

Was berechtigt uns, von einem elektrischen „Strom“ zu sprechen?

„Wenn wir die Natur wollen kennen lernen (nicht Träume darüber), so müssen wir mit dem sinnlichen Schein anfangen, und diesem so lange trauen, bis man uns das Gegenteil beweist.“

(G. CHR. LICHTENBERG¹)

Es gibt zwei Hauptzugänge zur Elektrizitätslehre. Der erste vom Katzenfell und Bernstein herkommend, also von der „Elektrostatik“, ist heute unbeliebt geworden. Er gilt als überholt, verspielt und „lebensfremd“. Man meint damit „alltagsfremd“, und das heißt ja zunehmend: „technik-fremd“. Offenbar ist der Blitz unserem „Leben“ fremd geworden. Dass das Fünkchen, das kaum hörbar zwischen Katzenfell und Bernstein knistert, und in dem Seidenhemd, das wir von der trockenen Haut abstreifen, dass dieser Funke „dasselbe“ ist wie Blitz und Donner, nur im Ausmaß von ihm verschieden, das hat FRANKLIN gezeigt, als er seinen Drachen in die Gewitterwolke steigen ließ und aus dem Drahtseil, das ihn hielt, unten einen Funken hervorlockte.

Der zweite Weg zur Elektrizitätslehre geht von der Steckdose aus und dem „Strom“ als Gegebenheiten unseres täglichen, zivilisierten Lebens. Es ist naheliegend, mit dem anzufangen, was die Kinder zu Hause umgibt; wählen wir hier einmal diesen Weg. Ein Blick in die Lehrbücher zeigt, dass man dabei fast immer sofort vom „Strom“ spricht, der „fließt“, und gleich danach etwas von „Elektronen“ erzählt. Diese Vorwegnahme wird von den sorgfältigeren Autoren nachträglich zu stützen versucht.

Das ist auch das Verfahren, das sogar im Unterricht der Gymnasien vorwiegt. Ich wüsste aber nicht, wodurch es ernstlich zu rechtfertigen wäre, außer in solchen Fällen, wo der Weg vom Phänomen zur Theorie in der Schule überhaupt nicht gangbar wäre, entweder weil die experimentellen Mittel nicht ausreichen oder weil die Kinder in ihrer Abstraktionskraft überfordert würden. Beides scheint mir hier nicht der Fall zu sein. Und das Argument, man komme nicht durch den „Stoff“ hindurch, den wir „durchnehmen“ müssten, wenn wir nicht, weil es „rationell“ sei, gleich von Elektronen redeten, dieses Argument verliert an Gewicht, wenn wir den Stoff radikal vermindern und von dem Verfahren des „exemplarischen Lehrens“ Gebrauch machen.

In den Lehrbüchern der Volksschule kommt es zu der nachträglichen Rechtfertigung fast nie. Vielleicht hält man die Begründung des Wortes „Strom“ nicht für nötig, vielleicht auch für zu schwierig? Das glaube ich bei des nicht und möchte durch die folgenden Hinweise dazu ermutigen, es einmal anders zu versuchen, sowohl in der Volksschule wie in der Mittelstufe der Gymnasien. Denn ein forschender Unterricht ist immer wirksamer und bildender als ein nur bestätigender (verifizierender).

Wir gleichen sonst jenen Zeitungen, die dem Leser schon in der Überschrift oder im ersten Absatz nahe legen, was er von den Hintergründen des Ereignisses zu halten habe, das ihm – wenn überhaupt – erst später selber vorgesetzt wird. – Wir handeln dann im Widerspruch zu dem, was wir immerfort beteuern: dass der naturwissenschaftliche Unterricht von den Erscheinungen und dem Experiment auszugehen habe, um daraus vorsichtige Schlüsse zu ziehen.

Der folgende Entwurf will nicht ein Stück Lehrbuch sein und kann auch nicht auf alle experimentellen Einzelheiten eingehen. Er ist auch kein Lehrgang, der gerade genau-

¹ Physikalische und mathematische Schriften. A.a.O. Bd. IV, S. 396

so nachgemacht werden möchte, wie er hier steht. Er versucht, ein Stück Elektrizitätslehre unter einem – merkwürdigerweise nicht üblichen – Gesichtspunkt zu ordnen und dadurch vielleicht Anregungen zu geben. –

Er möchte nicht dahin missverstanden werden, als könne der Lehrer *niemals* gezwungen sein, auch einmal Ergebnisse mitzuteilen. Ich meine aber, dass er es gerade bei diesem Problem (Strom?) besonders wenig nötig hat, weil die Dinge selber reden. Dass er dabei unterwegs noch genug Einzelnes *mitteilen* muss, wird deutlich werden. Wenn wir manches *Einzelne* berichten müssen, so ist das aber kein Grund, das *Ganze* einfach mitzuteilen. (Wenn ein Kind den Weg auf den Berg allein nicht ganz gehen kann, so ist schon etwas gewonnen, wenn es ihn in wichtigen Strecken bewältigt. Wir brauchen ihm nicht gleich einen Sessellift zu bauen.)

Auch soll nicht behauptet werden, man müsse *alle* Teile der Physik in solcher Gründlichkeit entwickeln. Aber man kann es einmal hier und einmal dort tun. Mir scheint, dass es hier besonders lohnend ist.

Die Erscheinung – das also was man unmittelbar sieht und spürt – zeigt nun zunächst nicht das mindeste von einer Strömung.

Schließen wir eine Nickel-Eisen-Akkumulatorenbatterie (die ja für kurze Zeit eine starke Belastung von 10 oder 20 Amp. verträgt) durch einen an Länge und Querschnitt geeignet gewählten Draht „kurz“, so beginnt dieser Draht zu glühen. Die Glut kommt aber nun nicht etwa von einer Seite her an gekrochen. Sie wird gleichzeitig auf der ganzen Länge des Drahtes bemerkbar. Lassen wir die Kinder ganz nahe herangehen an dieses so anziehende rotglühende Phänomen. Sagen wir gar nichts. Erst wenn sie dann nicht selber fragen, so fragen wir: Seht ihr was strömen? Nein, sie sehen nichts; beim besten Willen nicht. Sollen wir nun, oder müssen wir gar, den bequemen, aber nicht zum Denken erziehenden, sondern zum Nicht-Denken verführenden Notausgang wählen, ihnen, wie ein Märchen, zu erzählen: „Die Wissenschaftler haben herausgebracht, dass da kleine Teilchen, die sogenannten Elektronen, in dem Draht fließen“?

