10. Ueber die Messung des Selbstpotentials gerader Drähte; von Oswald Prerauer.

Die Bestimmung des Selbstpotentials (S. P.) grösserer Rollen ($p > 10^5$ cm) bietet keine Schwierigkeiten. Zur Berechnung desselben sind mehrfach Näherungsformeln aufgestellt,¹⁾ andererseits giebt es mehrere Methoden, nach welchen sich S. P. von Rollen experimentell bestimmen lassen, entweder durch absolute Messung²⁾ oder durch Vergleich³⁾ mit einem bekannten S. P. oder einer Capacität. Hingegen scheinen die Versuche zur Messung kleiner S. P. keine sicheren Resultate ergeben zu haben,⁴⁾ obgleich gerade die *experimentelle* Bestimmung kleiner S. P. wichtig wäre, weil sich dieselben nur in den wenigsten Fällen *berechnen* lassen.

Dies geht nur für ebene lineare Leiter, welche kreisförmige oder geradlinige geometrische Figuren bilden. Bei anders gestalteten Leitern, oder wenn magnetische Metalle in Frage kommen, lässt sich das S. P. nur durch Messung be-

1) Vgl. Stephan, Wied. Ann. 22. p. 107. 1884.

2) Maxwell, Electr. u. Magn. p. 500. Berlin 1883; Dorn, Wied. Ann. 17. p. 773. 1882; Joubert, Compt. rend. 91. p. 161. 1880; Roiti, N. Cim. 17. p. 186. 1885; Kohlrausch, Wied. Ann. 31. p. 595. 1887; M. Wien, Wied. Ann. 44. p. 689. 1891.

3) Maxwell, Electr. u. Magn. 2. § 757; Rayleigh, Phil. Mag. p. 867 u. f. 1886; Grätz, Wied. Ann. 50. p. 766. 1893; Hr. Grätz hält es für einen Vorzug seiner Methode, dass bei ihm die Schwierigkeit der genauen Zeitmessung, welche anderen Methoden anhaftet, fortfällt. Hierzu ist zu bemerken, dass die von ihm citirten Methoden eine *absolute* Messung des S. P. durch Widerstands- und Zeitmessung bezwecken, also eine Zeitmessung hierbei principiell nothwendig ist. Bei Methoden, welche wie die von Herrn Grätz nur zur *Vergleichung* eines unbekannten S. P. mit einem bekannten dienen, fällt die Zeitmessung naturgemäss fort.

4) Hughes, Journ. Telegr. Eng. 15. p. 6—26. 1886; Weber, Centralbl. f. Electrotechn. 8. p. 162—168. 1886; Wietlisbach, desgl. 4. p. 463—466. 1886; Rayleigh, Phil. Mag. V. 22. p. 469. 1886. Sämmtliche Versuche sind mit dem Hörtelephon gemacht, vgl. hierüber p. 775.

stimmen. Und selbst, wo eine Berechnung möglich ist, ist sie unsicher, weil die Versuchsanordnung den der Theorie zu Grunde liegenden Bedingungen meist nicht genau entspricht.

Im Folgenden soll eine Methode angegeben werden, welche gestattet, kleine S. P. (von 100 cm bis 10000 cm) mit genügender Genauigkeit (1 Proc.) zu messen. Sie soll geprüft werden für gerade, nicht magnetische Drähte, wo die Theorie vollständig durchgeführt ist.¹⁾

Die Methode.

Die angewandte Methode ist die Maxwell'sche Brückemethode zum Vergleich von S. P., die ich nach Vorschlägen von Hrn. M. Wien zur Messung kleiner S. P. brauchbar gemacht habe.

