

Friedrich Herrmann

Die Richtung von Strömen

Es wird gezeigt, daß die Richtung des elektrischen Stroms nicht eine Frage der Konvention ist, sondern zwangsläufig aus dem durch eine Konvention festgelegten Vorzeichen der elektrischen Ladung folgt. Die Gültigkeit der Regel: „Der elektrische Strom fließt vom hohen zum niedrigen Potential“ wird untersucht. Es zeigt sich, daß sie für Empfänger elektrischer Energie zutrifft, für Quellen dagegen nicht. Weiterhin wird gezeigt, daß es nicht sinnvoll ist, von *zwei* Arten elektrischer Ladung zu sprechen. Schließlich werden Konventionen untersucht, nach denen die Vorzeichen der elektrischen Ladung und des Impulses festgelegt werden.

1. Einleitung

„Der elektrische Strom fließt in einem Stromkreis vom Plus- zum Minuspol. Diese Festsetzung der Stromrichtung ist eine Konvention. Tatsächlich kann es passieren, daß der elektrische Strom im Gegenverkehr fließt. Da es zwei Arten elektrischer Ladung gibt, kann gleichzeitig positive Ladung in die eine und negative in die andere fließen.“

Welcher Physiklehrer hat seinen Schülern nicht diese oder ähnliche Sätze schon einmal ins Heft diktirt. Dabei enthalten diese Sätze mehrere fundamentale Fehler.

Einmal fließt Strom genauso oft vom Plus- zum Minuspol, wie vom Minus- zum Pluspol. Außerdem trifft es nicht zu, daß die sogenannte konventionelle oder technische Stromrichtung auf einer Konvention beruht. Schließlich ist für elektrische Ladung ein Gegenverkehr nicht möglich, denn es gibt nicht zwei Arten elektrischer Ladung, sondern nur eine.

Im vorliegenden Aufsatz wird auseinandergesetzt, wodurch die Richtung eines beliebigen – nicht nur des elektrischen – Stroms festgelegt ist. Es wird untersucht, auf welchem Fehlschluß die uns allen so plausible Vorstellung eines möglichen Gegenverkehrs beruht. Schließlich wird eine Konvention diskutiert, aber nicht die über das Vorzeichen von Strömen, sondern über das Vorzeichen der strömenden Größe selbst.

2. Die Festlegung der Stromrichtung mit Hilfe eines Erhaltungssatzes

Wir wollen die Frage nach der Richtung eines Stroms zunächst an einem einfachen Beispiel untersuchen, nämlich an einem Wasserstrom.

Durch das Rohr der Abbildung 1 strömt Wasser von einem der beiden Behälter in den anderen. Woran erkennen wir die Stromrichtung im Rohr? Woran erkennen wir, ob das Wasser im Rohr von links nach rechts, oder von rechts nach links fließt? Diese Frage ist leicht zu beantworten. Wir betrachten den Wasserstand in einem der Behälter, etwa in Behälter 1. Nehmen wir an, wir stellen fest, daß der Wasserstand abnimmt, die Änderung dn/dt der Wassermenge n (oder Wasser-Stoffmenge) im Behälter also negativ ist. Wir schließen daraus, daß im Rohr Wasser (oder stellvertretend Stoffmenge) von links nach rechts strömt. Wir haben für diese Entscheidung die Tatsache benutzt, daß sich die Wassermenge in einem Behälter nur dadurch ändern kann, daß sie durch das Rohr zu oder abfließt. Wir haben von der Erhaltung der Wassermenge Gebrauch gemacht.

