ÜBER DIE MESSUNG DER DICHTIGKEIT VAGABUNDIERENDER STRÖME IM ERDREICH.

Von F. Haber und K. Liese.

(Aus dem Chemisch-Technischen Institut der Hochschule in Karlsruhe.)

§ 1. Einleitung.

Die Untersuchung von Haber und Goldschmidt¹⁾ über den anodischen Angriff des Eisens durch vagabundierende Ströme im Erdreich und die Passivität des Eisens enthält einen Hinweis auf die Möglichkeit, die Dichtigkeit der Ströme im Erdreich zu bestimmen. Die hier mitgeteilten Versuche betreffen die experimentelle Ausbildung dieses Verfahrens und erläutern seine Anwendung in der Praxis, in Verbindung mit der Benutzung von Tastelektroden, wie sie Haber und Goldschmidt beschrieben haben. Ein Teil der zur praktischen Erzielung des Verfahrens in den Strassen von Karlsruhe unternommenen Arbeiten ist bereits von F. Haber im Journal für Gasbeleuchtung und Wasserversorgung mitgeteilt worden²⁾. Es erscheint zweckmässig, diese Angaben hier zu wiederholen, um daran den Bericht über das Ergebnis der Aufgrabungen anzuschliessen, bei denen die nach den Messungen als gefährdet bezeichneten Rohre in der Tat stark angegriffen gefunden wurden. Dagegen sind die allgemeinen technischen Betrachtungen, welche an jener Stelle gegeben sind, in diese Mitteilung nicht aufgenommen worden.

§ 2. Die Aufgabe der Untersuchung und die Messvorrichtung.

Wir haben es uns wesentlich angelegen sein lassen, ein Verfahren auszubilden, welches die Dichtigkeit elektrischer Ströme im Erdreich unmittelbar in der Nähe eiserner Rohrstränge in den Grenzen von 0,05 bis 1 Milliampère mit guter Genauigkeit zu bestimmen erlaubte. Es handelt sich dabei vorzugsweise um Ströme, welche aus dem Rohr in das Erdreich oder umgekehrt übertreten. Fliesst der positive Strom aus einem metallisch leitenden Eisenrohr in das elektrolytisch leitende Erdreich, so geht nach früherer Feststellung das Eisen als zweiwertiges Metall annähernd in dem durch das Faradaysche Gesetz gegebenen Umfange in Lösung. Fliesst ein solcher Strom etwa, wie es den Betriebsverhältnissen der Strassenbahnen in den Gross-

städten entspricht, 18 Stunden täglich, und beträgt die Dichtigkeit des aus dem Rohre austretenden Stromes auf das Quadratdecimeter 1 Milliampère, so wird bei vollkommen gleichförmigem Angriff jährlich 0,1 mm von dem Rohre theoretisch abgefressen. Ein solcher Angriff erscheint unbedingt gefährlich für den Bestand der Rohre, insbesondere da Ungleichförmigkeiten nie ausbleiben werden, welche bedingen, dass er an

Fig. 314.

einzelnen Stellen viel rascher, an anderen langsamer fortschreitet. Auf der anderen Seite wird man Stromdichten, und dementsprechend Anfrassungen, die mehr als zwanzigmal kleiner sind, praktisch als unerheblich ansprechen dürfen. Das Prinzip, das wir angewandt haben, stellt eine Umkehrung des gewöhnlichen Kupfer-, bzw. Silbercoulometers dar. Während für gewöhnlich der Strom durch metallische Zuführung zur Anodenplatte des Coulometers geleitet wird, von dort in den Elektrolyt übergeht und durch die Kathodenplatte und die mit ihr verbundene metallische Ableitung zur Stromquelle zurückkehrt, musste hier, wo Strom in dem elektrolytisch leitenden Erdreiche gemessen werden sollte, der Stromein- und der Stromaustritt von dem Erdreich in den Elektrolyten erfolgen und die Anoden- und Kathodenplatte des Coulometers direkt metallisch miteinander verbunden werden. Damit ergab sich die folgende, schon von Haber und Goldschmidt entworfene Fig. 314. Die beiden Coulometerplatten, welche durch eine starke Linie in der Mitte der Figur gekennzeichnet sind, liegen blank aneinander.

1) Z. f. Elektroch. **12**, 49 (1906).

2) Unter dem Titel: „Die vagabundierenden Strassenbahnströme und die durch sie bedingte Gefährdung des Rohrnetzes in der Stadt Karlsruhe i. B.“ (1906).

Die nach aussen gekehrten Seiten sind mit dem zu einer Paste verdickten Elektrolyt bedeckt und durch ein Blatt Pergamentpapier, das mit Glaubersalzlösung (10% krist. Salz) durchfeuchtet wird, von dem Erdreich getrennt. Die Platten sitzen in einer Ebonitfassung, welche ihrerseits in einen Holzrahmen eingelassen ist. Es wurden durchweg quadratische Holzrahmen benutzt, welche 1 qdm im Lichten frei liessen, während ihre Kantenlänge 15 cm betrug. Die Dicke des Rahmens belief sich auf 40 mm, so dass die mit Paste und Erdreich erfüllte Oeffnung auf jeder Seite rund 19,5 mm ausmachte. Die benutzten Platten waren von Kupfer oder Silber. Die Kupferplatten waren je 0,5 mm, die Silberplatten je 0,3 mm stark. Die Kantenlänge der Kupfer- und Silberplatten betrug 11 cm, so dass sie auf jeder Seite 5 mm tief in die enge Hartgummirinne, welche sie mit kleinem seitlichen Spielraum ausfüllten, hineinreichten. Mit den Platten wurde in die Hartgummirinne ein schmaler Gummistreifen an jeder der vier Plattenkanten als Dichtung eingeschoben. Dadurch wurde verhindert, dass die Flüssigkeit der Paste in die Hartgummifassung und zwischen die beiden Platten drang und Messfehler veranlasste. Um die Platten aus- und einführen zu können, war eine von den vier Seiten des Rahmens abnehmbar. Durch eine kleine Veränderung konnten diese Erdcoulometer auch als Erdampèremeter benutzt werden. Wurde nämlich zwischen die Platten ein Glimmerblatt gelegt, welches sie isolierte, und je ein isolierter Draht durch den Rahmen zu den beiden Platten geführt, so erlaubte ein mit diesen beiden Drähten verbundenes Galvanometer, direkt die Stromstärke zu messen. Wurden die Rahmen in dieser Art zur Strommessung verwendet, so war eine Entfernung der Platten aus den Rahmen zwecks Wägung offenbar nicht erforderlich. Deswegen konnten die Fugen zwischen Platten und Hartgummiführung mit isolierendem Lack dicht geschlossen werden, womit jede Gefahr gelegentlichen Eindringens des Elektrolyten zwischen die Platten beseitigt war. Ein solches Eindringen der Lösung würde hier, wo jede direkte, leitende Verbindung zwischen den Platten ausser der durch das Galvanometer, ausgeschlossen sein musste, die Messung ganz unbrauchbar gemacht haben. Die befriedigende Isolation der Platten liess sich stets dadurch leicht prüfen, dass ein feines Galvanometer keinen Ausschlag im Stromkreise einer Batterie gab, deren Pole an die beiden Platten gelegt wurden, wenn die von den Platten ausgehenden Drähte unverbunden waren.

