

TECHNIK



Photovoltaik

Eine Unterrichtseinheit zur Behandlung von
Solarzellen im Grundkurs 12/I

Peter Martin

Ingeborg-Drewitz-Gesamtschule, Gladbeck

2/90

Herausgeber:

Technik-Unterricht: Forum e.V. (TUF)
Memelstraße 75 4100 Duisburg 1

Inhalt

Seite

1.	Grundsätzliche didaktische und methodische Überlegungen	1
2.	Herstellung der benötigten Unterrichtsfunktionsmodelle	2
3.	Durchführung der Unterrichtseinheit:	3
3.1	Grundlegende Experimente	3
3.2	Naturwissenschaftliche Grundlagen	3
3.3	Optimierung der Betriebsbedingungen	4
3.4	Einsatzmöglichkeiten von Photovoltaiksystemen zur Bereitstellung elektrischer Energie unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit	5
3.5	Entwicklungsrichtungen im Bereich der Photovoltaik	7
4.	Literatur	9

Anhang

Schülerarbeitsblätter

Photovoltaik 01	Naturwissenschaftliche Grundlagen
02	Naturwissenschaftliche Grundlagen
03	Naturwissenschaftliche Grundlagen
04	Experiment: Hängt die abgegebene Leistung vom Widerstand ab?
05	Arbeitsblatt zur Fertigung eines Belastungsdiagramms
06	Belastungsdiagramme bei unterschiedlicher Einstrahlung
07	Kennlinie einer Solarzelle
08	Arbeitsblatt zur Fertigung einer Kennlinie
08a	Kennlinien bei unterschiedlicher Einstrahlung
09	Einfluß des Innenwiderstandes auf die Kennlinie
10	Einfluß der Einstrahlung und der Temperatur auf die Kennlinie
11	Nutzbare Flächen in der Bundesrepublik Deutschland
12	Einbindung eines Photovoltaikkraftwerks in das Versorgungsnetz
13	Kostenstruktur eines Photovoltaikkraftwerks
14	Energiekosten für verschiedene Leistungsbereiche
15	Kostenvergleich zwischen Diesel- und Photovoltaikanlage ($P = 1 \text{ kW}$)
16	Wasserstoffproduktion durch Photovoltaikanlagen
17	Entwicklungsziele für Photovoltaik-Systeme
18	Kristalline Solarzellen (Kurzbeschreibung)
19	Dünnschicht-Solarzellen (Kurzbeschreibung)
20	Anteile der absorbierten Sonnenstrahlung in Tandemzellen
21	Entwicklungsstand von Tandem-Solarzellen

1 . Grundsätzliche didaktische und methodische Überlegungen

Die folgende Unterrichtsreihe ist Teil des Grundkurses 12/I "Energieumsatz in technischen Systemen". Sie kann ergänzend bzw. vertiefend zur Behandlung des thermischen Kraftwerks die in den Richtlinien Technik festgelegten Unterthemen dieses Kurses konkretisieren (vgl. /3/ S.5).

Eine vertiefende Betrachtung der wirtschaftlichen Aspekte von Photovoltaiksystemen kann darüber hinaus im Grundkurs 13/I "Verbund technischer Systeme" folgende Unterthemen konkretisieren:

- Verschiedene Energieträger und ihre Bedeutung beim Energieverbund
- Wirtschaftlichkeit verschiedener Energieträger bei der Bereitstellung von Nutzenergie
- Entwicklungstendenzen.

Aus folgenden Gründen erscheint es mir sinnvoll, die Photovoltaik im Technikunterricht der gymnasialen Oberstufe zu thematisieren:

- das Thema hat vor dem Hintergrund der Energieproblematik und der drohenden Klimaveränderungen einen besonderen Stellenwert
- das Interesse der Schüler (und hier besonders der Schülerinnen) ist überdurchschnittlich
- mit ca. DM 100,- lassen sich die zur Durchführung notwendigen Materialien beschaffen
- die Aufbereitung der Materialien für den unterrichtlichen Einsatz ist nicht zeitintensiv (ca. 4h)
- die eingesetzten Unterrichtsfunktionsmodelle ermöglichen eine Vielzahl von handlungsorientierten Phasen im Unterricht
- das Thema wird von vielen Technikkollegen als Ergänzung zu den bestehenden Unterthemen im Grundkurs 12/I gewünscht (vgl. Berichte des Kultusministers über die Richtlinien und Lehrpläne für die gymnasiale Oberstufe, Sektor 4, 1988)/1/.

Zu diesem Thema gibt es ein praxisnahes Heft "Experimente mit Solarzellen" von Martin Volkmer/2/. Der überwiegende Teil der dort vorgestellten Experimente eignet sich für den Unterricht in der Sekundarstufe I. An einigen Stellen der folgenden Seiten wird auf dort abgedruckte Arbeitsblätter verwiesen, die auch im Unterricht der Sekundarstufe II eingesetzt werden können. Da alle TUF-Mitglieder ein kostenloses Exemplar dieses Heftes erhalten, werden die entsprechenden Arbeitsblätter hier nicht mehr abgebildet.

2. Herstellung der benötigten Unterrichtsfunktionsmodelle

Für den Einsatz im Unterricht eignen sich sowohl kristalline als auch Dünnschicht-Solarzellen. Gekapselte Solarzellen sind ebenfalls geeignet, jedoch sollte eine Mindestleistung von 0,25 Watt je Solarzelle gewährleistet sein. Der Preis der Zellen sollte nicht mehr als DM 15 je Watt Leistung betragen. Die Experimente dieser Unterrichtsreihe wurden mit einzelnen kristallinen Solarzellen (Siemens, 10 cm Durchmesser) durchgeführt, die wie folgt für den unterrichtlichen Einsatz präpariert wurden.

Der Solarzellengrundträger besteht aus einer 12cmx18cm großen 5mm-Sperrholzplatte, die auf zwei Dachlatten aufgeleimt ist. Die Solarzelle wird mit gleichmäßig verteiltem Holzleim auf die Sperrholzplatte aufgeleimt. Zuvor muß jedoch ein Kabel an der Unterseite der Zelle angelötet werden (Plus-Pol) und durch die Grundplatte auf eine 4mm-Einbaubuchse geführt werden.

Der Anschluß für den Minuspol wird direkt auf der Oberfläche der Zelle angelötet und ebenfalls auf eine 4mm-Einbaubuchse geführt.

Auf eine lichtdurchlässige Abdeckung zum Schutz der Solarzelle wurde verzichtet. Dieser preisgünstige Grundaufbau hat sich im Unterricht wegen seiner Robustheit bewährt. Der Platzbedarf ist durch die einfache Stapelbarkeit gering. Zur Vereinfachung des Aufbaus der Experimente empfiehlt es sich, auch die erforderlichen veränderbaren Widerstände auf ein Grundbrett (12cmx7cm) mit 4mm-Steckbuchsen fest zu montieren. Dieses Maß eignet sich ebenso für die Montage eines Verbrauchers (Solar-Motor, Conrad- Best.-Nr. 198080, DM 5,90).

3. Durchführung der Unterrichtseinheit

3.1 Grundlegende Experimente

Nach einer kurzen Wiederholung der Problematik der zukünftigen Energieversorgung kann über Lösungsmöglichkeiten nachgedacht werden. Aus der Vielzahl der Möglichkeiten kann mit Hilfe von geeigneten Medien die Photovoltaik als bearbeitenswertes Thema in den Mittelpunkt der folgenden Unterrichtsarbeit gerückt werden. In einer ersten Experimentierphase messen die Schüler die Leerlaufspannung und die Kurzschlußstromstärke. In einer folgenden Phase kann die Abhängigkeit dieser beiden Größen von der Solarzellenfläche gemessen werden. Hierzu eignen sich besonders die Arbeitsblätter *SOL 2.4 und SOL 2.5* aus dem Heft "Experimente mit Solarzellen" /2/.

Zur weiteren Einübung des Umganges mit der Solarzelle und den Meßgeräten können Schülerexperimente zur Reihen- und Parallelschaltung (*SOL 3.1 und SOL 3.2* /2/) durchgeführt werden.

Da zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit einer Solarzelle die Kenntnis der Leerlaufspannung und der Kurzschlußstromstärke nicht ausreicht, müssen die abgegebene elektrische Energie und Leistung in Abhängigkeit von der Bestrahlungsstärke gemessen und die Ergebnisse anschließend diskutiert werden.

3.2 Naturwissenschaftliche Grundlagen

Zentraler Aspekt dieser Phase ist selbstverständlich die Funktionsweise von Solarzellen. In welchem Umfang naturwissenschaftliche Anteile in den Technikunterricht einfließen, hängt von den Voraussetzungen der Lerngruppe ab: Vorwissen der Schüler, Schülerinteresse, Schwerpunktsetzung und verbleibende Unterrichtszeit. Die folgende Vorgehensweise erwies sich unter Berücksichtigung der genannten Bedingungen für die Lerngruppe als angemessen.

Mit Hilfe eines einfachen Experimentes (Abb. 1) läßt sich leicht der Diodencharakter einer unbeleuchteten Solarzelle zeigen. Als frühere Schüler des Grundkurses 11/1 verfügen sie über grundlegende Kenntnisse zur p- und n-Leitung (Diode, Transistor), so daß sie den Aufbau der Solarzelle entwickeln können. Das Arbeitsblatt 01 dient dann als Bestätigung. Zum prinzipiellen Verständnis der Funktionsweise reicht eine kurze Erläuterung der Inhalte des Arbeitsblattes aus. Schüler, die eine weitergehende Erklärung wünschen, erhalten außerdem die Arbeitsblätter 02 und 03.

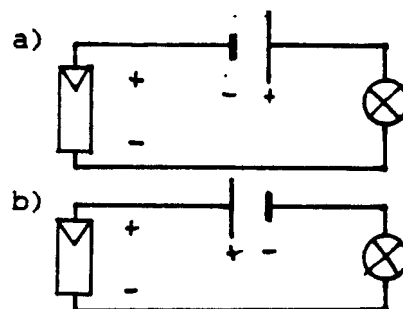


Abb. 1: Diodencharakter von Solarzellen

3.3 Optimierung der Betriebsbedingungen

Dem Einstieg dient die Frage "Wovon hängt die von der Solarzelle abgegebene Leistung ab?". Nach Sammlung der Schüleräußerungen (Fläche, Einstrahlung, η , Verbraucherwiderstand) zeigt sich, daß die Abhängigkeit vom angeschlossenen Verbraucher nicht ohne weiteres begründet werden kann. Diese Ungewißheit ist der Anlaß zu einer klärenden experimentellen Untersuchung. Hierzu erhalten die Schüler das Arbeitsblatt 04. Zu beachten ist hierbei, daß bei der Untersuchung einzelner Solarzellen zwingend digitale Meßgeräte verwendet werden müssen. Drehspulmeßinstrumente verfälschen wegen ihres Energieeigenbedarfes die Meßergebnisse stark.

Die so gewonnenen Meßwerte werden anschließend in das vorgefertigte Belastungsdiagramm (Arbeitsblatt 05) eingetragen. Es zeigt sich, daß die Spannung bei maximaler Leistungsabgabe ca. der halben Leerlaufspannung entspricht. Es empfiehlt sich, die bei der Betrachtung des belasteten Generators erarbeiteten Zusammenhänge ($P_{\max}$ wenn $R_i = R_a$) an dieser Stelle vertiefend zu wiederholen (s. auch Arbeitsblatt 09).

Führt man das Experiment bei unterschiedlichen Einstrahlungen (Glasscheiben auflegen oder Versuchsort verändern) erneut durch, so ist der Einfluß auf das Belastungsdiagramm deutlich zu erkennen und ist zu diskutieren (Arbeitsblatt 06).

In der Photovoltaik wird jedoch das Betriebsverhalten von Solarzellen üblicherweise mit Hilfe von Kennlinien (Arbeitsblatt 07) dargestellt. Diese Art der Darstellung läßt sich aus den Meßwerten und dem vorgefertigten Arbeitsblatt 08 leicht gewinnen. Die Festlegung des Punktes maximaler Leistung (MPP) erfolgt über eine Flächenbetrachtung unterhalb der Kennlinie.

