

1 Photovoltaik

1.1 Entwicklung und Perspektive

Die Gewinnung von Energie direkt aus der Sonnenstrahlung kann für die Energieversorgung der Zukunft eine bedeutende Rolle spielen. Seit 1953 die erste Silizium-basierte Solarzelle bei Bell Labs hergestellt wurde, konnten große Fortschritte erzielt werden, sowohl beim Wirkungsgrad der Zellen als auch bei deren Produktionskosten. Dementsprechend beobachtete man in den letzten Jahrzehnten ein exponentielles Wachstum bei der globalen Stromerzeugung durch Photovoltaik (siehe Abb. 1).

Ein Maß für die Größe von Photovoltaik-Anlagen ist die Leistung in Megawatt-Peak (MW_p), also bei Norm-Bedingungen von 25°C , senkrechter Sonneneinstrahlung und einer durchquerten Luftmasse von AM1.5 (entspricht der durchquerten Atmosphärendicke bei 42° Zenitdistanz der Sonne, AM1 entspräche einem Winkel von 0° , also Mittag am Äquator) [1]. Dies kann unter Berücksichtigung des Breitengrades und der Witterungsverhältnisse am Aufstellungsort in die durchschnittliche Leistung der Anlage umgerechnet werden. Für Deutschland erhält man beispielsweise eine Ausbeute von $0,09W/W_p$ (Norddeutschland) bis $0,1W/W_p$ (Süddeutschland) [1].

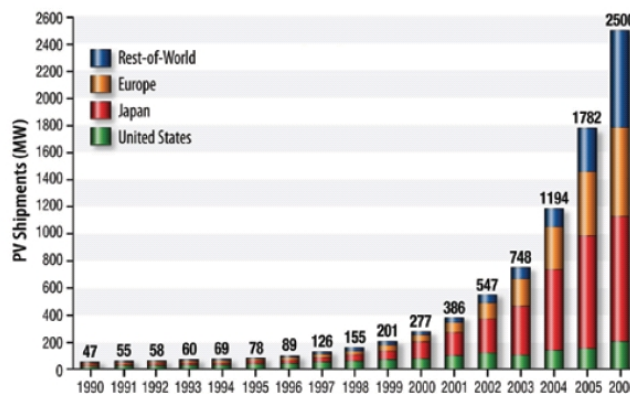


Abbildung 1: Die Entwicklung der globalen Stromerzeugung aus Photovoltaik, angegeben in Megawatt-peak (siehe Text), aus [2]

Wohl der bedeutendste Faktor für die weitere Etablierung von Solarzellen als Energiequelle ist die Entwicklung der Kosten pro erzeugter Kilowattstunde Solarstrom. Abbildung 2(links) zeigt, wie der Preis von Photovoltaik-Anlagen pro W_p mit steigendem Produktionsvolumen fällt. Für die kommenden Jahre sind verschiedene Prognosen (Lernkurven) angegeben, wobei der bisherige Verlauf der 80%-Kurve folgt (d.h. bei verdoppeltem Produktionsvolumen sinkt der Preis auf 80%). Das amerikanische Department of Energy gibt als Ziel für wirtschaftliche Stromproduktion einen Preis von 40 US-cent pro W_p an, was in den südlichen Staaten der USA einem Kilowattstundenpreis von etwa 2 US-cent entspricht. Dabei geht man von einer Lebensdauer der Anlage von 30 Jahren aus. Mit einem momentanen Preis von etwa $3,50US\$/W_p$ bei konventionellen Silizium-Zellen ist man davon jedoch noch weit entfernt [3].

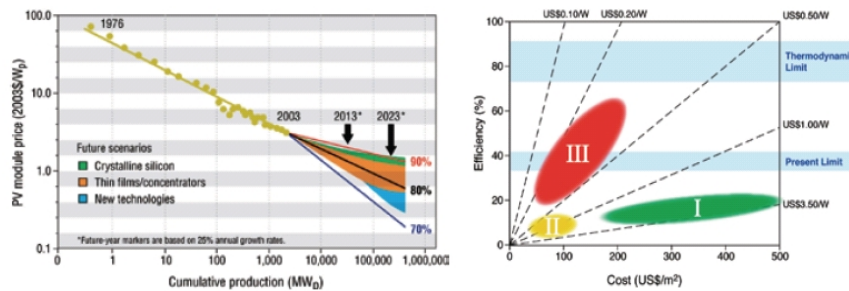


Abbildung 2: Die Relation zwischen Kosten pro W_p und Produktionsvolumen an Solaranlagen (links) und die Kosten- und Effizienzbereiche verschiedener Generationen von Solarzellen (rechts), die gestrichelten Linien geben den Preis pro Watt-Peak an, aus [2]

