

10. Mathematische Vorzeichen als Kennzeichen für Größenarten. Die elektrische Ladung

Geeignete Paare elektrisch nicht leitender Dinge (Isolatoren), zum Beispiel ein Glasstab und ein Seidentuch oder ein Hartgummistab und ein Wolltuch, laden sich bei Berührung gegenseitig elektrisch auf («Berührungselektrizität»). Die Aufladung, die wir sinnlich nicht unmittelbar wahrnehmen können, ist daraus zu erschließen, daß zwischen einem geladenen und einem nicht geladenen Isolator eine anziehende Kraft wirkt. Diese scheint nicht groß zu sein, ist tatsächlich aber um viele Zehnerpotenzen größer als die zwischen den Isolatoren (und allen anderen Dingen) ebenfalls wirkende Gravitationskraft.

Die Gravitationskraft zwischen Dingen ist so klein, daß sie nur mit einer (hochempfindlichen) Gravitationsdrehwaage nachgewiesen werden kann - es sei denn, daß das eine Ding zum Beispiel die Erde ist und sich die Gravitationskraft zwischen der Erde und dem zweiten Ding, zum Beispiel einem Stein, als das Gewicht dieses Steins zu erkennen gibt. - Versuche mit der Gravitationsdrehwaage sind vergleichsweise jungen Datums, während die Anziehung auf Grund elektrischer Kräfte schon im klassischen Altertum bekannt war: Ein mit einem Tuch geriebener Bernstein zieht zum Beispiel Wollflöckchen und Papyrusfasern an.

Da sich die Ladung auf einem Isolator nicht durch Elektrizitätsfluß ausbreiten kann, werden Bernsteinstücke und andere Isolatoren nicht nur mit einem Tuch zur Berührung gebracht, sondern mit diesem gerieben, um sie in einem größeren Bereich aufzuladen («Reibungselektrizität»).

Bei Reibungsversuchen zeigt sich, daß geladene Isolatoren nicht nur auf ungeladene, sondern - und zwar stärker - auch auf geladene Isolatoren wirken, und zwar nicht nur anziehend, sondern auch abstoßend. Insgesamt lassen sich drei auffallende Tatsachen feststellen.

(1) Die anziehende Kraft zwischen einem geladenen Glasstab und einem geladenen Hartgummistab ist größer als die zwischen einem geladenen Glasstab und einem ungeladenen Hartgummistab oder als die zwischen einem ungeladenen Glasstab und einem geladenen Hartgummistab.

(2) Zwischen einem geladenen und einem nicht geladenen Isolator wirkt nur eine anziehende Kraft. Zwischen zwei geladenen Isolatoren kann nicht nur eine anziehende Kraft wirken - wie zum Beispiel zwischen einem geladenen Glasstab und einem geladenen Hartgummistab - sondern auch eine abstoßende - wie zum Beispiel zwischen zwei geladenen Glasstäben oder zwischen zwei geladenen Hartgummistäben.

(3) Alle Isolatoren lassen sich nach der Art der (anziehenden oder abstoßenden) Wechselwirkung mit anderen Isolatoren in zwei - und nur in zwei - Gruppen einordnen. Alle geladenen Dinge ein und derselben Gruppe stoßen sich gegenseitig ab und ziehen alle geladenen Dinge der jeweils anderen Gruppe an. Zwei geladene Isolatoren verschiedener Art sind also immer entweder «gleichsinnig», oder «gegensinnig» geladen.

Daraus ist zu schließen, daß es Ladungen zweier - und nur zweier - Arten gibt.

Die elektrischen Phänomene lassen sich nicht mit der Annahme deuten, daß es nur eine Ladung einer einzigen Art gebe und daß die Ladung der scheinbar zweiten Art (nur) durch einen Mangel an elektrischer Ladung (der alleinigen Art) vorgetäuscht werde. Gäbe es nur eine Ladung einer einzigen Art, könnte bei einer Entladung nur der Zustand des Nichtgeladenseins erreicht werden und bliebe der Zustand des 'gegensinnigen' Geladenseins unverständlich.

