

Badische Landesbibliothek Karlsruhe

Digitale Sammlung der Badischen Landesbibliothek Karlsruhe

Gesammelte Werke

Schriften vermischten Inhalts

Hertz, Heinrich

Vaduz/Liechtenstein, 1987

4. Obere Grenze für die kinetische Energie der bewegten Elektrizität

[urn:nbn:de:bsz:31-269592](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-269592)

4. Obere Grenze für die kinetische Energie der bewegten Elektrizität.

Aus WIEDEMANN'S Annalen der Physik und Chemie, Bd. 14, S. 581—590, 1881.

In einer früheren Arbeit¹⁾ habe ich aus Versuchen über die Intensität von Extrastömen die Folgerung ziehen können, daß die kinetische Energie der elektrischen Strömung von der magnetischen Dichte I in einem kupfernen Leiter kleiner sei als $0,008 \text{ mg mm}^2/\text{sec}^2$. Diese Folgerung konnte indessen nur unter der Voraussetzung gezogen werden, daß eine gewisse Beziehung zwischen dem spezifischen Widerstande der Metalle und der Dichte der Elektrizität in ihnen nicht bestehe. In der vorliegenden Arbeit will ich einen Versuch beschreiben, den ich gleichfalls in der Absicht, eine kinetische Energie der Strömung nachzuweisen, und gleichfalls mit negativem Resultate angestellt habe, welcher aber vor den früheren Versuchen die Vorteile bietet, erstens direkter zu sein, zweitens einen kleineren Wert für die obere Grenze zu liefern, und drittens, diesen Wert ohne weitere Beschränkung zu ergeben.

Es sei eine dünne Metallplatte von der in Fig. 17 dargestellten Form zwischen den Elektroden A und B durchflossen von einem Strome von möglichst großer Dichtigkeit, es seien ferner die Punkte C und D mit einem feinen Galvanometer verbunden und das System so reguliert, daß kein Strom das Galvanometer durchfließt. Wird nun die Platte um eine durch ihren Mittelpunkt gehende, zu ihrer Ebene senkrechte Axe in Rotation versetzt, so muß, falls sich die Elektrizität mit träger Masse bewegt, die Strömung von der

¹⁾ [Siche No. 1, S. 1.]

Richtung AB seitlich abzuweichen bestrebt sein, aus derselben mechanischen Ursache, welche auf der rotierenden Erde die Passatwinde von der Richtung des Meridians abweichen läßt. Die Folge dieses Bestrebens ist eine Potentialdifferenz zwischen den Punkten C und D oder ein Strom im Galvanometer. Dieser Strom muß seine Richtung ändern mit der Richtung der Drehung; ist diese Richtung die des Uhrzeigers und geht gleichzeitig der Strom in der Platte von A nach B , so muß er die Galvanometerleitung außerhalb der Platte von D nach C durchfließen, wie es die Pfeile andeuten.

Qualitativ muß die genannte Wirkung eintreten, welches auch die Natur des galvanischen Stromes ist, vorausgesetzt nur, daß mit demselben eine solche Bewegung träger Masse verbunden ist, welche mit der Richtung des Stromes ihre eigene Richtung ändert. Die Schwierigkeit des Versuches besteht in der Herstellung von vier hinreichend sicheren und ruhigen Zuleitungen bei schneller Rotation; diese Schwierigkeit habe ich so weit überwunden, daß gleichzeitig eins der feinsten Galvanometer, eine Geschwindigkeit von 30 Umdrehungen in der Sekunde und eine Potentialdifferenz von 1 Daniell zwischen A und B benutzt werden konnte. Dabei war eine Ablenkung der Nadel, welche einer trägen Masse entsprechen würde, nicht nachzuweisen; lege ich die WEBER'sche Anschauung zu Grunde, so kann ich mittels der unten angegebenen Betrachtung aus meinen Versuchen die Folgerung ziehen, daß die kinetische Energie μ einer Strömung von der magnetischen Dichte I in einem Kubikmillimeter eines silbernen Leiters die Größe von $0,00002 \text{ mg mm}^2/\text{sec}^2$ nicht wesentlich überschreiten kann.