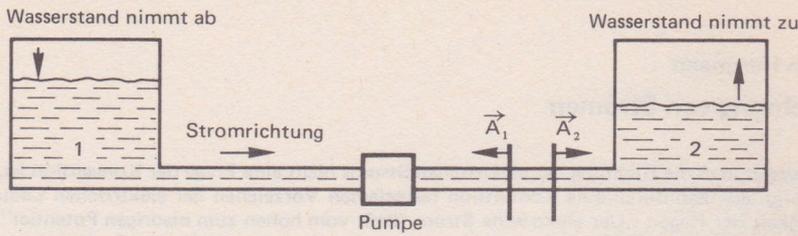


Abb. 1 Nimmt die Wassermenge in Behälter 1 ab, so fließt Wasser aus Behälter 1 heraus. Im Rohr fließt also Wasser von links nach rechts. Die Stärke des Stroms durch die Fläche A_1 ist negativ, die durch A_2 positiv.

Daß Wasser von links nach rechts fließt, findet darin seinen Ausdruck, daß die Vektoren des Stromdichtefeldes \vec{j}_n im Rohr nach rechts weisen. Was wir unter Stromrichtung verstehen, ist gerade die Richtung dieser Vektoren.

Man könnte die Stromrichtung verwechseln mit dem Vorzeichen der Stromstärke. Stromdichte \vec{j}_n und Stromstärke I_n hängen durch

$$I_n = \int \vec{j}_n \cdot d\vec{A}$$

zusammen. Man sieht an diesem Ausdruck, daß das Vorzeichen der Stromstärke davon abhängt, wie man die durchströmte Fläche orientiert. Die Stromstärke mit ihrem Vorzeichen ist also erst dann definiert, wenn man diese Fläche angibt. Die Stärke des Stroms durch die Fläche \vec{A}_1 in Bild 1 ist negativ, die durch \vec{A}_2 ist positiv.

Die Stromdichte dagegen, und damit die Stromrichtung, hängt nicht von der Wahl irgendeiner Fläche ab. Sie folgt eindeutig aus dem Vorzeichen der Änderung $\frac{dn}{dt}$ der Wassermenge.

Wir wollen nun diese Überlegung auf einen elektrischen Strom, d.h. einen Strom elektrischer Ladung übertragen.

Durch den Draht der Abbildung 2 strömt elektrische Ladung von einem der beiden Körper zum anderen. Woran erkennen wir die Stromrichtung im Draht? Wir messen die zeitliche Änderung der elektrischen Ladung Q etwa des Körpers 1. Angenommen, wir finden $\frac{dQ}{dt} < 0$, so ist die Richtung des Stroms der elektrischen Ladung im Draht „von links nach rechts“. Die Stromdichtevektoren im Draht weisen nach rechts. Wir haben wieder von der Erhaltung der strömenden Größe Gebrauch gemacht. Da Q auch negative Werte annehmen kann, ist es wichtig zu beachten, daß $\frac{dQ}{dt}$ positiv sein kann, obwohl der Betrag von Q abnimmt.

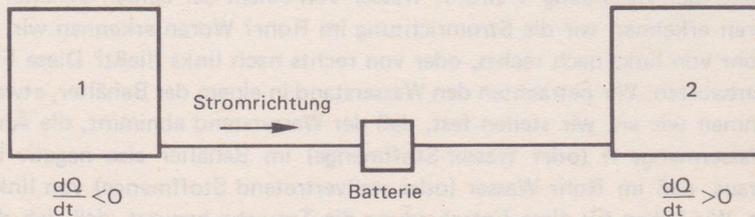


Abb. 2 Nimmt die elektrische Ladung von Körper 1 ab, so fließt elektrische Ladung aus dem Körper 1 heraus. Im Draht fließt also elektrische Ladung von links nach rechts.

Die hier gefundene Stromrichtung ist die Richtung des elektrischen Stroms, den man zum Verbrauch gemacht – hier die Bewegung von Protonen, die positiv, so negativ definiert, so ist die Richtung des Strom im Draht

3. Unter welcher Stromrichtung fließt

Wenn man von irgendwo die Richtung der elektrischen Stromflussrichtung elektrischer Strom fließt. Voraussetzung dafür ist ein Zusammenhang zwischen Potential und Stromfluss. Haupt ein Potential

Betrachtungen auf so



Abb. 3 In der Batterie fließt der Strom in der Richtung des Potentialgefälles.

