

# Energy Harvesting in geschlossenen Räumen

Die Vorteile autonomer, per Energy Harvesting mit elektrischer Energie versorgter Systeme in Gebäuden sind bekannt. Nur das „Wie“ bereitet Systementwicklern noch Kopfzerbrechen. So stellen z.B. Solarzellen in geschlossenen Räumen besondere Anforderungen.

Von Matthieu Chevrier und Thomas Oderwald



**W**ann ist Energy Harvesting sinnvoll? Bei der Beantwortung dieser Frage müssen zunächst die Anforderungen an das zu entwickelnde Produkt untersucht werden. Dazu zählt beispielsweise auch, welche Kosten die Stromversorgung des Produkts verursachen darf. Batteriebetrieb scheidet beispielsweise aus, wenn das

Gerät schwer zugänglich ist und/oder die Batterie zu häufig gewechselt werden muss. Andererseits kann auch das Verlegen einer Stromversorgungsleitung inakzeptabel hohe Kosten verursachen. Fest vorgegeben ist ebenfalls die Verfügbarkeit von Energie in der Umgebung, sei es in Form von Tages- oder Kunstlicht, Wärme oder auch Bewegung

wie z.B. Vibration durch Motoren, Pumpen, Maschinen, Luftströme, Wind und dergleichen. Gelegentlich werden auch die elektromagnetischen Felder von Fernseh- und Ton-Rundfunk- oder Mobilfunksendern als mögliche Energiequelle angeführt. Diese sind jedoch nach dem heutigen Stand der Technik eindeutig zu schwach, um als mögliche Energiequelle in Frage zu kommen.

Im Anschluss kommen die nachgeordneten Restriktionen ins Spiel, z.B. welche Umweltauflagen zu erfüllen sind und ob eine hohe Verfügbarkeit verlangt wird, weil beispielsweise ein Ausfall hohe Kosten verursachen würde. Einen Ausfall könnten z.B. erschöpfte Batterien oder beschädigte Anschlussleitung verursachen – letzteres kann speziell bei Geräten vorkommen, die häufig bewegt werden. Auch bezüglich der Gehäusegestaltung kommen mit einem Energy Harvester neue Aspekte ins Spiel, denn damit werden wasserdichte Gehäuse und kompaktere Geräte möglich, da kein Platz für Batterien eingeplant werden muss und auch die Klappen zum Tausch der Batterien weggelassen werden können. Einige Energy Harvester sind für einen größeren Temperaturbereich geeignet als Batterien.

Damit Energy Harvesting zur Energieversorgung in Frage kommt, muss erstens genügend nutzbare Energie in der Umgebung verfügbar sein, und zweitens muss der Aufwand für eine

konventionelle Stromversorgung zu hoch sein. Energy Harvesting muss allerdings nicht immer die einzige Option sein. Ein wasserdichtes Gehäuse z.B. lässt sich auch mit kontaktloser Energieübertragung realisieren.

Eine verbreitete Energy-Harvesting-Technik ist die Photovoltaik (PV), deren Anfänge im Jahr 1958 liegen, als der erste Satellit mit Solarzellen zur Stromversorgung ausgestattet wurde. Inzwischen ist die Entwicklung weit fortgeschritten – z.B. organische Solarzellen, Farbstoff-Solarzellen – und die Massenproduktion von kristallinen Si-Solarzellen hat das Preisniveau auf unter 1 US-Dollar/W gedrückt. Die Zahl der Anbieter ist auf diesem Gebiet sehr viel größer als bei anderen Arten des Energy Harvestings, was die Beschaffung vereinfacht.

## Solarzellen in Räumen

Für Entwickler ist der Entwurf eines Systems, das von PV-Zellen in geschlossenen Räumen gespeist werden soll, schwierig, denn hierfür liegen, im Gegensatz zum Betrieb von Solarzellen im Freien, kaum verlässliche Daten vor. Im ersten Schritt einer quantitativen Annäherung ist zu ermitteln, wie viel Energie insgesamt auf die PV-Zelle trifft. Unter freiem Himmel bei hellem Sonnenlicht und einem Einfallswinkel von 45° können durchaus 1.000 W/m<sup>2</sup> auftreten. In geschlossenen Räumen ist aber eher ein Wert von etwa 1 W/m<sup>2</sup> an der Zellenoberfläche zu erwarten. In einer Entfernung von 1,5 m von einer 60-W-Glühlampe beträgt die Leistungsdichte E:

$$E(r = 1,5\text{ m}) = \frac{P}{A} = \frac{60\text{ W}}{4\pi \cdot 1,5^2} = 2,1\text{ W/m}^2$$