Durch Vorstellung unterschiedlicher Kennlinien wird die Frage nach einer optimalen Kennlinie aufgeworfen. Mit Hilfe des Arbeitsblattes 09 lassen sich die Einflußmöglichkeiten bei der Herstellung von Solarzellen unter Optimierungsaspekten diskutieren. Neben diesen im Unterricht nicht zu verändernden Eigenschaften der Solarzelle hängt der Verlauf der Kennlinien noch von der Einstrahlung und der Temperatur ab. Beide Abhängigkeiten lassen sich im Unterricht über veränderte Lichtverhältnisse sowie kurzzeitiges Abkühlen der Solarzelle (Vereisungsspray) demonstrieren. Abschließend ist Arbeitsblatt 10 hinsichtlich der gegenläufigen Aussagen zu den optimalen Umweltbedingungen zu interpretieren.

3.4 Einsatzmöglichkeiten von Photovoltaiksystemen zur Bereitstellung elektrischer Energie unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit

Nach den eher grundlegenden Teilen der Unterrichtseinheit folgt nun eine Betrachtung der konkreten Möglichkeiten zur Nutzung der Sonnenenergie mit Photovoltaikanlagen. Mit Hilfe des Arbeitsblattes 11 lassen sich für den Bereich der Bundesrepublik Aussagen über die zur Verfügung stehenden Flächen und die erreichbare elektrische Leistung formulieren. Eine genauere Betrachtung der folgenden Nutzungsmöglichkeiten schließt sich an:

- a) Direkteinspeisung in das öffentliche Netz
- b) Produktion von Wasserstoff durch Elektrolyse
- c) Batteriegepufferte Systeme.

zu a)

Diese Möglichkeit läßt sich durch eine Betrachtung des RWE-Solarkraftwerks Kobern-Gondorf konkretisieren. Es bietet sich an, den Aufbau des Kraftwerks durch ein Schülerreferat in den Unterricht einzubringen. Neben der RWE-Veröffentlichung "Die Photovoltaikanlage Kobern-Gondorf, Informationen zur Technik und zum Betrieb der Anlage" /4/ eignet sich auch die gleichnamige VHS-Videocassette der RWE zur Übergabe an den referierenden Schüler. Das Arbeitsblatt 12 stellt schematisch die Anlage selbst sowie die Anbindung an das Öffentliche Netz zusammenfassend dar. Die Schüler sind darauf hinzuweisen, daß dieses Projekt (z.Z. $P_{\max} = 300\text{kW}$) in erster Linie der Forschung dient. Es sollen Erfahrungen gewonnen werden (vgl. /5/, S.9) über:

- Aufständigung der Solargeneratoren
- Optimierung der Verschaltung
- Umweltverträglichkeit
- unterschiedliche Wechselrichtertechnik
- unterschiedliche Solargeneratortypen
- Gesamtoptimierung.

Neben den technischen Aspekten dieser Nutzungsmöglichkeiten sind Berechnungen der Wirtschaftlichkeit von besondere Bedeutung für diesen Teil der Unterrichtsreihe. Das Arbeitsblatt 13 befaßt sich mit den zu veranschlagenden Investitions- und Stromerzeugungskosten für ein 10-MW-Kraftwerk in den Jahren 1992 und 2000. Arbeitsblatt 14 stellt Energiekosten verschiedenen Leistungsbereichen gegenüber und veranschaulicht so den Bereich der Wirtschaftlichkeit. Der Kostenvergleich zwischen einer Photovoltaik- und einer Dieselanlage (Wasserpumpe in Taiwan) auf Arbeitsblatt 15 weist die Wirtschaftlichkeit eines heute bereits arbeitenden Systems nach. Auf dem Gebiet solcher dezentralen Anlagen, besonders geeignet für die sonnenreichen Länder der Dritten Welt, wird die Solarindustrie sich weiterhin auch im Interesse künftiger Marktchancen engagieren.

zu b)

Ausgehend von einer Verdeutlichung des antizyklischen Verlaufes von Sonnenenergieangebot und der Verbrauchernachfrage mit geeigneten Medien kann die Erzeugung von Wasserstoff als Möglichkeit zur Speicherung der aus Sonnenenergie gewonnenen elektrischen Energie zu einem Unterrichtsschwerpunkt erklärt werden. Wiederum bietet sich an, ein z.Z. laufendes Projekt (Bayernwerke) genauer zu untersuchen. Falls dieser Unterrichtsteil durch ein Schülerreferat gefüllt werden soll, eignet sich zur Übergabe an den Referierenden die Veröffentlichung der Solar-Wasserstoff-Bayern GmbH "Das Solar-Wasserstoff-Projekt"/6/.

Der Vorgang der Elektrolyse läßt sich, falls kein leistungsfähiger Solargenerator zur Verfügung steht, mit ca. fünf in Reihe geschalteten Solarzellen im Unterricht als Demonstrationsexperiment durchführen. Der Versuchsaufbau und die notwendigen chemischen Grundlagen sind in dem Heft "Experimente mit Solarzellen" /2/, auf dem Arbeitsblatt SOL 3.9, angemessen zusammengefaßt. Abweichend von den dort benutzten NaOH-Perlen läßt sich auch mit einigen Tropfen 10%iger Schwefelsäure (Vorsicht) die gewünschte Ansäuerung zur Verbesserung der Leitfähigkeit des Wassers erzielen. Als Elektroden können Bleistiftminen verwendet werden.

Auch bei diesem Projekt ist eine Betrachtung der wirtschaftlichen Aspekte unerlässlich. Auf dem Arbeitsblatt 16 ist neben einer zusammenfassenden Darstellung der Solar-Wasserstoff-Technologie eine Kostenschätzung der unterschiedlichen Wasserstoffproduktionsverfahren tabellarisch dargestellt. Die dort aufgeführten Preise für die Produktion von Wasserstoff durch Photovoltaikanlagen eignen sich, eine ergiebige Diskussion über das Thema einzuleiten, in der den Aspekten *technisch machbar*, *wirtschaftlich vertretbar*, *ökologisch notwendig* eine besondere Bedeutung zukommt.

Aus der Diskussion können sich verschiedene Vertiefungsthemen ergeben, z.B.: Großprojekte in der Wüste bzw. im Weltraum, Transportsysteme für Wasserstoff, Transportkosten sowie die auf dem Arbeitsblatt 16 dargestellten Anwendungen.

zu c)

Die Analyse batteriegepufferter Photovoltaiksysteme kann mit Hilfe der im Heft "Experimente mit Solarzellen" /2/ abgedruckten Arbeitsblätter SOL 3.7 und SOL 3.8 durch Schülerexperimente erfolgen. Eine vertiefende Betrachtung der dabei auftretenden Meß-, Steuer- und Regelaufgaben wird z.Z. im Grundkurs 12/II erprobt.

3.5 Entwicklungsrichtungen im Bereich der Photovoltaik

Erklärtes Ziel aller Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten ist, die Herstellungskosten von Solarzellen drastisch zu senken. Es wird nach neuen, kostengünstigeren Basismaterialien sowie Herstellungsverfahren gesucht, die es erlauben, Solarzellen mit hohem Wirkungsgrad in großen Stückzahlen herzustellen. Das Arbeitsblatt 17 zeigt Forschungsschwerpunkte auf, die zur Reduktion der Investitionskosten und zur Erhöhung des Wirkungsgrades führen sollen. Aus der Vielzahl der dort aufgeführten Punkte wird im Unterricht der Schwerpunkt auf eine Betrachtung der Vor- und Nachteile der verschiedenen Solarzellentypen gelegt. Die folgende Darstellung der dazu notwendigen fachlichen Kenntnisse orientiert sich an einem Vortrag von D. Stahl, der anlässlich der GVC-Jahrestagung im September 1988 in Hannover gehalten worden ist mit dem Titel "Technik und Wirtschaftlichkeit von Photovoltaischen Anlagen" /7/.

Bei den heute bekannten Solarzellentypen unterscheidet man zwischen:

- Dickschicht-Zellen* (z.B. aus kristallinem Silizium) und
- Dünnschicht-Zellen* (z.B. aus amorphem Silizium).

Zur Dickschicht-Solarzelle:

Wegen des Entwicklungsvorsprunges durch Raumfahrtanwendungen sind heute noch Solarzellen aus kristallinem Silizium am weitesten verbreitet. Das Arbeitsblatt 18 enthält eine Kurzbeschreibung dieser Typen. Darin wird unterschieden nach:

- monokristallinen Solarzellen* und
- polykristallinen Solarzellen*.

Bei beiden Typen wird durch eine Anzahl von aufwendigen Prozessen mehr oder weniger hochreines Silizium in eine Kristallstruktur überführt und anschließend in relativ dicke Scheiben (0,4mm) zersägt, wobei jedoch rund 50% des eingesetzten Materials verlorengehen.

Monokristalline Silizium-Solarzellen

Diese Zellen erreichen im Vergleich zu anderen Typen (Ausnahme: GaAs-Solarzellen) die höchsten Wirkungsgrade (ca. 13 bis 16%).

Die Höhe des Wirkungsgrades hängt dabei besonders von der Reinheit des verwendeten Siliziums ab. Anfänglich hat man das durch Ziehen von Stäben aus der Si-Schmelze gewonnene, hochreine und teure Elektronik-Silizium verwendet. Zwecks Kostenoptimierung wurde jedoch die Anforderung an die Reinheit reduziert, um auf einfachere Herstellungsverfahren für Einkristalle ausweichen zu können.

Polykristalline Silizium-Solarzellen

Das gereinigte flüssige Silizium wird in Blöcke mit einer Kantenlänge von bis zu 40cm gegossen und gezielt abgekühlt. Dabei bildet sich eine begrenzte Anzahl von Kristallen, die alle in eine Richtung orientiert sind. Diese Blöcke werden dann entsprechend der Kristallausrichtung in Säulen mit einer Kantenlänge von 10 bis 15cm

zersägt, die wiederum wie der Einkristall in ca. 0,4mm dicke Scheiben gesägt werden. Der gegenüber monokristallinen Silizium-Zellen geringere Wirkungsgrad von 10 bis 13% kompensiert sich kostenmäßig durch das vereinfachte Herstellungsverfahren.

Zur Dünnschicht-Solarzelle:

Bereits seit längerer Zeit wird nach Verfahren gesucht, die Sägeverluste zu vermeiden und die notwendigen Schichtdicken zu verringern, um das teure Silizium sparsamer zu verarbeiten. Das Arbeitsblatt 19 zeigt eine Kurzbeschreibung der Dünnschicht-Solarzellen. Darin wird unterschieden nach :

- *Solarzellen aus amorphem Silizium*
- *Solarzellen aus Verbindungshalbleitern* und
- *Tandem-Solarzellen.*

Alle Zellen zeichnen sich durch extrem dünne (ca. $1\mu\text{m}$) Halbleiterschichten aus, die auf Trägermaterialien aufgebracht werden.

Solarzellen aus amorphem Silizium

Das amorphe Silizium wird heute fast ausschließlich mit dem relativ einfachen und energiesparenden Glimmentladungsverfahren bei weniger als 300 °C aus der Gasphase unter Verwendung von Silan (SiH_4) auf ein Trägermaterial abgeschieden. Dem Preisvorteil dieses Verfahrens steht allerdings ein deutlich schlechterer Wirkungsgrad (6 bis 8%) gegenüber.

Solarzellen aus Verbindungshalbleitern

Als Verbindungshalbleiter werden sämtliche Solarzellentypen bezeichnet, deren aktive Schichten aus verschiedenen Halbleitermaterialien zusammengesetzt sind. Die Kombination Kupferindiumselenid (CIS) wird als besonders entwicklungsfähig eingestuft. Der grundsätzliche Vorteil gegenüber kristallinen Siliziumzellen besteht wiederum in den deutlich dünneren Halbleiterschichten (ca. 2 bis $3\mu\text{m}$), die durch ein erheblich besseres Absorptionsverhalten ermöglicht werden. Der Wirkungsgrad erhöht sich bei diesen Zellen auf ca. 11%. In Zukunft sollen Solarzellen aus Siliziumgermanium-Verbindungen Wirkungsgrade von 20% erreichen können.

