

Was den Strom antreibt – Gemeinsamkeiten elektrischer Energiequellen

Friedrich Herrmann

Abteilung für Didaktik der Physik, Universität, 76128 Karlsruhe

Kurzfassung

Es geht zunächst um ein allgemeines Funktionsprinzip elektrischer Energiequellen. Dann wird gezeigt, wie dieses Prinzip bei drei Energiequellen zur Wirkung kommt: bei der Brennstoffzelle, der Solarzelle und dem Thermoelement.

1. Was treibt einen elektrischen Strom an?

Was treibt den elektrischen Strom an? Diese Frage bringt niemanden in Verlegenheit: ein Potenzialgefälle. Die elektrische Ladung fließt von selbst den Potenzialberg hinunter, in die Richtung des elektrischen Feldstärkevektors. Da haben wir aber schon das Problem. Wenn die Ladung in einem geschlossenen Stromkreis fließt, so geht es ja immer auf einem Teil des Weges den Potenzialberg hinauf und auf einem anderen wieder hinunter. Hinunter geht es im immer Energieverbraucher und hinauf in der Quelle.

Wenn man wissen will, wer den elektrischen Strom im Stromkreis herumtreibt, so darf nicht dort suchen, wo es den Potenzialberg hinunter geht, sondern dort wo es hinauf geht. Das ist zwar kein aufregendes Ergebnis. Trotzdem lohnt es sich, daran zu erinnern, denn viele Lehrbücher – auch Hochschulbücher – behaupten: Der Antrieb der Ladungsträger in der Solarzelle sei das elektrische Feld in der Sperrschicht. Dieses Feld hat, so meint man, glücklicherweise auch die richtige Richtung. Es zieht die Ladungsträger in ihrer Bewegungsrichtung. Das Argument kann nicht richtig sein, denn wir müssen nicht nach einer Stelle suchen, wo das Feld in Flussrichtung zieht, sondern im Gegenteil nach einer Stelle, wo der Fluss gegen das Feld anströmt.

Wie lässt sich das aber überhaupt erreichen? Zur Beantwortung der Frage müssen wir unser Gesichtsfeld etwas erweitern. Es genügt nicht, die elektrische Ladung allein zu betrachten. Wir müssen berücksichtigen, dass die Ladung an Teilchen gebunden ist. Die Teilchen tragen aber außer elektrischer Ladung noch andere mengenartige Größen: etwa Masse, Impuls, Entropie, Drehimpuls und Stoffmenge. Ein elektrischer Strom ist daher zwangsläufig mit einer Reihe anderer Ströme verbunden. Wenn die Teilchen strömen, so fließt nicht nur ein elektrischer Strom, sondern auch ein Massenstrom, ein Entropiestrom, ein Mengenstrom, ein Impulsstrom, ein Drehimpulsstrom und andere.

Einen elektrischen Strom aufrechtzuerhalten heißt, die Ladung tragenden Teilchen in Bewegung zu halten. Dazu brauchen wir aber nicht unbedingt ein elektrisches Potenzialgefälle. Wir können zwar, mit Hilfe eines elektrischen Potenzialgefälles, an der elektrischen Ladung der Teilchen ziehen. Wir können aber auch mit Hilfe eines Gravitationsfeldes an ihrer Masse ziehen, mit Hilfe eines Temperaturgefälles an ihrer En-

tropie oder mit Hilfe eines Gefälles des chemischen Potentials an ihrer Stoffmenge.

In einer elektrischen Energiequelle soll die Ladung den elektrischen Potenzialberg hinauffließen. Wir müssen also dafür sorgen, dass es dort für eine andere Größe den Berg hinuntergeht.

Man sieht nun aber leicht, dass dieser Trick unser Problem gar nicht löst: Wir wollen mit einem anderen Potenzialgefälle an einer anderen mengenartigen Größe der Ladungsträgerpartikel ziehen. Für dieses andere Potenzial gilt nun aber dasselbe wie für das elektrische Potenzial: Geht man einmal im Kreis herum, so geht es auch für die anderen Potentiale genau so viel hoch wie runter. Es fehlt also noch eine Idee: Man muss dafür sorgen, dass dieses zweite Gefälle nur auf einem Teil des Weges wirksam wird. Wir erklären es an einem etwas unsinnigen Beispiel: Ein geschlossener elektrischer Leiter befindet sich senkrecht im Gravitationsfeld. Wir stellen uns nun vor, wir könnten rechts an die Elektronen kleine Zusatzgewichte anhängen. Wir würden dann an die Elektronen oben Zusatzgewicht anhängen, so dass sie in der einen Hälfte des Stromkreises nach unten gezogen werden. Unten nehmen wir die Gewichte wieder weg. Die leichten Elektronen gehen dann in der anderen Hälfte des Stromkreises wieder hoch. Wir haben also einen zweiten Strom, nämlich einen Massenstrom, der nur über ein gewisses Wegstück an den Ladungsstrom gekoppelt ist.