Gelegentlich wurden kleinere Rahmen verwendet, welche bei ebenfalls quadratischer Form eine Fläche von 5×5 cm frei liessen. Sie boten jedoch keine Vorteile, während das kleinere Niederschlagsgewicht, das auf der kleineren

Fläche zu stande kam, die coulometrische Benutzung bei kleinen Stromstärken ungenau machte. Deshalb verwendeten wir für die definitiven Messungen nur die grösseren Rahmen. Mit der beschriebenen viereckigen Rahmenform ist der Nachteil verbunden, dass die gewogenen Platten beim Aus- und Einführen manchmal durch die Nutenwände eine kleine Schramme bekommen. Wir haben deshalb beiläufig versucht, den Rahmen aus zwei Ringen zu bilden, die mit Gewinden versehen waren und aufeinander geschraubt wurden. Es ist sicherlich möglich, die Rahmenform so zu wählen, dass die Bildung von Schrammen gänzlich vermieden wird¹⁾.

Die Prüfung der Erdcoulometer auf ihre Verwendbarkeit verlangte eine Reihe von Beobachtungen. Denkt man sich in einen solchen Rahmen von der einen Seite her einen bekannten Strom ein- und aus ihm auf der anderen Seite wieder austreten, so muss derselbe in dem zu zweit beschriebenen Falle der isolierten Platten offenbar seinem vollen Betrage nach durch das Galvanometer gehen und von dem Galvanometer richtig angezeigt werden. In dem zuerst erläuterten Falle, bei welchem die Gewichtsänderung der Platten und aus ihr die gesamte durchgegangene Elektrizitätsmenge bestimmt werden soll, wird hingegen die Brauchbarkeit des Resultates davon abhängen, ob eine Metallfällung ohne störende Nebenvorgänge und in gut wägbarer Form erfolgt. Die Versuche über die Genauigkeit, mit welcher coulometrisch mit Hilfe der Rahmen eine bekannte, durch den Rahmen gehende Strommenge bestimmt werden kann, sind darum im folgenden Abschnitte zunächst mitgeteilt.

Ist die Messung einer durch den Rahmen hindurchgehenden Strommenge coulometrisch, oder einer durch ihn gehenden Stromstärke ampèremetrisch genau möglich, so bleibt weiter zu fragen, ob nach Einsetzen des Rahmens in den Weg eines Erdstromes durch den Rahmen dieselbe Strommenge fliessen wird, die zuvor den gleichen Weg nahm. Abgesehen von den zufälligen Einflüssen, welche das Eingraben des Rahmens insofern bewirken mag, als es den Verband der Erdschichten ändert und damit deren Leitfähigkeit beeinflusst, wird die Polarisierbarkeit der Platten von prinzipieller Bedeutung sein. Die verschiedenen, diesen Punkten gewidmeten Versuche sind in den §§ 4 u. 5 dargestellt. Sie ergeben die Gewissheit, dass die ampèremetrische wie die coulometrische Messung der vagabundierenden Ströme im Erdreich mit Hilfe der Rahmen in dem vornehmlich wichtigen Be-

1) Eine Anzahl Handgriffe, die bei der Benutzung der Rahmen vorzunehmen sind, findet man in dem citierten Aufsatz im Journal für Gasbeleuchtung von F. Haber genau angegeben.

zirk von 0,05 Milliampère bis 1,0 Milliampère/qdm mit erheblicher, jenseits dieser Grenze mit etwas kleinerer Genauigkeit möglich ist.

§ 3. Die Genauigkeit der Kupfer- und Silberfällung bei kleinen Stromdichten¹⁾.

Es wurden zunächst Versuche über die Genauigkeit der Kupferfällung bei kleinen Stromdichten angestellt. Dabei befand sich als Vergleichsinstrument ein gewöhnliches Kupfervoltmeter im selben Stromkreise, dessen Kathode so klein war, dass die Stromdichten nicht unter 0,5 Amp/qdm betrugen. Dieses Vergleichskupfercoulometer war mit der von Oettel angegebenen Lösung beschickt, welche folgende Zusammensetzung hat: 150 g Kupfersulfat, je 50 g konzentrierte Schwefelsäure und Alkohol, gelöst in 1 Liter Wasser. Um mit den Verhältnissen bei schwachen Stromdichten und gleichzeitiger Beschränkung der Kathodenlösung auf eine dünne Schicht längs der Kathode (wie dies den Bedingungen im Erdcoulometer entspricht) vertraut zu werden, wurde die kupferne Versuchskathode, welche ein quadratisches Blech von 1 dm Kantenlänge darstellte, an einer kupfernen Zuführung zunächst in einen Trog mit derselben Oettelschen Lösung zwischen zwei parallele, grosse Kupferanoden eingehängt. Die Durchgangsstelle der Zuführung durch die Grenzfläche der Lösung gegen die Luft wurde durch einen Fettüberzug geschützt. Die Kathode war auf beiden Seiten mit einem Blatt Asbestpapier belegt, darüber wurde Pergamentpapier gespannt. Die mit der Lösung getränkte Asbestschicht stellte den Vorrat an Kupfersulfat dar, welcher die zur Fällung durch den Strom gelangenden Cupriionen hergab. Sie diente zugleich mit der Pergamentpapierschicht zur Abhaltung des atmosphärischen Sauerstoffes. Es wurden Stromdichten von 0,5 und 1,6 Milliampère/qdm verwendet. Die Stromdauer wurde so gewählt, dass 50 bis 60 mg Kupfer im Vergleichscoulometer sich ausschieden. An der Versuchskathode war die Gewichtszunahme nur zwei Drittel so gross. Um den Abschluss der Luft, bezw. lufthaltiger Lösung vollständiger zu machen, wurde das lose die (mit Asbestpapier bekleidete) Platte umgebende Pergamentpapier durch zwei fest anliegende Gipsplatten ersetzt. Die Randfugen wurden sorgfältig mit Gipsbrei ausgestrichen. Mit dieser Anordnung wurde bei einem längeren Versuche ein günstiges Ergebnis erzielt.

