7. *Über Messungen hoher Spannungen;* *von E. Voigt.*

(Auszug aus der Würzburger Inaugural-Dissertation.)

1. Die Arbeit beschäftigt sich mit einer Methode, welche Spannungen bis 100000 Volt mit 1—2 Proz. Genauigkeit zu messen gestattet. Das Verfahren kann ohne Bedenken auf Messungen noch höherer Spannungen ausgedehnt werden, doch standen mir solche über die angegebene Grenze hinaus nicht zur Verfügung, so daß ich in dieser Richtung auch keine Versuche machen konnte. Die großen experimentellen Schwierigkeiten bei Arbeiten mit hohen Spannungen beginnen mit etwa 50000 Volt, denn bei dieser Spannung treten an allen Unebenheiten der Apparate und den immer gefährdeten Stellen der Isolationsmittel bedeutende Verluste durch Ausstrahlung und Oberflächenleitung ein; als notwendige Folge dieses Übeldes ergibt sich die Forderung, von einem Meßinstrument, das ja der Natur der Sache nach u. a. immer dünne und daher in elektrischer Beziehung gefährdete Metallbestandteile hat, die hohen Spannungen fernzuhalten, ihm also nur einen bestimmten Teil der ganzen Spannung zuzuführen.

Das Prinzip der Spannungsteilung, zu dem diese Überlegung führt, läßt zwei Ausführungen zu, nämlich Teilung durch vorgeschaltete Kondensatoren, und Teilung durch Herstellung eines Spannungsabfalles an einem Widerstand. Das erstere Verfahren ist schon öfters angewendet worden, bislang ohne großen Erfolg, von dem zweiten habe ich Gebrauch gemacht.

2. Bei der praktischen Ausnützung dieses Prinzipes schafft schon die erste Frage nach einem geeigneten Widerstands-

material große Schwierigkeiten; leider sind noch alle Bemühungen nach einem festen Widerstandsmaterial, das konstante Werte von Millionen Ohm liefert, erfolglos geblieben. Ich benützte zu meinen Versuchen ein Material, das in der gegenwärtigen physikalischen Meßtechnik im allgemeinen nicht zu präzisen Messungen benützt zu werden pflegt, nämlich Holz. Das Holz besitzt allerdings einen großen Temperaturkoeffizienten; trägt man jedoch dafür Sorge, daß der Holzstab — in dieser Form kam das Holz zur Verwendung — ein vollständig gleichmäßiges Gefüge, also etwa pro 1 cm Länge den gleichen Widerstandswert und überall gleiche Temperatur hat, so fällt dieser Einfluß vollständig heraus, denn zur Messung wird nicht ein Absolutwert, sondern nur ein Verhältnis zweier Längenteile desselben Holzstabes gefordert. Heißt das am unbekannten Potential V anliegende Ende des Stabes A , das andere an Erde liegende Ende B und ist außerdem ein Zwischenpunkt C gegeben, an dem die Spannung V_1 elektrometrisch gemessen werden kann, so ist die gesuchte Spannung V

$$V = V_1 \frac{A B}{B C}.$$

Sehr brauchbar hat sich Ahornholz erwiesen, das mehrere Jahre gelagert hatte; es wurde auf der Hobelmaschine auf den überall gleichen Durchmesser von 7 mm gebracht und zur Vermeidung von Spitzenwirkung sauber poliert. Ausgesuchte Stäbe dieser Art waren so homogen, daß zwischen den durch Längenmessung und dem elektrisch gefundenen Verhältnis AB/BC nur Unterschiede von 5 Proz. auftraten. Mit solchem Stäbe operierte ich zunächst in freier Luft; bald überzeugte ich mich aber, daß an der Seite des hohen Potentials durch Ausstrahlungen an die Luft, die durch influenzierende benachbarte Körper noch verstärkt wurden, beträchtliche Verluste sich einstellten, welche das Meßverhältnis in ganz unkontrollierbarer Weise beeinflussten. Zur Vermeidung dieser Verluste wurde deshalb der ganze Stab (120 cm Länge und 0,7 cm Durchmesser) in ein Dielektrikum eingebaut, aus dem nur die Zuleitungen herausragten. Zugleich wurde dadurch der Stab äußeren Einflüssen vollständig entzogen, und es bestand nur die Gefahr, daß infolge der Stromwärme, die der Holz wider-

stand selbst lieferte, dieser durch höhere Temperaturen sein Widerstandsverhältnis doch noch in unliebsamer Weise ändern könnte; ein ideal gleichmäßiges Holz ist natürlich nicht zu beschaffen. Das Experiment lehrte, daß die Änderungen des Widerstandsverhältnisses in praktisch als bedeutungslos anzusehenden Grenzen blieben; selbst nach Dauerversuchen betrugen die Abweichungen des Verhältnisses von seinem Anfangswert maximal 4 Proz.

