
Photovoltaik– und Solarthermieanlagen

Aufbau, Verwendung, Verwertung und Entsorgung

Bayerisches Landesamt
für Umweltschutz



Augsburg, 2003 – ISBN 3–936385–31–9

Herausgeber: Bayerisches Landesamt für Umweltschutz
Bürgermeister–Ulrich–Straße 160, 86179 Augsburg
Tel.: (0821) 90 71 – 0
Fax: (0821) 90 71 – 55 56
eMail: poststelle@lfu.bayern.de
Internet: <http://www.bayern.de/lfu>

Verfasser: Dipl. –Ing. Birgit Hütter

Stand: Dezember 2002

Zitiervorschlag: Bayer. Landesamt für Umweltschutz (Hrsg.): „Photovoltaik– und Solarthermieranlagen – Aufbau, Verwendung, Verwertung und Entsorgung“, Augsburg, 2003

Das Bayerische Landesamt für Umweltschutz (LfU) gehört zum Geschäftsbereich des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen (StMLU).

© Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, Augsburg, 2003

Gedruckt auf Recyclingpapier

Die Broschüre wurde auch im Internet unter www.bayern.de/LfU/abfall/index.html veröffentlicht.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	4
1.1	Begriffsdefinition	4
1.1.1	Solarthermie – Photovoltaik	4
1.1.2	Verwertung – Recycling	4
2	SOLARTHERMIE	5
2.1	Kollektorbauformen	5
2.2	Wärmeträgermedien	6
2.3	Absorberbeschichtung und Kollektorabdeckungen	6
2.4	Marktentwicklung und Mengen	7
2.4.1	Der Solarthermiemarkt in Deutschland	7
2.4.2	Abfallmengen.....	8
2.5	Möglichkeiten der Verwertung	8
3	PHOTOVOLTAIK	9
3.1	Die monokristalline Solarzelle	9
3.2	Andere Arten von Solarzellen	10
3.2.1	Von der Zelle zum Modul	11
3.2.1.1	Glas–Folien–Lamine	11
3.2.1.2	Glas–Glas–Lamine	12
3.2.1.3	Die elektrische Verbindung	12
3.3	Marktentwicklung und Mengen	13
3.3.1	Der Photovoltaik–Markt in Deutschland	13
3.3.2	Abfallmengen.....	14
3.4	Inhaltsstoffe	15
3.4.1	Silizium	15
3.4.2	Dotierungselemente	16

2	Inhaltsverzeichnis	
3.4.2.1	Bor.....	17
3.4.2.2	Phosphor.....	17
3.4.2.3	Gallium und Arsen.....	18
3.4.2.4	Cadmium–Tellurid und Kupfer–Indium–Diselenid.....	18
4	ÖKOLOGISCHE BETRACHTUNGEN ZUR PHOTOVOLTAIK	20
4.1	Stoffeinträge in die Umwelt	20
4.2	Energieaufwand und Energierückzahlzeit.....	20
4.3	Möglichkeiten der Verwertung	22
4.3.1	Stand der Technik.....	22
4.3.2	Wirtschaftlichkeit	24
4.3.3	Recycling von Solarmodulen und Solarzellen	24
5	AUSBLICK UND EMPFEHLUNGEN.....	26

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Flachkollektor	5
Abb. 2: Vakuum-Röhrenkollektor	6
Abb. 3: Marktentwicklung der Sonnenkollektoren in Deutschland von 1990 – 2001	7
Abb. 4: Aufbau einer kristallinen Solarzelle	9
Abb. 5: Rahmenlose und gerahmte Solarmodule	12
Abb. 6: Entwicklung des deutschen Photovoltaikmarktes von 1990 – 2001	14
Abb. 7: Silizium-Einkristall nach dem Czochralski-Verfahren	16
Abb. 8: Zonenschmelz-Verfahren.....	16
Abb. 9: n-Dotierung mit Phosphor bei monokristallinen Si-Wafern	17
Abb. 10: Darstellung der Abhängigkeit des Primärenergiebedarfs von der Waferdicke.....	21

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Primärenergiebedarf bei der Produktion von Si-Wafern.....	20
Tab. 2: PV-Modulkomponenten und ihre Verwertungsmöglichkeiten	23

1 Einleitung und Definitionen

Der Solarenergie kommt im Rahmen einer nachhaltigen Gestaltung unserer Zukunft eine immer zentralere Bedeutung innerhalb der erneuerbaren Energien zu. Unterschiedliche Nutzungsformen dieser an sich uneingeschränkt vorhandenen Energiequelle machen jedoch auch den Einsatz unterschiedlicher Technologien und Rohstoffe notwendig. Obwohl die Nutzung solarer Energieformen als „grüne“ Energieform gilt, muss trotzdem darauf hingewiesen werden, dass es sich beim Einsatz von Solarkomponenten um keinen Nulleffekt handelt sobald man auch den Produktionsprozess und die Periode nach dem Ende der prognostizierten Nutzungsdauer in die Betrachtungen mit einbezieht. Um die mit dem Einsatz von Solarkomponenten verbundenen entstehenden Emissionen, wie z.B. durch die Verwendung umweltrelevanter Stoffe in der Produktion, weiter zu reduzieren, soll in diesem Bericht aufgezeigt werden, welche Formen der Solarenergienutzung in Bayern vorzugsweise angewandt werden und welche Möglichkeiten zur Nachnutzung der verwendeten Komponenten bestehen. Eine intensive Nachnutzung bzw. ein sinnvolles Recycling der Solarprodukte verringert den Bedarf an Primärrohstoffen und Primärenergieträgern, somit werden Ressourcen geschont und den Zielen des Kreislaufwirtschaftsgesetzes [1] Rechnung getragen. Der vorliegende Bericht gibt einen Überblick über das Aufkommen, die Zusammensetzung, Inhaltsstoffe und die Strategien für eine fachgerechte Entsorgung von Photovoltaik- und Solarthermieranlagen sowie den derzeitigen Stand der Technik bezüglich der Aufbereitung und Wiederverwendung der verwendeten Module.

1.1 Begriffsdefinition

Grundsätzlich wird zwischen unterschiedlichen Nutzungsformen der Solarenergie, wie z.B. Solarthermie, Solarchemie und Photovoltaik unterschieden. Im Folgenden wird jedoch nur auf Solarthermie und Photovoltaik näher eingegangen, da diese beiden Energieformen zur Zeit, wenn auch noch untergeordnet, die wichtigste Rolle im Bereich der solaren Energien spielen.

1.1.1 Solarthermie – Photovoltaik

Der wesentliche Unterschied zwischen Solarthermie und Photovoltaik liegt in den resultierenden Energieformen. Bei der Solarthermie wird Sonnenenergie genutzt um ein Trägermedium zu erhitzen und die so gewonnene Wärme zu ihrem eigentlichen Einsatzort zu transportieren (Brauchwasserspeicher o.ä.), während es die Photovoltaik ermöglicht, das einfallende Sonnenlicht direkt und ohne Umwege über Trägermedien in elektrische Energie umzuwandeln.

1.1.2 Verwertung – Recycling

Unter Verwertung versteht man sämtliche Verfahren, die in der EG-Richtlinie 75/442/EWG, Anhang IIB, aufgeführt sind, wie z.B. Rückgewinnung oder Regenerierung einzelner Produktkomponenten. Auch eine thermische Verwertung ist möglich. Bei dieser Verwertungsart steht nicht die stoffliche Komponente im Vordergrund, sondern die Gewinnung von Energie aus dem betreffenden Stoff. Recycling wiederum verfolgt die Wiederaufarbeitung von Abfallmaterialien für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke. Nicht mit eingeschlossen in den Begriff des Recyclings ist die energetische Verwertung, also der Einsatz der Abfallmaterialien als Brennstoff zur Energiegewinnung. Bei Recycling unterscheidet man noch das Downcycling, wobei Downcycling die wirtschaftliche Abwertung des neugewonnenen Produktes beschreibt, sodass die Herstellung eines „neuen“ Produktes nur durch eine Wertminderung des eingesetzten Materials möglich ist.

2 Solarthermie

Bei der Solarthermie wird Solarstrahlung in sogenannten Energiewandlern zu Nutzenergie umgewandelt. Dies geschieht für den privaten Gebrauch üblicherweise in Sonnenkollektoren. Obwohl es unterschiedliche Bauweisen von Sonnenkollektoren gibt, ist das Prinzip stets dasselbe. Eine schwarze Platte (Absorber) aus Kupfer, Aluminium oder auch Kunststoff wird durch die Solarstrahlung erhitzt. Die dabei entstehende Wärme wird an ein Wärmeträgermedium, z. B. Wasser, Luft, oder organische Verbindungen, das durch in die Platten eingearbeitete Röhren strömt, abgegeben und erhitzt dieses Medium. Das erhitzte Trägermedium wiederum führt die Wärme dem eigentlichen Nutzen, Erhitzen von Brauchwasser zum Beispiel, zu [2, S. 19], [3, S. 217].

2.1 Kollektorbauformen

Für Sonnenkollektoren gibt es unterschiedliche Bauweisen. Der Flachkollektor, dargestellt in Abb. 1, besteht aus einer transparenten Abdeckung, dem Absorber, Wärmeträgerrohren, der Reflektorschicht, der Wärmedämmung und dem Gehäuse.

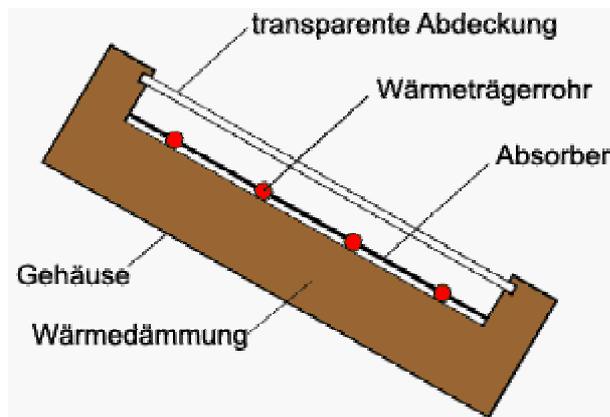


Abb. 1: Flachkollektor

Mit dieser Art von Kollektoren können Wassertemperaturen von 60–70°C erzeugt werden. Die transparente Abdeckung besteht aus eisenfreiem Glas. Für die Wärmedämmung werden hitzebeständige Kunststoffe an den Rück- und Seitenwänden des Gehäuses eingebaut, die den hohen Kollektorstillstandstemperaturen von bis zu 200°C standhalten müssen. Absorber werden aus Alu,- Kupfer- oder Stahlblechen hergestellt. Ihre Wirkung wird durch das Auftragen sog. selektiver Farbschichten erhöht [4], S. 98].