¹⁾ Die Theorie der Kupferfällung, wie sie von F. Foerster und seinen Schülern experimentell und theoretisch begründet ist, wird als bekannt vorausgesetzt. Man findet sie dargestellt z. B. in Foersters Werk über die Elektrochemie wässriger Lösungen S. 256 (Leipzig 1905). (Bredigs Handbuch der angewandten physikalischen Chemie, Bd. I.)

Es fand sich nämlich bei nahezu 1,6 Milliampère/qdm Stromdichte mit etwa 87 Stunden Stromdauer:

Zunahme der Vergleichskathode 0,3058 g,
 " " Versuchskathode . 0,3032 "
 entsprechend 99,8% der Theorie.

Bei einem zweiten, kürzeren Versuche aber wurde bei annähernd derselben Stromdichte nach rund 6 Stunden erhalten:

Zunahme der Vergleichskathode 0,0186 g,
 " " Versuchskathode . 0,0033 "

Es lag nahe, zu vermuten, dass der Sauerstoffgehalt der feuchten Asbestschicht den wesentlichsten Anteil an den Versuchsfehlern hatte. Deshalb wurde die Oettelsche Lösung vor der Verwendung längere Zeit über Kupfergranalien gestellt und dann in einer Kohlensäureatmosphäre auf den Asbest und mit diesem auf die Versuchskathode gebracht, die alsbald durch die Gipsplatten wie zuvor abgesperrt wurde. Das Ergebnis war in der Tat jetzt ein befriedigendes:

Stromdichte: 1,6 Milliamp/qdm; Zeit: etwa 6 Stunden.

Zunahme der Vergleichskathode 0,0183 g,
 " " Versuchskathode . 0,0187 "
 entsprechend 102,2% der Theorie.

Diese Versuche wiesen indes einen übereinstimmenden Mangel auf, welcher darin bestand, dass mit dem Kupfer Asbestfasern auf der Kathode aufwuchsen, die schwer vollständig entfernt werden konnten, ohne dass Kupfertheilchen mit weggenommen wurden. Deshalb schien es zweckmässig, statt der in Asbest aufgesogenen Lösung eine streichfähige Paste von fein zerriebenem Kupfersulfat mit verdünnter Schwefelsäure und etwas Alkohol herzustellen und auf die Versuchskathode aufzutragen. Diese Anordnung versprach einen weiteren Nutzen noch darum, weil sie eine Verarmung des Elektrolyten bei längerer Stromdauer und damit ein Eintreten einer Konzentrationspolarisation ausschloss, was für die Verwendung im Erdcoulometer wesentlich war. Um den Sauerstoff in der Paste zu beseitigen, bezw. Cupriionen in ihr zu erzeugen, wurde eine Spur feinsten Kupferpulvers mit hineingerieben. Im übrigen wurde in früher beschriebener Weise gearbeitet. Es ergab sich für 1,65 Milliampère/qdm:

Zunahme der Versuchskathode . 0,0145 g,
 " " Vergleichskathode 0,0144 "
 entsprechend 99,6% der Theorie.

Ein zweiter Versuch mit gleicher Stromdichte, bei welchem zwei Apparate mit je einer Kathode hintereinander in den Stromkreis geschaltet waren, ergab:

Zunahme der Vergleichskathode 0,0543 g,
 " " Versuchskathode 1 0,0499 "
 " " " 2 0,0490 "

Bei diesem zweiten, längere Zeit (etwa 15 Stunden) ausgedehnten Versuche trat ein

Uebelstand hervor, welcher bei der gewählten Anordnung nicht wohl vermieden werden konnte und das ungenaue Ergebnis bedingte. Zufolge des hohen osmotischen Druckes nämlich, welchen die Paste besass, saugte sie Wasser durch die Gipsplatten an, vermehrte ihr Volum und sprengte die Gipschülle. Dann trat lufthaltige Lösung durch die Risse zur Kathode und damit wurde das Ergebnis unbrauchbar. Auf diese Weise ging eine ganze Reihe von Versuchen verloren, welche mit einer Stromdichte von 0,5 Milliampère/qdm unternommen wurden und je über 14 Stunden ausgedehnt werden mussten, wenn ein zur Beurteilung der Genauigkeit des Verfahrens genügendes Kupfergewicht zur Abscheidung gebracht werden sollte. In allen Fällen sprangen hierbei die Gipsplatten, und die Gewichtszunahme der Coulometerplatten, von denen sich vielfach die Paste durch eingedrungene Lösung nach Versuchsschluss weggeschwemmt zeigte, ergab zu kleine Werte.

Die Versuche sprachen dafür, dass im Sinne der bekannten Foersterschen Ausführungen über diese Frage das Kupfercoulometer bei ausreichendem Luftabschluss noch bei sehr kleinen Stromdichten genaue Werte liefern würde. Aber es war nicht zu verkennen, dass bei ausgedehnten Versuchen in der Erde mit den früher beschriebenen Rahmen ein entsprechender Luftabschluss nicht sicher ist, da die Erde stets lufthaltig ist. Dazu tritt die Ueberlegung, dass die Versuche in der Erde jedenfalls bei schwachen Stromdichten des kleineren Kupferäquivalentes wegen sehr lange hätten ausgedehnt werden müssen. Es wurden deshalb zwar mit Kupferplatten und der erwähnten Paste einige Versuche in den früher beschriebenen und abgebildeten Rahmen (Fig. 314) angestellt, indem die Rahmen in einer grossen, mit Erde gefüllten Kiste, deren noch später zu gedenken sein wird, eingegraben wurden. Im übrigen aber haben wir von der Verwendung der Kupferplatten für den coulometrischen Zweck abgesehen und lieber danach getrachtet, das Silbercoulometer unseren Bedürfnissen gemäss einzurichten.

