

Klaus Bücher und
Jochen Fricke

Solarzellen

Die Photovoltaik hat die Phase der „Unschuld“ und eine Kostenreduktion um den Faktor 10 hinter sich. Hocheffektive Solarzellen für konzentriertes Sonnenlicht stehen heute ebenso zur Verfügung wie Dünnschichtzellen für großflächige Anwendungen. Ein wirtschaftlich arbeitendes Solarkraftwerk erfordert bei einem Wirkungsgrad um 15 % jedoch eine nochmalige Reduktion der Herstellkosten um den Faktor 10.

Der Bedarf an elektrischer Energie wird in den nächsten Jahrzehnten weltweit beträchtlich anwachsen. Bis heute ist unklar, ob und wie die Deckung dieses Bedarfs erreicht werden kann.

Die Vorräte an Kohle, Öl und Gas sind begrenzt; zudem entsteht bei der Verbrennung dieser Stoffe das Treibhausgas CO_2 . Eine weitgehende Rückhaltung von CO_2 im Kraftwerk ist zwar möglich, aber sehr aufwendig [1]. Die CO_2 -Entsorgung im Meer ist noch nicht einmal erprobt.

Der Betrieb von Kernreaktoren wird in vielen Ländern als zu riskant eingestuft; die Entsorgung der Brennstäbe bzw. der Spaltprodukte und Transurane im technischen Maßstab ist weltweit bislang noch immer ungelöst.

Die Nutzung des Windes zur Elektrizitätserzeugung wird heute an günstigen Standorten nahe an der Wirtschaftlichkeitsgrenze betrieben. Weltweit sind derzeit größenordnungsmäßig 2 GW an elektrischer Leistung installiert. Der jährliche Zuwachs lag in den vergangenen Jahren zwischen 100 und 500 MW. Diese Schwankungen sind vor allem durch Großbestellungen im amerikanischen Windenergieprogramm bedingt.

Mit großer Hoffnung betrachtet man die Elektrizitätserzeugung mit Hilfe der Photovoltaik. Die jährlich hergestellte Menge an Solarzellen entspricht derzeit etwa einer elektrischen Spitzenleistung von 50 MW. Ein erheblicher Anteil davon wird allerdings im Rahmen staatlicher Forschungs/Demonstrationsprojekte installiert. Der Umsatz im Photovoltaikbereich liegt weltweit bei 400 Mio. \$; daran sind rund 200 Firmen und Institute beteiligt. Die Photovoltaik-Förderung des Bundesministeriums für Forschung und Technologie (BMFT) lag 1989 bei rund 100 Mio. DM.

Die Fortschritte im Bereich der Photovoltaik in den achtziger Jahren lagen

- in der Erhöhung des Wirkungsgrades von einkristallinen Si- und GaAs-Zellen, sowie
- in der Entwicklung von Dünnschichtzellen auf der Basis von polykristallinem Si, amorphem Si, Kupferindiumdiselenid und Cadmiumtellurid.

Die Lebensdauern von Solarzellen und Modulen liegen heute bei 20 Jahren oder darüber. Können die Kosten von derzeit 15 DM pro Peak-Watt durch automatische Fertigung auf 2 DM gesenkt werden, was unter bundesrepublikanischen Klimabedingungen einem Preis von 0,50 DM pro kWh entspricht, ist an den Bau wettbewerbsfähiger Photovoltaik-Kraftwerke zu denken.

Für viele dezentrale Anwendungen ist die Solarzelle schon heute attraktiv: etwa zur Lichtversorgung von Berghütten, zum Betrieb von Irrigations-Wasserpumpen, für die Energieversorgung von abgelegenen Relais-Sendestationen oder für die Medikamentenkühlung in Krankenstationen in der dritten Welt.

Ein kurzer Rückblick

Der photovoltaische Effekt wurde erstmals von Edmund Becquerel im Jahr 1839 erwähnt [2]. Erst mit der Verfügbarkeit von Halbleiter-Einkristallen und der Entwicklung von Dotiertechniken in den vierziger und fünfziger Jahren gelang es, funktionsfähige Solarzellen herzustellen: In den Bell Laboratories wurden 1954 Si-Solarzellen mit 6 % Wirkungsgrad produziert [3].

Seit 1958 wird die Energieversorgung der meisten Satelliten durch Solarzellen bewerkstelligt. Wegen der hohen Fertigungskosten gab man der Photovoltaik aber keine Chance

bei terrestrischen Anwendungen. Erst in den siebziger Jahren erschien wegen der dramatisch angestiegenen Preise für die fossilen Primärenergieträger die Photovoltaik attraktiv für die Elektrizitätserzeugung. Heute wirken vor allem Umweltgründe motivierend für die Weiterentwicklung der Solarzelle.

Die Funktionsweise von Solarzellen

pn-Übergänge

Einkristalline Si-Solarzellen sind etwa 300 μm dick. Die Leitfähigkeit des Siliziums kann durch Dotieren, also das gezielte Einbringen von Fremdatomen, verändert werden. Baut man einen fünfwertigen Stoff, z. B. Phosphor, in das Gitter der vierwertigen Si-Atome ein, so wird ein Elektron nicht zum Aufbau des Kristallgitters gebraucht. Bereits die thermische Energie reicht, dieses Elektron von seinem Atomrumpf zu trennen; der Kristall enthält zusätzlich ein frei bewegliches Elektron, er ist n-leitend.

Dotiert man mit dreiwertigem Bor, so fehlt ein Elektron zur Absättigung der Bindung; es entsteht ein „Loch“. Auch die Löcher sind beweglich, das Material ist p-leitend.

Die beweglichen Ladungsträger, die in der Mehrzahl vorkommen, nennt man die Majoritätsladungsträger; es sind dies also die Elektronen im n-Material und die Löcher im p-Material. In Halbleitern können aber Elektronen auch aus dem Valenzband ins Leitungsband angehoben werden. Ein derartiges Aufbrechen von Silizium-Silizium-Bindungen ist durch thermische Anregung bei höheren Temperaturen oder durch Lichtabsorption möglich. Es entstehen Paare von frei beweglichen Löchern und Elektronen. Die Löcher im n-Material und die Elektronen im p-Material bezeichnet man als Minoritätsla-

dungsträger. Das Halbleitermaterial bleibt bei all diesen Vorgängen elektrisch neutral, denn für jedes bewegliche Elektron bleibt ein positiv geladener unbeweglicher Atomrumpf zurück.

Die Grundlage für sehr viele Bauelemente der Halbleiterelektronik, aber auch für die Solarzelle, ist der pn-Übergang, den man durch Zusammenfügen einer p- und einer n-Schicht erhält (Abbildung 1). Durch den Austausch und die Rekombination der freien Ladungsträger wird an der Grenze beider Gebiete eine Schicht ohne frei bewegliche Ladungsträger aufgebaut, in der ein starkes elektrisches Feld durch die unkompenzierten geladenen Atomrümpfe der Dotierstoffe besteht. Diesen Bereich nennt man Raumladungszone (RLZ). Die Schichtenfolge p-n bzw. p-RLZ-n ist eine Halbleiterdiode.