Entladungsversuche zeigen, daß sich 'gegensinnige' Ladungen (teilweise oder vollständig) kompensieren, das heißt: in ihrer Wirkung aufheben können und damit Eigenschaften entgegengesetzter Art sind. (Ich meine hier mit dem Wort "Ladung" ausschließlich eine physikalische Größe, nämlich die Eigenschaft von Dingen, ihre Umgebung in besonderer [spezifischer] Weise zu beeinflussen, und nicht einen Ladungsträger, der eine Sache ist.)

In einem stromdurchflossenen Elektrizitätsleiter (sei dieser ein Metallstück oder zum Beispiel eine Portion einer Salzlösung) bewegen sich elementare Elektrizitätsträger, und zwar im allgemeinen ungeheuer viele, ohne daß der Leiter nach außen hin elektrisch geladen wäre.

Man spricht übrigens oft sowohl von "elektrischer Ladung" wie auch (in einer allgemeineren Weise) von "Elektrizität", und zwar ohne die genaue Bedeutung dieser beiden Namen festzulegen. - Auch ich muß hier diese beiden Namen verwenden, ohne ihre Bedeutung präzise zu analysieren.

Ich bezeichne die Elektrizitäten der beiden Arten (vorübergehend und nur scheinbar verfremdend) nach den bekanntesten Vertretern ihrer Träger mit den (bekannten) Namen "Glaselektrizität" (G) und "Hartgummielektrizität" (H).

Da wir heute wissen, daß alle Dinge aus Protonen, Neutronen und Elektronen bestehen und daß die Protonen die Träger der Glaselektrizität und die Elektronen die der Hartgummielektrizität sind, könnten wir heute auch unmittelbar von "Protonenelektrizität" und "Elektronenelektrizität" sprechen - allerdings nur um den Preis, daß diese Namen den Schülern im einführenden Unterricht unverständlich wären. (Wer nur ein Chemielehrbuch für akzeptabel hält, das mit der Aussage beginnt "Es gibt Protonen, Neutronen und Elektronen", würde staunen, was die Schüler in einem solchen Buch alles nicht verstehen - allerdings nur, wenn er auch fähig ist, dieses Nichtverstehen zur Kenntnis zu nehmen.) - Wir wissen heute auch, daß die Ladung eines Protons (eine "positive Elementarladung") genau die Ladung eines Elektrons (eine «negative Elementarladung») kompensiert - auch wenn wir hier keine Antwort auf die Frage geben können, warum das so ist. Aber weil sich die Ladungen genau kompensieren, wird ihnen das gleiche Ausmaß zugesprochen, nämlich $1,60 \dots \cdot 10^{-19}$ As, und es wird diesem ein mathematisches Vorzeichen vorgesetzt: $+1,60 \cdot 10^{-19}$ As; $-1,60 \cdot 10^{-19}$ As. - Ich komme hierauf noch zurück.

Und ich bezeichne (ebenfalls vorübergehend und nur scheinbar verfremdend) auch die Bezugsgrößen (Einheiten) der elektrischen Ladungen der beiden Arten nicht mit einem Kombinat aus einem Ausmaßzeichen (1 As) und einem mathematischen Vorzeichen (+ oder -), sondern mit "1 G-As" (1 Glasampersekunde) und "1 H-As" (1 Hartgummiampererekunde).

Da sich zwei 'gegensinnige' Ladungen von beispielsweise 3 G-As und 3 H-As in ihrer Wirkung gegenseitig aufheben, könnte man diesen Sachverhalt mathematisch durch die Gleichung

$$(10.1) \quad 3 \text{ G-As} + 3 \text{ H-As} = 0$$

beschreiben. Aus dieser würde folgen

$$(10.2) \quad 3 \text{ G-As} = -3 \text{ H-As} \text{ (beziehungsweise } -3 \text{ G-As} = 3 \text{ H-As).}$$

