

Solarzellen der dritten Generation

Grenzen des Wirkungsgrades von Solarzellen

Peter Würfel und Thorsten Trupke

Die Grenze für den Wirkungsgrad von gewöhnlichen Solarzellen liegt Lehrbüchern zufolge bei unüberwindlichen 30 %. Anhand der prinzipiellen Funktionsweise von Solarzellen soll hier jedoch diskutiert werden, wie sich Wirkungsgrade deutlich über diesem Grenzwert erreichen lassen könnten, welche Faktoren dabei die entscheidende Rolle spielen und welche praktischen Ansätze Erfolg versprechend erscheinen.

Shockley und Queisser [1] haben 1961 als obere Grenze für den Wirkungsgrad von Solarzellen 30 % für unfokussiertes Sonnenlicht außerhalb der Erdatmosphäre berechnet. Berücksichtigt man die Absorption des Sonnenlichts in der Atmosphäre durch z. B. Wasserdampf oder CO₂, so liegt diese Grenze auf der Erde bei 33 %. Für im Labor mit großem Aufwand hergestellte einkristalline Siliziumsolarzellen wurde bereits ein Wirkungsgrad von 24,7 % gemessen [2]. Das sind etwa 75 % des theoretischen Grenzwertes und damit ähnlich viel wie bei fortgeschrittenen Dampfkraftwerken. Große Verbesserungen scheinen da nicht mehr möglich. Wo aber liegt wirklich die Grenze für den Wirkungsgrad für photovoltaische Energiekonversion und wodurch wird sie bestimmt? Für fortgeschrittene Solarzellenkonzepte, auch *Solarzellen der dritten Generation* genannt, werden theoretische Grenzen von bis zu 86 % errechnet. Basierend auf einer Darstellung der prinzipiellen Funktionsweise von Solarzellen werden hier einige dieser Konzepte diskutiert und bewertet.

Solarzellen als Wärmekraftmaschinen

Solarzellen wandeln Sonnenenergie, die in Form von Wärmestrahlung zur Erde kommt, in elektrische Energie um. Dabei kommt, wie immer, wenn Wärme in eine Entropie freie Energieform wie mechanische, chemische oder elektrische Energie umgewandelt werden soll, die Thermodynamik mit ihrem 2. Hauptsatz ins Spiel. Dieser besagt, dass Entropie nicht vernichtet, wohl aber erzeugt werden kann. Der bestmögliche Umwandlungsprozess ist demnach ein isentroper Prozess, bei dem keine Entropie erzeugt wird.

Alle Maschinen, die Wärme in eine Entropie freie Energieform umwandeln (auch Solarzellen!), arbeiten nach folgendem Prinzip: Wärmeenergie, das Produkt von Temperatur und Entropie, wird zunächst bei hoher Temperatur von einem Arbeitsgas aufgenommen. Die mit der Energie aufgenommene und die eventuell

erzeugte Entropie muss anschließend, da sie nicht vernichtet werden kann, im Verlauf des Prozesses in Form von Wärme wieder abgeführt werden. Damit dabei nicht auch gleich die gesamte aufgenommene Energie wieder abgeführt wird, muss die Entropieabgabe bei tieferer Temperatur geschehen, das Arbeitsgas muss also in einem Zwischenschritt abgekühlt werden. Die Entropieabgabe bei tieferer Temperatur und der damit verbundene Energieverlust sind also prinzipiell unvermeidbar, was den Wirkungsgrad für solare Energiekonversion von vorneherein auf den Carnot-Wirkungsgrad $\eta = 1 - T_0/T_S$ begrenzt, der für die Sonnentemperatur $T_S = 6000$ K und eine Umgebungstemperatur $T_0 = 300$ K allerdings sehr hoch ist und bei 95 % liegt.

Der Carnot-Wirkungsgrad ist jedoch kein wirklich praktischer Grenzwert für die Nutzung der Sonnenenergie, denn isentrope Prozesse haben es leider an sich, dass zwar der Wirkungsgrad groß, der Durchsatz jedoch verschwindend klein ist. So stellt, streng genommen, ein Carnot-Prozess auch gar keinen Prozess dar, sondern eine Gleichgewichtssituation.

Sehr anschaulich wird der Unterschied zu dem für Solarzellen gebräuchlichen Wirkungsgrad an einem System, in dem ein Zwischenabsorber, der von der Sonne auf die Temperatur T_A geheizt wird, eine Carnot-Maschine antreibt, die zwischen dem Absorber und einem Reservoir bei Raumtemperatur T_0 mit dem idealen Wirkungsgrad von $\eta = 1 - T_0/T_A$ arbeitet. Für den Gesamtwirkungsgrad einer solchen Anordnung ergibt sich

$$\eta_{\text{gesamt}} = \left(\frac{\sigma T_S^4 - \sigma T_A^4}{\sigma T_S^4} \right) \left(1 - \frac{T_0}{T_A} \right) = \left(1 - \frac{T_A^4}{T_S^4} \right) \left(1 - \frac{T_0}{T_A} \right). \quad (1)$$

Der erste Term in Gl. (1) ergibt sich aus dem Stefan-Boltzmann-Gesetz und gibt an, welcher Anteil der eingestrahlten Wärmeleistung σT_S^4 der Sonnenstrahlung tatsächlich entnommen wird. Der zweite Term beschreibt den Carnot-Wirkungsgrad, mit dem dieser Anteil im Prinzip in elektrische Energie umgewandelt werden kann. Der Gesamtwirkungsgrad nach Gl. (1) ist null bei $T_A = T_S$, da sich der Absorber dann im Strahlungsgleichgewicht mit der Sonne befindet und alle absorbierte Energie wieder zur Sonne zurückstrahlt, für die Weiterverarbeitung in der Carnot-Maschine also nichts mehr übrig bleibt. Der Wirkungsgrad ist ebenfalls null bei $T_A = T_0$, weil dann die gesamte aufgenommene Energie zur Abfuhr der Entropie gebraucht wird. Ein maximaler Wirkungsgrad von 85 % wird jedoch

Prof. Dr. Peter Würfel, Institut für Angewandte Physik, Universität Karlsruhe, 76128 Karlsruhe; Dr. Thorsten Trupke, Centre of Excellence for Advanced Silicon Photovoltaics and Photonics, University of New South Wales, Sydney, 2052, Australien

erreicht für eine optimale Absorbtemperatur von $T_A = 2480$ K. Mit großem Aufwand lässt sich noch eine weitere, geringfügige Steigerung auf 86 % erreichen, wenn jedes Spektralintervall des Sonnenspektrums von einem separaten Absorber mit einer eigenen Carnot-Maschine verarbeitet wird, wobei dann jeder Absorber seine eigene optimale Temperatur hat. Als Schlussfolgerung dieser Überlegungen soll festgehalten werden, dass die Sonnenenergie wegen ihrer hohen Temperatur eine sehr hochwertige Energie ist und theoretisch Wirkungsgrade von 86 % ermöglicht.