3. Die Einbettung des Holzstabes in ein Dielektrikum vollzog sich nicht ohne Schwierigkeiten. Das Paraffin, das hierbei benützt wurde, hat ja die wenig willkommene Eigenschaft, beim Erstarren Blasen zu bilden; namentlich an dem Holzstabe selbst traten ganze Hohlräume auf. Sollte die Einbettung überhaupt Sinn haben, so war natürlich wegen der möglichen Ausstrahlungsverluste auf ein ganz gleichmäßiges Anliegen des Paraffinmantels Gewicht zu legen. Stundenlang dauerndes Nachgießen von heißem Paraffin zu dem eben erstarrenden und ebenso lang dauerndes allmähliches Abkühlen in einem Raume von etwa 40° C. brachten durchaus keinen besseren Erfolg. Erst ein Zusatz von reinem Bienenwachs beseitigte die Schwierigkeit in ganz einfacher Weise. Der Einguß der über Wasser geschmolzenen Isoliermasse (2 Teile Paraffin und 1 Teil Wachs) geschah ohne besondere Vorsichtsmaßregeln; der polierte Stab war dabei mit Seidenfäden in der Mitte des seiner Hauptrichtung nach horizontal aufgestellten Blechgefäßes befestigt.

Waren jetzt die Verluste an dem Holzstabe selbst beseitigt, so blieb doch noch als Quelle eines großen Verlustes die Stelle übrig, an der die Zuleitung von der Influenzmaschine erfolgte. Für die Genauigkeit des Widerstandsverhältnisses kam dieser Übelstand nicht in Betracht, dafür war er für Erreichung eines hohen Potentials um so wichtiger. Die Meßanordnung, die ja nicht Selbstzweck sein soll, darf natürlich nicht so viel Verluste herbeiführen, daß das Potential der Maschine schon hierdurch allein um ein Drittel geschwächt wird. Und diese Gefahr liegt bei den Messungen hoher Spannungen für die gewöhnlich gebrauchten Influenzmaschinen in der Tat in bedeutendem Maße vor. Ich konnte anfangs wegen der Ausströmungen an den Zuleitungen ein Potential von 70000 Volt

nur mit Mühe erreichen. Wie sorgfältig die Zuleitung hergestellt wurde, davon gibt Fig. 1 eine Anschauung; diese Figur gibt einen Teil des Längsschnittes durch den Widerstand wieder.

Die oben erwähnte Stelle C, an der die Spannung V_1 elektrometrisch gemessen wurde, bekam höchstens 22000 Volt; hier lag die Gefahr vor, daß sich eine Oberflächenentladung nach den abgeleiteten Gefäßwänden ausbildete; solche unerwünschte Entladung aber hätte hier einen Fehler bei unseren

Messungen verursacht und mußte soweit wie möglich durch Verlängerung des Entladungsweges beschränkt werden. Das gelang gut, als die Potentialabnahmestelle *C* in einer Weise hergestellt wurde, wie sie Fig. 2 zeigt (Querschnitt durch den Widerstand). Die mit *W* bezeichneten Paraffinteile sind nachträglich aufgeschmolzene Wände und bilden einen vier-eckigen Kasten, in dessen Bodenmitte das $1\frac{1}{2}$ cm weite Loch zur Potentialabnahmestelle sich befindet. In den Figuren, in denen übrigens die Dimensionen durch Zahlen in Millimeter gekennzeichnet sind, ist die Zuleitung bez. Ableitung nicht direkt geschehen, sondern durch Vermittelung von Kappen, von denen eine in Fig. 3 noch be-

Fig. 2.

sonders dargestellt ist. Die Kappe kann durch die Schraube *a* fest an den Holzstab gepreßt werden, der Metallstift *k* hat den Zweck, die kleineren stündlichen Temperaturschwankungen ab-zudämpfen. Ohne den Stift könnten leicht die benachbarten Teile des Holzstabes eine andere Temperatur als die weiter entfernten

Fig. 3.

annehmen, damit aber wäre das Widerstandsverhältnis geändert. Nachdem Widerstand und Zuleitungen vollständig in ein schützendes Dielektrikum eingeschlossen waren, konnte nunmehr annähernd ein Potential von 100 000 Volt erreicht werden, die Verluste durch die Meßanordnung waren so gering, daß man an die isolierte Zuleitung, die unter 100 000 Volt Spannung stand, ruhig die Hand legen konnte, ohne daß das Elektrometer eine

wesentliche Verringerung seines Ausschlages gezeigt hätte. Ein für die Richtigkeit des Widerstandsverhältnisses in Betracht kommender Verluststrom durch das Paraffin hindurch nach den Gefäßwänden konnte von einer Größenordnung, die durch Benützung eines Siemensschen Spiegelgalvanometers von $5 \cdot 10^{-10}$ Amp./Skt. Empfindlichkeit gegeben war, nicht festgestellt werden. Da der Strom durch den Meßwiderstand selbst minimal 10^{-6} Amp. betrug, waren Bedenken in der angegebenen Richtung nicht zu erheben.

