

Universität Konstanz

FB Physik

Sommersemester 2005

Seminar: Wichtige physikalische Entdeckungen und ihre gesellschaftspolitische Relevanz (EPG 2)

Dozenten: Prof. Dr. U. Rüdiger, Prof. Dr. G. Schatz

Referentin: Svenja Wilking

Konstanz, den 24.06.2005

# Die Solarzelle -

Technische Realisierung und gesellschaftliche Relevanz



**Svenja Wilking**

LA Physik/ Französisch

Email: [Svenja.Wilking@web.de](mailto:Svenja.Wilking@web.de)

# Inhalt

<b>1. Einleitung .....</b>	<b>2</b>
<b>2. Aufbau und Funktion einer Solarzelle .....</b>	<b>2</b>
<b>2.1 Grundlagen .....</b>	<b>2</b>
2.2.1 Halbleiter .....	2
2.2.2 Innerer Fotoeffekt .....	3
2.2.3 Dotierung .....	3
<b>2.2 Technische Realisierung .....</b>	<b>4</b>
2.2.1 Aufbau .....	4
2.2.2 Funktion .....	5
2.2.3 Anwendung: Solarmodule .....	5
<b>2.3 Ausblick .....</b>	<b>6</b>
2.3.1 Steigerung des Wirkungsgrads .....	6
2.3.2 Reduktion der Herstellungskosten .....	7
<b>3. Gesellschaftliche Bedeutung der Solarzelle</b>	
<b>- Anforderungen an die Energieträger der Zukunft .....</b>	<b>8</b>
3.1 Versorgungssicherheit.....	8
3.2 Klimaschutz.....	9
3.3 Wirtschaftlichkeit .....	9
3.4 Akzeptanz .....	10
<b>4. Literaturverzeichnis .....</b>	<b>11</b>

# 1. Einleitung

Kann die Sonne – eine noch kaum genutzte Energiequelle – dazu beitragen, die Welt in Zukunft vor Energieengpässen zu bewahren, oder wird die Solartechnik viel zu ineffektiv und zu teuer bleiben? Von den einen wird sie hochgelobt als die Lösung aller Probleme, von anderen nur müde belächelt. Die Wahrheit liegt wie so oft vermutlich dazwischen.

Um einen Überblick über die Rolle der Solartechnik heute und in Zukunft zu vermitteln, soll dieser Vortrag zunächst einen Überblick über die Funktionsweise einer Solarzelle geben, um dann näher auf deren gesellschaftliche Bedeutung einzugehen. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Photovoltaik als Teil des Gesamtsystems „regenerative Energien“.

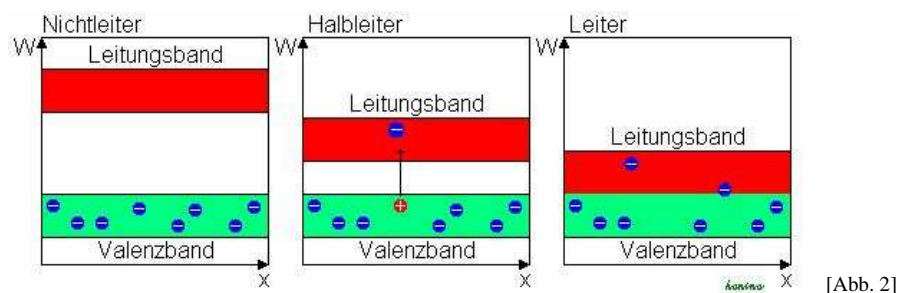
## 2. Aufbau und Funktion

### 2.1 Grundlagen

#### 2.1.1 Halbleiter

Leitende, halbleitende und nicht-leitende Materialien unterscheiden sich durch den Besetzungszustand ihres Valenz- und Leitungsbandes.