Vorversuche, wie sie bezüglich der Kupferfällung ausgeführt wurden, erschienen hier entbehrlich. Es wurde vielmehr alsbald einer der beschriebenen Rahmen mit eingefügten Feinsilberblechen benutzt. Der Rahmen wurde in eine mit Erde gefüllte, lange und schmale Kiste eingesetzt, deren Querschnitt er vollständig ausfüllte, so dass der gesamte Strom gezwungen war, die Platten zu passieren. Auf die Silberplatten brachten wir bei den ersten Versuchen gebleichten Baumwollstoff, der mit 20prozentiger Silbernitratlösung getränkt war, und legten darauf ein Blatt Pergamentpapier. Dann ersetzten wir den Baumwollstoff durch Filtrierpapier, das mit derselben Silbernitratlösung getränkt war, um

schliesslich in einer Paste von essigsauerm Silber mit destilliertem Wasser das geeignetste Material zu finden. Von den Versuchen mit Baumwolle mag lediglich erwähnt sein, dass bei einer Stromdichte von 1 Milliampère/qdm die theoretische Abnahme an den Anoden durch Wägung genau zu finden war. Hingegen wuchs das Silber an der Kathode kristallinisch in die Baumwolle ein und haftete auf dem Bleche sehr schlecht, so dass zur Bestimmung des kathodischen Niederschlages die Baumwolle verbrannt und dann das verbleibende Silber mit Salpetersäure aufgenommen und titrimetrisch bestimmt werden musste. Bei diesem umständlichen Verfahren wurde eine genügende Genauigkeit nicht erzielt. Auch bei Ersatz der Baumwolle durch Lagen von aschearmem Filtrierpapier zeigte sich der gleiche Missstand des Einwachsens und schlechten Haftens. Indes war hier durch Einlegen der Platten in heisses Wasser die Hauptmenge des Papiers entfernbare, und die eingewachsenen Fasern konnten durch Abbrennen mit Alkohol auf der Platte selbst bis auf unwägbare Aschenreste entfernt werden. Folgende Resultate wurden mit Verwendung solcher Filtrierpapierlagen gewonnen. Ein im Stromkreis befindliches Kupfercoulometer diente wie früher als Vergleichsmaass:

Stromdichte: 0,001 Amp/qdm.

I. Zunahme der Kupferkathode	0,0199 g,
Aequivalent an Silber . .	0,0675 „
Zunahme der Silberkathode .	0,0706 „
Abnahme der Silberanode .	0,0689 „
II. Zunahme der Kupferkathode	0,0145 „
Aequivalent an Silber . .	0,0492 „
Zunahme der Silberkathode .	0,0499 „
Abnahme der Silberanode .	0,0496 „

Die groben Silberkristalle hafteten indessen immer schlecht an der Platte, so dass jede Unvorsichtigkeit Verluste brachte. Wesentlich günstiger erwies sich die Abscheidung bei einer Paste aus essigsauerm Silber und Wasser. Wir erhielten mit ihr bei 0,001 Amp/qdm Stromdichte:

I. Zunahme der Kupferkathode	0,0166 g,
Aequivalent an Silber . .	0,0563 „
Zunahme der Silberkathode .	0,0573 „
Abnahme der Silberanode .	0,0567 „
II. Zunahme der Kupferkathode	0,0101 „
Aequivalent an Silber . .	0,0343 „
Zunahme der Silberkathode .	0,0349 „
Abnahme der Silberanode .	0,0347 „
III. Zunahme der Kupferkathode	0,0172 „
Aequivalent an Silber . .	0,0584 „
Zunahme der Silberkathode .	0,0588 „
Abnahme der Silberanode .	0,0580 „
IV. Zunahme der Kupferkathode	0,0143 „
Aequivalent an Silber . .	0,0485 „
Zunahme der Silberkathode .	0,0484 „
Abnahme der Silberanode .	0,0485 „

Die Stromdurchgangszeiten bewegten sich zwischen 9 und 17 Stunden.

Das Silber wuchs in keinem Falle wie bei Benutzung von Silbernitrat in Filtrierpapier und Baumwolle grobkristallin auf, sondern haftete fest an der Kathode in Gestalt eines sammetartigen Ueberzuges, der von oben gesehen dunkel erschien, bei seitlichem Lichte aber die feinkristalline Struktur und den hellen Glanz des Silbers zeigte. Es war dabei gleichgültig, ob die Platten vorher mattiert waren oder eine polierte Oberfläche besaßen. Bei der erheblich höheren Stromstärke von 40 Milliampère/qdm, mit der vier weitere Versuche gemacht wurden, erwies sich aber eine polierte Fläche als unvorteilhaft. Eine mattierte Fläche ist hingegen auf alle Fälle zu empfehlen. Man erhält sie leicht dadurch, dass man die Platten nach dem Reinigen von Fett u. s. w. kurze Zeit in starke Salpetersäure einlegt. Versuche mit der Stromdichte von 40 Milliampère/qdm ergaben die im folgenden mitgeteilten Werte an mattierten Kathoden:

- I. Zunahme der Kupferkathode 0,3773 g,
 Äquivalent an Silber . . 1,2804 „
 Zunahme der Silberkathode . 1,2653 „

Der anodische Wert wich erheblich ab, weil die Paste so fest haftete, dass sie durch blosses Einlegen in heisses Wasser nicht völlig entfernbar war und eine mechanische Behandlung bei der stark unterfressenen Platte eine Mitnahme von Silberpartikelchen herbeiführte. Später fand sich, dass ein Abspülen mit Ammoniak solche haftenden Pastenspuren ohne Gefahr zu entfernen erlaubt.

- II. Zunahme der Kupferkathode 0,1347 g,
 Äquivalent an Silber . . 0,4571 „
 Zunahme der Silberkathode . 0,4507 „
 Abnahme der Silberanode . 0,4540 „
 III. Zunahme der Kupferkathode 0,1649 „
 Äquivalent an Silber . . 0,5596 „
 Zunahme der Silberkathode . 0,5637 „
 Abnahme der Silberanode . 0,5598 „

Die Genauigkeit der Resultate ist, wie man sieht, wesentlich geringer als bei den viel kleineren Stromdichten, die allein für unsere praktischen Zwecke wichtig waren.

Schliesslich wurde zur Ergänzung der Beobachtungen noch ein Versuch mit der sehr kleinen Stromdichte von 0,076 Milliampère/qdm gemacht. Als Vergleichscoulometer wählten wir das übliche Silbervoltameter.