Die verschiedenen Typen von Solarzellen lassen sich in drei Generationen einordnen: Die erste Generation bezeichnet konventionelle Zellen auf Basis von kristallinem Silizium, die sich durch hohe Produktionskosten und Effizienzen im Bereich von 10 - 20% auszeichnen (Die Effizienz einer Zelle ist der Anteil der eingestrahlen Energie, der in elektrischen Strom umgewandelt wird). Diese Zellen werden momentan überwiegend eingesetzt, ihr Anteil an der Produktion liegt etwa bei 94% [3]. In der zweiten Generation findet man Dünnschicht-Solarzellen aus amorphem Silizium oder anderen Halbleiter-Materialien, wie etwa Cadmium-Tellurid, die in der Herstellung wesentlich billiger sind als die konventionellen, jedoch auch nicht ganz deren Effizienz erreichen. Der Preis pro Watt-Peak ist dennoch signifikant niedriger (siehe Abbildung 2(rechts)), allerdings sind viele dieser Zellen noch nicht marktreif, dementsprechend ist auch ihr Anteil an der gesamten Produktion noch so gering. In der dritten Generation findet man komplizierter aufgebaute Solarzellen, deren Effizienz weit über den bisher erreichten Werten liegen soll, bei kaum gesteigerten Kosten. Allerdings wurden solche Zellen noch nicht kommerziell produziert und auf dem Weg dahin muss noch erheblicher Forschungsaufwand erbracht werden [2]. Das angestrebte Ziel von $0,4 US\$/W_p$ scheint mit diesen Zellen erreichbar.

1.2 Sonneneinstrahlung

Es stellt sich nun die Frage, in welchem Umfang Stromerzeugung durch Photovoltaik dazu beitragen kann, den ständig wachsenden Energiebedarf der Erdbevölkerung zu decken. Im Jahr 2004 lag die durchschnittliche verbrauchte Leistung bei 15 Terawatt ($= 1,5 \cdot 10^{13} W$) [2]. Im Vergleich dazu liegt die auf die Oberfläche der Erde eingestrahelte Sonnenleistung bei etwa 160 Petawatt ($= 1,6 \cdot 10^{17}$), also 4 Größenordnungen höher! Dies entspricht einer Strahlungsdichte von $1 kW/m^2$ bei AM1,5 (also unter 42° Zenitdistanz der Sonne).

Abbildung 3 zeigt das Spektrum der Sonnenstrahlung vor und nach der Atmosphäre. Die Wellenlänge des Lichts ist ein Maß für die Energie der Photonen: Je kürzwelliger, desto höher die Energie. Man erkennt, dass der überwiegende Teil der Energie im sichtbaren Bereich (Wellenlänge 350 - 800 nm) liegt. Materialien, die für Photovoltaik eingesetzt werden sollen, müssen daher Licht in diesem Bereich besonders gut absorbieren.

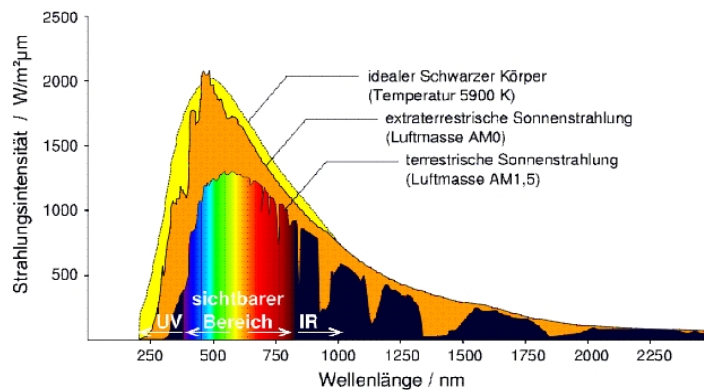


Abbildung 3: Spektrum des Sonnenlichts vor (AM0) und nach (AM1,5) Atmosphärendurchgang

1.3 Funktionsweise

1.3.1 Grundschema

Um zu verstehen, warum verschiedene Solarzellentypen sich in Kosten und Effizienz so stark unterscheiden, muß man die Funktionsweise der photovoltaischen Stromerzeugung auf mikroskopischer Ebene betrachten. Dieses Kapitel soll lediglich eine grobe Idee von der Funktionsweise einer Solarzelle vermitteln, für eine umfangreichere Erklärung sei auf die Quellen [5] und [1] verwiesen.