Das Princip der Maxwell'schen Methode ist folgendes: Der Zweig 1 der Brücke (Fig. 1) enthält den Widerstand w_1 und das S. P. p_1 , der Zweig 2 den Widerstand w_2 und das S. P. p_2 , der Zweig 3 den Widerstand w_3 und der Zweig 4 den Widerstand w_4 . Die Zweige 3 und 4 haben kein merkliches S. P.²⁾

Fig. 1

Durchfließt ein variabler Strom das Brückensystem, so

1) Rayleigh, Phil. Mag. V. 21. p. 381. 1886; Wietlisbach, l. c. W. Thomson, Electrician. 1. Febr. 1889; Heaviside, Phil. Mag. (5) 22. p. 118 und p. 273. p. 419. 23. p. 137. 1887.

2) Die Bedingung dafür, dass die Selbstinduction der Zweige 3 u. 4 vernachlässigt werden darf, ergibt sich aus Folgendem. Ist in allen 4 Zweigen der Brücke Selbstinduction vorhanden, so lauten die Gleichungen dafür, dass der Strom im Brückenzweig verschwindet.

$$w_1 w_4 - n^2 p_1 p_4 = w_2 w_3 - n^2 p_2 p_3$$

und

$$p_1 w_4 + p_4 w_1 = p_2 w_3 + p_3 w_2.$$

Soll p_3 und p_4 ohne Einfluss auf das Messresultat sein, so müssen die Producte $p_4 w_1$ und $p_3 w_2$ gegen $p_1 w_4$ und $p_2 w_3$ verschwinden, so dass die letzte Gleichung in die Maxwell'sche

$$p_1 w_4 = p_2 w_3$$

übergeht.

ist der Brückenweig stromlos, wenn

$$p_1 : p_2 = w_1 : w_2 = w_3 : w_4$$

ist. Kennt man p_2 und das Verhältniss w_3/w_4 resp. w_1/w_2 , so erhält man also das unbekannte S. P.

$$p_1 = p_2 \frac{w_3}{w_4} \text{ resp. } p_2 \frac{w_1}{w_2}.$$

Die Methode kann nur genaue Resultate geben, wenn die von der Selbstinduction herrührende electromotorische Kraft $p di/dt$ nicht klein ist gegen $i w$.

Bei kleinen S. P. darf man daher nicht mit einem einfachen Stromstoss und Galvanometer arbeiten, sondern muss Wechselströme anwenden und zwar von ziemlich hoher Unterbrechungszahl, da die electromotorische Kraft der Selbstinduction mit der Frequenz des Sinusstromes wächst.

Damit $p di/dt$ nicht klein gegen $w i$ ist, muss ferner w nicht zu gross sein. Es darf also der Querschnitt des Leiters nicht zu klein und der specifische Widerstand des Metalles nicht zu gross sein.

Die Selbstinduction bewirkt, dass innerhalb eines Leiters die Stromlinien des Wechselstromes nicht dieselbe Vertheilung haben, wie die eines constanten Stromes; dadurch erscheint der Widerstand vergrössert, das S. P. verkleinert.

Für einen geraden Draht stellt Lord Rayleigh folgende Ausdrücke auf:

$$P' = P - \mu l \left\{ \frac{n^2 l^2 \mu^2}{48 W^2} - \frac{13}{8640} \frac{n^4 l^4 \mu^4}{W^4} \dots \right\}$$

$$W' = W \left\{ 1 + \frac{1}{12} \frac{n^2 l^2 \mu^2}{W^2} - \frac{1}{180} \frac{n^4 l^4 \mu^4}{W^4} \dots \right\}$$

worin μ die Permeabilität, l die Länge, n die Schwingungszahl in 2π Sec., w der Widerstand für constanten Strom,

$$P = 2l \left(\log \frac{4l}{d} + \frac{\mu}{4} - 1 \right)$$

ist. Z. B. für einen 3 mm dicken Kupferdraht würde bei einer Schwingungszahl von 256 pro Secunde $(W'/W) = 1,00042$; bei 2560 W'/W schon $= 1,042$. P ändert sich viel weniger. Es ist P'/P bei 256 Schwingungen $= 1 - 0,0,915$, für 2560 Schwingungen $1 - 0,0,915$.

Für magnetische Drähte tritt diese Erscheinung wegen der grösseren Permeabilität in viel höherem Maasse auf.