Die verschiedenen elektrischen Energiequellen unterscheiden sich darin, welche mengenartige Größe man für den Antrieb auswählt, und welchen Trick man anwendet, um die Kopplung an die elektrische Ladung ein- und auszuschalten.

Sowohl in den elektrochemischen Quellen, als auch in der Solarzelle ist Antriebsgröße die Stoffmenge. Das zugehörige Potenzial ist das chemische Potenzial. Elektrochemische Zelle und Solarzelle sind also ganz enge Verwandte. Beim Thermoelement ist die Größe, an der man zieht, die Entropie. Die zugehörige Antriebsgröße ist die Temperatur.

2. Die elektrochemische Zelle

Es gibt unzählige Varianten. Wir betrachten hier eine, die sich zwar praktisch kaum realisieren lässt, dafür aber den Vorteil hat, dass man sie besonders leicht durchschaut, Abb. 1. Wie funktioniert diese Zelle?

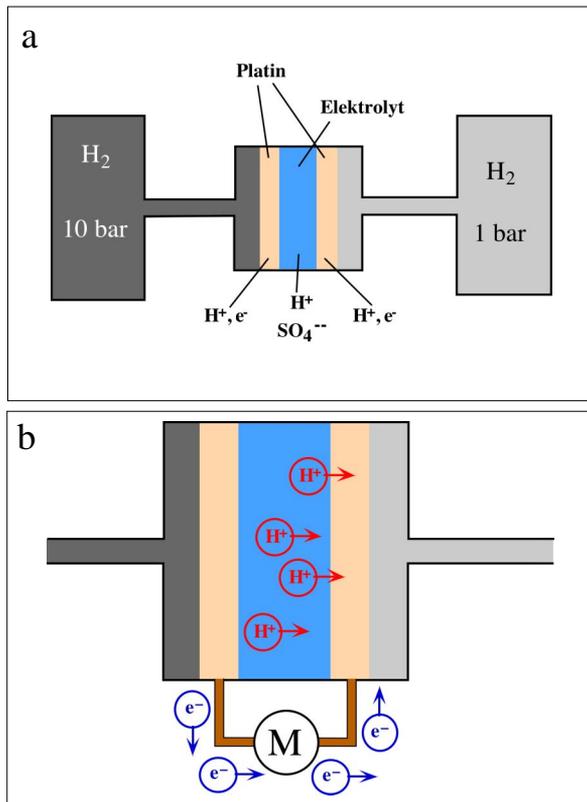


Abb. 1. Elektrochemische Zelle. Sie beruht auf einem Unterschied der Drücke und damit der chemischen Potentiale des Wasserstoffs in den beiden Behältern (a). Die Schwefelsäure ist für Protonen leitfähig und für Elektronen nicht leitfähig. Der Kupferdraht ist für Elektronen leitfähig und für Protonen nicht leitfähig (b).

Der Wasserstoff hat im linken Behälter einen höheren Druck als im rechten, er möchte also von links nach rechts hinüber. Der Antrieb ist eine Differenz des chemischen Potentials. (Oder des Drucks: das chemische Potenzial eines Gases geht mit dem Logarithmus des Druckes.) Für Wasserstoffmoleküle ist der Weg aber versperrt. Tatsächlich gibt es für ihn aber doch eine Möglichkeit, nach rechts zu gelangen. Im Platin ist er nämlich völlig dissoziiert. Wasserstoffkerne, d. h. heißt Protonen, und Elektronen liegen getrennt und sind beweglich. Nun ist der Elektrolyt für Protonen leitfähig oder durchlässig, aber undurchlässig für die Elektronen, er ist ein Nichtleiter für Elektronen. Im Kupferdraht ist es umgekehrt: Er ist durchlässig für Elektronen, aber undurchlässig für Protonen. Man sieht also, wie es der Wasserstoff anstellen kann, um nach rechts zu kommen: die Protonen gehen durch den Elektrolyten, die Elektronen durch den Kupferdraht. In die Elektronenleitung, also den Kupferdraht kann man nun noch eine Glühlampe oder einen Elektromotor einbauen.

Wir sehen: Die Funktionsweise elektrochemischer Zellen beruht auf einem Unterschied der Stoffleitfähigkeit.

