

Über die Messung starker elektrischer Ströme

(Nach stenographischer Niederschrift)

Von Dr. O. Frölich¹

Elektrotechnische Zeitschrift, Erster Jahrgang, Januar 1880, Seite 197 ff.

Im Wortlaut unveränderter Nachdruck, durch einige Anmerkungen ergänzt, im November 2013
www.historische-messtechnik.de
Gemeinfrei nach §64 UrhG

Meine Herren! In den letzten Monaten und in den letzten Jahren sind verschiedene Publikationen über Apparate erfolgt, namentlich in England und in Deutschland, welche dazu dienen sollen, die Ströme der dynamoelektrischen Maschinen zu messen. Es ist natürlich, daß mit der Entwicklung dieser Maschinen auch das Messungswesen Schritt halten mußte, und da die Ströme, welche diese Maschinen geben, viel stärker sind, als die bisher in der Telegraphie und bei wissenschaftlichen Untersuchungen angewendeten, so mußten die Instrumente verändert werden. Man griff zunächst zurück auf die Instrumente, welche man besaß, suchte sie so weit als möglich zu benutzen, und brachte, wenn sie den Absichten nicht entsprachen, diejenigen Änderungen an, die geboten schienen.

Das Hauptinstrument war bisher die Tangentenbussole, ein Instrument, in welchem eine geringe Anzahl von Kreisströmen auf eine einfache Nadel wirkt; diese sind verhältnißmäßig weit von der Nadel abgestellt, und zwar deshalb, um die Ablenkung möglichst proportional der Tangente der Ablenkung zu machen. Dieses Instrument, welches bekanntlich Helmholtz² und Gaugain³ durch seitliche Stellung des Ringes verbesserten, wurde zuerst angewendet, und auch in neueren Arbeiten über die Dynamomaschine ist es noch in seiner alten Form verwendet. Es hat sich jedoch bald gezeigt, daß dieses Instrument nicht genug Variation bietet, um das ganze Gebiet der Dynamomaschinen zu beherrschen, namentlich, daß die Ströme meist zu stark sind, auch wenn man nur einen einzigen Stromkreis, nämlich den Ring, in Wirkung setzt.

In Folge dessen sind verschiedene Abänderungen angebracht worden, welche diesem Mangel abhelfen sollen; ich will hiervon nur zwei erwähnen, die wesentlich in Betracht kommen.

Dr. Obach⁴ in London hat die hübsche Idee gehabt, die Wirkung des Stromkreises dadurch abzuschwächen, daß er diesen Kreis nicht mehr wie gewöhnlich in eine vertikale Ebene stellt, sondern ihn um eine horizontale Axe drehbar macht. Ist das Instrument bei

verticalem Stromkreis zu empfindlich, d. h. sind die Ablenkungen zu groß, so wird der Kreis gedreht und damit die Empfindlichkeit des Instruments verringert. Stellt man den Ring vollständig horizontal, so äußert er keine Wirkung auf die Nadel; es ist daher klar, daß man durch Drehung des Ringes die Empfindlichkeit des Instrumentes auf jedes bei Dynamomaschinen vorkommende Maß einstellen kann. Dasselbe ließe sich auch erreichen durch Näherung und Entfernung des Ringes.

Außerdem ist noch zu erwähnen ein Instrument von Hipp⁵ in Neuchâtel; dasselbe ist aus der einfachen Überlegung hervorgegangen, daß wenn ein Strom in einem einfachen Draht zu stark ist, um auf die Nadel zu wirken, man diese Wirkung verringern kann, indem man den Strom nicht in einfacher Linie bei der Nadel vorbeiführt, sondern hin- und zurückführt in Form einer Schleife. Es ist klar, daß diese beiden Stromwege in entgegengesetztem Sinne auf die Nadel wirken müssen, und man hat es so vollständig in der Gewalt, die Wirkung des Stromes abzuschwächen. Bei dem Hipp'schen Instrument gilt das Tangentengesetz nicht; es würde jedoch Geltung erlangen, wenn man statt der Schleife zwei Ringe in vertikaler Ebene angewendete, welche dicht hinter einander stehen und vom Strom in verschiedener Richtung durchlaufen werden.

