.). Deutschlands Weltmarktanteil wird dadurch von 55 % im Jahr 2005 auf ca. 22 % im Jahr 2010 zurückgehen.

²⁰ Zu den Eckdaten und Annahmen der Szenarienerstellung (z.B. demografische und ökonomische Kenndaten, Einspeisevergütung) siehe Nitsch (2007: 15 ff).

Der Auf- und Ausbau des inländischen PV-Marktes wird damit zu einem zentralen Schritt für die Positionierung deutscher PV-Unternehmen auf dem Weg zum Exporteur von PV-Technologie in potenzielle Zukunftsmärkte (Nitsch 2007: 32).

4.2.2 Sonstiges Europa

Für die Europäische Union liegt ein Vorschlag einer „Vision for Photovoltaic Technology“ vor, die einen Ausbau der europäischen PV-Kapazität bezogen auf die alten EU15 Staaten von 3 GW bis zum Jahr 2010 für realistisch hält (siehe EC 2005). Diese Abschätzungen beruhen auf dem im Jahr 1997 veröffentlichten Weißbuch der EU über erneuerbare Energien. Bis zum Jahr 2030 werden Gesamtkapazitäten von bis 200 GW für möglich gehalten (EC 2005: 27). Für das Jahr 2020 liegen keine expliziten Schätzungen vor.

Die vielversprechendsten europäischen Märkte werden in der Übereinstimmung mehrerer Studien und Experten (siehe z.B. Fawer 2006, LBBW 2005, Auer 2005) in den sonnerreichen südeuropäischen Ländern Italien, Spanien, Portugal, Griechenland, etc. gesehen. Abhängig von der jeweiligen nationalen Fördersituationen (siehe Kap. 2.1.2) können sich in diesen Ländern aufgrund der höheren solaren Einstrahlung PV-Anlagen rascher amortisieren als in Deutschland.

4.2.3 USA

In den USA existiert bisher kein nationaler Förderplan für die Photovoltaik (siehe Kap. 2.2). Von der US-amerikanischen Photovoltaikindustrie ist im Jahr 2004 eine Roadmap mit eigenen Zielen der Technologie- und Marktentwicklung bis zum Jahr 2025 veröffentlicht worden (US PV 2004). Diese Roadmap setzt einen Ausbau der nationalen PV-Kapazität von ca. 0,4 GW im Jahr 2004 auf 200 GW im Jahr 2030 zum Ziel (US PV 2004: 6). Eine aktuellere Studie der American Solar Energy Society (ASES) aus dem Jahr 2007 hält eine Kapazität von bis zu 275 GW bis zum Jahr 2030 für möglich, was 10 % des Gesamtstromverbrauchs der USA entsprechen würde (ASES 2007: 21).

Auer (2005: 7) hält in den USA eine durchschnittliche jährliche Wachstumsrate der Neuinstallationen von ca. 30 % bis 2010 für realistisch, verweist aber auch auf die starke Abhängigkeit dieser Zielgrößen von den zukünftigen Förderbedingungen einzelner Bundesstaaten. Palz (2005: 5) verweist auf eine Besonderheit der amerikanischen Stromverbrauchsmuster hin, die einen Vergleich US-amerikanischer PV-Szenarien mit denen anderer Staaten erschweren. Aufgrund der großen Anzahl klimatisierter Gebäude hat die USA einen hohen Sommerstromverbrauch, der parallel mit der solaren

Energieproduktion verläuft und sich daher auch gut über Photovoltaik decken lässt. In der EU ist dagegen der Stromverbrauch in den Wintermonaten im Schnitt 20 % höher als in den Sommermonaten, so dass der höhere Stromverbrauch antizyklisch zu der solaren Produktion verläuft.

4.2.4 Japan

Wie bereits in Kap. 2.1.2 erläutert besitzt Japan eine lange Fördergeschichte der Photovoltaikforschung und eine leistungsfähige Photovoltaikindustrie. Die japanische „New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO)“ hat im Jahr 2004 eine eigene Roadmap zur Photovoltaik veröffentlicht, die Auskunft über die Entwicklungsziele verschiedener PV-Technologien gibt (NEDO 2004).

NEDO hält bis zum Jahr 2030 eine kumulierte PV-Gesamtleistung von bis 100 GW in Japan für realistisch. Diese installierte Leistung könnte 10 % des gesamten japanischen Elektrizitätsbedarfs bzw. 50 % des Stromverbrauchs der Haushalte decken (NEDO 2004: 1). Für das Jahr 2020 liegen keine expliziten Schätzungen vor.

Auer (2005: 7) hält in Japan für den Zeitraum 2004 bis 2010 eine durchschnittliche jährliche Rate von Neuinstallation von 25 % für möglich. Nach seiner Auffassung werden die hohen japanischen Strompreise und das Ziel einer größeren Energieautarkie des Landes weiterhin zu einem massiven Ausbau der Photovoltaik in Japan beitragen. Fawer (2006: 22) hält dagegen auch für Japan einen Rückgang des Weltmarktanteils von 23 % auf 13 % im Jahr 2010 zugunsten anderer asiatischer Wachstumsregionen wie China, Indien, Südkorea, Taiwan und Thailand für möglich.

4.2.5 Sonstiges Asien

Für die bereits erwähnte Wachstumsregion der Staaten China, Indien, Südkorea, Taiwan und Thailand liegen nur teilweise Abschätzungen von Marktszenarien vor.

China verfügte im Jahr 2005 über eine kumulierte PV-Gesamtleistung von 70 MW_P. Die chinesische Regierung hat den Ausbau erneuerbarer Energien für die eigene Energieversorgung zu einem wichtigen politischen Ziel erklärt (siehe auch Kap. 2.2). Im Rahmen des so genannten Brightness-Programms sollen bis zum Jahr 2015 5 - 6 Mrd. Euro in die Förderung regenerativer Energien und die Energieversorgung von rund 23 Mio. Menschen in netzfernen Gebieten investiert werden. Im Rahmen des 11. Fünfjahres-Plan (2006 - 2010) wurde zudem beschlossen, die installierte photovoltaische Gesamtleistung auf 320 MW_P bis zum Jahr 2010 auszubauen. Diese soll sich in einen großen Anteil netzferner PV-Anlagen zur Versorgung von Haushalten in entlegenen Regionen (250 MW_P), auf netzgekoppelte Anlagen (50 MW_P) und auf Demonstrations-

projekte in Form von Kraftwerken (20 MW_P) aufteilen. Angesichts eines geschätzten jährlichen Zubauvolumens von rd. 5 MW_P in China lassen die Expansionspläne der chinesischen PV-Industrie künftig weiterhin eine starke Exportorientierung erwarten. Derzeit werden ca. 97 % der chinesischen PV-Module nach Deutschland, Italien und Spanien exportiert (alle Angaben siehe Haugwitz 2007).

Südkorea: Südkorea gilt aufgrund seines großen Energiebedarfs und der Importabhängigkeit von Energieträgern als ein wichtiger Zukunftsmarkt für die Photovoltaikindustrie. Die koreanische Regierung hat sich zum Ziel gesetzt, den Anteil erneuerbarer Energien an der bis zum Jahr 2011 von 2,2 auf 5 % des Gesamtenergieverbrauchs zu steigern²¹.

Indien verfügte im Jahr 2005 über eine installierte photovoltaische Gesamtleistung von rund 90 MW_P. Die gesamte solare Energieerzeugung inklusive Solarthermie soll nach einem Regierungsziel bis 2012 auf 280 MW_P kumulierter Leistung ausgebaut werden (Fawer 2006: 20).

4.3 Marktanteile einzelner Technologien und ausgewählter Anwendungsfelder (Perspektive 2020)

4.3.1 Marktanteile verschiedener Photovoltaiktechnologien

Der Photovoltaikmarkt wird bisher stark von mono- bzw. polykristallinen Siliziumzellen dominiert. Aufgrund der technologischen Erfahrungen, der relativ hohen Wirkungsgrade sowie etablierter Fertigungsstrukturen haben die auf Siliziumwafern basierenden Zellen bis heute einen Marktanteil von über 90 %.

In den letzten Jahren haben sich jedoch neben den klassischen Siliziumzellen eine Reihe neuer Dünnschichttechnologien (siehe Kap. 3.1.2) am Markt etablieren können. Sie machen inzwischen rund 6,5 % des gesamten Photovoltaikmarktes aus. Gründe für den Erfolg dieser neuen Technologien sind die verhältnismäßig günstigen Produktionskosten bei vergleichsweise guten Wirkungsgraden (siehe auch Kap. 3.1.7). Insbesondere der beständig hohe Preis für Rohsilizium und Wafer hat in den letzten Jahren die Nachfrage nach Dünnschichtmodulen ansteigen lassen. Abbildung 8 gibt einen Überblick über die Aufteilung des Photovoltaikmarktes in klassische Silizium- und neue Dünnschichttechnologien.