Eine weitere Bauart ist der Vakuumkollektor, bei dem der Raum zwischen Abdeckung und Absorber evakuiert ist, um Wärmeverluste durch Konvektion zu vermeiden. Eine effiziente Anordnung stellen Vakuum-Röhrenkollektoren, wie in Abb. 2 dar. Bei dieser Bauweise befindet sich die Absorberplatte in einer evakuierten Glasröhre. An der Unterseite des Absorbers ist das Rohr für den Durchfluss des Wärmeträgermediums angelötet. Diese Bauweise weist gegenüber den Flachkollektoren deutlich verringerte Transmissions- und Konvektionsverluste auf. Aufgrund der verbesserten thermischen Eigenschaften besitzen Vakuumkollektoren bei höheren Betriebstemperaturen höhere Wirkungsgrade als gewöhnliche Flachkollektoren und können daher auch zur Raumheizung und zur Prozesswärmeerzeugung eingesetzt werden [4, S. 99].

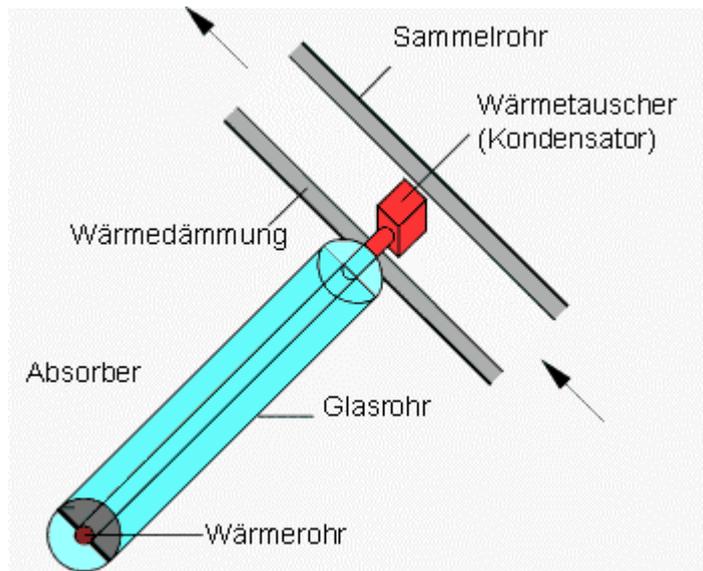


Abb. 2: Vakuum-Röhrenkollektor

Flachkollektoren und Vakuum-Röhrenkollektoren werden üblicherweise der Sonnenposition nicht nachgeführt [5, S. 58 ff.].

2.2 Wärmeträgermedien

Als Wärmeträgermedien kommen nur Stoffe in Frage, die folgende Anforderungen erfüllen:

- Sie dürfen keine ätzenden, toxischen oder reaktiven Eigenschaften aufweisen
- Schutz vor Korrosion, Alterung und Inkrustierung von üblicherweise im Heizungsbau eingesetzten Metallwerkstoffen.
- Der Flammpunkt muss über 100°C liegen.
- Wärmeträgermedien müssen biologisch abbaubar sein.

Als Wärmeträgermedien dienen im wesentlichen Wasser-Glykol-Gemische, die ein Einfrieren des Kollektors im Winter verhindern. Propylenglykol kann unter Beachtung der behördlichen Vorschriften zur Entsorgung einer Sonderbehandlung zugeführt werden. Verdünnte Wasser-Glykol-Gemische, die in biologische Kläranlagen eingeleitet werden, lassen keine Störung der Abbauaktivität des Belebtschlammes erwarten. Auf den Einsatz von Thermoölen wird aufgrund der Toxizität weitestgehend verzichtet. Wasser scheidet im Normalfall wegen der Gefahr des Einfrierens im Winter aus. Luft wird als Wärmeträgermedium in Mitteleuropa nur selten verwendet [6, S. 174 ff.].

2.3 Absorberbeschichtung und Kollektorabdeckungen

Zur Erreichung eines hohen Wirkungsgrades sollen Absorber mit hohem Absorptionsvermögen zum Einsatz kommen. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass Körper mit hohem Absorptionsgrad auch oft ein hohes Emissions- also Rückstrahlvermögen, besitzen. Zur Vermeidung zu hoher Wärmeverluste durch Emission sind im Allgemeinen bei industriell gefertigten Kollektoren die Absorber mit einer selektiv beschichteten Oberfläche ausgeführt. Der selektiven Beschichtung liegt das unterschiedliche Absorptions- und Emissionsverhalten von schwarzen und weißen Oberflächen zugrunde. Das bedeutet, dass Photonen des sichtbaren Spektrums von schwarzen Oberflächen vollständig absorbiert werden, während langwellige Infrarot-Strahlung verstärkt reflektiert wird. Bei spiegelnden oder weißen Oberflächen verhält es sich genau umge-

kehrt. Durch das Aufbringen einer selektiven Beschichtung werden die Effekte des Verhaltens von weißen und schwarzen Körpern kombiniert. Die Herstellung dieser selektiven Schichten erfolgt durch das Aufdampfen von Interferenzfiltern, eine kostenintensive Methode, oder durch Galvanisieren mit Metalloxiden, bzw. –sulfiden (Nickel, Chrom, pigmentiertes Aluminiumoxid). Die Absorberschichten weisen Dicken von wenigen Mikrometern auf und müssen vor Umwelteinflüssen geschützt werden. Dies geschieht durch den Einbau in Kollektorgehäuse.

Bei Kollektoren mit selektiver Beschichtung zur Brauchwassererwärmung (Einsatz bis 60°C Wassertemperatur) kommt eine einfache Abdeckung mit Solarglas zur Anwendung. Für die Bereitstellung von Prozesswärme (ab 100°C Wassertemperatur) befinden sich transparente Wärmedämm-Materialien als Zweitabdeckung in Entwicklung [6, S. 174 ff.].

2.4 Marktentwicklung und Mengen

2.4.1 Der Solarthermiemarkt in Deutschland

Im Jahr 2001 wurden in Deutschland ca. 900.000 m² Kollektorfläche installiert. Zum Ende des vergangenen Jahres waren insgesamt ca. 3,8 Mio. m² Kollektorfläche in Deutschland vorhanden. Das entspricht einer Leistung von rund 1,5 Mio. MWh und einer jährlichen Kohlendioxid-einsparung von 560.000 Mg. Der Absatz der Solarwärmeanlagen hat sich in den letzten 10 Jahren verzehnfacht und in den Jahren 2000/2001 gegenüber 1999 verdoppelt. Diese Entwicklung wird in Abb. 3 dargestellt.

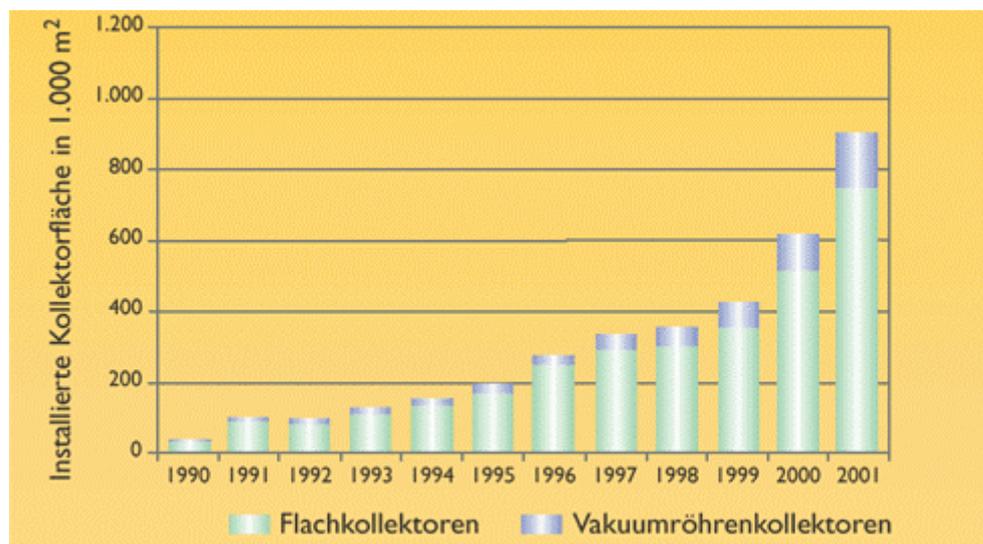


Abb. 3: Marktentwicklung der Sonnenkollektoren in Deutschland von 1990 – 2001

Mittlerweile entfallen auf jeden Bundesbürger ca. 0,04 m² an installierte Kollektorfläche [7, S. II-76 ff.]. Für den Freistaat Bayern bedeutet das eine durchschnittlich installierte Fläche an Solarthermieanlagen von rund 500.000 m². Trotz allem scheint das Ziel der Europäischen Union – Installation von 100 Mio. m² Kollektorfläche bis zum Jahr 2010 in Europa noch in weiter Ferne, da bis zum Ende des Jahres 2000 in Europa erst ein Zehntel dieser Fläche installiert war. Allein in Deutschland stehen 800 Mio. m² an solargeeigneten Dachflächen zur Verfügung, 200 mal mehr als heute genutzt werden. Weitere 3.000 Mio. m² könnten auf geeigneten Flächen, wie z.B. Brachland, genutzt werden [8].

2.4.2 Abfallmengen

Im Jahr 2001 waren in der Bundesrepublik Deutschland insgesamt rund 3,8 Mio. m² Kollektorfläche installiert. Geht man von durchschnittlich 0,04 m² Fläche pro Bundesbürger aus, so ergibt sich für Bayern eine installierte Fläche von rund 500.000 m². Bei einem durchschnittlichen Flächengewicht von ca. 20 kg/m² und einem vorzeitigen Ausschuss vor Ende der prognostizierten Lebensdauer von 1%, sowie einem weiteren Prozent Ausschuss durch Montage,- oder Transportverluste, ergibt sich derzeit eine Menge von rund 200.000 kg Schrott aus Sonnenkollektoren. Verglichen mit der derzeitigen Menge an Elektronikschrott in Bayern (~ 25.000 Mg) nimmt sich diese Menge an Kollektorschrott gering aus. Trotz derzeit sehr geringer Mengen ist ein Anstieg der zu entsorgenden Sonnenkollektoren direkt proportional zum Wachstum des Solarthermiemarktes zu erwarten.

2.5 Verwertung und Entsorgung

Wie bereits erwähnt ist die Nachfrage nach Energiegewinnung aus Solarenergie in den vergangenen Jahren kontinuierlich angestiegen, ein Trend der sich auch in den kommenden Jahren zweifellos fortsetzen wird. Wie im o.g. Kapitel beschrieben, wird mit dem verbreiteten Einsatz dieser Energieform in Zukunft auch mit steigenden Abfallmengen aus Sonnenkollektoren zu rechnen sein. Aus ökologischer Sicht erscheint es daher durchaus sinnvoll, sich Gedanken über Sammel- und Verwertungsstrategien zu machen, auch wenn zur Zeit noch keinerlei gesetzliche Verpflichtungen dazu existieren. Derzeit werden defekte Sonnenkollektoren hauptsächlich an die Hersteller zurück geliefert, um im Werk repariert und für eine neuerliche Montage vorbereitet zu werden. Kollektoren bei denen eine Reparatur nicht mehr möglich ist, werden als hausmüllähnlicher Abfall entsorgt. Die Rückführung der eingesetzten Hauptbestandteile wie Glas aus Abdeckungen und den Wärmeträgerrohren sowie der verwendeten Metallbauteile in die entsprechenden (bereits existierenden) Kreisläufe wäre sinnvoll. Erste Überlegungen zum Thema Sammlung, Rücknahme bzw. Demontage von defekten Sonnenkollektoren wurden von Herstellern und Vertreibern in Bayern bereits angestoßen.