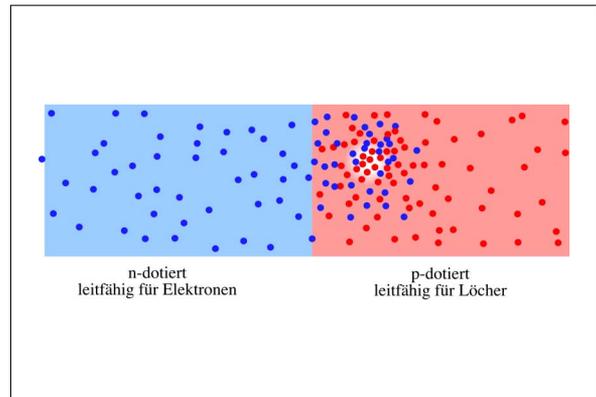


Abb. 2. Solarzelle. Das Licht erzeugt Paare beweglicher Elektronen und Löcher. Die Elektronen können nur nach links, über das n-Material abfließen, die Löcher nur über das p-Material rechts.

Der Antrieb ist eine Konzentrationsdifferenz der Protonen, und damit eine chemische Potenzialdifferenz. Diese wirkt aber nur auf einem Teil des Gesamtstromkreises: auf dem Wegstück zwischen im Elektrolyten. Da sich die Protonen nicht im ganzen Kreis herumbewegen, ist der elektrische Strom nur auf diesem Wegstück an die Protonenstoffmenge gekoppelt.

Andere elektrochemische Zellen funktionieren im Prinzip genau so. Nur laufen in oder an den Elektroden andere Reaktionen ab.

3. Die Solarzelle

Ihren Aufbau zeigt Abbildung 2. Auch hier spielt die selektive Leitfähigkeit von zwei Stoffen eine Rolle: Der eine Stoff sind die freien Elektronen, der andere die freien Löcher. Das Material auf der linken Seite, das n-dotierte Germanium, ist für Elektronen leitfähig, für Löcher ist es undurchlässig. Das p-dotierte Material rechts leitet nur Löcher und ist für Elektronen undurchlässig.

Wir lassen nun ein Lichtbündel auf den Halbleiter fallen, etwa im p-Material in der Nähe der Kontaktfläche. Das Licht erzeugt Elektron-Loch-Paare. Wir bekommen hier eine Überschusskonzentration von Elektronen und von Löchern. Diese möchte sich ausgleichen. Genauer: das chemische Potenzial treibt sie auseinander. Man wird vielleicht erwarten, dass die Elektron-Loch-Paare rekombinieren. Tatsächlich tun sie das auch, nur eben nicht sofort. Wie jede andere chemische Reaktion, so hat auch diese einen gewissen Reaktionswiderstand. Elektronen und Löcher können und müssen also eine Weile koexistieren. Sie werden nun nach außen getrieben und kommen ein Stück weit. Die Entfernung, die sie durchlaufen ohne zu rekombinieren, heißt *Diffusionslänge*. Nun haben Elektronen und Löcher unterschiedliche Möglichkeiten zu entweichen. Die Elektronen, treffen an der Kontaktfläche auf ein Gebiet mit hervorragender Leitfähigkeit für Elektronen. Sie können also dem Druck von rechts ausweichen, sie fließen nach links weg. Die Löcher

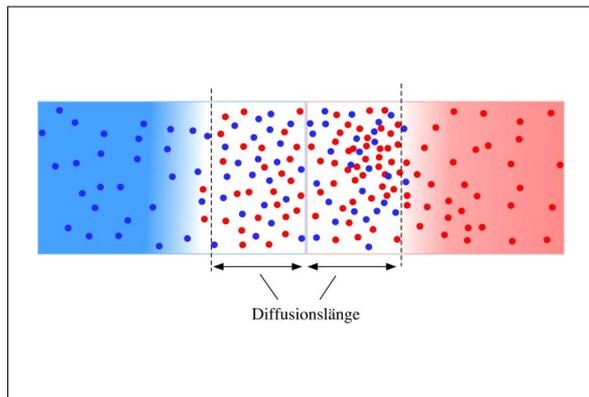


Abb. 3. Nur das Licht, das in einem Abstand von der Kontaktfläche auftrifft, der kleiner ist als die Diffusionslänge, trägt zum photoelektrischen Effekt bei.

können hier nicht lang, denn das Material links ist für Löcher ein Nichtleiter. Sie brauchen diesen Weg aber gar nicht, denn sie können nach rechts abfließen. Das p-Material rechts ist ja für Löcher leitend.