²¹ Siehe http://www.keei.re.kr/web_keei/en_news.nsf/BymainV/4EE20B40529A6CC949257156003A3E3D?OpenDocument (letzter Abruf April 2007)

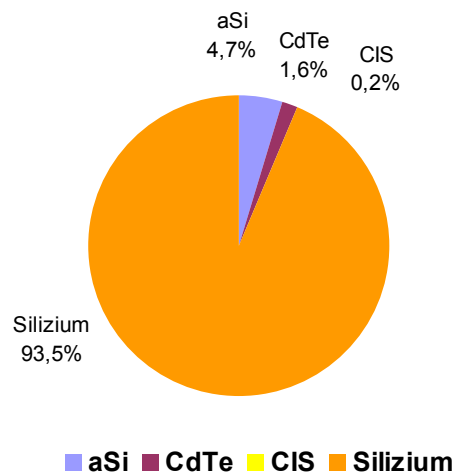


Abbildung 8: Anteile verschiedener Photovoltaiktechnologien am weltweiten Gesamtmarkt (eigene Darstellung nach Daten von Fawer 2006: 15)

Interessant ist der Einsatz von Dünnschichttechnologien aber nicht nur aufgrund seiner wirtschaftlichen und technischen Parameter (Wirkungsgrad, günstiges Leistungsverhalten bei hohen Temperaturen, etc.) sondern auch aus gestalterischer Sicht. Neue Farben sowie opake und semitransparente Oberflächen machen Dünnschichttechnologien attraktiv für den Einsatz in Architektur und Gebäudeintegration (siehe auch Kap. 3.2.2).

Die Europäischen Photovoltaikvereinigung (EPIA) prognostiziert, dass der Anteil der Dünnschichttechnologien bis 2010 auf 20 % der gesamten PV-Modulproduktion steigen wird (Fawer 2006: 16). Diese Prognose ist jedoch stark von der weiteren Entwicklung des Siliziummarktes und den Marktentwicklungen bei den Ausgangsmaterialien der jeweiligen Dünnschichttechnologie abhängig. Auch hier könnten sich in der Zukunft steigend Ressourcenpreise und Nutzungskonkurrenzen um die benötigten seltenen Metalle negativ auf den Preis auswirken (siehe Kap. 5.1.2).

Ähnliche, langfristige Wachstumspotenziale sieht auch Hoffmann (2004a: 14) in Dünnschichttechnologien und neuen Ansätzen. Nach seiner Auffassung können diese Technologien im Jahr 2030 den Marktanteil konventioneller, kristalliner Siliziumzellen deutlich übersteigen (siehe Abbildung 9).

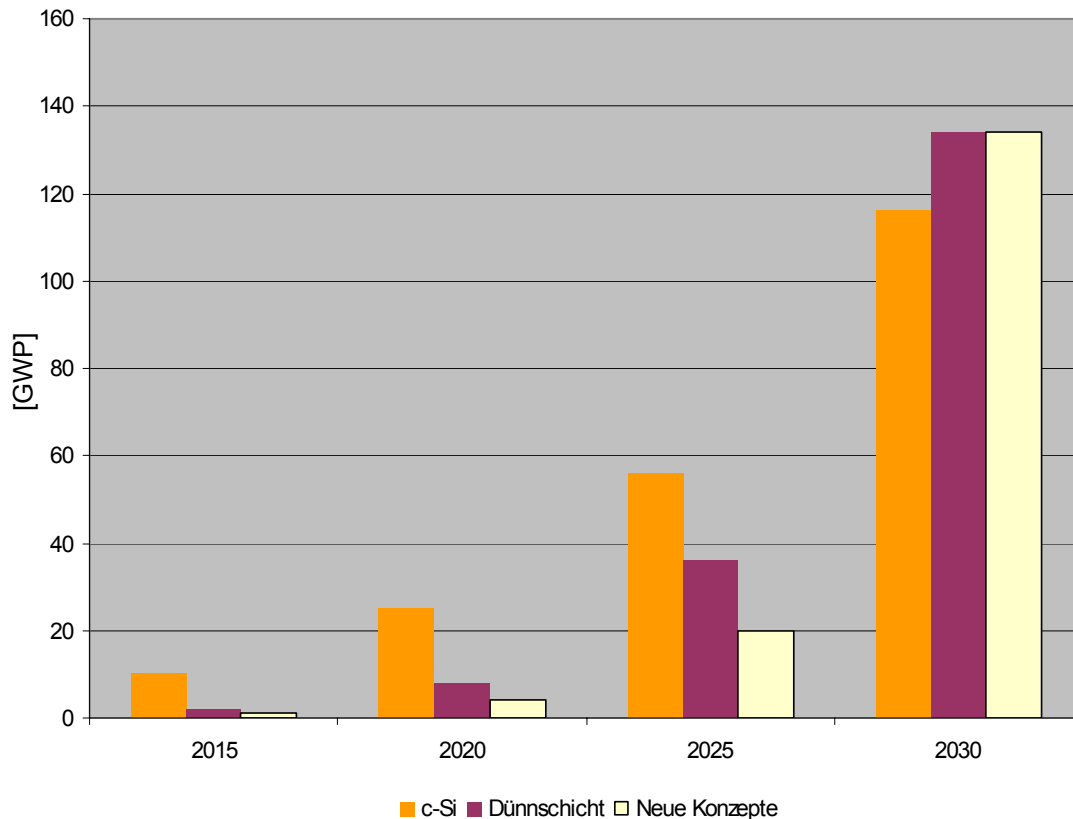


Abbildung 9: Prognose zukünftiger Produktionskapazitäten unterschiedlicher PV-Technologien (eigene Darstellung nach Daten von Hoffmann 2004a: 14)

4.3.2 Marktanteile potenzieller Anwendungsfelder von Dünnschicht und Farbstoffsolarzellen, Marktpotenzial für gebäudeintegrierte Photovoltaik

Für die Abschätzung zukünftiger Marktanteile der Photovoltaik ist insbesondere auch die Abschätzung des Potenzials in ausgewählten Anwendungsfeldern von besonderem Interesse. Da im Vorhaben ColorSol die spezifischen Anwendungsmöglichkeiten der Farbstoffsolarzelle im Mittelpunkt stehen, wird im Folgenden das Feld der gebäudeintegrierten Photovoltaik (siehe Kap. 3.2.2) genauer analysiert, da Dünnschicht- und Farbstoffsolarzellen aufgrund ihrer technischen und physikalischen Eigenschaften (Farbigkeit, Semitransparenz, günstiges Leistungsverhalten bei hohen Temperaturen, etc.) für diesen Einsatz prädestiniert sind.

Basis der folgenden Abschätzungen sind Daten, die die Internationale Energie Agentur (IEA), die im Jahr 2002 in einer Studie mit dem Titel „Potential for Building Integrated

Photovoltaics“ (IEA 2002) veröffentlicht hat. Aktuellere Zahlen sind derzeit nicht vorhanden.

Im Rahmen dieser Studie wurde das Potenzial der für Photovoltaik sinnvoll nutzbaren Gebäudefläche in 14 ausgewählten Mitgliedsländern der IEA (USA, Kanada, Japan, Deutschland, Spanien, Großbritannien, etc.) erhoben, die insgesamt über 90 % des Photovoltaikweltmarktanteils vereinen. Berücksichtigt wurde dabei zum einen der solar sinnvoll nutzbare Anteil der Gebäudeaußenhülle (d.h. die Fläche, die einen solaren Energieertrag von jeweils 80 % der maximalen solaren Einstrahlung am jeweiligen Standort aufweist) und zum anderen architektonisch geeignete Flächen (betrifft ca. 60 % bei Dächern und 20 % bei Fassaden).

Das Flächenpotenzial für gebäudeintegrierte Photovoltaik beträgt demnach in den 14 ausgewählten Staaten rund 23.270 km². Mit dieser Fläche könnten bis zu 30 % des Strombedarfs dieser Länder gedeckt werden.