Infolge dieser Aenderung von Widerstand und S. P. würde man bei der Brückeneinstellung nach der Maxwell'schen Methode für verschiedene Schwingungszahlen eines Sinusstromes verschiedene Einstellungen erhalten.

Dies bedingt eine principielle Schwierigkeit bei der Messung kleiner S. P., wenn man, wie üblich, als Stromquelle ein Inductorium benutzt, dessen primäre Leitung akustisch unterbrochen wird, und als Messinstrument das Hörtelefon oder ein Dynamometer anwendet. Ein solcher Inductionsstrom enthält nicht nur den Sinusstrom von der Periode der Unterbrechung, sondern nebenbei Ströme höherer Perioden, welche im Hörtelefon als Obertöne auftreten.

Die Nulleinstellung fällt für die hohen Töne nicht mit der des Grundtones zusammen. Das Minimum ist verwaschen, die Einstellung unsicher und fehlerhaft.¹⁾ In ähnlicher Weise wird auch die Einstellung mit dem Dynamometer beeinflusst.

Bei der folgenden Versuchsanordnung fällt diese Schwierigkeit fort. Es wurde zwar mit gewöhnlichen Wechselströmen, jedoch mit dem optischen Telefon gearbeitet. Dasselbe ist für den Ton, auf den es eingestimmt ist, mehr als 100fach empfindlicher, als für alle übrigen; die Töne höherer Perioden haben daher keinen Einfluss auf die Nulleinstellung, und man kann stets den Ausschlag Null erhalten, wenn der Strom der Grundperiode im Brückenweig verschwindet, auch wenn noch Ströme höherer Periode vorhanden sind.²⁾

Die Aenderung des Selbstpotentials durch die ungleiche Stromdichte ist, wie aus obiger Formel hervorgeht, bei der angewandten Schwingungszahl (256 in der Secunde) wenigstens bei nicht magnetischen Drähten verschwindend. Wir können daher zur Berechnung einfach die Formel

$$P = 2l \left(\log \frac{4l}{d} - 0,75 \right)$$

benutzen.

1) Je dünner der Leiter ist und je grösser sein specifischer Widerstand, desto geringer ist diese Dispersion der Töne. Jedoch wird dann wegen des grossen Widerstandes, wie oben erwähnt, die Methode ungenau.

2) Vgl. hierzu M. Wien, Wied. Ann. 42. p. 594 u. f. 1891.

Die experimentelle Anordnung.

Ein Wechselstrom, erzeugt durch ein Inductorium, dessen primäre Leitung durch eine schwingende Saite 256 Mal in der Secunde unterbrochen wurde, wurde durch eine Wheatstone'sche Brückencombination geschickt, in deren Brückenzweig sich ein optisches Telephon befand.

Zweig 1 der Brücke bestand ausschliesslich aus dem Leiter, dessen S. P. gemessen werden sollte.

Zweig 2 enthielt die Vergleichsrolle, deren S. P. bekannt und ca. 10—100 Mal so gross als das zu messende war.

Zweig 3 und Zweig 4: Widerstände mit zu vernachlässigender Selbstinduction. (Vgl. p. 773 Anmerkung.)

Die ganze Anordnung wurde so getroffen, dass erstens die nöthige Empfindlichkeit erreicht wurde, zweitens die grösste Fehlerquelle, die gegenseitige Induction der verschiedenen Brückenzweige, möglichst vermieden wurde.

Die Empfindlichkeit wurde durch geeignetes Transformiren des Hauptstromes und des Brückenzweiges erreicht.

Nach Rayleigh¹⁾ zeigt die Wheatstone'sche Brücke für Wechselströme die grösste Empfindlichkeit, wenn im Hauptzweige, wie im Brückenzweige der innere scheinbare Widerstand gleich dem äusseren ist, ganz analog den Bedingungen für constanten Strom.

