Photonenteiler: Wie Solarzellen aus einem Lichtteilchen zwei machen

SOLARZELLEN UND LICHTQUANTEN

2025 wurden weltweit Solaranlagen mit rund 698 Gigawatt Leistung neu installiert, insgesamt sind es inzwischen fast drei Terawatt. Rechnerisch könnte die Photovoltaik damit gut zehn Prozent des weltweiten Strombedarfs decken [1]. Jede Solarzelle stößt dabei an eine Grenze, die nichts mit Technik zu tun hat, sondern mit der Quantennatur des Lichts.

Eine elegante Idee, an dieser Grenze zu rütteln, haben Thorsten Trupke, Martin Green und Peter Würfel 2002 durchgerechnet: einen Photonenteiler, der ein energiereiches Lichtteilchen in zwei energieärmere zerlegt, die die Solarzelle dann besser nutzen kann [2]. Um zu verstehen, warum das hilft, muss man wissen, wie eine Solarzelle mit Licht umgeht.

Eine Solarzelle zählt Photonen

Sonnenlicht kommt in Portionen, den Photonen. Jedes trägt eine Energie, die nur von seiner Wellenlänge abhängt [3]:

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad \Rightarrow \quad \frac{E}{\mathrm{eV}} \approx \frac{1240}{\lambda/\mathrm{nm}} \tag{1}$$

Rotes Licht mit 700 Nanometern bringt also etwa 1,8 Elektronenvolt mit, blaues mit 450 Nanometern schon 2,8. Warum Licht überhaupt in solchen Paketen kommt, steht auf der Seite Was sind Quanten?.

In einer Solarzelle trifft ein Photon auf einen Halbleiter (wie eine Solarzelle im Einzelnen funktioniert, erklärt die Seite Fotovoltaik). Dessen Elektronen sitzen im sogenannten Valenzband fest, und um sie frei beweglich zu machen, muss man sie über eine Energielücke ins Leitungsband heben. Diese Bandlücke E_g beträgt bei Silizium und Raumtemperatur 1,12 Elektronenvolt [4]. Ein Photon, das weniger mitbringt, geht einfach durch, Gleichung (1) zufolge alles jenseits von etwa 1100 Nanometern. Ein Photon, das mehr mitbringt, hebt zwar ein Elektron an, aber nur eines. Den Überschuss gibt das Elektron sehr rasch als Wärme an das Kristallgitter ab und landet an der Unterkante des Leitungsbands [2],[5]. Ob ein Photon 1,2 oder 3 Elektronenvolt hat, es liefert in der Regel genau ein Elektron mit der Energie der Bandlücke.

Rechnet man das für das Sonnenspektrum durch, ergibt sich eine harte Obergrenze. William Shockley und Hans-Joachim Queisser nannten sie 1961 den „ultimativen Wirkungsgrad“ [5]:

$$u_{\max} = \frac{E_g \cdot N_{(E \geq E_g)}}{P_{\text{Sonne}}} \approx 44\,\% \quad (\text{Silizium}, E_g = 1{,}12\,\text{eV}) \tag{2}$$

Im Zähler steht die Bandlücke mal der Zahl der Photonen, die genug Energie haben, im Nenner die gesamte Strahlungsleistung der Sonne. Mit der Sonne als Schwarzem Strahler von 5772 Kelvin [6] kommt man für Silizium auf etwa 44 Prozent (eigene Rechnung). Rund 23 Prozent der Energie gehen verloren, weil die Photonen zu schwach sind, und rund 33 Prozent werden zu Wärme (Abb. 1). Wie das Sonnenspektrum entsteht, erklärt die Seite zum Treibhauseffekt.