Die Gleichungen 10.1 und 10.2 legen die Folgerung nahe, auf die Unterscheidung von G- und H-Ladungen und -Ladungseinheiten zu verzichten und nur von "positiven" und "negativen" Ladungen und Ladungseinheiten zu sprechen und statt 10.1 zu schreiben

$$(10.3) \quad 3 (+\text{As}) + 3 (-\text{As}) = 0.$$

Diese Gleichung erlaubt zwei mathematisch-formale Umformungen beziehungsweise Vereinfachungen:

$$(10.4) \quad 3 (+As) = +3 As; 3 (-As) = -3 As;$$

$$(10.5) \quad +3 As - 3 As = 0.$$

Beim Übergang von 10.3 zu 10.4 geschieht etwas so Merkwürdiges, daß man es nicht übersehen sollte: Die Vorzeichen, die die Art der (Bezugs-)Ladungen kennzeichnen (und die an Stelle der in 10.1 verwendeten Buchstaben "G" und "H" geschrieben sind) sind von ihrem Ort unmittelbar vor dem Bezugsgrößensymbol ["3 (-As)"] vor das Produkt "Ausmaßfaktor mal Bezugsgröße" gewandert (" -3 As") und täuschen so Orientierungszeichen vor.

Beim Übergang von 10.3 zu 10.5 werden dann auch noch das Operationszeichen "+" und das Zeichen "-", das im zweiten Summanden der Gleichung 10.3 die Art der Ladung kennzeichnet, zum Operationszeichen "-" zusammengefaßt. Dadurch tritt an die Stelle des Additionszeichens in 10.3 mathematisch-formal ein Subtraktionszeichen in 10.5 und aus der negativen Ladung in 10.3 ["3 (-As)"] wird mathematisch-formal eine positive Ladung ("3 As") in 10.5. (Die Zeichen "3 As" in den beiden Summanden bedeuten in 10.5 ja formal identisch Gleiches.)

Wenn das kompliziert klingt, liegt das nicht an der Darstellung, sondern an der mehrdeutigen Verwendung des Plus- und des Minuszeichens.

Wie schon angedeutet, sehen die Symbole der Art "+3 As" und "-3 As" aus wie die früher besprochenen Symbole für Dreifaktorenprodukte und suggerieren fast zwangsläufig die Vorstellung verschieden orientierter gleichartiger Größen, also die Vorstellung, daß es nur eine einzige Größe "elektrische Ladung" gebe und daß diese lediglich mit zwei verschiedenen 'Ladungssinnen' auftrete. Sie verleiten damit also auch zu der Meinung, daß es neben den bisher besprochenen physikalischen Sinnen auch noch alternativ auftretende 'Ladungssinne' gebe, und können damit verschleiern, daß es sich bei den Ladungen mit den beiden vermeintlichen Ladungssinnen in Wahrheit um **Ladungen zweier unterschiedlicher Arten** handelt.

Die mathematischen Vorzeichen in den Ladungsangaben haben demnach in einer merkwürdigen Weise die Aufgabe, die Art einer Ladung zu kennzeichnen. (Das wurde im Vorstehenden bereits zum Ausdruck gebracht; und es bestätigt, daß die Verwendung von Namen wie "Glaselektrizität" in der Tat nicht verfremdend ist, sondern den tatsächlichen Verhältnissen genau gerecht wird.) Die Verwendung der mathematischen Vorzeichen vereinfacht Rechnungen in der Physik, sollte aber nicht zu sachlich unzutreffenden Auffassungen verleiten. Die Namen "positiv" und "negativ" bringen im Kombinat mit dem Namen "Ladung" nicht die Orientierung eines 'Ladungssinns' zum Ausdruck, sondern dienen - um es noch einmal zu betonen - (in einer bis jetzt nicht in den Blick gekommenen Weise) der Kennzeichnung von Ladungen zweier verschiedener Arten, die sich (in ebenfalls einmaliger Weise) in ihrer Wirkung kompensieren können.