In unserem Falle war der Widerstand der vier Brückenzweige, sowohl zwischen den Punkten *A B*, wie zwischen den Punkten *C D* sehr klein (vgl. Fig. 1). Demnach musste auch die secundäre Wicklung des Inductoriums im Hauptzweige einen sehr kleinen Widerstand besitzen und ebenso die primäre Wicklung des Inductoriums im Telephonzweige. Nähere Zahlenangaben folgen weiter unten.

Die gegenseitigen *Inductionswirkungen* wurden nach Möglichkeit vermieden, indem die angewandten Inductorien ringförmig gewickelt wurden, sodass nur wenig Kraftlinien austraten, und ferner, indem die Drähte entweder bifilar oder $\perp$ zu einander geführt wurden. Wo dies nicht möglich war, musste die Induction berechnet werden. Für gerade parallele Drähte führt die Rechnung zu verhältnissmässig einfachen

1) Rayleigh, Proc. of the Roy. Soc. 1891. p. 10.

Resultaten. Daher wurden die Drähte, wo eine $\perp$ oder bifilare Anordnung nicht möglich war, parallel geleitet. Da ferner die gegenseitige Induction mit der Entfernung abnimmt, so wurde durch möglichst weite Entfernung solcher unvermeidlicher paralleler Drähte die Induction so weit als möglich herabgemindert.

Im Folgenden sollen nun die einzelnen Zweige der Brücke genauer beschrieben werden, wie sie zur Messung des Selbstpotentials der 50 cm langen Drähte angeordnet waren.

Fig. 2.

Zweig 1. AC (vergl. Fig. 2 und 3). Im Zweige 1 befand sich, wie gesagt, ausschliesslich der 50 cm lange Draht, dessen

Fig. 3.

Selbstopotential gemessen werden sollte. Die Endpunkte mussten scharf begrenzt sein, sie durften z. B. nicht, wie bei Widerstandsmessungen, durch dicke Kupferklötze gebildet werden,

weil deren Selbstpotential nicht wie der Widerstand vernachlässigt werden darf.

Zu diesem Zwecke wurde von dem über 50 cm langen Draht durch fest aufgedrückte Messingschneiden ein Stück AC von genau 50 cm abgegrenzt, das den Zweig 1 bildete; die über die Schneiden hinausragenden Enden Aa und Cc gehörten zu den benachbarten Zweigen.

Zweig 2 (C, c, V, H, B) bestand aus der Vergleichsrolle, einem Widerstande, der continuirlich geändert werden konnte, und den Zuleitungen. Von c aus war senkrecht zu AC am Rande des Tisches, auf welchem die ganze Anordnung aufgebaut war, ein dicker Kupferdraht weggeführt zu einem Quecksilbernapfe, welcher den Contact mit der Vergleichsrolle V vermittelte; das andere Ende von V tauchte in einen zweiten Quecksilbernapf; von diesem aus ging zunächst parallel und gleich lang mit AC ein Draht ab, der dann bei H rechtwinklig abgebogen war und schliesslich in einer Quecksilberrinne α endete. Parallel mit dieser führt ein ca. 15 cm langer dünner Platindraht β zu dem Quecksilbernapfe B , wo *Zweig 2* endet. Quecksilberrinne und Platindraht sind durch einen Schleifcontact verbunden, so dass man durch Verschieben desselben die Länge des eingeschalteten Platindrahtes, also den Widerstand von *Zweig 2* continuirlich verändern konnte.

Zweig 3 (AaD) bestand aus einem bifilar gelegten Neusilberblechstreifen aD von ungefähr 0,12 S. E. Widerstand und aus dem Stücke Aa des Drahtes AC .