4. Als Meßinstrument, das die Spannung V_1 elektrometrisch zu messen hatte, diente ein Heydweillersches Spiegelelektrometer, das ich mir nach Heydweillers Angaben¹⁾ mit geringen Änderungen hatte bauen lassen. Dieses Instrument hat den Vorzug guter Dämpfung und weist, was gerade für meine Meßmethode wichtig war, infolge der verhältnismäßig kleinen Oberfläche und runden Gestaltung aller Einzelteile einen geringen Ausstrahlungsverlust auf. Die Eichung geschah mit Hülfe des absoluten Schutzringelektrometers; hierbei wurde der Zeiger der Wage, an deren einem Ende die bewegliche Platte aufgehängt war, in die untere Hälfte des Gesichtsfeldes des Fernrohrs gespiegelt, mit welchem das Spiegelelektrometer beobachtet wurde. Beide Instrumente waren elektrisch verbunden und zunächst auf ein höheres Potential gebracht als den aufliegenden Gewichten des absoluten Elektrometers entsprach. Durch allmähliche Potentialerniedrigung wurde schließlich ein Punkt erreicht, wo an der Wage Gleichgewicht und sofort darauf ein Ausschlag der Zunge stattfand. Der in diesem Momente herrschende Ausschlag des Spiegelelektrometers, die aufliegenden Gewichte der Wage und die geometrischen Abmessungen des absoluten Instrumentes gestatten den Reduktionsfaktor des Spiegelelektrometers zu messen. Der Faktor war nicht für die ganze Skala konstant, sondern mußte für Ausschläge von 100—350 Skt. punktweise bestimmt werden. Außerdem wurde mit mehreren Plattenabständen des absoluten Instrumentes gearbeitet, so daß der Einfluß von Beobachtungsfehlern ermittelt werden konnte. Eine graphische Darstellung (Skalenteile als Ordinaten und Werte

1) A. Heydweiller, Wied. Ann. 48. p. 110. 1893.

des Reduktionsfaktors als Abszissen) gab ein Bild über die Genauigkeit der Messungen in sich. Es ergab sich, daß der Reduktionsfaktor als auf 1 Proz. genau anzusehen war. Die maximale direkt zu messende Spannung betrug, wie schon erwähnt, 22000 Volt.

5. In Fig. 4 stellt $ABCD$ den Holzwiderstand dar, B und C sind Potentialabnahmestellen, das Elektrometer, dessen Isolationswiderstand d ist, liegt augenblicklich an C , die Teile des Widerstandes sind mit a, b, c bezeichnet, der Widerstand d des Elektrometers bildet einen Nebenschluß zu $(a + b)$; da dieser Widerstand selbst 10^9 Ohm hatte — der ganze Widerstand AD hatte 10^{10} Ohm —, so konnte unter Umständen die

Fig. 4.

Größe von d zu Korrekturen Veranlassung geben und mußte deshalb bestimmt werden. Die Bestimmung geschah durch Beobachtung des zeitlichen Verlustes einer Ladung, die dem Elektrometer mitgeteilt wurde, eine Methode, die deshalb vorteilhaft erschien, weil sie nachher beim Gebrauch des Meßwiderstandes mit Hülfe einer einzigen Ausschaltung und ohne jeden Nebenapparat beliebig oft benützt werden konnte. Bei der ersten Messung erscheint freilich das Verfahren umständlich, weil zunächst die Kapazität c des Instrumentes bekannt sein muß; denn ist w der Isolationswiderstand und sinkt das Potential in der Zeit t vom Werte v_1 auf den Wert v_2 , so ist

$$w c = \frac{t}{\log_{\text{nat}} \frac{v_1}{v_2}}.$$

Es wurde nun eine kleine Zusatzkapazität c_2 , deren Wert nach der Harmsschen Methode¹⁾ bestimmt wurde, und deren Widerstand w_2 durch Spannungs- und Strommessung (mit

1) F. Harms, Physik. Zeitschr. 4. p. 11. 1903. Hr. Harms war selbst so freundlich, mir die Messung mit seinen Apparaten auszuführen.

10000 Volt) festgestellt wurde, zum Elektrometer angeschaltet. Aus den Beobachtungen mit angeschalteter Zusatzkapazität (Werte w_2 , c_2 , t_2 , v_1' und v_2') und nicht angeschalteter Zusatzkapazität (Werte t_1 , v_1' und v_2') läßt sich w nach der leicht zu erhaltenden Formel

$$w = w_2 \frac{t_2 \log \frac{v_1'}{v_2'} - t_1 \log \frac{v_1''}{v_2''}}{\log \frac{v_1'}{v_2'} \left(w_2 c_2 \log \frac{v_1''}{v_2''} - t_2 \right)}$$

berechnen. w ergab sich also direkt; c wurde auch bestimmt, weil eben der späteren Kontrolle wegen die Benützung der ersten Formel erwünscht war.

Es wurde gefunden

$$c = 8 \cdot 10^{-11} \text{ Farad,}$$

$$w = 3 \cdot 10^{12} \text{ Ohm.}$$

Der angegebene Wert für w war der kleinste, der beobachtet wurde, meist hielt sich w auf einer Höhe von $2 \cdot 10^{13}$ Ohm.

6. Es war das Nächstliegende, das Widerstandsverhältnis auf galvanometrischem Wege durch Messung der Absolutwerte der einzelnen Teile festzustellen. Spannungs- und Strommessung lieferten den Widerstand als Quotienten; die erstere geschah mit einem Deprezinstrument von Dr. Rudolf Franke & Co. in Hannover, die letztere mit dem schon erwähnten Spiegelgalvanometer von Siemens & Halske. Die Empfindlichkeit des Galvanometers wurde für verschiedene Ausschläge sorgfältig bestimmt, so daß die Instrumente für sich eine Genauigkeit von 1 Proz. erlaubt hätten. Der Versuch brachte jedoch Resultate, die um mehr als 5 Proz. voneinander abwichen.