Photonenabsorption und Ladungskonzentration

Eine Solarzelle entsteht (Abbildung 2 oben), wenn in ein Substrat aus p-dotiertem Silizium eine sehr dünne Schicht aus n-Silizium eindiffundiert wird. Zur Abführung der lichterzeugten Ladungen erhält die Rückseite einen ganzflächigen Metallkontakt. Um möglichst wenig Halbleitermaterial abzuschatten, besitzt der Vorderseitenkontakt die Form eines kammförmigen Gitters. Auftreffende Photonen werden in der Solarzelle absorbiert, wenn ihre Energie den Bandabstand überschreitet, es entstehen Paare aus Elektronen und Löchern. Im Außenkreis kann ein elektrischer Strom fließen und Arbeit an einem Lastwiderstand R_L verrichten, wenn eine Trennung der Elektronen und Löcher gelingt, bevor diese rekombinieren, also unter Abgabe von Wärmeenergie wieder in ihre Bindungen zurückfallen.

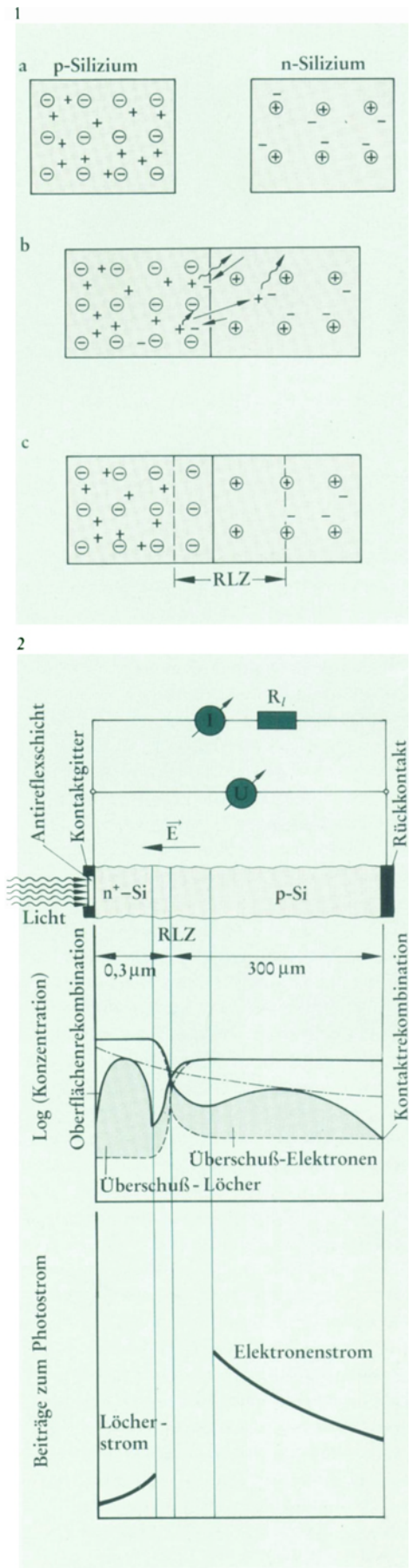
Abbildung 2 Mitte zeigt den Verlauf der Lichtintensität bzw. der Absorptionsrate für langwelliges Licht (Wellenlänge $\lambda \approx 1000$ nm), das tief in die Zelle eindringt. Dagegen wird kurzwelliges Licht mit $\lambda \approx 400$ nm bereits in einer Tiefe von $0,3 \mu\text{m}$ merklich abgeschwächt (Abbildung 3). Die Absorptionsrate nimmt exponentiell mit der Eindringtiefe ab. Da jedes absorbierte Photon ein Elektron-Loch-Paar erzeugt, ist die Photonen-Absorptionsrate gleichzeitig auch die Generationsrate für elektrische Ladungen.

Die sich tatsächlich einstellende Ladungskonzentration weicht vom Verlauf der Ge-

nerationsrate ab, da ja auch Rekombinationsprozesse vorkommen. Am Rückseitenkontakt ist der Si-Kristall extrem gestört; praktisch alle dort erzeugten Photo-Elektronen rekombinieren; trotz Generation sinkt also die Ladungsträgerkonzentration hier auf den Gleichgewichtswert. Dies ist die Minoritätsträgerkonzentration, die sich aufgrund der Dotierung im Zustand ohne Beleuchtung einstellt. Durch das sich ergebende Konzentrationsgefälle diffundieren Ladungsträger aus der p-Zone zum Kontakt und rekombinieren ebenfalls. In der Raumladungszone der Solarzelle können alle Minoritätsträger durch das dort herrschende elektrische Feld abtransportiert werden. Auch an der RLZ-Grenze sinkt deshalb im Kurzschlußbetrieb die Konzentration auf den Gleichgewichtswert.

Damit bildet sich im p-Bereich ein Maximum der Elektronenkonzentration aus. Seine Lage und Höhe ist abhängig von der Rekombination am Kontakt, dem Abtransport an der RLZ-Grenze, aber auch von der Höhe der Rekombination im p-Bereich selbst. Letztere wird durch die Diffusionslänge der Minoritätsträger (Elektronen) bestimmt. Das ist die Strecke, die das Ladungsträgerkollektiv durch Diffusion im Mittel zurücklegen kann, bevor ihre Konzentration durch Rekombination mit den Majoritätsträgern auf den e-ten Teil abgesunken ist. Die Diffusionslänge sollte – bezogen auf die Dicke der Solarzelle – möglichst groß sein. Dies läßt sich durch eine hohe Reinheit und gute Kristallqualität des Halbleitermaterials erreichen.

Im n-Bereich stellt sich in ähnlicher Form wie im p-Bereich ein Konzentrationsberg ein. Da die Vorderseite der Zelle nur teilweise mit Metall bedeckt ist, findet hier starke, aber nicht vollständige Rekombination statt. Die



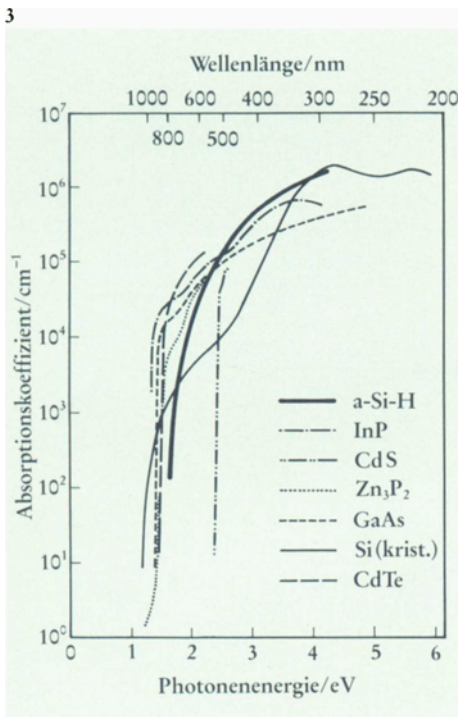


Abb. 2. oben: Querschnitt durch eine Solarzelle mit hochdotierter n^+ -Schicht und schwach dotierter p -Schicht; zwischen beiden liegt die Raumladungszone (RLZ); Photonen werden im Silizium absorbiert und erzeugen Elektron-Loch-Paare. Werden diese Ladungen eingesammelt, bevor sie rekombinieren, so fließen sie durch den Lastwiderstand R_L und verrichten dort Arbeit. Mitte: Die Lichtabsorption in der Solarzelle ist von der Wellenlänge des einfallenden Lichtes abhängig; sie fällt exponentiell mit der Eindringtiefe ab (hier für Licht mit $\lambda = 1000 \text{ nm}$). Die hierdurch entstehende Ladungsträgerkonzentration wird durch verschiedene Rekombinationsprozesse verringert; es bedeuten \cdots Lichtabsorptions- und Generationsrate für Ladungsträger, $----$ Ladungsträgerkonzentration im Dunkeln und $—$ verbleibende Ladungsträgerkonzentration bei Beleuchtung. Unten: Photostrombeiträge aus verschiedenen Bereichen der Solarzelle.