Tandem-Solarzellen

Solarzellen aus Verbindungshalbleitern nutzen je nach verwendetem Material immer nur einen bestimmte Frequenzbereich der Sonnenstrahlung aus. Bei der Tandem-Solarzelle wird versucht, vier Halbleitermaterialien so übereinander anzuordnen, daß ein größerer Bereich des Sonnenspektrums genutzt wird. Arbeitsblatt 20 stellt eine solche Kombinationsmöglichkeit dar. Der Inhalt der auf Arbeitsblatt 21 abgebildeten Zeitungsartikel läßt erwarten, daß die heute üblichen Dickschichtzellen bald durch kostengünstigere Tandemzellen mit vergleichbaren Wirkungsgraden ersetzt werden können.

4. Literatur

- /1/ *Modellversuch : Richtlinien und Lehrpläne für die gymnasiale Oberstufe
Berichte zu den Unterrichtsfächern, Technik*
Schriftenreihe des Kultusministers NRW, 1988

- /2/ Experimente mit Solarzellen, Martin Volkmer
Hamburgische Electricitäts-Werke AG, 1988

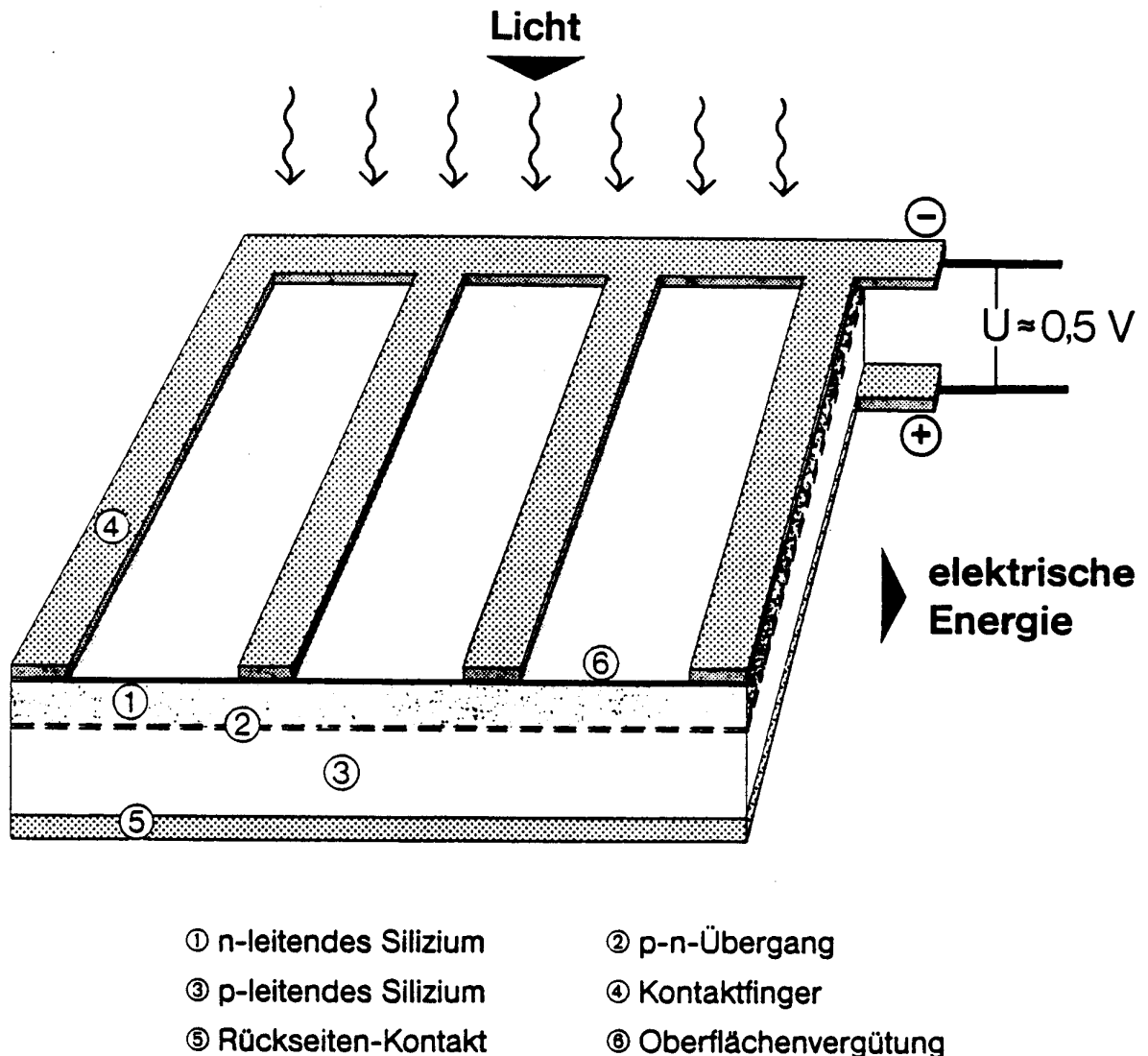
- /3/ Richtlinien für die gymnasiale Oberstufe - Technik, Heft 4726 der
Schriftenreihe: *Die Schule in NRW*, 1981

- /4/ Die RWE-Photovoltaikanlage Kobern-Gondorf
Informationen zur Technik und zum Betrieb der Anlage, RWE AG, Essen

- /5/ RWEinformiert Nr. 224: *Stromerzeugung durch Windenergie- und Photo-
voltaikanlagen*, Sonderdruck aus VGB Kraftwerkstechnik 11/1987

- /6/ Das Solar-Wasserstoff-Projekt, Gewinnung von Wasserstoff aus Solarenergie,
Speicherung, energetische Anwendung, Solar-Wasserstoff-Bayern GmbH,
Nymphenburger Str. 39, 8000 München 2

- /7/ Technik und Wirtschaftlichkeit von photovoltaischen Anlagen, Dietrich Stahl,
Vortrag anlässlich der GVC-Jahrestagung in Hannover, im September 1988

Solarzelle als Spannungsquelle

Am Übergang von der n-leitenden zur p-leitenden Schicht wird ein elektrisches Feld aufgebaut. Fällt Licht auf die Oberfläche, so entstehen Elektronen-Löcher-Paare, die durch dieses Feld getrennt werden. Zwischen den Kontaktfingern und dem Rückseitenkontakt kann eine Spannung von ca. 0,5V abgegriffen werden.

aus: Arbeitskreis Schulinformation Energie,

Lehrer-informationen "Strom aus regenerativen Energien, Beispiel: Photovoltaik"

Photovoltaischer Effekt

Die Wandlung von Sonnenenergie in elektrische Energie vollzieht sich innerhalb der Solarzelle in mehreren Phasen:

- Ausbildung eines elektrostatischen Feldes (RLZ)
- Absorption der auftreffenden Photonen
- Erzeugung von bipolaren Ladungsträgerpaaren
- Trennung und Diffusion der Ladungsträger

Der PN-Übergang, Raumladungszone: In der Abb. 15 ist das Schema eines PN-Übergangs dargestellt. Im stromlosen Zustand enthält die n-Schicht einen Überschuss an freibeweglichen Elektronen und die p-Schicht einen Überschuss an freibeweglichen Löchern (Defektelektronen). Beide Schichten sind nach außen hin elektrisch neutral, da den Ladungsträgern die entsprechenden, fest am Gitterplatz gebundenen Atomrümpfe gegenüberstehen: in der n-Schicht positiv ionisierte Donator-Atome und in der p-Schicht negativ ionisierte Akzeptor-Atome.

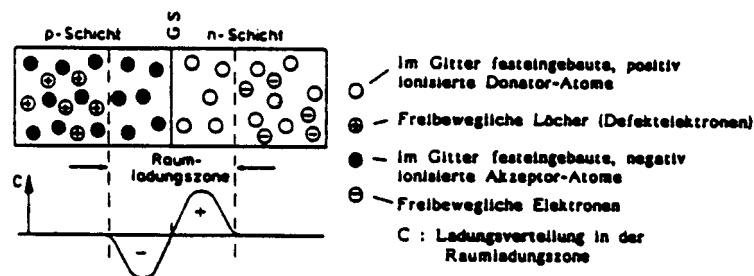


Abb. 15: Modellbild PN-Übergang

Infolge der Wärmebewegung ist jedoch das Ladungsgleichgewicht in der Grenzschicht (GS) zwischen der n- und p-Schicht gestört. Quasi freie Elektronen diffundieren ohne angelegte äußere Spannung aus der n-Schicht in die p-Schicht und rekombinieren dort größtenteils mit Löchern und umgekehrt. Infolge dieser Ladungsträgerdiffusion stellt sich in der Grenzschicht auf der p-Schicht-Seite ein Elektronenüberschuß, in der n-Schicht-Seite ein Löcherüberschuß ein. Dadurch entsteht eine Potentialdifferenz, die zur Ausbildung eines elektrostatischen Feldes innerhalb der sog. Raumladungszone RLZ führt. Nach Erreichen einer bestimmten Raumladung stellt sich ein thermodynamisches Gleichgewicht ein. Damit wird die Ladungsträger-Diffusion zum Stillstand gebracht.

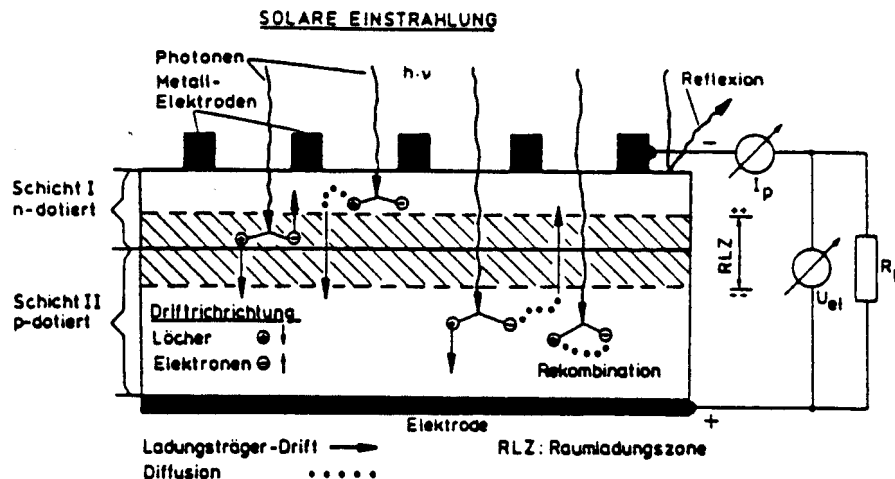


Abb. 16: Modellbild zum photovoltaischen Prinzip

Photonenabsorption: Zur Verdeutlichung der Umwandlungsprozesse ziehen wir die Abb. 16 heran. Bei unbeleuchteter Solarzelle herrscht in der Raumladungszone der beschriebene Zustand: Das elektrostatische Feld ist ausgebildet. Elektronen, die im Halbleiter Photonen absorbieren, können grundsätzlich nur Zustände einnehmen, die entweder im Valenz- oder Leitungsband liegen. Dazwischen besteht je nach Basismaterial ein mehr oder weniger großer Bandabstand E_g .