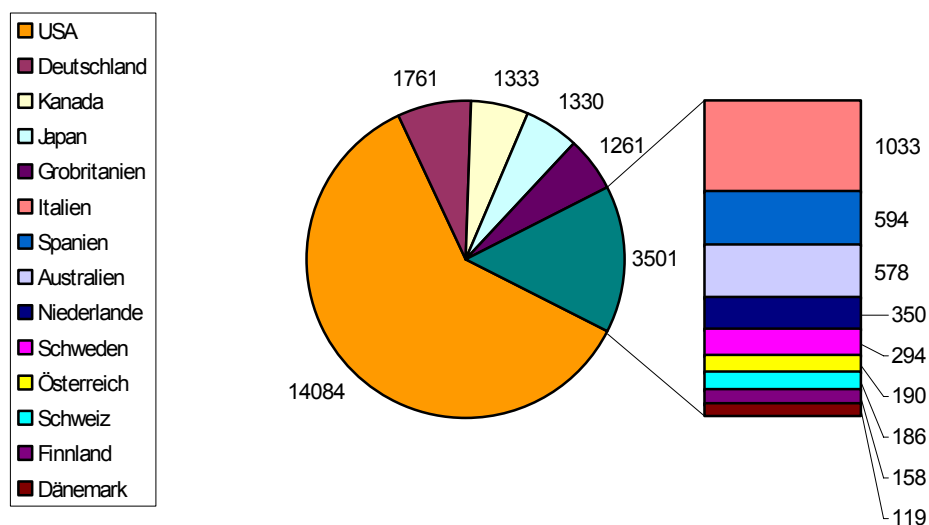


Abbildung 10: Potenzial für gebäudeintegrierte Photovoltaik, Flächenverteilung nach Ländern in km² (eigene Darstellung nach Daten von IEA 2002)

Um das zukünftigen Marktpotenzials von Farbstoffsolarzellen abzuschätzen, wurde ihr Anteil an der gesamten gebäudeintegrierten Photovoltaik mit 0,1 % im Jahr 2010 und 0,2 % im Jahr 2020 angenommen. Daraus ergibt sich für die 14 ausgewählten Länder im Jahr 2010 eine potenzielle Gesamtfläche für den Einsatz von Farbstoffsolarzellen von bis zu 50.000 m² und für Deutschland eine Fläche von bis zu 3.700 m². Dies ent-

spricht ca. 30 Gebäuden mit einer photovoltaisch nutzbaren Fläche von jeweils 125 m². Geht man von einer Modulgröße von 60 × 100 cm und einem Modulpreis von 250 Euro pro Modul aus, so ergibt sich für den weltweiten Markt in den ausgewählten Ländern ein Volumen von ca. 84.000 Modulen mit einem Marktvolumen von rund 21 Mio. Euro.

4.4 Zwischenfazit

Nationale und internationale Szenarien prognostizieren einen deutlichen Anstieg der installierten Photovoltaikkapazitäten bis zum Jahr 2020 bzw. 2030. Deutliche Unterschiede bestehen jedoch hinsichtlich des Charakters und der Funktion der jeweiligen Wachstumsregionen und nationalen Märkte.

Japan und Deutschland blicken beispielsweise auf eine lange, kontinuierliche Förderung der Photovoltaik zurück, die aktuell für starke Absatzmärkte sorgen und wie im Falle Japans auch zu einem selbst tragenden Markt führen. Die Solarunternehmen dieser beiden Länder konnten, auch dank dieser Förderpolitik, ihre gute Markt- und Technologieführerposition weiter ausbauen.

In der Zukunft (Perspektive 2020) werden die größten Wachstumsmärkte für Photovoltaik verstärkt in sonnenreichen Regionen (z.B. Südeuropa, Afrika, Asien) und Ländern mit hohem Elektrifizierungsbedarf (z.B. China) liegen. Wichtigste Voraussetzung hierfür ist die Senkung der Herstellungskosten bzw. die Entwicklung neuer kostengünstiger PV-Technologien, wie dies z.B. einige Dünnschichttechnologien und auch neue Verfahren der Gewinnung von Silizium in Aussicht stellen. Hohe Preise für Rohsilizium und seltene Metalle werden in den kommenden Jahren den Kosten- und Entwicklungsdruck sowohl für die klassische Siliziumtechnologie wie auch für Dünnschichttechnologien aufrechterhalten.

In den USA, Japan und Nordeuropa spielen vor allem die steigenden Strompreise und die Entwicklung neuer multifunktionaler Photovoltaikmaterialien eine größere Rolle für den Ausbau der Photovoltaik. Insbesondere in den hoch industrialisierten Ländern stehen mit Gebäuden und Bauwerken vielfältige Flächen zur Verfügung, die für die photovoltaische Erzeugung von Strom genutzt werden können. Die ermittelten Potenziale für die Gebäudeintegration zeigen, dass sich auch in aktuellen Marktnischen der Photovoltaik durch den Einsatz neuer Technologien erhebliche Potenziale realisieren lassen.

5 Wertschöpfungsketten und Akteure der Photovoltaikwirtschaft

5.1 Wertschöpfungskette der Photovoltaikwirtschaft

5.1.1 Wertschöpfungskette von Siliziumzellen

Wichtigstes Ausgangsmaterial für die Produktion von Siliziumzellen ist das Reinsilizium, das zu Wafern bzw. Ingots weiterverarbeitet wird. Reinsilizium und Wafer werden in ähnlichen Qualitätsgraden sowohl für die Solarzellen- als auch für die Chipproduktion in der Computerindustrie benötigt. Weltweit gab es bisher nur wenige Hersteller, wie z.B. die Unternehmen Asemi (REC), Hemlock, Tokuyama und Wacker, die den Bedarf an Reinsilizium und Wafern entsprechender Qualität decken können. Die Angebotssituation entspricht daher den Marktstrukturen eines Oligopols (siehe LBBW 2005: 17).

Die begrenzt verfügbaren Mengen an Reinsilizium wurden in den vergangenen Jahren wiederholt für die steigenden Preise von Solarzellen und Produktionsengpässe in der Photovoltaikindustrie verantwortliche gemacht (vgl. z.B. Stryi-Hipp und Bernreuter 2006a). Von dieser Entwicklung weitaus weniger stark betroffen war die Chipindustrie, da sie über langfristige Lieferverträge mit den Herstellern von Reinsilizium verfügt.

Für die Gewinnung des Reinsiliziums kommen mehrere chemisch-physikalische Verfahren, wie z.B. die Aufbereitung im Wirbelschichtreaktor zum Einsatz (siehe auch Tabelle 10).

Unternehmen	Ausgangsstoff	Verfahren	Aktuelle Projektphase	Jahreskapazität [t]
REC Silicon	Silan	Wirbelschichtreaktor	Pilotanlage	200 t
Joint Solar Silicon	Silan	Zersetzung in Rohrreaktor	Pilotanlage	100 t
Wacker Polysilicon	Trichlorsilan	Wirbelschichtreaktor	2 Pilotreaktoren	2 x 50 t
Hemlock Semicon.	Trichlorsilan	Wirbelschichtreaktor	Pilotanlage	30 t
Tokuyama	Trichlorsilan	Vapor to Liquid Deposition	halbkommerzielle Anlage	200 t
Chisso	Siliziumtetrachlorid	Reduktion mit Zinkdampf	Labor, Pilotphase	k.A.
Arise Technologies	Trichlorsilan	geheim	Labor	k.A.
Centesil	metallurg. Silizium	ähnlich wie Siemens	Planung	-
JFE Steel	metallurg. Silizium	metallurgische Reinigung	Kommerzielle Anlage	100 t
Elkem Solar	metallurg. Silizium	Schlacken/Säure/Raffinierung	Pilotanlage	100 - 250 t
Apollon Solar, PEM/ Ferroatlantica	metallurg. Silizium	Reinigung durch Plasma	Pilotanlage	200 t
Scheuten Solar	metallurg. Silizium	direkte Aufbereitung	Pilotanlage	100 t
Dow Corning	metallurg. Silizium	Reinigung	k.A.	k.A.

GT Equipment	metallurg. Silizium	Aufbereitung der Schmelze	Labor	k.A.
Solsilc Development	Quarz und Kohlenstoff	Lichtbogenofen und geheim	Pilotphase	50 t
Girasolar	k.A.	Elektrolyse	Labor, Pilotphase	k.A.

Tabelle 10: Alternative Herstellungsverfahren für Rein- bzw. Polysilizium (nach Bernreuter 2006a)

Um die bestehenden Engpässe im Siliziummarkt zu umgehen werden derzeit verschieden alternative Produktionsverfahren erprobt, die darauf abzielen die Kosten für das Rein- bzw. Polysilizium durch die kostengünstigere Reinigung von metallurgischem Silizium zu senken. Eine Reihe von Unternehmen, darunter auch Photovoltaikfirmen, haben angekündigt eigene Produktionskapazitäten für die Herstellung von solarem Silizium auf Basis des metallurgischen Rohstoffes schaffen zu wollen (siehe Tabelle 11).

Produzent	Produktionsbeginn	Kapazität [t]
Elkem Pilotproduktion	2005	50
Dow Corning	2006	1.000
Apollon/ Ferroatlantica	2006	200
Solarvalue	März 2007	880
JFE	2007	50
Elkem	Mitte 2008	5.000
Scheuten/ Solarworld	2009	1.000

Tabelle 11: Kapazitäten für Solarsilizium aus gereinigtem metallurgischem Silizium (nach Daten von Kreuzmann 2007: 34)

Aus dem Reinsilizium werden je nach Endprodukt (mono- oder polykristalline Zellen) Wafer aus Ingots oder Siliziumblöcken hergestellt (siehe Kap. 3.1.1). Durch die Herstellung immer dünnerer Wafer mit größerer Fläche konnte in den letzten Jahren die Materialeffizienz für die Herstellung von Solarzellen deutlich gesteigert werden (Siemer

2007: 57 f). Die Verarbeitung des Reinsiliziums zu Wafern nimmt daher eine Schlüsselposition bei der Herstellung von Solarzellen ein und hat erheblichen Einfluss auf die Preisbildung und Leistung der Solarzellen.