Mit einer Kompaktleuchtstofflampe von 15 W errechnet sich somit eine Leistungsdichte von 0,5 W/m<sup>2</sup>, obwohl der visuelle Eindruck identisch ist. Dies liegt daran, dass die Empfindlichkeit des menschlichen Auges bei einer Wellenlänge von 555 nm (grün) am höchsten ist (Bild 1) und die Kompaktleuchtstofflampe mit ihrem Spektrum besser auf diese Charakteristik abgestimmt ist. Aufgrund dieser Besonderheit wird die Beleuchtungsstärke in Lux angegeben (1 lx = 1 lm/m<sup>2</sup>). 1 lm wiederum ist der Lichtstrom einer monochromatischen Lichtquelle mit einer Wellenlänge von

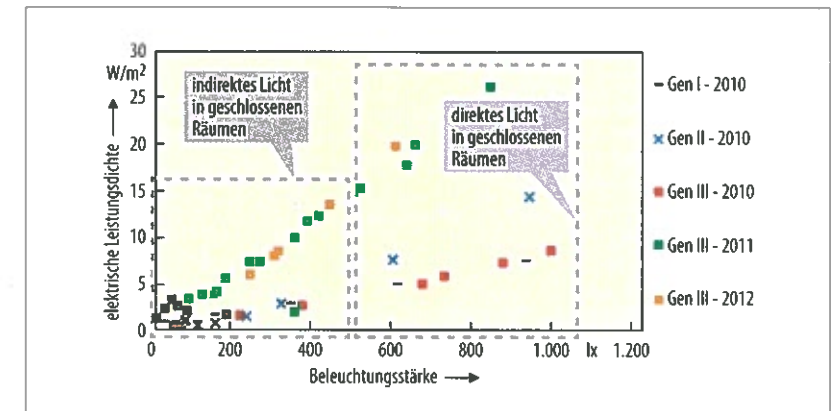


Bild 2. Elektrische Leistungsdichte unterschiedlicher Typen von PV-Zellen bei typischen Lichtbedingungen in geschlossenen Räumen, die per Leuchtstofflampen beleuchtet werden. GEN I = Zellen aus kristallinem Silizium, GEN II = Zellen aus amorphem Silizium, GEN III = Farbstoff-Solarzellen.

(Quelle: Texas Instruments)

555 nm, die Licht mit einer Leistung von 1/683 W abgibt. In Tabelle 1 und 2 sind einige übliche Beleuchtungsstärken aufgeführt. Bild 2 zeigt die Leistungsdichte von verschiedenen Arten von PV-Zellen abhängig von der Beleuchtungsstärke. Aus den Messkurven kann in erster Näherung eine Energieausbeute von 7 µW/cm<sup>2</sup> (bei 200 lx) abgelesen werden. Die Leerlaufspannung der PV-Zellen ist stark von der Beleuchtungsstärke abhängig und geht bei völliger Dunkelheit auf 0 V zurück.

Die Leistungsdichte von PV-Zellen ist zunächst von den Einsatzbedingungen abhängig, wird aber zusätzlich auch von anderen Faktoren beeinflusst. Einige Hersteller bieten die Zellen bei-

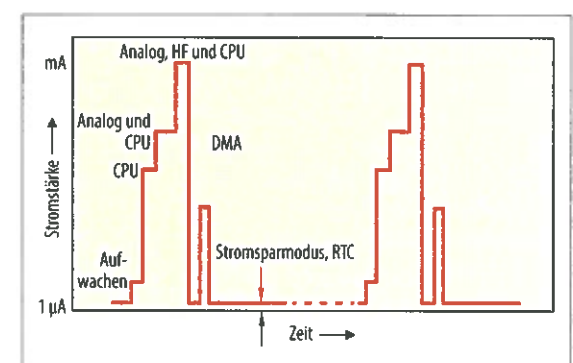


Bild 3. Die Stromaufnahme eines typischen Energy-Harvesting-Systems ist geprägt von kurzen Phasen höherer Stromaufnahme und langen Ruhephasen mit sehr niedriger Stromaufnahme.

spielsweise in unterschiedlichen Farben an, was zwar zu Lasten des Wirkungsgrads geht, aber aus ästhetischen Gründen wünschenswert sein kann. Auch der Biegeradius des Panels kann von der Formgestaltung diktiert werden, hat aber Auswirkungen auf die Lebensdauer. PV-Zellen lassen sich ferner unterschiedlich transparent herstellen – wiederum mit negativen Folgen für den Wirkungsgrad – und somit bei Bedarf unauffällig verbauen.