Halbleiter sind Wärmekraftmaschinen, die chemische Energie erzeugen

Als Wärmekraftmaschinen müssen Solarzellen auch deren oben beschriebenes allgemeines Prinzip befolgen. Als Ausgangsmaterialien für Solarzellen dienen in der Regel Halbleiter. Das Arbeitsgas sind darin die durch Absorption von Photonen erzeugten Elektronen im Leitungsband und Löcher im Valenzband. Abb. 1a (grüne Kurven, Mitte) zeigt die Energieverteilung dieses Arbeitsgases unmittelbar nach seiner Erzeugung, d. h. die Dichte besetzter Elektronenzustände pro Energieintervall im Leitungs- und im Valenzband. Die hohe Besetzungswahrscheinlichkeit hochenergetischer Zustände spiegelt hier die hohe Temperatur der Sonnenstrahlung wider. In Halbleitern verlieren Elektronen und Löcher in der Regel sehr schnell ihre Energie durch die Erzeugung von Phononen. Dies führt zu einer Umbesetzung der Elektronen- und der Löcherzustände und zu einer verstärkten Population der niederenergetischen Zustände (orange Kurven, Abb. 1a rechts). Sobald das Temperaturgleichgewicht mit den Phononen erreicht ist, sind die Elektronen auf die Zustände des Leitungsbands und die Löcher auf die des Valenzbandes jeweils entsprechend separater Fermi-Verteilungen mit der Temperatur des Gitters verteilt. Da die Abkühlung bei konstanter Konzentration von Elektronen und Löchern erfolgt, ist die Konzentration beider Teilchensorten jedoch größer als im Gleichgewicht mit der 300-K-Umgebungsstrahlung. Deswegen haben die für das Leitungsband und für das Valenzband geltenden Fermi-Verteilungen verschiedene

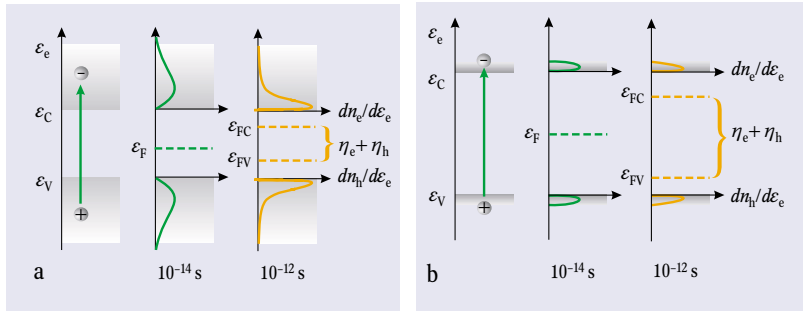


Abb. 1:
► a) Die mit dem breiten Sonnenspektrum erzeugten Elektronen (und Löcher) verlieren durch Emission von Phononen einen großen Teil ihrer Energie, bis sie nach typischerweise 10^{-12} s die Gittertemperatur erreicht haben. Ihre Energieverteilung wird dann durch getrennte Fermi-Verteilungen für Elektronen und für Löcher beschrieben.
► b) Sind die Elektronen und Löcher auf schmale Energiebereiche begrenzt, ist der Energieverlust bei der Abkühlung wesentlich geringer.

Wirkungsgrad für die Erzeugung chemischer Energie

Prinzipiell können einer Solarzelle nur die Elektronen und Löcher durch einen äußeren Stromkreis entnommen werden, die im Absorber erzeugt werden und nicht vorher rekombinieren. Der Strom j_{eh} von Elektron-Loch-Paaren, der einem belichteten Halbleiter mitsamt ihrer chemischen Energie entnommen werden kann, ist demnach gegeben durch die Differenz von Generationsrate und Rekombinationsrate.

$$j_{eh} = G_{eh} - R_{eh} \quad (i)$$

Unter der Annahme, dass bei der Absorption eines Photons genau ein Elektron-Loch-Paar erzeugt wird und dass bei seiner Rekombination auch genau ein Photon emittiert wird, die Rekombination also ausschließlich strahlend ist, sind die auf die Fläche bezogenen Raten durch den absorbierten bzw. emittierten Photonenstrom gegeben.

Es ist wenig bekannt, dass der Photonenstrom $dj_y(\hbar\omega)$, der im Photonenenergieintervall $d(\hbar\omega)$ von einem schwarzen Körper wie der Sonne oder einem belichteten Halbleiter emittiert wird, durch

das gleiche *verallgemeinerte* Plancksche Strahlungsgesetz gegeben sind [4]:

$$dj_y(\hbar\omega) = a(\hbar\omega) \frac{\Omega}{4\pi^3 \hbar^3 c_0^3} \frac{(\hbar\omega)^2}{\exp\left[\frac{\hbar\omega - (\eta_e + \eta_h)}{kT}\right] - 1} d(\hbar\omega) \quad (ii)$$

Darin ist $a(\hbar\omega)$ der Absorptionsgrad, Ω der mit dem Lambertschen Cosinus-Gesetz bewertete Raumwinkel, in den die Emission geht, T die Temperatur und $\mu_y = \eta_e + \eta_h$ das chemische Potential der Elektron-Loch-Paare, das im ursprünglichen Planckschen Strahlungsgesetz fehlt, weil es nur für rein thermische Emittoren wie die Sonne gilt, also für $\mu_y = 0$. Die Sonnenstrahlung kommt ohne

Fokussierung aus dem kleinen Raumwinkel von $\Omega = 6,8 \cdot 10^{-5}$, den die Sonnenscheibe am Himmel einnimmt, während die Emission des Halbleiters (der Solarzelle) in den gesamten Halbraum, also in den effektiven Raumwinkel $\Omega = \pi$ geht. Durch Fokussierung der Sonnenstrahlung, z. B. mithilfe von Spiegeln oder Linsen, lässt sich der Raumwinkel, aus dem die Sonnenstrahlung absorbiert werden kann, deutlich vergrößern, maximal bis auf $\Omega = \pi$, sodass die Sonnenstrahlung dann aus dem gesamten Halbraum auf den Halbleiter fällt. Dies entspricht der maximal möglichen Konzentration der Sonnenstrahlung und einem Konzentrations-

faktor von etwa 46200. In der Praxis wird heute z. B. mit Tandemanordnungen mit Konzentrationsfaktoren von einigen hundert „Sonnen“ gearbeitet.

Gl. (ii) erlaubt die Berechnung des von der Sonne stammenden, absorbierten Photonenstroms ($\mu_y = 0$, $T = T_s$), also der Generationsrate G , und des vom Absorber als Funktion der chemischen Energie pro Elektron-Loch-Paar ($\eta_e + \eta_h$) emittierten Photonenstromes, der Rekombinationsrate R . Aus Gl. (i) folgt die Rate j_{eh} , mit der Elektron-Loch-Paare dem Halbleiter als Funktion von $\mu_y = (\eta_e + \eta_h)$ entnommen werden können.