Das auftreffende Sonnenlicht setzt sich aus Photonen unterschiedlicher Energie ΔW zusammen. Nun werden in der Solarzelle nur diejenigen Photonen absorbiert, die eine Energie $\Delta W > E_g$ besitzen. Damit lassen sich drei Fälle unterscheiden:

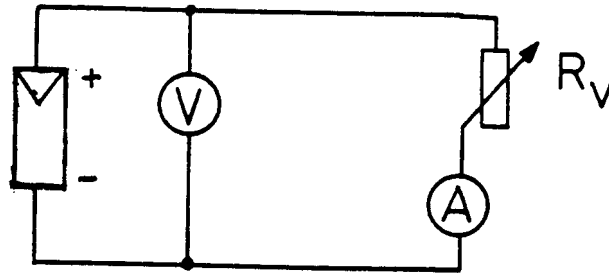
1. Photonenenergie $\Delta W < E_g$: Keine Absorption.
2. Photonenenergie $\Delta W = E_g$: Ein Elektron wird vom Valenzband in das Leitungsband gehoben. Die Energie des Photons ist damit vollständig umgewandelt ("aufgebraucht"). Durch diesen Elementarakt wurde ein Ladungsträgerpaar Elektron/Loch gebildet.
3. Photonenenergie $\Delta W > E_g$: Den Photonen wird gerade die Energie entzogen, die zur Überwindung der Bandlücke notwendig ist, der Überschuss wird in Wärmeenergie mit dem Betrag $E_w = \Delta W - E_g$ umgewandelt.

Trennung der Ladungsträger: Die erzeugten bipolaren Ladungsträgerpaare gelangen durch Diffusion in die Grenzschicht, falls der Elementarakt außerhalb dieser Schicht stattgefunden hat, werden dort unter dem Einfluß des bestehenden elektrischen Feldes getrennt und über die Grenzschicht hinweggetrieben. Die Ladungstrennung in der RLZ ist jedoch nur so lange möglich, wie die in dieser Zone angesiedelten Raumladungen noch nicht neutralisiert sind.

Durch diesen Vorgang entsteht ein Photostrom, dessen Stärke mit zunehmender Strahlungsintensität wächst. Er setzt sich aus dem Driftstrom der Raumladungszone und dem Diffusionsstrom der anderen Gebiete zusammen. Die sich ausbildende Leerlaufspannung U_0 ist durch die Höhe der Diffusionsspannung U_d begrenzt ($U_0 < U_d$) und liegt für Silizium bei max. 0,6 V. Will man höhere Photoerlaufspannungen erzielen, kann durch entsprechende Wahl des Basismaterials ein größerer Bandabstand erzeugt werden. Die Vergrößerung des Bandabstandes ist aber auch mit Nachteilen verbunden, da nur ein kleiner Teil der eingestrahlt Photonen über einen so hohen Energiebetrag verfügt, den vergrößerten Bandabstand (E_g) zu überwinden.

aus: Schmidt-Wohlbrand, Konrad "Kernenergie und regenerative Energien"
Technische Universität, Berlin 1986

EXPERIMENT:

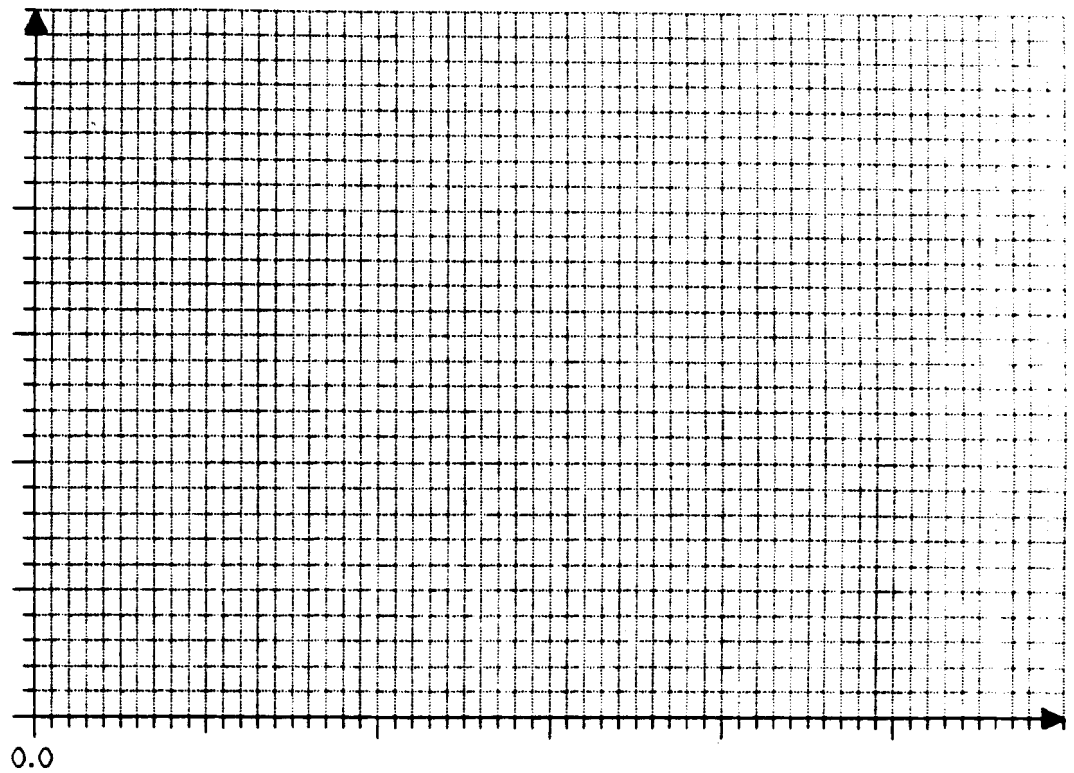


LEERLAUFSPANNUNG (U_0) =

KURZSCHLUBSTROM (I_K) =

[illegible][illegible]