## Entwickeln nach Plan

Empfehlenswert ist ein Vorgehen nach den folgenden Schritten:

- 1. Ermittlung des Leistungsbedarfs
- 2. Wahl eines geeigneten Energiespeichers
- 3. Festlegung der Solarzellengröße

Im ersten Schritt ist zunächst festzustellen, welchen Mindestbedarf die einzelnen Verbraucher haben. Der Leistungsbedarf lässt sich auch über die

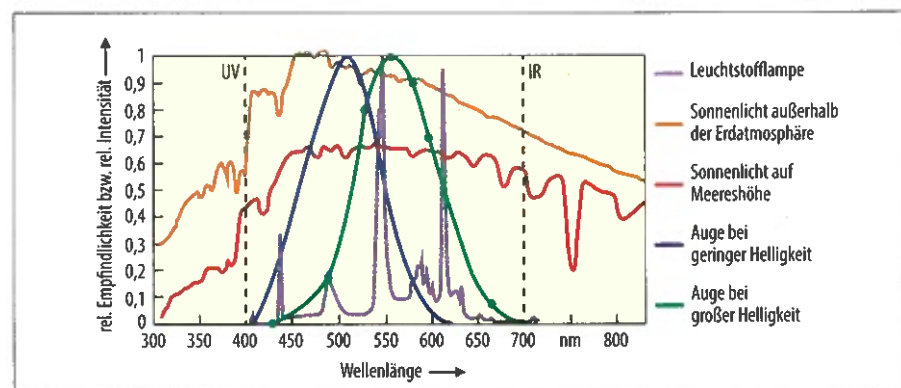


Bild 1. Die relative spektrale Empfindlichkeit des menschlichen Auges bei geringer und großer Helligkeit sowie das Spektrum des Sonnenlichts außerhalb der Atmosphäre und auf Meereshöhe.

(Quelle: Texas Instruments)

Tätigkeit	typischer Ort	mittlere Beleuchtungsstärke [lx]	minimale gemessene Beleuchtungsstärke [lx]
Gehen, Fahren	Flure, Lkw-Parkplätze, Straßen	20	5
Gehen in gefährlicher Umgebung, Details müssen nicht erkannt werden können	Baustellen, Verladerampen	50	20
Minimaler Grad an Details	Küchen	100	50
Erkennen von Details	Büros	200	100
Erkennen feiner Details	Zeichensäle	500	200

Tabelle 1. Je nach Tätigkeit und der nötigen Erkennbarkeit von Details werden Mindest-Beleuchtungsstärken gefordert [1].

Lichtquelle	Beleuchtungsstärke [lx]
Vollmond	1
Straßenbeleuchtung	10
Wohnraumbeleuchtung	30 bis 300
Schreibtischbeleuchtung im Büro	100 bis 1.000
Operationsleuchten	10.000
direktes Sonnenlicht	100.000

Tabelle 2: Das menschliche Auge verfügt über einen großen Dynamikbereich [2], so dass der Mensch selbst bei kleinen Beleuchtungsstärken sehen kann. Die um den Faktor 1.000 kleinere Beleuchtungsstärke in geschlossenen Räumen stellt für die Energiegewinnung per Solarzellen jedoch eine besondere Herausforderung dar.



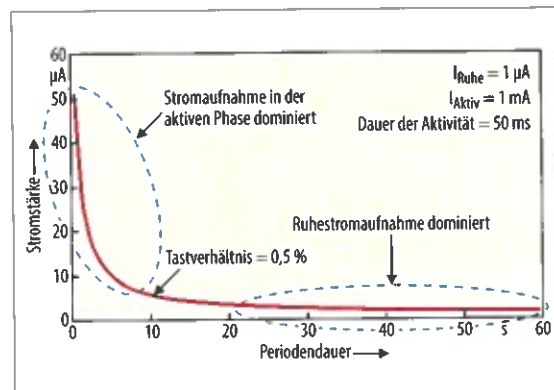


Bild 4. Vom Tastverhältnis hängt es ab, ob die Betriebs- oder die Ruhephase entscheidend für die Gesamtstromaufnahme ist. Je kleiner das Tastverhältnis, umso wichtiger werden Ruhe- und Leckströme der verwendeten Komponenten.