In weiteren Fertigungsschritten erfolgt die Weiterverarbeitung der Wafer zu PV-Zellen und Solarmodulen, die dann je nach Größe und Anwendungsfeld durch unterschiedliche Systemdienstleister zu vollständigen Anlagen montiert werden.

Die wichtigsten Wertschöpfungsstufen mit den jeweiligen Unternehmen sowie Marktstruktur sind in Abbildung 11 aufgelistet.

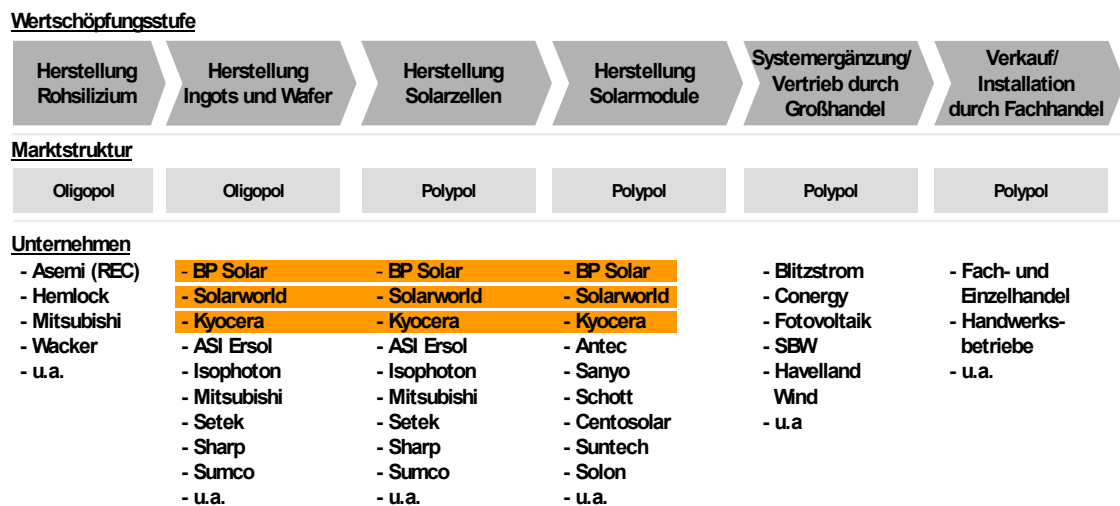


Abbildung 11: Wertschöpfungskette und Marktstrukturen für siliziumbasierte Photovoltaik (eigene Darstellung in Anlehnung an LBBW 2005: 17)

Aufgrund des starken Wachstums, der zunehmenden Konkurrenz und den Engpässen befindet sich der Markt der siliziumbasierten Photovoltaik derzeit in einem starken Umbruch, folgende Entwicklungen verdeutlichen diesen Eindruck:

- Integration entlang der Wertschöpfungskette:** Innerhalb der PV-Industrie gibt es, bedingt durch das starke Wachstum größerer Unternehmen und die Konsolidierung innerhalb der Branche eine Tendenz zur Integration (Frede 2006: 49). Die Fertigungsschritte der Zell- und Modulherstellung werden von größeren Solarunternehmen bereits innerhalb eines Unternehmens realisiert (siehe z.B. die Unternehmen BP Solar, Solarworld und Kyocera in Abbildung 11). Mittlerweile haben auch erste Zell- und Modulhersteller angekündigt, trotz hoher Investitionskosten selber in die Produktion von Polysilizium einsteigen zu wollen (Bernreuter 2006a).

- **Ausbau der Produktionskapazitäten für Reinsilizium:** Generell steht ein deutlicher Ausbau der Produktionskapazitäten für Reinsilizium bevor. Für die Jahre 2007 und 2008 wird, basierend auf Aussagen von Herstellern, mit deutlich gesteigerten Produktionskapazitäten gerechnet. In Verbindung mit den bereits beschriebenen Effizienzsteigerungen in der Produktion von Solarzellen, wird sich der Markt für Reinsilizium daher in den nächsten Jahren deutlich entspannen (siehe Bernreuter 2006a und Kreutzmann 2007).
- **Konkurrenz und Preisdruck durch neue PV-Technologien:** Neben den klassischen siliziumbasierten PV-Zellen ist inzwischen eine Reihe von Dünnschichttechnologien in der Erprobung bzw. im Einsatz (siehe auch Kap 3.1.2), die aufgrund ihrer Unabhängigkeit vom Rohsilizium und guter Effizienzgrade zu alternativen Technologien herangewachsen sind. Erste Produktionsstätten für Dünnschichtsolarzellen beginnen im Jahr 2007 mit einer Serienproduktion (siehe auch Kap. 5.1.2 und Siemer 2007: 85).

Zu den größten Produzenten von klassischen siliziumbasierten PV-Modulen zählten im Jahr 2006 in absteigender Reihenfolge: Sharp, Q-Cells, Kyocera, Sanyo, Mitsubishi Electric, Schott Solar, BP Solar, Suntech, Motech und Shell Solar (siehe Fawer 2006: 10). Damit führt Japan gefolgt von Deutschland die Liste der großen Solarzellenhersteller an. Neben diesem aktuellen Blick ist für die längerfristige Bewertung der Solarwirtschaft jedoch auch die strategische Positionierung der Unternehmen von Bedeutung. Sie wird in Kap. 5.2.1 behandelt.

5.1.2 Wertschöpfungskette von Dünnschichtzellen

In Kap. 3.1.2 wurde ein Überblick über verschiedene Technologien für Dünnschichtzellen gegeben. Diese teilen sich auf in Technologien, die auf dünnen amorphen Siliziumschichten oder auf dünnen Schichten anderer Halbleitermaterialien wie z.B. Cadmiumtellurid (CdTe), Kupfer-Indium-Diselenid (CIS), etc. bestehen. Ein großer Vorteil der Dünnschichttechnologie gegenüber den klassischen Siliziumzellen wird in der effizienten und automatisierten Fertigung der Dünnschichtmodule, bei verhältnismäßig guten Wirkungsgraden gesehen. Bei der Produktion von Dünnschichtmodulen können je nach Technologie z.B. die Fertigungsschritte der Beschichtung, Kontaktierung und Versiegelung in integrierten Durchlaufverfahren zusammengefasst werden (siehe Abbildung 12). Durch diese Integration und den im Vergleich zur klassischen Siliziumtechnik höheren Automatisierungsgrad können geringere Fertigungskosten erreicht werden (Dimmler 2002: 208). Für die weiteren Verarbeitungsstufen gelten vergleichbare Schritte wie für die Fertigung von Siliziumzellen.

Die Wertschöpfungskette für Dünnschichttechnologien ist u.a. von dem verwendeten Halbleitermaterial abhängig. Wird amorphes Silizium verwendet, so handelt es sich bei den Zulieferern weitestgehend um die aus der klassischen PV-Technologie bekannten Hersteller (siehe auch vorangegangenes Kapitel). Wird ein neues Halbleitermaterial verwendet, so kommen verschiedene Unternehmen in Fragen, die seltene Metalle bzw. mineralische Rohstoffe anbieten.

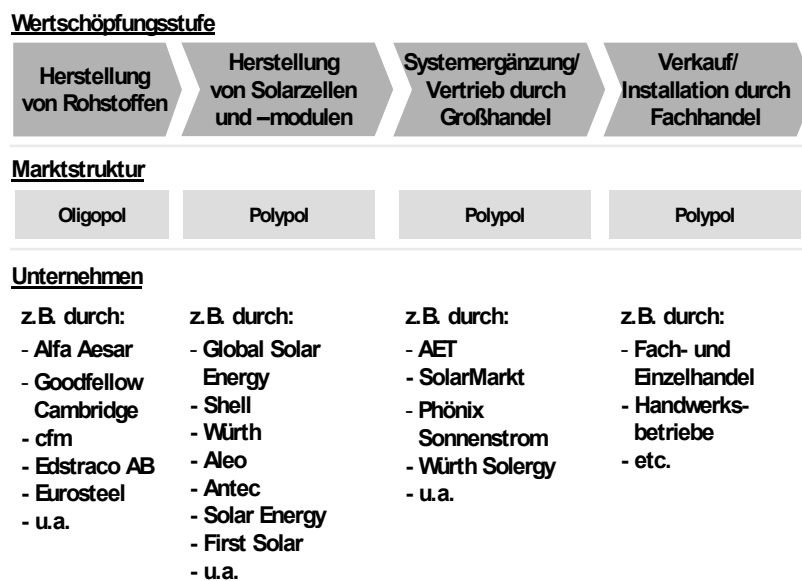


Abbildung 12: Wertschöpfungskette und Marktstrukturen für Dünnschichttechnologien (eigene Darstellung)

Abbildung 12 zeigt, dass die Wertschöpfungskette für Dünnschichtmodule gegenüber der klassischen PV-Technologie deutlich kürzer ausfällt. Aufgrund einer Vielzahl neuer Halbleitermaterialien und neuer Herstellungsverfahren (siehe auch Kap. 3.1.2) gibt es bisher noch wenige Informationen über die Zuliefererstrukturen der einzelnen Produktionsansätze von Dünnschichtzellen.