Man benutzt die oben beschriebene Überlegung, offensichtlich ist, daß die Ladung, die von hohem Potential zum niedrigen fließt, sie auf einem niedrigeren Potential, und auf einem niedrigeren Potential fließt sie in den Drähten fließt sie in die gleiche Richtung. Allgemein fließt der Strom in den Drähten fließt sie in die gleiche Richtung (oder „Verbraucher“) Draht, in einer Richtung. Er fließt vom niedrigen Potential zum hohen. Er fließt sich entladenden Zelle oder in einem Transformator. In einem Gerät, das angeschlossen ist, fließt der Strom zum hohen Potential. Der Strom fließt in die gleiche Richtung. Die elektrische Strom fließt in die gleiche Richtung. Die elektrische Energie fließt in die gleiche Richtung.

Die hier gefundene Stromrichtung ist identisch mit der sogenannten konventionellen elektrischen Stromrichtung. Zu ihrer Festlegung haben wir aber von keiner Konvention Gebrauch gemacht – höchstens von der, daß man eine bestimmte Art *Ladung*, etwa die Ladung von Protonen, als positiv bezeichnet. Hätte man nämlich die Protonenladung als negativ definiert, so wäre für den linken Körper (in Abb. 2) $dQ/dt > 0$, und folglich flöse der Strom im Draht von rechts nach links.

3. Unter welcher Voraussetzung der elektrische Strom vom Pluspol zum Minuspol fließt

Wenn man von irgendeinem elektrischen Leiter oder Bauelement sagen soll, in welche Richtung der elektrische Strom hindurchfließt, benutzt man gewöhnlich die Regel: „Der elektrische Strom fließt vom hohen zum niedrigen Potential“.

Voraussetzung dafür, daß man überhaupt eine Regel aussprechen kann, die einen Zusammenhang zwischen Potentialverlauf und Stromrichtung beschreibt, ist natürlich, daß überhaupt ein Potential definiert ist, daß also $\oint_{\text{Stromkreis}} \vec{E} \cdot d\vec{r} = 0$ ist. Wir beschränken daher unsere Betrachtungen auf solche Stromkreise. Abbildung 3 zeigt ein Beispiel dafür.

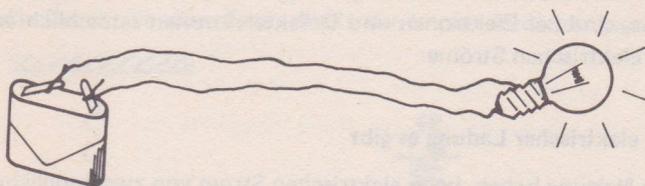


Abb. 3 In der Glühlampe fließt die elektrische Ladung vom hohen zum niedrigen Potential, in der Batterie vom niedrigen zum hohen, und in den Drähten fließt sie auf konstantem Potential.

Man benutzt die oben zitierte Regel, und man kommt zum richtigen Ergebnis, obwohl es offensichtlich ist, daß die Regel genauso oft richtig ist wie falsch. Jede elektrische Ladung, die von hohem zu niedrigem elektrischem Potential fließt, muß nämlich irgendwann einmal vom niedrigen auf das hohe gekommen sein. In dem Stromkreis der Abbildung 3 fließt sie auf einem Teil ihres Weges, nämlich in der Glühlampe, vom hohen zum niedrigen Potential, und auf einem anderen, nämlich in der Batterie, wieder hinauf zum hohen. In den Drähten fließt sie, falls die Drähte ideale Leiter sind, auf konstantem Potential.

Allgemein fließt der elektrische Strom vom hohen zum niedrigen Potential in jedem Empfänger (oder „Verbraucher“) elektrischer Energie, also etwa in einem (nicht supraleitenden) Draht, in einer Glühlampe oder in einer Halbleiterdiode.

Er fließt vom niedrigen zum hohen Potential in *Quellen* elektrischer Energie, etwa in einer sich entladenden Taschenlampenbatterie, in einem sich entladenden Akku, in einer Solarzelle oder in einem Thermoelement.