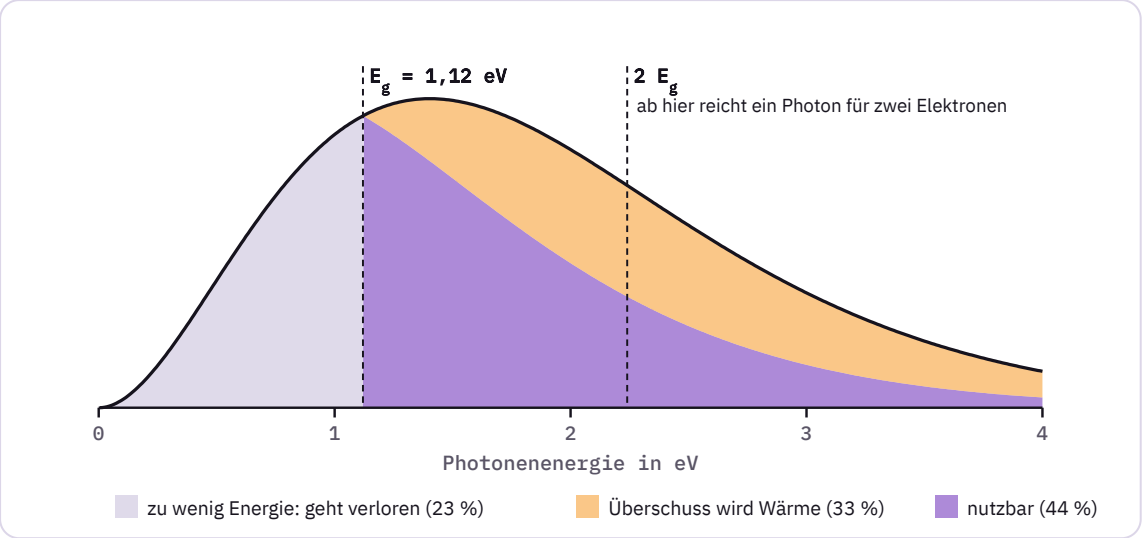

Abb. 1: Verteilung der Sonnenenergie auf die Photonenenergien und was eine Siliziumsolarzelle davon nutzen kann. Sonne vereinfacht als Schwarzer Strahler mit 5772 K [6], ohne Atmosphäre. Eigene Berechnung und Darstellung nach dem Prinzip von [5].

Das ist noch nicht die ganze Wahrheit. Eine Solarzelle strahlt selbst ein wenig Licht ab, ihre Spannung bleibt immer unter der Bandlücke, und so sinkt die Grenze weiter. Shockley und Queisser kamen für eine ideale Zelle mit der Bandlücke von Silizium auf rund 30 Prozent [5]. Für echtes Silizium, in dem zusätzlich Elektronen und Löcher im Kristall verloren gehen, liegt die theoretische Grenze bei 29,4 Prozent [7]. Die besten Siliziumzellen im Labor erreichen inzwischen rund 28 Prozent [8]. Viel Luft ist da nicht mehr.

Aus eins mach zwei

Der größte Verlustposten in Abbildung 1 ist die Wärme. Ein blaues Photon mit 2,8 Elektronenvolt trägt mehr als doppelt so viel Energie wie die Bandlücke, liefert aber nur ein Elektron. Hier setzt der Photonenteiler an. Er ist eine dünne Schicht vor oder hinter der

Solarzelle, mit einem Material, das drei passende Energieniveaus besitzt (Abb. 2). Ein energiereiches Photon hebt dort ein Elektron vom unteren auf das obere Niveau. Zurück fällt es in zwei Schritten über das mittlere Niveau, und bei jedem Schritt sendet es ein Photon aus. Damit beide Photonen in der Solarzelle ein Elektron anregen können, muss jedes mindestens die Bandlücke mitbringen:

$$E_a = E_b + E_c, \quad E_b, E_c \geq E_g \quad \Rightarrow \quad E_a \geq 2E_g \tag{3}$$