Abb. 3. Absorptionskoeffizienten von Solarzellen-Materialien als Funktion der Photonenenergie. Der Absorptionskoeffizient von kristallinem Si steigt mit Überschreiten der Bandlücke von 1,1 eV nur langsam an – man spricht von einem indirekten Halbleiter; bei direkten Halbleitern erfolgt der Anstieg rascher; ein solcher direkter Halbleiter ist auch amorphes Si. Der Kehrwert des Absorptionskoeffizienten entspricht der mittleren Eindringtiefe.

Ladungsträgerkonzentration sinkt dort nicht völlig auf den Gleichgewichtswert ab. Dennoch ist gerade die Reduzierung der Oberflächenrekombination im n -Bereich von großer Bedeutung, denn im UV und im blauen Spektralbereich werden hier viele Ladungsträger generiert.

Photoströme

Wie kommt es zur Einsammlung der Ladungsträger, bevor diese rekombinieren?

Elektronen und Löcher, die in der Raumladungszone durch Absorption entstehen, werden durch das elektrische Feld praktisch sofort und vollständig getrennt: die Elektronen wandern in Abbildung 2 nach rechts, die Löcher nach links und tragen unmittelbar zum Photostrom bei. Außerhalb der RLZ findet eine Ladungsträgerwanderung nur über Diffusionsprozesse statt [4]. Der Diffusionsstrom ist dem Gradienten der Ladungsträgerkonzentration proportional. Allerdings können nur Ladungen eingesammelt werden, die nahe genug, d. h. etwa innerhalb einer Diffusionslänge, an der RLZ generiert werden; außerhalb dieses Bereiches rekombinieren praktisch alle Ladungsträger und sind damit verloren. Je näher also die Generation an der RLZ erfolgt, desto größer ist der Beitrag dieser Ladungen zum Photostrom (Abbildung 2 unten).

Der Gesamtstrom durch die Solarzelle ist die Summe aus Elektronen- und Löcherstrom an einer beliebigen Stelle in der Solarzelle. Da die Majoritätsladungsträger aufgrund des elektrischen Feldes in der Raumladungszone an der RLZ-Grenze aber nicht zum Strom beitragen, sind dort allein die Minoritätsladungsträger zu berücksichtigen. Vernachlässigt man in erster Näherung die Rekombination von Ladungsträgern in der sehr dünnen RLZ, so berechnet sich der Gesamtstrom als die Summe aus dem Elektronen-Minoritätssträgerstrom am rechten RLZ-Rand und dem Löcher-Minoritätssträgerstrom am linken RLZ-Rand.

Der Photostrom ist direkt proportional zur Zahl der einfallenden Photonen.

Leerlaufspannung

Auch wenn die Anschlüsse der Solarzelle nicht direkt oder über einen Verbraucher miteinander verbunden werden, also im Leerlaufbetrieb, diffundiert ein Teil der Minori-

tätsträger in die jeweils andere Schicht. Da sie über den Kontakt nicht abfließen können, rekombinieren sie an den ionisierten Störatomen in der RLZ; dadurch wird diese schmaler. Eine Verkleinerung der RLZ-Weite einer Diode kann aber nur auftreten, wenn eine Spannung in Durchlaßrichtung anliegt. Die beleuchtete Diode entwickelt im Leerlauf also eine Durchlaßspannung, die Leerlaufspannung, an ihren Klemmen. Es können jedoch nicht beliebig viele Minoritätsträger ins andere Gebiet diffundieren und die RLZ beliebig verkleinern. Die Leerlaufspannung verhindert nämlich das weitere Andiffundieren von Ladungsträgern, da ihr Feld der Diffusionsrichtung entgegenwirkt.

Die Leerlaufspannung ist logarithmisch von der Photonenzahl abhängig, aber auch von Rekombinations- und Geometrieparametern der Solarzelle.

Leistungsentnahme

Die ideale Solarzelle ist eine Parallelschaltung aus einer Stromquelle (dem Photostrom) und einer idealen Diode (Abbildung 4). Die Kennlinie bei Beleuchtung ist also gegenüber der einer Diode lediglich additiv um den Photostrom in den vierten Quadranten verschoben (Abbildung 4). Im Kurzschlußfall fließt der gesamte Photostrom I_k im Außenkreis, da in der idealen Diode bei einer Spannung von $U = 0 \text{ V}$ auch $I = 0$ wird. Im Leerlauf fließt der gesamte Photostrom durch die innere Diode; dies ist aber nur möglich, wenn an den Klemmen der inneren Diode die (Leerlauf-)Spannung U_L entsteht, die diesem Strom entspricht.

Verbindet man die Solarzelle über einen Lastwiderstand R_L fließt ein Teil des Photostroms durch die Last, ein Teil durch die innere Diode. An der Last kann elektrische Leistung $P = U \cdot I$ abgenommen werden. Bei einer $10 \cdot 10 \text{ cm}^2$ großen Si-Solarzelle erreicht man etwa folgende Werte: $U_L = 0,58 \text{ V}$, $I_k = 2,8 \text{ A}$, $P_{\text{max}} = 1,4 \text{ W}$ bei 1000 W/m^2 Lichteinstrahlung.

Da Leerlaufspannung U_L und Kurzschlußstrom I_k , und damit auch der optimale Arbeitspunkt mit der Lichteinstrahlung variieren (Abbildung 5), ist es eine wichtige Aufgabe für den Systemtechniker, geeignete Laderregler für Batterien oder DC/AC-Wandler zur Erzeugung von Wechselstrom, etwa bei Einspeisung in das Elektrizitätsnetz, zu entwickeln.