3 Photovoltaik

Unter Photovoltaik versteht man die direkte Umwandlung des Sonnenlichtes in elektrischen Strom mit Hilfe von Solarzellen. Direkte Umwandlung heißt, dass das einfallende Sonnenlicht nicht zum Erwärmen von Wasser verwendet wird, wie dies bei der Solarthermie der Fall ist, sondern die Erzeugung von Strom unter direkter Ausnutzung des physikalischen Photoeffektes stattfindet.

3.1 Die monokristalline Solarzelle

Das Basismaterial der gegenwärtigen industriellen Solarzellenproduktion ist nahezu ausschließlich Silizium. In einem ersten Schritt werden aus höchstreinem, kristallinem Silizium Einkristalle, meist in Form von zwei bis drei Meter langen Zylindern mit einem Durchmesser von 20 Zentimetern, gezüchtet. Aus diesen Zylindern werden Scheiben, sog. „Wafer“ gesägt. Um die direkte Umwandlung von Sonnen- in elektrische Energie zu bewerkstelligen, benötigt man in allen Fällen sogenannte Halbleiter. Halbleiter sind kristalline Festkörper, die üblicherweise isolierend wirken, bei denen aber durch bestimmte Änderungen in ihrem Kristallgitter wie zum Beispiel durch Einbringen der Elemente Gallium, Indium, Bor oder Phosphor oder durch äußere Einflüsse eine Leitfähigkeit, also ein Ladungsfluss, erzwungen werden kann [10, S. 20]. Um diese Leitfähigkeit nutzen zu können, werden während des Produktionsprozesses die oben genannten Halbleiterelemente in die Siliziumwafer eingebracht. Diesen Vorgang nennt man Dotierung. Dabei entsteht eine positiv leitende und eine negativ leitende Schicht. In einer photovoltaischen Zelle bringt man zwei Halbleiterschichten, die in ihrer chemischen Struktur etwas unterschiedlich sind und deshalb die Neigung haben, Ladungen auszutauschen (n- bzw. p-Halbleiter), in Kontakt. Werden die einzelnen Schichten elektromagnetischer Strahlung (Sonnenlicht) ausgesetzt, so werden durch die absorbierten Photonen (Lichtquanten) Elektronen im Halbleitermaterial angeregt. Durch die räumliche Trennung der Elektronen am sogenannten p-n-Übergang entsteht eine Spannung von etwa 0,5 V an den außen angefügten Metallkontakten (Kontaktfinger) [3, S. 224]. Eine äußere Verbindung über einen Verbraucher schließt den Stromkreis. In Abb. 4 ist der Aufbau dieser Solarzellen ersichtlich.

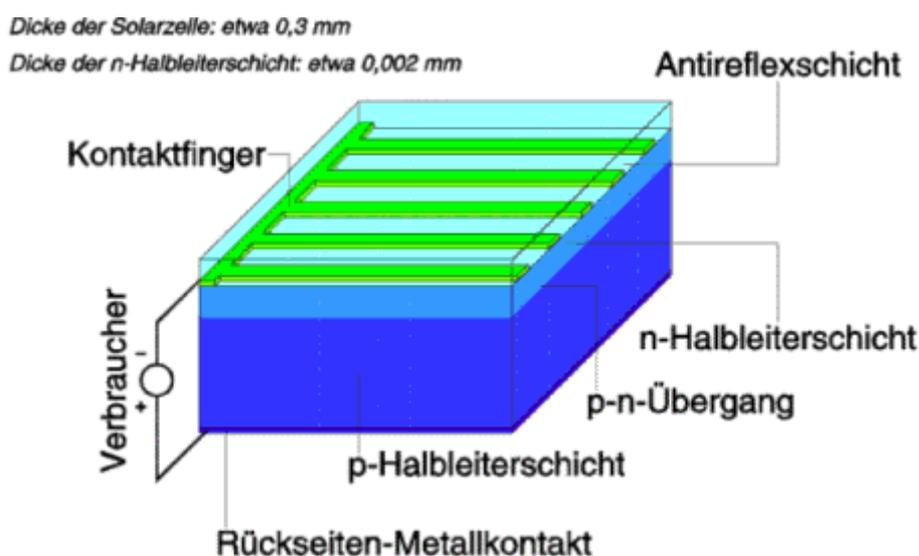


Abb. 4: Aufbau einer kristallinen Solarzelle

Die so hergestellten Solarzellen haben einen Wirkungsgrad von 14 bis 18%. Energieverluste entstehen dadurch, dass nicht alles Sonnenlicht absorbiert wird und dass ein Teil des auftretenden Sonnenlichtes in Wärme umgewandelt wird [3, S. 224 f.].

3.2 Andere Arten von Solarzellen

Obwohl in diesem Bericht nur monokristalline Siliziumzellen betrachtet werden, muss darauf hingewiesen werden, dass sich zur Zeit noch eine Vielzahl anderer Solarzellen im Entwicklungsstadium befinden. Die Weiterentwicklung der „herkömmlichen“ monokristallinen Solarzellen soll zu Einsparungen im Energie- und Kostenbereich einerseits und zur Steigerung der Wirkungsgrade andererseits führen. Im Weiteren sollen mögliche Technologien kurz vorgestellt werden.

- Polykristalline Solarzellen

Poly- oder Multikristalline Solarzellen mit der typisch marmorierten, blauen Oberfläche werden ähnlich wie monokristalline Solarzellen als Scheiben von einem Siliziumblock gewonnen. Dieser ist allerdings kein Einkristall, sondern nur eine kontrolliert abgekühlte Siliziumschmelze mit vielen Kristalliten. Die polykristalline Solarzelle ist daher billiger in der Herstellung; der Wirkungsgrad liegt allerdings mit ca. 13–15 % etwas unter dem der monokristallinen Solarzelle.

- Amorphe Solarzellen

Bei der amorphen Solarzelle (Dünnschichtzelle) wird nicht das teure kristalline Silizium eingesetzt, sondern Silizium bei ca. 200 °C mit einem speziellen Verfahren in sehr dünnen Schichten auf eine Oberfläche (z.B. Glas oder Folie) aufgedampft. Bei diesem Prozess bilden die Siliziumatome keine Kristallgitter, sondern es entsteht ein Film aus unregelmäßigem Silizium, das sogenannte "amorphe Silizium". Je nach Schichtdicke sind die Zellen leicht durchschimmernd, transparent dunkelgrau oder rötlichbraun. Diese amorphen Solarzellen haben zwar nur einen Wirkungsgrad von 6–8 %, sind aber wesentlich kostengünstiger als die anderen Zellen, da wesentlich weniger Silizium benötigt wird. Diese Form der Solarzelle wird zur Zeit hauptsächlich für sogenannte „Konsumgüter“, das heißt vorwiegend in Taschenrechner oder Uhren, verwendet.

- Tandem- oder Stapelzellen

Amorphes Silizium hat den Nachteil, dass es durch die Lichtabsorption altert. Dieser Effekt kann durch entsprechend dünne Schichten zwar abgemildert werden, da jedoch für die Absorption eine gewisse Mindest-Schichtdicke erforderlich ist, geht man gleichzeitig zu Mehrschichtstrukturen über. Diese können mit Materialien gleicher charakteristischer Mindestenergie oder durch Beimischung von Germanium als Dotierungselement auch als echte Tandemstrukturen realisiert werden. Im Labormaßstab wurden für Mehrschichtstrukturen auf kleinen Flächen Wirkungsgrade von ca. 13% realisiert. In der industriellen Fertigung auf großen Flächen liegen die Wirkungsgrade bei 6,5 bis knapp 8%. Eine weitere Möglichkeit der schnellen Alterung von amorphen (Dünnschicht)-zellen entgegenzuwirken, ist die Herstellung der sog. „Stapelzelle“. Dafür werden die amorphen Solarzellen mit einem kleinen technischen Unterschied im Vergleich zu den kristallinen Solarzellen produziert. Und zwar befindet sich dabei zwischen der p-Schicht und der n-Schicht eine dritte, undotierte Schicht, die den Namen i-Schicht (i = intrinsisch = von innen her) erhielt, so dass sich der Begriff "pin-Solarzelle" für eine so gestapelte Zelle eingebürgert hat. „Stapelzelle“ man statt einer einzelnen pin-Struktur zwei pin-Schichten übereinander, nach dem Prinzip, mehrere dünne Schichten – weniger Alterung, so ergibt sich aus dieser Technolo-

gie eine weitere Möglichkeit der schnellen Alterung von amorphen Solarzellen entgegenzuwirken. Die Stapelstruktur verlangsamt nicht nur den Alterungsprozess einer Dünnschicht-Solarzelle sondern dient auch der besseren Ausnutzung des Sonnenspektrums durch die Kombination unterschiedlicher Halbleiter.

- Neue Materialien

Um der starken Einschränkung des Wirkungsgrades entgegen zu arbeiten und trotzdem den materialsparenden Einsatz der Dünnschichttechnologie nutzen zu können, werden andere Halbleitermaterialien, wie z.B. Galliumarsenid (GaAs), Cadmiumtellurid (CdTe) oder Kupfer-Indium-Diselenid (CIS) erprobt. Der Einsatz dieser Materialien birgt jedoch für die Photovoltaik die Gefahr den Ruf einer „grünen“ Technologie einzubüßen, da der Einsatz von Cadmium und Arsen aus umwelthygienischer Sicht bedenklich ist.

- MIS – Zellen

Das innere elektrische Feld der Solarzelle wird nicht durch einen typischen p-n-Übergang erzeugt, sondern durch den Übergang einer dünnen Oxidschicht zu einem Halbleiter.

3.2.1 Von der Zelle zum Modul

Eine einzelne kristalline Solarzelle mit den üblichen Abmessungen von 100 x 100 x 0,3 mm arbeitet in einem Spannungsbereich von 0,4 – 0,6 V. Diese Spannung ist zur technischen Nutzung praktisch nicht brauchbar. Zudem ist die Solarzelle sehr empfindlich in Bezug auf Bruch und Korrosion. Aus diesem Grund werden in der Regel mehrere Solarzellen zu Solarmodulen zusammengefasst. Durch Einbetten zwischen Gläsern und Folien wird eine thermische Ausdehnung ermöglicht und Schutz vor Feuchtigkeit und elektrische Isolierung gewährleistet. Die Zellen sind dann dauerhaft geschützt und haben eine Lebenserwartung von rund 30 Jahren. Die Elemente sind zwischen 8 und 30 mm dick. Zur technischen Anwendung haben sich wegen ihrer guten Langzeiteigenschaften die zwei Herstellungsmethoden Glas-Folien- und Glas-Glas-Lamine durchgesetzt. Im Bereich der „Konsumgüter“, Solarzellen für Taschenrechner o.ä., sind auch Techniken der Lackierung, Folien-Folien-Lamine oder Harzeinbettungen ohne Gläser häufig anzutreffen [11, S. 157].