Wir erhielten bei 16stündigem Stromdurchgang:

- Zunahme der Vergleichskathode 0,0049 g,
 „ „ Versuchskathode . 0,0042 „

Ueber die Bereitung der Silberacetatpaste sei noch bemerkt, dass sie durch Füllen von

heisser konzentrierter Silbernitratlösung mit ebensolcher Lösung von essigsäurem Natron erhalten und durch Auswaschen mit destilliertem Wasser nach dem Erkalten gereinigt wurde. Es ist nicht vorteilhaft, einen Ueberschuss von (gelöstem) Nitrat in der Paste zu lassen, weil dieses beim Gebrauch auf der Kathodenseite verzehrt wird, auf der Anodenseite aber nicht, so dass eine Konzentrationsdifferenz zu erwarten ist, die eine entsprechende Polarisierung zur Folge hat. Es scheint aber auch nicht rätlich, einen Ueberschuss von Natriumacetat in der Paste zuzulassen, weil dann nach dem Massenwirkungsgesetz die Konzentration der Silberionen sinkt und die Platte voraussichtlich polarisierbarer wird als in reiner Silberacetataufschwemmung.

Bei keiner der zahlreichen Anwendungen, die wir von den mit Acetat ausgerüsteten Silbercoulometern in der Erde gemacht haben, ist uns eine störende Verunreinigung durch in der Erde befindliche Stoffe begegnet. Das Pergamentpapierblatt, welches die Paste von der Erde trennt, färbt sich häufig dunkel. Ins Innere der Paste, oder gar bis an die Berührungsstelle der Paste mit der Platte reichende chemische Veränderungen sind aber niemals aufgetreten.

Für die erdampèremetrischen Messungen mit isolierender Einlage zwischen den Platten haben wir hingegen das Silbercoulometer nie benutzt. Der Vorteil des grösseren Silbergewichtes und die Sicherheit quantitativer Abscheidung kommt für diesen Fall nicht in Betracht. Deshalb hat hier das Kupfercoulometer, welches billiger und, wie die späteren Messungen lehren, in ähnlichem Umfange unpolarisierbar ist, den Vorzug. Die Kupfersulfatpaste wurde für diese Zwecke ohne Kupferpulver und Alkohol lediglich aus feinst zerriebenem Kupfersulfat und 20prozentiger Schwefelsäure angefertigt. Einige Schwierigkeit verursachte noch anfänglich die Auswahl eines passenden Galvanometers. Hier konnten wegen der Verwendbarkeit bei Strassenmessungen nur Zeigerinstrumente in Betracht kommen. Diese müssen aus Gründen, die im folgenden deutlicher hervortreten werden, einen sehr kleinen Widerstand haben. Als besonders geeignet erschien ein auf Veranlassung von H. Hausrath¹⁾ von Hartmann und Braun gebautes Drehspulengalvanometer, das bei 13 Ohm Widerstand eine Stromempfindlichkeit von $8,9 \cdot 10^{-7}$ Amp. für einen Skalenteil besass. Durch einen Nebenschluss von 0,5 oder 1 Ohm liess sich der Widerstand dieses Instrumentes auf einen sehr kleinen Betrag bringen, während es zugleich noch ganz die erforderliche Empfindlichkeit besass. Dass es bei diesen kleinen Nebenschlüssen träge im Ausschlag war und die rapiden

1) Samml. elektrotechn. Vortr., Band VII, 1905; Heft 11, 24.

Schwankungen, die der Strassenbahnbetrieb in der Stärke der vagabundierenden Ströme bedingt, nur beschränkt mitmachte, war eher von Vorteil als von Nachteil. Dass sein Nullpunkt in der Mitte liegt, war bei dem gelegentlich durch den Bahnbetrieb bedingten Wechsel des Stromsinnes der vagabundierenden Ströme angenehm. Später überzeugten wir uns, dass ein Instrument von etwas geringerer Stromempfindlichkeit noch vollkommen genügte.

§ 4. Ueber die Unpolarisierbarkeit der Kupfer- und Silberplatten.

Es blieb nun die Frage zu beantworten, inwieweit ein in einem Erdquerschnitt von 1 qdm fließender Strom auch durch die in seinen Weg gebrachten Rahmen fließen würde.

Nennen wir die durch den Rahmen gehende Stromstärke J_2 , so gilt für die Spannungsdifferenz in den dem Rahmen anliegenden Schichten

$$E = J_2 w_2 + \epsilon,$$

wo w_2 der Rahmenwiderstand und ϵ die Polarisierung der Rahmenplatten ist. Für den ursprünglichen Strom an derselben Erdstelle vor Einsetzen des Rahmens gilt hingegen

$$E' = J' w'.$$

Ist ϵ Null und w_2 gleich w' , so wird auch J_2 gleich J' und E gleich E' sein. Diesem Sachverhalt muss man möglichst nahe kommen. Deshalb muss in erster Linie ϵ , die Polarisierung, klein sein.

Die Versuche wurden demgemäss zunächst auf die Bestimmung der Polarisierbarkeit der mit Paste bedeckten Platten gerichtet. Es schien zweckmässig, die Bestimmung derselben zunächst ausserhalb der Rahmen in der Art vorzunehmen, dass zwei mit Paste bedeckte Platten der auch sonst verwendeten Grösse (11 × 11 cm) mit den gepasteten Seiten aufeinander gelegt und die Polarisierbarkeit der so entstandenen Zelle

Metall—Paste—Metall

geprüft wurde. Zu dem Ende wurde durch die beiden Metallbleche ein variabler Strom gesandt, und ihre Spannungsdifferenz bei Stromfluss und nach Stromunterbrechung nach der Kompensationsmethode gemessen. Die Anordnung liess Fehler von $\pm 0,3$ Millivolt zu. Die gemessene Spannungsdifferenz setzt sich additiv aus dem Produkt der durchgehenden Stromstärke und dem Pastenwiderstand einerseits und aus der Polarisierung andererseits zusammen. Die Zahlen sind im folgenden tabellarisch für 4 Anordnungen gegeben. Bei a und b bestand das System aus zwei Kupferplatten zwischen denen Kupfervitriolpaste sich befand. Aber diese Paste war bei a mit 20prozentiger, bei b mit zweiprozentiger Schwefelsäure angemacht, c bezieht sich auf Silber—Silberacetat—Silber, d auf das gleiche System, nachdem vor der Beobachtungsreihe

ein Strom von 0,5 Amp. mehrere Minuten erst im einen, dann im anderen Sinne durchgeschickt und so eine frische Oberfläche des Silbers geschaffen worden war. In allen Fällen ist eine bald im einen, bald im anderen Sinne wirksame kleine Potentialdifferenz der Platten im stromlosen Zustand merkbar, welche mit sich bringt, dass bei der Verwendung der Rahmen im stromlosen Erdreich dennoch Ausschläge, bezw. Abscheidung und Auflösung von Metall in sehr kleinem Betrage auftreten. Von diesen Grössen, welche weiterhin als Rahmenfehler bezeichnet werden, wird später gehandelt.

