# Fotovoltaik einfach erklärt: Wie eine Solarzelle aus Licht Strom macht

STROM AUS LICHT

Solaranlagen auf Dächern, Feldern und Balkonen erzeugten 2025 knapp 17 Prozent der Nettostromerzeugung in Deutschland, den direkt selbst verbrauchten Solarstrom noch nicht mitgezählt [1]. Fast alle Module bestehen aus Siliziumscheiben, rund 98 Prozent der Weltproduktion [1]. Sie haben keine beweglichen Teile, machen keinen Lärm und verbrauchen nichts außer Licht. Wie aus Licht Strom wird, lässt sich nur mit Quantenphysik verstehen, und erstaunlich ist, dass eine verbreitete Erklärung dazu nicht ganz stimmt.

Entdeckt hat den Effekt der neunzehnjährige Edmond Becquerel 1839 in Paris, an zwei Metallelektroden in einer Flüssigkeit, zwischen denen bei Beleuchtung ein schwacher Strom floss [2]. Die erste brauchbare Solarzelle aus Silizium stellten Daryl Chapin, Calvin Fuller und Gerald Pearson 1954 in den Bell Laboratories vor. Sie wandelte rund sechs Prozent des Sonnenlichts in Strom um [3]. Ende 2024 erreichten verkaufte Module im Schnitt fast das Vierfache [1].

## Warum Silizium kein Metall ist

In einem einzelnen Atom dürfen Elektronen nur bestimmte Energien haben. Rücken sehr viele Atome zu einem Kristall zusammen, spalten sich diese Energiestufen in unzählige, eng benachbarte Zustände auf, die man als Bänder bezeichnet. Zwischen den Bändern können Lücken bleiben, in denen es überhaupt keine erlaubten Zustände gibt [4]. Wie gut ein Stoff Strom leitet, hängt davon ab, wie diese Bänder gefüllt sind (Abb. 1).

In einem Metall ist das oberste Band nur teilweise besetzt. Die Elektronen finden jederzeit freie Plätze knapp über ihrer Energie und können sich bewegen. In einem Isolator ist das Valenzband vollständig gefüllt, und bis zum leeren Leitungsband klafft eine so große Lücke, dass kaum ein Elektron sie überwindet. Ein Halbleiter wie Silizium liegt dazwischen. Sein Valenzband ist ebenfalls voll, die Lücke bis zum Leitungsband beträgt aber nur 1,12 Elektronenvolt [5]. Bei Raumtemperatur schaffen nur sehr wenige Elektronen den Sprung, reines Silizium leitet deshalb schlecht.

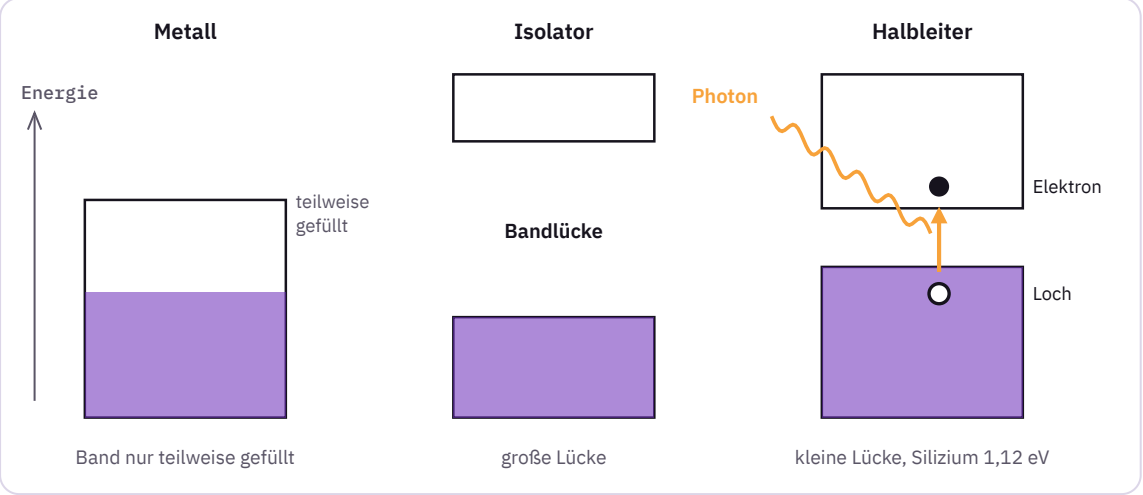


**Abb. 1:** Bändermodell. Lila: mit Elektronen besetzte Zustände. Im Halbleiter kann ein Photon ein Elektron über die Bandlücke heben und hinterlässt ein Loch. Schematische eigene Darstellung nach [4].