Ich will mich der Kritik dieser Instrumente überheben und hier nur die Gesichtspunkte feststellen, welche seit einer längeren Reihe von Jahren bei Siemens & Halske bei Construction dieser Instrumente maßgebend waren.

Sprechen wir vorerst von der direkten Strommessung. Zunächst ist hervorzuheben, daß ein zur Strommessung dienendes Instrument ganz andere Anforderungen erfüllen muß, wenn es für den Techniker bestimmt ist, als wenn es im wissenschaftlichen Laboratorium gebraucht werden soll.

Vom Experimentator im wissenschaftlichen Laboratorium kann verlangt werden, daß er Übung in Behandlung von Meßinstrumenten besitzt, meistens hat er auch mehr Zeit als der Techniker; der Techniker dagegen bedarf zu

seinen Messungen eines Instrumentes, das so zu sagen nicht verdorben werden kann, das auch in ungeübten Händen noch brauchbare Messungen liefert und dessen Aufstellung und Behandlung wenig Zeit kostet. Damit ist durchaus nicht gesagt, daß sich die Forderungen, welche der Mann der Wissenschaft und welche der Techniker an Meßinstrumente stellt, nicht vereinigen lassen; im Gegentheil, bei wissenschaftlichen Instrumenten sind meist die Bedürfnisse des Technikers nur deshalb nicht befriedigt, weil sie der Mann der Wissenschaft weniger fühlt, und es lassen sich in den meisten Fällen Instrumente konstruiren, die sowohl den wissenschaftlichen, als den technischen Anforderungen Genüge leisten.

Die Postulate, welche der Techniker an ein Instrument für direkte Strommessung stellen muß, sind meiner Ansicht nach die folgenden: Erste Forderung: Unabhängigkeit von äußeren Kräften. Namentlich in Räumen, in denen viele Drähte gezogen sind und Maschinen, elektrische und nichtelektrische, stehen, ist erste Bedingung, daß die verschiedenen Kräfte, die von den Strömen, Magneten und Eisenmassen auf das Instrument ausgeübt werden, die Anzeigen des Instrumentes wenig oder gar nicht beeinflussen. Sobald die Anzeigen des Instrumentes in erheblichem Maße von äußeren Kräften abhängig sind, muß bei jeder Messung der Einfluß dieser äußeren Kräfte bestimmt und womöglich paralytisch werden, und man ist, außer bei ganz zuverlässigen Beobachtern, nie sicher, daß nicht bei der Messung ein solcher Einfluß stattgehabt habe.

Giebt man aber diese Forderung zu, dann ist es unmöglich, ein Instrument zu verwenden, in welchem ein Magnet vorkommt. Benutzt man z. B. die Tangentenbussole, so muß man, um nicht einen zu großen Ausschlag zu erhalten, den Ring schief stellen oder weiter wegrücken; führen Sie nun die Zuleitungsdrähte an die Bussole, so üben diese im Allgemeinen eine ähnliche Wirkung auf die Nadel aus, wie der Ring selbst, und man hat mit Sorgfalt die Zuleitungsdrähte so anzuordnen, daß ihre Wirkung auf diese Null wird. Jeder geübtere Beobachter ist allerdings leicht im Stande, diese Ausgleichung auszuführen; geben Sie das Instrument aber einem ungeschickten oder ungeduldigen Arbeiter in die Hand, so wird derselbe grobe Fehler machen, und auch dem Geübteren kommen trotz aller Wachsamkeit Fehler dieser Art vor. Ebenso ist es mit magnetischen Massen; nicht allein Eisenmassen, sondern auch Stahlmagnete und magnetische Maschinen, ebenso die Gasleitungen und Eisenträger, die sich in den Gebäuden verbreiten, können Einflüsse

ausüben, die man oft erst zu spät bemerkt.

Zweite Forderung. Proportionalität der gemessenen Größe mit der zu messenden Größe.

Wir besitzen eine Reihe von Strommeßinstrumenten, bei welchen die Wirkung nach dem Gesetz des Sinus, des Tangens, des Secans u. s. w. des Ausschlags erfolgt. Wenn Sie objectiv die Entwicklung der Instrumente verfolgen, so kommen Sie zu der Überzeugung, daß immer mehr die Aufmerksamkeit sich denjenigen Instrumenten zuwendet, in welchen Proportionalität herrscht zwischen der zu messenden und der gemessenen Größe.