Die drei Widerstände DC , CB , BA kann man offenbar in verschiedener Weise messen, je nachdem man sie einzeln oder summiert bestimmt. Man erhält so die Möglichkeit zur Kontrolle der Messung in sich. Alle möglichen Permutationen ließen sich nicht ausführen, da teilweise die Ausschläge zu klein wurden. Es wurde für das Verhältnis $AD/AB = 4,83$ und $4,13$ gefunden, für das Verhältnis $AD/AC = 2,27$ und $2,10$, die entsprechenden Mittel wären $4,48$ und $2,18$. Die Abweichungen mögen ihre Ursache in Polarisationen, Kontaktpotentialen etc. haben; die gebrauchte Meßspannung betrug

70 Volt; erweckte elektromotorische Kräfte von 1—2 Volt in summa machen da natürlich schon Beträchtliches aus.

Die Bedenken gegen diese Methode wurden noch durch die Überlegung verstärkt, daß ein 1000 mal $\left(= \frac{70\,000}{70}\right)$ stärkerer Strom den Widerstand trotz verhältnismäßig gleichmäßigen Holzmaterialies doch noch in unliebsamer Weise verändern könnte. Ich suchte deshalb nach einem Verfahren, mit einer noch direkt meßbaren Hochspannung von etwa 20000 Volt das Verhältnis direkt bestimmen zu können. Man könnte daran denken, den Holzwiderstand bei *A* nicht direkt mit der Erde zu verbinden, sondern den Strom erst durch ein Galvanometer zu schicken und zu messen. Ich machte in dieser Richtung auch Versuche, doch waren auch hier durch die Schwierigkeit, das Potential konstant zu halten und durch die Erwärmung der Widerstände die Genauigkeitsgrenzen ziemlich weite. Dagegen konnte ich mit einem anderen Verfahren eine Genauigkeit von 1 Proz. erzielen. Ich benützte hierbei das absolute Elektrometer als Hilfsmittel, um eine willkürlich genommene Spannung von etwa 20000 Volt nach Belieben oft und genau zu erkennen. Das Elektrometer brauchte dazu nicht sorgfältig justiert zu werden, da es für eine Meßreihe immer dasselbe Potential anzeigte, dessen absolute Größe gleichgültig war. Es ließe sich deshalb für diesen Zweck das Instrument unter Umständen durch einen ganz einfachen Apparat ersetzen.

In Fig. 5 ist eine Skizze der gesamten Anordnung gegeben.

Der Meßwiderstand *W* ist mit der Influenzmaschine *J* durch die Zuleitung *Z* verbunden. Der Nebenschlußmotor *L* (70 Volt Spannung) treibt die Influenzmaschine an. — *E* ist eine Kapazität von 600 cm, an die noch eine Funkenstrecke angeschaltet werden kann. Das Spiegelelektrometer mit Schutzzylinder wird durch *F* angedeutet, während *G* das absolute Plattenelektrometer bedeutet, welches links neben dem Beobachter erschütterungsfrei aufgestellt ist. Zur Rechten des durch Fernrohr *H* schauenden Beobachters befindet sich ein Tischchen *K*, von dem aus mittels Fäden Ausschaltungen und Regulierungen vorgenommen werden können. Auch be-

findet sich hier ein Ruhstratscher Schleifwiderstand von 60 Ohm, durch den die Geschwindigkeit des Elektromotors geregelt werden kann.

B und *C* sind zwei Potentialabnahmestellen vom Meßwiderstande. In ihrer Nähe befinden sich die Kontakte *M* und *N*. Fig. 6 stellt einen solchen Kontakt dar. *M* ist durch Leitung in $1\frac{1}{2}$ cm weiten Glasröhren mit dem Spiegelelektrometer *F* fest verbunden, ebenso *N* mit der anderen Kontaktstelle *O*. Mittels gebogener Leiter, die in Glasröhren und Paraffin sauber eingelegt sind, können zwischen *M*, *N*, *B* und *C* beliebige Schaltungen vorgenommen werden.

Fig. 6.

Kontaktstelle *O* ist fest mit Kapazität *E* verbunden und kann ferner mit Kontakt *P* und damit mit dem Plattenelektrometer, außerdem aber mit dem Konduktor *R* der Influenzmaschine durch lösbare Leiter verbunden werden. *Q* ist eine Funkenstrecke, an der später verschiedene Versuche gemacht wurden. Die spannungsliefernde Quelle war eine zweiplattige Holtzsche Maschine. Wie die Schwierigkeiten, die ein häufigeres Versagen der Maschine herbeiführten, behoben wurden, sei hier übergangen; von Interesse dürfte jedoch noch folgendes sein.