Licht ändert das. Albert Einstein schlug 1905 vor, dass Licht aus einzelnen Energiepaketen besteht [6] (mehr dazu unter Was sind Quanten?). Trifft ein solches Photon auf Silizium, kann es ein Elektron aus dem Valenzband ins Leitungsband heben, aber nur, wenn seine Energie reicht:

$$h \cdot f \geq E_g \quad \Leftrightarrow \quad \lambda \leq \frac{hc}{E_g} \approx 1107\,\mathrm{nm} \quad (\mathrm{Silizium}) \tag{1}$$

Das ist der innere Fotoeffekt. Mit den Werten von $h$ und $c$ [7] folgt, dass Silizium alles sichtbare Licht und noch einen Teil des nahen Infrarots nutzen kann. Infrarotlicht mit Wellenlängen jenseits dieser Grenze hilft dagegen nicht, auch wenn es noch so hell ist. Mehr Helligkeit bedeutet nur mehr Photonen, die alle ungenutzt bleiben. Zurück bleibt neben jedem angehobenen Elektron eine Lücke im Valenzband, ein Loch, das sich wie ein positiv geladenes Teilchen durch den Kristall bewegt.

## Phosphor, Bor und der pn-Übergang

Damit eine Solarzelle funktioniert, wird das Silizium gezielt mit Fremdatomen versetzt, man nennt das Dotieren. Ein Siliziumatom hat vier Außenelektronen, mit denen es an seine vier Nachbarn gebunden ist. Ersetzt man es durch ein Phosphoratom mit fünf Außenelektronen, bleibt eines übrig, das schon bei Raumtemperatur frei durch den Kristall wandert. So entsteht n-Silizium, in dem sehr viele bewegliche Elektronen unterwegs sind. Bor hat nur drei Außenelektronen, an seiner Stelle fehlt eines, und es entsteht ein bewegliches Loch. Das ist p-Silizium [4].

Lange Zeit typisch war eine dicke p-dotierte Siliziumscheibe mit einer dünnen n-dotierten Schicht obendrauf, dazu Kontakte vorn und hinten (Abb. 2). Heute bestehen die meisten

Zellen aus n-dotierten Scheiben, etwa in sogenannten TOPCon- oder Heterojunction-Zellen, bei denen die Rollen von n und p vertauscht sind [1]. Das Prinzip ist dasselbe. Fällt Licht ein, entstehen Elektron-Loch-Paare. Würde man nichts weiter tun, fänden Elektronen und Löcher nach kurzer Zeit wieder zueinander, man spricht von Rekombination, und die Energie wäre als Wärme oder schwaches Licht verloren.

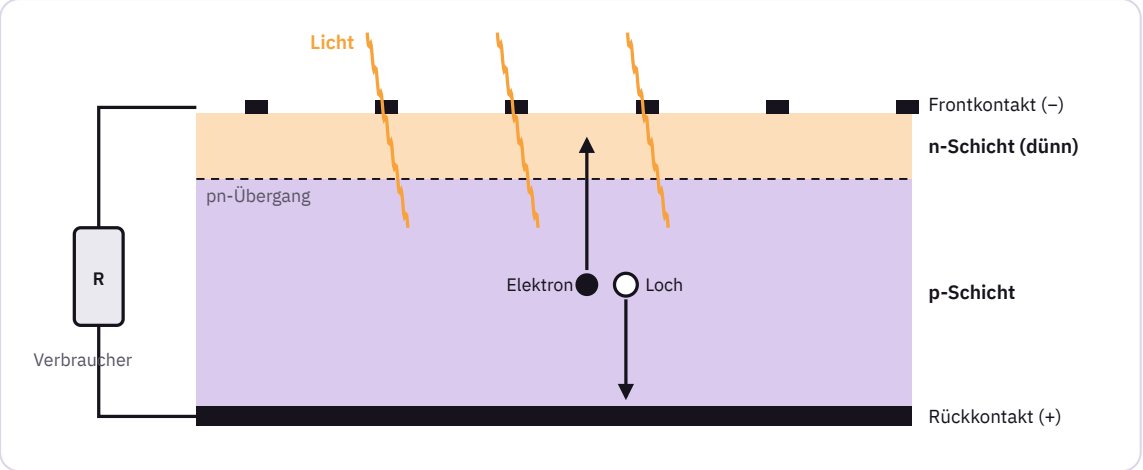


**Abb. 2:** Vereinfachter klassischer Aufbau einer Siliziumsolarzelle (p-Basis, n-Emitter). Ein Photon erzeugt ein Elektron-Loch-Paar, das Elektron gelangt zum Frontkontakt, das Loch zum Rückkontakt, und durch den Verbraucher fließt Strom. Schematische eigene Darstellung.