Es ist auch für den Mann der Wissenschaft von Werth, in dem Ausschlag des Instruments eine wirkliche unmittelbare Vorstellung von der Größe zu besitzen, welche er messen will. Je einfacher ferner das Gesetz ist, welchem die Ausschläge des Instrumentes folgen, desto mehr Rechenoperationen lassen sich während des Experimentirens im Kopfe ausführen; und das ist für den rasch experimentirenden Techniker nicht unwichtig. Sie werden bemerkt haben, daß bei wissenschaftlichen und technischen elektrischen Messungen das Spiegelgalvanometer allmähig alle anderen Apparate verdrängt, wo es überhaupt möglich ist, namentlich, weil es trotz der delikaten Behandlung, die es verlangt, ein Instrument ist, dessen Ausschlag dem Strome genau proportional ist. Je weniger Zeit der Beobachter hat, desto mehr verlangt er nach der Proportionalität. Wer nur wenige Messungen täglich anzustellen hat, für den ist es unerheblich, ob sein Instrument der Proportionalität folgt oder einem anderen Gesetz; wer aber unausgesetzt mit dem Instrument zu arbeiten hat, wird stets ein von der Proportionalität abweichendes Gesetz sehr störend finden.

Ein weiterer Vortheil der Proportionalität besteht in der Gleichmäßigkeit der Empfindlichkeit.

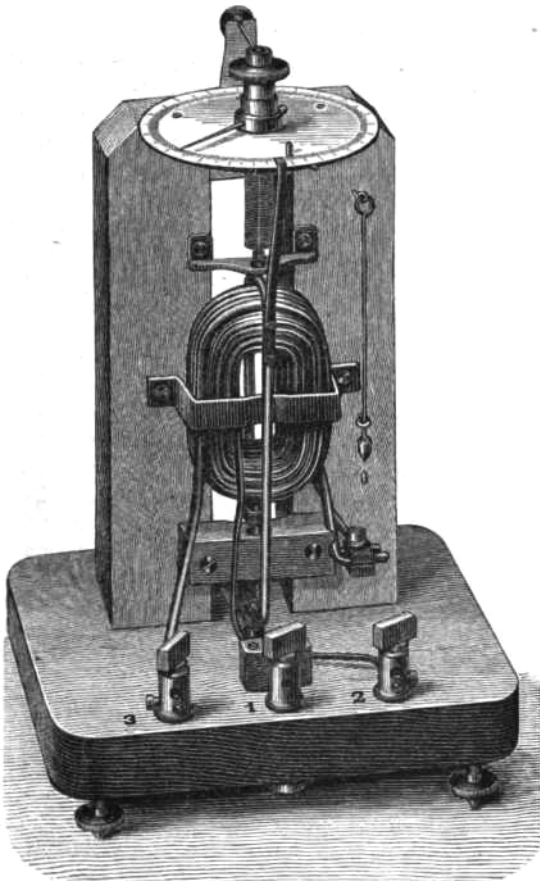
Bei der Tangentenbussole nimmt die Empfindlichkeit bekanntlich mit der Größe des Ausschlages bedeutend ab. 1° bedeutet in der Gegend von 30° eine viel größere Variation in der Stromstärke als in der Gegend von 0° .

Wenn man an diesen beiden Forderungen festhält, so muß man für die Messung von starken Strömen die Magnete verwerfen und muß bei der Construction der Instrumente die Tangenten- und Sinusgesetze vermeiden und statt dessen Spiegelablesung oder Torsionsfedern einführen. Torsionsfeder nennt man eine Spiralfeder, an welcher der Körper aufgehängt ist, der durch den Strom eine Drehung erfährt (Magnet oder Stromrolle); durch Drehung dieser Spiralfeder wird jener

Körper wieder in seine Ruhelage zurückgeführt; der Drehungswinkel ist alsdann ein Maß für die auf den Körper ausgeübte Kraft.