Betriebsweise senken, indem beispielsweise Peripheriefunktionen möglichst frühzeitig ab- und möglichst spät eingeschaltet werden. Der Schlaf-Modus des Mikrocontrollers kann ebenfalls zum Energiesparen genutzt werden, und auch das verwendete Funkübertragungs-Protokoll lässt sich in ähnlicher Weise optimieren. Besonders zu beachten ist der maximal zu erwartende Leistungsbedarf, für den die Stromversorgung dimensioniert werden muss (Bild 3).

Anschließend kann die mittlere Leistungsaufnahme  $P_m$  mit folgender Formel bestimmt werden: (2)

$$P_m = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N U_{i,j} \cdot I_{i,j} \cdot TV_i$$

mit

N: Anzahl der Bauelemente  
M: Anzahl der von den Bauelementen durchlaufenen Stromspar-Modi.

$U_{i,j}$ : Versorgungsspannung. Mit der doppelten Indizierung wird die dynamische Spannungsregelung (DVS, Dynamic Voltage Scaling) berücksichtigt.  
 $I_{i,j}$ : Stromaufnahme  
 $TV_i$ : Tastverhältnis der einzelnen Energiespar-Modi

Die Leistungsaufnahme von Anwendungen mit kleinem Tastverhältnis kann im sparsamsten Modus den größten Anteil am

durchschnittlichen Leistungsbedarf ausmachen, weil das System die meiste

Zeit in dieser Betriebsart verbringt (Bild 4).

Der Energiespeicher wird abhängig vom gewünschten Autonomiegrad und vom maximalen Leistungsbedarf gewählt. Bei letzterem sind hauptsächlich die parasitären Eigenschaften – Innenwiderstand und Induktivität – des Energiespeichers zu berücksichtigen. Die Applikation sollte den Ladezustand des Energiespeichers kennen, um entscheiden zu können, ob genügend Leistung zum Ausführen eines bestimmten Unterprogramms vorhanden ist oder nicht. Im einfachsten Fall genügt dafür eine Spannungsmessung. Ausgefeilter wäre das Messen der Spannungsänderung beim Aktivieren eines bekannten Verbrauchers, bevor die eigentliche Leistungsstufe aktiviert wird – z.B. den

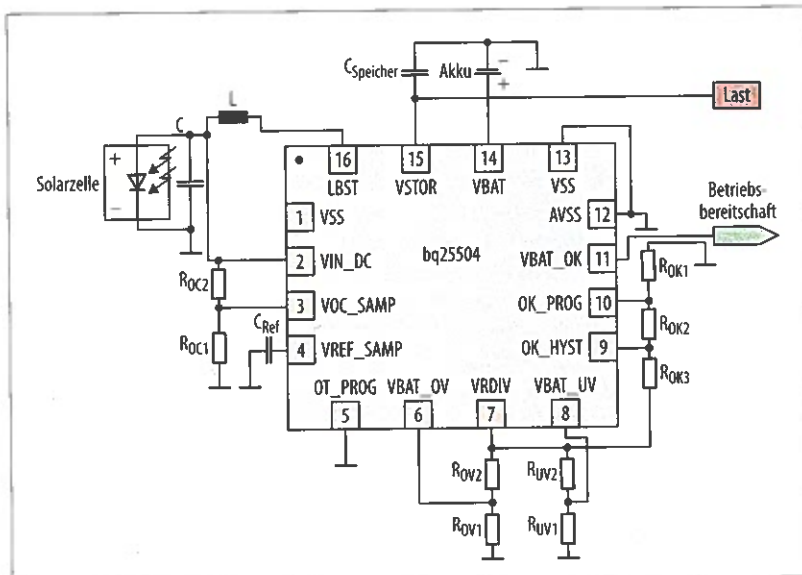


Bild 5. Eine DC/DC-Wandlerschaltung mit dem bq25504, um die Energie einer Solarzelle zu sammeln. Die Ladespannung des ICs lässt sich frei konfigurieren, so dass unterschiedliche Li-Ionen-Akkutypen als Energiespeicher direkt ans IC angeschlossen werden können.