## Was die Ladungen wirklich trennt

In vielen Schulbüchern steht an dieser Stelle, das elektrische Feld am pn-Übergang ziehe die Elektronen auf die eine und die Löcher auf die andere Seite. Dieses Feld gibt es tatsächlich. Peter Würfel (Universität Karlsruhe) und Uli Würfel (Universität Freiburg und Fraunhofer ISE) haben in ihrem Lehrbuch und in einer gemeinsamen Arbeit mit Andrés Cuevas aber darauf hingewiesen, dass es nicht der eigentliche Antrieb ist [4],[8].

Licht erzeugt in der Zelle mehr Elektronen und Löcher, als im Dunkeln da wären. Getrieben vom Unterschied in ihrer Konzentration, genauer von Gradienten der sogenannten Quasi-Fermi-Energien, wandern beide Sorten in alle Richtungen auseinander, ähnlich wie sich ein Tropfen Tinte im Wasser verteilt. Für sich genommen würde das an beiden Kontakten Elektronen und Löcher gleichermaßen ankommen lassen, und es flösse kein nutzbarer Strom. Entscheidend ist, dass die beiden Seiten unterschiedlich leiten. Die n-Schicht leitet Elektronen sehr gut, Löcher dagegen kaum, die p-Schicht umgekehrt. Sie wirken wie zwei Membranen, von denen jede nur eine Sorte durchlässt. Erst diese Auswahl sorgt dafür, dass am Frontkontakt Elektronen ankommen und am Rückkontakt Löcher [8]. Das Feld am pn-Übergang ist eine Folge dieses Aufbaus, die Trennung leisten die unterschiedlichen Leitfähigkeiten.

Damit die Ladungen die Kontakte erreichen, bevor sie rekombinieren, muss das Material sehr rein sein. In gutem Silizium legen Elektronen und Löcher im Mittel weite Wege zurück,

bevor sie sich wiederfinden, und genau daran arbeiten Solarzellenhersteller seit Jahrzehnten [4].

## Spannung, Strom und Wirkungsgrad

Elektrisch verhält sich eine Solarzelle wie eine Diode, in die das Licht einen zusätzlichen Strom einspeist. William Shockley hat die Diodengleichung schon 1949 hergeleitet [9], für die beleuchtete Zelle lautet sie:

$$I(U) = I_L - I_0\left(e^{\frac{eU}{kT}} - 1\right) \quad \Rightarrow \quad U_{\mathrm{oc}} \approx \frac{kT}{e}\ln\frac{I_L}{I_0} \tag{2}$$

$I_\mathrm{L}$ ist der vom Licht erzeugte Strom, $I_0$ ein sehr kleiner Sperrstrom, der umso kleiner ist, je weniger Ladungen im Material verloren gehen. $kT/e$ beträgt bei 25 °C rund 25,7 Millivolt. Ist der Lichtstrom zum Beispiel eine Billion Mal größer als der Sperrstrom, ergibt sich eine Leerlaufspannung von etwa 0,71 Volt (eigene Rechnung). Viel mehr gibt eine einzelne Siliziumzelle nicht her, weshalb ein Modul aus vielen in Reihe geschalteten Zellen besteht. Abbildung 3 zeigt die Kennlinie. Bis kurz vor der Leerlaufspannung liefert die Zelle fast ihren vollen Strom, dann bricht er ein. Am größten ist die Leistung kurz vor diesem Knick, und auf diesen Punkt regeln Wechselrichter die Anlage ständig nach.

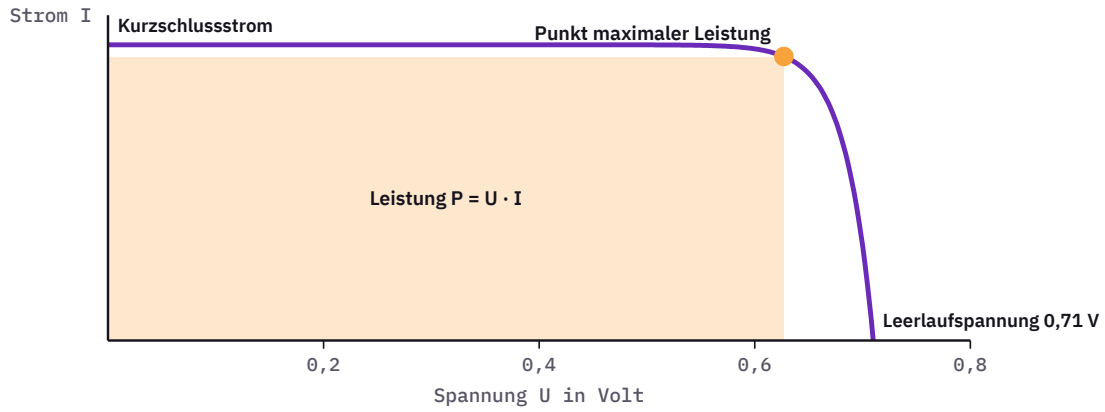


**Abb. 3:** Strom-Spannungs-Kennlinie einer idealen Solarzelle nach Gleichung (2) mit $I_\mathrm{L}/I_0 = 10^{12}$ bei 25 °C. Die orange Fläche entspricht der maximalen Leistung. Eigene Berechnung und Darstellung.