Die in der Tabelle mitgeteilten Daten sind durch den Ohmschen Widerstand der Anordnung nicht merklich beeinflusst. Denn das verwendete System besass in allen Fällen, wie mit Wheatstonescher Brücke und Telephon festgestellt wurde, unter 1 Ohm Widerstand; das Produkt aus Widerstand und Stromstärke lag also bei 1 Milliampère noch unter 1 Millivolt.

Stromstärke und Strom- richtung (Amp. $\times 10^{-4}$)	Spannungsdifferenz der Platten in Millivolt				
	a	b	c		d
			α	β	
+ 1	< 1	+ 2,60	— 5,88	— 4,9	0
0		+ 1,95	— 6,86	— 5,9	— 1,0
— 1	< 1	+ 1,30	— 9,81	— 6,9	— 1,0
0		+ 1,95	— 8,82	— 4,9	— 1,0
— 2	— 1,3	+ 0,65	— 11,8	— 8,8	— 2,0
0	0,0	+ 1,95	— 9,8	— 5,8	— 1,0
+ 2	+ 2,6	+ 3,25	+ 4,6	— 2,9	+ 1,0
0	+ 1,3	+ 1,95	— 6,9	— 5,9	— 1,0
+ 3	+ 1,3	+ 5,20	—	—	—
0	— 0,6	+ 3,25	—	—	—
— 3	— 2,6	+ 1,30	—	—	—
0	— 0,6	+ 3,25	—	—	—
— 4	— 1,3	+ 0,65	0,0	— 2,0	— 4,9
0	+ 1,3	+ 3,25	+ 5,9	+ 4,9	— 3,9
+ 4	+ 3,9	+ 7,15	+ 11,8	+ 11,8	— 2,0
0	+ 1,3	+ 4,55	+ 7,8	+ 5,9	— 1,0
+ 5	+ 2,6	+ 11,05	+ 13,7	+ 11,8	— 2,0
0	— 0,6	+ 4,55	+ 7,8	+ 5,9	— 2,9
— 5	— 3,9	— 1,95	— 2,0	— 2,0	— 3,9
0	— 0,6	+ 4,55	+ 5,9	+ 3,9	— 2,9
— 7	— 5,2	— 4,55	— 3,9	— 9,8	— 4,9
0	— 0,6	+ 4,55	+ 3,9	+ 2,0	— 2,0
+ 7	+ 3,9	+ 13,65	+ 13,7	+ 13,7	— 1,0
0	+ 0,6	+ 4,55	+ 5,9	+ 5,9	— 2,0
+ 10	+ 8,5	+ 17,55	+ 17,6	+ 17,6	—
0	— 1,3	+ 4,55	+ 7,8	+ 5,9	—
— 10	— 9,1	— 8,45	— 3,9	— 9,8	—
0	— 1,3	+ 4,55	+ 5,9	+ 2,0	—
— 20	— 14,3	— 14,95	— 11,8	— 18,6	— 1,0
0	— 1,3	+ 4,55	+ 3,9	+ 3,9	+ 1,0
+ 20	+ 11,7	+ 21,45	+ 21,6	+ 19,6	+ 2,9
0	— 1,3	+ 4,55	+ 5,9	+ 5,9	— 2,9
+ 40	—	—	—	—	+ 4,9
0	—	—	—	—	— 1,0
— 40	—	—	—	—	— 6,9
0	—	—	—	—	— 1,0

Die Polarisierbarkeit ist bei a geringer als bei b. Die 20prozentige Schwefelsäure ist also vorteilhafter als die zwei Prozentige für die Herstellung der Kupfersulfatpaste. Der mit Erde vollgestrichene Rahmen enthält eine Erdschicht von 1 qdm Querschnitt und rund 35 mm Dicke, deren Widerstand zu etwa 300 Ohm angenommen werden kann. Zur Begründung verweisen wir auf die im Fortgang dieser Arbeit mitgeteilten Ergebnisse der Widerstandsbestimmungen und auf Zahlen, welche eine Reihe von Fachgenossen die Güte hatten, festzustellen, wofür wir ihnen auch an dieser Stelle unseren verbindlichsten Dank sagen. Die Werte sind sämtlich als spezifische Widerstände pro Kubikmeter Würfel zu verstehen.

Herr Professor Abegg fand an Erdproben von Aufgrabungen in verschiedenen Teilen von Breslau Widerstände zwischen 125 und 278 Ohm. Der Boden war von sandiger Beschaffenheit. Herr Professor Foerster fand in Dresden an drei weit auseinander gelegenen linkselbischen Punkten für Lehm Boden aus $\frac{1}{2}$ m Tiefe 55 bis 63 Ohm; eine vierte Probe aus rechtselbischem Gebiet, wo der Boden sandig ist, ergab 244 Ohm. Herr Professor Lorenz fand im fetten Lehm Boden von Zürich 84 Ohm, in einer Sandgrube bei Oerlikon 800 und mehr Ohm¹⁾. Herr Professor Luther ermittelte in Leipzig Werte von 70 bis 250 Ohm. Alle Werte beziehen sich auf den Kubikmeter-Würfel und sind im Frühjahr bei Bodentemperaturen von etwa 5° C. gefunden. In Karlsruhe ergaben sich bei einer grossen Anzahl von Messungen Werte zwischen 100 und 1000 Ohm, die niedrigen Werte fanden sich im lehmigen, die hohen im sandigen Erdreich. Die meisten Werte lagen zwischen 200 und 300 Ohm.