Ein Instrument, welches diese Bedingungen erfüllt und sich bereits seit einer Reihe von Jahren praktisch bewährt hat, ist das Elektrodynamometer von Siemens & Halske (s. Fig. 1).

Fig. 1.



Es ist dies ein Weber'sches Dynamometer, bestehend aus einer inneren festen und einer äußeren beweglichen Rolle. Die letztere enthält nur eine einzige Windung; man erreicht dadurch eine beinahe völlige Unabhängigkeit vom Erdmagnetismus. Die Wirkung auf die bewegliche Rolle bleibt nämlich im Wesentlichen dieselbe, wenn das Produkt der Windungszahl der einen Rolle mit der Windungszahl der anderen Rolle dasselbe bleibt; sie bleibt also z. B. gleich, wenn zehn Windungen auf der beweglichen, zehn Windungen auf der festen Rolle und wenn bloß eine Windung auf der beweglichen, hundert Windungen auf der festen Rolle sich befinden. Die Wirkung des Erdmagnetismus muß aber um so mehr gegen diejenige der festen Rolle verschwinden, je mehr Windungen dieselbe enthält. Bei diesem Instrumente ist es daher beinahe gleichgültig, in welcher Ebene

dasselbe aufgestellt wird, was sonst bei Instrumenten dieser Art nicht der Fall ist.

Die Kontakte, durch welche der beweglichen Windung der Strom zugeführt wird, sind Quecksilberkontakte. Es sind zwei verschiedene innere Rollen angebracht, die eine von wenig Windungen dicken Drahtes für die lichterzeugenden Dynamomaschinen, die andere von mehr Windungen dünneren Drahtes für die lichterzeugenden Wechselstrommaschinen bestimmt. Das ganze Gebiet der elektrischen Maschinen, mit Ausnahme derjenigen für chemische Niederschläge im Großen, wird von dem Instrumente beherrscht.

Der Torsionswinkel ist proportional dem Quadrat des Stromes; das ist aber gerade diejenige Größe, welche den Techniker direkt interessiert, weil derselben die erzeugte Licht- oder Wärmemenge und die verbrauchte und erzeugte Arbeitskraft proportional ist.

Für jedes Instrument sind die betreffenden Konstanten bestimmt und beigegeben, so daß jede gemessene Stromstärke sich unmittelbar

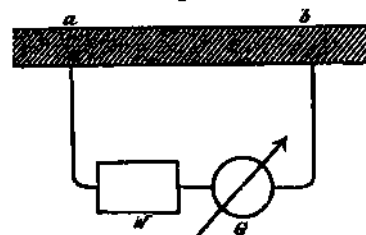
in absolutes Maß $\frac{\text{Daniell}}{\text{Siemens Einh.}}$ ⁶ oder *Weber*⁷ umrechnen läßt.

Mit der direkten Strommessung ist nun die Aufgabe des Elektrikers bei den elektrischen Maschinen noch nicht erschöpft; wie wir weiter unten an Beispielen sehen werden, bedarf man auch eines Instrumentes, welches die Potential- oder Spannungsunterschiede an beliebig zu wählenden Punkten des Stromkreises mißt, und zwar ohne die im Kreise herrschenden Strömungs- oder Potentialverhältnisse erheblich zu verändern.

Hierzu eignet sich am besten folgende Methode:

Man verbinde die Punkte *a*, *b* (s. Fig. 2), deren Spannungsdifferenz zu bestimmen ist, durch einen Widerstand *W* und ein Galvanometer *G*; die in diesem Zweige herrschende Stromstärke ist gleich der Spannungsdifferenz *ab*, dividirt durch den Widerstand des Zweiges; man kann daher die Spannungsdifferenz *a b* stets aus der Stromstärke bestimmen, wenn der Widerstand bekannt ist.

Fig. 2.



Man kann zunächst die Spannungsdifferenz $a b$ mit jedem beliebigen Galvanometer bestimmen, wenn man als Widerstand W einen Widerstandskasten benutzt und bei jeder Messung so viel Widerstand einschaltet, daß der Ausschlag am Galvanometer eine bestimmte Größe, z. B. 15° , beträgt. In diesem Falle ist die zu messende Spannungsdifferenz proportional dem eingeschalteten Widerstand + demjenigen des Galvanometers und läßt sich leicht in Daniell⁸ oder Bunsen⁹ ausdrücken, wenn man den Zweig an die Pole einer Batterie von bekannter elektromotorischer Kraft anlegt.