Die reale Solarzelle ist mit zwei wesentlichen Verlustwiderständen behaftet, welche die Kennlinienform stark verändern und die Leistungsabgabe verringern. Dies ist zum einen der Serienwiderstand R_s (Abbildung 6); hierzu zählt der Widerstand der dünnen Kamm-Leiterbahnen und der Kontaktwiderstand Metall/Halbleiter. Auch der Schichtwiderstand der sehr dünnen n^+ -Schicht ist von Bedeutung, denn die Ladungen müssen ggf. quer durchs Material fließen, bis sie einen Kontaktfinger erreichen. Der zweite Verlustwiderstand ist der Parallelwiderstand R_p ; hierzu zählen Kurzschlüsse des pn-Übergangs an den Kanten der Solarzelle. Ferner ist der n^+ -Bereich so dünn, daß kleine Löcher (Pinholes) in der Schicht auftreten können. Das Metall der Leiterbahnen kann durch diese Löcher direkt den p-Bereich kontaktieren, erzeugt also winzige Kurzschlüsse. Serien- und Parallelwiderstand führen zu einer Verflachung der Kennlinie. Im Kurzschluß wird der Kurzschlußstrom nun kleiner als der Photostrom, da ein Spannungsabfall am Serienwiderstand entsteht; dadurch fließt ein Teilstrom durch die ideale Diode und den Parallelwiderstand. Im Leerlauf wird auch die Leerlaufspannung verringert, denn ein Teil des Photostroms fließt nicht mehr durch die ideale Diode, sondern durch den Parallelwiderstand; damit sinkt die Durchlaßspannung der Diode.

Der Füllfaktor f , das Produkt aus Strom und Spannung am optimalen Arbeitspunkt (Abb. 5), geteilt durch das Produkt aus U_L und I_k , vermittelt einen Eindruck, wie rechteckig die Kennlinie der realen Solarzelle ist; gute Zellen besitzen heute Werte von $f = 0,8$.

Aufbau der Solarzelle

In der Praxis muß eine sorgfältige Wahl der Materialqualität und Schichtdicken erfolgen, wenn man hohe Wirkungsgrade erzielen will. Um möglichst das gesamte Licht in der Solarzelle zu absorbieren, benötigt man eine Schichtdicke von etwa 200 bis 500 μm . Bei Material mit geringer Diffusionslänge können Ladungsträger, die tief in der Solarzelle generiert werden, die RLZ nicht erreichen, sie rekombinieren bereits auf dem Weg dorthin. Andererseits darf eine Solarzelle aus kristallinem Si nicht zu dünn hergestellt werden, da sonst nur ein geringer Anteil der solaren Einstrahlung absorbiert wird und darüber hinaus dünne Scheiben leicht brechen.

Die Oberfläche von Silizium ist metallisch

grau, über 30 % des einfallenden Lichtes werden wie an einem Spiegel reflektiert. Zur Vermeidung dieser Reflexionsverluste bringt man eine Antireflexionsschicht auf. Sie muß an den Brechungsindexunterschied zwischen Luft, Deckglas und Silizium möglichst gut angepaßt werden. Einen Entspiegelungseffekt erreicht man über die konstruktive Interferenz in einer $\lambda/4$ -Schicht. Hierfür dient eine etwa 100 nm dicke Schicht aus Siliziumdioxid, die man über eine Oxidation der Siliziumoberfläche erhält. Geeignet ist auch eine 56 nm dicke Schicht aus Siliziumnitrid (Abbildung 7).

Eine weitere Reduktion der Reflexion erreicht man durch zweilagige Antireflexschichten; diese werden aus Kostengründen bisher aber nur bei Zellen für Weltraumwendungen eingesetzt.

Aufgrund der hohen Oberflächenrekombinationsrate im n^+ -Bereich können hier viele Ladungsträgerpaare verlorengehen. Dies ist dann besonders schädlich, wenn gerade dort viele Ladungen entstehen. Werden die Ladungen in der RLZ oder im p-Bereich generiert, so ist der Rückseitenkontakt weit entfernt, das Problem der Oberflächenrekombination also abgemildert. Solarzellen werden meist aus stark asymmetrischen pn-Übergängen mit einem n^+ -Bereich von nur 0,2 bis 0,5 μm Dicke und einem p-Bereich von 300 μm gefertigt. Deshalb ist für blaues Sonnenlicht die Rekombination an der Zellenoberfläche von Bedeutung. Allerdings ist eine zu dünne n^+ -Schicht wegen der Pinholes problematisch. Außerdem muß sehr hoch dotiert werden, um eine gute Leitfähigkeit zu erreichen, denn nur ca. 6 % der Zellenoberfläche sind mit dem Metallkontakt bedeckt. Die hohe Dotierung führt aber wiederum zu einer Erhöhung der Volumen-Rekombination. Bei einfachem Zelldesign ist der n^+ -Bereich deshalb häufig eine „tote Zone“, in der zwar Licht absorbiert wird, praktisch aber alle Ladungen rekombinieren.

Auch das Verhältnis von Kontaktform und -dicke zur gesamten Zellfläche ist ein Optimierungsproblem. Die Erhöhung der Lichtabschattung durch geringere Abschattung, also schmale Leiterbahnen erhöht andererseits den Serienwiderstand, reduziert also den Wirkungsgrad.

Technologie

Ausgangsstoff für die Herstellung von Sili-

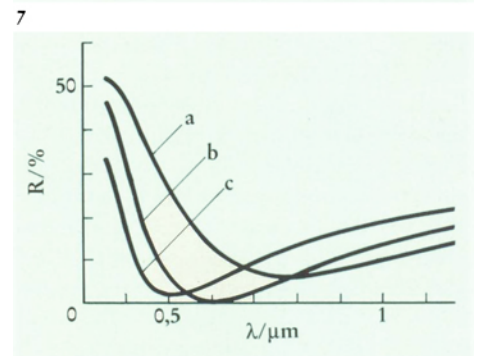
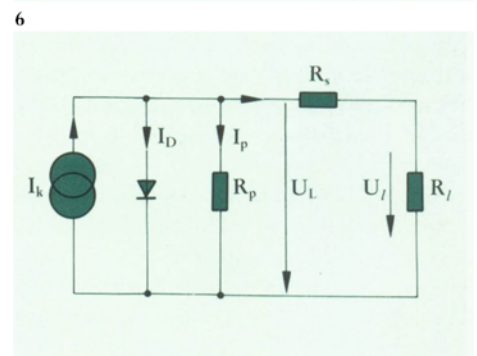
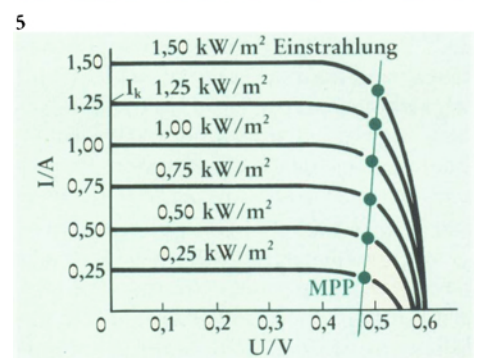
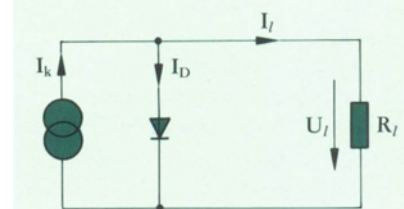
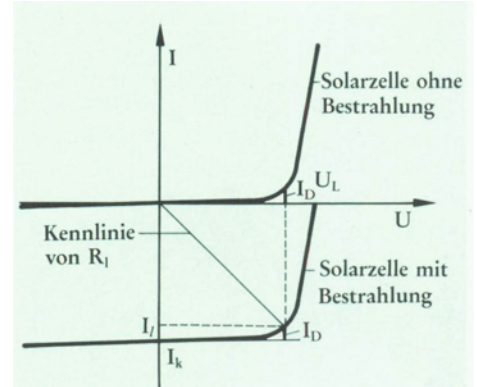


Abb. 4. Strom-/Spannungskennlinie einer unbeleuchteten bzw. beleuchteten Solarzelle. Bei Bestrahlung ist die Dunkelkennlinie um den Wert des Kurzschlußstroms I_k nach unten verschoben. Das Ersatzschaltbild der Solarzelle ist die Parallelschaltung aus einer Stromquelle (Photostrom) und einer idealen Diode. I_k ist der Kurzschlußstrom, U_l die Spannung am Lastwiderstand R_l , I_l der Strom im Lastwiderstand und I_D der Strom durch die ideale Diode.