Das Valenzband eines Festkörpers entspricht dem energetischen Bereich der gerade noch im Atom gebundenen Elektronen. Elektronen, die sich im Leitungsband befinden sind dagegen nicht mehr fest gebunden, sondern beweglich, benötigen aber um in diesen Zustand zu gelangen eine höhere Energie. Bei 0 Kelvin ist dieses Band demnach auf jeden Fall unbesetzt. Zwischen den beiden Bändern befindet sich eine je nach Material unterschiedlich große Energielücke, in deren Bereich es aus quantenmechanischen Gründen keine Elektronenzustände geben kann, die ein Elektron also überwinden muss um aus dem Valenz- ins Leitungsband angehoben werden zu können. Diese sogenannte Bandlücke bestimmt so den Besetzungszustand der Bänder und damit die Leitfähigkeit eines Festkörpers, da Leitung nur bei teilbesetzten Bändern stattfinden kann:



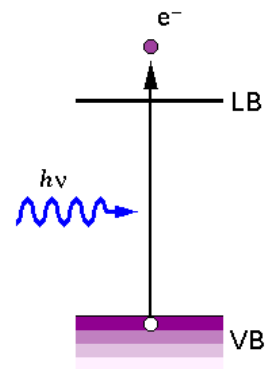
[Abb. 2]

Bei Nichtleitern ist die Bandlücke so groß, dass selbst bei hohen Energien alle Elektronen im Valenzband bleiben, das Leitungsband ist unbesetzt. Bei Leitern ist die Energielücke Null, es

gibt also bei jeder Temperatur  $T > 0\text{K}$  Elektronen im Leitungsband. Halbleiter besitzen eine Energielücke, die von Elektronen ab einer gewissen, materialabhängigen, Energie (z.B. Temperatur) überwunden werden kann. Ihre Leitfähigkeit ist also von der zugeführten Energie abhängig.

### 2.1.2 Innerer Fotoeffekt

Beim Fotoeffekt wird einem Material Energie in Form von Licht zugeführt, dessen Photonen absorbiert werden und dabei ihre Energie an im Atom gebundene Elektronen übertragen. Ist die so zugeführte Energie groß genug, das Licht also ausreichend hochfrequent, überwinden die Elektronen dadurch die Bandlücke und werden ins Leitungsband angehoben. Dies führt zu teilbesetzten Bändern mit beweglichen Elektronen im Leitungs- und nicht mehr besetzten Fehlstellen (Löchern) im Valenzband.



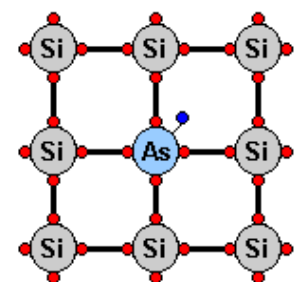
[Abb. 3]

Man erreicht somit eine Eigenleitung, die relativ schwach ist, aber über Veränderungen im Material (Dotierung) verstärkt werden kann.

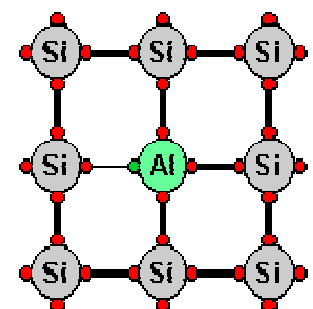
### 2.1.3 Dotierung

Unter Dotierung versteht man das gezielte Einbringen von Fremdatomen in einen Halbleiter (z.B. Silizium, 4. Hauptgruppe). Dabei verwendet man Materialien aus benachbarten Hauptgruppen, die also ein Valenzelektron mehr oder weniger als der reine Halbleiter besitzen.

Bei einem Fremdatom aus der nächsthöheren Hauptgruppe (z.B. Arsen, 5. H.gr.) wird das zusätzliche Elektron nicht für die Bindung benötigt, liegt aber energetisch nahe unter der Leitungsband-Kante des Halbleiters. Es kann dadurch bereits bei geringer Energiezufuhr ins Leitungsband angehoben werden. Auf diese Art und Weise erzeugte Bereiche mit Elektronenüberschuss werden „n-dotiert“ genannt.