Da viele diese Technologie vom Einsatz seltener Metalle (Tellur, Indium, Gallium, etc.) abhängt, bleibt abzuwarten, wie sich die benötigten Mengen, die Verfügbarkeit und Preise dieser Rohstoffe entwickeln. Viele dieser Elemente werden auf dem Weltmarkt nur in geringen Mengen gehandelt und sind z.T. erheblichen Preissteigerungen bzw. Preisschwankungen unterworfen (siehe auch Kap. 3.1.2 bzw. Fawer 2006: 16 und Behrendt et al. 2007).

Einen weiteren wesentlichen Einfluss auf die Marktentwicklung von Dünnschichtmodulen werden auch die realisierbaren Wirkungsgrade der Dünnschichttechnologie und der Preis pro W_p haben.

Derzeit noch nicht vollständig absehbar sind die Wertschöpfungsketten neuer organischer Technologien, wie z.B. von organischen Solarzellen oder Farbstoffsolarzellen. Hier bilden sich inzwischen erste mögliche Produktionsverbände heraus, die in Kap. 5.2.2. dargestellt werden.

5.2 Zentrale Akteure der Photovoltaikwirtschaft und deren Positionierung

5.2.1 Positionierung von Unternehmen klassischer Photovoltaiktechnologie

In Kap. 3.3.1 wurde die Innovationsdynamik der Photovoltaikforschung und –industrie in erster Linie anhand der Patententwicklung diskutiert. Patente geben jedoch nur einen stark technisch geprägten Ausschnitt aus der Innovationsdynamik wieder. Für die Bewertung der Photovoltaikwirtschaft und ihrer Akteure sind über die Patente und das technische Wissen hinaus, auch Fragen der Rohstoffsicherung, die kritische Größe eines Unternehmens und der Kundenbasis auf wichtigen Märkten entscheidend. Sie tragen in Summe zu der strategischen Positionierung eines Unternehmens in der Photovoltaikindustrie bei und sind aussagekräftiger als die Patentsituation allein.

Fawer (2006: 24 ff) bewertete daher die strategische Positionierung von 16 börsennotierten Photovoltaikunternehmen im Jahr 2006 anhand der genannten Kriterien auf einer Skala von maximal 40 erreichbaren Punkten. Dieser Vergleich kommt zu einem anderen Ergebnis als die reine Patenauswertung. Demnach belegen die deutschen Unternehmen Solarworld und Q-Cells die ersten beiden Plätze, was vor allem auf die Kriterien technisches Wissen, Rohstoffsicherung und Internationalität zurückgeführt wird (siehe Abbildung 13). Japanische Unternehmen schneiden nach dieser Betrachtung schlechter ab.

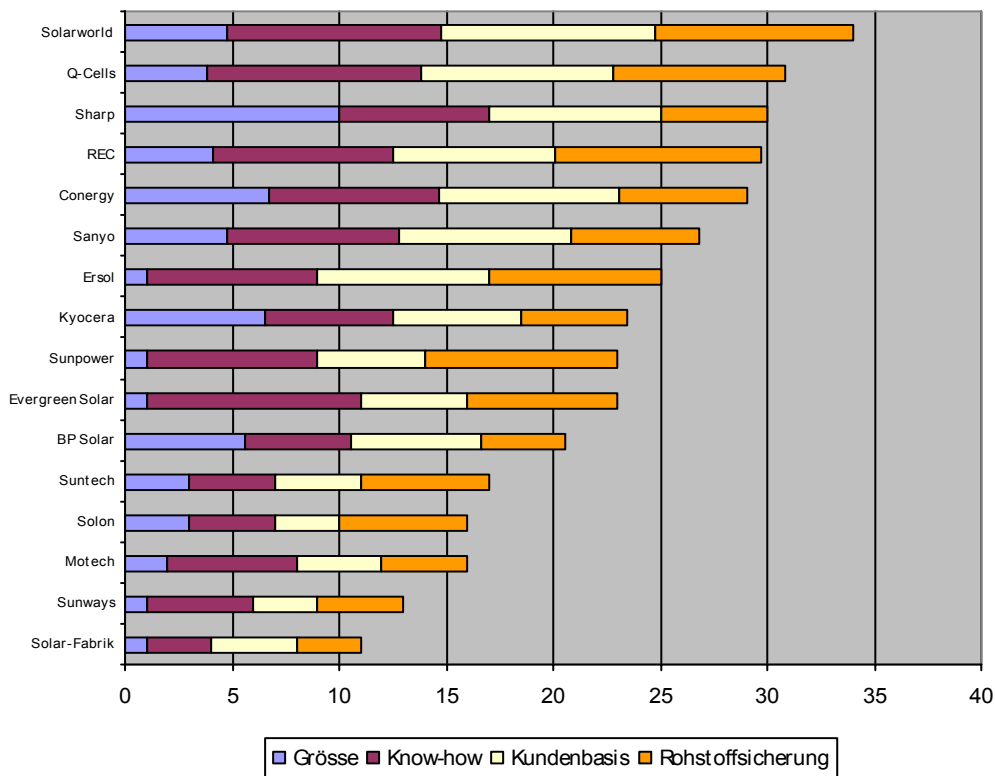


Abbildung 13: Bewertung der strategischen Positionierung von Photovoltaikunternehmen (Fawer 2006: 26)

Schwer zu bewerten ist derzeit die Position chinesischer PV-Unternehmen. Fawer (2006: 21) nennt insbesondere die Firmen Suntech Power, LDK Solar HiTech, Yingli Solar, Trina Solar Energy und Linyang Solarfun als wichtige Akteure. Von Seiten der chinesischen Regierung wird ein massiver Ausbau der PV-Industrie unterstützt, um die bisherige Importabhängigkeit von Silizium, Wafern und Zellen zu verringern. Laut Haugwitz (2007) gibt es Expansionspläne von einem halben Dutzend nicht benannter chinesischer Hersteller, die bis zum Jahr 2010 zwischen 500-1000 MW Produktionskapazitäten schaffen wollen.

Fawer (2006: 27) erwartet insgesamt in den kommenden Jahren einen starken Konsolidierungsprozess in der Photovoltaikindustrie, da nach seiner Einschätzung der Wettbewerbsdruck entlang der gesamten Wertschöpfungskette (siehe auch Kap. 5.1) zunehmen wird und die Systemkosten für die Produktion von PV-Zellen und Modulen deutlich sinken müssen. Vor diesem Hintergrund könnten preisgünstige Solarmodule z.B. aus chinesischer Produktion eine große Konkurrenz für heimische Produzenten darstellen.

5.2.2 Positionierung von Unternehmen aus den Dünnschicht-technologie und neuer technologischer Ansätze

Auf dem Markt sind seit einigen Jahren erste Dünnschichtsolarmodule erhältlich. Viele Hersteller haben jedoch ihren Produktionsbeginn mehrfach verschieben müssen (siehe z.B. Iken 2007: 98 f) und befinden sich derzeit im Übergang von der Pilot- zur Serienproduktion. Eine umfassende Bewertung der Positionierung von Unternehmen im Bereich der Dünnschichttechnologien ist deshalb zum aktuellen Zeitpunkt schwer möglich.

Die Daten der der folgenden Übersicht stammen aus unterschiedlichen Marktübersichten und Quellen (Iken 2007: 108, Siemer 2007: 56 f und Fawer 2006: 16) und stellen z.T. Abschätzungen der Hersteller dar. Insbesondere die geplanten Produktionskapazitäten für das Jahr 2007 können noch nicht verlässlich beurteilt werden.