Oder aber, man läßt den Widerstand des Zweiges konstant und mißt den Strom an einem passenden Galvanometer; der Strom ist alsdann unmittelbar ein Ausdruck der Spannungsdifferenz $a b$. Ein Spiegelgalvanometer ließe sich hierfür gut verwenden; da aber dessen Empfindlichkeit im vorliegenden Falle nicht ausgenutzt wird, ist es richtiger, ein einfacheres, gröberes Instrument mit Torsionsfeder zu konstruieren.

So entstand das Torsionsgalvanometer (Fig. 3). Dasselbe besteht aus einem an Spiralfeder und Faden aufgehängten Glockenmagneten, auf welchen zwei Stromrollen wirken; dasselbe ist so justirt, daß ein Torsionswinkel von etwa 15° einem Daniell Spannungsdifferenz entspricht. Durch einen Stöpsel läßt sich ein Widerstand ausschalten, wodurch die Empfindlichkeit genau auf das Zehnfache gesteigert wird. Es lassen sich daher Spannungsdifferenzen von 0,01 bis 10 Daniell mit dem Instrumente messen.

Die Messung der Spannungsdifferenzen braucht nicht, wie die direkte Strommessung, in der Nähe der Maschinen und Leitungen zu erfolgen, sondern kann beliebig weit weg von derselben verlegt werden an eine Stelle, wo keine erheblichen äußeren Kräfte wirken.

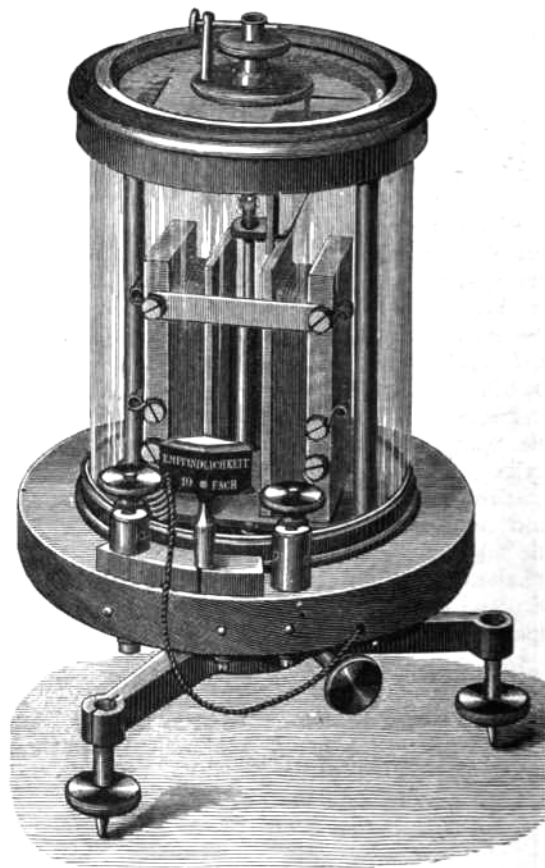
Die Messung der Spannungsdifferenzen kann auch die direkte Strommessung ersetzen, wenn man den zwischen den Punkten a, b liegenden Widerstand (im Hauptstromkreise) kennt; man erhält die Stromstärke im Hauptstromkreise, indem man die gemessene Spannungsdifferenz $a b$ durch den Widerstand $a b$ dividirt.

Die wichtigste Anwendung der Spannungsmessung ist diejenige beim Niederschlagen von Metallen im Großbetrieb vermittelt dynamoelektrischer Maschinen.