Durch Einbringen eines Fremdatoms mit einem Valenzelektron weniger (z.B. Aluminium, 3. H.gr.) erhält der Halbleiter eine unbesetzte Fehlstelle, ein Loch, das energetisch nahe über der Valenzband-Kante des Halbleiters liegt und somit leicht von Valenzelek-



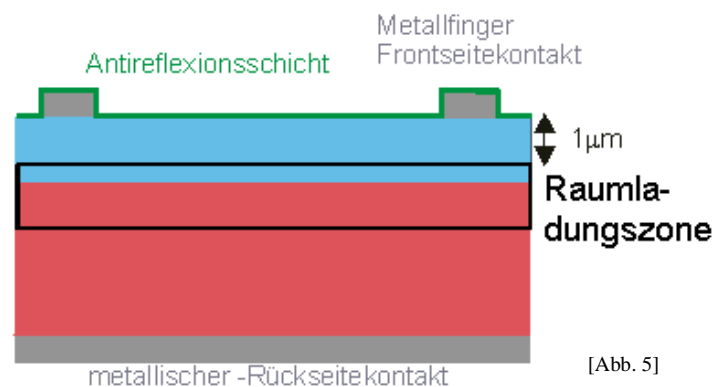
[Abb. 4]

tronen aus der unmittelbaren Umgebung besetzt werden kann. Das Loch verschiebt sich und hat denselben Effekt wie eine positive, im Valenzband wandernde Ladung. Halbleiterbereiche mit Elektronenmangel (sozusagen „Löcherüberschuss“) nennt man „p-dotiert“.

Dotierung ist somit eine Möglichkeit die Leitfähigkeit eines Halbleiters über die Zahl der eingebrachten Elektronen zu steuern bzw. zu erhöhen. Üblicherweise dotiert man ca. mit einem Fremdatom auf 1 Mio. Halbleiter-Atome.

## 2.2 Technische Realisierung

### 2.2.1 Aufbau



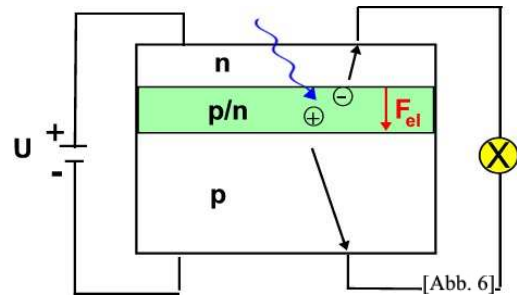
Eine Solarzelle besteht im Wesentlichen aus einem Halbleiter bestehend aus einem p- und einem n-dotierten Bereich. An der Kontaktstelle zwischen beiden Halbleiterbereichen, dem p-n-Übergang, füllen bewegliche Elektronen aus der n-dotierten Schicht freie Löcher im p-Bereich auf, wodurch eine an freien Ladungsträgern verarmte Zone entsteht. Da die Dichte an Löchern im p-Gebiet an der Kontaktstelle abnimmt, die der ortsfesten, negativ geladenen Dotanden aber konstant bleibt, bleibt eine resultierende negative Raumladung im p-Gebiet. Dasselbe geschieht analog im n-dotierten Bereich der Raumladungszone, der dadurch eine positive Ladung erhält. Es baut sich so ein elektrisches Feld am p-n-Übergang auf, das der Diffusion der beweglichen Ladungsträger in den jeweils anderen Bereich entgegenwirkt, so dass sich ein Gleichgewichtszustand einstellt, der den weiteren Übertritt von Elektronen über die Kontaktstelle verhindert. Dieser Effekt wird durch eine Vorspannung in Sperrrichtung zusätzlich verstärkt.

Der Halbleiter ist zur Sonne hin mit einer Antireflexionsschicht überzogen, die möglichst große Absorptionsraten erlaubt. Metallische Kontakte an Vorder- und Rückseite dienen zur Herstellung einer leitenden Verbindung zwischen den beiden entstehenden Polen und ermöglichen bei Belichtung einen Stromfluss.

### 2.2.2 Funktion

Trifft Licht auf die Zelle, das in der Raumladungszone oder in einem Abstand nicht größer als die mittlere Diffusionslänge der freien Ladungsträger im Halbleiter vom p-n-Übergang entfernt absorbiert wird, so dass das bewegliche Elektron die Möglichkeit hat, auf Grund von Diffusionsprozessen in die Raumladungszone zu gelangen, gibt das Photon auf Grund des Photoeffekts seine Energie an ein Elektron ab, das dadurch auf ein höheres Energieniveau gehoben wird.