Schon bei geringer Geschwindigkeit einer Glasscheibe ($\frac{200 \text{ Umdrehungen}}{\text{Min.}}$) wurden 60000 Volt erzeugt; doch erst mit

$\frac{500 \text{ Umdrehungen}}{\text{Min.}}$ beider Scheiben, also mit der fünffachen Elektrizitätsmenge ließ sich das Maximum mit 94000 Volt gewinnen; da die Elektrizitätsmenge und also auch das Potential der Umdrehungszahl annähernd proportional ist, so geht aus den mitgeteilten Zahlen hervor, welch gewaltige Verluste mit Erhöhung der Spannung auftreten, und zwar nur an der verhältnismäßig kleinen Oberfläche des Konduktors und Zuleitungen. Nur außergewöhnliche Vorrichtungen, wie etwa die 60 plattige

Töplersche Maschine, dürften beträchtlich über 100 000 Volt liegende Potentiale zu erreichen gestatten.

Zur Bestimmung des Meßverhältnisses war nun O für die Dauer der ganzen Messung mit P und R in Verbindung, so daß das Plattenelektrometer immer direkt an der Influenzmaschine lag.

Die Messung zerfiel in folgende Phasen:

1. N mit M verbunden; Ausschlag am Spiegelelektrometer; Potential durch Reguliervorrichtung allmählich erniedrigt, bis Wage ausschlägt. Ausschlag α .

2. Verbindung $M-N$ gelöst; M mit C verbunden, Potential wieder erniedrigt, bis Ausschlag β bei Umkippen der Wage.

3. Wiederholung von 1. zur Kontrolle, ob nichts verändert.

Wären die Spiegelelektrometerausschläge genau proportional den Quadraten der Spannungen, so wäre das Widerstandsverhältnis AD/AC

$$\frac{AD}{AC} = \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}}.$$

Der Abweichungen halber von der Proportionalität empfahl sich die Umrechnung auf Volt.

Nach Messung 2 kann man noch das Verhältnis AD/AB und durch Kurzschließen des Widerstandes CD mittels der Verbindung $N-C$ auch das Verhältnis AC/AB bestimmen.

Dem Ausschlag α wurde ein möglichst großer Wert gegeben; er betrug meist zwischen 320 und 350 Skt., entsprechend einer ungefähren Spannung von 20 000 Volt. Infolge der quadratischen Proportionalität werden die Ausschläge β immer verhältnismäßig klein; für Verbindung $C-M$ wurde er unter den gewählten Verhältnissen ca. 70 und für Verbindung $M-B$ nur noch 17 Skt. Vergrößerung des Ausschlages wäre nur durch Verkleinerung des Widerstandsverhältnisses AD/AX zu erreichen; für Erreichung einer Meßgrenze von ca. 100 000 Volt aber mußte bei dem gegebenen Elektrometer das Verhältnis AD/AB gegen 4,5 betragen. Hauptsächlich zur besseren Messung des Verhältnisses AD/AB , aber auch zur Messung relativ kleinerer Potentiale wurde deshalb das Verhältnis AD/AC noch eingeschoben.

Ist

$$\frac{A D}{A C} = \frac{a + b + c}{a + b} = m$$

und

$$\frac{A C}{A B} = \frac{a + b}{a} = n,$$

so folgt durch Multiplizieren

$$\frac{A D}{A B} = \frac{a + b + c}{a} = (m n).$$

m ist ohne weiteres zu bestimmen, n nach Kurzschließen des Widerstandsteiles CD ; jetzt erhielt man für n auch einen Ausschlag von ca. 75 Skt.

7. Der Einfluß der Parallelschaltung von d zu $(a + b)$ wurde in folgender Weise klargestellt. Beim Messen des Verhältnisses m wird in Wahrheit bestimmt

$$m = \frac{\frac{(a + b) d}{(a + b) + d} + c}{\frac{(a + b) d}{(a + b) + d}}.$$

Daraus folgt durch Umformen

$$m = \frac{a + b + c}{a + b} + \frac{c}{d}.$$

Analog folgt für n

$$n = \frac{a + b}{a} + \frac{b}{d}.$$

Multiplizieren wir, wie oben, die beiden letzten Gleichungen, so ist also durch den Versuch ermittelt

$$(m n)_1 = \frac{a + b + c}{a} + \frac{a + b}{a} \frac{c}{d} + \frac{a + b + c}{a + b} \frac{b}{d} + \frac{b c}{d^2}.$$

Es war nun

$$a = 2,5 \cdot 10^9 \text{ Ohm,}$$

$$b = 2,6 \cdot 10^9 \text{ „}$$

$$c = 2 \cdot 10^9 \text{ „}$$

$$d = 3 \cdot 10^{12} \text{ „}$$

Unter Vernachlässigung des Gliedes $b c / d^2$ folgt deshalb

$$(m n)_1 = \frac{a + b + c}{a} + 2 \frac{b + c}{d} \text{ (nahezu).}$$

Würde man jetzt $(m n)$ *direkt* durch Messung bestimmen — wie man es nachher auch zu Messungen braucht —, so wäre gemäß dem Obigen zu setzen

$$(m n) = \frac{a + b + c}{a} + \frac{b + c}{d}.$$

Die Differenz zwischen $(m n)_1$ und $(m n)$ ergibt den Fehler

$$(m n)_1 - (m n) = \frac{b + c}{d} \\ = 3 \cdot 10^{-3},$$

$(m n)$ selbst beträgt ungefähr 4,5; der eingesetzte Wert von d ist der ungünstigste, der bei feuchtem Wetter beobachtet wurde; selbst ein zehnmal kleinerer Wert von d würde erst eine Änderung des Resultates von $(m n)$ um 1 Proz. herbeiführen. Außerdem würde man in solchem Falle noch eine Korrektion einführen können, da es ein leichtes wäre, d zu bestimmen.