3.2.1.1 Glas-Folien-Lamine

Bei diesem Herstellungsverfahren werden die Solarzellen zwischen einer Frontglasscheibe und einer rückseitigen Kunststoffolie einlamiert. Hierzu werden jeweils vor und hinter den Solarzellen eine EVA-Folie (Ethyl-Vinyl-Acetat) als eigentlich verbindendes Material gelegt. Dieses Paket wird in einem Laminator unter Druck und Temperatur zu einem Verbund „zusammengebacken“. Die meisten der Solarelemente sind Glas-Folien-Lamine mit meist 36, 72 oder 144 Solarzellen. Es entstehen so Einheiten mit Leistungen zwischen 50 und 300 Watt. Glas-Folien-Lamine werden aus Preisgründen nahezu ausschließlich in Großserien mit einem umlaufenden Alu- oder Edelstahlrahmen hergestellt. Der Anteil der Solarzellen am Wert des Solarmoduls ist relativ hoch.

3.2.1.2 Glas–Glas–Lamine

Bei dieser Herstellungsweise werden die Solarzellen zwischen einem Frontglas und einem konventionellen Rückglas entweder unter Verwendung einer EVA-Folie oder eines Gießharzes eingebettet.

Wird EVA-Folie verwendet, entspricht der Herstellungsprozess praktisch dem der Glas-Folien-Lamine. Wird Gießharz verwendet, werden die Zellen mittels Abstandhalter auf dem rückseitigen Glas fixiert, so dass diese sich nach dem Füllen mit Gießharz exakt in der Mitte des Glasverbundes befinden. Dieser Aufbau hat gegenüber den Folien-Laminen den Vorteil, dass die Solarzellen bei mechanischer Belastung des Glases, z.B. durch Wind oder Schnee, weniger belastet werden, da sie sich in der so genannten neutralen Zone des Solarelementes befinden. Mit dieser Technologie können Solarelemente bis zu einer Größe von rund 2 x 3 m hergestellt werden. Das entspricht einer Leistung von bis zu 800 Watt. Das Gießharz ist speziell im Hinblick auf Transparenz, Haftfähigkeit und Langzeitstabilität modifiziert. Glas-Glas-Lamine werden meist in Kleinserien hergestellt. Sie werden häufig unmittelbar in Fassadenkonstruktionen oder Dächer von Gebäuden integriert und deshalb auch rahmenlos hergestellt. Jeweils ein Beispiel der o.g. Modularten ist in Abb. 5 dargestellt.



Abb. 5: Rahmenlose und gerahmte Solarmodule

3.2.1.3 Die elektrische Verbindung

Die elektrische Verbindung der Zellen miteinander geschieht, indem ein flacher Leiter von der Rückseite der einen zur Vorderseite der nächsten Zelle geführt und dort zu so genannten Strings verlötet wird. Da die Vorder- und Rückseite den unterschiedlichen Polen der Zellen entsprechen, wird also jeweils ein Pluspol mit dem Minuspol der nächsten Zelle verbunden. Die Zellen sind in Serie bzw. in Reihe geschaltet. Dieses Verfahren wird solange fortgeführt bis die gewünschten Abmessungen des Glases erreicht sind. Dann wird der nächste String in Gegenrichtung daneben gelegt, so dass am Ende alle Strings mäanderförmig auf dem Glas positioniert sind. Die metallenen Streifen sind von vorne sichtbar. Anfang und Ende sämtlicher miteinander verbundener Strings werden mit einem Leiter in eine Anschlussdose auf der Modulrückseite geführt. Zum Schutz der Solarzellen vor Überlastung werden in regelmäßigen Abständen sogenannte Bypassdioden eingelötet.

3.3 Marktentwicklung und Mengen

Mit der Studie „Photovoltaics in 2010“ [12] der Generaldirektion für Energie der Europäischen Kommission wird der Entwicklungsrahmen am europäischen Solarmarkt in einem Zeitraum von 1996, dem Erscheinungsjahr dieser Studie, bis ins Jahr 2010 umrissen. Als Grundlage dafür diente das Kernziel des ALTERNER-Programms der EU, welches eine Kohlendioxidreduktion um 180 Mio. Mg vorsieht, um die Menge der Kohlendioxidemissionen bis zum Jahr 2000 auf dem Stand von 1990 einzufrieren. Diese Reduktion soll durch folgende Maßnahmen erreicht werden:

- Verdopplung der Nutzung erneuerbarer Energiequellen von 4% im Jahr 1991 auf 8% im Jahr 2005
- Produktion von Elektrizität aus erneuerbaren Energiequellen soll in Europa verdreifacht werden
- Der Marktanteil von Biotreibstoff am Gesamttreibstoffverbrauch soll 5% betragen.

Um diese Ziele zu erreichen, entwickelten einzelne europäische Staaten eigene Förderprogramme. In Deutschland wird einerseits versucht, die Kosten für Solarzellen- und module durch die Verbesserung der Wirkungsgrade zu senken, andererseits soll diese Leistungssteigerung und auch eine erhöhte Zuverlässigkeit durch verbesserte Bauteile bewirkt werden. Zu diesem Zweck unterstützt das Bundesministerium für Forschung und Technologie eine Vielzahl von Aktivitäten, von der Grundlagenforschung bis hin zu abschließenden Feld- und Langzeittests von PV-Anlagen. Im Jahr 1990 wurde vom Bundesministerium für Forschung und Technologie und der Bundesregierung das 1.000 Dächer-Programm gestartet, welches 1992 auch auf die neuen Bundesländer ausgeweitet wurde. Gefördert werden Solarstromanlagen (Photovoltaik) ab einer Größe von ca. 1 kWp (Kilowatt Peak) [12]. Bis zum Jahr 1995 wurden 2.250 Anlagen gefördert und so der Beweis erbracht, dass die Technik für den Breitereinsatz geeignet ist. 1999 wurde das 100.000 Dächer-Programm ins Leben gerufen, um dem Solarmarkt weitere Anreize zur Entwicklung zu bieten. Antragsberechtigt sind Privatpersonen, Vereine, Stiftungen, sowie kleinere und mittlere Unternehmen (max. 250 Mitarbeiter) und Freiberufler. Programmstart war am 01.01.1999. Das Programm läuft 5 Jahre. Es sollen 100.000 PV-Anlagen mit einer durchschnittlichen Größe von 3 kWp, gesamt also 300 MWp gefördert werden. Der Ausbau der PV-Leistung wird zusätzlich durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) aus dem Jahr 2000 angeregt [13].

3.3.1 Der Photovoltaik-Markt in Deutschland

Der Photovoltaikmarkt wuchs im Jahr 2001 weltweit um 38% auf knapp 400 MWp. Der europäische Markt wird zu 75% durch die PV-Installationen in Deutschland geprägt, jedoch werden weniger als 30% der Module heute auch in Deutschland gefertigt. Deutschland ist nach Japan und USA das drittgrößte Land für PV-Technik. In Deutschland wurden im Jahr 2001 81 MWp Photovoltaikleistung installiert, 78 MWp davon waren netzgekoppelt. Diese Entwicklung wird in Abb. 6 verdeutlicht [8].

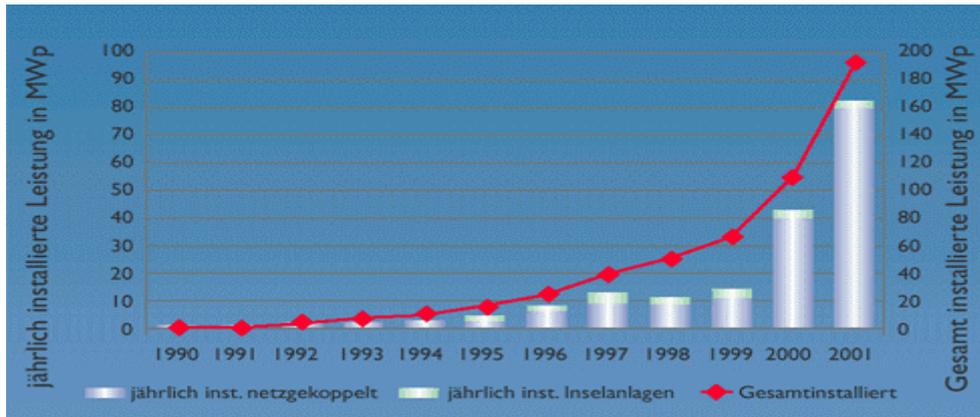


Abb. 6: Entwicklung des deutschen Photovoltaikmarktes von 1990 – 2001

Diese Leistung entspricht einer Kohlendioxid-Einsparung von 100.000 Mg pro Jahr. 150 Mio. kWh Strom konnten in das Stromnetz eingespeist werden. Trotz aller Bemühungen entspricht diese Menge nicht einmal 1% der eingespeisten Gesamtenergie. Durch den gestiegenen Absatz konnte im Jahr 2002 eine Kostenreduktion von 5 – 10% erreicht werden. Die gestiegene Nachfrage der vergangenen Jahre hat auch zum Aufbau einer Vielzahl von Produktionsstätten auf allen Produktstufen, von der Herstellung von Rohsilizium über Waferproduktion bis hin zur Bereitstellung von Komponenten geführt. Mit der in Deutschland vorhandenen Sonneneinstrahlung und den bereits vorhandenen, geeigneten Dachflächen wäre es möglich 30% des Strombedarfs aus Photovoltaik bereit zustellen.

3.3.2 Abfallmengen

Die derzeitigen Abfallmengen lassen sich anhand der Produktionszahlen für das Jahr 2001 abschätzen. Für die Abschätzung wird von einer Lebensdauer von ca. 25 Jahren ausgegangen. Man rechnet mit einem Transport- und Montageverlust von 1%. Auch defekte Altanlagen werden nur mit 1% der Gesamtinstallationen veranschlagt, da der überwiegende Teil der Module ihre prognostizierte Lebensdauer noch nicht erreicht hat. Bei 15 kg Masse pro Quadratmeter Modulfläche mit einer Nennleistung von 100 Wp ergeben sich für das Jahr 2001 9.500 Mg Modulschrott weltweit, davon fallen ca. 2.000 Mg in Europa an. In der Bundesrepublik fallen schätzungsweise 1.500 Mg an. Im Vergleich zum restlichen Elektro(nik)schrottaufkommen in Deutschland, ca. 1 Mio. Mg, nimmt sich diese Menge an Modulschrott gering aus. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Frage, ob Modulschrott unter die Elektronikschrott-Richtlinie der EU [9] fällt oder nicht, keineswegs geklärt ist. Die EU-Richtlinie definiert in Art. 3 der Elektro- und Elektronikaltgeräte-Richtlinie Elektro- und Elektronikgeräte, als „Geräte, die zu ihrem ordnungsgemäßen Betrieb elektrische Ströme oder elektromagnetische Felder benötigen, und Geräte zur Erzeugung, Übertragung und Messung solcher Ströme und Felder, die unter die in Anhang IA aufgeführten Kategorien fallen...“. Nun dienen Photovoltaikanlagen der Erzeugung von Strom, werden aber in Anhang IA der Richtlinie nicht explizit aufgeführt. Fragen bezüglich der gesetzeskonformen Verwertung und/oder Entsorgung von Modulschrott sind bisher nicht geklärt worden.