$\frac{P}{\text{mW}}$



$\frac{P}{\text{mW}}$

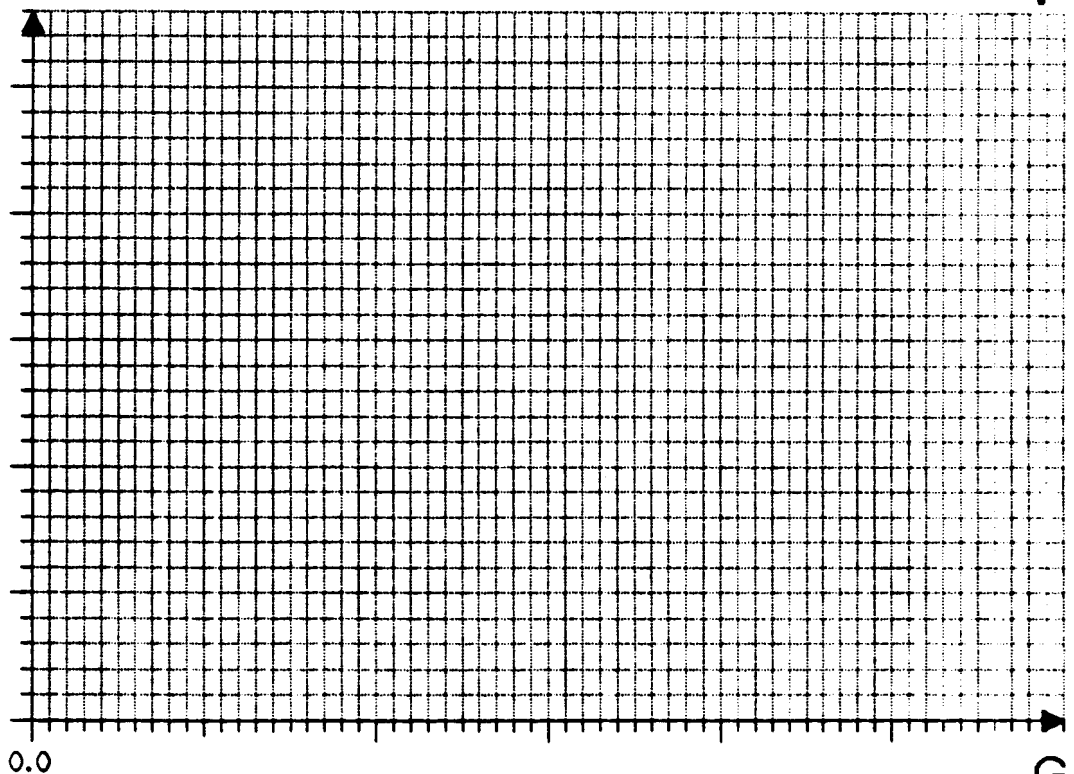
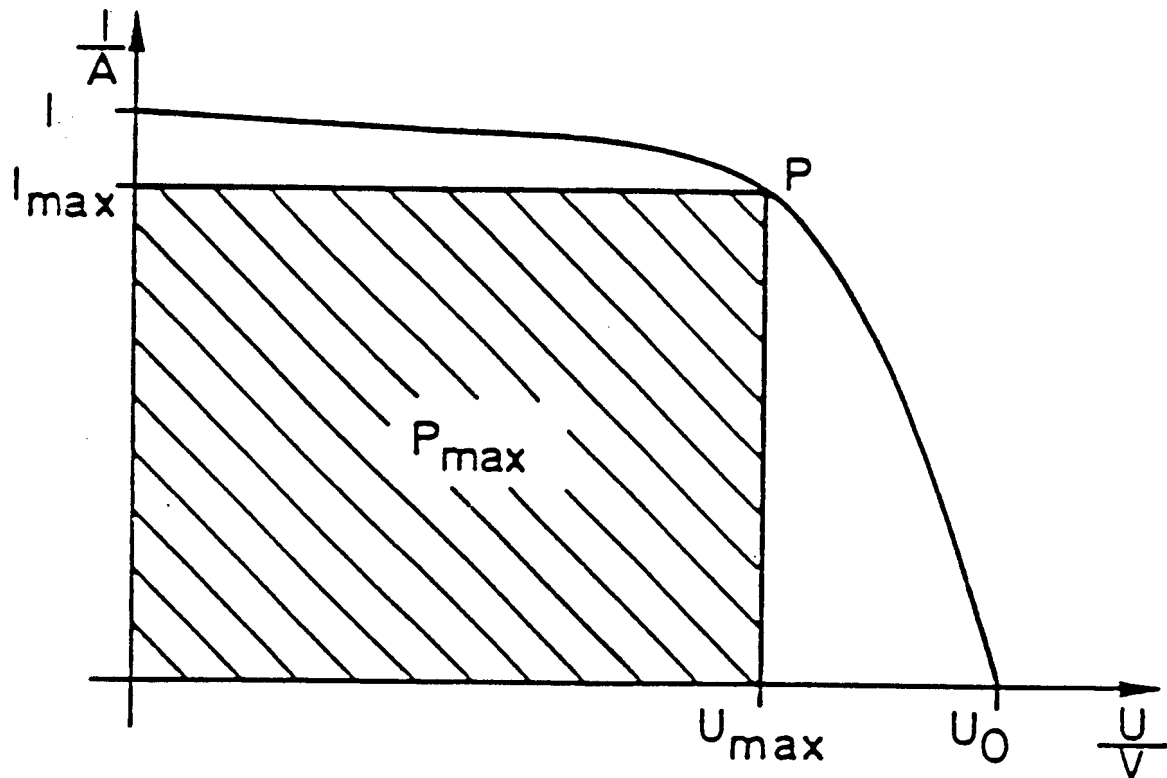
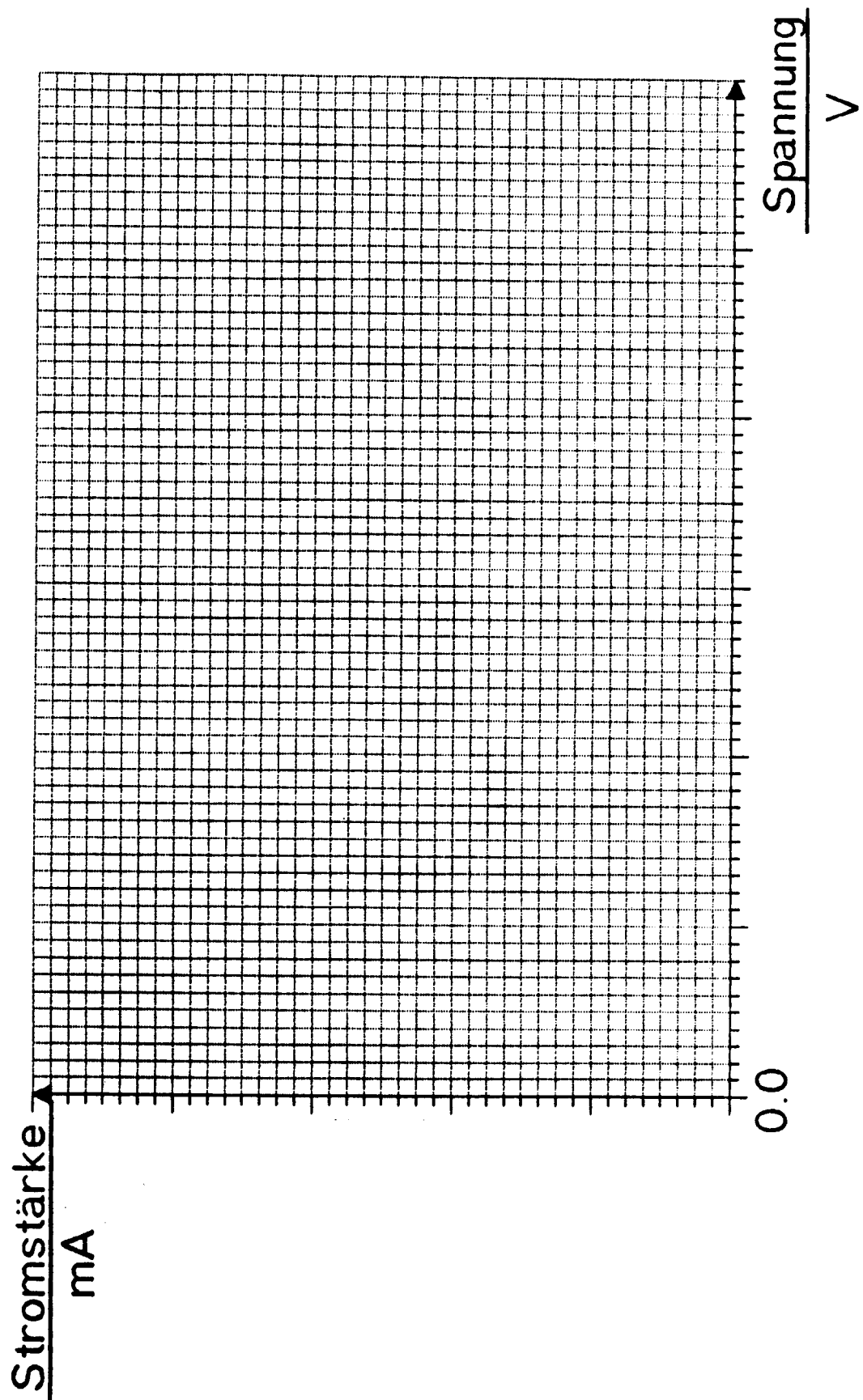
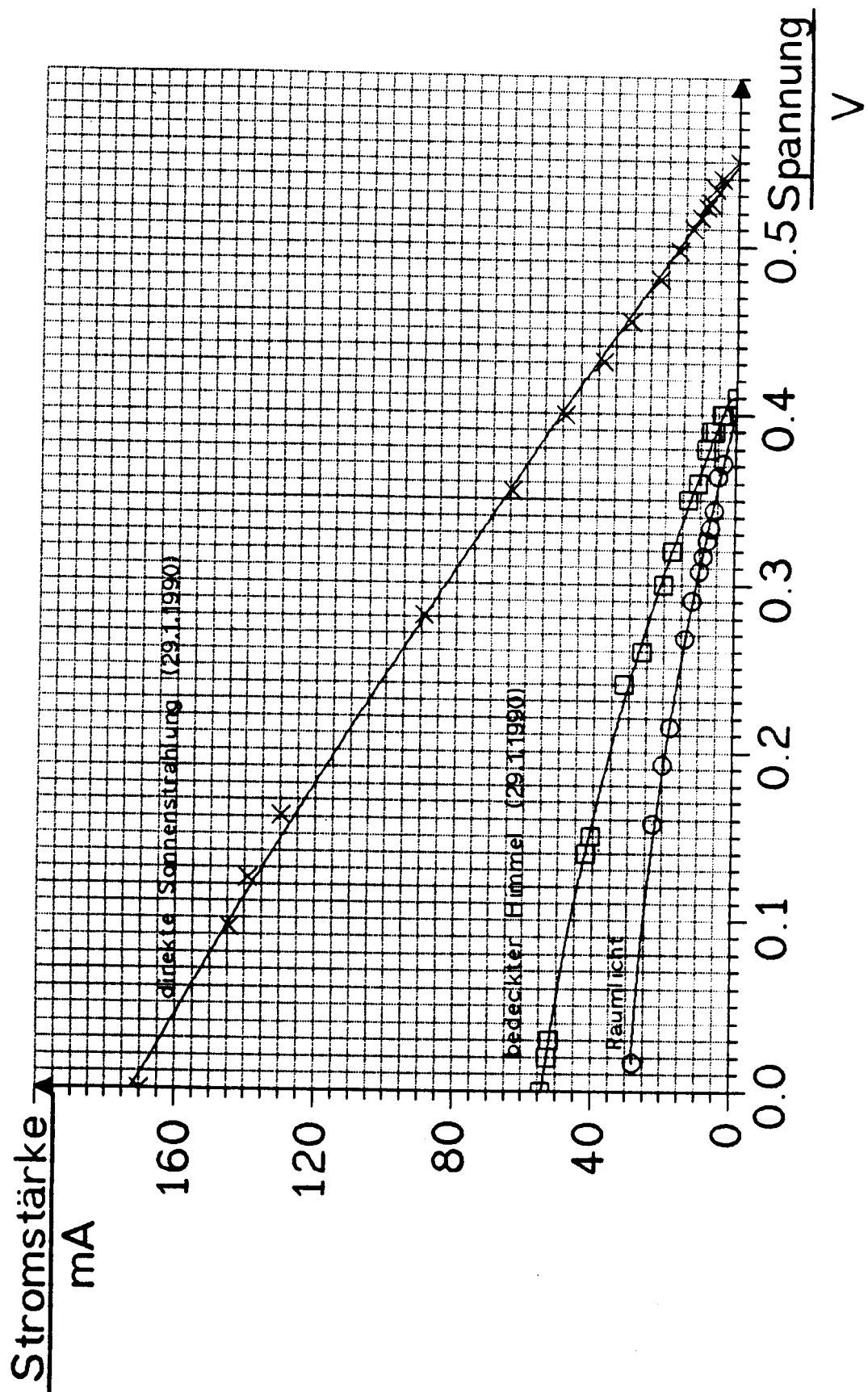


Fig. 4



Strom-Spannungskennlinie einer Solarzelle





Das Ersatzschaltbild der Solarzelle

Will man ein Element genau untersuchen, ist es zweckmäßig, dessen Ersatzschaltbild zu zeichnen. So kann die Funktion genau studiert werden:

Die Solarzelle können wir uns zusammengesetzt vorstellen aus einer Konstantstromquelle und einer Diode. An die Klemmen wird ein Lastwiderstand angeschlossen (Abb. 1).

Der Strom, der durch die Last fließt, ist also $I_L = I_K - I_D$

In der Praxis genügt dieses einfache Ersatzschaltbild nicht. Zwei weitere wichtige Größen sind:

- R_p : Parallel zur Konstantstromquelle wirkt ein innerer Verlustwiderstand R_p . Dieser Widerstand sollte möglichst groß sein, um den Leistungsverlust in Grenzen zu halten. R_p wird durch Kristallfehler, Dotierungsunzulänglichkeiten und andere Defekte beeinflusst (Abb. 2).

- R_s : Der Serienwiderstand R_s setzt sich aus verschiedenen Einzelwiderständen zusammen (Widerstand des Halbleitermaterials, der Metall-Halbleiter-Kontakte und der elektrischen Zuleitungen). Messungen ergaben für kommerzielle monokristalline Solarzellen mit Flächen von 20 bis 80 cm² Fläche-Serienwiderstandswerte R_s zwischen 80 mΩ und 400 mΩ und Parallelwiderstände R_p von 400 Ω bis 600 Ω je nach Zellentyp.

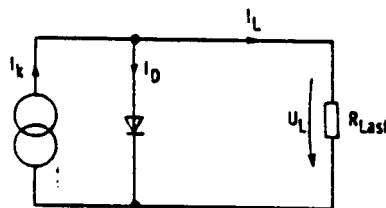


Abb. 1 Vereinfachtes Ersatzschaltbild einer Solarzelle

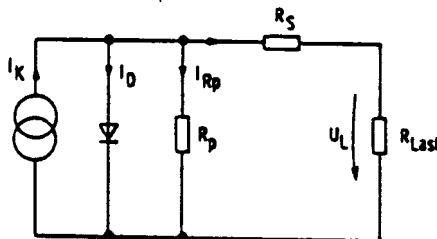


Abb. 2 Erweitertes Ersatzschaltbild einer Solarzelle

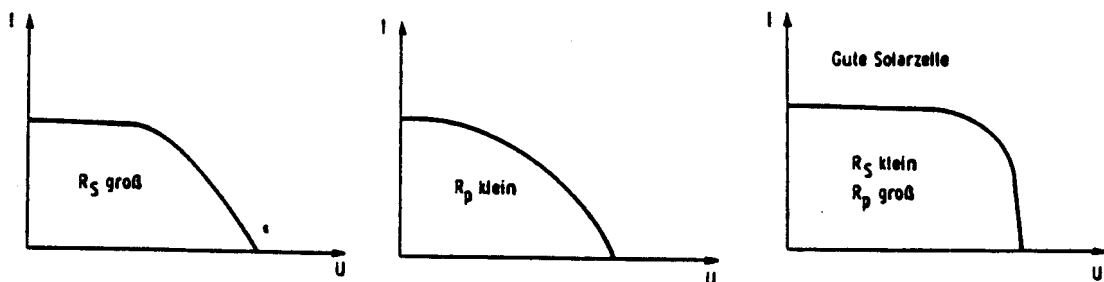
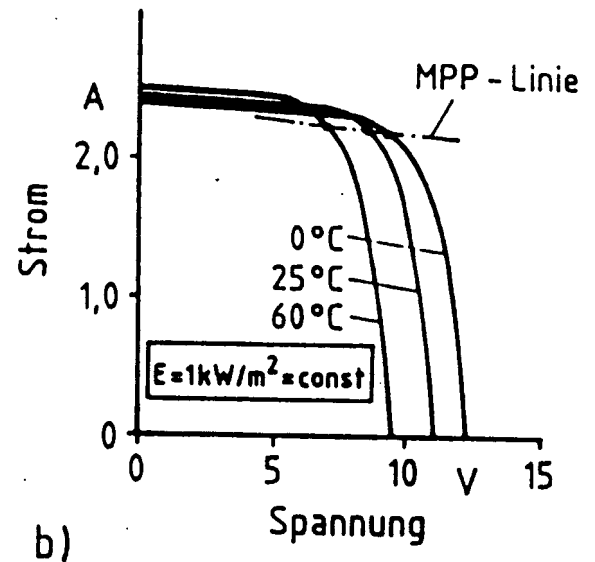
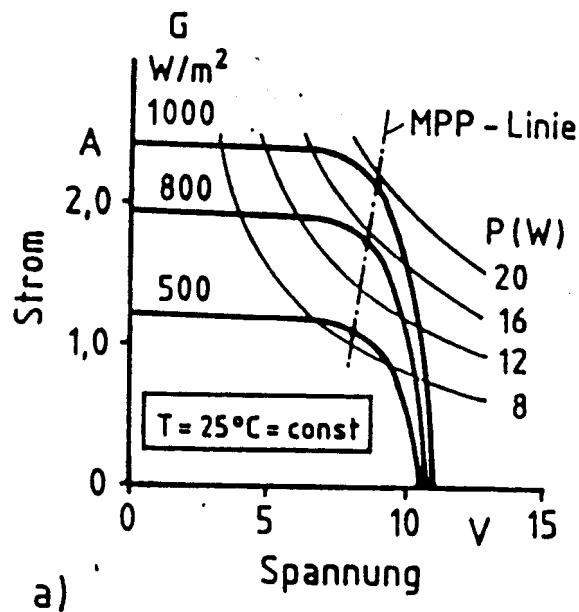