In einem Gerät, das manchmal Quelle und manchmal Empfänger elektrischer Energie ist, fließt der Strom manchmal vom hohen zum niedrigen und manchmal vom niedrigen zum hohen Potential. Der Akku z.B. ist beim Laden Empfänger elektrischer Energie. Der elektrische Strom fließt dann *im Akku* vom Pluspol zum Minuspol. Beim Entladen ist er Quelle elektrischer Energie, und der elektrische Strom fließt *im Akku* vom Minuspol zum Pluspol.

4. Der Strom der elektrischen Ladung und der Strom der Menge

Warum erscheint uns die Vorstellung so plausibel, der elektrische Strom könne in einem Stromkreis gleichzeitig zwei Richtungen haben? Ist es denn falsch zu sagen, der elektrische Strom, der von den Elektronen in einem Halbleiter getragen wird, habe die umgekehrte Richtung wie der von den Defektelektronen getragene? Ja, es ist falsch.

Wenn man sagt, in einem Festkörper fließe ein Elektronenstrom, so meint man damit ein Ensemble von Strömen physikalischer Größen: einen Strom von Masse, einen Strom von Drehimpuls, von Entropie, von Stoffmenge und von weiteren mengenartigen Größen. Für jede Teilchenart stehen die verschiedenen Stromstärken in einem charakteristischen Zusammenhang. Für Elektronen etwa gilt unter anderem $I_m = 5,5 \cdot 10^{-7} I_n \cdot \text{kg/mol}$ und $I_Q = 9,6 \cdot 10^4 I_n \cdot \text{C/mol}$. Die Richtungen der einzelnen Ströme können durchaus entgegengesetzt zueinander sein. Bei Elektronen ist die Richtung des Stroms der elektrischen Ladung der Richtung des Massen- und des Mengenstroms entgegengesetzt. Bei Defektelektronen oder bei positiven Ionen in einem Elektrolyten haben alle drei Ströme dieselbe Richtung.

Wenn man sagt, die Richtung des von Elektronen getragenen Stroms sei entgegengesetzt zur Richtung des von Defektelektronen getragenen, verwechselt man den elektrischen Strom mit dem Strom von Masse oder von Stoffmenge. Die Massenströme, und ebenso die Stoffmengenströme, sind bei Elektronen und Defektelektronen tatsächlich entgegengesetzt, nicht aber die elektrischen Ströme.

5. Wieviele Arten elektrischer Ladung es gibt

Daß wir eine so starke Neigung haben, beim elektrischen Strom von zwei möglichen Richtungen zu sprechen, hat wahrscheinlich historische Ursachen. In den Anfängen der Entdeckung elektrischer Phänomene stand der Unterschied zwischen Anziehung und Abstoßung elektrisch geladener Körper sehr stark im Vordergrund.

Man konnte sich Anziehung und Abstoßung anscheinend nur vorstellen als zustandekommend durch die Wechselwirkung verschiedener Qualitäten, zwischen denen es keinen stetigen Übergang gibt, ähnlich wie zwischen den Qualitäten männlich und weiblich. Demzufolge hatte man die Vorstellung von zwei elektrischen Fluida, die sich in einem Körper befinden können, einem negativen und einem positiven [1, S. 40]. Obwohl in der mathematischen Formulierung der Theorie des Elektronenmagnetismus durch Maxwell nur eine einzige Größe „elektrische Ladung“ auftritt, hat sich in der sprachlichen Beschreibung elektrischer Phänomene die Hypothese der zwei Fluida bis heute erhalten. Es gibt kaum ein Physiklehrbuch, in dem nicht von zwei Arten elektrischer Ladung, der positiven und der negativen, die Rede ist, so als handle es sich um zwei verschiedene physikalische Größen. Man könnte das damit entschuldigen, daß man sagt, das sei eben eine Art auszudrücken, daß die elektrische Ladung zweier Vorzeichen fähig ist. Wenn das gemeint ist, muß man allerdings noch einen Lehrsatz hinzufügen, der die Verknüpfung zwischen diesen Größen festlegt: „Befinden sich an einem Ort gleiche Mengen positiver und negativer Ladung, so heben sich die Ladungen in ihrer Wirkung auf“. Dies ist eine unnötige Komplizierung eines einfachen Sachverhalts.