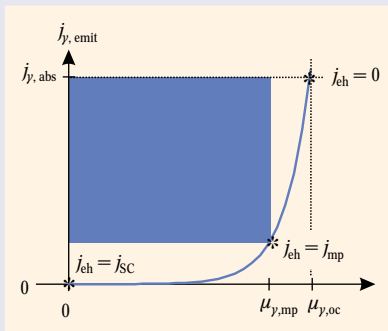


Abb. i: Vom Halbleiter emittierter Photonenstrom als Funktion von $\mu_y = \eta_e + \eta_h$ (blaue Kurve). Bei $\mu_y = \mu_{y,oc}$ entspricht der emittierte Photonenstrom dem insgesamt absorbierten Photonenstrom, und es werden keine Elektron-Loch-Paare und keine chemische Energie entnommen ($j_{eh} = 0$). Bei $\mu_y = 0$ ist zwar der entnommene Strom der Elektron-Loch-Paare maximal, nämlich gleich dem absorbierten Photonenstrom ($j_{eh} = j_{sc} = j_{y,abs}$). Dabei wird aber die Konzentration der Elektron-Loch-Paare soweit erniedrigt, dass ihre chemische Energie null wird ($\mu_{y,sc} = 0$). Der chemische Energiestrom ist maximal (blaue Fläche) am Punkt maximaler Leistung bei $\mu_y = \mu_{y,mp}$.

Fermi-Energien. Die Differenz der Fermi-Energien entspricht der Summe der elektro-chemischen Potentiale $\eta_e + \eta_h$ von Elektronen und Löchern und ist gleich der chemischen Energie pro Elektron-Loch-Paar, die bei der Abkühlung des Elektron-Loch-Gases entsteht. Diese Umwandlung von Wärme in chemische Energie findet in jedem belichteten Halbleiter statt und erfordert keine spezielle Struktur, wie zum Beispiel einen pn-Übergang.

Von chemischer Energie von Substanzen spricht man, wenn sie mit ihrem Reaktionsprodukt unter Umgebungsbedingungen nicht im Gleichgewicht stehen. Die chemische Energie, die Summe der chemischen Potentiale der an der Reaktion beteiligten Substanzen, ist die Triebkraft für die Reaktion, und diese läuft spontan immer zum Gleichgewicht hin. Bei der Reaktion der Elektronen mit den Löchern (Rekombination) entstehen in strahlenden Übergängen Photonen und in nicht-strahlenden Übergängen Phononen. Beide haben unter Umgebungsbedingungen das chemische Potential $\mu = 0$. $\eta_e + \eta_h > 0$ ist deswegen nutzbare chemische Energie.

Bei der in Abb. 1a gezeigten Thermalisierung verlieren die Elektronen und Löcher einen großen Teil der von den Photonen übernommenen Energie durch die Erzeugung von Phononen. Wenn jedoch, wie in Abb. 1b, die Energie der Elektronen und der Löcher auf einen schmalen Energiebereich begrenzt bleibt, dann geht auf dem Weg zum Temperaturgleichgewicht mit den Phononen weniger Energie verloren und die Thermalisierung verläuft mit geringerer Entropieerzeugung. Wir werden sehen, dass eine solche Einschränkung des für die Thermalisierung der Elektronen verfügbaren Energiebereiches und damit die Reduzierung der mit der Thermalisierung verbundenen Energieverluste das Ziel in allen Solarzellen der dritten Generation ist.

Wirkungsgrad für die Erzeugung chemischer Energie

Um Energie zu gewinnen, müssen dem Halbleiter Elektronen und Löcher mitsamt ihrer chemischen Energie entnommen werden. Unabhängig davon, wie dies in einer realen Solarzelle bewerkstelligt wird, lässt sich die Obergrenze des Wirkungsgrades für die Umwandlung von Wärme in entnommene chemische Energie theoretisch vorhersagen (siehe Infokasten „Wirkungsgrad für die Erzeugung chemischer Energie“).

Für den Fall, dass nur monochromatische Strahlung absorbiert und emittiert werden kann, lässt sich zeigen, dass bei Gleichheit von absorbiertem und emittiertem Photonenstrom (Gl. (i) und Gl. (ii)) die Effizienz für die Umwandlung der Photonenenergie in chemische Energie der Elektron-Loch-Paare (eh-Paare) dem Carnot-Wirkungsgrad entspricht. Dieser gilt aber auch hier wieder für eine Gleichgewichtssituation, in der dem Halbleiter, da er sich im Strahlungsgleichgewicht mit der Sonne befindet (obwohl er bei Raumtemperatur ist), gar keine eh-Paare und damit auch keine chemische Energie entnommen werden ($j_{eh} = 0$). Umgekehrt können dem Halbleiter fast alle durch Belichtung generierten eh-Paare entnommen werden, wenn $\eta_e + \eta_h = 0$,

wobei dann allerdings mit den eh-Paaren keine chemische Energie entnommen wird.

Bei einem bestimmten Wert von $\eta_e + \eta_h$, dem *maximum power point*, hat das Produkt $j_{eh}(\eta_e + \eta_h)$, also die insgesamt entnommene chemische Leistung, ein Maximum. Dividiert durch den eingestrahlenen, von der Sonne stammenden Energiestrom, ergibt sich der maximale Wirkungsgrad für die Umwandlung von Sonnenwärme

in chemische Energie. Abb. 2 zeigt den maximalen Wirkungsgrad für die Umwandlung von Wärme in chemische Energie für monochromatische Belichtung als Funktion der Photonenenergie für unkonzentrierte und für voll konzentrierte Sonnenstrahlung. Man kann sich fragen, warum der Wirkungsgrad im *monochromatischen Betrieb* deutlich geringer für unkonzentrierte Sonnenstrahlung ist, als für konzentrierte Sonnenstrahlung, da doch für monoenergetische Elektronen und Löcher bei der Thermalisierung keine Energie verloren geht. Der geringere Wirkungsgrad bei nicht-konzentrierter Einstrahlung ist nur durch zusätzliche Entropie-Erzeugung zu erklären. Diese passiert bei der Impulsrelaxation,

bei der die mit Photonen aus einem kleinen Raumwinkel erzeugten Elektronen und Löcher so verteilt werden, dass die bei ihrer Rekombination erzeugten Photonen in den gesamten Halbraum emittiert werden. Da die so erzeugte Entropie mit der Lumineszenzstrahlung abgeführt werden muss, haben ihre Photonen dann ein kleineres chemisches Potenzial, was sich auch aus Gl. (i) und Gl. (ii) im Infokasten ergibt.