In *Zweig 4* (B, R, γ, D) befand sich die Hälfte eines Stöpselrheostaten R (0,1 — 10 S. E.) und als Zusatzwiderstand ein dünner Platindraht γ mit Quecksilberschleifcontact, der gestattete, den Widerstand continuirlich zu ändern. Da der Widerstand w_3 wegen seiner Kleinheit sich schlecht bestimmen und constant halten lässt, so wurde unmittelbar nach der Einstellung der Brücke 1, 2, 3, 4 das Widerstandsverhältniss w_3/w_4 mittelst einer neuen Wheatstone'schen Brückencombination 3, 4, 5, 6 gemessen (vgl. Fig. 2). Zu diesem Zwecke mussten die Verbindungen bei C unterbrochen und der Punkt E mit dem Telephon verbunden werden. Die *Zweige* 5 und 6 bestanden aus einem Messdrahtwiderstande mit Schleifcontact und der zweiten Hälfte des oben erwähnten Rheostaten R .

Der Telephonzweig: Das Telephon war, wie schon gesagt, nicht direct in den Brückenweig eingeschaltet, sondern der Strom wurde in geeigneter Weise transformirt. Das Inductorium, welches zum Transformiren benutzt wurde, hatte eine primäre Spule von 0,246 S. E. und eine secundäre Spule von 39 S. E. Widerstand; erstere war direct in den Brückenweig eingeschaltet, letztere mit dem Telephon verbunden. Im Einzelnen war die Anordnung folgende (vgl. Fig. 3): Vom Quecksilbernapfe *D* aus führte ein Draht senkrecht zur Tischebene in die Höhe zu der primären Wickelung des 180 cm über dem Tische auf einem Stativ angebrachten Inductoriums I_1 . Von dem anderen Ende der Wickelung ging ein Draht parallel mit *AC* ab, bog genau über *C* um und führte lothrecht nach *C*. (In der Figur ist der zu *AC* parallele Draht *FG* nicht senkrecht darüber, sondern daneben gezeichnet.) Hierdurch ist erreicht, dass der zu *AC* parallele Draht durch seine Entfernung nur geringe und berechenbare inducirende Wirkung auf Zweig 1 auszuüben vermag.

Die Stromzuführung: Im Hauptzweig befand sich ebenfalls ein Ringinductorium I_2 , dessen primäre Spule 0,163 S. E. Widerstand hatte. Die secundäre Wickelung war mit der Brückencombination verbunden und besass mit Rücksicht auf den sehr kleinen Widerstand in der Brücke nur 0,037 S. E. Widerstand. Die beiden Eintrittsstellen des Stromes in die Brückencombination (*AB*) liegen dicht zusammen, und daher ist es möglich, die von der secundären Wickelung des Inductoriums ausgehenden Leitungen bifilar bis zu den genannten Punkten zu führen. Der von zwei Bunsenelementen erzeugte Primärstrom wurde durch die schwingende Saite *S* geschlossen und unterbrochen. Saite und Elemente standen in einem ein Stockwerk tiefer gelegenen Raum, um directe Inductions- und akustische Wirkungen auf das Telephon zu vermeiden; von da aus wurden die Drähte bifilar bis zur Decke des Beobachtungszimmers und dann senkrecht hinunter zum Inductorium I_2 geführt.

Gegenseitige Induction.

Die oben geschilderte Anordnung ist besonders in der Absicht getroffen, dass die gegenseitige Induction möglichst klein und berechenbar ist. Aus der Fig. 3 ergibt sich, dass,

da der Zweig 4 wegen seines grossen Widerstandes ohne Einfluss ist, nur die parallelen Stücke der Zweige 1 und 2 und des Brückenzeuges (0) einander induciren. Eine einfache Berechnung zeigt, dass die Messung von p dadurch in der Weise beeinflusst wird, dass man statt $p_1 - p_1 - M_{01} - M_{02} + M_{12}$ misst, worin die M die betreffenden gegenseitigen Inductionscoefficienten zwischen den Zweigen 0, 1 und 2 sind. In unserem Falle ist M_{01} der gegenseitige Inductionscoefficient zwischen den parallelen Strecken AC und FG , M_{02} zwischen den || Strecken HV und FG und zwischen cC und FG . M_{12} zwischen den || Strecken HV und AC und zwischen den Strecken AC und cC , wo cC in der Verlängerung von AC liegt. Dieselben lassen sich berechnen, da der mathematische Ausdruck dafür

$$\iint \frac{ds ds' \cos \psi}{r}$$

sich auswerthen lässt. Für parallele gleich lange Strecken von der Länge l und dem Abstände a ergiebt die Integration für die gegenseitige Induction:

$$M = 2a - 2\sqrt{l^2 + a^2} + l \log \frac{\sqrt{l^2 + a^2} + l}{\sqrt{l^2 + a^2} - l}.$$