Genügt die Energie zu Überwindung der Bandlücke des Halbleiters, so entstehen, wie unter 2.1.2 beschrieben, bewegliche Elektronen und Löcher, die gemäß ihrer Ladungen in entgegengesetzte Richtungen wandern: Das Elektron bewegt sich entgegen



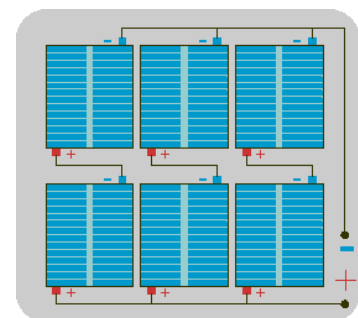
dem in der Raumladungszone aufgebauten elektrischen Feld, angezogen vom positiv geladenen Feldbereich des n-Halbleiters zum dahinter liegenden Frontseitkontakt. Analog wird das „Loch“ von der negativen Raumladung im p-Halbleiter angezogen und gelangt so zum metallischen Rückseitkontakt, wo es mit freien Elektronen rekombiniert, die über eine leitende Verbindung vom Frontseitkontakt nach hinten geleitet werden. Bei längerer Beleuchtung entsteht so ein kontinuierlicher Stromfluss, so dass an einem zwischen beiden Kontakten eingefügten Verbraucher eine Spannung anliegt. Es kann also Leistung abgegriffen werden.

Der Wirkungsgrad einer solchen Anordnung ist begrenzt, da nicht jedes Photon ein Elektron-Loch-Paar bildet und ein Elektron auch wieder mit einem Loch rekombinieren kann, wobei statt elektrischer Energie nur Wärme entsteht. Die Rekombinationsrate steigt dabei mit der Betriebstemperatur.

### 2.2.3 Anwendung: Solarmodule

Um die über den fotoelektrischen Effekt gewonnene Energie für den Verbraucher nutzbar zu machen, werden die einzelnen Solarzellen zu Modulen verschaltet. Diese bestehen aus einer Kombination aus parallel (zur Erhöhung der Stromstärke) und in Reihe (zur Erhöhung der Spannung) geschalteten Solarzellen.

Die Solarzelle liefert Gleichstrom, der zur Netzeinspeisung recht aufwändig über einen Wechselrichter dem Netz angepasst werden muss.



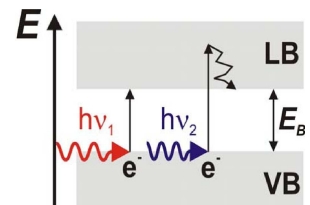
[Abb. 7]

Da der Wechselrichter selbst nur einen begrenzten Wirkungsgrad hat, liegt hier ein weiterer Schwachpunkt bzgl. der Effektivität einer Solaranlage. Dennoch beträgt die Energy-Payback-Time einer Solaranlage, also die Zeit, die durchschnittlich benötigt wird, um die zur Fertigung aufgewandte Energie wieder zu erwirtschaften ca. 3 Jahre. Bei einer Lebensdauer von mindestens 25 Jahren bleiben somit 23 Jahre zur Netto-Energieerzeugung. Aus energetischer Sicht lohnt sich die Investition daher auf jeden Fall.

## 2.3 Ausblick: Konzepte zur Steigerung der gewonnenen Energie pro eingesetzte Kosten

### 2.3.1 Steigerung des Wirkungsgrads $\eta = E_{in} / E_{out}$

Da erst Photonen ab einer gewissen Frequenz ausreichend Energie besitzen, damit die Elektronen, an die sie ihre Energie abgeben, die Bandlücke überwinden können, bleibt bei einer normalen Solarzelle der gesamte langwellige Teil des Sonnenspektrums ungenutzt.