Um das gesamte Sonnenspektrum annähernd monochromatisch verarbeiten zu können, wird für jedes Energieintervall ein eigener Halbleiter benötigt. Den Gesamtwirkungsgrad von (unendlich) vielen Halbleitern, die jeweils nur Strahlung in einem kleinen Energieintervall verarbeiten, findet man, indem man den Wirkungsgrad bei jeder Photonenenergie aus Abb. 2 mit dem Anteil des Sonnenspektrums bei dieser Energie wichtet [3]. Für unfokussierte Strahlung ergibt sich ein Wert von 67 % und für maximal fokussierte Strahlung ein Wert von 86 %, der identisch ist mit dem weiter oben angegebenen Wirkungsgrad für unendlich viele monochromatische, thermische Absorber, die jeweils ideale Wärmekraftmaschinen mit Wärme beliefern.

Membranen sorgen für Strom

Der zweite wichtige Prozess in einer Solarzelle ist die Umwandlung der durch Belichtung im Halbleiter erzeugten chemischen Energie in elektrische Energie. Dazu muss man die Elektronen und die Löcher an verschiedenen, durch einen äußeren Verbraucher miteinander verbundenen Stellen aus dem Absorber heraus fließen lassen. Wegen der negativen beziehungsweise positiven Ladung der Elektronen und der Löcher fließt dann ein elektrischer Strom durch den Verbraucher.

Wie man diese Vorzugsbewegung der Elektronen und der Löcher zu verschiedenen Kontakten erreicht, kann man sich am besten durch den Vergleich mit der Trennung eines Gasgemisches aus Wasserstoff- und Sauerstoff-Molekülen klarmachen. Damit aus einem Gefäß an einer Stelle nur Wasserstoff heraus fließt,

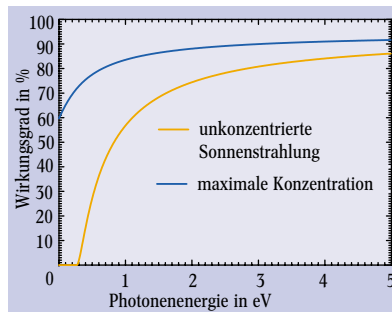
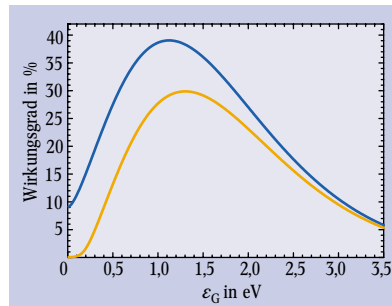


Abb. 2: Wirkungsgrad für die Entnahme chemischer Energie aus einem Halbleiter, bei dem Absorption und Emission von Photonen auf ein Energieintervall $d(h\nu)$ eingeschränkt sind, als Funktion der Photonenenergie. Die untere Kurve gilt für nicht-konzentrierte Sonnenstrahlung, die obere für maximale Konzentration.

braucht man dort eine nur für Wasserstoff durchlässige Membran und entsprechend an einer anderen Stelle eine Sauerstoffmembran. Der Antrieb für Wasserstoff- und Sauerstoffströme ist der Unterschied der Partialdrücke zwischen innen und außen.

Analog zu diesem Modell werden für die Trennung der Elektronen und Löcher im belichteten Halbleiter zwei Membranen benötigt, die jeweils nur für Elektronen beziehungsweise für Löcher gut leiten. Im Idealfall ist mit einer derartigen Struktur die Umwandlung der durch Belichtung erzeugten chemischen Energie in

Abb. 3: Theoretische Grenze des Wirkungsgrads (Shockley-Queisser-Grenze) bei nur strahlender Rekombination für die Umwandlung von Sonnenenergie in elektrische Energie in einem Halbleiter als Funktion von dessen Energielücke ε_G . Die untere Kurve gilt für nicht konzentrierte Sonnenstrahlung außerhalb der Atmosphäre, die obere für maximale Konzentration.



elektrische Energie verlustfrei möglich (siehe Infokasten „Ideale Struktur einer Solarzelle“)!

Da der entnommene Teilchenstrom als Funktion der chemischen Energie pro Elektron-Loch-Paar in Abb. i sich nur durch die Elementarladung vom Ladungsstrom als Funktion der Spannung unterscheidet, stellt Abb. i auch gleichzeitig die Strom-Spannungs-Kennlinie einer idealen Solarzelle dar. An dieser Stelle wird deutlich, dass der exponentielle Verlauf der idealen Kennlinie z. B. eines pn-Überganges keinesfalls, wie häufig zu lesen, auf die Überwindung von Potentialbarrieren zurückzuführen ist, sondern das Resultat der Balance zwischen Generation und Rekombination von Elektron-Loch-Paaren ist. Bei konstanter Generationsrate folgt die ideale Kennlinie demnach allein aus der exponentiellen Abhängigkeit der strahlenden Rekombinationsrate von der chemischen Energie pro Elektron-Loch-Paar. Ebenso rührt, wie hier gezeigt, die prinzipielle Begrenzung des Wirkungsgrades von Solarzellen ausschließlich von der Konversion von Wärme in chemische Energie her.

„Generationenkonflikt“ in der Photovoltaik

In den letzten Jahren hat sich in der Photovoltaik-Forschergemeinde eine Einteilung von Solarzellen in drei „Generationen“ eingebürgert, eine Bezeichnungswiese, die nicht bei allen Wissenschaftlern beliebt ist, da sie suggeriert, dass heutige Solarzellen (der ersten oder zweiten Generation) bereits technisch überholt sind, und eine fortgeschrittene dritte Generation bereits in naher Zukunft auf den Dächern zu finden sein könnte. Wie wir weiter unten sehen werden, ist dies sicherlich falsch. Als „Solarzellen der ersten Generation“ werden die heute kommerziell erhältlichen, größtenteils aus kristallinen Silizium-Scheiben hergestellten Solarzellen bezeichnet. In Modulen werden mit diesen Zellen Wirkungsgrade um die 16 % erreicht. Dieser Typ Solarzellen hat allerdings den entscheidenden Nachteil, dass aufgrund der Dicke der Scheiben von typischerweise 300 μm sehr hochwertiges und damit teures Material benötigt wird. Schon seit geraumer Zeit wird dem Photovoltaikmarkt deshalb ein Übergang zu Dünnschichttechnologien, den „Solarzellen der zweiten Generation“ vorhergesagt. Hier wird mit verschiede-

nen III-V- und II-VI-Materialsystemen (z. B. CuInSe_2 , GaAs, CdTe), aber auch mit Silizium experimentiert. Typische Schichtdicken für Dünnschicht-Solarzellen liegen bei wenigen Mikrometern oder sogar im Sub-Mikrometer-Bereich. Die wesentlichen Vorteile der Dünnschichttechnologie sind der deutlich geringere Materialaufwand (weniger und niederwertigeres und damit billiger herzustellendes Material) sowie die Tatsache, dass die Verschaltung zu Modulen direkt in den Herstellungsprozess der Solarzellen eingebunden werden kann. Aufgrund dieser immensen ökonomischen Vorteile werden etwas geringere Wirkungsgrade bewusst in Kauf genommen. Der kommerzielle Übergang zu Solarzellen der zweiten Generation ist allerdings bis heute noch nicht vollzogen, und aus Silizium-Scheiben bestehende Solarzellen dominieren weiterhin den Markt.