Die Bestimmung von d in Absatz 5 ist, wie ein Versuch zeigte, auf etwa 30 Proz. genau; diese Genauigkeit würde aber vollständig hinreichend sein, denn selbst in dem angenommenen Falle eines zehnmal kleineren Wertes von d würde der Einfluß der Bestimmung von d nur $0,01 \cdot 0,3 = 0,003$, d. h. $\frac{1}{3}$ Proz. ausmachen.

8. Um eine Anschauung davon zu geben, wie genau gearbeitet werden konnte, gebe ich in Tab. 1 eine Messungsreihe, wie sie anfangs oft gemacht wurden, um über das Meßverfahren Erfahrungen zu sammeln.

Unter D , C , B_2 sind die Potentiale bei den bezüglichen Verbindungen mit M zu verstehen, auch für B_1 gilt das, nur mit dem Unterschiede, daß DC kurzgeschlossen war.

Tabelle 1.

<i>D</i>		<i>C</i>		<i>B</i> ₁	
Skalen- teile	Volt	Skalen- teile	Volt	Skalen- teile	Volt
355	21 100	75,4	9 960	78,5	10 160
356		75,4		78,5	
355,5		75,4		78,5	
356					
<i>C</i>		<i>D</i>		<i>B</i> ₂	
74,6	9 920	354,1	21 050	17,8	4 840
74,8		354,2		17,8	
74,8		354,2		17,8	
74,8					

Für D und C sind je zwei Aufnahmen gemacht, die maximale Abweichung beträgt 0,4 Proz. Es berechnet sich

$$m = \frac{21\,075}{9940} = 2,120.$$

$$n = \frac{21\,075}{10\,160} = 2,075.$$

Daraus

$$\begin{aligned}(mn) &= 2,120 \cdot 2,075 \\ &= 4,40.\end{aligned}$$

Die direkte Bestimmung lieferte

$$(mn)_1 = \frac{21\,075}{4840} = 4,36.$$

Die direkte Bestimmung von $(mn)_1$, obgleich zur Berechnung unnötig, wurde öfters gemacht, weil sie ein gutes Mittel war zur Kontrolle über die ganzen Messungen. Größere Abweichungen als $1-1\frac{1}{2}$ Proz. durften nicht stattfinden.

Anstatt des Plattenelektrometers kann man zur Fixierung einer bestimmten Hochspannung auch Funken benützen an einer solid montierten Funkenstrecke. Auch hiermit kann man eine verhältnismäßig hohe Genauigkeit in der Eichung des Widerstandsverhältnisses erreichen. Während der Vorversuche wurden einmal zwei Widerstandsverhältnisse mit Hilfe des Plattenelektrometers, darauf dann mit Hilfe von Funken bestimmt.

Mit Plattenelektrometer bestimmt 2,184 bez. 2,856

„ Funken „ 2,16 „ 2,83

Differenz 1 % bez. 0,9 %

Ein Arbeiten mit Funken erfordert eine größere Zahl von Einzelmessungen, da diese größere Abweichungen voneinander zeigen können, als die Messungen mit dem absoluten Elektrometer; bei dem letzteren genügten 2 bis 3 Einzelbeobachtungen in den meisten Fällen.

Nach Fertigstellung des definitiven Widerstandes war es zunächst wichtig festzustellen, ob sich das Widerstandsverhältnis

bei Messungen von mehreren Stunden infolge Erwärmung änderte. Zu diesem Zweck wurde mehrere Stunden lang ein Strom unter einer Spannung von 60000 Volt durch den Widerstand geschickt, und in Zwischenräumen wurde schnell das Widerstandsverhältnis bestimmt. Da die Isoliermasse auch ein guter Wärmeisolator, behielt der Holzstab für kurze Zeit die höhere Temperatur, die etwa bei dem vorher durchgeschickten, stärkeren Strom auftrat, bei; eine schnell hinterher erfolgende Messung hätte also auch etwaige Veränderungen durch diese Temperatur nachweisen müssen; die Veränderungen, die auf diese Weise gemessen wurden, waren meist vernachlässigbar, die Erwärmung noch zu gering.

Tabelle 2.

	Werte von	m	$(m n)$
Zu Beginn der Untersuchung	2,12	4,40	
Nach 1 Stunde Stromdurchgang	2,13	4,41	
„ 3 Stunden „	2,12	4,40	
Am nächsten Tage nach weiterem 6stündigen Stromdurchgang	2,13	4,41	

Das Mittel aus diesen Beobachtungen war 2,13 und 4,40, gültig für die Anfangsmessungen im Oktober; selbst für mehrere Stunden lang dauernde Messungen war das Widerstandsverhältnis genügend konstant.