Liegt der Leiter in der Verlängerung des anderen und sind l und l' die bez. Längen, so wird

$$M = l \log \frac{l}{l+l'} + l' \log \frac{l'}{l+l'}.$$

Die zahlenmässige Berechnung ergiebt:

$$M_{01} + M_{12} - M_{02} = 11,4 - 0,8 - 9,3 = 1,3 \text{ cm.}$$

Diese 1,3 cm waren den Werthen hinzuzufügen, die bei der Messung der Selbstpotentiale der Drähte erhalten wurden. Diese berechnete Induction kann mit der wirklich vorhandenen nicht genau übereinstimmen, da es nicht möglich ist, die Drähte genau geometrisch zu führen und auch sonst z. B. durch Einschaltung der Inductorien und Rollen von den bei der Berechnung vorausgesetzten geraden Linien abgewichen wurde. Um nun festzustellen, wie weit der berechnete Werth der wirklich vorhandenen gegenseitigen Induction entsprach, wurde bei *einer* Drahtmessung die gegenseitige Induction dadurch stark vermehrt, dass der Draht des Brückenzeuges FG statt 195 cm nur 80 cm über dem Tisch ausgespannt wurde; dadurch

wurde $M_{01} + M_{12} - M_{02} = 19,0$ cm. Die Differenz der bei beiden Anordnungen für den gleichen Draht unter sonst gleichen Umständen erhaltenen Resultate betrug etwas über 1 Proc. Bei der grösseren Entfernung, in welcher sich bei der ersten Anordnung die sich gegenseitig inducirenden Zweige befanden, war der Einfluss dieser Fehlerquelle geringer und konnte nur Bruchtheile eines Procentes betragen.

Vergleichsrollen.

Es muss noch die Beschreibung und Messung der Vergleichsrollen hier eingefügt werden. Die Vergleichsrollen wurden so hergestellt, das sie etwa das 10 bis 100fache des zu messenden Selbstpotentials hatten, also etwa 10^4 bis 10^5 cm.

Es wurde eine ganze Reihe dieser Rollen hergestellt mit möglichst verschiedenem Widerstand, da jede Messung zur Controlle mit zwei verschiedenen Rollen gemacht wurde. Als Beispiel sei eine dieser Rollen genau beschrieben (4 der Tabelle). Sie war aus 2 mm dickem mit Seide übersponnenem Kupferdrahte gewickelt, 5 Lagen über- und 5 Lagen nebeneinander. Der äussere Durchmesser der Rolle war 3 cm, sodass die Länge des aufgewickelten Drahtes ungefähr 170 cm betrug.

Das Selbstpotential der Rollen wurde nach der Maxwell'schen Vergleichsmethode mit einer grösseren Rolle verglichen, deren Selbstpotential absolut bestimmt wurde. Diese absolute Bestimmung erfolgte nach einer von M. Wien angegebenen Methode ¹⁾ mit Wechselstrom und optischem Telephon und ergab als Mittel von drei Messungen:

$$1,039 \cdot 10^6 \text{ cm} \quad (\pm 0,0023 \text{ mittl. Fehler}).$$

Direct nach dieser Methode die Vergleichsrollen zu bestimmen, war nicht vortheilhaft, da der Widerstand der Rollen für die absolute Messung bekannt sein muss, der kleine Widerstand derselben aber leicht zu Fehlern Veranlassung geben konnte. Bei der Vergleichsmethode ist die Kenntniss des Widerstandes der Zweige 1 und 2 nicht erforderlich.