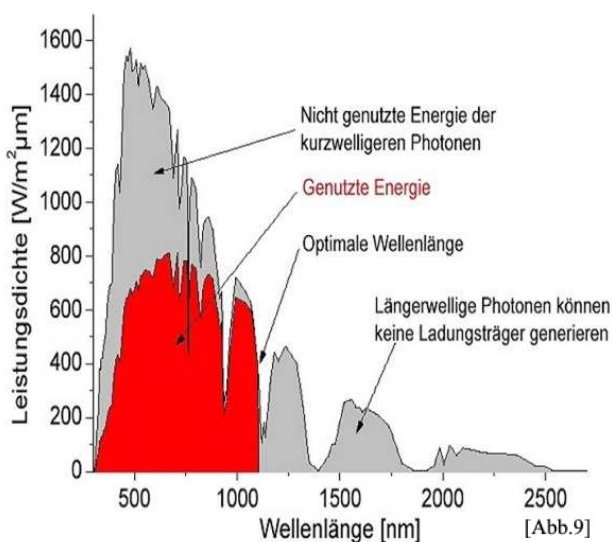


Erhalten die Elektronen zu viel Energie, geben sie den Überschuss in

[Abb. 8]

Form von Wärme ab, es wird also auch hier nur ein Teil der Photonenenergie effektiv genutzt.

Zur Energiegewinnung wird somit nur der in Abb. 9 rot gekennzeichnete Bereich benutzt.



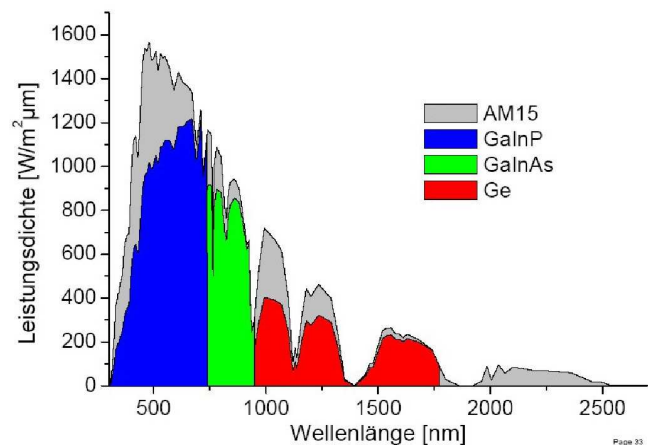
[Abb.9]

Beide Verluste lassen sich durch mehrschichtige Solarzellen stark verringern: In der ersten Schicht werden die Photonen mit der höchsten Energie absorbiert, die von ihnen angeregten Elektronen können eine relative große Bandlücke überwinden, also verhältnismäßig viel elektrische Energie erzeugen. In der zweiten werden etwas niederfrequenter absorbiert, in der letzten, einem Halbleiter mit relativ kleiner Bandlücke, wird schließlich auch der langwelligere Teil des Spektrums

absorbiert und in elektrische Energie umgesetzt.

Auf diese Art und Weise wird jedem Teil des Spektrums ein Halbleiter mit optimaler Bandlücke zugeordnet, was pro Spektralbereich eine bestmögliche Energieausbeute zulässt.

Abb. 10 zeigt den genutzten Teil des Sonnenspektrums<sup>1</sup> (AM 1,5) bei Verwendung einer dreischichtigen Solarzelle. Es können so Wirkungsgrade von bis zu 50 % erreicht werden, die Herstellung dieser Zellen ist aber durch die Kombination verschiedener Halbleitermaterialien aufwändig und für flächendeckende Anwendung zu kostenintensiv.



[Abb. 10]

### 2.3.2 Reduktion der Herstellungskosten

Da bereits knapp 40 % der Herstellungskosten einer Solarzelle für die Herstellung reiner Siliziumkristalle sowie deren Weiterverarbeitung zu Wafern anfallen, besteht in diesen Bereichen ein relativ großes Kostensenkungspotential.



Die eine Möglichkeit wäre hier den Materialbedarf durch den Bau dünnerer Zellen bis hin zu Folien zu minimieren, worunter allerdings Stabilität und Haltbarkeit leiden.