Es blieb der Wunsch bestehen, noch direkt festzustellen, ob sich die Eichung der Meßwiderstände bei den hohen Spannungen änderte. Ein kleiner Holzwiderstand von $\frac{1}{5}$ der Länge des Meßwiderstandes, also von 23 cm ungefähr, der den gleichen Querschnitt und gleiche Beschaffenheit wie der Meßwiderstand besaß, wurde ganz genau wie dieser in Isoliermasse eingebaut und bei einer Spannung zwischen 5000 und 20000 Volt untersucht; der durch den Holzstab fließende Strom wurde mit einem Wiedemannschen Galvanometer gemessen. Die Stromstärke und der Spannungsabfall pro Zentimeter Länge des Holzstabes waren bei diesem kleinen Widerstand dieselben wie beim Meßwiderstand unter fünffach größerer Spannung.

Es ergab sich

Tabelle 3.

Volt	Strom in Skalenteilen α	$\frac{\text{Volt}}{\alpha}$	
5 470	42,5	129	
7 450	58	128	
10 330	80	129	Größte Abweichung:
12 850	101	127	129 - 123 = 6,
15 600	121	129	d. h. 4,7 Proz.
17 700	142	125	auf das Mittel 126.
20 220	165	123	
15 600	123	127	
9 870	77	128	

Unter genau denselben Versuchsbedingungen wurde jetzt dieselbe Messung wiederholt für den Meßwiderstand; dabei wurde die Spannung gemessen durch Verbinden der Punkte *M* und *B* mit Hülfe des bekannten Verhältnisses 4,40, dabei erhielt ich Tab. 4.

Die Zahlen dieser Tabelle sind Mittelwerte von je drei bis sechs Beobachtungen; es war schwierig, die hohen Spannungen genügend konstant zu halten. Die Messung war nur durchzuführen mit Assistenz eines zweiten Beobachters zur Beobachtung des einen Instrumentes.

Tabelle 4.

Volt	Strom in Skalenteilen α	$\frac{\text{Volt}}{\alpha}$	
92 800	231	40,2	Größte Abweichung:
73 300	181	40,5	41,9 - 40,2 = 1,7,
49 800	121	41,2	d. h. 4,3 Proz.
38 700	93	41,6	auf das Mittel 40,0.
28 100	67	41,9	

In Tab. 3 und 4 ist der Sinn der Abweichung des Quotienten $\frac{\text{Spannung}}{\text{Strom}}$ von der Proportionalität mit größer werdender

Tabelle 5.
Kilovolt. $r = 2,5$ cm.

Abstand der Kugeln cm	Heyd- weiller- Paschen	Eigene Messungen	Differenz	
0,1	32,7	32,0	2,2 %	Die größere Abweichung bei der ersten Messung erklärt sich ohne Zwang durch die größere Ungenauigkeit bei der Einstellung kleinerer Abstände.
0,12	33,4	37,8	1,6	
0,14	43,8	43,4	1	
0,16	48,6	48,1	1	

Die zwischen Kugeln verschiedener Radien ermittelten Funkenpotentiale sind in der Tab. 5 zusammengestellt. Die Messungen sind auf 2 Proz. genau, wie an verschiedenen Tagen angestellte Versuche bewiesen. Die mittlere Genauigkeit war sogar größer wie das folgende Beispiel, in dem je eine schlechte und eine gute Messung gegeben ist, erkennen läßt.

Kugelradius 2 cm. Abstand 2 cm.

5. November	57,4 Kilovolt	} Größte Abweichung 1,8 Proz.
6. „	57,3 „	
10. „	58,3 „	

Abstand 5 cm.

5. November	89,8 Kilovolt	} Größte Abweichung 0,5 Proz.
6. „	89,4 „	
7. „	89,6 „	

Tabelle 6.
Kilovolt. Radius r in cm.

Kugelabstand cm	$r = 1,0$ cm	$r = 2,0$ cm	$r = 2,5$ cm	$r = 3$ cm
1,2	35,4	38,0	38,0	37,8
1,4	39,7	43,4	43,4	43,4
1,6	41,4	47,5	48,1	48,4
1,8	—	51,5	53,5	54,5
2,0	—	54,5	57,7	58,7
2,5	—	61,4	67,0	69,6
3,0	—	66,7	73,0	78,0
3,5	—	70,6	78,2	84,2
4,0	—	73,6	82,4	89,4
4,5	—	75,7	86,0	93,8
5,0	—	77,9	89,6	—

Die Messungen von Funkenpotentialen in *festen Dielektrika* beziehen sich auf Glimmer, Paraffin, Hartgummi und Glas. Die Schwierigkeit bei diesen Messungen lag darin, daß die Funken über die Oberfläche der Dielektrika hinwegschlugen; ich benutzte im übrigen eine Anordnung, wie sie Almy¹⁾ beschrieben hat und wie sie in Fig. 7 abgebildet ist. Es stellte sich

Fig. 7.

heraus, daß selbst verhältnismäßig reine und homogene Materialien große Unterschiede bezüglich der Durchschlagsfestigkeit aufweisen; in Hinsicht auf praktische Bedürfnisse erschien es mir richtiger, wohl gute, aber durchaus keine besonders peinlich präparierte Materialien zu untersuchen.