Abbildung 4 zeigt schematisch den Vorgang in der Zelle bei Absorption von Licht: Es wird zunächst ein Photon (d.h. ein „Licht-Teilchen“) absorbiert(1), wobei ein positiver und ein negativer Ladungsträger gebildet werden (2). Diese Ladungsträger bewegen sich durch Diffusion im Material(3), wobei ihre Lebensdauer hinreichend lang sein muss(4), um die sogenannte Raumladungszone zu erreichen.

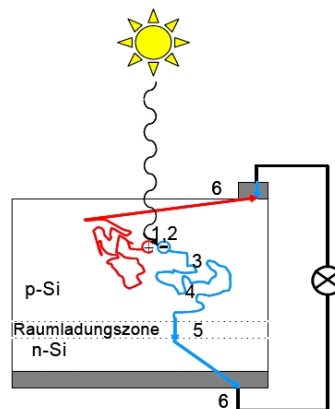


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Lichtabsorption in der Solarzelle, Beschreibung siehe Text, aus [1]

Die Lebensdauer der Ladungsträger wird dadurch begrenzt, dass der Um-

kehrprozess der Absorption, die Rekombination, mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit stattfinden kann. Dabei werden jeweils ein positiver und ein negativer Ladungsträger vernichtet und ein Photon ausgesandt. Entscheidend für die Stromerzeugung ist die Raumladungszone, ein Bereich im Festkörper, in dem durch geeignete Kombination von Materialien ein elektrisches Feld erzeugt wird, das positive und negative Ladungsträger trennt und sie in entgegengesetzte Richtungen beschleunigt(5). Die Ladungsträger werden dann an gegenüberliegenden Enden der Zelle mit Elektroden abgegriffen(6), wobei die der Sonne zugewandte Elektrode so konstruiert sein muss, dass sie das einfallende Licht noch zum Großteil in die Zelle durchlässt. Man verwendet hier streifenförmige Kontakte oder transparente leitfähige Oxide.

1.3.2 Halbleiter

Zur Herstellung von Solarzellen werden Halbleiter-Materialien eingesetzt. In Festkörpern stehen den Elektronen kontinuierliche Energiebänder zur Verfügung in denen sie Zustände besetzen, im Gegensatz zu einzelnen Atomen, wo nur diskrete Energieniveaus existieren. Die Quantenmechanik sagt aus, dass Elektronen der Klasse der Fermionen angehören, was bedeutet dass zwei Elektronen niemals den gleichen Zustand besetzen dürfen. Da die Teilchen das Bestreben haben, ihre Energie zu minimieren, besetzen sie also von unten nach oben die Zustände in den Bändern. Die Besonderheit bei Halbleitern ist, dass das oberste besetzte Band, das sog. Valenzband vom untersten unbesetzten Band, dem Leitungsband durch eine Lücke getrennt ist, deren Breite der Energie von sichtbarem Licht entspricht. Aus einer Symmetriebetrachtung (siehe z.B. [5]) folgt, dass volle und leere Bänder keinen Strom leiten können, der Halbleiter hat also zunächst schlechte Leitfähigkeit.

Man kann die Leitfähigkeit jedoch steigern, indem man Fremdatome in das Material einbringt, die entweder ein Elektron mehr (z.B. Phosphor in Silizium) oder eines weniger (z.B. Bor in Silizium) haben als die Atome des Halbleiters (siehe Abb. 5). Dadurch wird erreicht, dass entweder Elektronen im Leitungsband vorhanden sind (n-Dotierung) oder das Valenzband Löcher enthält (p-Dotierung) und somit Strom leiten kann. Die Löcher können dabei wie positiv geladene Teilchen behandelt werden.