Warum wird dieser Weg so oft gewählt? Ich vermute, weil man es für zu schwierig und zu zeitraubend hält, das zu tun, was wir *sonst* für einzig richtig und redlich halten, nämlich: erst ansehen, dann nachdenken, und, Schritt für Schritt, Ordnung schaffen und sich so eine begründete Vorstellung zu machen, ein Bild, das man verteidigen kann. Ich möchte andeuten, wie etwa ein solcher Weg lauten könnte, und hoffe, davon zu überzeugen, dass es kein schwieriger Weg ist.

Eine Hilfe ist es, wenn man sich mit den Schülern dahin verabredet, sich des Wortes „Strom“ *zunächst* zu enthalten, um sich seiner Suggestion bei den Schlussfolgerungen zu entziehen. Man spricht dann also zunächst von dem „Etwas“, das hier in Erscheinung tritt. Bei dieser Verabredung ist es aber von vornherein allen klar und bekannt, dass die Untersuchung darauf hinausläuft, dem Etwas die Bezeichnung Strom zuzuerkennen. Es ist also nicht etwa ein Versteckspiel, kein „So-tun-als-ob“. Es soll nur der Vorsatz unterstützt werden, keinesfalls fahrlässige Schlüsse zu ziehen. Etwa angesichts des Versuches auf Seite 264 altklug zu meinen: „Das ist ja ganz klar, denn es ‚ist‘ ja ein Strom!“ Das ist weit entfernt von dem Satz: „Dieses Symptom spricht *auch* dafür, dass ‚Es‘ mit dem Gleichnis ‚Strom‘ nicht schlecht getroffen wäre“; oder: „Das Etwas zeigt auch hier ein Verhalten, das an ‚Strom‘ erinnert.“ Daraus folgt dann noch nicht, dass es einer „ist“, aber der Versuch „spricht dafür“, und neue Indizien müssen gesucht werden.

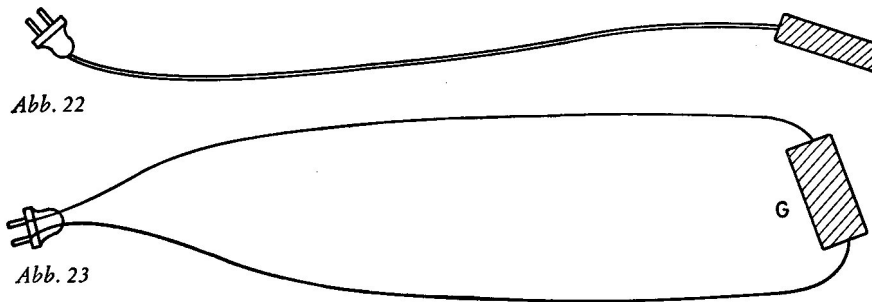
Ein solches Vorgehen bedeutet also nichts weiter als ein Bestehen auf dem induktiven Fortgang des naturwissenschaftlichen Suchens, auch da, wo der allgemeine Sprachgebrauch das Ergebnis uns schon vorsagt. („Vorsagen gilt nicht.“ – „Wir haben es gar nicht nötig, uns etwas erzählen zu lassen.“ – „Das ist ja das Schöne an der Physik.“ – „Leichtgläubig sind wir nicht.“)

Ich mache diesen Vorschlag deshalb, weil er sich in der Praxis des Unterrichts als ungemein förderlich erwiesen hat. Ein Spiel, von dem alle wissen, dass es mehr ist als ein Spiel, obwohl es ebensoviel Vergnügen macht.

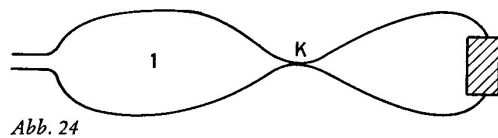
A. Einführende Versuche

Der nun folgende Entwurf beruht auf Unterrichtserfahrungen. Innerhalb des Dargelegten sind andere Reihenfolgen und andere Verzweigungen des Weges möglich. Worauf es mir vor allem dabei ankommt, ist die physikalische Seite der Frage: Lässt sich aus dem Phänomen etwas wie ein „Strom“ erschließen?

Jedes elektrische Gerät, das wir im Haushalt benutzen, sieht zunächst so aus, wie Abb. 22 andeutet. Wenn wir es aber aufdröseln, nimmt es die Form von Abb. 23 an:

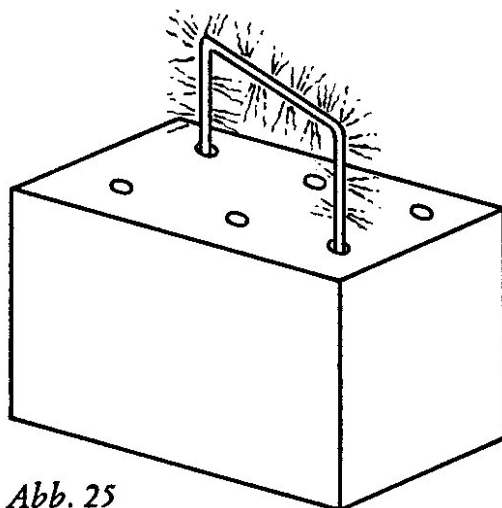


Es wird ein in sich geschlossener „Kreis“, der durch das Gerät G hindurchführt. Dieser Kreis wird gebildet von einem metallischen Draht, der von einer nicht-metallischen Hülle umgeben ist. Die Hülle, zeigt sich, ist zum Funktionieren nicht notwendig. – Sie ist aber nützlich, denn wenn sie fehlt und der Draht legt sich zufällig einmal



so, wie Abbild. 24 zeigt, so versagt das Gerät, und es geschieht nur in dem ersten „Kreis“ etwas, der sich durch Zufall gebildet hat, und besonders an der Berührungsstelle K: ein „Kurzschluss“. Das komplizierte Gerät ist „ausgeschaltet“.

Was im ersten Kreis geschieht ist einfacher, denn das undurchsichtige Gerät fehlt. Untersuchen wir deshalb gerade ihn, den verbotenen Kurzschluss, besonders. Das führt auf den schon beschriebenen Versuch: der Draht, der den



Nickel-Eisen-Akkumulator kurzschließt, glüht (Abb. 25). Aber auf der ganzen Linie zugleich. Wir betrachten dieses Phänomen. Wir suchen nach Anzeichen, dass „es“ sich mit einem Strom vergleichen lässt.

Nichts kommt angeströmt. „Es“ ist „da“.