Einen für Solarzellen der ersten und der zweiten Generation gültigen Grenzwert des Wirkungsgrades haben Shockley und Queisser erstmals bestimmt [1]. Die Berechnung dieses Grenzwertes basiert auf der Annahme, dass das Solarzellenmaterial eine Energielücke ε_G in der elektronischen Zustandsdichte aufweist, die gleichzeitig eine Grenze für den Absorptionsgrad darstellt. Eingestrahlte Photonen mit Energien $\hbar\omega > \varepsilon_G$ können absorbiert werden, was zur Generation genau eines Elektron-Loch-Paares führt, während Photonen mit Energien $\hbar\omega < \varepsilon_G$ ungenutzt transmittiert werden. Abb. 3 zeigt den nach Shockley und Queisser benannten Wirkungsgrad als Funktion der Energielücke ε_G für ein maximal fokussiertes und für ein unfokussiertes, schwarzes 5800-K-Spektrum. Der Grund für die vergleichsweise kleinen Grenzwerte des Wirkungsgrades von Solarzellen der ersten und der zweiten Generation ist vor allem der große Energieverlust bei der Thermalisierung der durch Absorption hochenergetischer Photonen erzeugten Elektronen und Löcher. Bei großen Energielücken werden zwar diese Thermalisierungsverluste kleiner, dafür wird aber ein größerer Teil des Sonnenspektrums ungenutzt transmittiert.

Wie oben erläutert, liegt der Schlüssel für deutlich verbesserte Solarzellen mit Wirkungsgraden oberhalb der Shockley-Queisser-Grenze darin, die Thermalisierungsverluste zu reduzieren. Auf einige Konzepte, die als „Solarzellen der dritten Generation“ bezeichnet werden, und mit denen dies realisiert werden könnte, wollen wir nun im Detail eingehen. Wir möchten allerdings an dieser Stelle bereits betonen, dass es sich, abgesehen von den Tandemzellen, bei diesen Konzepten bislang weitgehend um theoretische Modelle handelt, auf denen basierend unter idealisierenden Annahmen deutlich gesteigerte Wirkungsgrade vorhergesagt werden. Ein Teil dieser Konzepte ist bis heute überhaupt noch nicht realisiert worden, und abgesehen von den Tandemanordnungen wurden mit keinem bislang Wirkungsgrade oberhalb des Shockley-Queisser-Wirkungsgrades erreicht. Wenn also von „Solarzellen der dritten Generation“ die Rede ist, so sollte klar sein, dass es sich dabei um langfristige Ziele beziehungsweise Visionen handelt, zu deren Realisierung eine voraussichtlich langjährige Grundlagenarbeit insbesondere zur Erforschung geeigneter Materialien nötig sein wird.

Thermophotovoltaische Konversion

In einem thermo-photovoltaischen (TPV) System wird ein Zwischenabsorber von der Sonnenstrahlung aufgeheizt. Auf der Rückseite des Absorbers befindet sich eine Solarzelle, die einen Teil der thermischen

Strahlung des Zwischenabsorbers absorbiert und in elektrische Energie umwandelt. Monochromatischer Betrieb der Solarzelle in der TPV-Anordnung der Abb. 4 wird entweder durch selektive thermische Emission des Zwischenabsorbers oder durch ein zusätzliches Filter erreicht, das Photonen nur in einem schmalen Energieintervall durchlässt und alle anderen reflektiert. Alle Komponenten sind idealerweise in einem innen verspiegelten Gehäuse untergebracht. In dieser Anordnung sind weder die vom Filter reflektierten noch die von der Solarzelle emittierten Photonen verloren, da sie vom Zwischenabsorber reabsorbiert werden und

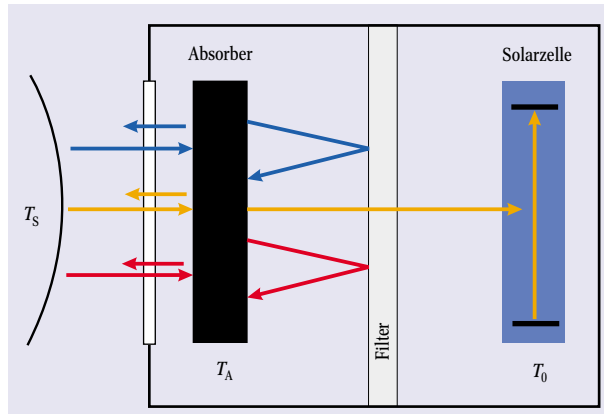


Abb. 4: In einer thermophotovoltaischen Anordnung heizt die einfallende Sonnenstrahlung einen Zwischenabsorber. Die durch ein Filter auf einen möglichst schmalen Spektralbereich begrenzte Emission von dessen Rückseite fällt auf eine Solarzelle.

somit helfen, dessen Temperatur hoch zu halten. Die Solarzelle muss deshalb auch nicht am Punkt maximaler Leistung betrieben werden, sondern kann nahe dem Carnot-Wirkungsgrad arbeiten, der, wie eingangs gezeigt wurde, bei monochromatischer Belichtung und im Leerlauf erreicht wird. Der Gesamtwirkungsgrad würde dann, wie in Gl. (1) angegeben, bei einer Temperatur des Zwischenabsorbers von 2480 K einen Wert von 85 % bei maximaler Konzentration der Sonnenstrahlung erreichen. Der Vorteil des TPV-Konzepts besteht darin, dass das ganze Sonnenspektrum mit nur einem einzigen Solarzellenmaterial verarbeitet wird und trotzdem nur geringe Thermalisierungsverluste auftreten.

Die Realisierung großer Wirkungsgrade mit TPV ist allerdings mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden, von denen die Entwicklung eines selektiven Emitters, eines perfekt reflektierenden Gehäuses, die Vermeidung jeglicher parasitärer Absorptionsprozesse oder die Realisierung der maximalen Konzentration der Sonnenstrahlung nur einige sind.

Tandemzellen

Eine andere Möglichkeit, Solarzellen mit monochromatischer Strahlung zu betreiben, ist eine Anordnung, in der mehrere Solarzellen mit abnehmender Energielücke hintereinander angeordnet werden. Jede Solarzelle absorbiert nur die Photonen, deren Energie zwischen der Energielücke der davor liegenden Zelle und der eigenen Energielücke liegt. Für unendlich viele Zellen mit nur strahlender Rekombination ergibt sich wieder der Grenzwert für den Wirkungsgrad von 86 % für maximal fokussierte Sonnenstrahlung, der schon zuvor für unendlich viele Absorber in Kombination mit idealen Carnot-Maschinen angegeben wurde.