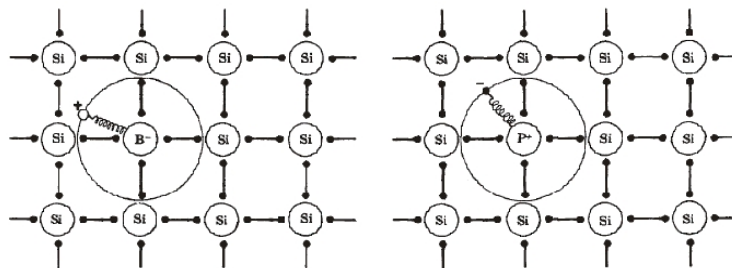


Abbildung 5: Durch Dotierung werden zusätzliche Elektronen (rechts) oder Löcher (links) eingebracht, aus [5]

1.3.3 pn-Übergang

Bringt man nun einen p-dotierten und einen n-dotierten Halbleiter zusammen, so grenzt eine Schicht mit vielen Elektronen an eine mit vielen Löchern. Im Grenzbereich können die Ladungsträger in das jeweils andere Material diffundieren und dort rekombinieren, die geladenen Atomrümpfe bleiben zurück. Sie erzeugen ein eingebautes elektrisches Feld (siehe Abb. 6), das in der Solarzelle genutzt werden kann um die Ladungsträger zu trennen.

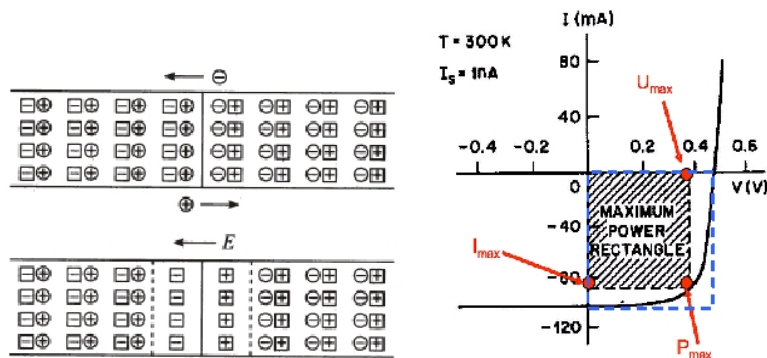


Abbildung 6: Bei Kontaktieren eines p-dotierten Halbleiters mit einem n-dotierten entsteht eine Raumladungszone(links), aus [5] und U-I-Kennlinie eines beleuchteten pn-Übergangs(rechts), aus [1]

1.3.4 Absorbtion von Licht

Bestrahlt man nun einen pn-Übergang mit Licht, dessen Energie größer ist als die Bandlücke, so können Elektronen durch Absorbtion eines Photons vom Valenzband ins Leitungsband angehoben werden. Es werden dabei zwei Ladungsträger erzeugt: das Loch im Valenzband und das Elektron im Leitungsband. Diese Ladungsträger werden im Feld der Raumladungszone in entgegengesetzte Richtung beschleunigt.

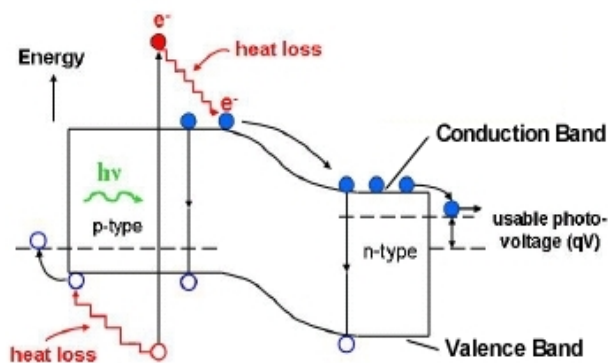


Abbildung 7: Energetische Darstellung der Photonabsorbtion mit Energiebändern in p- und n-Zone(rechts), aus [3]

Ist die Energie des Photons wesentlich höher als die Bandlücke, so geht der Überschuss in Form von Wärme verloren. Dieser Vorgang ist in Abbildung 7 bildlich dargestellt. Kontaktiert man nun die gegenüberliegenden Enden des pn-Übergangs außen über einen Verbraucher, so fließt ein Strom der sich aus der Kennlinie (siehe Abb. 6(rechts)) ergibt. Man beachte, dass im gestrichelten Bereich Spannung und Strom entgegengesetztes Vorzeichen haben. Gemäß $P = U \cdot I$ (Leistung = Strom \times Spannung) ist folglich die Leistung negativ, sie wird also von der Solarzelle erzeugt. Den Quotienten aus maximal abgreifbarer Leistung (schraffiertes Rechteck P_{max}) und dem Produkt aus maximalem Strom und maximaler Spannung ($U_{max} \cdot I_{max}$) bezeichnet man dabei als Füllfaktor.