Bei anderen mengenartigen (extensiven) physikalischen Größen, die zweier Vorzeichen fähig sind, sagt man übrigens auch nicht, es gebe zwei Arten der Größe. Niemand sagt, es gebe zwei Arten von Impuls, nur weil Impuls positiv und negativ sein kann.

6. Das Vorzeichen des Vorzeichens

Aus den Überlegungen davon abhängt, was es also. Man könnte also sagen, das Wasserstoffatom wird als positiv betrachtet, mehr in Frage. Man könnte auch sagen, die Konvention nicht ausreicht, um die Konvention zu beschreiben wollten, das Wasserstoffatom auf einem Stern, die Konvention, so müssen zusätzlich der Kern des Wasserstoffatoms. Bis hierher scheinen aber nicht, wenn man etwa auf den Impuls. Durch eine gespannte Feder (Abb. 4). Durch die

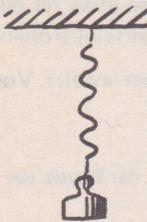


Abb. 4 Durch die gespannte Feder ist ein Impuls nach unten übertragen.

durch die andere Feder beschleunigt wird. Durch die Feder vom Manuskript nicht erst dargestellt werden wollen, sondern von der anderen Seite betrachtet, etwa



Abb. 5 Wenn ein Impulsstrom vom Manuskript zum Blatt Papier übertragen wird, so wird das Blatt Papier beschleunigt.

6. Das Vorzeichen der elektrischen Ladung – eine Konvention; das Vorzeichen des Impulsstroms

Aus den Überlegungen in Abschnitt 2 folgt, daß die Richtung des elektrischen Stroms davon abhängt, was für elektrische *Ladung* man als positiv bezeichnet. Eine Konvention gibt es also. Man könnte sie etwa so formulieren: „Die Ladung des Kerns des Wasserstoffatoms wird als positiv festgelegt“. Diese Konvention ist etabliert, niemand stellt sie mehr in Frage. Man kann sich aber leicht eine Situation vorstellen, in der diese Konvention nicht ausreicht. Wenn wir jemand auf einem fernen Stern per Funk die Erde beschreiben wollten, würden wir ihm vielleicht sagen: „Wir nennen die Ladung des Kerns des Wasserstoffatoms positiv“. Wenn wir Pech haben, lebt aber unser Gesprächspartner auf einem Stern, der aus Antimaterie besteht, und er versteht unsere Nachricht falsch. Die Konvention, so wie wir sie oben formuliert haben, ist also nicht allgemeingültig. Wir müssen zusätzlich noch unser „elektrisches Bezugssystem“ angeben: „Die Ladung des Kerns des Wasserstoffatoms *in unserem Sonnensystem* wird als positiv festgelegt“.

Bis hierher scheinen unsere Überlegungen eine belanglose Spielerei zu sein. Sie sind es aber nicht, wenn man sie überträgt auf andere Größen, die zweiter Vorzeichen fähig sind, etwa auf den Impuls.

Durch eine gespannte und durch eine gedrückte Feder fließt ein Impulsstrom [2, S. 80], (Abb. 4). Durch die eine Feder fließt der Impuls in die entgegengesetzte Richtung wie

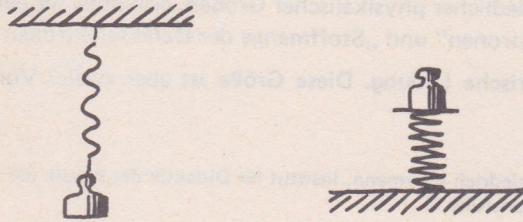


Abb. 4 Durch jede der beiden Federn fließt ein Impulsstrom. Die Stromrichtung in der linken Feder ist entgegengesetzt zu der in der rechten.