Die installierte Leistung in Deutschland betrug im Jahr 1999 67,3 MWp. Auf den Freistaat Bayern entfielen im selben Zeitraum 8,5 MWp oder rund 12,63% [7, II-S. 84 ff.]. Unter der Annahme, dass somit in Bayern auch 12,63% des Modulschrotts anfallen, bedeutet das ein Mengenaufkommen von rund 190 Mg Modulschrott. Im Vergleich dazu fielen in Bayern im Jahr 2000 rund 25.000 Mg Elektronikschrott an [14].

Unabhängig vom derzeitigen Mengenaufkommen wird ein ansteigendes Abfallaufkommen in etwa proportional zum Wachstum des PV-Marktes erwartet. Laut einer Studie des Schweizer Bankhauses Sarasin kann für das kommende Jahrzehnt von einer durchschnittlichen, jährlichen Zuwachsrate für den Solarzellenmarkt von 17,5% ausgegangen werden. Für einzelne Anwendungsgebiete wird auch mit einem erheblich höherem Wachstum gerechnet [15, S. 4].

3.4 Inhaltsstoffe

Wie in den vorangegangenen Kapiteln bereits beschrieben, stellen das Deckglas und der Aluminium- oder Edelstahlrahmen den größten Massenanteil eines Solarmoduls dar. Betrachtet man jedoch den materiellen und energetischen Wert stehen die bei Photovoltaikanlagen verwendeten „Wafer“ an erster Stelle. Diese Tatsache macht sie auch für die Wiederverwendung oder –verwertung interessant. Wafer bestehen im großen und ganzen aus Silizium mit einigen Dotierungselementen. Diese Werk- und Wertstoffe werden im folgenden näher beschrieben.

3.4.1 Silizium

Der Anteil von Silizium an der Zusammensetzung der Erdkruste beträgt etwa 26%. Damit ist Silizium nach Sauerstoff das auf der Erde am weitesten verbreitete Element. Silizium kommt in der Natur nahezu ausschließlich in Mineralien wie Sand, Ton und Gesteinen vor. Zur Herstellung von Wafern wird Reinstsilizium benötigt, wobei die Summe aller Verunreinigungen unter 10^{-7} Gew.-% liegen muss. Um diesen Reinheitsgrad zu erzielen, kommen verschiedene Verfahren der Einkristallzüchtung und das Zonenschmelz-Verfahren zum Einsatz [16, S. 4103].

Silizium kann gewonnen werden, indem man Quarz (SiO_2), mit Kohlenstoff reagieren lässt. Dazu wird in Lichtbogenöfen der Quarzsand mit der beigemengten Kohle erhitzt. Dabei verbindet sich der Sauerstoff mit dem Kohlenstoff. Zurück bleibt Silizium mit einer Reinheit von 99%. Zur Herstellung von elektronischen Bauteilen oder Wafern für die Solarindustrie benötigt man jedoch Einkristalle. Einkristalle sind kristalline Festkörper, die über viele Zentimeter hinweg ein ungestörtes Kristallgitter aufweisen. Dazu wird Silizium in großen Tiegeln bei 1410°C geschmolzen und ein kleiner Einkristall als Wachstumskeim in die Schmelze getaucht. Die Temperatur wird so eingestellt, dass der Einkristallkeim gerade nicht schmilzt, sondern flüssiges Silizium daran erstarrten kann. Unter gleichmäßigem Drehen wird der wachsende Einkristall mit einer Geschwindigkeit von etwa einem Millimeter pro Sekunde herausgezogen, und zwar so, dass die Wachstumsfläche sich immer gerade an der Oberfläche der Schmelze befindet. Mit diesem sogenannten Czochralski-Verfahren entstehen viele Kilogramm schwere zylinderförmige Einkristalle (siehe Abb. 7), die aber noch immer zu viele Fremdatome enthalten.



Abb. 7: Silizium-Einkristall nach dem Czochralski-Verfahren

Das Reinigen dieser Kristallstäbe erfolgt durch das Zonenschmelz-Verfahren. Dabei wird der Kristall durch eine Reihe von Heizspulen gezogen, wobei jeweils die Zone, die sich in der Spule befindet, aufschmilzt (siehe Abb. 8). Verunreinigungen neigen dazu, sich bei der Rekristallisation nicht in den Kristallverbund einzufügen, sondern sich in der verbleibenden Schmelze anzureichern. Durch das Zonenschmelz-Verfahren schiebt man so die Verunreinigungen sozusagen bis ans Ende des Kristalls, dessen gereinigter Hauptteil letztendlich nur noch ungefähr ein Fremdatom in einer Milliarde Siliziumatome enthält [3, S. 397 ff.].

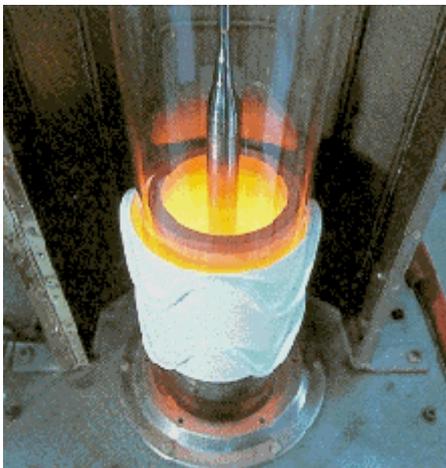


Abb. 8: Zonenschmelz-Verfahren

3.4.2 Dotierungselemente

Wie bereits in Kapitel 3.1 erwähnt, zählt Silizium zu den Halbleiterelementen. Das heißt, erst durch das Einbringen verschiedener Fremdatome in das ansonsten hochreine Siliziumkristallgitter lässt sich der Photoeffekt und somit die elektrische Energiegewinnung aus Sonnenlicht erreichen. Dieses „Einbringen von Fremdatomen“ wird Dotierung genannt. Nicht alle chemischen Elemente eignen sich als Dotierungselemente. In der Photovoltaik kommen hauptsächlich Bor und Phosphor zum Einsatz. Arsen, Gallium, Germanium, Indium, Cadmium und Tellur, sowie deren Verbindungen werden in einer neuen Generation der Solartechnik erst erprobt.

3.4.2.1 Bor

Da man für Solarzellen einen sog. p–n–Übergang braucht, muss man das Silizium dotieren. Dazu wird bereits der Siliziumschmelze eine kleine Menge des Elementes Bor beigefügt. Mit dem dreiwertigen Bor erhält man p–dotiertes Silizium. Die durchgehend p–dotierten Stäbe werden mit Spezialsägen in ca. 0,5 mm dicke Scheiben zerschnitten. Elementares Bor ist nicht toxisch, wohl aber einige seiner Verbindungen. In Spuren kommt Bor in allen Böden und Organismen vor. Als Spurenelement spielt Bor eine wichtige Rolle. Für manche Pflanzen ist die ständige Versorgung mit diesem Spurenelement für die Zellteilung und somit für das Wachstum notwendig. Außerdem regelt Bor den Kalziumhaushalt von Pflanzen. Für Tiere und Mikroorganismen scheint Bor entbehrlich zu sein. Bei Raumtemperatur ist die elektrische Leitfähigkeit von Bor gering, steigt jedoch beim Erwärmen rasch an. Zur Dotierung von Silizium beispielsweise wird kristallines Bor hoher Reinheit verwendet [16, S.492 ff.].

3.4.2.2 Phosphor

Um die n–Schicht in einem bereits mit Bor p–dotiertem Siliziumwafer zu erzeugen, wird Phosphoroxidchlorid (POCl_3) in einem Trägergas aus Argon und Sauerstoff zu den Wafern transportiert. An der Waferoberfläche reagiert der Sauerstoff mit Silizium, so dass sich eine sehr dünne Oxidschicht bildet. In dieser Schicht lagert sich ein geringer Teil der mit getragenen Phosphor- atome ab. Aufgrund der hohen Temperatur der Wafer (800–900°C) sind die Phosphor- atome sehr beweglich und können aus dieser Oxidschicht in den Wafer diffundieren. Nach kurzer Zeit befinden sich in einer dünnen Grenzschicht an der Wafer–Oberfläche mehr Phosphor – als Bora- tome. Diese Schicht stellt den n–Übergang dar. Der Dotierungsprozess ist abgeschlossen (siehe Abb. 9) [19].

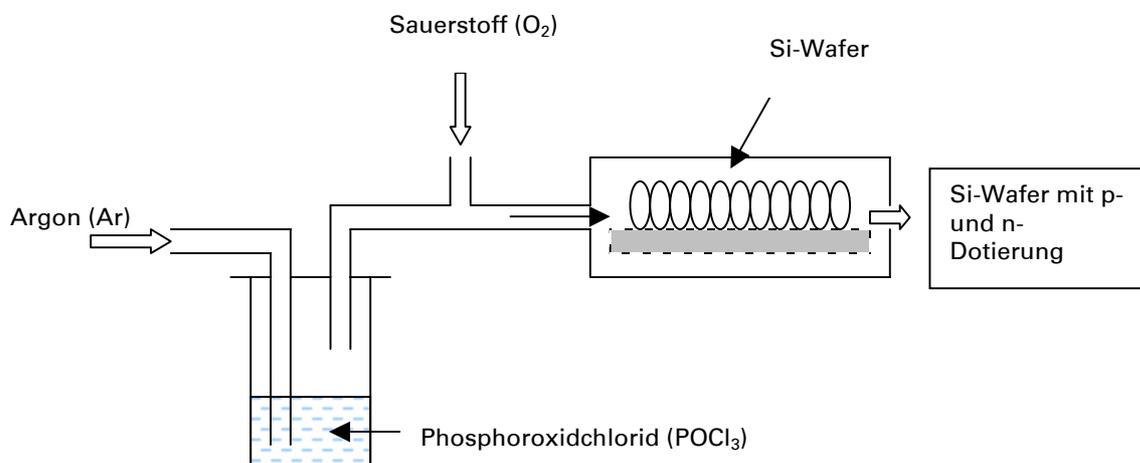


Abb. 9: n-Dotierung mit Phosphor bei monokristallinen Si-Wafern

Das Nichtmetall Phosphor tritt in unterschiedlichen Erscheinungsformen auf. Weißer Phosphor liegt bei Raumtemperatur als weißer, wachsartiger Feststoff vor, der sich bei Temperaturen über 50°C selbst entzündet. Aus diesem Grund wird er im Allgemeinen unter Wasser aufbewahrt. Diese Phosphormodifikation ist sehr giftig, doch kommen akute Vergiftungen selten vor, da sie die Inhalation von Dampf, Staub oder die orale Aufnahme voraussetzen, was in der Praxis leicht vermeidbar ist. Durch Erhitzen kann der weiße Phosphor in roten Phosphor übergehen. Roter Phosphor ist nicht löslich, nicht flüchtig oder selbstentzündlich und nicht giftig. Bei weiterer Erwärmung geht roter Phosphor in schwarzen Phosphor über. Schwarzer Phosphor besitzt ähn-

liche Eigenschaften wie roter Phosphor und kann ebenso im Gemisch mit Kaliumchlorat oder anderen Oxidationsmitteln durch Reibung oder Stoß zur Zündung gebracht werden. In der Natur ist das Vorkommen von organisch und anorganisch gebundenem Phosphor auf die Litho- und Hydrosphäre beschränkt. Über den Boden wird das Element von Pflanzen aufgenommen und in den Zellen zur Energiegewinnung genutzt [16, S. 3287]. Gelangen übermäßige Mengen von Phosphor in aquatische Systeme so kommt es dort sehr leicht zur Überdüngung (Eutrophierung). Dabei wird das Wachstum von Algen gefördert und damit die Sauerstoffzehrung im Gewässer verstärkt. Durch den daraus resultierenden Sauerstoffmangel kommt es in Folge der Eutrophierung häufig zu Fischsterben [17, S. 232], [18, S. 244].