1.4 Solarzellen auf Silizium Basis

1.4.1 Konventionelle Solarzellen aus kristallinem Si

Solarzellen werden in erster Linie aus dem Halbleiter Silizium hergestellt, da dieser in sehr reiner Form und in großen Massen industriell hergestellt wird. Das Rohmaterial wird durch Reduktion von Quarzsand mit Kohlenstoff gewonnen ($SiO_2 + C \rightarrow Si + CO_2$). Es wird dann im Siemens-Prozess mit Salzsäure zu gasförmigem Trichlorsilan umgesetzt und durch Dampfabscheidung (CVD: chemical vapor deposition) zu polykristallinem Silizium verfestigt. Dabei wird Bor zugegeben, um eine p-Dotierung zu erreichen. Die Größe der einzelnen kristallinen Strukturen (Korngröße) beträgt etwa 1 cm. Aus diesem „electronic grade“-Silizium wird dann im „Czochralski“-Prozess einkristallines Silizium gewonnen, das auch in der Mikrochip-Industrie verwendet wird. Dabei wird das Silizium eingeschmolzen und ein Keimkristall in die Schmelze getaucht. Durch langsames ziehen des Keimkristalls aus der Schmelze erreicht man, dass das erstarrende Silizium entlang der Kristallstruktur des Keims wächst. Man erhält einen Zylinder aus einkristallinem Silizium mit einem Durchmesser von etwa 20 cm. Dieser wird in $200 \mu m$ dicke Scheiben, die sog. Wafer zersägt.

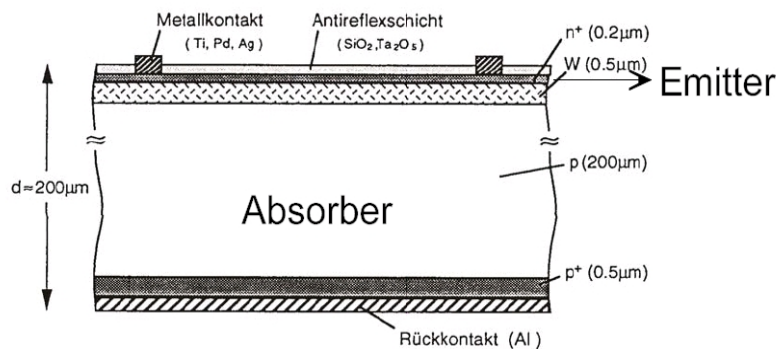


Abbildung 8: Querschnitt einer konventionellen Si-Solarzelle, aus [1]

Diese Wafer können nun zu Solarzellen verarbeitet werden, indem man Phosphor auf einer Seite eindiffundiert, wodurch eine dünne n-dotierte Schicht und somit ein pn-Übergang entsteht. Elektroden werden dann mittels Siebdruck aufgebracht. Zum Schluß wird eine Anti-Reflex-Schicht auf der Oberfläche ab-

geschieden, die dafür sorgt, dass ein möglichst großer Anteil des einfallenden Lichts die Zelle passiert [1]. Abbildung 8 zeigt den Querschnitt einer solchen Zelle. Man kann auf den Choralski-Prozess auch verzichten, und Solarzellen aus polykristallinem Silizium herstellen. Die schlechteren elektronischen Eigenschaften des p-Si führen dann aber zu einem kleineren Wirkungsgrad von lediglich 13-15% gegenüber 15-17% bei kristallinem Si [1].

1.4.2 Dünnschicht-Solarzellen aus Si

Im Gegensatz zu konventionellen Zellen der Dicke $200\ \mu\text{m}$ weisen die Dünnschicht-Solarzellen lediglich eine Dicke von weniger als einem Mikrometer, also nur der ein- bis zweifachen Wellenlänge von sichtbarem Licht auf. Diese Zellen werden in einem völlig anderen Prozess gefertigt, und es ist auch kein teureres kristallines Silizium notwendig. Durch Magnetronspütern wird zunächst ein transparentes, leitfähiges Oxid auf ein Glassubstrat gebracht. Dann werden mittels Plasma-Dampfabscheidung (PECVD, plasma enhanced chemical vapor deposition) unter Zugabe von entsprechenden Zusatzstoffen zur Dotierung nacheinander eine p-dotierte, eine undotierte und eine n-dotierte Schicht von amorphem Silizium gewachsen. Die undotierte Schicht in der Mitte, die beinahe die gesamte Dicke der Zelle ausmacht, sorgt für eine Ausweitung der Raumladungszone über den gesamten Bereich der Zelle, und so eine effektivere Ladungsträgertrennung. Der Aufbau einer solchen Zelle ist auf Abbildung 9 zu sehen.