Der Wirkungsgrad gibt an, welcher Anteil der eingestrahlten Lichtleistung als elektrische Leistung herauskommt. Gemessen wird er unter Standardtestbedingungen: 1000 Watt pro Quadratmeter Bestrahlungsstärke mit dem Spektrum AM 1,5 bei 25 °C Zelltemperatur [4]. Ein Modul mit 1,9 Quadratmetern und einem mittleren Wirkungsgrad kommerzieller Siliziummodule von 22,7 Prozent (Stand Ende 2024) [1] liefert dann:

$$\eta = \frac{P_{\max}}{E \cdot A}, \qquad P_{\max} \approx 1000\,\mathrm{W/m^2} \cdot 1{,}9\,\mathrm{m^2} \cdot 0{,}227 \approx 430\,\mathrm{W} \tag{3}$$

Im Labor sind die besten Siliziumzellen inzwischen bei gut 28 Prozent angekommen. Die Effizienztabellen von 2026 führen 28,1 Prozent [10], im September 2026 meldete der Hersteller LONGi 28,3 Prozent, nach Firmenangaben vom Institut für Solarenergieforschung Hameln bestätigt [11]. Die theoretische Obergrenze für Silizium liegt bei etwa 29,4 Prozent [12]. Sie ergibt sich daraus, dass Photonen mit zu wenig Energie ungenutzt bleiben, der Überschuss energiereicher Photonen als Wärme verloren geht und Ladungsträger im Silizium unvermeidlich rekombinieren. Wo diese Grenze liegt und wie man sie mit Tricks wie dem Photonenteiler umgehen will, beschreibt der Artikel über den Photonenteiler.

Und noch etwas ist bemerkenswert. Dieselbe Physik funktioniert auch rückwärts. Legt man an einen pn-Übergang eine Spannung in Durchlassrichtung an, finden Elektronen und Löcher wieder zueinander und senden dabei Licht aus. Bei Silizium ist das wegen seiner indirekten Bandlücke sehr ineffizient, bei Halbleitern wie Galliumnitrid wird daraus eine Leuchtdiode [4].

## Quellen


1. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE: *Photovoltaics Report.* Stand: 14. Juli 2026, ise.fraunhofer.de.
2. E. Becquerel: *Mémoire sur les effets électriques produits sous l’influence des rayons solaires.* In: Comptes Rendus hebdomadaires des séances de l’Académie des Sciences 9 (1839), S. 561–567.
3. D. M. Chapin, C. S. Fuller, G. L. Pearson: *A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power.* In: Journal of Applied Physics 25 (1954), S. 676–677, doi:10.1063/1.1721711.
4. P. Würfel, U. Würfel: *Physics of Solar Cells. From Basic Principles to Advanced Concepts.* 3. Auflage, Wiley-VCH, Weinheim 2016.
5. 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.
6. A. Einstein: *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt.* In: Annalen der Physik 322 (1905), S. 132–148, doi:10.1002/andp.19053220607.
7. 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.

8. U. Würfel, A. Cuevas, P. Würfel: *Charge Carrier Separation in Solar Cells.* In: IEEE Journal of Photovoltaics 5 (2015), S. 461–469, doi:10.1109/JPHOTOV.2014.2363550.
9. W. Shockley: *The Theory of p-n Junctions in Semiconductors and p-n Junction Transistors.* In: Bell System Technical Journal 28 (1949), S. 435–489, doi:10.1002/j.1538-7305.1949.tb03645.x.
10. M. A. Green u. a.: *Solar cell efficiency tables: Version 68.* In: Joule 10 (2026), 102494, doi:10.1016/j.joule.2026.102494.
11. TaiyangNews: *LONGi Raises Single-Junction Silicon Cell World Record To 28.29%.* 27. September 2026, taiyangnews.info.
12. 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.

## Zitiervorschlag

quanten.de: *Fotovoltaik einfach erklärt: Wie eine Solarzelle aus Licht Strom macht.* Stand: Oktober 2026. URL: https://quanten.de/fotovoltaik.html (PDF: https://quanten.de/pdf/fotovoltaik.pdf)

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

**Weiterlesen:** Photonenteiler · Was sind Quanten? · Fermionen und Bosonen