Für diesen Wert wird angenommen, dass jede Zelle unabhängig von den Nachbarzellen am Punkt ihrer maximalen Leistung betrieben wird. Wenn die Zellen optisch hintereinander angeordnet sind, ist es aber praktischer, sie auch elektrisch in Serie zu schalten und einen monolithischen Aufbau anzustreben. Es ist dann notwendig, die Ladung der Elektronen, die aus der Elektronen-Membran einer Zelle heraus fließen, an die Löcher, die aus der Löcher-Membran der Nachbarzelle kommen, zu übergeben. Die dazu nötige „Rekombination“ bei $\eta_e + \eta_h = 0$ wird mit einer Tunneliode erreicht, die sich zwischen den Membranen bei hoher Dotierung ausbildet. Obwohl bei in Serie geschalteten Zellen der Strom in allen Zellen gleich ist, tritt bei Benutzung vieler Zellen im Idealfall keine Einbuße im Wirkungsgrad ein. Da jede Einschränkung des für einen bestimmten Übergang zur Verfügung stehenden Spektrums von Vorteil ist, lässt sich der Wirkungsgrad bereits mit praktikableren Anordnungen von nur zwei oder drei Zellen wesentlich verbessern. Für unterschiedlich stark konzentrierte Sonnenstrahlung wurden mit elektrisch in Serie geschalteten Tandemzellen Wirkungsgrade von 30,2 % mit zwei verschiedenen Materialien [5] und kürzlich von 36,9 % mit drei Materialien erreicht [6].

Impurity Photovoltaic (IPV) Effect, Intermediate Band Cells

Abb. 5 zeigt ein Energiediagramm für ein Material, das für den IPV-Effekt verwendet werden könnte. Elektron-Loch-Paare werden in diesem Material, wie in gewöhnlichen Halbleitern, durch Absorption von Photonen mit $\hbar\omega > \epsilon_G$ erzeugt, zusätzlich jedoch auch durch elektronische Übergänge vom Valenzband ins Leitungsband in einem Zwei-Stufen-Prozess über einen Zwischenzustand bei ϵ_{SI} durch Absorption von zwei

Ideale Struktur einer Solarzelle

In der Mitte der Struktur (Abb. ii) befindet sich der Absorber, in dem Elektron-Loch-Paare und damit chemische Energie durch Absorption von Photonen erzeugt werden. Elektronen und Löcher können durch jeweils nur für eine Teilchensorte durchlässige Membranen, ein n-Typ-Halbleiter für Elektronen auf der linken Seite sowie ein p-Typ-Halbleiter für Löcher auf der rechten Seite, heraus fließen. Diese Membranen haben im Idealfall eine größere Energielücke als der Absorber, wodurch die Leitfähigkeit für die Teilchen, die nicht durch gelassen werden sollen, über die Wirkung der Dotierung hinaus durch eine Energiebarriere erniedrigt wird.

Der Antrieb für den Transport von Ladungsträgern aus dem Absorber heraus ist der Gradient des elektrochemischen Potentials, genau $-\text{grad } \eta_e$ für die Elektronen und $-\text{grad } \eta_h$ für die Löcher. In Abb. ii wird deutlich, dass erst die Erzeugung chemischer Energie ($\eta_e + \eta_h > 0$) durch Belichtung die Voraussetzung für Gradienten der elektrochemischen Potentiale schafft. Weiter zeigt Abb. ii, dass die Gradienten für den Antrieb der Elektronen nach links, der Löcher nach rechts wegen der guten Leitfähigkeiten für Elektronen nach links und für Löcher nach rechts sehr

klein, idealerweise sogar verschwindend gering sein können. Die Differenz der Fermi-Energien im linken Kontakt und im rechten Kontakt $\epsilon_{F,\text{rechts}} - \epsilon_{F,\text{links}} = eU$ definiert die elektrische Spannung U , die die Solarzelle liefert. Im Idealfall vernachlässigbar kleiner Gradienten der elektrochemischen Potentiale ist die an einen Verbraucher gelieferte elektrische Energie pro Elektron-Loch-Paar gleich der chemischen Energie ($\eta_e + \eta_h$), die im Innern der Zelle erzeugt wird. Mit $eU = \eta_e + \eta_h$ ist in einer Solarzelle in der Anordnung der Abb. ii die Umwandlung chemischer Energie in elektrische Energie also aus thermodynamischer Sicht völlig ohne Verlust möglich.

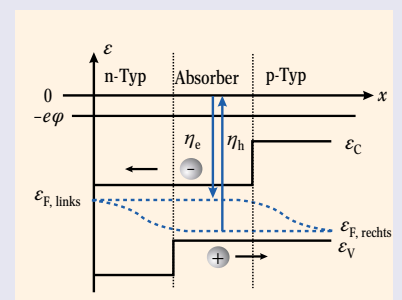


Abb. ii: Die ideale Struktur einer Solarzelle.

Photonen mit $\hbar\omega < \varepsilon_G$. Der Zwischenzustand kann von einer Störstelle stammen, er könnte aber auch zu einem schmalen Band zwischen Leitungs- und Valenzband gehören (in diesem Fall spricht man von *intermediate band solar cell*). Für die beiden Übergänge über das Zwischenniveau können Photonen mit Energien kleiner als der Bandabstand verwendet werden, die andernfalls ungenutzt transmittiert würden. Wie bei der Tandemzelle wird also auch hier das Sonnenspektrum in verschiedene Spektralbereiche aufgeteilt und auf diese Weise der Energieverlust bei der Thermalisierung reduziert.

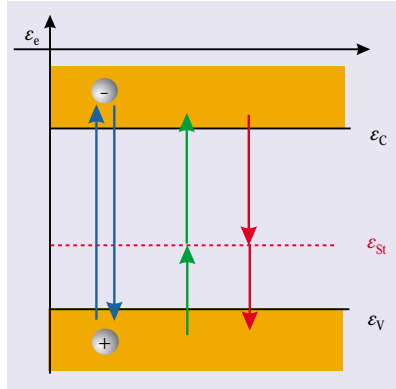


Abb. 5: Beim Impurity Photovoltaic Effect werden durch Störstellen bei ε_{st} zusätzliche optische Übergänge ermöglicht, über die durch Absorption von zwei Photonen Elektron-Loch-Paare erzeugt werden (grüne Pfeile), über die aber auch Elektron-Loch-Paare durch zusätzliche Rekombination verloren gehen (rote Pfeile).