Wenn es mit einer Strömung soll verglichen werden können – sagen wir: einem Menschenzug, der sich durch die Straßen einer Stadt windet, oder einer Wasserströmung in einem Bach oder Rohr –, dann dürfen wir uns also das hier jedenfalls nur so denken, dass das „Rohr“, die „Gasse“, schon *vor* Beginn des Strömens vollgestanden hat von dem wartenden Etwas, das dann, nach der „Einschaltung“ – das wäre der Anschluss

des losen Draht-

endes an den noch freien Pol – sich wie auf ein Kommando, einen Ruf, *überall zugleich* in Gang setzte. (Diese Vorstellung erweist sich bekanntlich als haltbar. Sie wird durch die Erscheinungen der elektrischen „Influenz“ gestützt: Jeder neutrale Körper ist von „der Elektrizität“ bereits besetzt, von nicht zuviel und nicht zuwenig.) – Jede Umfrage zeigt, dass sehr viele Erwachsene wie Schulkinder sich vorstellen, der „Strom“ komme beim Einschalten wie eine Reiterfront von einem der Pole her in die vorher leere Leitung hineingaloppiert.

Solche Überlegungen sind nur dann von Bedeutung, *wenn* „Es“ einem Strom ähnelt.

Wichtiges spricht bis jetzt aber auch *dagegen*: Wie soll das Strömende „im“ massiven Draht vorankommen (wie man doch sagt)? Vielleicht – so können Kinder argumentieren, und nicht schlecht (denn die *ruhende* Elektrizität sitzt ja *auch* auf der Oberfläche) – fließt er ja *auf* dem Draht? Sehen tut man zwar dort nichts. Auch kann man „es“ nicht abwischen. Ob es in der Oberfläche kriecht? Auf solche Fragen muss sich der Lehrer gefasst machen. (Und das entscheidende Argument für das Fließen *im* Draht kann er noch nicht bringen: die elektrische „Stromstärke“ (bei gleichbleibender „Spannung“) verdoppelt sich mit der Verdoppelung des *Querschnitts* des Drahtes und nicht mit der Verdoppelung seines Umfangs und damit seiner Oberfläche.)

Der Vorschlag ist nun sehr naheliegend, den glühenden Draht mit einer Zange an irgendeiner Stelle durchzutrennen. – Denn, müsste dann nicht, falls „Es“ stromhaft wäre, das Strömende aus dem einen Querschnitt herauslaufen wie bei einem aufgeschnittenen Wasserleitungsrohr?

Wir tun es: „Es“ hört auf der ganzen Linie gleichzeitig auf. Und nichts fließt heraus. Entweder' also ist der Vergleich mit einem Strom unpassend, oder das Fließende ist ein so besonderer „Saft“, dass es zwar im (oder am) Draht fließen kann, dass aber die Luft, obwohl so viel dünner und nachgiebiger, ihm wie ein Stöpsel den Weg versperrt.

Hier kann man den Lehrgang verzweigen: Es gibt einen schnellen, natürlichen Weg zum Strom: Funke – Gasentladung – Kathodenstrahlen. Er steht hier, als D, an dritter Stelle, denn er wird in der Volksschule vorläufig daran scheitern, dass die experimentellen Mittel fehlen. (Wenn die Volksschule den Anschluss an die moderne Technik wirklich erreichen will, wird sie ihn nicht scheuen dürfen. Und nicht nur um der Technik willen, wie man hier sehen wird.)

Der Lehrer der Volksschule wird also einstweilen nur mit Drähten, Lampen und Wasserleitungen experimentieren. Auch damit ist es möglich, den Eindruck, es fließe hier etwas, zwingend genug zu machen. Dieser Lehrgangsteil folgt hier, als B, zuerst.

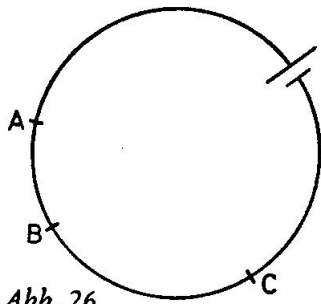
Man kann zur Not den Weg B (dann C) oder den Weg D allein wählen. Besser wird man beide gehen. Wer D zuerst nimmt, kann sich dadurch B und C erleichtern. B allein wird vorläufig das Normale sein.

B. Erscheinungen am Draht

Es wird den Kindern auffallen, dass der Draht nicht überall ganz gleich hell glüht und dass die hellsten Stellen die dünnen Stellen sind. Das ist ein wichtiges Indiz. Denn sie wissen vom Spielen an Bächen, dass an den engen Stellen die Strömung schneller wird, heftiger. („Geschwindigkeit“ und „Stromstärke“ werden noch nicht unterschieden. Davon später.)

Stellt man sich einen Draht her, der in der Mitte ein dünnes Stück trägt, während die Zuleitungen dicker sind, so kann man erreichen, dass er – kurzgeschlossen – auf der dünnen Strecke glüht, auf den anderen nur warm wird.

Von hier aus ist es nicht weit zu der Einsicht, dass eine Glühlampe „im Grunde“ nichts anderes ist als eine dünne Stelle des Drahtes.



Und es ist ein weiteres wichtiges Indiz für „Strom“, dass eine Glühlampe immer gleich hell glüht, an welcher Stelle – A oder B oder C – der Leitung sie auch eingefügt wird (Abb. 26). Sie glüht nicht etwa stärker in der Nähe desjenigen Poles, aus dem, wie man vielleicht meint, der Strom noch frisch und unverbraucht wie ein Sturzbach herauskommt.

Gehen wir zurück zu dem Kurzschluss- Versuch (Seite 260 und Abb. 25). Machen wir den verbindenden Draht kürzer, so nimmt seine Glut zu, wählen wir ihn länger (immer ohne Änderung des Materials, des Querschnitts und des Akkumulators), so

glüht er schwächer. (Man kann bei dieser Gelegenheit zeigen, dass er, wenn er sehr lang ist, überhaupt nicht mehr glüht, auch im Stockfinstern nicht, dass er aber noch warm wird. Die Wärmeentwicklung ist ein Kennzeichen dessen, das wir untersuchen.)

Auch dies erinnert an Strömungen, nicht bei Bächen, aber in geschlossenen Leitungen:

Ein Gartenschlauch, 10 m lang etwa, an die Wasserleitung angeschlossen, liegt auf der Wiese, und man sieht, wie viel Wasser am Ende immerfort herausfließt. Nun verlängern wir den Schlauch um ein gutes Stück (wir schrauben es an): dann fließt das Wasser bei gleichem Wasserdruck – am Ende viel spärlicher. Offenbar reibt es sich an den Wänden des Schlauches. (Auf die genauere Verfolgung dieser Reibung bis zur „inneren Reibung“ einzugehen, erscheint hier nicht nötig.)