Abb. 3 Verschiedene Kennlinien in Abhängigkeit von R_s und R_p

aus: U. Muntwyler, "Praxis mit Solarzellen",
Franz-Verlag, München 1983



- a) MPP-Linie bei unterschiedlicher Einstrahlung
 b) MPP-Linie bei unterschiedlichen Zellentemperaturen

Punkte maximaler Leistung für einen Solargenerator

Siemens Solar GmbH

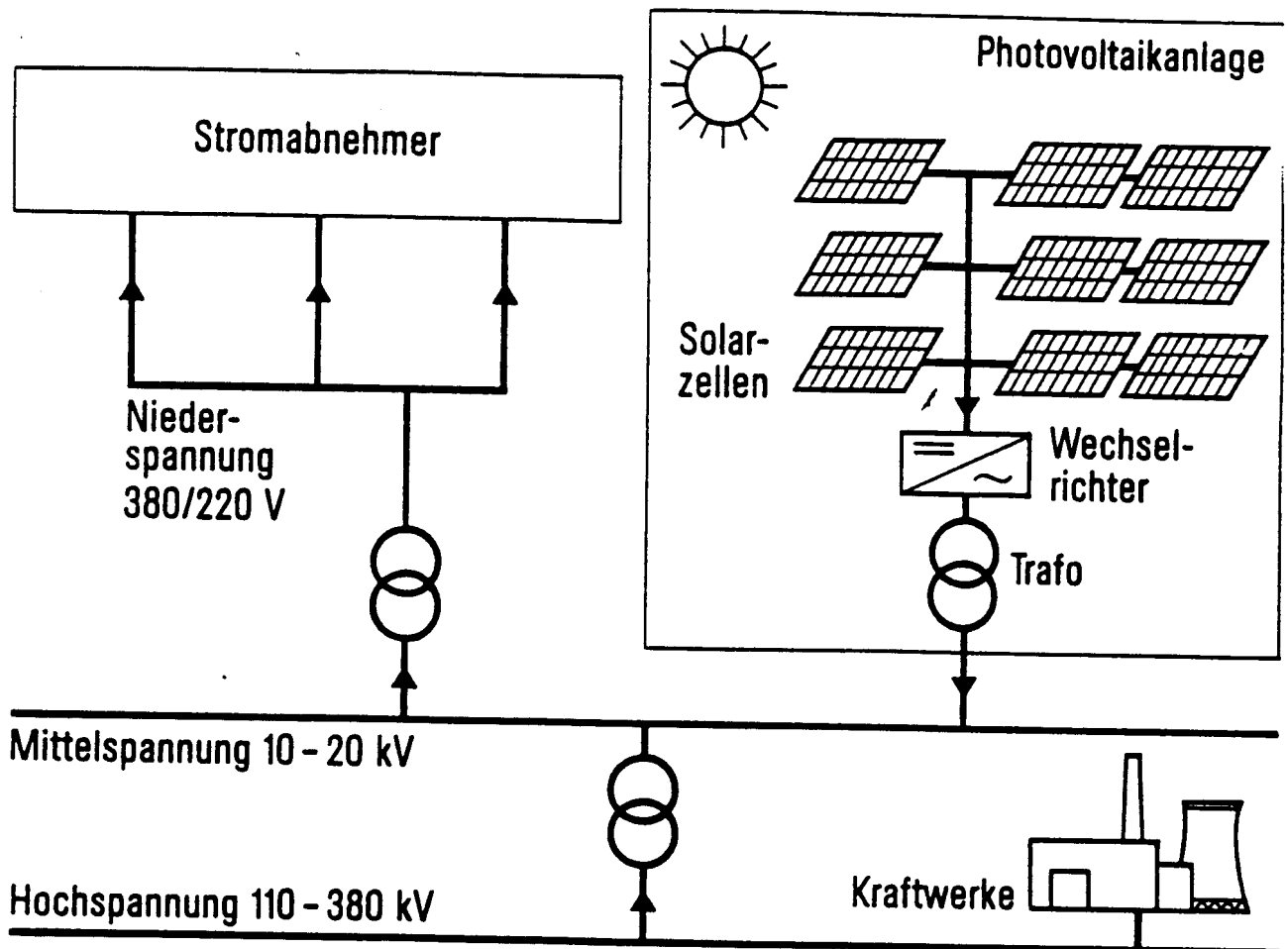


Abschätzung der Potentiale unterschiedlicher netzgekoppelter Systeme.

	Hausanlagen	Industrieanlagen	Großanlagen
Flächenangebot	Hausdächer	Hallendächer, Parkplätze, Höfe	Grenzertrags- und Brachflächen
verfügbare Flächen in der Bundesrepublik Deutschland	500 km ²	1 500 km ²	15 000 km ²
geeignete Flächen (etwa 30 % der verfügbaren Flächen)	150 km ²	450 km ²	5 000 km ²
Verhältnis	1:1	1:3 durch Aufständigung	1:5 ökologische Gründe
Solarzellenfläche	150 km ²	150 km ²	1 000 km ²
mögliche jährliche Stromerzeugung (20 % Jahresnutzungsgrad)	30 TWh/a	30 TWh/a	200 TWh/a
maximale Leistung (nur mittags im Mai/Juni)	24 000 MW	24 000 MW	160 000 MW
Anteil an der öffentlichen Stromversorgung (Basis: 400 TWh/a)	7,5 %	7,5 %	(50 %)

Um die angegebene jährliche Strommenge erzeugen zu können, muß wegen der geringen Sonnenscheindauer eine enorm hohe Leistung (siehe vorletzte Zeile) installiert werden. 1986 lag die Jahreshöchstlast im öffentlichen Netz unter 60 000 MW. Somit könnte auch im nächsten Jahrhundert das Verbundnetz nur wenige zigtausend MW Solarstrom an Sommertagen aufnehmen.

aus: RWE informiert, Nr. 224, "Stromerzeugung durch Windenergie- und Photovoltaikanlagen,
Sonderdruck aus VGB KRAFTWERKSTECHNIK 11/1987



Einbindung der Photovoltaikanlage in das Versorgungsnetz

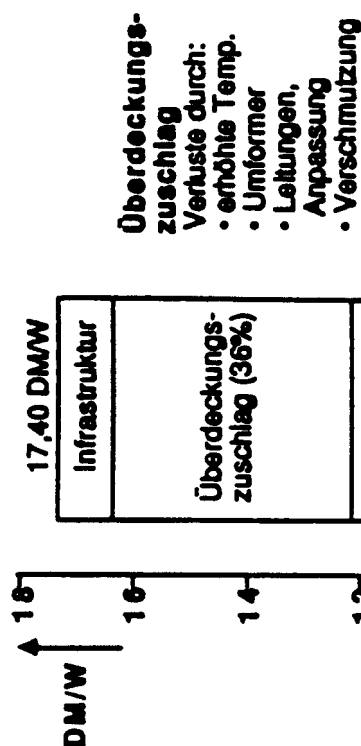
aus: RWE, Die Photovoltaikanlage Kobern-Gondorf,
Informationen zur Technik und zum Betrieb der Anlage



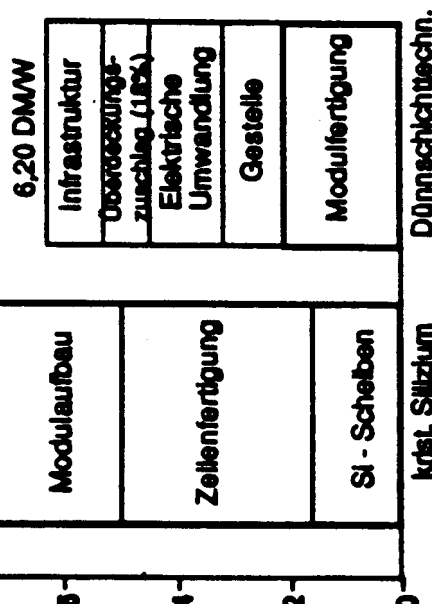
Kostenstruktur eines Kraftwerks mit Solarzellen (10 MW) und zugehörige Stromerzeugungskosten

Randbedingungen:

- Standort: Süddeutschland
- polykristallines Si: 20 Mio Si-Scheiben pro Jahr
ca. 23 MWp pro Jahr
Modulwirkungsgrad 12,5%
- Dünnschicht: ca. 37 MWp pro Jahr
Modulwirkungsgrad 20%



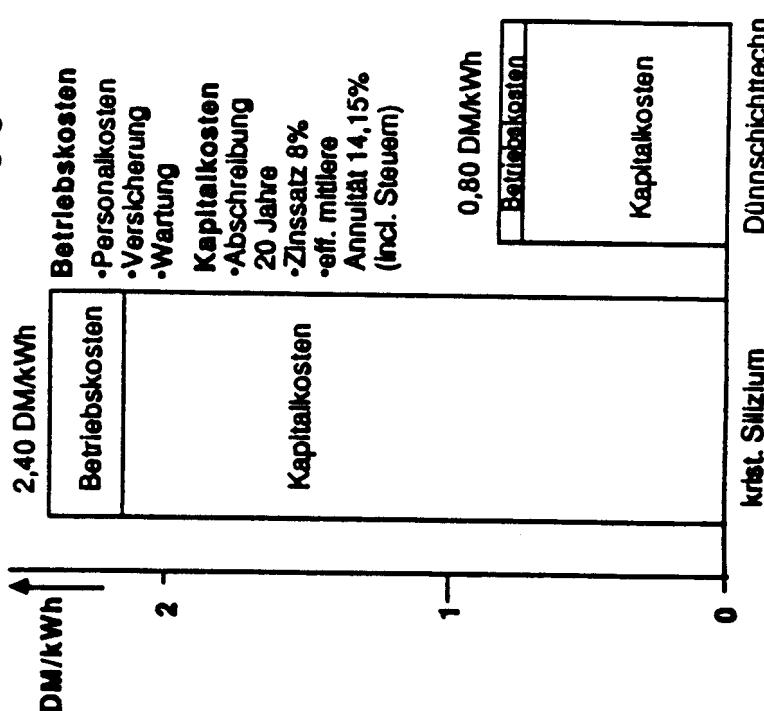
Überdeckungszuschlag
Verluste durch:
• erhöhte Temp.
• Umformer
• Leitungen,
Anpassung
• Verschmutzung



Krist. Silizium
techn. Stand 1988

Dünnschichttechn.
2000

Kostenbasis 1988 Investitionskosten



Betriebskosten
• Personalkosten
• Versicherung
• Wartung
Kapitalkosten
• Abschreibung
20 Jahre
• Zinssatz 8%
• eff. mittlere
Annuität 14,15%
(incl. Steuern)