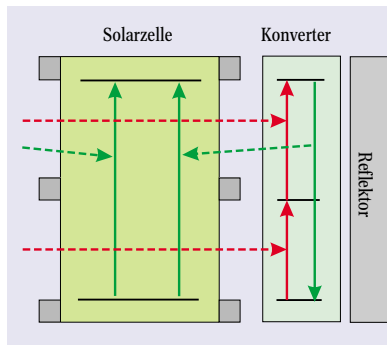
Die Möglichkeit, über den Zwischenzustand zusätzliche Elektron-Loch-Paare zu generieren, impliziert allerdings zwangsläufig, dass auch der umgekehrte Prozess, die Rekombination eines Elektron-Loch-Paares über den Zwischenzustand möglich ist. Ein zusätzlicher Rekombinationskanal wiederum hat für eine bestimmte Belichtungsintensität eine geringere Ladungsträgerkonzentration und damit eine verringerte Spannung zur Folge. Theoretisch lässt sich zeigen, dass sich aus diesem Grund für Materialien mit kleinerer Bandlücke wie z. B. in Silizium auch unter idealisierenden Annahmen keine Verbesserung erreichen lässt [7]. Bei größeren Bandlücken ergeben sich dagegen im Grenzfall rein strahlender Rekombination Wirkungsgrade bis zu 63,2 % für konzentrierte

Sonnenstrahlung [8]. Allerdings ist die Annahme nur strahlender Übergänge insbesondere beim IPV-Effekt besonders heikel, da Störstellen in Halbleitern in der Regel als Rekombinationszentren für nicht strahlende Rekombination agieren [9]. Weiterhin ist es fraglich, ob Materialien gefunden werden können, in die man geeignete Störstellen mit den geforderten optischen Eigenschaften und an der gewünschten Energie innerhalb der Bandlücke einbauen kann, ohne die für Solarzellen benötigten guten Transporteigenschaften zu zerstören.

Up- und Down-Conversion

Mit Tandemzellen oder dem IPV-Effekt wird eine möglichst ideale Anpassung der Solarzellenstruktur und des Solarzellenmaterials an das breite Sonnenspektrum angestrebt, um Transmissions- und Thermalisierungsverluste zu verringern. Alternativ dazu ist es aber prinzipiell auch möglich, das Sonnenspektrum mit einem lumineszierenden Material dem Solarzellenmaterial (z. B. Silizium) anzupassen. Dazu wurde kürzlich vor-

Abb. 6: In einem up-Konverter werden zwei niederenergetische, von der Solarzelle nicht absorbierbare Photonen in einem Zwei-Stufen-Prozess absorbiert und durch strahlende Rekombination des dabei erzeugten Elektron-Loch-Paares in ein Photon mit größerer Photonenenergie konvertiert, das dann in der Solarzelle absorbiert werden kann. Die Umkehrung des Absorptionsprozesses, also die Rekombination mit der Emission von zwei Photonen kleinerer Energie, ist aber ebenso möglich.



geschlagen, einerseits hochenergetische Photonen aus dem Sonnenspektrum in mehrere niederenergetische Photonen umzuwandeln (*down conversion*), die dann eine entsprechend größere Anzahl von Elektron-Loch-Paaren in einer Solarzelle erzeugen können, andererseits zwei- oder mehr niederenergetische Photonen, die von einer Solarzelle ungenutzt transmittiert werden, in einem geeigneten Konverter in ein hochenergetisches Photon umzuwandeln (*up conversion*), das dann wiederum in der Solarzelle absorbiert werden kann [10]. Abb. 6 zeigt schematisch eine Anordnung für eine Solarzelle in Kombination mit *up conversion*.

Ein wesentlicher Vorteil dieses Ansatzes besteht darin, dass die dafür geeigneten Solarzellen, z. B. hocheffiziente Silizium-Zellen mit Wirkungsgraden bis knapp 25 %, weitgehend unmodifiziert verwendet werden könnten. Im Gegensatz zum IPV-Effekt ist kein Eingriff in das Solarzellenmaterial selbst erforderlich. Sogar ein sehr ineffizienter up-Konverter auf der Rückseite einer Solarzelle würde daher den Gesamtwirkungsgrad immer noch verbessern.

Sowohl für Solarzellen in Kombination mit *up conversion* als auch mit *down conversion* werden unter der idealisierenden Annahme, dass es im Konverter nur strahlende Rekombination gibt, deutliche Verbesserungen des Wirkungsgrades vorausgesagt [10]. Für den Konverter werden dazu exzellente optische Eigenschaften gefordert, die Transporteigenschaften für Elektronen oder Löcher können dagegen beliebig schlecht sein. Da die für ein solches System benötigten Solarzellen bereits existieren, konzentriert sich die Forschung in diesem Bereich auf die Suche nach geeigneten Lumineszenzkonvertern. Seltene Erden, Übergangsmetalle und nanoskalige Halbleiterstrukturen, wie Quantenpunkte, sind potenzielle Kandidaten.

Energiekonversion mit heißen Elektronen und Löchern

Nach dem bisher Gesagten sieht es so aus, als können Thermalisierungsverluste prinzipiell nur vermieden werden, wenn die Solarzelle monochromatisch betrieben wird. Bei einer Solarzelle, die einen großen Teil des Sonnenspektrums absorbiert, scheinen große Verluste dagegen unvermeidbar. Wenn es aber gelingt, die Elektronen und Löcher schneller aus dem Absorber heraus fließen zu lassen als sie für die Thermalisierung brauchen, dann träte der Verlust im Absorber nicht auf. Man hat dann aber das Problem, wie man mit heißen Ladungsträgern elektrische Energie gewinnt. Wie oben beschrieben ist ja aus thermodynamischen Gründen die Thermalisierung zwingend notwendig.

Zur Diskussion dieser Probleme dient als Modellsystem ein Absorber, in dem die Elektronen und Löcher mit den Gitterschwingungen nicht wechselwirken, in dem eine Thermalisierung auf Gittertemperatur also gar nicht stattfinden kann. Es sei aber zugelassen, dass die Ladungsträger miteinander stoßen. Zusammen mit Stoßionisation und Auger-Rekombination stellt sich dann die in Abb. 1a, Mitte, gezeigte einheitliche Temperatur- und Fermi-Verteilung ein. Um Entropie-Erzeugung bei der anschließenden, in den Kontakten nicht mehr zu vermeidenden Thermalisierung zu mimimieren, sollte diese ohne Änderung der Energie, also innerhalb eines kleinen Energieintervalls erfolgen [11]. Dies wiederum lässt sich zumindest prinzipiell erreichen, wenn die Membranen für Elektronen- bzw. Löcher den Ladungsträgertransport jeweils nur in einem engen Energieintervall erlauben.

Die Stöße der heißen Elektronen und Löcher untereinander sorgen dafür, dass die Zustände des Absorbers, aus denen bei einer durch die Membranen vorgegebenen Energie Elektronen und Löcher entnommen werden, wieder aufgefüllt werden. Hier ist die Analogie zum TPV-System zu erkennen, bei dem einem heißen Absorber nur in einem kleinen Energiebereich Photonen entnommen werden. Es überrascht deswegen auch nicht, dass ein maximaler Wirkungsgrad von 85 % für maximale Konzentration auf einen Absorber mit Bandlücke $\varepsilon_G = 0$ und damit der gleiche Grenzwert wie für ein TPV-System gefunden wird [11]. Nichts ändert sich an diesen Ergebnissen, wenn auch das Gitter des Absorbers heiß ist und dafür die Wärmeabfuhr durch Phononen und Photonen an die Umgebung durch die Membranen hindurch verhindert wird. In diesem Fall fällt die mit realen Materialien schwer zu erfüllende Voraussetzung vernachlässigbar kleiner Elektron-Phonon-Kopplung weg, und es besteht eine große Ähnlichkeit mit einem idealen thermionischen Konverter.