Der Querschnitt der Leitungen beträgt in diesem Falle einen Quadratzoll und mehr, so daß die direkte Strommessung beinahe unmöglich wird. Man mißt daher in diesem Falle nur Spannungsdifferenzen: von allen Punkten, deren Spannungsdifferenzen ge-

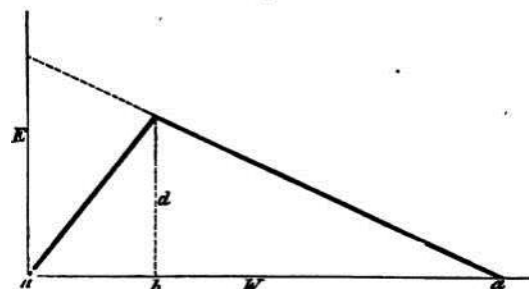
messungen werden sollen, von den Polen der Maschine, von verschiedenen Stellen der Leitungen und Bäder werden Drähte gezogen nach einem etwas entfernten Raume, in welchem das Instrument aufgestellt ist, so daß sich daselbst jederzeit die elektrischen Daten des Stromkreises sämtlich bestimmen lassen.

Fig. 3.



Wir wollen nun auf die Anwendung der beschriebenen Methoden, der direkten Strommessung und der Spannungsmessung, in den wichtigsten Fällen näher eingehen.

Fig. 4.

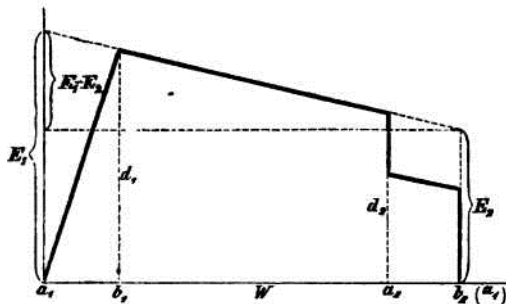


Wenn der Schließungskreis der Maschine bloß aus Widerstand besteht, so wird der Verlauf der Spannung im ganzen Stromkreise durch die in Fig. 4 enthaltene Linie dargestellt.

Der Widerstand ist Abscisse, die Spannung Ordinate, a, b sind die Pole des Ankers der Maschine. Da in jedem Theile des Ankers gleichmäßig elektromotorische Kraft entwickelt wird, muß die Spannung im Anker in gerader Linie aufsteigen, im äußeren Schließungskreis dagegen, zu dem auch die Wicklung der Schenkel gehört, in gerader Linie abfallen. Verlängert man die letztere bis zur Ordinatenaxe, so ist der so erhaltene Abschnitt auf der Ordinatenaxe gleich E , der elektromotorischen Kraft, während d die Spannungsdifferenz der Ankerpole bezeichnet.

In diesem Falle genügt, wenn die Widerstände bekannt sind, eine Messung zur Ermittlung der elektrischen Verhältnisse; dieselbe kann eine direkte Strommessung oder eine Spannungsmessung, z. B. an den Polen des Ankers, sein.

Fig. 5.

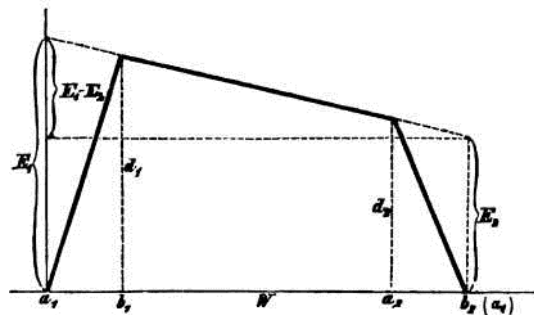


Besteht der Schließungskreis aus Leitungen und einer Zersetzungszelle, so hat man die in Fig. 5 dargestellte Spannungslinie. Die Strecke $a_1 b_1$ bedeutet den Anker, $b_1 a_2$ die Wicklung der Schenkel und Leitung, $a_2 b_2$ die Zersetzungszelle; b_2 ist mit a_1 verbunden gedacht. Im Anker steigt die Spannung und in dem Stücke $b_1 a_2$ fällt dieselbe, ähnlich wie im obigen Falle. Aber in der Zersetzungszelle stellt sich eine elektromotorische Gegenkraft entgegen, welche theils an der Anode (a_2), theils an der Kathode (b_2) auftritt. An diesen Stellen sinkt die Spannung plötzlich beim Übergang vom Metalle in die Flüssigkeit. E_1 ist die elektromotorische Kraft der Maschine, E_2 die elektromotorische Gegenkraft. Ein Theil (E_2) der elektromotorischen Kraft E_1 dient dazu, um der elektromotorischen Gegenkraft E_2 das Gleichgewicht zu halten, nur der Rest ($E_1 - E_2$) ruft Strom hervor. d_1 ist die Spannungsdifferenz der Ankerpole, d_2 diejenige der Pole der Zersetzungszelle.