durch die andere Feder. Aber fließt er in der linken nach oben und in der rechten nach unten oder umgekehrt? Abbildung 5 zeigt, wie durch eine gespannte Feder ein Körper beschleunigt wird. Der Impuls des Wagens nimmt zu, also fließt der Impulsstrom durch die Feder vom Mann zum Wagen, könnte man sagen. Hier treten aber die Mißverständnisse nicht erst dann auf, wenn wir den Versuch jemand auf einem fernen Stern beschreiben wollen, sondern schon dann, wenn jemand denselben Versuch von der Rückseite betrachtet, etwa, indem er das Blatt Papier, auf dem sich Abbildung 5 befindet,

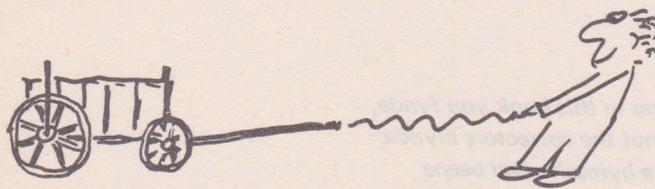


Abb. 5 Wenn man den Impuls nach rechts positiv zählt, fließt die Feder ein Impulsstrom vom Mann zum Wagen. Betrachtet man die Anordnung von hinten (etwa indem man das Blatt Papier gegen das Licht hält), so fließt der Impuls vom Wagen zum Mann.

gegen das Licht hält und von hinten durchsieht. Wenn er, wie bei der Betrachtung von vorn, den nach rechts weisenden Impuls positiv nennt, so nimmt für ihn der Impuls des Wagens ab. Folglich fließt der Impulsstrom für ihn vom Wagen durch die Feder zum Mann. Wie bei der Festlegung des Vorzeichens der elektrischen Ladung und damit des elektrischen Stroms, muß man auch beim Impuls zuerst das Bezugssystem fixieren. Erst dann ist es möglich, sich über das Vorzeichen von Impuls und Impulsstrom zu einigen.

7. Schlußbemerkungen

Wir wollen die Fehler, die die Sätze am Anfang dieses Artikels enthalten, noch einmal aufzählen und berichtigen

1. Der Satz „Der elektrische Strom fließt vom Plus- zum Minuspol“ ist richtig, wenn der elektrische Strom durch einen Empfänger elektrischer Energie fließt. Er gilt nicht für Quellen elektrischer Energie.
2. Die Festsetzung der elektrischen Stromrichtung beruht nicht auf einer Konvention. Die Richtung des elektrischen Stroms folgt zwangsläufig, wenn das Vorzeichen der elektrischen Ladung festgelegt ist.
3. Der elektrische Strom kann nicht im Gegenverkehr fließen. Einen Gegenverkehr kann es nur geben für Ströme unterschiedlicher physikalischer Größen, also etwa für den Strom der Größen „Stoffmenge der Elektronen“ und „Stoffmenge der Defektelektronen“.
4. Es gibt nur eine Größe elektrische Ladung. Diese Größe ist aber zweier Vorzeichen fähig.

(Anschrift des Verfassers: Prof. Dr. Friedrich Herrmann, Institut für Didaktik der Physik der Universität Karlsruhe, Kaiserstraße 12, 7500 Karlsruhe 1)

Eingangsdatum: 6.3.1980
(veränderte Fassung 21.7.1980)

Literatur

- [1] Maxwell, J.C.: Lehrbuch der Electricität und des Magnetismus, Berlin 1883.
- [2] Herrmann, F.: Konzepte eines zeitgemäßen Physikunterrichts, Heft 3, Schroedel: Hannover 1979

*If many faultes in this book you fynde,
Yet think not the correctors blynde;
If Argos heere hymselfe had beene
He should perchance not all have seene.*

(Richard Shacklock . . . 1565 [113])