Noch einmal in anderen Worten: Durch das Licht werden zusätzliche Elektronen und Löcher in das Material hineingepresst. Diese wollen ausweichen. Die einen können nur nach links weg, die anderen nur nach rechts. Links ist eine Sperre für die einen, rechts eine Sperre für die anderen. "Hintenrum" können sie sich dann wieder vereinigen. Auf dem Weg dahin lässt man sie aber noch etwas antreiben.

Bei der echten Solarzelle schickt man nicht nur ein kleines Lichtbündel auf den p-n-Übergang, sondern das ganze Gebiet wird mit Licht überflutet, Abb. 3. Für die Solarzelle wirksam ist aber nur dasjenige Licht, das in der Nähe der Kontaktfläche auftrifft, in dem Bereich innerhalb der Diffusionslänge.

Man beachte, dass dieses Gebiet etwa 1000 mal so breit ist wie das Raumladungsgebiet, unmittelbar neben der Kontaktfläche. Im Gegensatz zu dem, was oft gesagt wird, hat die Raumladung und das durch sie verursachte elektrische Feld nichts mit dem photoelektrischen Effekt zu tun.

4. Das Thermoelement

Der Stromkreis besteht aus zwei Hälften aus verschiedenen Materialien, Kupfer und Eisen zum Beispiel. An der einen Kontaktstelle wird erhitzt, an der anderen gekühlt, Abb. 4a. Als Folge davon fließen zwei Entropieströme von heiß nach kalt, einer im Kupfer und einer im Eisen. Diese Entropieströme sind nun, wenn auch schwach, an die Elektronen gekoppelt. Sie versuchen, die Elektronen mitzunehmen. Und das gelingt ihnen auch in geringem Maße.

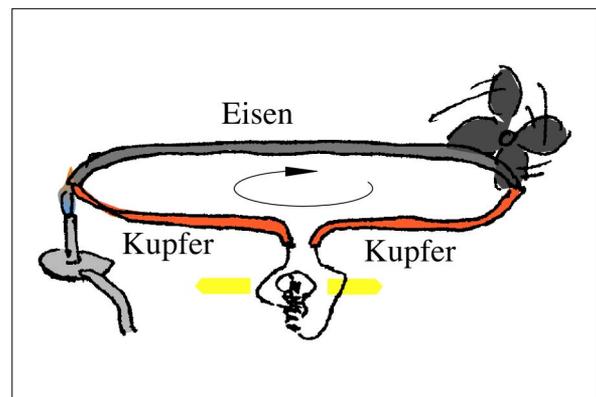
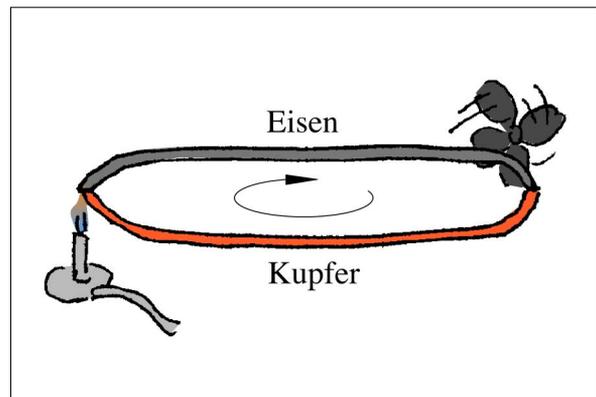


Abb. 4. Thermoelement. Die Entropie versucht, die Elektronen auf ihrem Weg von heiß nach kalt mitzunehmen. Wegen der stärkeren Kopplung zwischen elektrischer Ladung und Entropie, ist der Mitnahmeneffekt im Eisen stärker (a). Der Energieverbraucher kann irgendwo in den Stromkreis eingebaut werden (b).

Allerdings versucht es der eine Entropiestrom über den einen Draht, der andere über den anderen, sodass die Elektronen an der kalten Kontaktstelle gegeneinander drücken, und, so könnte man denken, es passiert gar nichts. Nun ist aber die Kopplung der Entropie an die elektrische Ladung in den beiden Materialien unterschiedlich. In unserem Fall ist sie im Eisen fast zehnmal so stark wie im Kupfer. An den Elektronen im Eisen zieht die Entropie daher viel stärker als im Kupfer. Der Antrieb im Eisendraht "gewinnt" gegenüber dem im Kupferdraht, und die Elektronen setzen sich im Uhrzeigersinn in Bewegung. Irgendwo im Stromkreis kann man einen Energieverbraucher einbauen, Abb. 4b.

Die Funktionsweise des Thermoelements beruht also auf der unterschiedlichen Kopplung der Entropie an die elektrische Ladung in verschiedenen Materialien.