Bei dem Vergleich der Rollen mit der absolut gemessenen, wurde der Zweig 2 genau so wie bei der späteren Drahtmessung angeordnet, weil die Selbstinduction der Zuleitungen zur Rolle nicht vernachlässigt werden durfte.

1) M. Wien, Wied. Ann. 44. p. 701. 1891.

Für die einzelnen Rollen fand ich folgende Werthe:

No. 1	$p = 13484$ cm
„ 2	$p = 30825$ „
„ 3	$p = 31690$ „
„ 4	$p = 48133$ „
„ 5	$p = 59632$ „
„ 6	$p = 212300$ „

Gang eines Versuchs.

Zunächst wurde die Saite möglichst genau auf den Eigenton des Telephons eingestimmt, dann wählte man je nach dem Widerstande des zu messenden Drahtes eine passende Vergleichsrolle und änderte nach Einschaltung derselben in den Zweig 2 den Widerstand in Zweig 4 durch Stöpseln, bis der Ausschlag des Telephons ein Minimum zeigte. Darauf suchte man für irgend eine Stellung des Schleifcontactes β auf γ das Minimum. Dann wurde β ein wenig verschoben und wieder auf γ das Minimum gesucht. Je nach dem dasselbe kleiner oder grösser als das vorhergehende geworden war, musste β in gleicher oder entgegengesetzter Richtung weiter verschoben werden. Auf diese Weise fuhr man fort, indem man immer für eine Stellung von β auf γ das entsprechende Minimum aufsuchte, bis Null erreicht war. Je nach der Empfindlichkeit der Anordnung konnte man dann β noch eine kürzere oder weitere Strecke verschieben, innerhalb welcher man auf γ stets Null erhielt. Aus den beiden äussersten Stellungen von β wurde das Mittel genommen, β darauf eingestellt und auf γ der Nullpunkt bestimmt. Das Verhältniss w_3/w_4 wurde mit Hülfe der Zweige 5 und 6 der Brücke gemessen. Die mit der Messbrücke 5, 6 verbundene Klammer wurde auf den Draht bei A aufgesetzt, aus C sämtliche Drähte herausgenommen, in w_6 ein passender Widerstand gezogen und mit dem Schleifcontact auf der Messbrücke der Nullpunkt bestimmt. Damit war das Verhältniss $w_3:w_4$, also auch das der Selbstpotentiale $p_1:p_2$ gegeben. Da p_2 bekannt war, hatte man es nur mit w_5/w_6 zu multipliciren, um p_1 , das Selbstpotential des zu messenden Drahtes, zu finden.

Die mit ein und derselben Vergleichsrolle erhaltenen Werthe des Selbstpotential differiren je nach dem Wider-

stand des Drahtes um 1—5 pro Mille unter einander. Die Differenz der bei Anwendung verschiedener Vergleichsrollen gefundenen Werthe war etwas grösser, da die bei der Messung der Vergleichsrollen gemachten Fehler hinzutraten. Immerhin dürfte der Fehler das Resultats aller Messungen nur unter ungünstigen Umständen (bei sehr grossen oder sehr kleinem Widerstand der Drähte) 1 Proc. erreichen.

Beispiel.

5 mm starker Zinkdraht.

Im Zweige 2 befand sich Rolle 3 mit dem Selbstpotential 48130 cm (vgl. p. 782). Der Ausschlag des Telephons wurde ein Minimum, als im Zweig 4 10,6 S. E. gezogen waren. Die Nullstellung wurde erreicht, als 2,1 cm Platindraht in γ eingeschaltet waren; die äusserste Stellung auf β , wo der Ausschlag noch Null blieb, war $\gamma = 4$ cm.