In Bezug auf die Ausführung des Versuches ist das Folgende zu erwähnen. Als Metallplatte wählte ich die Belegung einer nach dem LIENIG'schen Verfahren versilberten Glasplatte, die Form derselben ist in Fig. 17 dargestellt, die Entfernung AB betrug etwa 45 mm, die Entfernung CD 25 mm. Die Zuleitungsdrähte waren zunächst an Platinplättchen angelötet, diese wurden mittels kleiner Schrauben, die das Glas durchsetzten, gegen die Belegung angepresst; um eine gleichmäßigere Berührung zu erzielen, war zwischen die Belegung und die Plättchen eine Schicht Goldschaum gebracht. Der elektrische Widerstand war anfangs gleich 5,4 S.-E. in der Richtung AB

und gleich 3,5 S.-E. in der Richtung CD , aus unbekanntenen Gründen nahmen diese Widerstände mit der Zeit ab und wurden nach einigen Wochen resp. gleich 4,8 S.-E. und 3,1 S.-E. gefunden. Aus dem Verhältnisse dieser Widerstände und aus besonderen Versuchen war zu erschen, daß der Übergangswiderstand an den Zuleitungen keinen wesentlichen Teil des gesamten Widerstandes bildete. Die Regulierung des Systemes zu dem Zwecke, die Nadel auf Null zu bringen, geschah zunächst durch Abschaben des Silbers an einzelnen Stellen des Randes; da indessen eine dauernde Abgleichung von hinreichender Schärfe aus verschiedenen Ursachen unmöglich war, so schaltete ich zwischen A und C und zwischen C und B Zweigleitungen von einigen Hundert S.-E. Widerstand ein, durch deren Abgleichung die Nadel jederzeit, soweit es überhaupt wünschenswert schien, auf Null zurückgeführt werden konnte.

Um eine geschwinde Rotation der Glasplatte zu ermöglichen, war dieselbe auf einer Messingscheibe befestigt, die belegte Fläche war der Scheibe zugekehrt und nur durch eine möglichst dünne Luftschicht von derselben getrennt. Die Scheibe ihrerseits bildete das eine Ende einer horizontalen stählernen Axe, die in zwei Lagern so befestigt war, daß ihre beiden Enden zugänglich blieben. Die Zuleitung zum Galvanometer fand unmittelbar an der Glasplatte statt, die Zuleitung zur stromgebenden Kette am anderen Ende der Axe, die Leitungen von hier bis zu den Punkten A und B waren gebildet durch die Axe selbst und durch einen in einer Durchbohrung der Axe liegenden Draht. Die Vorrichtung, durch welche auf jedem Ende der letzte Übergang von den bewegten zu den ruhenden Teilen vermittelt wurde, ist in Fig. 18 dargestellt. Durch ein genau centriertes Stück einer sehr dünn ausgezogenen Glasröhre ist ein feiner Platindraht geführt, ein zweiter Platindraht ist um die Glasröhre herumgeschlungen, die Röhre mit den Drähten durchsetzt ein Quecksilbergefäß und mündet in einen zweiten derart, daß in dem Quecksilber des letzteren der erstgenannte und im Queck-

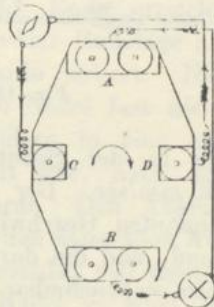


Fig. 17.

silber des ersteren der letztgenannte Draht rotiert. Das Glasröhrchen war mittels Siegellackes auf der einen Seite der Axe gegen die Glasplatte, auf der anderen an der Axe selbst befestigt. Da der Durchmesser der Windungen des

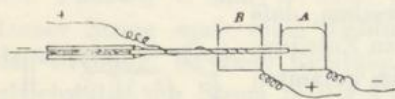


Fig. 18.