Abb. 5. Alle elektrischen Größen, auch der Wert des optimalen Lastwiderstandes, sind von der Höhe der Beleuchtungsstärke und der Temperatur der Solarzelle abhängig. MPP (Maximum Power Point) ist der Punkt maximaler Leistung; die Betriebsbedingungen müssen so geregelt werden, daß die Zelle immer in diesem Punkt gehalten wird, was man mit MPP tracking bezeichnet.

Abb. 6. Ersatzschaltbild der Solarzelle mit Serien- und Parallelwiderstand R_s bzw. R_p ; damit wird die Spannung U_l an R_l kleiner als die theoretisch mögliche Leerlaufspannung U_L ; außerdem wird der Kurzschlußstrom kleiner als der Photostrom.

Abb. 7. Spektrale Variation des Reflektionsgrades an einlagigen Antireflexionsschichten. Man optimiert auf ein Minimum der Reflexion im Spektralbereich mit hoher Sonneneinstrahlung; a) Silizium-Dioxidschicht mit Brechungsindex $n = 1,49$ und Dicke $d = 127$ nm, b) Silizium-Monoxidschicht mit $n = 1,97$ und $d = 77$ nm, c) Silizium-Nitridschicht mit $n = 2,35$ und $d = 56$ nm.

zium ist Quarzsand, der zu Silizium reduziert wird. Will man Scheiben aus einkristallinem Silizium herstellen, zieht man einen Impfkristall unter Drehbewegungen langsam aus einer mit Dotierungsstoffen versehenen Schmelze heraus, so daß sich Si-Atome regelmäßig ins Kristallgitter einordnen können. Man erhält dann Stäbe aus einkristallinem Silizium mit einer Dicke bis zu 21 cm.

Bei der Herstellung von polykristallinem Si gießt man flüssiges Si in einen Graphittiegel, in dem man es erstarren läßt. Hält man während der Erstarrung einen Temperaturgradienten aufrecht, so besteht der erstarrte Block aus vielen Kristalliten, die den Block säulenförmig von oben nach unten durchsetzen. Sägt man den Block senkrecht zu den Kristalliten in Scheiben, so erhält man Solarzellen, in denen viele einkristalline Bereiche aneinander grenzen. Auch an den Grenzen dieser Kristallite tritt eine „Oberflächenrekombination“ auf, die erzeugten Ladungen gehen hier teilweise wieder verloren. Deshalb ist die Diffusionslänge von polykristallinem Material kleiner und damit der Wirkungsgrad schlechter als bei monokristallinem Si. Andererseits ist aber auch der Energieaufwand, und daher der Herstellungspreis für polykristallines Material, niedriger. Da der Anwender aber ein photovoltaisches System benötigt, das auch Gestelle, Fläche, Traggpunkte miteinschließt, wird man mit fortschreitender Preisreduktion die leistungsfähigeren Zellen wohl immer mehr favorisieren, um mit möglichst kleinen Flächen auszukommen.

Nach der Herstellung der monokristallinen Stäbe bzw. der polykristallinen Blöcke werden diese in Scheiben von $10 \cdot 10$ cm² bis $15 \cdot 15$ cm² gesägt, wobei ein nicht unwesentlicher Teil des Materials verlorengeht, denn das Sägeblatt ist etwa genauso dick wie die Siliziumscheiben. Nach dem chemischen Reinigen und Polieren wird ein pn-Übergang erzeugt, indem man bei hohen Temperaturen Phosphor in die Scheibe eindiffundieren läßt. Dies kann wie in der Chip-Industrie durch Einleiten eines Phosphorgases in den Ofen erfolgen. Da dann auf beiden Seiten der Scheibe eine Dotierung erfolgt, muß man einseitig einen pn-Übergang wieder abätzen. Danach wird auf beiden Seiten der Kontakt aufgedampft.

Neuerdings diffundiert man aus einer Paste ein, die im Siebdruck nur auf eine Seite der Scheibe aufgebracht wird. Bestreicht man die Rückseite mit einer anderen Paste, so kann

man im gleichen Hochtemperaturschritt hier ebenfalls Atome eindiffundieren und die Leitfähigkeit der Rückseite für die Kontaktierung erhöhen. Auch der Kontaktkamm, der Rückseitenkontakt und die Antireflexschicht werden dann im Siebdruck auf die Scheibe aufgebracht und im Ofen gehärtet. Abschließend wird die Zelle zugeschnitten.

Verbesserung des Wirkungsgrades

Zur Materialersparnis möchte man dünnere Solarzellen bauen. Eine Dicke von 200 µm ist prinzipiell bei gutem Ausgangsmaterial ausreichend. Jetzt können aber merkliche Rekombinationsverluste am rückseitigen Kontakt auftreten.

Man diffundiert deshalb, ähnlich dem Emittent, eine dünne, sehr hoch dotierte p-Schicht direkt unter den Rückkontakt. An einer solchen Folge unterschiedlich hoch dotierter p-Schichten entsteht ein elektrisches Feld (BSF = Back Surface Field) analog zur Schichtenfolge von n und p. Es ist so gerichtet, daß die Elektronen nicht in die hochdotierte Schicht eindringen können, also den Kontakt nicht erreichen. Dadurch können die Elektronen nicht am Kontakt rekombinieren, die Zahl der Elektronen, die zur RLZ diffundiert und eingesammelt wird, steigt. Die Stromausbeute kann man weiter erhöhen, wenn das nicht absorbierte Licht durch einen rückseitigen Reflektor am Kontakt wieder zurück in die Zelle reflektiert wird. Beide Technologien, BSF und Rückseitenreflektor, werden bereits für Weltraumzellen angewandt, sind bisher für Solarzellen bei terrestrischer Nutzung aber noch zu teuer.

An der Zellenvorderseite ist das Kristallgitter abgebrochen, dies verursacht Rekombinationsverluste. Die offenen Bindungen kann man mit einer Siliziumdioxid-Schicht hoher Qualität passivieren, die dann gleichzeitig als Antireflexschicht dienen kann. Die Passivierung erhöht vor allem die Ausbeute an der blauen Flanke des solaren Spektrums. Einige weitere technologische Tricks erlauben es, Solarzellen für höchste Wirkungsgrade zu bauen. Anstelle eine Anti-Reflexions-Schicht aufzubringen, kann man die Oberfläche des Siliziums durch anisotropes Ätzen texturieren (Abbildung 8). Dabei entstehen kleine Pyramiden auf der Oberfläche der Siliziumscheibe. Einfallendes Licht dringt dann entweder sofort ins Silizium ein oder wird auf eine benachbarte Pyramide reflektiert, wo es dann absorbiert wird. Die gesamten Refle-

xionsverluste kann man so auf unter 3 % verringern. Andere Wissenschaftler versuchen, das vorderseitige Kontaktgitter vertikal in den Emitter einzulassen. Bei gleicher Leitfähigkeit schattet eine Leiterbahn so einen kleineren Teil der Oberfläche ab, folglich kann mehr Licht in das Silizium eindringen.