Nachdem es nun schon recht verdächtig nach „Strom“ aussieht, wird es vernünftig sein, spätestens jetzt sich einmal eine *Wasserströmung* genauer zu betrachten, wenn es nicht schon vorher geschehen ist. (Mancher wird vorziehen, die Untersuchung einer Wasserströmung vorzuverlegen oder ganz an den Anfang zu setzen. Die beste Reihenfolge wäre wohl die, dass – etwa im Rahmen des gesamtunterrichtlichen Themas „Wasser“ – die Beobachtungen an Bächen und Wasserrohren abgeschlossen sind und eine Zeitlang zurückliegen, wenn mit der Elektrizitätslehre begonnen wird. Dann werden die Vorstellungen, die damals am Wasser begonnen worden sind, bereitstehen und ohne allzu aufdringliche Suggestion hier „einfallen“.) Dabei kommt es vor allem auf den Begriff „*Stromstärke*“ und seine Unterscheidung von der „Geschwindigkeit“ an. Stromstärke ist ein sehr lebensnaher Begriff, denn jeder fragt sich ja einmal, wie viel Wasser den Rhein hinabfließt; genauer: wie viel Wasser er etwa bei Mainz vorbeischafft, am Tag, in der Stunde, in der Sekunde? Offenbar ist gemeint, wie viel Kubikmeter unter der Rheinbrücke durchfließen, in jeder Sekunde. An einem Bach kann man die entsprechende Zahl ausrechnen, wenn man gemessen hat, was dazugehört (Querschnitt und Geschwindigkeit). Man wird das an breiten und an engen Stellen tun und bemerken, dass das Wasser um so schneller fließt, je enger das Bett ist. In *geschlossenen* Leitungen, wie Gartenschläuchen, die uns eigentlich interessieren (da auch der Draht nicht offen ist), muss sich das genau abstimmen: da das Wasser nicht ausweichen, sich nicht zusammendrücken und sich also vor den Engen nicht stauen kann, muss die „Stromstärke“ an *allen Stellen*, sei das Rohr dort weit oder eng, *die selbe* sein. Diese Einsicht ist wichtig. Sie geht schwer ein und kann gar nicht genug geklärt und betont werden. Wenn man will, kann man Modelle bauen, Rinnen, Kanäle, auch Windkanäle, Glasröhren. Aber es wird auch genügen, an den Bach zu denken und mit einem Gartenschlauch zu experimentieren. Die Stromstärke lässt sich an seinem offenen Ende unmittelbar messen. Wenn ein 20-Liter-Eimer in 4 Sekunden voll wird, so ist die Stromstärke „5 Liter je Sekunde“ (physikalisch

geschrieben: $\frac{20l}{4sec} = 5 \frac{l}{sec}$). Für diese Stromstärke ergibt sich nun folgendes:

1. Zunächst, wie schon gesagt: Eine Verlängerung des Schlauches setzt die Stromstärke überall herab. Wir dürfen sagen, der längere Schlauch biete dem Wasser einen größeren „Widerstand“.

2. Eine Verengung des Schlauches an irgend einer Stelle – man trete mit dem Fuß darauf, ohne die Passage ganz zu sperren – vergrößert die Geschwindigkeit an dieser Stelle und setzt zugleich die Stromstärke herab, und zwar notwendig überall (notwendig deshalb, weil [siehe oben] die Stromstärke an allen Stellen der Leitung dieselbe sein muss). Ein lokaler Eingriff beeinflusst also das Ganze.

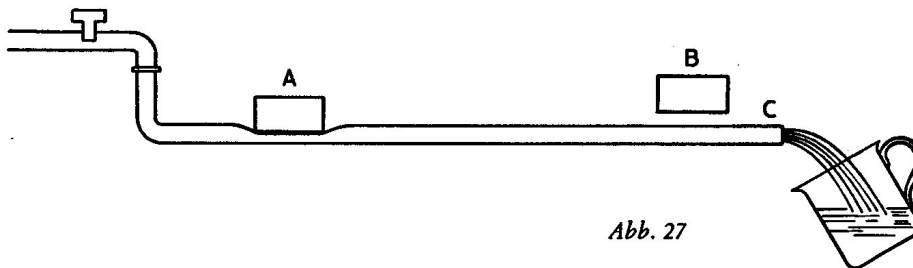
Wenn der Vergleich des elektrischen Phänomens, das wir untersuchen, mit einem Strom zutrifft, so müssen wir uns also vorstellen, dass in einer Glühlampe, als einer dünnen Stelle, einer „Stromschnelle“, die Stromstärke keine andere ist als an irgendeinem anderen Ort der Leitung. Die starke Erhitzung des Glühdrahtes ordnen wir dann dem schnelleren Strömen zu, und wir verstehen sie außerdem daraus, dass eine kleine Menge Metall (die des Glühdrahtes) leichter in Glut zu bringen ist als eine große (die der Zuleitung).

Weiter: Haben wir nun eine Lampe in Betrieb (eine Taschenlampenbirne etwa), angeschaltet an eine Taschenlampenbatterie, oder auch eine übliche Glühlampe an die Steckdose – ich würde auch keine Bedenken haben, stillschweigend Wechselstrom zu benutzen –, so glüht sie also. Nun schalten wir außer ihr eine zweite, genau solche Lampe an einer anderen Stelle desselben Leiters ein. Die Lampen sind also „hintereinander“ geschaltet, „in Serie“. Dann leuchten beide gleich hell, aber jede viel dunkler als vorher die eine. Dieser Tatbestand passt ausgezeichnet in das Bild eines Stromes: Die Leitung wird an einer zweiten Stelle verengt. Die Folge ist, dass die Stromstärke überall noch mehr absinkt.

Der Parallelversuch mit Wasser – vorher oder nachher auszuführen –: Der Gartenschlauch wird an einer Stelle (A) mit einem Backstein belastet und also dort eingeschnürt. Am Ende (C) wird die Stromstärke gemessen. (Sie hat nicht nur in C den gemessenen Wert, sondern an allen Stellen der Leitung.)

Nun wird außerdem an einer anderen Stelle (B) ein zweiter Backstein aufgelegt.

Folge: Die Drosselung nimmt noch mehr zu. Die Stromstärke, gemessen bei C, wird geringer, überall, auch bei A. (Was man nicht sieht, aber einsieht.)



Besonders aufschlussreich ist das, was man an einer verzweigten Leitung beobachten kann.