Technik	Unternehmen	Wirkungsgrad	Kapazität (MW _p) 2006	Kapazität (MW _p) 2007
aSi	EPV (USA)		10	
	ErSol Thin Films (DE)	10,0%	0	40
	Kaneka (JP)	6,3%	20	40
	Mitsubishi Heavy Industries (JP)	11,5%	10	40
	Schott Solar (DE)	5,3%	3	30
	Shenzen Topray (CN)		10	15
	United Solar Systems (USA)	6,1 - 6,4%	25	50
aSi/μSi-Tandem	Sharp (JP)	8,1 – 8,5%	15	
CdTe	Antec (DE)	4,2 – 4,8%	10	25
	Arendi (IT)		0	15
	Calyxo (DE)		0	
	First Solar (USA/DE)	8,3 – 9,7%	20	100
	CIGS	Ascent Solar (USA)		
	DayStarTechnologies (USA)	10%		20
	Honda (JP)			27
	Nanosolar (USA)	10,0% (geschätzt)		?
CIGS_{Se}	Johanna Solar (DE)	16,0% (geschätzt)		30
CIS	Axitec (DE)	5,1 – 6,7%		
	Odersun (DE)	10,0%		4,5

	Scheuten Solar (NL)		10	
	Shell Solar (USA)		3	
	Shell Solar/Saint-Gobain (GB/FR)	13,5 (geschätzt)		20
	Sulfurcell (DE)	6,1 – 7,3%		50
	Würth Solar (DE)	11,0%	2	15
CSG	CSG Solar (DE)			25
?	Arise Technologies (CA/DE)			80
	Total		138	628

Tabelle 12: Hersteller von Dünnschichtsolarzellen und ihre geplanten Produktionskapazitäten (Darstellung nach Daten von Iken 2007: 108, Siemer 2007: 56 f und Fawer 2006: 16)

Fawer (2006: 15) nennt unterschiedliche Strategien der Unternehmen für einen Einstieg in die Dünnschichttechnologie. Zum einen handelt es sich bei den Akteuren um Tochterunternehmen klassischer Solarunternehmen, die motiviert durch die dauerhaft hohen Siliziumpreise in den Dünnschichttechnologien eine Absicherung ihrer Technologiekompetenz sehen. Zum anderen gibt es auch eine Reihe von Unternehmen, die mit eigenen technologischen Ansätzen Marktsegmente erschließen wollen.

Große zusätzliche Marktpotenziale werden auch durch die Realisierung von polymerbasierten PV-Zellen erwartet. Die dadurch erwartete massenhafte Produktion kostengünstiger z.T. auch kurzlebiger Solarzellen könnte neue Anwendungsgebiete im Bereich von Konsumerprodukten und der netzunabhängigen Stromversorgung erschließen. Zuletzt haben z.B. die Unternehmen G24 Innovations und Novaled/ Heliatek (siehe nachfolgendes Kapitel und in Photon 2/2007: 55) durch entsprechende Meldungen auf sich aufmerksam gemacht. Obwohl auf unterschiedlichen technischen Konzepten basierend, nähren Meldungen über einfache „roll-to-roll“ Produktionsverfahren regelmäßig die Hoffnung nach einfachen, kostengünstigen PV-Elementen.

5.2.3 Positionierung von Akteuren im Umfeld der Farbstoffsolarzelle

Neben den bereits am Markt erhältlichen Dünnschichttechnologien gibt es mit der Farbstoffsolarzelle und der organischen Solarzelle Ansätze, die sich im Übergang von der Forschung zur Pilotproduktion und Markterschließung befinden. In den folgenden Abschnitten sollen zentrale Akteure und Produktionsansätze vorgestellt werden, die parallele oder konkurrierende Ansätze zu dem Vorhaben ColorSol verfolgen.

- **Ecole Polytechnique Fédéral de Lausanne:** Prof. Michael Grätzel ist Leiter des "Laboratory of Photonics and Interfaces" an der Ecole Polytechnique Fédéral de Lausanne (EPFL). Er entdeckte und patentierte Ende der 80er bis Anfang der 90er Jahre die grundlegenden Prinzipien und Effekte der Farbstoffsolarzelle. Er bzw. die EPFL halten bis heute die Rechte an diesen Patenten. Prof. Grätzel ist ein zentraler wissenschaftlicher Akteur auf dem Gebiet der Farbstoffsolarzelle und über Mitgliedschaften in wissenschaftlichen Beratergremien mit vielen nachstehend genannten Unternehmen verbunden.

- **Dyesol:** Das australische Unternehmen Dyesol mit Sitz in Queanbeyan in der Nähe von Canberra entwickelt, produziert und vermarktet nach eigenen Angaben Produktionsmitteln und Materialien für Farbstoffsolarzellen. Seit 2005 ist Dyesol an der australischen Börse registriert. Vorsitzender des „Scientific Board“ von Dyesol ist Prof. Grätzel. Das Unternehmen hat sich zum Ziel gesetzt, Ausrüster und Anbieter von Produktionsanlagen und Komponenten für die Herstellung von Farbstoffsolarzellen zu werden. Dyesol vertreibt bereits Materialien und Testanlagen zur Herstellung von Farbstoffsolarzellen.

Im Jahr 2006 hat Dyesol die Anteile des australischen Unternehmens Sustainable Technologies International Ltd. (STI) übernommen, das weltweiter Lizenzinhaber der für Farbstoffzellen relevanten Patente der Ecole EPFL ist. STI hat sich auf die Forschung und Entwicklung polymerbasierter Farbstoffsolarzellen konzentriert und soll unter anderem flexible Solarzellen für das australische Militär entwickeln. Außerdem hält Dyesol seit 2006 99 % der Anteile des Schweizer Unternehmens Greatcell Solar S.A., das ebenfalls in der Forschung an Farbstoffsolarzellen und deren Fertigungsverfahren tätig ist und in dessen wissenschaftlichem Beirat Prof. Grätzel vertreten ist.

Anfang 2007 gab Dyesol bekannt, einen Vertrag mit dem britischen Unternehmen G24 Innovations (siehe unten) über die Lieferung von Farbstoffen zur Produktion von Farbstoffsolarzellen geschlossen zu haben. Diese Entwicklung ist für das Vorhaben ColorSol von großer Relevanz, da hiermit zum ersten Mal ein professioneller, kommerzieller Anbieter auf dem Markt erscheint, der Rutheni-

umfarbstoff in größeren Mengen anbietet.

Durch die Übernahme der genannten Unternehmen ist Dyesol zu einem wichtigen Akteur für die Herstellung von Ausgangsmaterialien und Produktionsanlagen für die Herstellung von Farbstoffsolarzellen geworden.

Dyesol verfügt dabei sowohl über Kompetenzen für die Herstellung glas- wie auch folienbasierter polymerbasierter Farbstoffsolarzellen. Als Versiegelungstechniken werden derzeit ausschließlich Polymerversiegelungen angeboten.

- **Solarcoating Machinery:** Als weiterer wichtiger Zulieferer für die Produktionstechnik Farbstoffsolarzellen auf Foliensubstraten scheint sich das Unternehmen Solarcoating Machinery zu etablieren. Ursprünglich im Bereich der Laminierungstechnik für die Dünnschichttechnologien CIS und CIGS tätig, hat Solarcoating auch die Fertigungstechnik für G24 Innovations (siehe nächster Abschnitt) entwickelt.
- **G24 Innovations:** Das britische Unternehmen G24 Innovations Ltd. mit Sitz in Wentloog, Cardiff hat sich zum Ziel gesetzt erster kommerzieller Anbieter von im „roll-to-roll“ Verfahren hergestellten flexiblen Farbstoffsolarzellen auf Folienbasis zu werden. Die Zellen sollen insbesondere für die Anwendung in Mobiltelefonen, Notebooks, LED-Lampen, Sensoren sowie Zeltkonstruktionen geeignet sein. Das Unternehmen nutzt für seine geplanten Produkte eine weltweit gültige Lizenz der EPFL-Patente von Prof. Grätzel, der auch Mitglied des „Advisory Boards“ von G24 Innovations ist. Ursprünglich waren von G24 Innovations für das Frühjahr 2007 die ersten kommerziellen Produkte angekündigt worden. Dieser Zeitplan scheint sich zu verzögern. Genauere Informationen sind derzeit nicht erhältlich.
Wichtige Anteilseigner von G24 Innovations sind der US-amerikanische und britische Investor Renewable Capital, das Unternehmen Konarka (siehe nächster Abschnitt) sowie die EPFL.
- **Konarka:** Konarka mit Sitz in Massachusetts ist ein aus einer Forschergruppe der US-Armee und der University of Massachusetts, Lowell hervorgegangenes Unternehmen, das u.a. an der Entwicklung des „roll to roll“ Prozesses für polymerbasierter Photovoltaik forscht. Konarka hat vor einigen Jahren die „Siemens Polymer Solar Cell Technology Division“ übernommen und gelangte dadurch in den Besitz von Patente der polymerbasierten Photovoltaik. Ein wesentliches Ergebnis der Forschungsarbeiten Konarka's der letzten 5 Jahre ist die Anpassung der Farbstoffsolarzellentechnologie auf ein folienbasiertes „Roll-to-roll“-Verfahren. Konarka hält ebenfalls eine Lizenz der EPFL- Patente und Prof. Grätzel ist Mitglied des „Scientific Advisory Boards“ des Unternehmens. Konar-

ka ist auch Entwickler des bei G24 Innovations eingesetzten Verfahrens und ist derzeit an der Entwicklung weiterer folienbasierter Produktionsverfahren für die organische Photovoltaik (nicht Farbstoffsolarzelle) beteiligt.