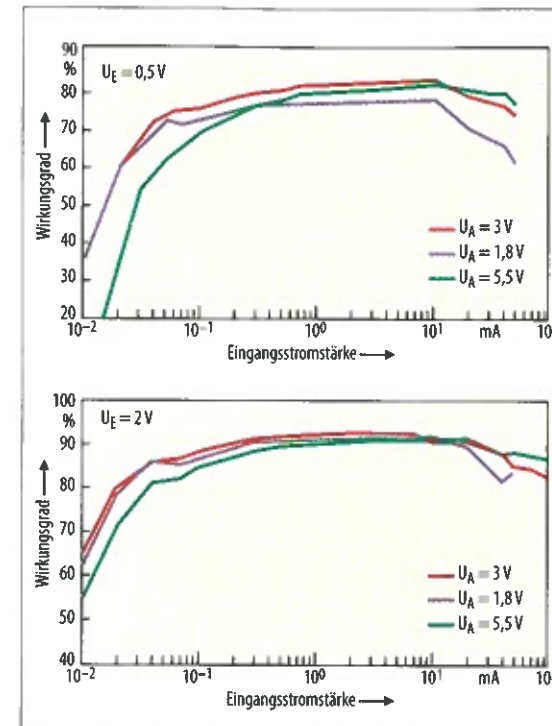


Bild 6. Wirkungsgrad des Gleichspannungswandlers bq25504 als Funktion des Eingangsstroms. Das IC kann geringe Eingangsleistungen von 100 µW mit einem Wirkungsgrad von 80 % wandeln, um eine stabile, geregelte Ausgangsspannung von 3 V zu erzeugen.

Sensor aktivieren, Spannungsänderung messen und dann erst den Funksender einschalten. Auf diese Weise ließe sich auch der mit der Zeit zunehmende Innenwiderstand erfassen. Denkbar wäre auch eine Kombination verschiedener Energiespeicher. Ein Speicher mit großer Kapazität aber hohem Innenwiderstand könnte die Grundlast übernehmen und über einen DC/DC-Wandler einen kleineren Speicher mit niedrigem Innenwiderstand langsam laden. Dieser kleine Speicher kann dann die kurzen aber hohen Strompulse für den Funksender liefern.

Auf der Basis dieser Werte erfordert die Dimensionierung der PV-Zelle nur noch ein paar unkomplizierte Berechnungen. Allerdings ist die Ausgangsspannung einer Solarzelle zu klein. Sie muss über einen Gleichspannungswandler angeschlossen werden, der idealerweise die PV-Zelle im Leistungsmaximum betreibt. Der bq25504 von Texas Instruments ist ein speziell für Energy-Harvesting-Applikationen entwickelter Gleichspannungswandler (Bild 5). Er bietet eine MPPT-Funktion (Maximum Power Point Tracking), um den Energieertrag aus der PV-Zelle zu optimieren. Dass die MPPT-Funktion nötig ist, lässt sich am Beispiel der

„Kaltstart“-Situation verdeutlichen, wenn alle Energiespeicher komplett leer sind. Die Startzeit wird hier durch MPPT halbiert, da das Laden des Energiespeichers mit konstanter Leistung und nicht mit konstantem Strom erfolgt.

Da die Spannung einer PV-Zelle bei 50 lx unter 400 mV sinken kann, was in geschlossenen Räumen durchaus vorkommt, ist es wichtig, dass der Gleichspannungswandler mit einer so kleinen Spannung zuverlässig arbeiten kann. Je niedriger die Anlaufspannung eines DC/DC-Wandlers ist, um so autonomer ist das PV-gespeiste System, da es weniger

Zeit ohne Energiezufuhr von außen überstehen muss. Der hohe Wirkungsgrad bei niedrigen Spannungen (Bild 6) ermöglicht auch, ein System aus nur einer PV-Zelle statt aus einer Reihenschaltung mehrerer PV-Zellen zu versorgen.