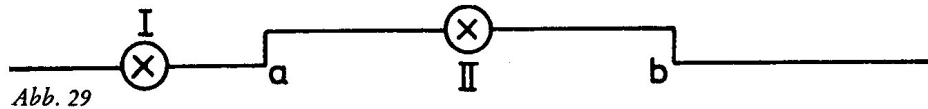
Man muss hier wohl ziemlich stark und vorsichtig führen. Etwa so:

1. Zwei gleichartige Lampen liegen (wie gerade besprochen) hintereinander. Sie brennen gleich hell.

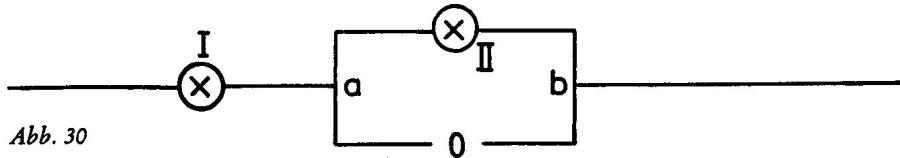


Abb. 28

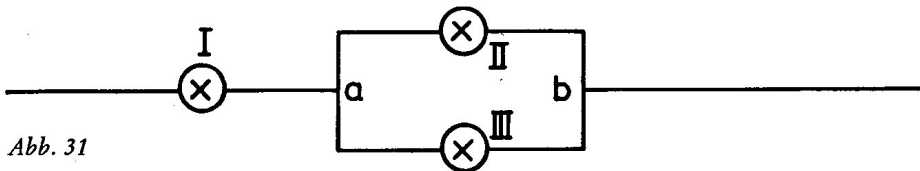
2. Zur Vorbereitung des Kommenden biegen wir den Leiter so, wie das Abb. 29 zeigt. Das ändert nichts.



3. Nun bauen wir eine Verzweigung an, die aber an der Stelle 0 vorläufig offen bleibt. Das ändert wieder nichts und passt: in einem blinden Flussarm fließt nichts.



4. Jetzt schrauben wir an der offenen Stelle 0 die Lampe III ein, wieder genauso eine, wie I und II sind. Aber ehe wir es tun, fragen wir uns: Was ist zu erwarten, wenn der Vergleich mit dem Strom richtig ist?



Hier kommen nun ohne Zweifel auch falsche (rückfällige) Antworten. Etwa: muss nun nicht der „Strom“ außer der Lampe I und II auch noch III „beliefern“! Er wird also in I absinken.

Die Wirklichkeit: I wird heller (!), II dunkler als es war, und III glüht genauso hell wie II.

Das letzte ist „aus Symmetriegründen“ allen einleuchtend. Der Strom hat sich „verteilt“. Deshalb wird auch verstanden, dass I heller als II (oder III) leuchtet („doppelt so hell“). Aber dass I heller wurde als zuvor, verblüfft:

Um diesen Punkt zu klären, genügt ein einziger Gedanke. Er wird leichter zu fassen sein, wenn man den letzten Versuch noch einmal rückwärts ablaufen lässt: III wieder *heraus*: I wird *dunkler* (!) und gleich II. Das ist, wenn ich nicht irre, leichter zu verstehen als der Versuch in der ersten Reihenfolge, weil es an vorher Besprochenes besser anschließt:

Wir erinnern uns, dass eine Verengung der (damals unverzweigten) Leitung an *irgendeiner* Stelle die Stromstärke *überall* drosselt. Was wir nun hier tun, indem wir III herausnehmen, *ist* eine solche Verengung der Leitung auf der Strecke a-b. Denn der zwischen a und b verfügbare Weg hat jetzt nur noch den halben Querschnitt. Es ist also nicht anders, als wenn ich – bei dem analog gedachten Wasserversuch – zwischen a und b den Backstein auflege. Die von I angezeigte Stromstärke muss also wirklich absinken. I wird dunkler.

Umgekehrt: Das Einschalten von III in den blinden Zweig bei 0 bedeutet eine Querschnittsverdoppelung (*mehr* Passage) zwischen a und b, also *Verkleinerung* des „Widerstandes“ zwischen a und b. Rückwirkung aufs *Ganze*: Die Gesamtstromstärke, angezeigt von I, *steigt*.

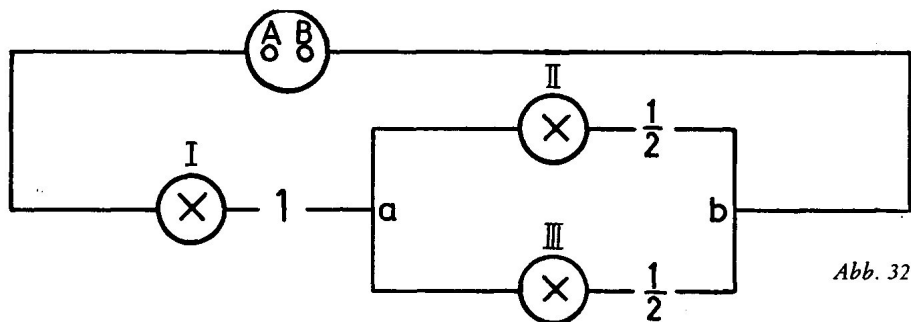
Damit ist die Hauptsache verstanden. Der Vergleich mit einem Strom hat sich weiter bewährt.

Kopfzerbrechen macht aber wohl immer noch das Verhalten von I. Etwa beim Herausnehmen von III. Es ist zwar jetzt klar, dass T dunkler werden muss und II ihr gleich. Aber warum wird II heller als sie war?

Bleiben wie sie war, kann sie natürlich nicht. Denn wenn sich an irgend einer Stelle des Stromnetzes ein Widerstand ändert, dann wird die Stromstärke an allen anderen Orten „be-ein-flusst“. Aber II könnte ja auch dunkler werden. Warum wird sie heller?

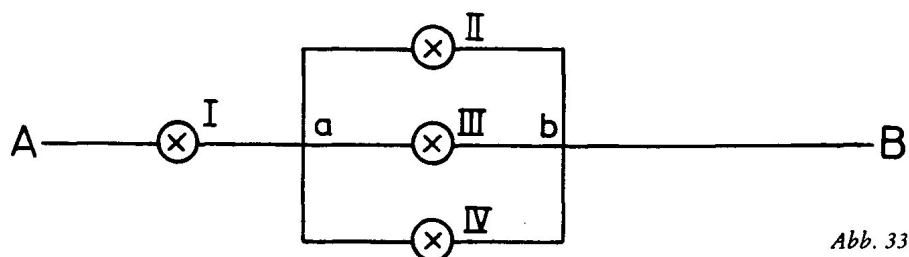
Man muss, um das einzusehen, den Blick jetzt nicht nur auf das verzweigte Adernetz zwischen a und b richten, sondern auf sein Verhältnis zum ganzen Netz zwischen A und B (Abb. 32), (was übrigens eine allgemeine Regel ist, wenn der Gedanke stockt: sieh das Ganze an!).

Vor dem Ausschalten von III entsprechen die Stromstärken – verhältnismäßig angegeben – etwa denen, die in die Abb. 32 eingetragen sind.