Drahtes *B* nur ungefähr $\frac{1}{2}$ mm betrug, so bewegte sich das Platin gegen das umgebende Quecksilber auch bei einer Rotationsgeschwindigkeit von 100 Umdrehungen

in der Sekunde nur mit einer Geschwindigkeit von 160 mm/sec. Der Erfolg war ein guter, denn auch bei der genannten Geschwindigkeit zeigte sich kein Übergangswiderstand, und die durch Erwärmung erzeugten Störungen waren eben wahrnehmbar und klein gegen andere unvermeidliche. Die Rotation wurde der Axe mitgeteilt durch einen Schnurlauf, welcher sie mit der schnellsten Axe eines BECQUEREL'schen Phosphoroskopes verband, sodafs sie doppelt so schnell als jene lief. Die Kurbel des Phosphoroskopes wurde mit der Hand gedreht, einer Umdrehung derselben entsprachen 290 Umdrehungen der Axe. Da die ganze Vorrichtung so leicht als möglich gebaut war, konnten auch grofse Geschwindigkeiten schnell erzeugt und wieder aufgehoben werden. Das angewandte Galvanometer war ein SIEMENS'sches mit einem astatischen Systeme von zwei Glockenmagneten und vier Rollen von zusammen ca. 7 S.-E. Widerstand. Die Astatic konnte durch äufserer Magnete beliebig weit getrieben werden, bei den definitiven Versuchen war die Empfindlichkeit eine solche, dafs einer Potentialdifferenz von ein Milliontel Daniell an den Punkten *D* und *C* ein Ausschlag von 32 Skalenteilen entsprach. Dabei war die Bewegung der Nadel aperiodisch, eine neue Ruhelage nahm dieselbe nach etwa 8 Sekunden mit einer für die vorliegenden Versuche hinreichenden Genauigkeit an. Der Strom wurde geliefert durch ein DANIELL'sches Element und mittels einer gewöhnlichen Tangentenbussole gemessen. In die Leitung zum Galvanometer und zur Kette war je ein Kommutator eingeschaltet.

Nachdem der Strom so lange durch die Platte geleitet war, dafs eine weitere Erwärmung derselben nicht stattfand,

wurde mittels der äußeren Widerstände zwischen *A*, *C* und *B* die Nadel des Galvanometers nahezu in ihre natürliche Ruhelage gebracht. Es wurde sodann der Kurbel des Phosphoroskopes eine möglichst gleichmäßige einmalige Umdrehung erteilt, die im Durchschnitte 8—9 Sekunden erforderte und durch eine automatische Arretierung ihr Ende erreichte. Dabei wich die Nadel im allgemeinen von der Ruhelage aus, ihre Stellung zu Ende der Rotation wurde notiert. Nach Aufhören der Rotation ging indessen die Nadel fast nie in die ursprüngliche Ruhelage zurück, sondern in eine neue Ruhelage über, die, sobald sie erreicht war, nach etwa 6—8 Sekunden, gleichfalls abgelesen wurde. Den Abstand derselben von der ursprünglichen will ich den dauernden Ausschlag nennen; unter augenblicklichem Ausschlag soll verstanden sein der Abstand der Stellung der Nadel zu Ende der Rotation vom Mittel zwischen der ursprünglichen und der schließlichen Ruhelage. Den augenblicklichen Ausschlag wollen wir ansehen als Maß desjenigen Stromes, dessen Ursachen nur während der Rotation wirken, wie z. B. der Einfluß träger Masse; während der dauernde Ausschlag den nach Beendigung der Rotation noch andauernden Störungen zugeschrieben werde. Anspruch auf Genauigkeit hätte diese Rechnungsweise nur dann, wenn die Rotation eine gleichförmige und der dauernde Ausschlag klein wäre, was beides in den Versuchen nicht zutraf, indessen waren die Störungen zu mannigfaltig und die Ausschläge zu unregelmäßig, als daß eine nähere Diskussion möglich gewesen wäre.

Schon die ersten Versuche zeigten nun, daß ein Einfluß träger Masse, welcher die unvermeidlichen Störungen bedeutend überwöge, jedenfalls nicht vorhanden war. Um einen solchen dennoch nachzuweisen, resp. einen möglichst kleinen Wert der oberen Grenze zu finden, stellte ich immer einen Satz von acht Beobachtungen zusammen, bei welchen die Richtung der Drehung von Beobachtung zu Beobachtung, die Richtung der Leitung zum Galvanometer von je zwei zu zwei Beobachtungen, endlich die Richtung des Stromes in der Platte von den vier ersten gegen die letzten Beobachtungen abwechselte. Ein solches System von acht Beobachtungen will ich einen Versuch nennen. Durch passende Kombination der Beobachtungen

liefs sich nun für jeden Versuch die mittlere Wirkung der einzelnen störenden Ursachen berechnen. Es mußte sich nämlich in den Ausschlägen vorfinden und aus denselben eliminieren lassen:

1) ein Teil, welcher sein Vorzeichen ändert nur mit der Umschaltung der Leitung zum Galvanometer, nicht mit der Richtung der Drehung oder der Leitung zur Kette. Derselbe konnte seinen Ursprung nur in einer durch die schnelle Rotation erzeugten elektromotorischen Kraft in der Kontaktstelle zur Galvanometerleitung haben. Insofern diese Kraft eine thermoelektrische war, mußte der entsprechende Ausschlag ein dauernder sein.

2) ein Teil, dessen Zeichen abhing von der Richtung der Leitung zum Galvanometer und zur Kette, hingegen nicht von der Richtung der Drehung. Derselbe konnte verschiedene Ursachen haben:

a) die Spannung der Platte infolge der beträchtlichen Centrifugalkraft, die Wirkung kann nur im augenblicklichen Ausschlage erscheinen;

b) eine gleichmäßige Temperaturänderung der ganzen Platte infolge der Rotation, die Wirkung erscheint im dauernden Ausschlag;

c) eine Änderung der Verhältnisse der Widerstände AC/BC und AD/BD während der Dauer der Beobachtung aus anderweitigen Ursachen. In der That änderte sich die Ruhelage der Nadel, auch wenn keine Rotation stattfand, langsam, aber stetig und stark genug, daß der dadurch verursachte Fehler von der Ordnung der übrigen war. Die Wirkung macht sich im dauernden Ausschlag geltend.

3) ein Teil, dessen Vorzeichen außer von den Richtungen der Leitungen auch von der Richtung der Rotation abhängt:

a) käme im augenblicklichen Ausschlage ein solcher Teil vor, so wäre für denselben wohl keine andere Ursache anzugeben, als eine Trägheit der bewegten Elektrizität;

b) im dauernden Ausschlage kann ein solcher Teil dadurch entstehen, daß bei der Rotation zwei diagonal gegenüber liegende Zweige der Brücke vorangehen, zwei andere folgen, erstere sich also infolge des Luftzuges stärker als

letztere abkühlen. Da die leitende Silberschicht der Messingscheibe sehr dicht anlag, hatte ich eine solche Wirkung nicht vermutet, sie zeigte sich aber zunächst sehr stark und war um so unbequemer, als sie sich von der Wirkung einer trägen Masse nur durch ihr Andauern nach beendigter Rotation unterschied. Indem ich die Platte und Messingscheibe mit Baumwolle und einer Papiertrommel umgab, verminderte ich die Störung beträchtlich, eine weitere Verminderung trat ein, als ich das Innere der Papiertrommel durch einen derselben gegebenen Paraffinüberzug hermetisch abschloß. Ganz blieb diese Störung eigentümlicherweise auch so nicht aus.

Von den beschriebenen Versuchen habe ich zwei Reihen zu je 20 Versuchen angestellt. Dieselben unterschieden sich durch die Intensität des angewandten Stromes, die Empfindlichkeit des Galvanometers und vorzüglich dadurch, daß bei der ersteren der erwähnte Paraffinüberzug noch fehlte. Die zweite war bei weitem die bessere und soll daher nur von ihr die Rede sein. Auf sie bezieht sich die Angabe, die oben über die Empfindlichkeit des Galvanometers gemacht ist. Die Intensität des Stromes betrug im magnetischen Maße $1,17 \text{ mg}^{\frac{1}{2}} \text{ mm}^{\frac{1}{2}}/\text{sec}$; die Rotationsgeschwindigkeit nach dem obigen durchschnittlich $290/8\frac{1}{2} = 34$ Umdrehungen in der Sekunde. Der Ausschlag des Galvanometers am Ende der Drehung betrug im Mittel 10 bis 15 Skalenteile und änderte sich in den folgenden Sekunden meist nur um wenige Skalenteile. Der größte Teil dieses Ausschlages entsprach den nicht mehr zu trennenden Ursachen 2b) und 2c); die Wirkung der Störungen 1) und 3b) ergab sich etwa zu 2 bis 4 Skalenteilen, die Störung 2a) war klein. Die Brauchbarkeit der Methode zeigte sich darin, daß die einzelnen Störungen aus allen Versuchen fast ausnahmslos mit gleichen Zeichen und von gleicher Größenordnung gefunden wurden. Die 20 Werte, welche für den unter 3a) angeführten Teil des Ausschlages erhalten wurden, sind in Skalenteilen die folgenden:

+3,6, -1,0, -0,0, -2,7, -1,1, +0,1, -0,6,
 +0,8, -1,1, +0,2, -0,4, +0,5, +0,7, +0,5,
 +0,8, +1,2, +1,1, +0,7, +0,6, +0,7.

Das Mittel dieser Werte ist +0,23. Die Abweichung

von Null ist etwas gröfser als der wahrscheinliche Fehler des Resultates, indessen dürfte die Ursache der Abweichung eher in der bis zu einem gewissen Grade willkürlichen Berechnung des augenblicklichen Ausschlages, als in einer physikalischen Ursache zu finden sein. Der Einfluss einer trägen Masse mufste nach den Umständen des Versuches und den benutzten Vorzeichen einen negativen Ausschlag zur Folge haben, ein solcher Einfluss war also durchaus nicht nachzuweisen. Setzt man den konstanten Ausschlag von 0,23 auf Rechnung einer anderen Ursache und berechnet die Fehler der Versuche von Null an, so ergibt sich immer noch eine Wahrscheinlichkeit von 14 gegen 1, dafs kein Ausschlag gröfser als $\frac{1}{2}$ Skalenteil, und von 3480 gegen 1, dafs kein Ausschlag gröfser als 1 Skalenteil vorhanden war, der einer trägen Masse hätte zugeschrieben werden können.

Bei der Berechnung der Versuche unter Zugrundelegung der WEBER'schen Hypothese mache ich der Einfachheit halber die Annahme, dafs die Masse einer positiven Einheit gleich der Masse einer negativen Einheit sei, und dafs im elektrischen Strome beide Elektrizitäten mit entgegengesetzt gleicher Geschwindigkeit fliesen. Es sei m die Masse der elektrostatischen Einheit, v die Geschwindigkeit, mit welcher sie gezwungen ist, sich in der Axe der Platte AB oder in einer dieser Axe parallelen Geraden zu bewegen, ω die Rotationsgeschwindigkeit der Platte. Dann ist die aus der Rotation entspringende scheinbare Kraft, welche auf die Einheit senkrecht zur Bahn derselben wirkt, gleich $2mv\omega + C$, wenn C die dem Orte der Einheit entsprechende Komponente der Centrifugalkraft ist. Die entgegengesetzte Einheit, welche sich am gleichen Orte befindet, erleidet in gleicher Richtung die Kraft $-2mv\omega + C$. Die Summe beider Kräfte $2C$ stellt eine ponderomotorische Kraft dar, nämlich diejenige Zunahme der auf die Masse des Leiters wirkenden Centrifugalkraft, welche aus der Vermehrung dieser Masse um die Masse der Elektrizität folgt; die Differenz aber, nämlich $X = 4mv\omega$ ist eben die elektromotorische Kraft, welche wir im Galvanometer zu bemerken suchten. Nun ist m gleich der Masse M der gesamten in einem Kubikmillimeter enthaltenen positiven und negativen Elektrizität, dividiert durch die Anzahl der in einem Kubik-

millimeter enthaltenen elektrostatischen Einheiten; diese Anzahl wiederum ist gleich der elektrostatisch gemessenen Stromdichte i , dividiert durch die Geschwindigkeit v , also ist $m = Mv/i$ und $X = 4\omega \cdot Mv^2/i = 4i\omega \cdot Mv^2/i^2$. Wir können nun, ohne die Gleichung zu ändern, rechts und links magnetisches Maß einführen; thun wir dies, so ist $Mv^2/i^2 = Mv_0^2/i_0^2$ diejenige Größe, welche in der Einleitung mit μ bezeichnet ist, und also $X = 4\mu i\omega$. Hierin ersetzen wir noch die Stromdichte i durch den Quotienten aus der Gesamtintensität J und dem Querschnitt q der Leitung, ferner die elektromotorische Kraft X durch den Quotienten aus der Potentialdifferenz φ zwischen den Punkten C und D und der Breite b der Platte; nennen wir noch die mittlere Dicke derselben d , so wird jetzt $\varphi = 4\mu J\omega b/q = 4\mu J\omega/d$, oder, da wir μ suchen:

$$\mu = \frac{\varphi q}{4Jb\omega} = \frac{\varphi d}{4J\omega}$$

Den Querschnitt q oder die Dicke d können wir angenähert aus der Menge des niedergeschlagenen Silbers berechnen, rationeller und genauer zugleich ist es, ihn aus dem elektrischen Widerstande der Platte zu bestimmen, denn dieser Widerstand hängt unmittelbar von der mittleren Geschwindigkeit ab, mit welcher sich die Elektrizität in der Platte bewegt, und eben diese Geschwindigkeit und nur mittelbar der Querschnitt ist die Größe, auf welche es ankommt. Da die Leitung unzweifelhaft eine metallische war, können wir für den spezifischen Widerstand der leitenden Substanz nur den des Silbers setzen; aus der Länge der Platte = 45 mm und dem Widerstand = 5,1 S.-E. im Mittel ergibt sich der für uns in Betracht kommende Querschnitt $q = 0,00014 \text{ mm}^2$ und die entsprechende Dicke $d = 5,6 \cdot 10^{-6} \text{ mm}$. Allerdings ist diese Dicke nur etwa ein Zehntel derjenigen, welche man aus der Menge des niedergeschlagenen Silbers erschließen konnte, indessen zeigt dies nur, was von vornherein wahrscheinlich war, dafs das Silber sich sehr ungleichförmig auf dem Glase verteilt. Wendet man den gefundenen Wert der Dicke an und setzt außerdem $J = 1,17 \text{ mg}^{\frac{1}{2}} \text{ mm}^{\frac{1}{2}} \text{ sec}^{-1}$, $\omega = 2\pi \cdot 34 \text{ sec}^{-1}$, $\varphi = 1$ Skalenteil = 1 32 Milliontel Daniell = $3300 \text{ mg}^{\frac{1}{2}} \text{ mm}^{\frac{1}{2}} \text{ sec}^{-1}$, so folgt $\mu = 0,000 018 5 \text{ mm}^2$. μ erscheint demnach als eine Fläche,

nämlich als eine Energie, dividiert durch die Einheit des Quadrates einer magnetischen Stromdichte und durch die Einheit des Volumens. Da der Wert $\varphi = 1$ Skalenteil sich schon als äußerst unwahrscheinlich herausstellte, so erscheint die in der Einleitung ausgesprochene Behauptung gerechtfertigt. Wären die bei der Berechnung der Versuche gemachten Annahmen mehr als rohe Annäherungen, so würde selbst die Überschreitung einer weit geringeren Grenze noch unwahrscheinlich sein.

Es ist von Interesse, zu bemerken, daß wir elektrische Ströme kennen, welche zweifellos mit kinetischer Energie verbunden sind, deren Größe die aufgestellte Grenze beträchtlich überragt, die Ströme in Elektrolyten. Aus dem chemischen Äquivalent des Stromes von der magnetischen Intensität 1 und der Überföhrungszahl für salpetersaures Silberoxyd kann man leicht berechnen, mit welcher Geschwindigkeit sich in einer Lösung dieses Salzes von bestimmter Konzentration die Atomgruppen Ag und NO₃ bewegen, wenn in der Lösung die Stromdichte 1 herrscht. Daraus folgt dann die lebendige Kraft dieser Bewegung, und zwar findet man für mittlere Konzentrationen angenähert, wenn auf 1 Gewichtsteil Wasser n Gewichtsteile des Salzes kommen, $\mu = 0,0078/n \text{ mm}^2$. Liefse sich demnach der beschriebene Versuch mit einem Elektrolyten unter ähnlichen Bedingungen wie mit einem Metalle anstellen, so müßte er ein positives Resultat ergeben; thatsächlich bewirken Widerstand und Zersetzbarkeit der Elektrolyte, daß sich gleich günstige Versuchsbedingungen auch nicht annähernd erreichen lassen.