Im Hinblick auf Wirkungsgradverbesserung bei geringen Kosten ist die MIS-Inversionsschicht-Solarzelle (Abbildung 9) interessant [5]. MIS steht für Metall-Isolator-Silizium. Als Ausgangsmaterial dient eine p-dotierte Si-Scheibe. Auf der Vorderseite wird eine 1,3 nm dicke SiO_2 -Schicht aufgebracht, welche von Elektronen durchtunnelt werden kann. Als Abdeckung und Antireflexlage dient eine Siliziumnitridschicht. An der Grenzfläche zwischen Oxid und Nitrid wird eine ortsfeste positive Ladung etabliert. Diese sorgt dafür, daß unter der SiO_2 -Schicht eine Inversionsschicht mit Elektronenüberschuß induziert wird. Zwischen n-Inversionsschicht und p-Zone entsteht eine Raumladungszone, mit der eine effiziente Ladungstrennung erreicht wird. Die Elektronen fließen zur Inversionsschicht ab, durchtunneln die SiO_2 -Schicht und werden in den Al-Kontakten gesammelt. Die Löcher diffundieren durch die feldfreie p-Schicht zum Rückseitenkontakt. Die MIS-Zelle zeichnet sich vor allem durch eine gute Ausbeute für kurzwellige Solarstrahlung aus: wegen des Fehlens von Kontakten auf der Vorderseite des Halbleiters ist die Oberflächenrekombination dort stark herabgesetzt. An $10 \cdot 10 \text{ cm}^2$ großen Zellen aus einkristallinem Material wird ein Wirkungsgrad von ca. 15 % erzielt. Durch Ausnutzung der Rückseiteneinstrahlung – die Rückseite erhält hierzu eine Gitterkontaktstruktur – läßt sich dieser Wert noch erhöhen.

Andere neue Solarzellentypen bestehen aus einer nur sehr schwach dotierten Siliziumscheibe. Man kontaktiert inselförmige Punkte oder dotierte Bahnen auf der Rückseite, die abwechselnd n- und p-dotiert sind (Abbildung 10). Für diese Solarzellen verwendet man Silizium allerhöchster Reinheit und Kristallqualität. Die Herstellung muß in Reinräumen wie in der Chip-Industrie erfolgen. Bei Verwendung von hochreinem Material, Oberflächen- und Rückseitenpassivierung und einer Texturierung der Oberfläche erhält man so Wirkungsgrade bis zu 23 %. Noch höhere Wirkungsgrade erzielt man, wenn man Solarzellen für die Anwendung in konzentriertem Sonnenlicht baut; die Erhöhung beruht auf einer Vergrößerung der Leer-

laufspannung, welche logarithmisch mit der Bestrahlungsstärke variiert. Man benötigt dann Spiegel oder Fresnellinsen zur Konzentration des Sonnenlichtes und muß die Solarzelle dem Sonnenstand nachführen. Bei 200facher Lichtkonzentration hat man Wirkungsgrade von mehr als 28 % erreicht.

Vergleichbar hohe Wirkungsgrade erhält man, wenn man Galliumarsenid anstelle von Silizium zur Herstellung der Solarzelle verwendet. Galliumarsenid ist ein direkter Halbleiter, deshalb ist seine Lichtabsorption für Photonenenergien oberhalb der Bandlücke sehr hoch (Abbildung 3 und 11).

Eine Galliumarsenid-Solarzelle braucht daher nur einige μm dick zu sein. Solche Solarzellen sollen auf Fremdsubstrate aufgebracht werden. Da der Bandabstand von Galliumarsenid bei ca. 1,4 eV liegt, wird Licht mit $\lambda > 900 \text{ nm}$ in diesem Material nicht absorbiert. Das Fremdsubstrat könnte also eine weitere Solarzelle sein, die für die Absorption von infrarotem Licht optimiert ist.

Man kommt so zur Idee der Tandemzelle [6], bei der mehrere Teilzellen Licht aus unterschiedlichen Spektralbereichen in elektrische Energie umwandeln. Abbildung 11 zeigt die spektrale Empfindlichkeit einer Silizium-Solarzelle, die im gesamten Bereich von 400 nm bis 1100 nm absorbiert, sowie die Empfindlichkeit einer GaAs- bzw. Ge-Solarzelle. Setzt man gut optimierte GaAs- und Ge-Solarzellen übereinander (Abbildung 12), so werden bereits Wirkungsgrade von über 38 % erzielt [7]. Da Galliumarsenid viel teurer als Silizium ist, wird man es wohl nur bei Lichtkonzentration oder für Tandemzellen einsetzen.

Dünnschichtzellen

Speziell für Dünnschichtzellen werden viele neue Materialien untersucht. Hierzu zählen Kupferindium-Diselenid und Cadmium-Tellurid; beide Materialien ermöglichen im Labor Wirkungsgrade von 14,1 % bzw. 12 %. Man bringt dünne polykristalline Schichten auf einen Glasträger oder Stahlblech auf. Wegen der geringen Menge an Halbleitermaterial und der Möglichkeit, bandförmiges Substrat kontinuierlich durch die Herstellungs-kammer zu ziehen, haben derartige Zellen gute Aussichten auf Preisreduktion. Dies gilt auch für Solarzellen aus amorphem Silizium, die man heute vor allem in Taschenrechnern und Uhren einsetzt. Die Ladungssammlung

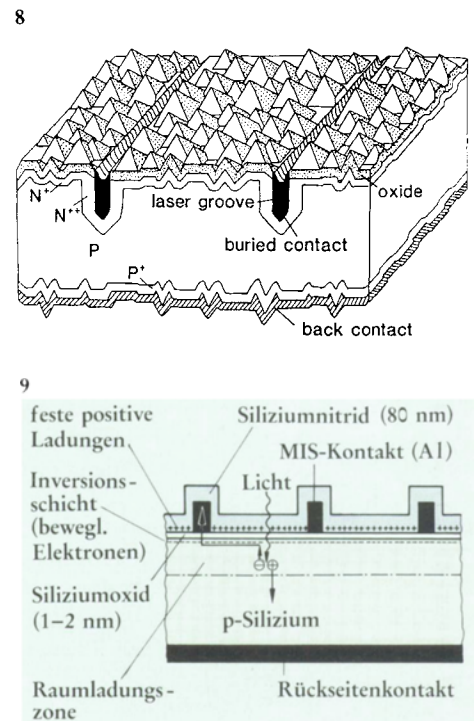
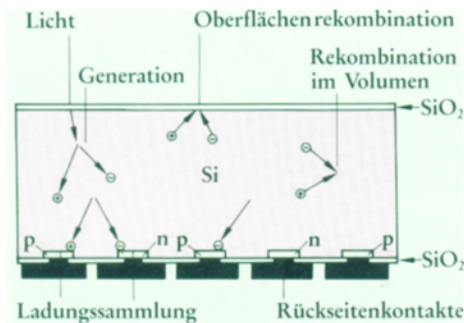


Abb. 8. Hochleistungszelle der Universität von New South Wales, Australien [10]. Die Pyramiden auf der Oberfläche werden durch anisotropes Ätzen erzeugt und reduzieren die Reflexion. Die Kontaktbahnen sind vertikal in den Emitter gelegt, um die Abschattung zu verringern. Sehr hoch dotierte Gebiete N^{++} verbessern den Kontaktwiderstand. Am Rückkontakt befindet sich ein BSF (P^+)-Gebiet. Die unebene Rückseite dient auch dazu, Licht diffus in die Basis zurückzereflektieren. Durch ein Oxid ist die Zellenvorderseite passiviert. Typisch für derartige Zellen sind Wirkungsgrade von 23 % [10].