Nach dem Ausschalten gilt, wenn wir an Wasser denken, folgendes: Zwischen a und b wurde der Leitungsquerschnitt auf die Hälfte verengt. Deshalb sank ja die Gesamtstromstärke, die I anzeigt. Sie sinkt unter 1. Auf welchen Bruchteil? Kann man ihn abschätzen? Wäre die ganze Leitung (also nicht nur die Strecke [das Netzwerk] zwischen a und b, sondern die ganze Leitung zwischen A und B [und besonders also auch innerhalb von I!]) auf die Hälfte verengt worden, so wäre die Gesamtstromstärke auf einen gewissen Bruchteil gesunken (vermutlich nahe bei $\frac{1}{2}$ aber es kommt auf den genauen Wert nicht an). – Da die Verengung aber nur auf einer Teilstrecke (a b) stattfindet, wird sie weniger drosselnd wirken. Die Gesamtstromstärke muss demnach über diesem Bruchteil ($\frac{1}{2}$) liegen, bei 3/4 ?? vielleicht. Und diese Stärke müssen die Lampen I und II nun beide zeigen. Da II vorher $\frac{1}{2}$ zeigte, muss sie heller werden.

Es ist natürlich und nützlich, folgende Frage anzuschließen. (Die Schüler werden sie zweifellos aufwerfen, falls sie ins Nachdenken gekommen sind): Wenn wir nun noch eine dritte Lampe abzweigen? (Abb. 33.) – (Man werde nicht ungeduldig über rückfällige Vermutungen wie jene, die ich einmal eine Studentin aussprechen hörte: Die mittlere (III) werde heller als die beiden benachbarten (II und IV) leuchten. Hier kommt noch einmal das Vorbild des Sturzbaches zur Geltung, der geradeaus, in der Mitte, mehr Wucht entwickelt als seitlich, um die Ecken herum.)



Wie ist es? I muss *noch* heller werden und wird es auch.

Obwohl hier nichts Neues zu verstehen ist, ist man doch von neuem verblüfft. Denn man sieht voraus: Wenn ich 4, 5 und immer mehr Lampen in neue Zweige setze und I wird immer heller? Muss sie nicht schließlich durchbrennen? Nur langsam macht man sich klar, dass ja 1. die Zweiglampen, je mehr es sind, einzeln immer dunkler werden, 2. I ja nicht heller werden kann, als wenn sie *allein* im Stromkreis säße (wenn also das ganze Verzweigungsnetz herausgenommen und a unmittelbar an b angeschlossen würde, so dass zwischen a und b der Widerstand Null wäre) denn: je mehr Lampen das Verzweigungsnetz parallel enthält, desto geringer ist sein „Widerstand“, ohne je Null zu werden, es strebt einem „Grenzwert“ zu.

C. Erscheinungen in leitenden Lösungen

So sehr alle die Phänomene, die wir an Drähten und Lampen beobachten, dem Bild eines „Stromes“ sich einordnen: Es fehlt doch noch etwas, was einem Strom nicht fehlen darf: Anzeichen einer *Richtung*, in der das Strömen vor sich geht. Die beiden Pole dürfen einander in ihrem Verhalten nicht gleichen, da doch einer von ihnen der sein soll, aus dem das Strömende dauernd austritt, und der andere der, in den es immerfort einläuft. Bisher fanden wir keine solchen Anzeichen. Und dass am einen Pol des Akkumulators ein + gemalt ist und am anderen ein –, zwei verschiedene Zeichen, das ist es eben, was noch der Rechtfertigung bedarf. – Es bleibt vorläufig auch denkbar, das aus *beiden* Polen das Strömende immerfort austritt und im Draht zwei Ströme sich ständig durchdringen. (OERSTED sprach vom „elektrischen Konflikt“.)

Das erste auffällige Anzeichen für eine Verschiedenheit der Richtungen bieten die *elektrolytischen* Phänomene.

Der Weg zu ihnen kann so geführt werden, dass man einmal probiert, ob der Draht, in dem „Es“ stattfindet, unbedingt aus *festem* Metall sein muss. Ob es nicht auch ein Quecksilber-Faden tut? Man könnte nämlich vermuten, ein „Strom“ würde sich in einem „Leiter“, der flüssig ist, also selber strömen kann, eher bemerkbar machen. Nichts dergleichen. Der Quecksilber-Faden verhält sich genau wie ein Kupferdraht: Er strahlt Wärme aus, so lange er die Pole des Akkumulators verbindet.

Dagegen kommt etwas ganz Neuartiges zutage mit der Entdeckung der „Elektrolyse“: Während reines Wasser oder Öl, wenn man sie zwischen die Enden des Drahtes schaltet, das Phänomen blockieren, also „nicht leiten“ (wie auch die Luft), hindert Salzwasser das Phänomen nicht: Der Draht rechts und links wird warm und auch die Lösung selber: Die Erscheinung findet auch in ihr statt. Sie ist „*so gut wie*“ ein Draht. In der Sprache des Strom-Bildes: sie leitet.

Neu ist folgendes: sie wird chemisch zersetzt und ihre elementaren Bestandteile erscheinen an den verschiedenen Seiten. Worauf es uns hier ankommt, verlangt keine nähere Kenntnis der Elektrolyse, sondern nur eines Versuches, der davon überzeugt, dass in dieser leitenden Flüssigkeit tatsächlich eine zwar unsichtbare aber materielle Strömung stattfindet: Wenn man etwa in verdünnte Schwefelsäure einerseits einen Kupferstab, auf der anderen Seite einen Kohlestab eintaucht und diesen Kohlestab mit dem negativen Pol der Spannungsquelle verbindet, so scheidet sich allmählich an der Kohle Kupfer ab, während der Kupferstab schwindet². Das Kupfer kann nicht anders zur Kohle gekommen sein als durch die Flüssigkeit hindurch³. Da aber eine sichtbare Strömung, wie wir sie von Bächen kennen, nicht zu sehen ist, müssen wir uns ein Wandern unsichtbarer kleiner Partikel vorstellen. Nun ist es so: Dieses Wandern hört auf,

² 2 bis 3 %; 1,5 Volt; 0,2-Amp. – Taschenlampenbatterie oder Akkumulator. – Ich verdanke den Hinweis auf diesen Versuch Herrn Studienrat V. HILSDORF, Seeheim a. d. B.

³ Dass gleichzeitig ein zweiter materieller Transport in umgekehrter Richtung im Elektrolyten stattfindet, kann durch andere Beispiele gezeigt werden.

sobald der elektrische „Strom“ aufhört. Zum erstenmal ist damit also ein *gerichtetes* materielles *Strömen* zu beobachten, das den Vorgang *begleitet*, den man elektrischen Strom nennt.