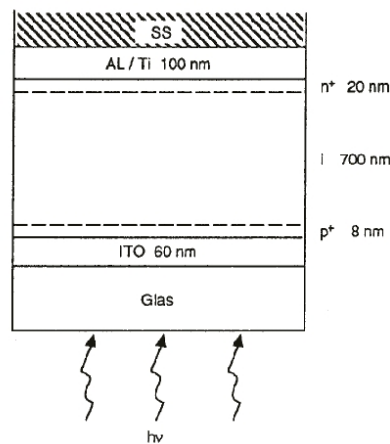


Abbildung 9: Querschnitt einer Dünnschicht Solarzelle aus amorphem Silizium, aus [1]

Der große Vorteil dieses Verfahrens ist, dass man bei der Herstellung nicht auf relativ kleine Wafer beschränkt ist wie beim kristallinen Silizium. Amorphes Silizium kann im Prinzip auf Quadratmeter-großen Substraten gewachsen werden, wodurch die Kosten gesenkt werden. Der ganze Prozess an sich ist weit weniger aufwändig als die Herstellung von kristallinem Silizium, der Quadratmeterpreis ist daher mit ungefähr $75\ \text{US}\$/\text{m}^2$ wesentlich günstiger als bei Solarzellen aus kristallinem Si mit $350\ \text{US}\$/\text{m}^2$ (Stand: 2005, siehe [3]). Die Verwendung von amorphem Silizium hat jedoch auch einen entscheidenden Nachteil: Aufgrund seiner schlechteren elektronischen Eigenschaften treten unerwünschte La-

dungsträgerrekombinationen verstärkt auf, was den Wirkungsgrad bis jetzt auf unter 10% begrenzt. Kommerzielle Zellen erreichen lediglich 6 bis 7%.

1.5 Energetische Amortisation

Ein wichtiges Kriterium zur Beurteilung von regenerativen Energiequellen ist die energetische Amortisationszeit. Darunter versteht man die Zeit, die eine Anlage benötigt, um die Energie zu erzeugen, die bei ihrer Herstellung verbraucht wurde. Es zeigt sich, dass sich die verschiedenen Photovoltaik-Technologien darin wesentlich unterscheiden.

So schneiden die Zellen aus einkristallinem Silizium hier mit durchschnittlich etwa 55 Monaten (siehe [4]) am schlechtesten ab. Polykristalline Zellen erreichen zwar einen etwas geringeren Wirkungsgrad, amortisieren sich aber durch die weniger energieaufwändige Herstellung schon nach etwa 38 Monaten. Einen noch besseren Wert erreichen die Dünnschicht-Solarzellen aus amorphem Silizium mit nur etwa 28 Monaten. Der vergleichsweise geringe Wirkungsgrad wird hier bei weitem überkompensiert durch die weitaus günstigere Prozessführung, die bei der Herstellung dieser Zellen zum Einsatz kommt. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass für eine Solaranlage aus Dünnschicht-Zellen bei gleicher Ausgangsleistung etwa doppelt so viel Fläche benötigt wird wie für eine Anlage aus poly-Si-Zellen, bedingt durch den niedrigen Wirkungsgrad.

Die genannten Zahlen beziehen sich auf eine Aufstellung der Solaranlage in Deutschland. Sie halbieren sich in etwa bei Aufstellung in Südeuropa.

Literatur

- [1] F. Falk. Vorlesungsskript Physik und Technologie von Solarzellen. 2006. IPHT Jena.
- [2] D. Ginley, M. Green, and R. Collins. Solar energy conversion toward 1 terawatt. *MRS Bulletin*, 33, 2008.
- [3] N. Lewis, G. Crabtree, et al. Basic research needs for solar energy utilization. *Report on the Basic Energy Sciences Workshop on Solar Energy Utilization*, 2005.
- [4] V. Quaschnig. Regenerative Energien und Klimaschutz. www.volker-quaschnig.de.
- [5] W. Wegscheider and D. Weiss. Vorlesungsskript Halbleiterphysik. 2006. Universität Regensburg.