

18. Arbeiten mit Ersatzgrößen für noch nicht erfaßte Urgrößen. Elektrostatische Ladung des physikalischen Dreiersystems und elektrische Ladung des physikalischen Vierersystems

18.1. Im Abschnitt 16 wurde angedeutet, daß oft erst Größen, die sich später als von anderen Größen abgeleitet erwiesen, ermöglichten, physikalische Phänomene erstmalig quantitativ zu behandeln. Daß das so ist, soll am Beispiel der elektrostatischen Ladung des elektrostatischen Dreiersystems (es gibt noch zwei weitere Dreiersysteme) und der elektrischen Ladung des elektrodynamischen Vierersystems (das ein Teilsystem des heute benutzten Siebenersystems ist) gezeigt werden. Das genannte Dreiersystem wird heute zwar nur noch von Theoretischen Physikern und Physikochemikern benutzt; es ist aber von großer historischer Bedeutung (da der Weg zum heute verwendeten Vierersystem über dieses Dreiersystem führte), so daß schon diese Bedeutung seine Behandlung rechtfertigen würde. Dieses Beispiel zeigt, wie wichtig das Arbeiten können mit abgeleiteten Größen selbst dann - und vor allem dann - ist, wenn man - so paradox das klingen mag - mit den Urgrößen selbst noch nicht arbeiten kann, und zwar weil man sie nicht oder noch nicht (als Größen sui generis) messen kann.

Charles Auguste de Coulomb und seine Vorgänger wußten bei ihren quantitativen Untersuchungen der elektrostatischen Phänomene noch nicht, welche Vorstellung sie mit dem verbinden sollen, was wir heute "elektrische Ladung" nennen. Am ehesten dachten sie noch an einen besonderen Stoff, der in den geladenen Dingen wie Wasser in einem Schwamm verteilt ist. Aber sicherlich betrachteten sie die elektrische Ladung auch schon als die Eigenschaft elektrisch geladener Dinge, auf andere elektrisch geladene Dinge mit einer abstoßenden oder anziehenden Kraft zu wirken. (Man beachte die auch heute noch übliche Verwendung ein und desselben Worts "elektrische Ladung" sowohl für eine Sache - nämlich für die in einem elektrisch geladenen Ding vorhandene Überschußmenge an Elektronen oder an Protonen - wie auch für die Eigenschaft der geladenen Dinge, auf andere geladene Dinge mit einer Kraft zu wirken.)

Wenn man zur Zeit Coulombs Ladungen auch noch nicht messen konnte, so war man doch in der Lage, diese zu halbieren und damit schrittweise auch zu vierteln und zu achteln, indem man eine elektrisch geladene Kugel (mit elektrisch leitender Oberfläche) mit einer völlig gleichartigen ungeladenen Kugel zur Berührung brachte, so daß sich die Ladung der ersten Kugel gleichmäßig auf beide Kugeln verteilte. (Daß das so war, konnte man daran erkennen, daß von beiden Kugeln nach deren Trennung gleiche Kraftwirkungen ausgehen.) Damit konnte untersucht werden, wie sich die (abstoßende) Kraft zwischen den beiden (gleichsinnig) geladenen Kugeln mit der Ladung der einen Kugel, mit der Ladung der zweiten Kugel und mit deren gegenseitigen Abstand ändert. Man fand, daß sich die Kraft (in heutiger Ausdrucksweise) proportional mit jeder der beiden Ladungen Q_1^* und Q_2^* und umgekehrt proportional mit der Zweimalpotenz der Distanzlänge $l(D)$ zwischen den Ladungsschwerpunkten ändert, formulierte diese Beziehung aber ohne Proportionalitätsfaktor.

$$(18.1) \quad F = Q_1^* Q_2^* / [l(D)]^2$$

Diese Gleichung, die keine Proportionalität formuliert, besagt, daß die Kraft der Quotient aus dem Produkt der Ladungen und der Zweimalpotenz der Distanzlänge ist.

Ich kann die Ladung Q^* , die sogenannte elektrostatische Ladung, nicht mit " Q " symbolisieren, da mit diesem Zeichen die elektrische Ladung Q des elektrodynamischen Vierersystems symbolisiert wird. Ich kann sie aber auch nicht mit " Q^+ " symbolisieren, da sie keine Urgröße ist und ich bis jetzt nur die Zeichen für Urgrößen mit einem Kreuzzeichen gekennzeichnet habe. - Im übrigen ist auch die Ladung des heutigen Vierer- beziehungsweise Siebenersystems keine Urgröße: Sie wird von der elektrischen Stromstärke I abgeleitet:

$$(18.2.) \quad Q = I \cdot t \quad (Q = \int I dt) .$$

Es sei auch erwähnt, daß das Hauptinteresse damals weniger der Ladung als solcher als vielmehr der Auffindung des sogenannten Abstandsgesetzes galt, also des Teilgesetzes, das besagt, daß sich die Kraft genau mit dem «Quadrat» des größer werdenden Abstandes verkleinert.