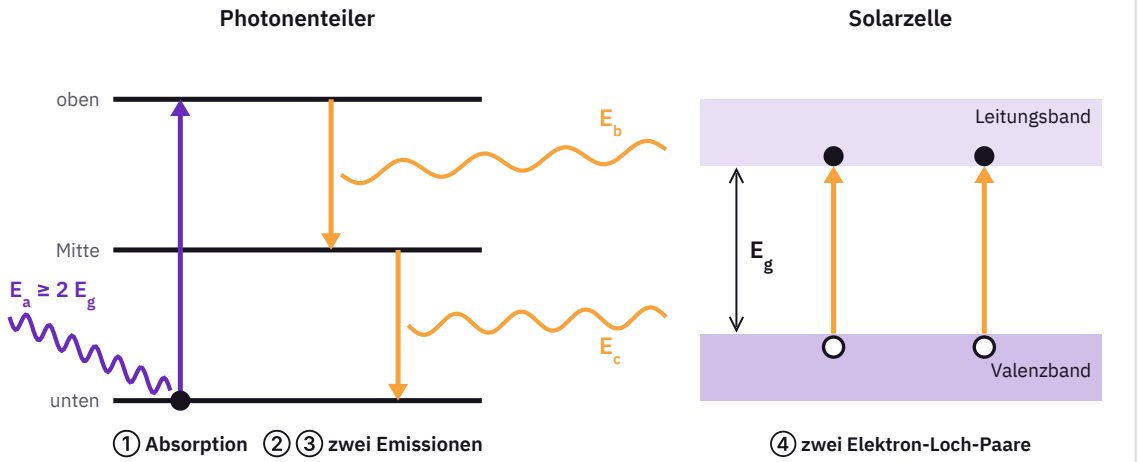

Abb. 2: Prinzip des Photonenteilers: Ein Photon mit mindestens der doppelten Bandlücke wird absorbiert (①), das angeregte Elektron fällt in zwei Schritten zurück und sendet zwei Photonen aus (② ③), die in der Solarzelle je ein Elektron-Loch-Paar erzeugen (④). Schematische eigene Darstellung nach [2].

Für Silizium heißt das, nur Photonen ab 2,24 Elektronenvolt, also grünes, blaues und violettes Licht sowie Ultraviolett unterhalb von etwa 550 Nanometern, lassen sich teilen. Nach unserer Rechnung mit dem Schwarzkörperspektrum sind das gut ein Viertel aller Photonen, die Silizium überhaupt nutzen kann. Trupke, Green und Würfel haben berechnet, was dabei im Idealfall herauskommt. Unter idealisierten Annahmen, mit der Sonne als Schwarzem Strahler von 6000 Kelvin, unkonzentriertem Licht und nur strahlender Rekombination, steigt der Grenzwirkungsgrad, jeweils bei der günstigsten Bandlücke gerechnet, von 30,9 auf 39,63 Prozent, wenn der Teiler hinter der Zelle sitzt, und auf 38,6 Prozent, wenn er vor ihr liegt [2]. Die zweite Variante hat den Charme, dass man sie im Prinzip auf fertige Solarzellen aufbringen könnte.

Das Gegenstück gibt es auch. Ein Aufwärtswandler sammelt zwei Photonen, die einzeln zu schwach wären, und macht daraus eines, das die Bandlücke überwindet [9]. Er greift den grauen Teil in Abbildung 1 an, der Photonenteiler den orangefarbenen.

Was aus der Idee geworden ist

Dass sich Lichtteilchen wirklich teilen lassen, war schon vor der Rechnung von 2002 gezeigt worden. Eine Gruppe aus Utrecht um Andries Meijerink stellte 1999 einen Leuchtstoff aus Lithium-Gadolinium-Fluorid mit Europium vor, der aus einem Photon im Vakuum-Ultraviolett zwei sichtbare macht. Die aus den Spektren abgeschätzte Quantenausbeute lag bei rund 190 Prozent [10]. Der Fachbegriff dafür ist „Quantum Cutting“, Quantenschneiden. Ein solcher Leuchtstoff absorbiert allerdings nur in schmalen Linien im Vakuum-Ultraviolett, und davon kommt auf der Erdoberfläche praktisch nichts an.

Vielversprechender sind inzwischen verwandte Effekte, die direkt im Absorbermaterial stattfinden. In manchen organischen Stoffen zerfällt ein angeregter Zustand von selbst in zwei, ein Vorgang, der Singulett-Spaltung heißt. Eine Solarzelle aus Pentacen lieferte 2013 im Spitzenwert 109 Elektronen pro 100 eingestrahlte Photonen [11]. In Halbleiter-Nanokristallen kann ein energiereiches Photon ebenfalls mehrere Elektronen freisetzen, eine Quantenpunkt-Solarzelle kam 2011 auf 114 Prozent [12]. Und 2019 gelang es, die Energie aus der Singulett-Spaltung in Tetracen in eine Siliziumzelle zu übertragen. Die Ausbeute lag bei rund 133 Prozent, und die Autoren halten auf diesem Weg Wirkungsgrade von bis zu 35 Prozent für möglich [13].