- **Japanische Unternehmen:** Japan stellt einen zentralen Schwerpunkt in der Forschung um Farbstoffsolarzellen mit wichtiger fachlicher und wissenschaftlicher Expertise dar. Zu den in der Forschung aktiven Unternehmen zählen Sharp, Fujikura, Toyota und Toshiba. Toyota hat zusammen mit dem Zulieferer Aisin Seiki an Farbstoffsolarzellen geforscht. Erste Ergebnisse dieser Kooperation sind als Prototypen z.B. im Toyota Dream House zum Einsatz gekommen, in dem eine Vielzahl von Smart-Home-Technologien angewendet wurden. Insbesondere Toyota betreibt eine Testanlage mit Farbstoffsolarzellen in Japan und besitzt erste Erfahrungen mit der Langzeitstabilität und der Leistungsfähigkeit der Zellen unter realen Einsatzbedingungen (siehe hierzu auch Toyoda et al. 2004). Das Unternehmen Sharp, das auf einem schwarzen Farbstoff basierende Zellen herstellt, möchte jedoch nach Informationen der Autoren erst dann unternehmerisch aktiv werden, wenn sich der Wirkungsgrad der Farbstoffsolarzellen deutlich verbessert hat. Zu den aktiven japanischen Forschungsinstitutionen auf diesem Gebiet zählen z.B. die Universität von Osaka und das National Institute of Materials and Chemical Research in Tsukuba. Eine genauere Analyse der japanischen Forschungs- und Unternehmensakteure soll in der zweiten Jahreshälfte 2007 durch das Projektkonsortium erfolgen.

Ein detaillierte Analyse der Wettbewerber und Akteure aus dem Umfeld der Farbstoffsolarzelle wird im Rahmen von Fallanalysen im Projekt ColorSol vorgenommen.

5.2.4 Investitionen in PV-Unternehmen

Die Wertpapiere börsennotierter Photovoltaikunternehmen haben in den vergangenen Jahren, trotz mehrfacher Gewinnwarnungen deutliche Kurssteigerungen verzeichnet. Die wichtigsten internationalen Titel werden im Photovoltaik-Index PPVX zusammengefasst. Insbesondere in den Jahren 2004 und 2005 wurden extreme Steigerungsraten von bis zu 150 Prozentpunkten verzeichnet. Nach einem starken Börseneinbruch im Mai 2006 haben sich nach Aussagen von Fawer (2006: 11) nicht alle Titel gleichermaßen gut erholt. Bei der aktuellen Bewertung von Photovoltaikunternehmen spielen daher die Geschäftsmodelle sowie die in Kap. 5.2.1 genannten Bewertungskriterien eine stärkere Rolle. Insbesondere die Integration entlang der Wertschöpfungskette (siehe auch Kap. 5.1) sowie die Absicherung durch langfristige Lieferverträgen für Silizium und Wafer spielen bei der Bewertung der siliziumbasierten Photovoltaik eine wichtige Rolle (Bernreuter 2006a).

Neue photovoltaische Dünnschichttechnologien (siehe auch Kap. 3.1) gelten als ein Ausweg aus den aktuellen Lieferengpässen für Silizium. Mittelfristig bieten diese Technologien daher auch Chancen für neue und kleinere Unternehmen, die sich aufgrund ihrer Position in dem hart umkämpften Siliziummarkt kaum etablieren können. Fawer (2006: 15) bestätigt diese Entwicklung. In den Jahren 2005 und 2006 wurden rund 500 Mio. Euro von privaten Geldgebern in Dünnschichttechnologien investiert. Dünnschichtzellen trugen damit im Jahr 2005 mit 6,5 % zum weltweiten PV-Markt bei. Für die Jahre 2007 und 2008 wird eine zusätzliche starke Zunahme dieses Anteils erwartet, da viele neue Produktionsanlagen für Dünnschichtmodule (z.B. Würth Solar, Johanna/Aleo Solar) ab 2007 mit der Fertigung beginnen (Siemer 2007: 85). Auch das junge Unternehmen G24 Innovations bestätigt diese Tendenz durch die Einwerbung von Kapital privater Investoren in mehrstelliger Millionenhöhe.

5.3 Zwischenfazit

Die Photovoltaikwirtschaft zeigt eine zunehmende Ausdifferenzierung in Technologielinien und Marktsegmente. Da die Marktexpansion der klassischen Siliziumtechnik derzeit in erster Linie durch die am Markt verfügbaren Mengen an Reinsilizium begrenzt wird, haben sich eine Reihe von Dünnschichttechnologien etablieren können, die mit günstigem Leistungs- und Preisverhältnis sowie spezifischen Eigenschaften aufwarten und erfolgreich kleinere Marktsegmente wie z.B. in der Gebäudeintegration erobern.

Neue Solarzellentechnologien und Anwendungen auf Basis von Farbstoffsolarzellen oder organischen Solarzellen müssen gegen dieses bestehende Angebot konkurrieren. Insbesondere im Bereich der Farbstoffsolarzellen haben sich in den letzten Jahren mit der EPFL und den Unternehmen Dyesol, Konarka und G24 Innovations ein stabiles und leistungsfähiges Netzwerk gebildet. Im Falle des von G24 Innovations angestrebten Marktes der netzunabhängigen Stromversorgung für Mobiltelefone, Notebooks, LED-Lampen, etc. bilden diese noch keine direkte Konkurrenz zu den in ColorSol verfolgten Projektzielen.

Anders verhält es sich mit den derzeit angebotenen Dünnschichtmodulen. Hier muss eine zukünftige gebäudeintegrierte Anwendung von Farbstoffsolarzellen sowohl gegen technologische (Farbe, Transparenz, Strukturierung, etc.) als auch betriebswirtschaftliche Anforderungen (kostengünstige Fertigungsverfahren, etablierte industrielle Strukturen, etc.) der Dünnschichttechnologie bestehen. Die muss bei der weiteren Entwicklung und Definition von Szenarien für gebäudeintegrierte Farbstoffsolarzellenanwendungen berücksichtigt werden.

6 Schlussfolgerungen für den Einsatz und das Marktpotenzial von Farbstoffsolarzellen (Perspektive 2020)

Der Photovoltaikmarkt entwickelt sich weltweit mit großen Zuwachsraten. In dem sich ausdifferenzierenden Markt konkurriert mittlerweile eine Vielzahl von Technologien miteinander, die auf jeweils spezifische Anwendungsfelder wie z.B. den Einsatz in Kraftwerken, Gebäuden oder auch in der netzunabhängigen Stromversorgung angepasst sind. Neben dem Wirkungsgrad spielen dabei auch die Kosten und die Leistung unter realen Einsatzbedingungen eine wichtige Rolle.

Die Marktpotenziale der Photovoltaik und insbesondere der gebäudeintegrierten Photovoltaik verdeutlichen den hohen Bedarf an neuen, konkurrenzfähigen PV-Technologien, die hinsichtlich der Kosten, und der gestalterischen Optionen (Farbe, Transparenz, etc.) in bestehende Bauwerke und Stile integriert werden können. Hierfür bieten neue Dünnschichttechnologien und insbesondere Farbstoffssolarzellen ein großes Potenzial.

Hochwertige Farbstoffssolarzellen für die Anwendung in der Fassade, wie sie im Forschungsvorhaben ColorSol angestrebt werden, zielen damit auf das Marktsegment gebäudeintegrierter, langlebiger Fassadenanwendungen ab. Kurzlebige, folienbasierte Alternativen stellen daher zunächst keine unmittelbare Konkurrenz dar.

Auch bei konservativer Abschätzung des Marktpotenzials könnte mit der erfolgreichen Entwicklung einer Farbstoffssolarzellenanwendung für die Gebäudeintegration ein Marktsegment erschlossen werden, das einen Einstieg in eine Kleinserienproduktion rechtfertigen würde. Dies zeigen die eigenen Abschätzungen.

Für die weitere Entwicklung der Farbstoffssolarzellen ist zum einen die Beobachtung und Bewertung der konkurrierenden Dünnschichttechnologien (insbesondere a-Si und CIS-Technologien) sowie der polymerbasierten organischen PV von großer Bedeutung. Insbesondere die bereits am Markt erhältlichen Dünnschichtmodule stellen das derzeit stärkste und am weitesten entwickelte Konkurrenzprodukt dar, von dem sich die Farbstoffssolarzelle technisch, gestalterisch und preislich differenzieren muss.

Zum anderen liefern die Anforderungen und Entwicklungen aus dem Fassadenbau wichtige Hinweise für die Entwicklung von Farbstoffssolarzellen und deren Integration in Gebäude. Für die Bewertung von Farbstoffssolarzellen ist der Vergleich mit Fassadenmaterialien entscheidend, da in diesem Segment die Zahlungsbereitschaft pro Quadratmeter höher ist, als im Bereich klassischer Photovoltaik. Damit verbunden sind je-

doch auch erhöhte Anforderungen hinsichtlich der Haltbarkeit, der Sicherheit und des Designs der eingesetzten Materialien.