Nehmen wir, wie zuvor gesagt, den Widerstand der in die Rahmenöffnung gestrichenen Erde zu 300 Ohm an, so wird der Durchgang von 1 Milliampère 300 Millivolt Spannungsgefälle bedingen, während die Polarisation bei der mit 20prozentiger Schwefelsäure angemachten Kupfersulfatpaste für den gleichen Strom rund 9 Millivolt, also $3\frac{1}{10}\%$ beträgt. Die damit bedingte, scheinbare Widerstandserhöhung wird kompensiert durch den Umstand, dass der Strom beim Durchgang durch den Rahmen in den Pasten und Platten einen sehr viel besseren Leiter findet, als ihn eine Erdschicht von gleicher Dicke abgeben würde. Die Polarisierbarkeit der Silberplatten ist, wie der Versuch d lehrt, noch kleiner, wenn das Silber mit frischer Oberfläche verwendet wurde. Bei praktischen Versuchen lässt sich aber die Erneuerung der Oberfläche vor dem Versuch unmöglich herbeiführen, so dass die Ergebnisse des Doppelversuches ca und cß maassgeblich sind. Diese zeigen eine

gewisse Unsicherheit der Potentialdifferenz im stromlosen Zustande, auf welche indessen wenig Gewicht fällt, da der durch sie bedingte Rahmenfehler bei coulometrischen Dauermessungen, wie später gezeigt wird, sehr gering ist. Vergleicht man die unter Strom gemessenen Werte jeweils mit den zugehörigen Daten für den stromlosen Zustand, so ergibt sich für die Polarisation der Silberplatten folgende Tabelle, welche erkennen lässt, dass die Polarisierbarkeit etwa ebenso klein wie bei den Kupferplatten ist.

Stromstärke in Milliampère	Polarisation beider Platten in Millivolt
0,1	1,0
0,2	2,5
0,4	6,0
0,5	7,0
0,7	9,0
1,0	11,0
2,0	16,0

§ 5. Erdstrommessungen in Kisten.

Von wesentlicher Bedeutung war die Frage nach dem Betrag der zufälligen Fehler, die man hervorruft, indem man beim Vollstreichen der Rahmen mit Erde und beim Eingraben nicht den ursprünglichen Zustand des Erdreichs herstellt. Es erschien uns wenig aussichtsvoll, nach Vorrichtungen zu suchen, welche unabhängig von der Uebung des Beobachters eine Sicherheit gegen solche Fehler gewährten. Wir haben uns vielmehr bemüht, die Grösse dieser Fehler festzustellen und uns dabei überzeugt, dass eine ganz geringe Uebung ausreicht, um sie praktisch zum Verschwinden zu bringen. Wir bedienten uns verschiedener Kisten, die mit Erde gefüllt waren und als Stromweg dienten. An zwei gegenüberliegenden Kistenwänden waren Eisenbleche eingesetzt, welche diese Wände völlig bedeckten. Es wurde dadurch bewirkt, dass ein gleichförmiger Strom von der einen zur anderen Seite der Kiste floss, wenn eine äussere Stromquelle eingeschaltet wurde. Die Erde in der Kiste war sehr sorgfältig homogen gemischt, lagenweise eingebracht und festgestampft worden. Es wurde zunächst eine Kiste von 47,8 cm Breite, 45 cm Tiefe, 100 cm Länge benutzt und ein Kupferrahmen, der mit Paste versehen und mit derselben Erde ausgestrichen war, so eingegraben, dass die Stromlinien seine Platten senkrecht trafen. Die Stromstärke, welche durch die ganze Kiste floss, sollte nach den Verhältnissen der Querschnitte das 21,5-fache der vom Rahmen angegebenen sein. Die ersten Versuche, welche in dieser Weise angestellt wurden, ergaben erhebliche Differenzen zwischen dem vom Rahmen angezeigten und dem erwarteten Strome. Aber nach kurzer Zeit gewannen wir ein so sicheres Gefühl für den Druck, mit welchem die Erde in die Rahmenöffnung gestrichen und um den eingesetzten

1) Der Lehm Boden enthielt 300 g Wasser im Liter.

Rahmen festgedrückt werden musste, dass die erwarteten Werte den beobachteten sehr nahe kamen. In der folgenden Tabelle sind die durch die Kiste gesandten Ströme als Gesamtstrom, sodann deren 21,5. Teil als berechneter Rahmenstrom und schliesslich der am Galvanometer gefundene Rahmenstrom angeführt. Alle Werte bezeichnen Milliampère.

Gesamtstrom	Ber. Rahmenstrom	Gef. Rahmenstrom
10	0,46	0,50
20	0,93	1,04

Das Erdreich in der Kiste wurde nun entfernt, neu eingefüllt, dabei schichtenweise festgestampft und der Rahmen wieder eingegraben. Jetzt fand sich:

10	0,46	0,47
20	0,93	0,96

Der Rahmen wurde wieder ausgegraben, die Pergamentblätter und die Erdfüllung des Rahmens erneut. Alsdann wurde der Rahmen frisch eingegraben:

10	0,46	0,49
20	0,93	1,00

Nun wurde der Rahmen näher der Strom-eintrittsstelle eingegraben:

10	0,46	0,50
20	0,93	0,99

Hierauf wurde der Rahmen mehr in der Nähe der Stromaustrittsstelle eingegraben:

5	0,23	0,23
10	0,46	0,47
15	0,69	0,72
20	0,93	0,97

Wurde der Strom, der durch die Kiste ging, unterbrochen, so zeigte sich am Rahmen ein Restausschlag von 0,015 Milliampère.

Die Ursache für das Auftreten dieses Rahmenfehlers haben wir früher kennen gelernt. Jene 0,015 Milliampère flossen in derselben Richtung wie die zuvor gemessenen Ströme, waren also nicht durch Polarisierung, sondern durch Zustandsverschiedenheit der Platten bedingt. Die Rahmenfehler sind nicht immer so gross, aber, da man nicht darauf rechnen kann, sie sicher unter 0,01 Milliampère zu bringen, so werden die Messungen von Strömen, die wesentlich kleiner als 0,05 Milliampère sind, relativ sehr ungenau. Denn bei einem Strom von 0,01 Milliampère z. B. kann man nicht sagen, ob lediglich ein Rahmenfehler vorliegt oder ob vielleicht ein Strom von 0,02 Milliampère vorhanden ist, der durch einen entgegengerichteten Rahmenfehler auf 0,01 Milliampère vermindert wird.