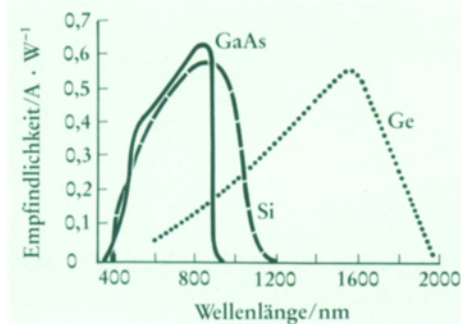
Abb. 9. MIS-Inversionsschichtzelle [5]. Diese Zelle enthält keinen durch Dotie-

in amorphen Zellen [8] erfolgt im Gegensatz zu den bisher beschriebenen Solarzellen nach einem anderen Prinzip. Hier sind nicht die Diffusionsströme vorherrschend, denn im gesamten Volumen der Solarzelle herrscht ein elektrisches Feld. Es dominieren also die Feldströme. Ein genaues Modell für die Ladungssammlung ist bisher aber noch nicht aufgestellt worden. Noch nicht gut verstanden ist auch der sogenannte Staebler-Wronsky-Effekt. Amorphe Solarzellen verlieren nämlich bei Beleuchtung einen Teil ihrer Fähigkeit, Licht umzuwandeln; der Wirkungsgrad sinkt direkt nach der ersten Inbetriebnahme ab. Die Zellen werden deshalb künst-

10



11



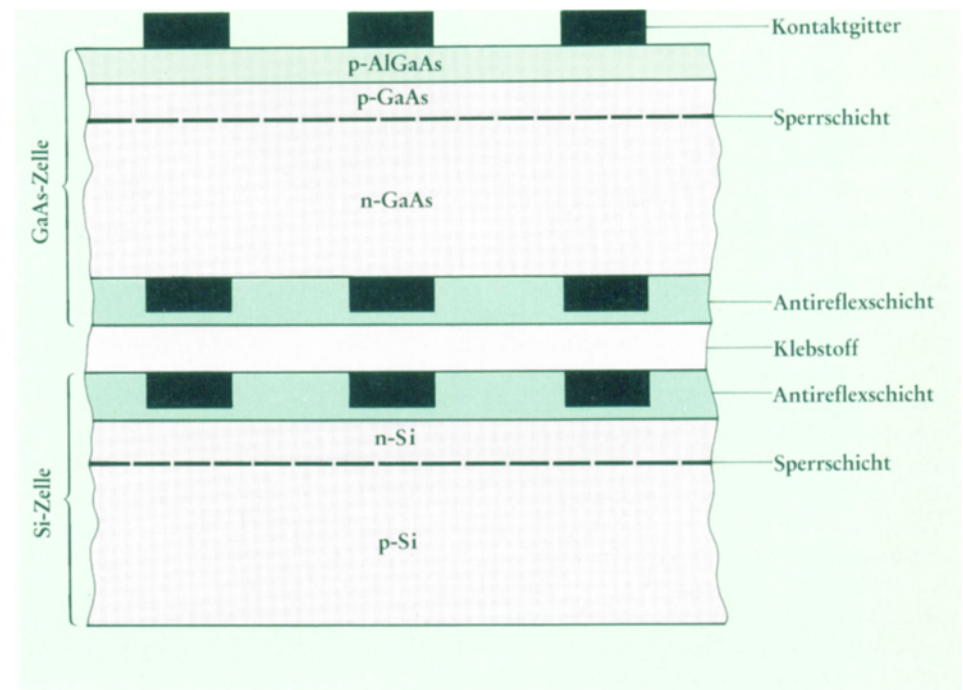
rung hergestellten pn-Übergang. Eine n-Inversionsschicht an der Vorderseite dient zur Stromweiterleitung und verursacht eine Raumladungszone. Elektronen können aus der Inversionsschicht durch eine sehr dünne SiO₂-Schicht in die Al-Kontakte tunneln.

Abb. 10. Die Si-Hochleistungssolarzelle der Stanford Universität, Kalifornien, besteht aus einer 100 μm dicken, nahezu undotierten Siliziumscheibe allerhöchster Reinheit [11]. Die Diffusionslänge beträgt 1 mm im Vergleich zu 0,2 mm bei kommerziellen Solarzellen. Die Oberfläche ist so gut mit SiO_2 passiviert, daß nahezu keine Oberflächenrekombination mehr auftritt. Obwohl das Silizium im Dunkeln hochohmig ist, wer-

lich vorgealtert, wobei der Wirkungsgrad auf etwa 70 % des Anfangswertes sinkt. Der Wirkungsgrad von Modulen liegt heute bei 5 %. Die Hersteller garantieren diesen Wirkungsgrad dann für mehrere Jahre der Lebensdauer.

Amorphes Silizium kann man durch die Zersetzung von Silan (SiH_4) in einem Reaktorgefäß auf einem Substrat aus Glas oder Stahl abscheiden. Die H-Atome des Silan werden zum Teil in das amorphe Silizium eingebaut und passivieren die vielen offenen Bindungen, die durch die fehlende Gittersymmetrie entstehen. Durch Beigabe von Germanium kann man auch hier den Bandabstand ändern

12



den bei intensivem Lichteinfall so viele Ladungsträger erzeugt, daß eine gute Leitfähigkeit erzielt wird. An der Rückseite befinden sich abwechselnd p- und n-Kontaktinseln von $50 \cdot 50 \mu\text{m}^2$ Größe. Die Ladungssammlung findet bei diesem Zelltyp also an der Rückseite statt. Der Wirkungsgrad beträgt 22 %, bei 100facher Lichtkonzentration erhöht er sich auf 27,5 %.

Abb. 11. Galliumarsenid besitzt einen großen Bandabstand. GaAs-Solarzellen liefern deshalb eine hohe Leerlaufspannung, absorbieren Licht aber nur im Wellenlängenbereich unter 900 nm. Silizium-Solarzellen absorbieren im Spektralbereich von 400 bis 1100 nm, aber die Leerlaufspannung

ist durch den kleineren Bandabstand geringer; Solarzellen aus Mischkristallen oder Germanium können auch Licht mit noch größeren Wellenlängen absorbieren. Im Bild ist die spektrale Ausbeute bzw. Empfindlichkeit $S(\lambda)$ in Ampere Photostrom pro Watt monochromatischen Lichtes über der Lichtwellenlänge aufgetragen.