Im vorliegenden Falle kommt man mit Einer Messung nicht aus, man hat von den drei Größen: Strom, Spannung d_1 und Spannung d_2 wenigstens zwei zu messen. Um die Menge des Niederschlages in der Zersetzungszelle zu bestimmen, genügt allerdings die Messung des Stromes; zur Bestimmung der aufgewendeten Arbeit aber

muß E_1 bekannt sein.

Fig. 6.



Ein ähnlicher Fall ist die elektrische Kraftübertragung, (Fig. 6). Die primäre, stromerzeugende Maschine magnetisirt die sekundäre Maschine, welche Arbeit leisten soll, und setzt dieselbe in Bewegung; in der sekundären Maschine entsteht eine elektromotorische Gegenkraft, wie oben in der Zersetzungszelle. a_1, b_1 sind die Ankerpole der primären, a_2, b_2 die Ankerpole der sekundären Maschine; b_2 ist mit a_1 verbunden gedacht; in der sekundären Maschine fällt die Spannung nicht plötzlich, wie in der Zersetzungszelle, sondern allmählich ab, weil in allen Theilen des Ankerdrahtes gleichmäßig elektromotorische Gegenkraft entwickelt wird. E_1 ist die elektromotorische Kraft, d_1 die Spannungsdifferenz an den Ankerpolen der primären Maschine, E_2 die elektromotorische Gegenkraft, d_2 die Spannungsdifferenz an den Ankerpolen der sekundären Maschine; die Differenz $E_1 - E_2$ können wir die strombildende elektromotorische Kraft nennen.

Auch hier genügt Eine Messung nicht; von den drei Größen: Stromstärke, Spannung d_1 und Spannung d_2 müssen wenigstens zwei gemessen werden; wenn irgend möglich, wird man jedoch alle drei messen und erhält dadurch zugleich eine Kontrolle über die Güte der Messung. Die aufgewendete Arbeit ist proportional E_1 die geleistete proportional E_2 , beide sind proportional dem Strom.

Enthält der äußere Schließungskreis einen Lichtbogen, so ist dieser Fall entweder auf den einfachen Fall des Widerstandes (s. Fig. 4) oder aber auf denjenigen der Zersetzungszelle zurückzuführen. Welcher von diesen Fällen der zutreffende ist, weiß man noch nicht mit Sicherheit; es ist nämlich noch fraglich, ob das elektrische Licht eine elektromotorische Gegenkraft entwickelt oder nicht. Diese Frage läßt sich allerdings untersuchen und entscheiden; es ist aber bisher noch nicht mit Sicherheit geschehen.

Zum Schluß habe ich noch eine Forderung zu erwähnen, deren Erfüllung ich bisher stillschweigend vorausgesetzt habe und welche für alle elektrotechnischen Messungen gilt; es ist

die Zurückführung der Messungsergebnisse auf absolutes Maß. Ich meine damit nicht, daß jede einzelne Messung auf das in der Wissenschaft sogenannte absolute Maßsystem reduziert werden müsse, sondern man kann auch andere Maßgrößen zu Grunde legen, deren Beziehung zum absoluten Maßsystem bekannt ist. Es empfiehlt sich sogar für die Praxis mehr, solche Maßeinheiten zu wählen, die entweder zu allgemein bekannten Apparaten in Beziehung stehen oder allgemein verbreitet sind.

Solche Einheiten sind: die elektromotorische Kraft des Daniell'schen Elementes für die Spannungen, die Siemens'sche Einheit für die Widerstände und das Verhältniß

Daniell
Siemens Einh. für die Stromstärken. Auf diese Einheiten werden bei Siemens & Halske sämtliche Messungen bezogen.