#### Literatur

- [1] Lighting at work. Health and safety guidance, HSG38, Health and Safety Executive, [www.hse.gov.uk/pubns/books/hsg38.htm](http://www.hse.gov.uk/pubns/books/hsg38.htm).
- [2] Schubert, E. F.: Light Emitting Diodes. Kapitel 16, Human eye sensitivity and

- photometric quantities. [www.ecse.rpi.edu/~schubert/Light-Emitting-Diodes-dot-org/Sample-Chapter.pdf](http://www.ecse.rpi.edu/~schubert/Light-Emitting-Diodes-dot-org/Sample-Chapter.pdf)
- [3] Nagarajan S.; Freeman, D.: A study of dye sensitized solar cells under indoor and low level outdoor lighting: Comparison to organic and inorganic thin film solar cells and methods to address maximum power point tracking. EU PVSEC proceedings 2011.
  - [4] [www.ti.com/product/bq25504](http://www.ti.com/product/bq25504)
  - [5] [www.ti.com/solution/energy\\_harvesting](http://www.ti.com/solution/energy_harvesting)



Matthieu Chevrier

ist bei Texas Instruments als Bereichsleiter im Marketing, Region Europa, Nahost und Afrika, verantwortlich für die Entwicklung der Produktpalette für den Energiesektor. Er hat über zehn Jahre Erfahrung – als Entwickler, in der Wartung, als Systemarchitekt und Qualitätsingenieur – in der Automobil- und Mobilfunk-Industrie gesammelt, bevor er 2002 zu Texas Instruments kam. Dort war er zunächst als Applikationsingenieur und Vertriebsleiter für digitale SoCs und Mixed-Signal-ICs tätig. Seit drei Jahren konzentriert er sich auf Energy-Harvesting-Anwendungen und Energiezähler. Er hat Elektrotechnik (Master) an der Ecole Supérieure d'Electricité (Supélec) in Metz, Frankreich, studiert.



Thomas Oderwald

arbeitet als Produktmarketing-Manager für Europa, Nahost und Afrika im Bereich Stromversorgung bei Texas Instruments. Er ist seit über 20 Jahren in der Halbleiterindustrie

tätig in den Bereichen IC-Entwicklung, Entwicklungsleitung, Produktmarketing und Vertrieb. 2005 wechselte er zu Texas Instruments und ist dort seit drei Jahren im Bereich Stromversorgung für portable Geräte tätig. Er hat Elektrotechnik an der Ruhr-Universität in Bochum studiert.

[epic@ti.com](mailto:epic@ti.com)

#### Licht und PV-Zelle müssen zusammenpassen

Wenn im Halbleitermaterial der PV-Zelle ein Photon auf ein Elektron im Valenzband trifft, kann dieses Elektron in das Leitungsband aufsteigen. Die so genannte Bandlücke zwischen beiden Bändern ist von Material zu Material unterschiedlich. Ein solcherart angeregtes Elektron kann sich frei bewegen und damit zum Stromfluss beitragen. Photonen haben abhängig von der Wellenlänge des Lichts unterschiedlich viel Energie: langwelliges Licht (z.B. rot) ist weniger energiereich als kurzwelliges (z.B. blau oder ultraviolett). Haben die Photonen aufgrund zu großer Wellenlänge zu wenig Energie, um Elektronen auf das Leitungsband zu he-

ben, bleiben sie ungenutzt. Sind sie andererseits energiereicher als eigentlich erforderlich, heben sie energiereichere Elektronen in das Leitungsband, die allerdings ihre überschüssige Energie bald in Form von Wärme abgeben. Abhängig von der Breite der Bandlücke – und damit vom Material – müssen die Photonen unterschiedlich viel Energie mitbringen, um Elektronen in das Leitungsband zu heben. Ebenso resultiert aus dem oben Gesagten, dass es eine ganz bestimmte Wellenlänge gibt, die einerseits ausreicht, um Elektronen in das Leitungsband zu heben, aber andererseits nicht so energiereich ist, dass es zu einer ungewoll-

ten Wärmeentwicklung kommt. Wird die Bandlücke vergrößert, so sind die Elektronen im Leitungsband energiereicher, aber ihre Zahl ist geringer. Eine kleinere Bandlücke dagegen lässt die Zahl der Elektronen im Leitungsband steigen, aber ihre Energie ist geringer. Der Wirkungsgrad einer PV-Zelle kann somit bei gegebener Wellenlänge einen bestimmten Grenzwert, die so genannte Shockley-Quessier-Grenze, nicht überschreiten. Je nach dem Spektrum des zu erwartenden Lichts sollte das Material der PV-Zelle außerdem so gewählt werden, dass die Energie des Lichts optimal ausgenutzt wird.