Zum anderen lassen sich evtl. auch Wafer mit relativ vielen kristallinen Defekten verwenden, was deren Herstellung wesentlich verbilligen würde. Da Defekte im Halbleiter aber dazu führen, dass Elektronen an diesen Stellen rekombinieren,

dann also nicht mehr zur Energiegewinnung zur Verfügung stehen, führt eine ungleichmäßige Kristallstruktur zu einer Verringerung des Wirkungsgrades.

Dieser Ansatz ist zusammen mit einigen anderen, z.B. der Entwicklung von Solarzellen auf organischer Basis, Gegenstand aktueller Forschung, es liegen hierzu aber noch keine serienreife Verfahren vor.

<sup>1</sup> Da die Sonne in Mitteleuropa nicht senkrecht, sondern durchschnittlich unter einem Winkel von ca. 40° in die Erdatmosphäre eindringt, legt sie den 1,5-fachen Weg durch die Atmosphäre zurück (Air Mass 1 = senkrechter Einfall). Dargestellt wird der Teil des Sonnenspektrums, der übrig bleibt, nachdem bereits gewisse Wellenlängen durch die Atmosphäre herausgefiltert wurden.

### 3. Gesellschaftliche Bedeutung der Solarzelle

#### – Anforderungen an die Energieträger der Zukunft

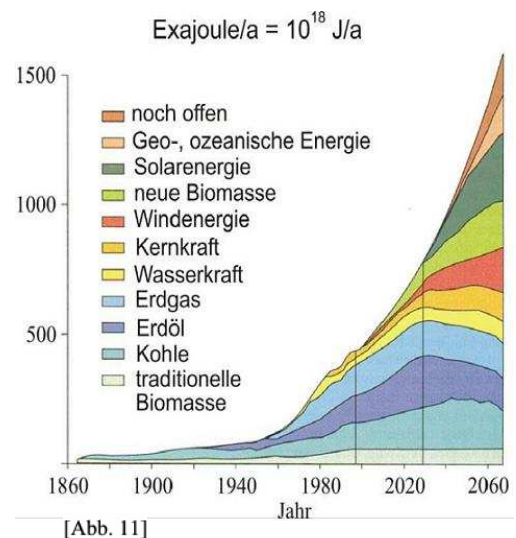
Durch die extrem starke Abhängigkeit von Wirtschaft und Infrastruktur vor allem in den Industrieländern bzw. den heutigen (noch) Schwellenländern von einer ungestörten Energieversorgung ergeben sich hohe Anforderungen an die Verfahren, mit Hilfe derer man versucht drohenden Energienengpässen entgegenzuwirken. Aktuelle Studien zufolge wird der Energiebedarf der Erdebevölkerung in den nächsten 50 Jahren auf über das doppelte des heutigen Standes ansteigen, bei auf Grund der Rohstoffsituation zwangsläufiger Abnahme fossiler Brennstoffe und der Kernenergie. Dies zwingt zu einigen grundlegenden Überlegungen zu alternativen Energiegewinnungsverfahren und führt zu der Frage, welche Aspekte dabei zu berücksichtigen sind.

#### 3.1 Versorgungssicherheit

Der erste maßgebliche Punkt ist die Unabhängigkeit von äußeren Umständen (z.B. dem Wetter) sowie die generelle Leistungsfähigkeit. Es muss gewährleistet sein, dass immer, selbst zu den Spitzen-Bedarfszeiten, ausreichend Energie zur Verfügung steht.

Beide Bedingungen werden zwar von den fossilen Energieträgern Öl, Gas, Kohle und Atomenergie momentan hinreichend gut erfüllt, diese Rohstoffe sind allerdings aktuellen Studien zufolge nicht einmal mehr 100 Jahre in ausreichender Menge vorhanden.

Die Förderung der fossilen Brennstoffe wird mit Abnahme der Vorräte immer schwieriger und teurer, das für die Kernspaltung benötigte Uran 235 ist Hochrechnungen zufolge noch maximal 70 Jahre vorhanden. Aber auch alternative Energiequellen sind heute noch keineswegs in der Lage, eine ähnliche Leistungsfähigkeit zu erreichen. Aus aktuellem Standpunkt lässt sich dieses Problem wohl nur durch eine allgemeine Effizienzsteigerung aller Energiegewinnungsverfahren sowie durch Kombination aller möglichen Energiequellen annähernd lösen. Außerdem sollte eine weiter ausgebaut internationale Vernetzung zur optimalen Ausschöpfung der Potentiale einzelner Länder sowie zum Ausgleich unterschiedlicher Spitzenbedarfszeiten dienen.