Man sollte deshalb nicht von "gleichsinnigen" und "gegensinnigen", sondern von "gleichartigen" und "ungleichartigen" oder "verschiedenartigen" Ladungen sprechen. Und man sollte, so lange man die Wörter "positiv" und "negativ" weiter verwendet, sprachlich besser treffend von "Positivladungen" und von "Negativladungen" statt von "positiven" und von "negativen Ladungen" reden. Die die Art der Ladungen kennzeichnenden Vorzeichen gehören - von der Sache her gesehen - unmittelbar zur Ladung und damit auch unmittelbar vor das Einheitensymbol ["3 (-As)"] und nicht vor das Symbol des Ausmaßfaktors (" -3 As"). Auch die Bezugsgrößen wären mit "1 Positivamperesekunde" und "1 Negativamperesekunde" zu bezeichnen. Die sachlich wie

logisch unzutreffenden, aber immer wieder zu hörenden Ausdrücke der Art "stärker positiv/negativ geladen" oder "positiver/negativer geladen" könnten dann vermieden werden. Es handelt sich ja nicht um das 'Positiver-Sein' oder 'Negativer-Sein' von Ladungen, sondern um das Größer- oder Kleiner-Sein von Positiv- oder Negativladungen: +5 As ist eine größere Positivladung als +3 As (und nicht eine 'positivere Ladung'), und -5 As ist eine größere Negativladung als -3As (und nicht eine 'negativere Ladung'). +5 As ist selbstverständlich nicht eine größere Ladung als -3 As (oder als -5 As), weil eine Positivladung mit einer (andersartigen) Negativladung so wenig in eine quantitative Vergleichsbeziehung gestellt werden kann wie zum Beispiel eine Masse und eine Länge: 5 kg ist nicht größer als 3 m (oder als 5 m).

Die Besonderheit der Größen "Positivladung" und "Negativladung" liegt nicht darin, daß diese Größen irgendwie 'gegenseinnig' (in der Bedeutung "gegenseinnig orientiert") wären, sondern darin, daß sie die geladenen Dinge 'befähigen', mit ihrer Umgebung in Wechselwirkungen zweier gegensätzlicher Arten (Anziehung und Abstoßung) zu treten, und daß sie sich deshalb in ihrer (Kraft-)Wirkung je nach ihrem Ausmaß ganz oder teilweise kompensieren können.

Die Unterscheidung von Elektrizitäten zweier Arten (und nicht von Elektrizitäten zweier Ladungssinne) ändert selbstverständlich nichts daran, daß die Bezugsgleitsinne elektrischer Ströme und elektrischer Felder konventionell vereinbart werden müssen: Der Bezugsgleitsinn eines elektrischen Stromes ist der Gleitsinn, mit dem sich die Träger der Positivladung bewegen; der Bezugsgleitsinn eines elektrischen Feldes weist

- vom Pol mit der Positivladung zum Pol mit der Negativladung oder
- vom Pol mit der größeren Positivladung zum Pol mit der kleineren Positivladung oder
- vom Pol mit der kleineren Negativladung zum Pol mit der größeren Negativladung.

Es ist auch anzumerken, daß die Gesamtladung eines Dinges nicht - wie man immer noch hören kann - die Differenz der Positiv- und der Negativladungen ist; sie ist (mathematisch formal) die Summe der Positiv- und der Negativladungen: Nur die 'Summenbildung' "+5 As + (-3 As)" (= 2 As) und nicht die 'Differenzbildung' "+5 As - (-3 As)" (= 8 As) liefert das zutreffende Ergebnis.

Das, was ich zur Verwendung der Vorzeichen bei Angaben von Ladungen (Q) sagte, gilt sinngemäß auch für die Verwendung der Vorzeichen bei Angaben von Stromstärken ($I = Q/t$). So wie es Ladungen zweier Arten gibt, gibt es auch Ladungsströme zweier Arten: +5 A ist die Stärke eines Stromes von Trägern einer Positivladung; -5 A ist die Stärke eines Stromes von Trägern einer Negativladung. - Im Gegensatz dazu ist im Zeichen für den Axor einer elektrischen Spannung das mathematische Vorzeichen ein Orientierungsfaktor in der besprochenen Bedeutung: Er gibt die Orientierung des Gleitsinns eines elektrischen Feldes hinsichtlich eines Bezugsgleitsinns an (Abschnitt 2).