Was hier wandert, das ist nun freilich *Materie*: Kupfer. Materie-Teilchen können aber nicht genau das sein, was wir im *Draht* fließend denken. Sie könnten nicht durch massives Kupfer oder Aluminium hindurch. Man kann nur sagen, dass da, wo die Flüssigkeit anfängt, eine Art materieller Fährdienst einsetzt, der die Fortführung des im Metall stattfindenden stromähnlichen Vorgangs besorgen muss.

Die elektrolytischen Phänomene zeigen also noch nicht, was *das* ist, das *im Draht* strömt. Aber sie deuten mehr als alles vorher Erwähnte auf „Strom“ hin; denn 1. die beiden Pole zeigen Verschiedenartigkeit und 2. in den Elektrolyten geschieht jedenfalls ein – allerdings materielles – Strömen.

D. Die Erscheinungen im luftverdünnten Raum

Das Etwas, das wir uns im Draht fließend vorstellen – schon *jetzt* fast vorstellen *müssen* –, nennen wir „die Elektrizität“, womit nichts erkannt, sondern nur etwas benannt ist (siehe auch [S. 51](#)). Wir dürfen es uns wie eine Art Flüssigkeit vorstellen, ein „Fluidum“, wie man früher sagte. (Es sich körnig zu denken, aus „kleinsten Teilchen“ [Elektronen] bestehend, dafür haben wir bis jetzt keinen Hinweis.) Auch über die Richtung seines Fließens sagen uns die bisher betrachteten Vorgänge nichts.

Man kommt weiter, wenn man versucht, die „Elektrizität“ aus dem Draht ins freie zu locken. Wir erinnern uns, dass wir den glühenden Draht mit der Zange durchschnitten, und leider kam die Elektrizität nicht über die Lücke geschossen. Es ist nicht so leicht, sie über den Abgrund springen zu lassen.

Wenn wir nun aber die Drahtenden erst wieder zusammenfügen – das Phänomen setzt wieder ein, der Draht wird wieder warm – und dann wieder langsam voneinander entfernen, so zeigt sich ein winziges Fünkchen zwischen ihnen, in der Luft. Ist das vielleicht der – wenn auch nur kurz andauernde – Durchbruch?

(Ich hätte übrigens keine Bedenken, diesen kleinen Funken fortschreitend zu ersetzen, durch immer größere, längere, glänzendere: erst solche, die man aus dem geriebenen Kamm „zieht“, dann: Funken eines Kondensators, dann: einer Elektrisiermaschine, dann: eines Bandgenerators, eines Induktors. Und zwar *ohne* diese Apparate zu „erklären“. Zu sagen also: Ihr seht hier bessere, vergrößerte Funken. *Wie* man sie macht, braucht uns jetzt nicht zu interessieren. Ich versichere euch: sie sind alle von derselben Art, und so sehen sie ja auch aus.)

Man wird sich den Funken nun genau ansehen (mit der Lupe; im Dunkeln, wenn er klein ist). Auf so etwas „spitzen“ die kleinen Buben schon gleich, wenn sie einen Funken aufs Korn nehmen. Sie wollen sehen, wie er „überspringt“, von hier nach dort oder von dort nach hier? Dabei bilden sie sich manchmal ganz fest etwas ein und sind dann recht verlegen darüber, dass der eine diese, der andere ebenso sicher die umgekehrte Richtung gesehen zu haben glaubt. Man kann dem Funken aber so leicht nicht auf die Sprünge kommen. Er hat (für diese Beobachtungsmittel) keine Richtung. Er steht plötzlich da und nur für eine ganz kurze Zeit.

Vielleicht erstickt ihn die Luft so schnell? So kann man auf den Gedanken führen, die Luft wegzuschaffen. – Man kann diese Untersuchung allmählich führen, man kann auch kurzen Prozess machen.

Zunächst folge ein Hinweis auf die *allmähliche* Führung. Sie könnte bei den „LICHTENBERG'schen Staubfiguren“⁴ beginnen, bei denen die Pole bereits eine Verschiedenheit zeigen, und dann die farbenprächtigen Entladungen im fortschreitend verdünnten Gasraum vorführen, wie sie heute in den Neon-Lampen alltäglich werden. Sie sind gerade für die 13- bis 15-jährigen und besonders für die Mädchen anlockend. Sie werden aber, wenigstens für die Volksschule, kaum in Betracht kommen, falls man – was das schönste ist – das Rohr allmählich selber auspumpen will; denn die Pumpe ist teuer. Billiger ist ein Satz fertig evakuierter Röhren von zunehmender Verdünnung. Ein Funkeninduktor ist in jedem Falle nötig.

Durch ein solches gasgefülltes Rohr von vielleicht einem halben Meter Länge – das ist die, nun recht große, „Lücke“ – wird „Es“ bei Normaldruck völlig blockiert (es geht gar kein „Strom hindurch“). Bei zunehmender Evakuierung erscheint ein fahl zuckender Blitz, ähnlich noch dem der Gewitter; er geht über in ein rötliches, biegsames, weich leuchtendes Farbband und zerfällt dann in Schichten (einer Geldrolle ähnlich). Die Farben sind abhängig vom Gas: Luft leuchtet anders als Neon. Hier zeigt sich nun deutlicher noch als bei den LICHTENBERG'schen Figuren, eine Verschiedenheit im Aussehen der Pole, das erste Anzeichen von „Richtung“.

Die Richtung wird *eindeutig* die einer „Strömung“, wenn das Gas nicht ganz, aber fast ganz, draußen ist. Und der *abgekürzte* Lehrgang wäre der, dass man hiermit einfach *begänne*: Der Funke im hohen Vakuum, gefangen in der Flasche, dem fertig gekauften „Kathodenstrahl“-Rohr. Dann stellt sich nämlich immer dasselbe Endbild her, gleichgültig welches Gas noch in Spuren den Innenraum des Rohres bevölkert: Immer genau gegenüber von demselben Pol, der „Kathode“ (das ist jetzt nur ein Name; zu verstehen ist daran nichts) ein grünes Fluoreszieren der Gaswand. Ein Aluminium-Hindernis, von jeher in Gestalt eines „eisernen Kreuzes“ geformt, wirft einen unverkennbaren Schatten.

Damit ist eine von der Kathode ausgehende, an sich selber unsichtbare, Strahlung außer Zweifel, die – im Gegensatz zu den im vorigen Absatz beschriebenen Vorstadien – ohne die Lage der „Anode“ noch zu spüren, „stur“ geradeaus gegen die Wand rennt. Ihre Ablenkbarkeit durch den Magneten (und – umständlicher und teurer zu zeigen – durch das elektrische Feld eines Kondensators) weist sie aus als einen Strom der sogenannten „negativen“ Elektrizität. (Damit entscheidet sich zugleich die Frage, ob es ein oder zwei elektrische „Fluida“ gibt, und welches das eigentliche ist.) Die Schüler werden fragen, wie denn dies Fliegende zur Anode komme, wenn es an ihr vorbeischießt. Und das müsse es doch, wenn es der ins Freie gelockte Teil-Lauf eines sonst im Draht strömenden Flusses sein solle. Man wird mitteilen, dass „die Elektrizität“ an der Glaswand zur Anode weiterkriechend gedacht werden müsse, und darf wohl verschweigen, dass außerdem noch ein zweiseitiger Ionenverkehr stattfindet.