Die Gleichung 18.1 enthält keine Gesetzeskonstante und ist damit auch kein Naturgesetz. Sie ist auch tatsächlich eine Definitionsgleichung für die elektrostatische Ladung. Für $Q_1^* = Q_2^* = Q^*$ gilt die Gleichung:

$$(18.3) \quad Q^* = \sqrt{[I(D)]^2 \cdot F} = I(D) \cdot F^{1/2},$$

die erlaubt, statt Ladungen als solche zu messen, diese aus den meßbaren Größen "Länge" und "Kraft" zu berechnen. Die elektrostatische Ladung Q^* ist (als Produkt aus einer Länge und der Wurzel einer Kraft) keine elektrische, sondern eine rein mechanische Größe. Ihre Bezugsgröße - die sogenannte elektrostatische Ladungseinheit (1 esL) - ergibt sich - bei dem damals benutzten Zentimeter-Gramm-Sekunde-System der Einheiten - gemäß 18.3:

$$(18.4) \quad 1 \text{ esL} = 1 \text{ cm} \cdot (1 \text{ g} \cdot 1 \text{ cm} / \text{s}^2)^{1/2} = 1 \text{ cm}^{3/2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{g}^{1/2}.$$

Während die elektrostatische Ladung eine rein mechanische Größe ist, ist die Größe, die wir heute als "elektrische Ladung" bezeichnen, eine spezifisch elektrische Größe (des Vierersystems mit den Basisgrößen "Länge", "Dauer", "träge Masse" und "elektrische Stromstärke"). Als solche erlaubt sie Aussagen, die den Phänomenen weit besser gerecht werden als die mit Dreiergrößen formulierten Aussagen über elektrische Sachverhalte.

Da wir heute elektrische Ladungen - in Vielfachen der Bezugsgröße "1 Coulomb" (1 C) beziehungsweise "1 Ampere·Sekunde" (1 As = 1 C) messen können, brauchen wir nicht mehr die Gleichung 18.1 als Quasinaturgesetz zu benutzen, sondern können ein empirisch zu findendes (tatsächliches) Naturgesetz formulieren:

$$(18.5) \quad F = f \frac{Q_1 \cdot Q_2}{[I(D)]^2} = \frac{f^{1/2} \cdot Q_1 \cdot f^{1/2} \cdot Q_2}{[I(D)]^2}$$

f ist eine Gesetzeskonstante, die nicht gemessen wird, sondern sich bei der Auswertung der gemessenen Größen F , Q_1 , Q_2 und $I(D)$ ergibt. Dieses Gesetz besagt, daß sich die Kraft proportional mit den beiden Ladungen und umgekehrt proportional mit der Zweimalpotenz des Abstandes ändert. Die Konstante " f " kann nicht unterschlagen oder willkürlich «dimensionslos gleich 1 gesetzt» werden. Man kann sie - wie schon bekannt - nur mathematisch-formal zum Verschwinden bringen, indem man ihre Wurzel " $f^{1/2}$ " mit der Ladung Q des Vierersystems multipliziert:

$$(18.6) \quad f^{1/2} \cdot Q = Q^*,$$

und auf diese Weise die elektrostatische Ladung Q^* des Dreiersystems erhält. Mit dieser kann man die Gleichung 18.1 (ohne die Konstante " f ") formulieren. Diese Dreierladung ist also durch eine mathematische Operation aus der Viererladung zu gewinnen und damit in der Tat eine Ersatzgröße für die (erst später eingeführte) elektrische Ladung des Vierersystems.

Da man auch heute noch die 'Gleichung' " $3 \cdot 10^9 \text{ esL} = 1 \text{ C} (1 \text{ As})$ " lesen kann, ist darauf hinzuweisen, daß diese 'Gleichung' falsch ist. Da die beiden Ladungen Q^* und Q verschiedenar-

tige Größen sind, können sie sich nicht allein durch einen Zahlenfaktor unterscheiden. Die zutreffende Beziehung lautet gemäß 18.6:

$$(18.7) \quad 3 \cdot 10^9 \text{ esL} = f^{1/2} \cdot 1 \text{ C.}$$

Gegen das Arbeiten mit dem elektrostatischen Dreiersystem ist logisch wiederum nichts einzuwenden. Es wird - wie schon gesagt - auch heute noch von Theoretischen Physikern und Physikochemikern durchgeführt, da das Rechnen mit drei Basisgrößen einfacher ist als das Rechnen mit vier Basisgrößen, einer zusätzlichen Verknüpfungskonstanten und zusätzlichen Einheiten sui generis. Die beim Rechnen mit Dreiergrößen auftretenden semantischen Schwierigkeiten ließen es in den anderen Bereichen der Naturwissenschaft und der Technik aber doch geboten erscheinen, eine spezifisch elektrische Größe einzuführen und damit auf die zuvor (unbewußt) durchgeführte Ersetzung der elektrischen Ladung durch die mechanische Ersatzgröße "elektrostatische Ladung" zu verzichten.