Abb. 12. Tandem-Solarzelle: Setzt man Solarzellen für unterschiedliche Wellenlängenbereiche übereinander, läßt sich der Wirkungsgrad beträchtlich erhöhen. Im Herbst 1989 wurde so ein Gesamtwirkungsgrad von 37 % erzielt. In der Abbildung ist die Si-GaAs-Tandemzelle der Sandia National Laboratories im Schnitt dargestellt [6].

und so Tandemzellen erzeugen. Diese Zellen zeigen auch eine höhere Stabilität gegen Degradation.

Installierte Kraftwerke

Neben Solarzellen-Installationen für den Inselbetrieb auf Berghütten, Booten, Relaisstationen sind in den vergangenen Jahren auch viele kleinere Photovoltaik-Pilot-Kraftwerke errichtet worden. Das größte dieser Kraftwerke, „Carissa Plains“ in Kalifornien, wurde 1985 von Arco Solar zusammen mit Pacific Gas & Electric gebaut; es hat eine Spitzenleistung von 6,5 MW (Abbildung 13). Die

Stromerzeugungskosten liegen bei 0,25 \$/kWh. Das Kraftwerk wird allerdings derzeit demontiert.

Bis 1992 soll eine Serie von 20 kW-Feldern mit den verschiedenen Technologien im PVUSA (Photovoltaics for Utility Scale Applications)-Programm installiert werden. In der Bundesrepublik soll von 1990 bis 1994 ein Breitentest mit 1000 netzgekoppelten photovoltaischen Kleinanlagen auf Hausdächern durchgeführt werden. In Kobern-Gondorf wird durch das RWE die Netzeinspeisung in größerem Rahmen erprobt. Ältere Großprojekte findet man beispielsweise auf Pellworm,

aber auch Kleinprojekte werden vom Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) gefördert.

Ausblick

Die Photovoltaik ist ein Forschungs- und Entwicklungsgebiet mit hohen Investitionen und rapidem Fortschritt. Ein Jahrzehnt intensiver Grundlagenuntersuchungen haben ein solides Verständnis von Photovoltaik-Materialien und ihren Verlustprozessen geschaffen. Die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten der neunziger Jahre werden sich daher wesentlich auf die Zellenoptimierung, auf den serienmäßigen Bau von Modulen und von Photovoltaik-Anlagen konzentrieren.

Der Photovoltaik-Markt wird heute von den USA und Japan angeführt; Europa folgt dicht darauf. Derzeit investieren die Bundesrepublik Deutschland und Japan jedoch mehr als die USA, so daß Änderungen in der Rangliste erwartet werden können.

Für die nächste Zukunft gehen Schätzungen der Chronar Corporation/USA [9] davon aus, daß mit Investitionen von 20 Milliarden \$ bis 1995 weltweit eine jährliche Solarzellen-Produktionskapazität von 10 GW aufgebaut werden könnte. Bis zum Jahr 2000 wäre dann eine Photovoltaikkapazität von 40 GW installierbar. Ob sich ein Konsens für eine derartige Zukunftsinvestition herbeiführen läßt und ob damit die obige Prognose realistisch ist, wird die Zukunft weisen.

Literatur

- [1] J. Fricke, U. Schüßler, R. Kümmel, *Physik in unserer Zeit* **20**, 56 (1989).
- [2] E. Becquerel, *Comptes Rendus* **9**, 561 (1839).
- [3] D. M. Chapin, C. S. Fuller, G. L. Pearson, *J. Appl. Phys.* **25**, 676 (1954).
- [4] M. Selders, D. Bonnet, *Physik in unserer Zeit* **10**, 3 (1979).
- [5] W. Hoffmann und R. Hezel, Die MIS-Inversionsschicht-Solarzelle, *Elektrowärme International* **45**, 105 (1987).
- [6] R. Pool, *Science* **241**, 900 (1988).
- [7] L. M. Fraas, J. A. Avery, J. Martin, V. S.

13

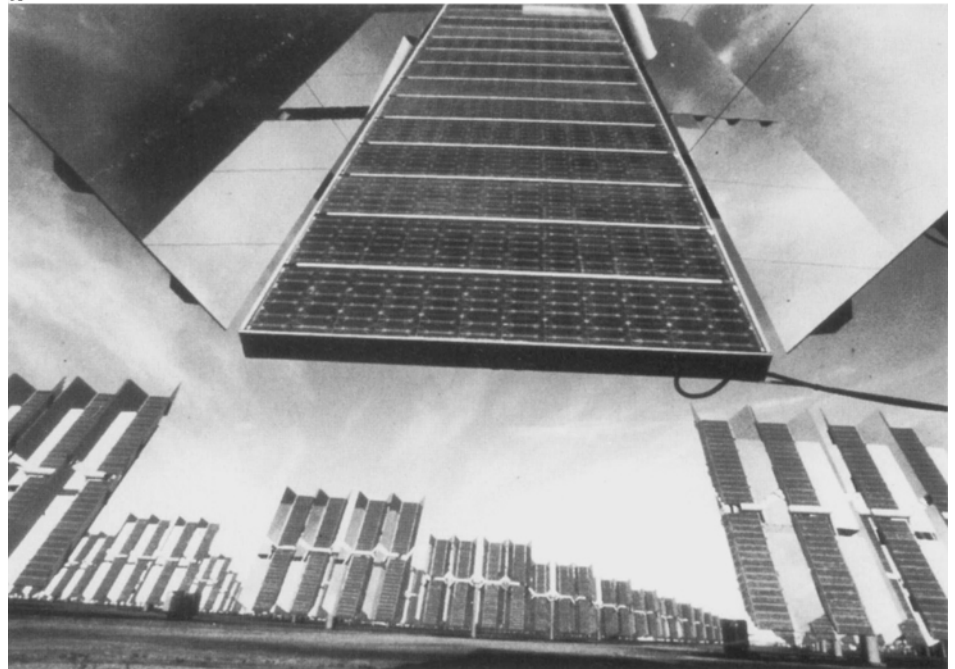


Abb. 13. Carissa Plains Photovoltaik-Solarkraftwerk mit 6,5 MW Spitzenleistung.

Sundaram, G. Girard, V. T. Dinh, T. M. Davenport, J. W. Yerkles, M. J. O'Neill, *IEEE Transactions on Electron Devices* **37**, 443 (1990).

[8] G. Winterling, *Physik in unserer Zeit* **16**, 50 (1985).

[9] H. M. Hubbard, *Science* **244**, 297 (1989).

[10] M. A. Green, A. W. Blakers, S. R. Wenham, 9th E. C. Photovoltaic Energy, Freiburg 1989, S. 302.

[11] *IEEE Electron Device Letters*, **7**, 567 (1986).

Anschriften der Autoren:

Dr. K. Bücher, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, Oltmannsstr. 22, 7800 Freiburg i. Br.

Prof. Dr. J. Fricke, Physikalisches Institut der Universität Würzburg, Am Hubland, 8700 Würzburg.