0,80 DM/kWh

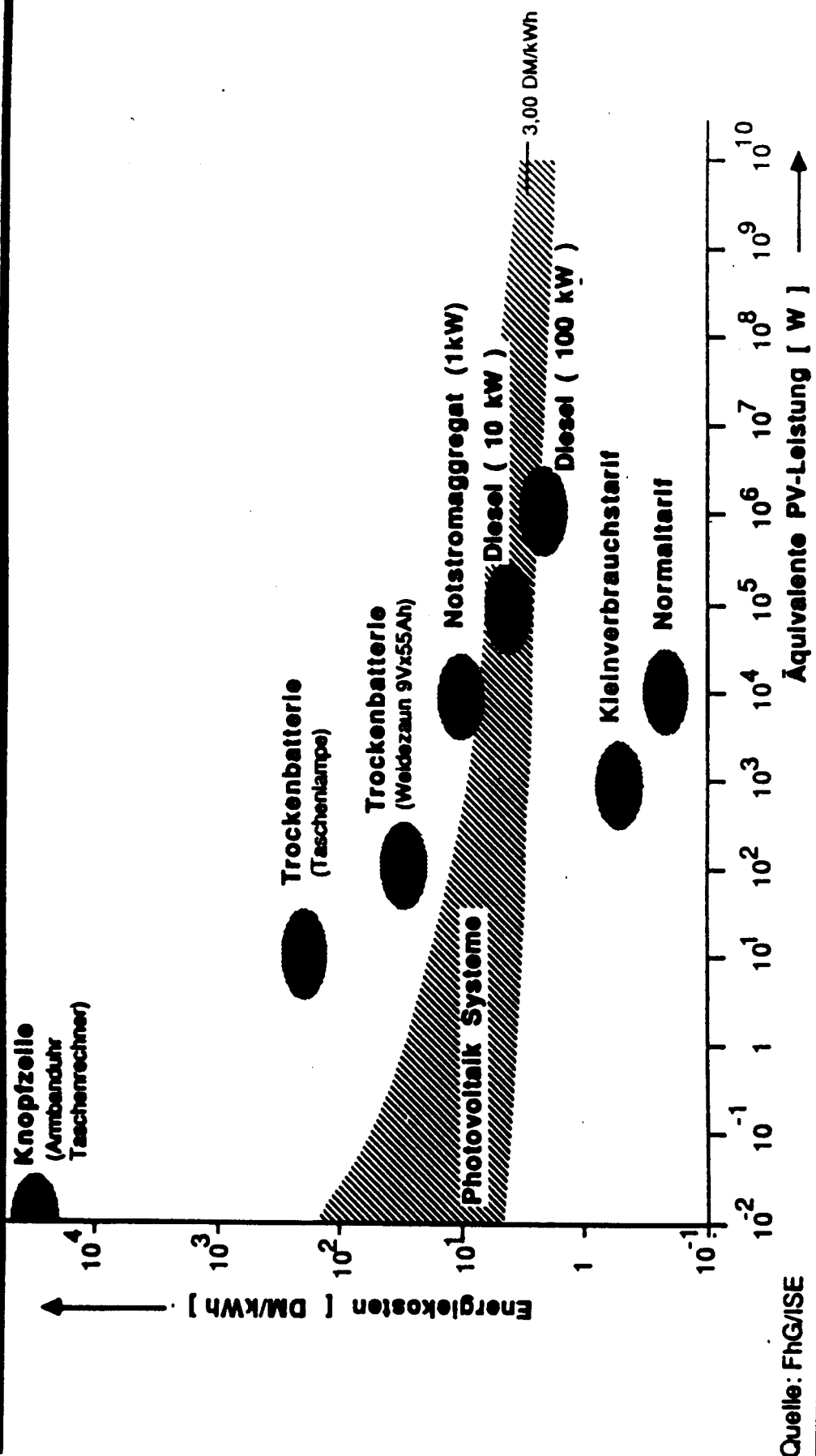
krist. Silizium
techn. Stand 1992

Dünnschichttechn.
2000

Stromerzeugungskosten

SIEMENS

Siemens Solar GmbH



SIEMENS

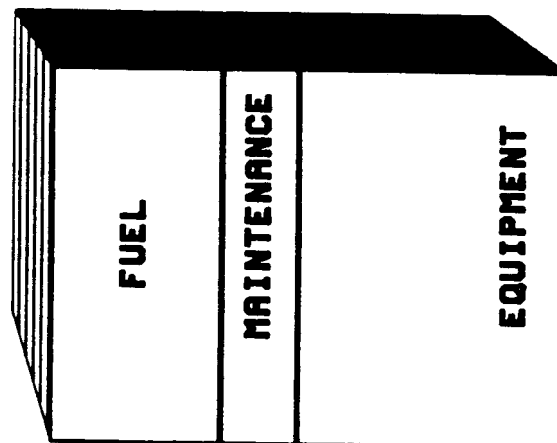
Siemens Solar

1 KW WATER-PUMPING SYSTEM

TAIWAN

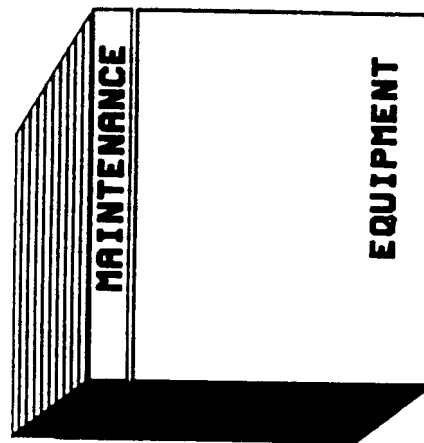
10 YEARS

TOTAL
20.300.-DM



DIESEL

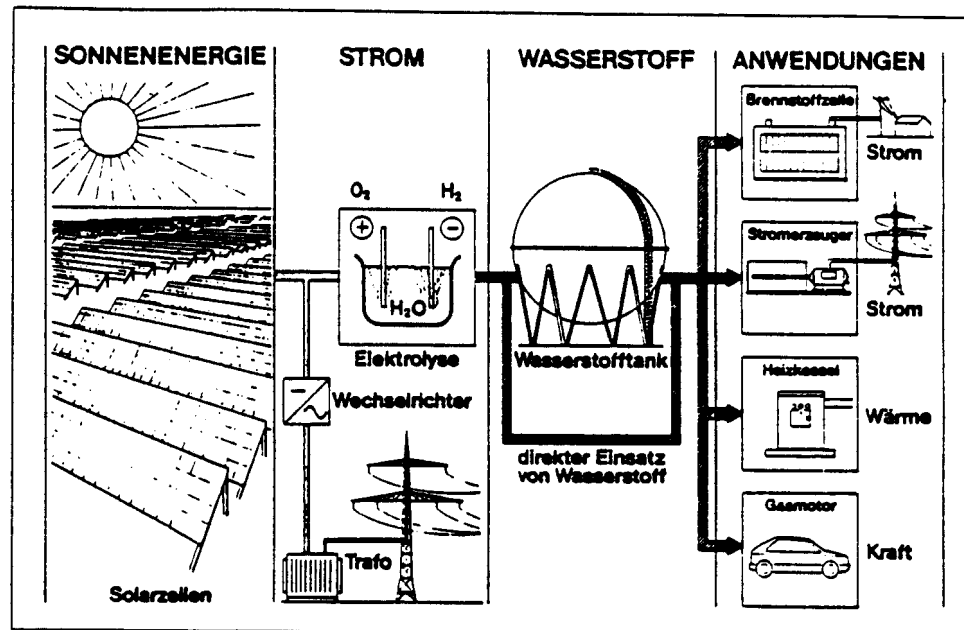
TOTAL
13.000.-DM



SOLAR ENERGY

Cost-Comparison Diesel vs. Solar Energy >costcom<

Standort Neunburg vorm Wald



aus: Arbeitskreis Schulinformationen Energie,

Lehrer-informationen "Strom aus regenerativen Energien, Beispiel Photovoltaik"

Schätzkosten für die Erzeugung von Wasserstoff

Energiequelle	Energiekosten	Verfahren	H ₂ -Preise	
			DM/Nm ³	DM/t SKE ¹⁾
Erdgas	30 Pf/Nm ³ Erdgas	Steamreforming	0,15	350
Erdölrückstände	70 DM/t SKE	Vergasung	0,17	390
Braun- oder Importkohle	100 DM/t SKE	Vergasung	0,25	580
Biomasse	170 DM/t SKE	Vergasung	0,27	630
Wasserkraft (bestehende Anlagen)	6 Pf/kWh	Elektrolyse	0,34	780
Kernkraft (neues Kernkraftwerk)	13 Pf/kWh	Elektrolyse	0,66	1.520
Windenergie	30 Pf/kWh	Elektrolyse	1,44	3.330
Solarenergie	150 Pf/kWh ²⁾	Elektrolyse	6,92	16.030

1) bezogen auf H₂ = 12,65 MJ/Nm³

2) Zukunftswert ohne Speicher

FAZIT:

Die mit Abstand billigsten Arten regenerativer Wasserstoffherzeugung sind der Weg über Elektrolyse auf Basis Wasserkraftstrom oder die Vergasung von Biomasse.

aus: VEBA, Zukunftsenergien- Fakten und Argumente

Düsseldorf, im Juli 1989

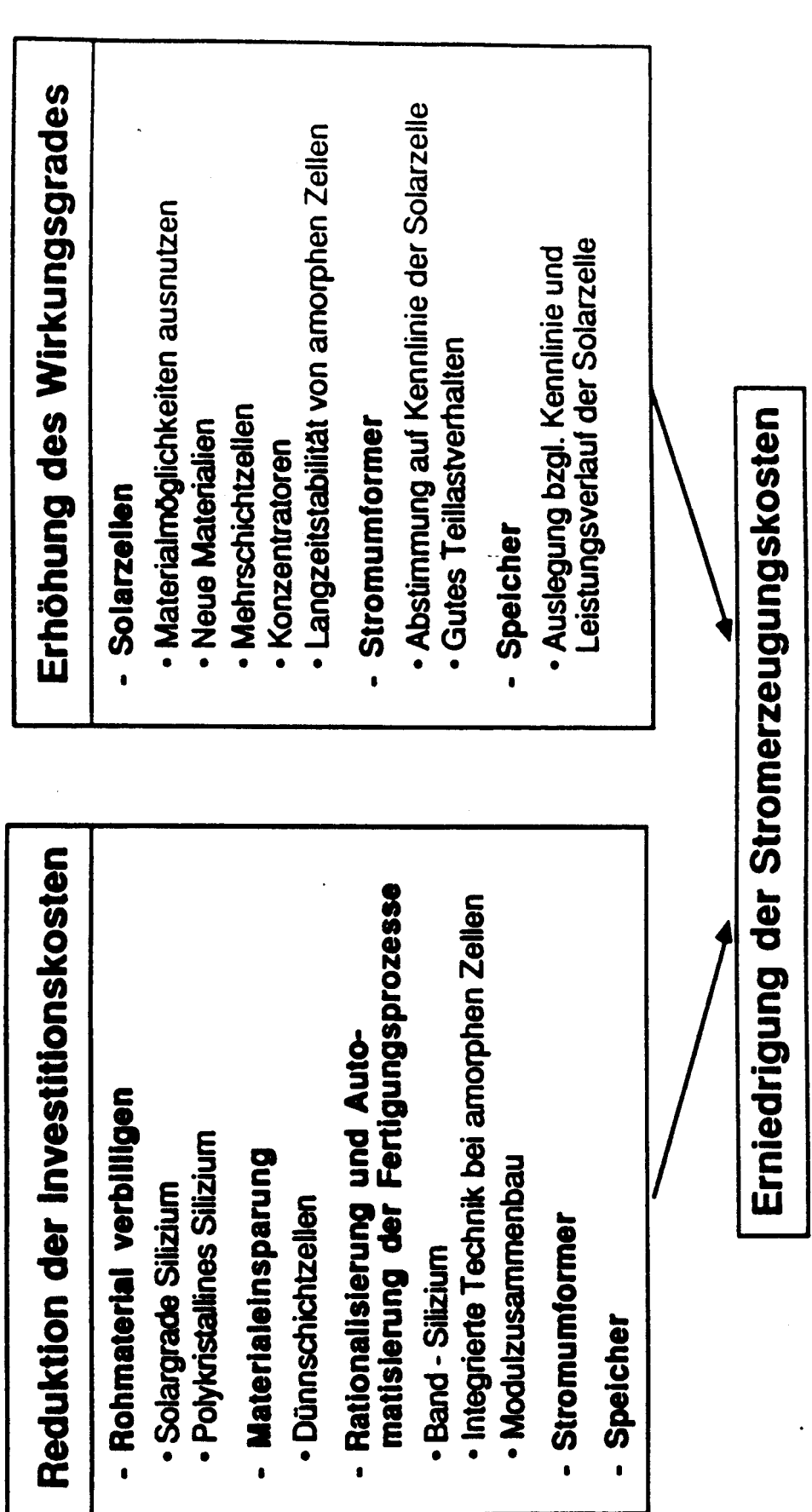
Siemens Solar GmbH

Erhöhung des Wirkungsgrades

- Solarzellen
 - Materialmöglichkeiten ausnutzen
 - Neue Materialien
 - Mehrschichtzellen
 - Konzentratoren
 - Langzeitstabilität von amorphen Zellen
- Stromumformer
 - Abstimmung auf Kennlinie der Solarzelle
 - Gutes Teillastverhalten
- Speicher
 - Auslegung bzgl. Kennlinie und Leistungsverlauf der Solarzelle