3.4.2.3 Gallium und Arsen

Galliumarsenid gehört, ebenso wie andere Verbindungen mit fünfwertigen Elementen, wie z.B. Galliumnitrid (GaN), Galliumphosphid (GaP) zur Gruppe der Verbindungshalbleiter. Sie werden sowohl in der Elektrotechnik als auch für die Produktion von Solarzellen verwendet. Das Metall Gallium kommt in einer ähnlichen Häufigkeit wie Blei in der obersten Erdschicht vor, zumeist in Spuren in Zinkblenden und im Kupferschiefer. Gallium wurde früher aus den Verhüttungsrückständen des Kupferschiefers gewonnen und fällt heute als Nebenprodukt in der Zink- und Aluminiumindustrie an. Der größte Teil der Galliumproduktion wird zur Herstellung von Verbindungshalbleitern verwendet. Galliumverbindungen werden auch zur Herstellung von magnetischen Legierungen und Supraleitern verwendet. Gallium wird außerdem als ungiftige Sperrflüssigkeit bei höheren Temperaturen, als Wärmetauscher in Kernreaktoren oder als Quecksilberersatz in Lampenfüllungen verwendet [16, S.1452].

Arsen (As) ist ein giftiges, nicht essentielles Schwermetall, das als Farbstoff, Pestizid und Holzschutzmittel Verwendung fand. Als Beimengung in sulfidischen Metallerzen wird es hauptsächlich aus Hüttenbetrieben als Luftschadstoff emittiert. Die toxikologische Bedeutung von Arsen beruht unter anderem auf seiner chemischen Ähnlichkeit mit Phosphor. Arsen ist in der Lage Stoffwechselwege zu unterbrechen an denen Phosphor beteiligt ist [17, S. 181ff]. Akute und chronisch toxische Wirkungen sind bekannt, wie z.B.: Hautveränderungen, Schädigungen der Schleimhäute und der Atemwege, neurologische Störungen und Leberschäden bis hin zur Bildung bösartiger Tumore. Arsen und seine Verbindungen gelten daher als krebserregende Arbeitsstoffe für die kein MAK-Wert, sondern ein TRK-Wert von $0,1 \text{ mg/m}^3$ festgesetzt wurde [16, S. 260 ff]. Für Galliumarsenid ist keine akut oder chronisch toxische Wirkung bekannt. Galliumarsenid bildet jedoch an der Oberfläche mit Feuchtigkeit in Gegenwart von Luftsauerstoff eine dünne, in Wasser lösliche, giftige Arsenoxidschicht. Auch kann sich in Anwesenheit von bestimmten Metallen, beispielsweise Zink, flüchtiger, giftiger Arsenwasserstoff bilden. Bei Erwärmung über 300°C zersetzt sich Galliumarsenid und es entsteht Arsen.

3.4.2.4 Cadmium-Tellurid und Kupfer-Indium-Diselenid

Cadmium-Tellurid (CdTe) und Kupfer-Indium-Diselenid (CIS)-Verbindungen stellen die neue Generation der Solarzellen dar. Durch die Kombination mehrerer unterschiedlicher Halbleitertypen und die Herstellung mittels Dünnschichttechnik erhofft sich die Industrie eine deutliche Kosten- und Energiereduktion auf der einen Seite und andererseits eine Steigerung der Wirkungsgrade. Bei der CdTe-Zelle handelt es sich, wie auch bei der Galliumarsenid-Zelle, um einen direkten Halbleiter, der es ermöglicht, in einer nur wenige Mikrometer dicken Schicht das Sonnenlicht vollständig zu absorbieren. Diese Form der Solarzelle besitzt eine äußerst hohe Stabilität. Im Laborversuch wurden Wirkungsgrade von 10 – 14% erreicht. Wobei Wirkungsgrade von 10% bereits mit sehr kostengünstigen Herstellungsverfahren erreicht werden konnten. Bei CIS-Zellen

konnten Wirkungsgrade bis 17% erreicht werden, wobei kaum Abnutzungserscheinungen an der Zelle beobachtet wurden. Auch hier gelang die Herstellung der Solarzelle mit sehr kostengünstigen Aufdampfverfahren[10, S. 213 ff]. Durch den Einsatz der toxischen Elemente Cadmium und Selen (Arsen wurde bereits vorher diskutiert) stellt sich vermehrt die Frage der ökologischen Unbedenklichkeit der Solarenergie. Im Vergleich mit anderen Energieversorgungsoptionen konnte jedoch nachgewiesen werden, dass diese neuen Technologien keine großen Umweltrisiken darstellen. Es wurde festgestellt, dass die Cadmiumfreisetzung bei der Verwendung der CdTe-Zellen pro Kilowattstunde etwa der von Kohlekraftwerken mit neuer Filtertechnik entspricht. Im Vergleich zu Nickel-Cadmium-Akkumulatoren weisen Cadmium-Tellurid-Zellen sogar einen um mehr als den Faktor tausend geringeren Cadmiumbedarf auf [20].

4 Ökologische Betrachtungen zur Photovoltaik

Trotz (oder gerade wegen) der offensichtlichen ökologischen Vorzüge, die die Nutzung der Solarenergie gegenüber fossilen Energieträgern hat, ist zu klären, ob eine großmaßstäbliche Anwendung der Photovoltaik nicht auch unerwünschte ökologische Folgen haben könnte. Zwar sind schädliche Einflüsse während des Betriebes von PV-Anlagen auszuschließen, nicht jedoch bei ihrer Herstellung und Entsorgung. Der Einsatz toxischer Stoffe wurde bereits in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben. Die ökologischen Auswirkungen der insgesamt mobilisierten Stoffströme sowie die energetische „Amortisationszeit“ sollen im Folgenden betrachtet werden.

4.1 Stoffeinträge in die Umwelt

Die Emissionsbeiträge der PV-Industrie setzen sich aus prozessspezifischen und energetisch bedingten Emissionen im Bereich der Rohstoffgewinnung und -veredelung sowie der nachgeschalteten Entsorgung, Verwertung oder Recycling zusammen. Die Emissionen aus diesen zusätzlichen Prozessschritten gelten als „ökologischer Rucksack“, den das Solarmodul mit zu tragen hat. Das bedeutet, dass für die Beurteilung der ökologischen Sinnhaftigkeit dieser Energiequelle auch vor- und nachgelagerte Produktionsprozesse wie z.B. das Züchten der Siliziumkristalle, die dabei verwendeten Chemikalien und Einsatzstoffe sowie deren Wiederverwendung oder Entsorgung berücksichtigt werden müssen. Um diesen „ökologischen Rucksack“ noch weiter zu erleichtern, wird zur Zeit an der Entwicklung entsprechender Recyclingprozesse gearbeitet. Glas und Silizium lassen sich einfach wiederverwerten. Problematisch ist allein die Auflösung des Modulverbundes, der auch Kunststoffe wie Ethylen-Vinyl-Acetat enthält. Neben der Energieeinsparung könnten auch deutliche Kostenreduzierungen durch Wiederverwertung der Solarzellen erreicht werden. Zukünftig werden Solarmodule so konstruiert werden, dass ein vollständiges stoffliches Recycling möglich ist [20].

4.2 Energieaufwand und Energierückzahlzeit

Für die Produktion eines Moduls mit einer Leistung von $50 W_p$ werden insgesamt ca. 4.813 MJ Primärenergie benötigt. Nahezu 65% davon fallen für die Roh- und Reinstsiliziumherstellung an. Für die Herstellung der Zelle selbst werden nur rund 13% der Energie benötigt. Eine Energieeinsparung im Produktionsbereich lässt sich nur durch eine Verringerung der Waferdicken realisieren, was jedoch wiederum nur auf Kosten der bruchsicHERen Handhabbarkeit der Wafer möglich ist [21]. Eine Zusammenfassung der Zahlen findet sich in Tab. 1.

Tab. 1: Primärenergiebedarf bei der Produktion von Si-Wafern

Produkt	Waferdicke [μm]	Energieverbrauch [MJ]
Solarmodul, $50W_p$ Modulwirkungsgrad: 13%	150	2.899
	300	4.813
	450	5.734

Aus der in Abb. 10 dargestellten Abhängigkeit lässt sich die Notwendigkeit der Entwicklung in Richtung Dünnschichttechnologie, die bereits im vorangegangenen Kapitel angesprochen wurde, erkennen. Dabei ist außerdem zu berücksichtigen, dass die Gesamtstromabgabe eines Solarmoduls unabhängig von der Dicke seiner Zellen ist. Wird also bereits bei der Zellenproduktion Energie gespart, wirkt sich diese Tatsache weiter vorteilhaft auf die Energieamortisation des Moduls aus. So können sich derzeitige Amortisationszeiten von ca. 3 Jahren auf weniger als 12 Monate verbessern. Das bedeutet, dass Solarmodule in einem Zeitraum zwischen einem und drei Jahren jene Energie wieder „erwirtschaftet“ haben, die zu ihrer Produktion benötigt wurde. Dann steht ihnen allerdings noch eine Lebenszeit von ungefähr 25 (!) Jahren für die Energieproduktion zur Verfügung.