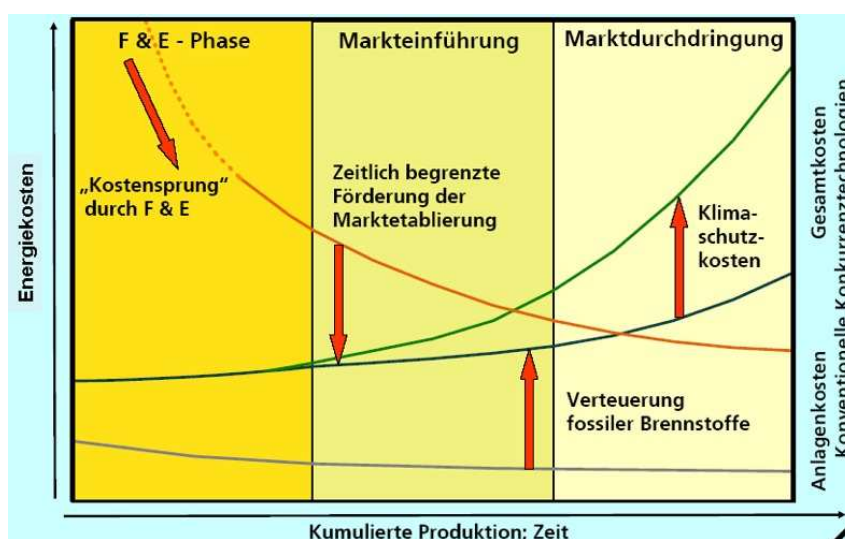


### 3.2 Klimaschutz

Eines der Hauptprobleme fossiler Energieträger ist das bei ihrer Verbrennung entstehende CO<sub>2</sub> bzw. dessen schädlicher Einfluss auf das Klima. Zur Verhinderung einer folgenschweren Klimaerwärmung verpflichteten sich die G8-Staaten (außer USA) über die Kyoto-Protokolle 1996 zur Reduktion ihrer CO<sub>2</sub>-Emissionen. Diese Verträge können nur eingehalten werden, wenn entweder weitgehend auf die Verbrennung fossiler Brennstoffe verzichtet wird, oder das CO<sub>2</sub> aus den Emissionen herausgefiltert und getrennt gespeichert wird, was mit einem erheblichen Kostenaufwand verbunden wäre. Der Verzicht auf fossile Brennstoffe müsste aber mit einer Steigerung des Anteils der erneuerbaren Energien auf ca. 44% der Gesamtenergie verbunden sein, was dem 8,5-fachen von heute entspricht. Dies kann momentan nicht geleistet werden.

### 3.3 Wirtschaftlichkeit

Der immer schwieriger werdende Abbau fossiler Brennstoffe führt zu einem immer stärkeren Anstieg der Rohstoffpreise. Zusammen mit den mit den Klimaschutz-Verträgen verbundenen Maßnahmen hat dies mittelfristig starke Preisanstiege bei den fossilen Energieträgern zur Folge. Auch die Kernenergie wird dann teurer werden, wenn Uran 235 nicht mehr natürlich vorliegt sondern aufwändig über Anreicherungsprozesse in Schnellen Brütern o.ä. hergestellt werden muss, wobei außerdem das äußerst giftige und (besonders in den falschen Händen) gefährliche „Abfallprodukt“ Plutonium entsteht. Letztendlich werden so sogar die regenerativen Energien preisgünstiger als die konventionellen.



[Abb. 12]

Dennoch ist auch eine Kostensenkung der regenerativen Energien unbedingt notwendig, insbesondere durch die Anhebung der Produktionszahlen. Nichtsdestotrotz kann in den nächsten Jahren nicht auf Subventionen verzichtet werden; nur dann können sich die neuen Produkte rechtzeitig und in ausreichender Menge auf dem Markt durchsetzen.