Zur Unterstützung der Entwicklung einer marktnahen Anwendung von Farbstoffsolarzellen in Gebäudefassaden werden aufbauend auf der vorliegenden Analyse der Trends und Rahmenbedingungen für das Innovationssystem Farbstoffsolarzelle die unten genannten Arbeitsschritte verfolgt:

- Detaillierte Analyse des Marktpotenzials gebäude- und fassadenintegrierter Photovoltaikanwendungen;
- Erfassung produktspezifischer Anforderungen an gebäude- und fassadenintegrierte Photovoltaikanwendungen aus Architektur sowie Gebäude- und Fassadenplanung;
- Entwicklung von Szenarien für den Einsatz, die Herstellung und den Vertrieb gebäude- und fassadenintegrierte Farbstoffsolarzellen und deren Vergleich mit konkurrierenden Dünnschichttechnologien und Materialien aus dem Fassadenbau.

7 Quellen

- Auer, J. (2005): Boombranche Solarenergie. Aktuelle Themen, Energie Spezial. Deutsche Bank Research, 21. April 2005, Nr. 320, Frankfurt a.M.
- Behrendt, S.; Scharp, M.; Kahlenborn, W.; Feil, M. Dereje, C.; Bleischwitz, R.; Delzeit, R. (2007): Seltene Metalle, Maßnahmen und Konzepte zur Lösung des Problems konfliktverschärfender Rohstoffausbeutung am Beispiel Coltan. UBA Texte, Forschungsbericht 363 01 124 UBA-FB 000980, Berlin
- Bernreuter, J. (2006a): Durchstarten ab 2008. in: Sonne Wind & Wärme 9/2006, S. 66 – 77
- Bernreuter, J. (2006b): Kritische Masse. in: Sonne Wind & Wärme 3/2006, S. 66 – 74
- BMU - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2001): EU-Richtlinie zur Förderung der Erneuerbaren Energien ist in Kraft getreten. Information des BMU vom Dezember 2001, <http://www.bmu.de/erneuerbare/energien/doc/2725.php> (letzter Abruf April 2007)
- BMU - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2007): Entwicklung der erneuerbaren Energien im Jahr 2006 in Deutschland. Stand: 21. Februar 2007. Aktuelle Daten des Bundesumweltministeriums zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2006 auf der Grundlage der Angaben der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat). Berlin 2007
- Dimmler, B. (2002): CIS- Dünnschichtsolarzellen. in: Rexroth, S.: Gestalten mit Solarzellen. Photovoltaik in der Gebäudehülle. C.F. Müller Verlag, Heidelberg
- EPIA – European Photovoltaic Industry Association (2005): EPIA Roadmap. Brussels, Belgium
- European Commission - EC (2005): A Vision for Photovoltaic Technology. European Commission, Directorate-General for Research, Brüssel 2005
- Fawer, M. (2006): Solarenergie 2006, Licht- und Schattenseite einer boomenden Industrie, Sustainable Investment, Nachhaltigkeitsstudie Bank Sarasin & Cie AG, Dezember 2006, Basel
- Frede, C. (2006): Photovoltaik in Deutschland, Weiteres Wachstum erwartet. in: Venture Capital Magazin, Tech-Guide 2006, S. 48 – 50

- Hagemann, I. B. (2002): Gebäudeintegrierte Photovoltaik. Architektonische Integration der Photovoltaik in die Gebäudehülle. Rudolf Müller Verlag, 2002, Köln
- Haselhuhn, R. (2006): Photovoltaik. Gebäude liefern Strom. 5. vollständig überarbeitete Auflage, BINE Informationspaket, Fachinformationszentrum Karlsruhe
- Haugwitz, F. (2007): Entwicklung, Stand und Perspektiven der Photovoltaik in der VR China, InfoBrief China, Informationen der Deutschen Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit,
http://www.ibchina.de/index.php?option=com_content&task=view&id=29&Itemid=9 (letzter Abruf April 2007)
- Hirshmann, W.P. (2007): Fälschung oder Versuchsballon? Schmutzige Tricks sabotieren die Arbeit and Italiens neuem Einspeisgesetz, in: Photon 2/2007, S. 18
- Hoffmann, W. (2004a): Perspektiven und Aussichten der PV Solarstromindustrie, 5. Nationale Photovoltaiktagung Zürich, ETH Zürich, 25./26. März 2004,
http://www.schott.com/photovoltaic/german/download/whoffmann_5_photovoltaiktagung_zuerich_maerz_2004.pdf?PHPSESSID=91 (letzter Abruf Juli 2007)
- Hoffmann, W. (2004b): PV im Spannungsfeld zwischen Erzeugung und Einspeisung, VWEW Informationstag, 30. November 2004 – Alzenau,
http://www.schott.com/photovoltaic/german/download/whoffmann_vwew_informationstag_nov_2004_alzenau.pdf?PHPSESSID=91 (letzter Abruf Juli 2007)
- hwp/ ISET – hullmann, willkomm & partner/ Institut für Solare Energieversorgungstechnik (2006): Multifunktionale Photovoltaik. Photovoltaik in der Gebäudehülle. Hamburg & Kassel
- IEA – Internationale Energie Agentur (2002): Potential for building integrated photovoltaics, Report IEA PVPS Task 7, NET Ltd., St. Ursen, Schweiz
- Iken, J. (2007): Lücken im Geleitzug, in: Sonne Wind und Wärme 3/2007
- Kämper, U. (2006): Report Innovative Trends in der Photovoltaik. Marktinformationen und Frühindikatoren durch Patent-Portfolio-Analyse. Wissenschaftlicher Informationsdienst WIND GmbH, 2006, Köln
- Klenk, R. (2002): Dünnschichttechnologie. in: Rexroth, S.: Gestalten mit Solarzellen. Photovoltaik in der Gebäudehülle. C.F. Müller Verlag, Heidelberg
- Kreutzmann, A. (2007): Licht am Ende des Tunnels. Das erste direkt gereinigte metallurgische Silizium taucht auf den Markt auf – und weckt Hoffnungen auf ein Ende des Rohstoffmangels, in: Photon 2/2007, S. 33 – 39

- LBBW (2005): Branchenanalyse Photovoltaik 2005. Das industrielle Zeitalter beginnt, Landesbank Baden-Württemberg, Equity Sales, April 2005, Stuttgart
- Lutz, A.; Heubach, D.; Lang-Koetz, C. (2007): Umweltwirkungen der Farbstoffsolarzelle- Analyse des Ruthenium-Vorkommens und Bewertung des Ruthenium-Farbstoffs, ColorSol Arbeitsbericht, Stuttgart
- New Energy and Industrial Technology Development Organization – NEDO (2004): Overview of “PV Roadmap toward 2030”, New Energy Technology Department, NEDO, June 2004, Japan
- Nitsch, J. (2007): Leitstudie 2007, Aktualisierung und Neubewertung der „Ausbaustrategie Erneuerbare Energien“ bis zu den Jahren 2020 und 2030 mit Ausblick bis 2050, Untersuchung im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, in Zusammenarbeit mit der Abteilung Systemanalyse und Technikbewertung des DLR, Februar 2007, Stuttgart
- Ökopol, IE 2004 - Ökopol, Institut für Ökologie und Politik, Institut für Energetik und Umwelt (2004): Stoffbezogene Anforderungen an Photovoltaik-Produkte und deren Entsorgung, Umwelt-Forschungs-Plan, FKZ 202 33 304 Endbericht
- Palz, W. (2005): Die „Roadmap“ für Photovoltaik – ein strategischer Leitfaden. In: Solarzeitalter 3/2005, S. 4 - 10
- Rexroth, S. (2005): Gestaltungspotenzial von Solarpaneelen als neue Bauelemente - Sonderaufgabe Baudenkmal. Dissertation an der Fakultät Gestaltung der Universität der Künste Berlin, August 2005, Berlin
- Siemer, J. (2007): Bessere Karten für die Kunden. Marktübersicht Solarmodule 2007. in: Photon 2/2007, S. 56 – 85
- Stryi-Hipp, G. (ohne Datum): Der Beitrag der Solarenergie: Anwendungen, Potenziale, Ausbauziele, Vortrag des Geschäftsführers des Bundesverbands Solarindustrie
- Toyoda, T.; Sano, T.; Nakajima, J.; Doi, S.; Fukumoto, S.; Ito, A.; Tohyama, T.; Yoshida, M.; Kanagawa, T.; Motohiro, T.; Shiga, T.; Higuchi, K.; Tanaka, H.; Takeda, Y.; Fukano, T.; Katoh, N.; Takeichi, A.; Takechi, K.; Shiozawa, M. (2004): Outdoor performance of large scale DSC modules. Journal of Photochemistry and Photobiology A Chemistry, Volume 164, Issues 1-3, 1 June 2004, S. 203 - 207, Elsevier Publishing