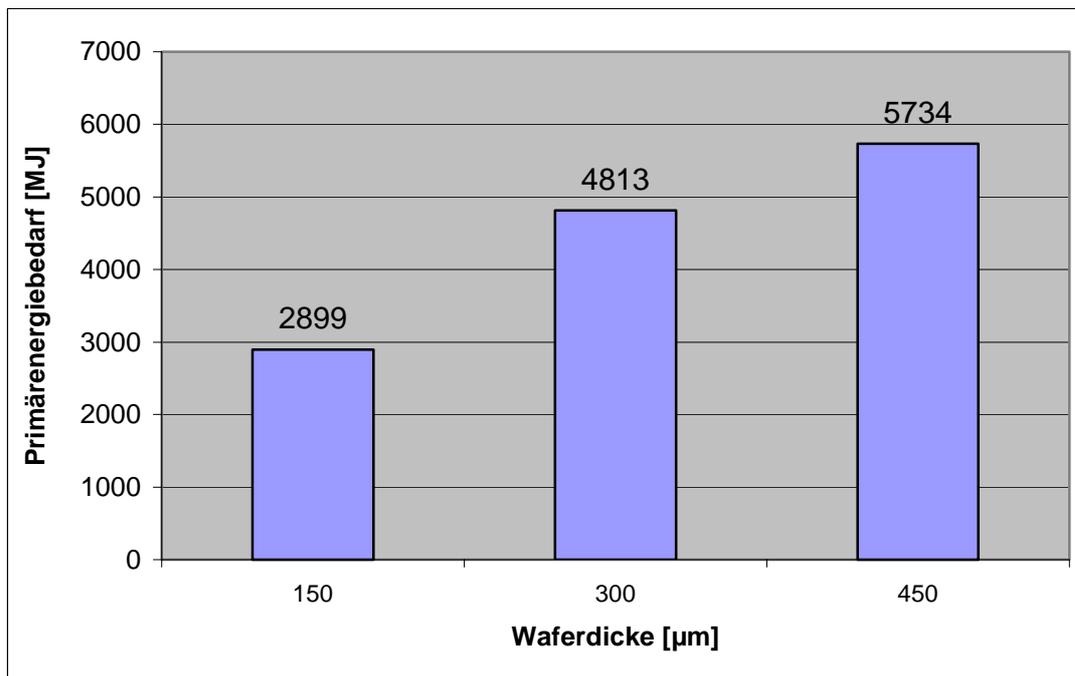


Abb. 10: Darstellung der Abhängigkeit des Primärenergiebedarfs von der Waferdicke

4.3 Möglichkeiten der Verwertung

Die Nachfrage nach photovoltaischen Produkten ist in den vergangenen Jahren sprunghaft angestiegen und für die folgenden Jahre wird ein weiteres Wachstum des Marktes mit ca. 20% jährlich prognostiziert. Mit der zunehmenden Verbreitung der Photovoltaik nimmt, mit zeitlichem Versatz, auch die Menge an schadhafte Modulen zu, die entsorgt werden müssen. Für Bayern würde das, legt man den Berechnungen die Zahlen aus Kapitel 3.3.2 zugrunde, ein derzeitiges Schrottaufkommen von rund 190 Mg pro Jahr bedeuten. Unabhängig vom derzeitigen Mengenaufkommen wird ein ansteigendes Abfallaufkommen in etwa proportional zum Wachstum des PV-Marktes erwartet. Obwohl Silizium, der Hauptrohstoff in der Solarindustrie, das zweithäufigste Element der Erdkruste darstellt, sind Gewinnung, Herstellung und Reinigung des Rohsiliziums sehr kosten- und energieintensiv. Auch werden dabei Hilfsmittel verwendet, wie z.B. Salzsäure, die durchaus als umweltrelevant einzustufen sind. Um diese solare Energieform von der „Wiege bis zur Bahre“ großflächig ökologisch zu gestalten, muss auch der Entsorgung bzw. Wiederverwendung Platz eingeräumt werden. Zu diesem Zweck gab es in den vergangenen Jahren in Deutschland bereits Forschungsprojekte, die im folgenden vorgestellt und diskutiert werden sollen.

4.3.1 Stand der Technik

Zur Zeit existieren keine gesetzlichen Verpflichtungen zur Sammlung und Rücknahme von Photovoltaikmodulen; auch die Frage der tatsächlichen Abfallart (Elektro- und Elektronikschrott ?) ist noch nicht geklärt, wie bereits in Kapitel 3.3.2 erwähnt. Die meisten Anlagenbetreiber haben, gemeinsam mit der Errichtung der PV-Anlage auch Wartungsverträge mit der Errichterfirma abgeschlossen, welche auch den Austausch schadhafter Module mit einschließen. Zur Zeit fallen, wenn überhaupt, Einzelmodule, jedoch nicht gesamte Anlagen zur Entsorgung an. Diese Module werden üblicherweise als hausmüllähnliche Abfälle entsorgt. Sogenannte Standardmodule für allgemeine Nutzungen stellen den überwiegend produzierten Modultyp dar. Sie sind meist mit einem Aluminium-Edelstahl- oder Kunststoffrahmen versehen und tragen an ihrer Rückseite eine Anschlussdose aus Kunststoff. Die zur Zeit verwendeten Solarzellen bestehen überwiegend aus mono- oder multikristallinem oder amorphem Silizium. Bei dem größten Teil der in den Modulen verwendeten Kunststoffe handelt es sich aufgrund der Lebensdauernforderungen um raumvernetzte Kunststoffe, die derzeit nur thermisch verwertbar sind. Die Metallteile und elektrischen Installationsmaterialien können über bereits vorhandene Wege der Metall- und Elektronikschrottverwertung zugeführt werden. Den größten Massenanteil am Photovoltaikmodul stellt das Abdeckglas mit 30 – 65% der Gesamtmasse dar. In der folgenden Tabelle sind die in PV-Modulen vorwiegend enthaltenen Stoffe sowie deren Verwertungsmöglichkeiten aufgelistet [22, S.4 ff].

Tab. 2: PV-Modulkomponenten und ihre Verwertungsmöglichkeiten

Modulkomponente	Materialien	Massenanteil [%]	Verwertungsmöglichkeit
Glas	Natron-Kalkgläser	30 – 65	Flach-, Guss-, Hohlglas, Fasern, Fritten
Verbundmaterial	EVA, Acrylate, PU u.a.	5 – 10	Thermisch
Rückseitenabdeckung	Polyester, Aluminium, Fluorpolymere, Stahl, Glas	0 – 10 (ohne Glas)	Thermisch, Metallkreislauf, Glasrecycling
Rahmen	Aluminium, Stahl, PU, PC u.a.	0 – 20	Thermisch, Metallkreislauf, Kunststoffrecycling
Anschlussdosen	ABS, PC, PPO, PET u.a.	0 – 5	Thermisch, Kunststoffrecycling
Kabel	Kupfer, Polyolefine, synthet. Kautschuke u.a.	Ca.1	Metallkreislauf, Elektronikschrottreycling
Dichtmassen	Silikone, Polyacrylate, PE-Schäume, PU	0 – 10	Thermisch
Füllstoffe	Al ₂ O ₃ , TiO ₂ , CaCO ₃ , SiO ₂ , C u.a.	Ca.1	Füllstoffe, mineralische Zuschläge
Solarzellen aus krist. Silizium	Si, Ti, Ag, Sn, Pb, Cu, Ni, Pd u.a.	5 – 10	Keramikherstellung, Legierungszuschläge, Solarzellenherstellung
Alternativ: Dünnschichtsolarzellen	Amorphes Si, Al, Sn, Pb, In, CdTe, S, Mo u.a.	<1	Chemisch und mechanisch, Metallkreislauf
Elektrische Verbinder	Cu, Sn, Pb, Al, Ag u.a.	Ca. 1	Metallkreislauf

4.3.2 Wirtschaftlichkeit

Um dem Anspruch einer „grünen“ Energie gerecht zu werden, wird auch in der Solarindustrie das Schließen noch offener Kreisläufe angestrebt; das bedeutet neben einer wirtschaftlichen Sammel- oder Rücknahmelogistik auch umweltschonende Verfahren zur Verwertung zu entwickeln. Folgende Entwicklungsziele wurden definiert:

- Integrationsmöglichkeiten in vorhandene Verfahren
- Trennung in reinstmögliche Komponenten
- Möglichst weitgehende Rückführung der Komponenten
- Verwendung energiesparender Trennverfahren
- Berücksichtigung des Recyclings in der Ökobilanz
- Langfristige, technische Machbarkeit.

Bislang konnten nur einige dieser Ziele erfüllt werden. Wie bereits erwähnt, werden anfallende Kleinmengen zur Zeit als hausmüllähnliche Abfälle entsorgt. Zerkleinerte Module werden auch als Zuschlagstoffe in Baustoffen oder als Ofenzuschläge in der Ferrosiliziumherstellung eingesetzt. Diese Praktiken sind jedoch weder aus ökologischer noch aus ökonomischer Sicht akzeptabel. Aufgrund verschiedener Zielsetzungen, z.B. Erwerb des Umweltschutzengels des Umweltbundesamtes, ergibt sich auch die Verpflichtung zur Rücknahme defekter Produkte durch Händler und Hersteller. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Trennung von Dünnschichtmodulen aufgrund ihrer Bauweise ökonomisch betrachtet aus heutiger Sicht keinen Sinn macht, da im Gegensatz zu Solarmodulen aus kristallinem Silizium keine größeren Erlöse zu erwirtschaften sind. Eine Kostendeckung wäre lediglich über eine Annahmgebühr zu erreichen. Doch es ist fraglich, ob ohne gesetzliche Verpflichtungen bzw. bei der bestehenden Unklarheit bezüglich der Anwendbarkeit der Elektro- und Elektronikaltgeräte-Richtlinie der EU [9] (siehe Kap.3.3.2) überhaupt die nötigen Rücklaufmengen zu erwarten sind. Erste Recyclingversuche bis Mitte der Neunziger Jahre zielten in erster Linie auf die Aufspaltung der Module in möglichst reine Fraktionen ab. Allerdings wurden diese Versuche nur im Labormaßstab betrieben und es wurde auch schnell klar, dass die zu erzielenden Fraktionen bestenfalls ein Downcycling der Module ermöglichen würden und somit nur mit geringen Verkaufserlösen zu rechnen wäre. Man erkannte, dass nur über die Rückgewinnung der unbeschädigten Solarzellen (Wafer) aus kristallinem Silizium eine Kostendeckung für eine Verwertung erzielt werden kann [22, S.6 ff.]

4.3.3 Recycling von Solarmodulen und Solarzellen

In ersten Versuchen wurden die Siliziumzellen durch Oxidation der Kunststoffe in heißen Mineralsäuren aus dem Modulverbund gelöst und neuerlich zu Solarzellen verarbeitet. Der hohe Bedarf an Salpetersäure und die Entstehung von metallischen und organischen Abbauprodukten erwiesen sich als nachteilig. Einen weiteren Ansatz stellte der Versuch dar, Siliziumwafer durch thermischen Abbau der Kunststoffverbunde in einem Wirbelbettreaktor aus dem Modul zu lösen, was auch gelang. Die thermische Trennung der Solarmodule wurde intensiv untersucht. Es stellte sich heraus, dass es sich dabei um ein praktikables Recyclingverfahren handelt, das sich ab einer Menge von rund 10.000 m² zu recycelter Modulfläche als wirtschaftlich erweist. [23, S.78 ff.]. Der letzte Stand des Solarzellenrecyclings besteht aus einem zweistufigen Prozess, der sich in einen thermischen und einen chemischen Verfahrensschritt unterteilen lässt. Gestützt auf die Versuchsergebnisse beschrieben in [21], wird auch hier der Siliziumwafer thermisch aus dem Modul gelöst, wobei die umgebenden Kunststoffe restlos verbrannt werden. Die verblei-

benden Komponenten Glas, Rahmen, metallische Verbinder, Solarzellen und Füllstoffe werden manuell getrennt, sortenrein gesammelt und einer weiteren Verwertung zugeführt. Die Solarzellen werden in mehreren Ätzschritten von anhaftenden Oberflächenverunreinigungen gereinigt und erfüllen nach diesem Reinigungsschritt wieder die üblichen Qualitätsanforderungen, so dass die Zellen wieder zu einem Solarmodul weiterverarbeitet werden können. Diese Technik ist zum einen kostengünstiger als die Wafer-Neuproduktion und zum anderen erspart dieses Recycling ca. 80% jener Primärenergie, die zur Produktion eines neuen Wafers benötigt würde. Die übrigen verbleibenden Elemente des Moduls wie Abdeckglas oder Rahmen können den hierfür vorgesehenen Stoffkreisläufen wieder zugeführt werden. Selbst Bruchstücke von Solarzellen können nach dem Reinigen durch Ätzen wieder eingeschmolzen und zur Waferherstellung verwendet werden.