Die Ablenkung beweist noch etwas anderes, dass nämlich das Dahin-Fliegende nicht ohne Trägheit, nicht also etwas Lichtartiges, sondern „Materie“ ist.

Da aber Elektrizität, auf einer üblichen feinen Waage gewogen, nichts Merkliches wiegt (ein elektrisch geladener Körper ist nicht erkennbar schwerer oder leichter als ungeladen) und sich *im* massiven Metall bewegen kann, so scheint es eine *sehr feine* Materie zu sein, keine „gewöhnliche“. Da sie andererseits mit so erheblicher Sturheit (Wucht) durch das Rohr schießt und sich der Ablenkung sichtlich widersetzt, so kann man vermuten, dass sie recht *schnell* aus der Kathode herausschießt (womit aber über *die* Geschwindigkeit, die sie *vorher*, im Draht, hatte, nichts gesagt ist).

All das sind keine ausreichenden wissenschaftlichen „Schlüsse“, und sie dürfen nicht dafür ausgegeben werden. Es sind Hinweise. Hier *darf* der Lehrer sagen: die Wissenschaftler haben diese Hinweise verfolgt und die Vermutungen, die auch wir hier haben konnten, bestätigt.

⁴ G. CHR. LICHTENBERG, Über eine neue Methode, die Natur und die Bewegung der elektrischen Materie zu erforschen (1777/78). OSTWALD'S Klassiker, Bd. 246, Leipzig 1956. { 556 }

Aber welche Materie haben wir vor uns? Die Untersuchung übersteigt die Mittel der Schule, muss also mitgeteilt werden: Diese Materie kann weder von dem Gasrest herrühren (denn die Natur des Gases hat keinerlei Einfluss auf alles, was man mit den Kathodenstrahlen machen kann), noch von dem Kathodenmaterial. (Die Kathode nützt sich nicht ab, und drüben an der Glaswand gegenüber gibt es keinen Niederschlag.) Wir haben es also tatsächlich mit einem ganz besonderen „Saft“ (so nennen die Rundfunktechniker den Strom) zu tun. Es ist die Elektrizität selber, die zwar unsichtbar, aber doch sichtlich, aus der Kathode herausgeschossen kommt, wie das Wasser aus dem Mundstück des Schlauches. So ist sie also höchstwahrscheinlich auch im Draht fließend zu denken.

Damit ist an dem Strom nicht mehr zu zweifeln.

Auch jetzt noch deutet nichts an den Kathodenstrahlen darauf hin, dass sie eine körnige Struktur haben und aus „kleinsten Elektrizitäts-Teilchen“, den „Elektronen“, bestehen. Wir haben also keinen Grund und auch keine Erleichterung davon, hier von ihnen zu erzählen. Kommt es doch zur Sprache, etwa weil die Kinder davon reden gehört haben, so müssen wir betonen, dass wir von den Elektronen aus ganz anderen Experimenten wissen (Elektrolyse, MILLIKAN-Versuch) und dass wir nur annehmen, dass sie bei allen Gelegenheiten zu denken sind, bei denen Elektrizität auftritt, so auch hier.

Ein Versuch sollte noch – als überwältigende Bestätigung der „Strom“ – Vorstellung – in diesem Zusammenhang den Schülern erzählt werden, ich meine sogar in der Volksschule. Wirklich machen können wir ihn bisher in der Schule nicht. (Eine „qualitative“ Form wäre ausreichend und ein dringender Wunsch an die Lehrmittelindustrie.) Einstweilen ist dieses Experiment unbezahlbar teuer. Dafür ist er grundsätzlich so einfach, dass er berichtet werden kann: der „ROWLAND-Versuch“.

Er allein würde genügen, uns die Gewissheit zu geben, dass in dem Draht, der zwischen die Pole des Akkumulators eingespannt – warm wird, Elektrizität sich, *bewegt*. Er könnte unser ganzes Kapitel ersetzen!

Es wird bei ihm die – in diesem Kapitel bisher nicht erwähnte – allbekannte, wichtige und höchst merkwürdige Tatsache benutzt, dass der Draht, in dem „Es“ stattfindet, nicht nur warm wird, sondern *noch* etwas ausrichtet, allerdings draußen, in seiner Umgebung: Magnete, Magnetnadeln, die sich etwa dort aufhalten und beweglich sind, veranlasst er, sich quer zum Draht zu stellen. Das ist der bekannte OERSTEDSche Grundversuch zum Elektromagnetismus. (Er gelingt in der Umgebung auch der Elektrolyte.)

Wenn nun das, was im Draht (oder im Elektrolyten) vor sich geht, ein Strom ist, und zwar ein Strom von Elektrizität, so müsste die Magnetnadel *auch dann* wegschwenken, wenn wirklich und sichtlich ein elektrisch geladener Körper *mitsamt* seiner Ladung an einer Magnetnadel vorbeiflüge, wenn also – um eine groteske Übertreibung zu gebrauchen – ein Füllfederhalter aus Hartgummi ein wenig mit Wolle gerieben, also „elektrisch“ gemacht und dann über die Nadel hinweggeschleudert würde. Dieser Schuss wäre dann auch ein Strom, ein kurzer, so wie ein „Schuss Wasser“ als ein kleiner, kurz dauernder Strom verstanden werden kann. – Nur muss man das etwas heftiger und dauernder machen, wenn es sichtlich wirken soll. Das geschieht grundsätzlich so ⁵, dass man eine isolierende kreisrunde Platte (ähnlich einer Grammophonplatte) stark elektrisch macht, sehr schnell um ihre – sagen wir waagerechte – Achse rotieren lässt und eine empfindliche Magnetnadel unter ihren tiefsten Punkt stellt. Dann benimmt sich die Nadel genauso, wie wenn statt der Platte ein kreisförmiger Draht über ihr hinge, in dem das stattfindet, was wir in diesem Kapitel untersuchten. Wir dürfen es also mit bestem Gewissen „Strom“ nennen.

⁵ Die Form, in der das Experiment tatsächlich ausgeführt werden muss, um einen deutlich sichtbaren und auch messbaren Erfolg zu haben, kann man z. B. nachlesen bei R. W. POHL, Elektrizitätslehre. 16. Aufl., Berlin 1957, S. 61.