Auf dem Dach ist davon noch nichts. Am weitesten ist ein anderer Weg, der das Sonnenlicht ebenfalls besser aufteilt: Tandemzellen, bei denen eine Schicht aus Perowskit mit größerer Bandlücke über einer Siliziumzelle liegt. Sie erreichen im Labor inzwischen gut 35 Prozent. Die Effizienztabellen von 2026 führen 35,2 Prozent [8], im Juli 2026 meldete LONGi 35,5 Prozent, nach Firmenangaben vom europäischen Testlabor ESTI bestätigt [14]. Die Physik dahinter ist dieselbe, die schon der Photonenteiler ausnutzen wollte. Jedes Photon sollte möglichst genau die Energie abgeben, die die Zelle braucht, und nicht mehr.

Quellen

1. M. de l’Epine, G. Dominguèz, I. Kaizuka, A. Jäger-Waldau: *Snapshot of Global PV Markets 2026.* Report IEA-PVPS T1-49:2026, IEA PVPS Task 1, April 2026, doi:10.69766/WXLW1389.
2. T. Trupke, M. A. Green, P. Würfel: *Improving solar cell efficiencies by down-conversion of high-energy photons.* In: Journal of Applied Physics 92 (2002), S. 1668–1674, doi:10.1063/1.1492021.
3. P. J. Mohr, D. B. Newell, B. N. Taylor, E. Tiesinga: *CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2022.* In: Reviews of Modern Physics 97 (2025), 025002, doi:10.1103/RevModPhys.97.025002.

4. M. A. Green: *Intrinsic concentration, effective densities of states, and effective mass in silicon.* In: Journal of Applied Physics 67 (1990), S. 2944–2954, doi:10.1063/1.345414.
5. W. Shockley, H. J. Queisser: *Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells.* In: Journal of Applied Physics 32 (1961), S. 510–519, doi:10.1063/1.1736034.
6. A. Prša u. a.: *Nominal values for selected solar and planetary quantities: IAU 2015 Resolution B3.* In: The Astronomical Journal 152 (2016), 41, doi:10.3847/0004-6256/152/2/41.
7. A. Richter, M. Hermle, S. W. Glunz: *Reassessment of the Limiting Efficiency for Crystalline Silicon Solar Cells.* In: IEEE Journal of Photovoltaics 3 (2013), S. 1184–1191, doi:10.1109/JPHOTOV.2013.2270351.
8. M. A. Green u. a.: *Solar cell efficiency tables: Version 68.* In: Joule 10 (2026), 102494, doi:10.1016/j.joule.2026.102494.
9. T. Trupke, M. A. Green, P. Würfel: *Improving solar cell efficiencies by up-conversion of sub-band-gap light.* In: Journal of Applied Physics 92 (2002), S. 4117–4122, doi:10.1063/1.1505677.
10. R. T. Wegh, H. Donker, K. D. Oskam, A. Meijerink: *Visible Quantum Cutting in $LiGdF_4$:Eu^{3+} Through Downconversion.* In: Science 283 (1999), S. 663–666, doi:10.1126/science.283.5402.663.
11. D. N. Congreve u. a.: *External Quantum Efficiency Above 100% in a Singlet-Exciton-Fission–Based Organic Photovoltaic Cell.* In: Science 340 (2013), S. 334–337, doi:10.1126/science.1232994.
12. O. E. Semonin u. a.: *Peak External Photocurrent Quantum Efficiency Exceeding 100% via MEG in a Quantum Dot Solar Cell.* In: Science 334 (2011), S. 1530–1533, doi:10.1126/science.1209845.
13. M. Einzinger u. a.: *Sensitization of silicon by singlet exciton fission in tetracene.* In: Nature 571 (2019), S. 90–94, doi:10.1038/s41586-019-1339-4.
14. pv magazine: *Longi sets new world record with 35.5%-efficient perovskite-silicon tandem cell.* 15. Juli 2026, pv-magazine.com.

Zitiervorschlag

quanten.de: ***Photonenteiler: Wie Solarzellen aus einem Lichtteilchen zwei machen.*** Stand: Oktober 2026. URL: https://quanten.de/photovoltaik_photonenteiler.html (PDF: https://quanten.de/pdf/photovoltaik_photonenteiler.pdf)

Texte und Abbildungen © 2026 quanten.de. Nutzung mit Quellenangabe und Link gern, kommerzielle Nutzung nach Absprache: info@quanten.de

Weiterlesen: Fotovoltaik · Was sind Quanten? · Treibhauseffekt · 100 Jahre Quantenmechanik

---

Online-Fassung mit aktualisierten Quellen: https://quanten.de/photovoltaik_photonenteiler.html