### 3.4 Akzeptanz

Die Akzeptanz der Bevölkerung für die Verfahren der Energiegewinnung ist maßgeblich für die Unterstützung von Politik und Wirtschaft, also für finanzielle Unterstützung und technische Weiterentwicklung.

Bedingung dafür ist Vertrauen in die Sicherheit der Systeme in zweifacher Hinsicht:

Zum einen in gesicherte, vom Ausland und eventuellen Krisen unabhängige Versorgung, zum anderen Sicherheit vor Anschlägen oder Sabotageakten. Ersteres lässt sich nur ohne die fossilen Rohstoffe Öl und Gas bzw. deren Import realisieren, letzteres nur ohne Kernspaltung sowie den damit verbundenen Gefahren der Radioaktivität.

Der Solarenergie kommt hier noch eine Sonderstellung zu: Durch den direkten Kontakt zur Bevölkerung zum Beispiel über Solaranlagen auf Einfamilienhäusern oder alltägliche, mobile Anwendungen (z.B. Taschenrechner) kann sie dazu motivieren, sich mit der Energieproblematik im Allgemeinen und mit den Möglichkeiten erneuerbarer Energien im Speziellen auseinanderzusetzen und damit eine Basis für mehr Energiebewusstsein, aber auch für eine breite Unterstützung der Öffentlichkeit für Verfahren der regenerativen Energieerzeugung schaffen.

Um jedoch den an die Photovoltaik gestellten Anforderungen gerecht werden zu können, sind weitere Anstrengungen in den Bereichen Grundlagenforschung und technische Realisierung, aber auch beim Ausbau der Infrastruktur nötig. Die zukünftige Entwicklung ist außerdem stark davon abhängig, ob und in welchem Maße dringend notwendige Subventionen zur Verfügung gestellt werden.

## 4. Literatur

### 4.1 Abbildungen

- Abb.1: [www.htldornbirn.at/photovoltaik.aspx](http://www.htldornbirn.at/photovoltaik.aspx)  
Abb.2: [www.wikipedia.de](http://www.wikipedia.de)  
Abb.3: [www.sol.physik.tu-berlin.de](http://www.sol.physik.tu-berlin.de)  
Abb.4: [www.schule-bw.de](http://www.schule-bw.de)  
Abb.5: [www.physik.uni-muenchen.de](http://www.physik.uni-muenchen.de)  
Abb.6: Svenja Wilking, Juli 2005  
Abb.7: [www.physik.uni-muenchen.de](http://www.physik.uni-muenchen.de)  
Abb.8: [www.solaranlagen.de](http://www.solaranlagen.de)  
Abb.9: S. Glunz, DPG-Tagung 2004  
Abb.10: S. Glunz, DPG-Tagung 2004  
Abb.11: Shell-Studie aus: G. Eisenbeiß, *Perspektiven für die Energie der Zukunft*, Spektrum der Wissenschaft, Dossier: Klima und Energie, Juni 1996.  
Abb.12: J. Nitsch, u.a.: „*Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland.*“ (BMU), März 2004.

### 4.2 Physikalischer Teil

- Lindner, H. u.a., *Taschenbuch der Elektrotechnik und Elektronik*, Leipzig 2004.
- [www.physik.uni-muenchen.de/leifiphysik/web\\_ph10/umwelt-technik/16solarzelle/index.htm](http://www.physik.uni-muenchen.de/leifiphysik/web_ph10/umwelt-technik/16solarzelle/index.htm)
- Würfel, P., Trupke, T., „*Solarzellen der dritten Generation*“ in: Botz, G. u.a. (Hg.), *Physik Journal*, 2. Jahrgang Dezember 2003.
- [www.lexsolar.de](http://www.lexsolar.de)
- [www.schule-bw.de](http://www.schule-bw.de)
- [www.wikipedia.de](http://www.wikipedia.de)

### 4.3 Gesellschaftspolitischer Teil

- J. Nitsch, u.a.: „*Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland.*“, Stuttgart u.a. Februar 2004.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hg.), „*Klimaschutz durch erneuerbare Energien.*“, Bonn u.a. 1999.