Für die Energiekonversion mit heißen Ladungsträgern und kaltem Gitter werden Materialien oder Strukturen gesucht, in denen die Thermalisierung möglichst langsam abläuft und andererseits das Herausfließen der Ladungsträger möglichst schnell. Die Zeiten für die Thermalisierung liegen in Halbleitern typischerweise im Bereich von wenigen Pikosekunden. Transfer von Elektronen aus einem Absorber in einen angrenzenden Halbleiter wurde schon innerhalb von wenigen Femtosekunden beobachtet [12]. Die Nutzung heißer Elektronen und Löcher scheint also nicht völlig ausgeschlossen.

Schlussfolgerungen

Dieser Artikel soll vor allem zeigen, wodurch die Energiekonversion mit Solarzellen begrenzt ist und wie man die Entropieerzeugung prinzipiell verringern und dadurch den Wirkungsgrad verbessern kann. Wir haben mehrere Beispiele besprochen, mit denen sich die theoretischen Grenzen zumindest unter idealisierenden Annahmen erreichen lassen. Diese Diskussion ist aber sehr spekulativ. Sie geht davon aus, dass es möglich ist, Verluste, vor allem durch nicht-strahlende Rekombinationsprozesse, vollständig zu vermeiden. Beim Impurity Photovoltaic Effect ist das möglicherweise prinzipiell nicht möglich. Genau so wenig scheinen Verluste durch unerwünschte Absorption oder unvollständige Reflexion beim thermo-photovoltaischen Prinzip auszuschließen zu sein. Die Konversion mit heißen Elektronen, sei es mit Materialien, in denen das Gitter „kalt“ und die Elektron-Phonon-Wechselwirkung „ausgeschaltet“ ist, oder mit Materialien, in denen das Gitter heiß und die Elektronen im thermischen Gleichgewicht mit dem Gitter sein dürfen, ist ebenfalls hochgradig spekulativ. Interessant am Vorschlag, das Sonnenspektrum durch *up* oder *down conversion* an eine Solarzelle anzupassen, ist, dass dadurch der Wirkungsgrad herkömmlicher Solarzellen nur verbessert, aber, wenn er nicht funktioniert, kaum verschlechtert werden kann und dass damit die Wirkungsgrade von bereits existierenden Solarzellen weiter verbessert werden könnten.

Was mit Sicherheit funktioniert, ist die Hintereinanderschaltung verschiedener Solarzellen zu Tandemanordnungen. Das ist denn auch von allen Beispielen, die die Shockley-Queisser-Grenze im Prinzip übertreffen können, das einzige, bei dem das auch experimentell schon erreicht wurde. Die Konzentration der Sonnenstrahlung ist dabei aus doppelter Sicht wichtig. Einmal

lässt sich mit konzentrierter Sonnenstrahlung prinzipiell ein größerer Wirkungsgrad erreichen, zum zweiten aber sind damit für die gleiche elektrische Leistung viel kleinere Solarzellenflächen erforderlich. Auch teure Systeme, wie die aus III-V-Verbindungen aufwändig hergestellten Tandem-Zellen, könnten dadurch wirtschaftlich werden.¹⁾

Literatur

- [1] W. Shockley und H. J. Queisser, *J. Appl. Phys.* **32**, 510 (1961)
- [2] J. Zhao, A. Wang und M. A. Green, *Progress in Photovoltaics* **7**, 471 (1999)
- [3] A. de Vos, Proc. 5.E.C. Photovoltaic Solar Energy Conf., Athen (1983), S. 186
- [4] G. Lasher und F. Stern, *Phys. Rev.* **133 A**, 553 (1964); P. Würfel, *J. of Physics C* **15**, 3967 (1982); P. Würfel, S. Finkbeiner und E. Daub, *Appl. Phys. A* **60**, 67 (1995)
- [5] M. A. Green et al., *Solar Cell Efficiency Tables (Version 21)*, *Progress in Photovoltaics* **11**, 39 (2003)
- [6] Pressemitteilung der Firma Spectrolab vom 25. Juli 2003, download unter www.spectrolab.com
- [7] P. Würfel, *Solar Energy Materials and Solar Cells* **79**, 153 (2003)
- [8] A. Luque und A. Martí, *Phys. Rev. Lett.* **78**, 5014 (1997)
- [9] W. Shockley und W. T. Read, *Phys. Rev.* **87**, 835 (1952); R. N. Hall, *Phys. Rev.* **83**, 228 (1951); G. Güttler und H. J. Queisser, *Energy Conversion* **10**, 51 (1970)
- [10] T. Trupke, M. A. Green und P. Würfel, *J. Appl. Phys.* **92**, 1668 (2002); T. Trupke, M. A. Green und P. Würfel, *J. Appl. Phys.* **92**, 4117 (2002)
- [11] P. Würfel, *Solar Energy Materials and Solar Cells* **46**, 43 (1997)
- [12] T. Hannappel, B. Burfeindt, W. Storck und F. Wilzig, *J. Phys. Chem. B* **101**, 6799 (1997)
- [13] Peter Würfel, *Physik der Solarzellen*, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg (2000)
- [14] M. A. Green, *Third Generation Photovoltaics*, Springer Verlag (2003)

1) Die hier vorgestellte Behandlung der prinzipiellen Funktionsweise von Solarzellen ist in ausführlicher Weise in [13] dargestellt. Eine eingehende Beschreibung von Konzepten für „Solarzellen der dritten Generation ist kürzlich erschienen“ [14].

Die Autoren



Peter Würfels Bemühen, den photovoltaischen Effekt zu verstehen begleitet ihn, seit er als Schüler in einem Buch über Fotografie eine (falsche) Erklärung des Selen-Belichtungsmessers fand. Das heutige Verständnis der Solarzelle hat er vor allem in vielen Diskussionen mit seinem früheren Lehrer Wolfgang Ruppel entwickelt, bei dem er 1971 an der Universität Karlsruhe promovierte. Dort wurde er

1995 Physik-Professor. Auch im Ruhestand ist Würfel aktiv, gerade ist er von einem längeren Forschungsaufenthalt am Centre for Third Generation Photovoltaics in Australien zurückgekommen. **Thorsten Trupke**, geb. 1970, studierte Physik in Karlsruhe und Grenoble und promovierte in Karlsruhe. Seit Mai 2001 ist er im Rahmen eines Feodor Lynen-Stipendiums der Alexander von Humboldt-Stiftung als Postdoc an der University of New South Wales (seit November 2003 als Senior Research Fellow), wo er sich vor allem mit Third Generation Photovoltaics und der Lichtemission von Silizium befasst. In seiner Freizeit genießt er mit seiner Frau und drei Kindern die fast unbegrenzten Möglichkeiten, die Sydney und Umgebung bieten.