Diesen Werthen entsprechen (in der Brücke 3, 4, 5, 6) $w_5 = 76,75$ cm und $77,14$ cm also Mittel $76,95$ und $w_6 = 170$ S. E. + $23,05$ cm Brückendraht. Hieraus, da 1 cm des Brückendrahtes = $0,02408$ S. E. war

$$p_1 = \frac{48130 \cdot 76,35 \cdot 0,02408}{170 + 23,05 \cdot 0,024} \text{ cm} = 522,9 \text{ cm.}$$

Die Messung mit einer zweiten Vergleichsrolle ergab 528,7. Also das Mittel beider Messungen 525,8. Dieser Werth enthielt noch den Fehler, welcher durch die gegenseitige Induction der verschiedenen Brückenzeige auf einander verursacht war und es waren daher nach obiger Berechnung noch 1,3 cm hinzuzufügen, sodass man im ganzen 527,1 cm erhielt.

Die Resultate.

Auf gleiche Weise wie der Zinkdraht wurden noch sieben andere Drähte gemessen, welche aus den nicht magnetischen¹⁾ Metallen Kupfer, Messing, Aluminium bestanden und verschiedene Durchmesser besaßen. Die nachfolgende Tabelle giebt die Resultate an. Zur Erläuterung derselben diene folgendes: Spalte 4 enthält die beiden mit den beiden Ver-

1) Das Selbstpotential von Drähten aus ferromagnetischen Metallen zeigte sich als in sehr hohem Maasse von der Stromstärke abhängig und bedarf einer besonderen Untersuchung.

gleichsrollen erhaltenen Werthe und das Mittel daraus. Durch Hinzufügen der von der gegenseitigen Induction herrührenden 1,3 cm, ergeben sich die Werthe der Spalte 5. In Spalte 6 steht das aus der Formel p. 775 berechnete Selbstpotential.

I	II	III	IV	V	VI	VII	
Material	Durch- messer	Vergleichs- rolle	Beobachtung	Re- sultat	Berech- nung	Diffe- renzin%	
Zink	5 mm	Nr. 4	522,99	525,8	527,1	524,1	+0,6
		„ 2	528,7				
Kupfer	1 „	„ 1	682,5	684,9	686,2	685,1	+0,16
		„ 3	687,3				
Kupfer	1,9 „	„ 2	622,0	624,6	625,9	620,6	+0,8
		„ 5	627,3				
Kupfer	3,15 „	„ 4	575,5	578,1	574,4	570,4	+0,7
		„ 6	570,7				
Kupfer	5 „	„ 6	521,4	521,4	522,7	524,1	−0,3
		„ 2	595,6				
Aluminium	2,4 „	„ 4	595,5	595,55	596,9	597,6	−0,13
		„ 2	582,2				
Aluminium	2,9 „	„ 4	581,0	581,6	582,9	578,6	+0,7
		„ 1	587,0				
Messing	2,4 „	„ 3	590,3	588,7	590,9	597,7	−1,3
		„ 3	590,3				

Einen Fehler über 1 Proc. zeigt nur der Messingdraht. Die Einstellung war hier wegen seines hohen Widerstandes vgl. p. 774) schon ziemlich ungenau.

Der Widerstand der gemessenen Drähte liegt zwischen $5 \cdot 10^6$ und $1,5 \cdot 10^7$ cm sec.⁻¹, also liegt das Verhältniss des S. P. zum Widerstand ($P/w = \text{Zeitconstante}$) zwischen 10^{-3} und $3 \cdot 10^{-5}$ sec. Es ist demnach der Beweis erbracht, dass die hier angewandte Methode empfindlich und genau genug ist, Selbstpotentiale von der Grössenordnung von 500 cm bis auf 1 Proc. zu messen bei Leitern, deren Zeitconstante innerhalb der genannten Grenze liegt. Ueber eine Reihe solcher Messungen wird in nächster Zeit von anderer Seite berichtet werden.

Schliesslich möchte ich nicht verfehlen, Hrn. Dr. Wien für seine gütige Unterstützung, sowie Hrn. Prof. Dr. Röntgen für das Interesse, das er stets meiner Arbeit zu theil werden liess, meinen besten Dank auszusprechen.

Würzburg, Phys. Inst. d. Univ. Juli 1894.