Ein in der beschriebenen Weise angelegtes und konsequent durchgeführtes elektrisches Messungssystem bietet nicht nur den Vortheil dar, die Wirkung der Maschinen bei Versuchen und im praktischen Betriebe genau zu verfolgen und klarzulegen und die Basis für Neukonstruktionen zu liefern, sondern auch die Messung derjenigen Größen ganz oder theilweise zu ersetzen, deren Bestimmung mühsam und umständlich ist; dahin gehören die Lichtstärke, die Menge des niedergeschlagenen Metalles und die Arbeitskräfte. Bei der Niederschlagsmenge und der Arbeitskraft ist dies bereits in genügendem Maße gelungen, und es ist nicht daran zu zweifeln, daß es auch bei der Lichtstärke gelingen werde.

¹ Dr. O. Frölich (* 1843; † 1909) Promovierte 1868, war ein deutscher Techniker und Erfinder, u.a. tätig als Oberingenieur bei Siemens & Halske.

² Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz (* 31. August 1821 in Potsdam; † 8. September 1894 in Charlottenburg) war ein deutscher Physiologe und Physiker. Als Universalgelehrter war er einer der vielseitigsten Naturwissenschaftler seiner Zeit und wurde auch Reichskanzler der Physik genannt.

³ Jean-Mathée Gaugain (* ??; † ??) war ein in Frankreich lebender Physiker. Er entdeckte 1855 den vakuumelektrischen Gleichrichtungseffekt (Ventilwirkung).

⁴ Dr. Eugen Obach (* 1852; † 1898) - Mitglied des chemischen Instituts der Siemens'schen Gesellschaft und des elektrotechnischen Vereins zu London, sowie mehrerer anderer gelehrten Gesellschaften.

⁵ Matthäus Hipp auch Matthias od. Mathias (* 25. Oktober 1813 in Blaubeuren; † 3. Mai 1893 in Fluntern) war ein deutscher Uhrmacher und Erfinder, der in der Schweiz lebte. Seine bedeutendsten, lang nachwirkenden Erfindungen waren elektrische Webstühle, Bahnsignale und Pendeluhrwerke sowie der Hipp'sche Bandchronograph.

⁶ Auf dem Ersten Internationalen Elektrizitätskongress wurde am 21. September 1881 der Name Ohm als „praktische Einheit“ des elektrischen Widerstandes für 1.000.000.000 cm/s festgelegt; in der dabei zugrundegelegten Variante eines cgs-Systems (genauer: elektromagnetische cgs-Einheiten) ist 1 cm/s die „fundamentale“ Widerstandseinheit. Zur Realisierung der Einheit ein Ohm wurde dabei eine Quecksilbersäule mit festgelegter Querschnittsfläche bei null Grad Celsius eingeführt. Diese Bauart hatte Werner Siemens 1860 in den Annalen der Physik beschrieben, mit Abmessungen, nach denen sich ein Wert von ungefähr 0,944 Ohm ergibt, der als 1 Siemens oder eine Siemens-Einheit (SE) bezeichnet wurde. Siemens fertigte und verkaufte Silberdrähte als Sekundärnormal.

Diese Siemens-Einheit darf nicht mit der noch heute gebräuchlichen Einheit Siemens (S) als Maßeinheit für die elektrische Leitfähigkeit verwechselt werden.

⁷ Das Weber (auch: die Voltsekunde) ist die Maßeinheit des magnetischen Flusses. Benannt wurde sie nach Wilhelm Eduard Weber (* 24. Oktober 1804 in Wittenberg; † 23. Juni 1891 in Göttingen).

⁸ Daniell ist eine heute veraltete Maßeinheit der elektrischen Spannung. 1 Daniell ist die Klemmenspannung des von John Frederic Daniell (* 12. März 1790 in London; † 13. März 1845 ebenda) entwickelten Kupfer-Zink-Elementes (Daniell-Element), einer galvanischen Zelle.

1 Daniell ist ungefähr 1,1 Volt.

⁹ Bunsen ist eine heute veraltete Maßeinheit der elektrischen Spannung. 1 Bunsen ist die Klemmenspannung des von Robert Bunsen verbesserten Grove-Elements wobei das teure Platin wurde durch billigere Kohle ersetzt (Bunsen-Element).

1 Bunsen ist etwa 1,9 Volt.