Ich gebe hier nur ganz kurz die gefundenen Zahlen:

1. Glimmer, Plattendicke 0,2—1 mm, Durchschlagspotentiale 25—54 Kilovolt.

2. Paraffin (Schmelzpunkt 52°C.), für je 0,1 mm (bis 1,2 mm) Dicke Durchschlagspotentiale von 8000 Volt ± 40 Proz.

3. Hartgummi, Plattendicke 0,25—0,5 mm, Durchschlagspotentiale 22—31 Kilovolt.

4. Glas, a) gewöhnliches Plattendicke 1—5 mm, Durchschlagspotentiale 40—90 Kilovolt; b) Jenenser 386^{III}, Röhren von 0,4 mm Wandstärke, Durchschlagspotential 82 Kilovolt.

Zum Schluß sei noch erwähnt, daß zur Regulierung und allmählichen Erhöhung des Potentials eine Vorrichtung nach Fig. 8 angebracht war; diese Vorrichtung war namentlich für größere Elektrizitätsmengen viel brauchbarer als die gewöhnliche Spitzenanordnung. Sie besteht aus einem Holzwiderstand,

1) J. E. Almy, Ann. d. Phys. 1. p. 508. 1900.

der zur Herstellung eines bestimmten Widerstandes mit Graphit eingerieben wurde; ein federnd anliegender Bügel, der zur Erde abgeleitet war, gestattete verschiedene Längen und damit auch verschiedene Widerstandswerte einzuschalten.

10. Außer der in dieser Arbeit beschriebenen Meßmethode wurde noch eine zweite direkte Methode bei einer Reihe von Messungen untersucht, die jedoch kein brauchbares Resultat ergeben hat. Hierbei wurde das Spiegelelektrometer, das nachher mit Abänderung auch bei der definitiven Meßmethode benützt wurde, vollständig in gut isolierendes Öl untergetaucht. Schon bei verhältnismäßig kleinen Spannungen traten dabei im Öl Konvektionsströme nach den abgeleiteten Gefäßwänden ein, die zuerst immerhin noch eine Einstellung nicht hinderten; der Spiegel des Elektrometers konnte durch eine planparallele Glasscheibe, die in die Gefäßwand eingekittet war, durch das Öl hindurch beobachtet werden.

Mit steigendem Potential jedoch kam das Öl in wirbelnde, kochende Bewegung; eine korrekte Messung war nicht mehr möglich. Außerdem trat durch

diese Konvektionsströme ein derartiger Verlust ein, daß das zu erreichende Potential weit unter 90000 Volt blieb. Es wurden Versuche mit Terpentin, Petroleum und Paraffinöl gemacht; bei allen drei Materialien wurde dieselbe Erscheinung beobachtet. Auch die Erwartung, daß ein dickeres Öl sich günstiger verhalten würde, wurde nicht erfüllt; das an und für sich schon ziemlich dickflüssige Paraffinöl wurde bei einem Versuch durch aufgelöstes Paraffin noch zähflüssiger gemacht. Auch hier trat durch unerwünschte Bewegungen in der Flüssigkeit ein Mißerfolg auf, ganz ab-

Fig. 8.

gesehen davon, daß es mir nicht geglückt war, ein vollständig klares Material zu erhalten.

Die Vermutung lag nahe, daß in dem Öl suspendierte Fremtteilchen die Ursache der Strömung seien. Eine gewöhnliche Filtration durch Papier half jedoch nichts, wie ein Versuch zeigte; ich griff daher zur Filtration durch eine Tonzelle unter Druck.¹⁾ Dabei ließ sich Terpentin in praktisch anwendbarer Frist noch durch die Tonzelle pressen, dagegen ging der Prozeß mit Paraffinöl, selbst wenn es auf 50° erwärmt wurde, äußerst langsam vor sich, weshalb ich von Versuchen in dieser Richtung absehen mußte. Auch zeigte sich beim gereinigten Terpentinöl durchaus kein anderes Verhalten als vorher, trotzdem ein kleines Versuchsgefäß ganz sorgfältig mit gereinigtem Öl vorher ausgespült war und u. a. auch die Flüssigkeitsoberfläche durch eine darauf gegossene Schicht von festem Paraffin vollständig gegen Staubteilchen aus der Luft geschützt wurde.

Selbst wenn für die benützte kleine Menge Öls ein Erfolg erzielt worden wäre, würde es doch fraglich geblieben sein, ob auch bei Berührung mit einem großen Instrument, an dessen Oberfläche ja immer mikroskopisch kleine Fremtteilchen haften, die Flüssigkeit rein geblieben wäre. Auf jeden Fall aber würde eine Meßmethode, die solch peinliches und langwieriges Arbeiten erfordert, kaum für die praktischen Bedürfnisse des Laboratoriums empfehlenswert gewesen sein; dagegen haben wir in der oben beschriebenen Methode des Potentialabfalles ein sicheres und in Anbetracht der hohen Spannungen auch einfaches Verfahren zur Meßung solcher Spannungen gefunden.

Auch an dieser Stelle sei es mir gestattet meinem herzlichen Danke gegen Hrn. Prof. Wien für die lebenswürdige Anregung und Unterstützung bei den Arbeiten Ausdruck zu geben.

Würzburg, Physikalisches Institut, Februar 1903.

1) Ann. d. Phys. 7. p. 156. 1902.

(Eingegangen 23. Mai 1903.)