Reduktion der Investitionskosten

- Rohmaterial verbilligen
 - Solargrade Silizium
 - Polykristallines Silizium
- Materialeinsparung
 - Dünnschichtzellen
- Rationalisierung und Automatisierung der Fertigungsprozesse
 - Band - Silizium
 - Integrierte Technik bei amorphen Zellen
 - Modulzusammenbau
- Stromumformer
- Speicher


Erniedrigung der Stromerzeugungskosten
Entwicklungsziele für Photovoltaik Systeme

Siemens Solar GmbH

Zelltypen:

- monokristallin (z.B. Siemens)
- polykristallin (z.B. AEG)

typische Zelldicken: ca. 400 μm

typische Zellwirkungsgrade: ca. 12 - 14%

Herstellverfahren:

- Herstellung von Reinstsilizium (heute Halbleitermaterial)
- Ziehen von Einkristallen oder Gießen von polykristallinen Blöcken
- Sägen der Scheiben (dabei ca. 50% Materialverlust)
- Herstellen der Zellen (dotieren, kontaktieren)
- Verketten / Einbetten der Zellen in Modulen

Vorteile:

- Herstellverfahren seit Jahren erprobt und bewährt
- gute Langzeitstabilität der Zellen / Module
- langjährige Erfahrung über Einsatz vorhanden

Nachteile:

- Herstellverfahren relativ aufwendig strukturiert
- hohe Investitions- und Materialkosten
- hohe Abhängigkeit von Vormaterial Reinstsilizium
- Wirkungsgradsteigerungen nur noch sehr begrenzt möglich
- Reduzierung der Herstellkosten nur mit neuen (Solar-) Silizium-Produktions- und Verarbeitungsverfahren möglich

Siemens Solar GmbH

Zellentypen:

- amorph. Silizium (z.B. Siemens/ARCO Solar)
- Kupfer-Indium-Selenid (z.B. Siemens/ARCO Solar)
- Silizium-Germanium (Neuentwicklung)

typische Zelldicke:ca. 1 - 2 μm **typische Zellwirkungsgrade:**

ca. 8 - 10% (Einzelzelle)

ca. 15 - 18% (Tandemzelle)

Herstellverfahren:

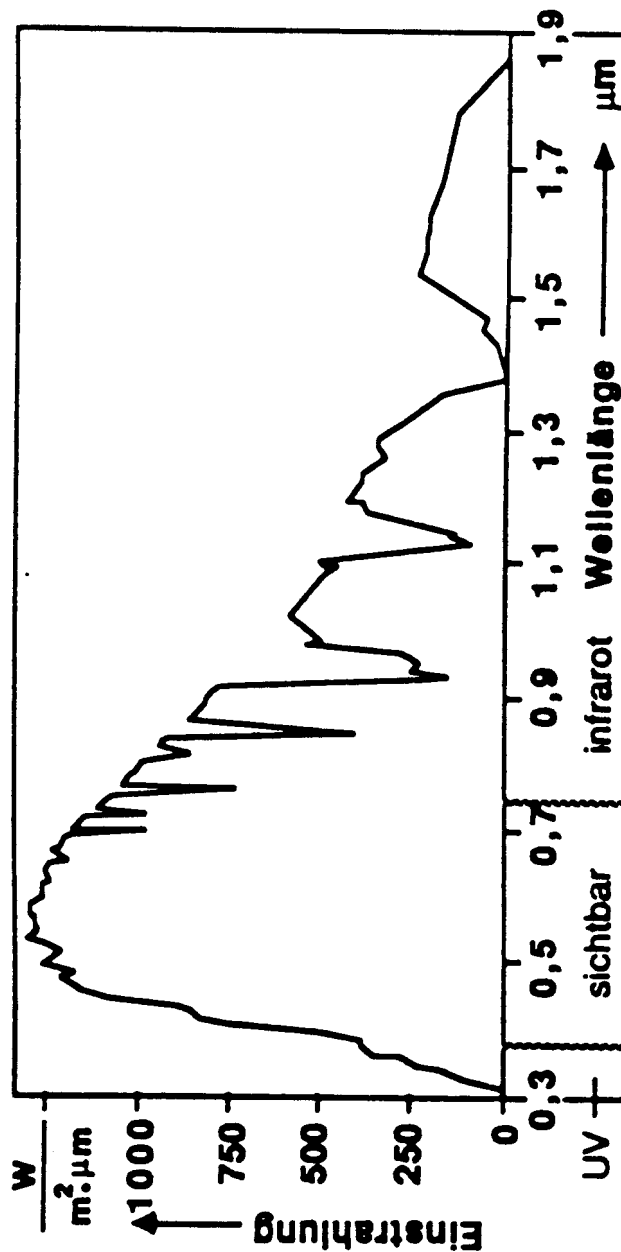
- Abscheidung der sehr dünnen Materialschichten nacheinander auf Substrat (vorzugsweise dünne Glasscheiben)
- Strukturierung der Fläche in einzelne Zellenstreifen
- Einbetten des fertigen Moduls

Vorteile:

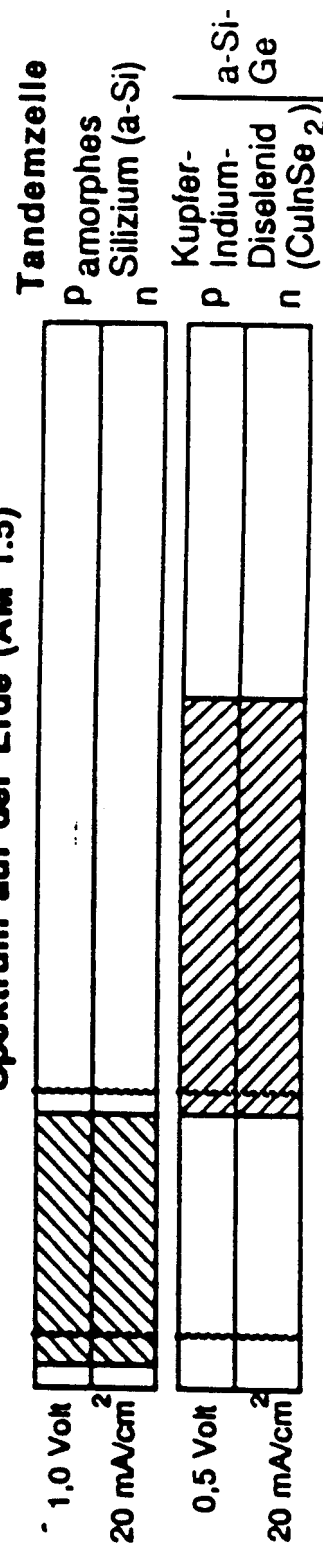
- Strukturierung, Verschaltung und Einbettung von Zellen bzw. Modulen erfolgen im gleichen Herstellprozeß
- wesentlich geringerer Materialverbrauch
- Herstellverfahren besonders geeignet für Großserienproduktion
- drastische Reduzierung der Herstellkosten durch geringere Materialkosten und automatisierte Großflächenproduktion

Nachteile:

- Entwicklung der Technik ist noch nicht abgeschlossen
- Erfahrung über Einsatzverhalten noch begrenzt



Spektrum auf der Erde (AM 1.5)



Anteile der absorbierten Sonnenstrahlung in Tandem-Solar - Modulen

SIEMENS



Rekord-Wirkungsgrad

Mit 31 % Wirkungsgrad bietet die Solarzelle aus den Labors der Sandia National Laboratories in Albuquerque (US-Staat New Mexico) derzeit den höchsten Wirkungsgrad für die direkte Umsetzung von Sonnenlicht in elektrischen Strom. Die Zelle ist gedacht für Kondensator-Systeme, in denen Spiegel oder Linsen das Sonnenlicht zuerst einmal bündeln. Die besten Daten erzielt sie bei einer Bestrahlung mit 35 bis 50 W/cm², was einer 350- bis 500fach konzentrierten optimalen Sonnenbestrahlung entspricht.

Die Zelle besteht aus zwei Lagen, die für verschiedene Spektralbereiche empfindlich sind: Die obere Zelle aus Gallium-Arsenid, mit deren Entwicklung die Firma Varian Associates in Palo Alto (Kalifornien) beauftragt war, konvertiert vorwiegend die blauen Anteile, während die untere Zelle aus Silizium, von Sandia selbst entwickelt, die unge-

nutzten und durchgelassenen rötlichen Anteile nutzt.

Dank dieser Doppelnutzung konnten die 27,2 % Wirkungsgrad der oberen Zelle alleine um 3,8 % auf 31 % gesteigert werden. Damit erreichte ein Fünfjahres-Forschungsplan des US-Energie-Ministeriums sein erstes Ziel, die 30 %-Marke zu überwinden. Jetzt sollen die Zellen zu einem Hochleistungsmodul verbunden werden. Später hoffen die Forscher, den Wirkungsgrad in die Nähe der bei 40 % vermuteten Grenze treiben zu können.

Bei der Bewertung dieses Ergebnisses muß man im Auge behalten, daß es sich hier um Zellen aus einem Forschungslabor und nicht etwa aus einer Serienfertigung handelt und daß sie in einem technisch aufwendigen Konzentratorsystem eingesetzt werden sollen.

Die Wirtschaftlichkeitskriterien sind also ganz andere als bei Solarzellen, die etwa auf einem Hausdach eingesetzt werden sollen. Deren Wirkungsgrad erreicht bei derzeitiger Serienfertigung bestenfalls 11,5 %. *ud*

aus: Bild der Wissenschaft, November 1988

Ein Solargenerator mit 31 Prozent Ausbeute

Durch die Kombination zweier hintereinandergeschalteter Solarzellen ist es Wissenschaftlern der amerikanischen Firma Boeing gelungen, 31 Prozent des Sonnenlichts in elektrischen Strom umzuwandeln. Das ist etwa das Doppelte, was herkömmliche Silizium-Solarzellen leisten. Die Experimente fanden unter Bedingungen statt, wie sie im Weltraum herrschen. Bei den Strahlungsverhältnissen auf der Erde, wo das Licht durch die Atmosphäre gefiltert ankommt, betrug der Wirkungsgrad sogar 37 Prozent. Die Tandem-Solarzelle besteht aus Galliumarsenid und Galliumantimonid. Das Galliumarsenid absorbiert nur Licht mit mehr als 1,42 Elektronenvolt Energie. Es trägt annähernd 24 Prozent zur Gesamtausbeute bei. In der zweiten Solarzelle aus Galliumantimonid läßt sich dann die durchgelassene Infrarotstrahlung nutzen. Die Energieschwelle des Materials liegt nämlich bei nur 0,72 Elektronenvolt. Der Solargenerator ist mit sogenannten Fresnel-Linsen versehen, die die Lichtintensität auf das Hundertfache konzentrieren. Eine besondere Kunststoffbeschichtung sorgt außerdem dafür, daß das Licht über den metallischen Kontaktstreifen auf das Halbleitermaterial in den Zwischenräumen abgelenkt und so für die Stromerzeugung nutzbar wird. In der Raumfahrt kommt es zwar nicht so sehr auf die Kosten an. Eine wesentlich höhere Stromausbeute erlaubt es jedoch, die Größe der Solargeneratoren von Satelliten entsprechend zu verringern und damit Platz und Gewicht einzusparen. *F.A.Z.*

aus: Frankfurter Allgemeine Zeitung, 15. November 1989