Auch bei diesem Verfahren ist die Rückgewinnung der Dünnschichtzellen nicht wirtschaftlich. Die dünnen Schichten können durch Sandstrahlen oder Ätzung entfernt werden. Amorphe Zellen können in begrenzten Maßen im Floatglasprozess eingesetzt werden. Beim Recycling von Verbindungshalbleitern wie z.B. Cadmium-Telluridzellen sind zusätzlich entsprechende Sicherheitsvorkehrungen und Umweltauflagen zu beachten, da toxische Stäube und Lösungen anfallen können [22, S. 8 ff.].

5 Ausblick und Empfehlungen

Aufgrund der vorliegenden Forschungsergebnisse lässt sich feststellen, dass ein Recycling von kristallinen Solarzellen ohne Qualitätseinbußen möglich ist. Um diese Tatsache auch im industriellen Maßstab zu beweisen, wurde im Juli 2002 in Freiberg, Sachsen, mit Fördermitteln des Bundes der Grundstein zu einem Pilotprojekt für das Recycling von Solarzellen und Solarmodulen in der Praxis gelegt. Die Industriereife des vorhin beschriebenen Verfahrens soll in drei Jahren erreicht sein. Diese Anstrengungen zeigen, dass es durchaus möglich ist, den Stoffkreislauf für diese Art der Energiegewinnung zu schließen und somit den ökologischen Rucksack weiter zu erleichtern. Zukünftig sollen Solarmodule so konstruiert werden, dass ein vollständiges stoffliches Recycling möglich ist. Diese positive Stoff- und Energiebilanz kann durch fossile oder nukleare Energiegewinnung nie erreicht werden, da diese Formen der Energiebereitstellung in allen ihren Lebensphasen, von der Gewinnung über den Einsatz bis hin zur Entsorgung, immer auf endliche Primärenergieträger angewiesen sind und zudem zu entsorgende Reststoffe wie z.B. Aschen, Abwärme und Abgase anfallen. Die erneuerbaren Energiegewinnungstechnologien eröffnen dagegen die einmalige Chance, die benötigten Sonnenenergiewandler selbst mit Sonnenenergie herzustellen und die notwendigen Rohstoffe im geschlossenen Kreislauf zu führen. Die Auswirkungen auf Mensch und Umwelt werden damit auf ein sehr geringes Maß reduziert. Um diese Kreislaufführung sowohl für solarthermische Anlagen als auch für Photovoltaikkomponenten zu ermöglichen, ergeben sich folgende Möglichkeiten:

- Nur ausreichende Mengenströme ermöglichen eine wirtschaftliche Wiederverwendung und Wiederverwertung von solartechnischen Komponenten. Daher sollte in erster Linie auf die Einrichtung von Rücknahmemöglichkeiten und Sammelsystemen hingearbeitet werden. Die Rücknahme von defekten Komponenten könnten durch einen Wartungsvertrag zwischen Kunden, Vertrieb und Hersteller sichergestellt werden. Der Abschluss solcher Verträge wird bereits durchgeführt, auch die Rücknahme zu Reparaturzwecken findet bereits statt. Beide Möglichkeiten sollten noch stärker aufgegriffen und eingeführt werden. Insbesondere öffentliche Bauträger mit Großprojekten sollen in ihren Aufträgen Verpflichtungen zur Rücknahme defekter Komponenten festlegen, um diese Möglichkeit der Sammlung und Reparatur weiter zu forcieren.
- Die Möglichkeit defekte Teile, besonders von Photovoltaikmodulen, aus dem Modulverbund zu lösen und den funktionierenden, verkleinerten Bauteil anderweitig, z.B. bei Parkautomaten o.ä. wieder einzusetzen sollte in Betracht gezogen werden.
- Der Einsatz einzelner Komponententeile, wie der Deckgläser und der Alu- oder Edelstahlrahmen in den entsprechenden Kreisläufen stellt eine weitere Möglichkeit, zumindest der teilweisen, Kreislaufschließung dar.
- Sollte keine der o.g. Optionen zur Verfügung stehen, müssen die solartechnischen Anlagen als hausmüllähnlicher Abfall (Bauschutt oder Baustellenabfälle) einer gesetzeskonformen Entsorgung zugeführt werden.

Die obengenannten Empfehlungen stellen den derzeitigen Stand der Verwertungs- und Entsorgungspraxis für Solarthermie- und Photovoltaikanlagen dar und erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Die Forschungsarbeiten und Überlegungen zur Kreislaufführung dieser relativ jungen Technologie der Energieerzeugung stecken noch im Anfangsstadium. Mit Hochdruck wird an der Beantwortung der offenen Fragen gearbeitet, wie z.B.:

- Fallen defekte Solarmodule unter die EU-Richtlinie für Elektro- und Elektronikaltgeräte?
- Ist das Recycling von Solarmodulen wirtschaftlich?

- Welche Umweltrelevanz haben neue Materialien wie Cadmiumtellurid oder Kupfer-Indium-Diselenid?
- Wie könnte ein flächendeckendes Sammelsystem für Solarkomponenten aussehen und ab welcher Menge ist es wirtschaftlich?

Durch die Kooperation vieler verschiedener Stellen, wie z.B. der Industrie, der öffentlichen Hand, des Handels und dem Gesetzgeber ist ein baldiger Fortschritt nicht nur in der industriellen Entwicklung dieser Technologien sondern auch im Wissen um die Verwendung, Verwertung und Entsorgung der anfallenden Materialien und Komponenten zu erwarten.

Abkürzungen

%	Prozent
°C	Grad Celsius
Abb.	Abbildung
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
EEG	Erneuerbare Energien Gesetz
EU	Europäische Union
EVA	Ethyl-Vinyl-Acetat
KrW-/AbfG	Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz
kWh	Kilowattstunden
kWp	Kilowatt peak
m	Meter
m ²	Quadratmeter
Mg	Megagramm
Mio.	Millionen
mm	Millimeter
MWh	Megawattstunden
o.ä.	oder ähnliches
o.g.	oben genannt
PV	Photovoltaik
sog.	sogenannte
u.a.	und andere
V	Volt
z.B.	zum Beispiel

Literaturverzeichnis

- [1] **BGBI. I 1994**, Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen, (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz –KrW-/AbfG), i.d.F. 2001
- [2] **Witzel W., Seifried D.**, „Das Solarbuch – Fakten, Argumente, Strategien“. Förderverein Energie- und Solaragentur Regio Freiburg e.V. (fesa), 2000
- [3] **Brockhaus Mensch-Natur-Technik**, Technologien für das 21. Jahrhundert, Leipzig, Mannheim; 2000
- [4] **Pontenagel Irm (Hrsg.)**, Das Potential erneuerbarer Energien in der Europäischen Union – Ansätze zur Mobilisierung erneuerbarer Energien bis zum Jahr 2020, Berlin, Heidelberg; Springer-Verlag, 1995
- [5] **Wokaun A.**, Erneuerbare Energien, Teubner Studienbücher – Chemie, Stuttgart, Leipzig; Teubner, 1999
- [6] **Hadamovsky H.-F., Jonas D.**, Solarstrom – Solarwärme: Technik der Photovoltaik und Solarthermie, Vogel, Würzburg, 1996
- [7] **Strauß F., Jahrbuch Erneuerbare Energien 2001**, Stiftung Energie-Forschung Baden-Württemberg (Hrsg.), Bieberstein-Fachbuchverlag, Radebeul, 2001
- [8] http://www.dfs.solarfirmen.de/dokumente_themen.html
- [9] **Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über Elektro- und Elektronikaltgeräte**, 2000/0158 (COD), C5-0486/2002, Brüssel, 8. Nov. 2002
- [10] **Goetzenberger A., Voß B., Knobloch J.**, Sonnenenergie: Photovoltaik, Teubner –Studienbücher Physik, Stuttgart: Teubner, 1997
- [11] **Rexroth S. (Hrsg.)**, Gestalten mit Solarzellen – Photovoltaik in der Gebäudehülle, Heidelberg: Müller 2002
- [12] **European Commission, Directorate-General for Energy**, Photovoltaics in 2010, Luxembourg: Office for official Publications of the European Communities, 1996
- [13] <http://www.solarwatt.de/>
- [14] **Abfallwirtschaft, Hausmüll in Bayern – Bilanzen 2001**, Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (Hrsg.), Augsburg, 2002
- [15] **Butz Ch.**, PV 2001 – Markt, Akteure und Prognosen, Sarasin-Studie, Basel: November 2001
http://www.solarworld.de/photovoltaik/pages/markt_home_idx.htm
- [16] **Falbe J., Regitz M. (Hrsg.)**, Römpp Lexikon Chemie, 10.Auflage, Band 1, Stuttgart, New York, Georg Thieme Verlag: 1999
- [17] **Alloway B.J., Ayres D.C.**, Schadstoffe in der Umwelt – Maßnahmen zur Beurteilung von Luft-, Wasser- und Bodenverschmutzungen, Heidelberg, Berlin, Oxford: spektrum Akademischer Verlag GmbH, 1996

- [18] **Fent K.**, Ökotoxikologie: Umweltchemie–Toxikologie–Ökologie, Stuttgart, New York: Georg Thieme Verlag, 1998
- [19] <http://www.solarverkauf.de/Lexikon-Solar/lexikon-solar.html>
- [20] http://www.eurosolar.org/publikationen/oeko_pv.html
- [21] <http://www.solpro.de/albrecht.html>
- [22] **Warmbach K., Deutsche Solar AG**, SIDAF, Aktuelle Situation und Perspektiven in der Abfallwirtschaft, Recycling von Solarmodulen und Solarzellen – Rückgewinnung von Silizium und Verbindungshalbleitern, TU Bergakademie, Freiberg 15. – 16.4.2002
- [23] **Pilkington Solar International GmbH**, Untersuchungen zu den technischen Möglichkeiten der Verwertung und des Recyclings von Solarmodulen auf der Basis von kristallinem und amorphem Silizium, BMBF–Abschlussbericht, Gelsenkirchen, 1.10.1993 – 31.3.1998