Ich muß es mir versagen, auf die ebenso interessanten wie komplizierten, für die hier durchgeführte Untersuchung aber belanglosen Probleme einzugehen, die dadurch bedingt waren, daß drei verschiedene Dreiersysteme nebeneinander verwendet wurden. Wer Aufschluß über diese nur noch historisch interessanten Probleme sucht, findet eine differenzierte Darstellung bei J. Fischer /5/.

Ich bin auf diese paradox wirkende Entwicklung nicht zuletzt auch deshalb eingegangen, weil sie bewußt machen kann, daß sich unsere Schüler - wohl auch den Lehrern unbewußt - fast immer in der Situation befinden, in der sich Coulomb und seine Zeitgenossen hinsichtlich der elektrischen Ladung befanden. So wie das sogenannte Coulombsche Gesetz in seiner ursprünglichen Fassung kein Naturgesetz ist, sondern eine Definitionsgleichung, die erlaubt, die elektrische Ladung Q durch das rein mathematische Konstrukt "Länge mal Wurzel aus Kraft", also durch eine meß- und berechenbare Größe zu ersetzen, und damit ermöglicht, weitere Erkenntnisse zu gewinnen, so sind Gleichungen der Art " $A = l^2$ " oder „ $F = m_{tr} \cdot a_G$ “ Definitionsgleichungen, die erlauben, das Areal A^+ und die Kraft F^+ durch die Produkte "Länge hoch zwei, " l^2 " beziehungsweise "Masse mal Beschleunigung, " $m_{tr} \cdot a_G$ ", also wiederum durch vergleichsweise leicht meßbare Größen zu ersetzen. Auch diese Ersetzung erfolgt im Unterricht, ohne daß die eigentlich gemeinten Urgrößen hinreichend als diese Urgrößen in den Blick gebracht würden. Während man sich aber in der Elektrizitätslehre gezwungen sah, eine spezifisch elektrische Größe einzuführen und deren zuvor benutzte Ersatzgröße nachträglich zu eliminieren, bleiben wir im Falle von Größen wie Areal $^+$ und Kraft $^+$ (aus dem angegebenen und durchaus verständlichen Grund) bei den Ersatzgrößen stehen - aber (und das ist meiner Meinung nach nicht akzeptabel) ohne das den Schülern hinreichend bewußt zu machen.

Um keinen falschen Eindruck aufkommen zu lassen, sei erwähnt, daß wir auch heute weder die elektrische Ladung noch die heute als Basisgröße behandelte elektrische Stromstärke als Größen sui generis, das heißt: als die Eigenschaft "Ladung" beziehungsweise Stromstärke" messen. Die heute gültige Definition der Stromstärkeneinheit lautet: «1 Ampere ist die Stärke eines zeitlich unveränderlichen elektrischen Stromes, der, durch zwei im Vakuum parallel im Abstand von 1 Meter voneinander angeordnete, geradlinige, unendlich lange Leiter von vernachlässigbar kleinem, kreisförmigen Querschnitt fließend, zwischen diesen Leitern je 1 Meter Leiterlänge die Kraft $2 \cdot 10^{-7}$ Newton hervorrufen würde». Diese, dem Nichtfachmann geradezu schockierend erscheinende Definition der Einheit der Stromstärke läßt nicht einmal ahnen, was die elektrische Stromstärke als solche sein könnte, besagt aber, daß man Stromstärken mit Hilfe von gemessenen Kräften und Längen bestimmen könne. (Auch die gebräuchlichen Stromstärkemeßgeräte zeigen letztlich nur an, daß und wie weit ihre Zeiger durch Kräfte, die beim Elektrizitäts-

fluß auftreten, aus ihrer Null-Lage gedreht werden.) Das ändert aber nichts daran, daß wir die Stromstärke als eine Basisgröße behandeln. Genau genommen fassen wir zunächst sogar die elektrische Ladung als Basisgröße und die Stromstärke als abgeleitete Größe auf: Die Auffassung, daß die Ladung Q die 'ursprünglichere' Größe und die Stromstärke $I = dQ/dt$ von dieser abzuleiten sei, liegt uns erheblich näher als die Auffassung, daß die Stromstärke die 'ursprünglichere' Größe und die Ladung $Q = \int I dt$ von dieser abzuleiten sei. Deshalb behandelt man auch im Unterricht im allgemeinen zuerst die Ladung als Basisgröße und führt erst später - unter Hinweis auf die in der Wissenschaft wesentlichen meßtechnischen Gründe - die Stromstärke als Basisgröße ein.