Die Weiterführung der zuletzt beschriebenen Versuche in derselben Art ergab:

Gesamtstrom	Ber. Rahmenstrom	Gef. Rahmenstrom	
20	0,93	0,91	Rahmenfehler
0	0,0	0,005	
20	0,93	0,91	
14	0,65	0,64	
10	0,46	0,46	Rahmenfehler
6	0,28	0,28	
0	0,0	0,006	
3	0,14	0,14	
1,3	0,06	0,06	Rahmenfehler
0	0,0	0,005	

Um nun über die Polarisierbarkeit weitere Kenntnis zu gewinnen, wurde eine neue Reihe von Messungen gemacht, bei welcher der Strom, der durch Kiste und Rahmen floss, zeitweilig kommutiert wurde. So wurde erhalten:

Gesamtstrom	Ber. Rahmenstrom	Gef. Rahmenstrom
-------------	------------------	------------------

Nach 3 Minuten währendem gleichstarken Stromfluss im Gegensinn:

20	0,93	0,945
Der Ausschlag sinkt rasch auf		0,935
und bleibt dort konstant.		

Nach abermals 3 Minuten währendem gleichstarken Stromfluss im Gegensinn:

20	0,93	0,948
Der Ausschlag sinkt rasch auf		0,938
und bleibt dort konstant.		

Gleiche Resultate wurden bei schwächerem Strome erhalten, wie folgende Zahlen lehren:

7,5	0,35	0,350 (Erstwert)
		0,342 (Endwert)

Schliesslich wurde nochmals der Rahmenfehler konstatiert, der sich zu 0,013 Milliampère fand.

Dass die Polarisierbarkeit, die sich im zeitlichen Abfall des Erstwertes zum Dauerwerte ausspricht, sehr klein ist, geht deutlich aus diesen Zahlen hervor; dass sie bei 0,35 Milliampère ebenso gross erscheint, wie bei 0,93 Milliampère, schreibt sich daher, dass bei 0,93 Milliampère das Drehspulengalvanometer mit 0,5 Ohm, bei 0,35 Milliampère aber mit 1 Ohm Nebenschluss benutzt wurde, und dass sich bei 0,5 Ohm die Nadel träger einstellt, so dass der Erstwert relativ später nach der Stromumkehr erreicht wird, als im anderen Falle.

Es erschien uns nicht ohne Interesse, nach diesen Ergebnissen den mit Paste bedeckten Kupferrahmen durch einen blanken zu ersetzen, um nach dem Ergebnis den Vorteil zu beurteilen, der durch die Paste gewonnen war. Es fand sich nun bei gleicher Arbeitsweise wie zuvor, dass der Erstwert nach dem Kommutieren des Stromes 2 bis 3 Minuten lang sank. Ausserdem waren alle Werte zu niedrig. Folgende Zahlen seien angeführt:

Gesamtstrom	Ber. Rahmenstrom	Gef. Rahmenstrom	
		Erstwert	Endwert
20	0,930	0,768	0,648
Wiederholung des Kommutierens gab:			
20	0,930	0,780	0,648
10	0,465	0,368	0,287

Diese Versuche wurden nunmehr in einer grossen Kiste wiederholt, die 1 qm Querschnitt bei 2,5 m Länge besass. An dem Schmalende waren Eisenbleche von 1 qm Fläche eingesetzt. Der Widerstand der Kiste betrug, nachdem die Erde sorgsam Lage für Lage festgedrückt war, 170 Ohm. Beim Eingraben von Rahmen in einer so grossen Kiste wird nur ein kleiner Teil der Erde umgewühlt und man gerät nicht leicht in Gefahr, die ganze Stromverteilung in der Kiste durch ungleichmässiges Festdrücken der Erde nach dem Eingraben unregelmässig zu gestalten. Bei der kleinen Kiste konnten wir je nach der Art, wie wir die Erde nach dem Eingraben der Rahmen wieder festdrückten, die Ströme um 20% aufwärts und abwärts ändern. In der grossen Kiste war diese Veränderlichkeit viel beschränkter und die richtige Art des Festdrückens durch wenige Vorversuche spielend zu erlernen. Der Rahmen wurde viermal an verschiedenen Stellen, stets senkrecht zur Längsrichtung der Kiste, welche zugleich die Stromrichtung war, eingegraben. Die Messung wurde so ausgeführt, dass der die Kiste durchfliessende Strom so lange reguliert wurde, bis der Rahmenstrom die Werte:

$$\left. \begin{array}{l} 0,1, 0,15, 0,2, 0,25, 0,3, 0,4, \\ 0,5, 0,6, 0,7, 0,8, 1,0 \end{array} \right\} \text{ Milliampère}$$

zeigte. Theoretisch hätte der Kistenstrom das Hundertfache des Rahmenstromes betragen sollen, da die Querschnitte sich verhielten wie 100:1. Wie nahe das erreicht war, zeigt folgende Zusammenstellung der erhaltenen Kistenströme in Milliampère:

Erste Stelle	Zweite Stelle		Dritte Stelle Der Rahmen war 16 Stunden eingegraben, ehe die Messung begann	Vierte Stelle Der an der dritten Stelle benutzte Rahmen nach Einstreichen neuer Erde, aber mit derselben Paste	Theorie
	als bald nach dem Eingraben	eine Stunde später			
11,0	11,0	10,5	11,0	11,0	10,0
15,5	16,0	15,1	15,0	15,2	15,0
21,0	21,5	20,0	20,0	20,2	20,0
25,5	26,5	25,0	25,0	25,8	25,0
30,0	31,5	30,0	29,0	30,9	30,0
40,0	41,0	39,8	38,0	40,9	40,0
50,0	51,5	49,5	47,0	50,1	50,0
59,5	61,5	59,5	56,0	60,1	60,0
69,5	72,5	69,5	65,0	70,2	70,0
79,0	83,5	79,5	73,5	80,2	80,0
100,0	105,0	99,5	92,0	103,5	100,0

An der dritten Stelle wurde der Rahmenfehler zu 0,01 Milliampère bestimmt, an der vierten Stelle war er halb so gross.

Zum Vergleich wurde auch hier der Rahmen ohne Paste in ähnlicher Art benutzt. Das Ergebnis war:

Kistenstrom	99,5	79,5	69,5	59,5	30	20
Rahmenstrom	0,46	0,35	0,30	0,27	0,10	0,055

Wie man sieht, ist das Verhältnis vom Kistenstrom zum Rahmenstrom niemals 100, sondern weit grösser. Es fliesst also der Polarisation wegen zu wenig Strom durch den Rahmen. Da von hohen zu niedrigen Stromwerten übergegangen wurde, bewirkt das Nachhinken des Polarisationsausgleiches, dass das Verhältnis bei den kleinsten Strömen am stärksten von hundert abweicht. Zur weiteren Kontrolle wurden auch in der grossen Kiste die Erstwerte und die Endwerte des Rahmenstromes bei öfterem Wenden des Kistenstromes beobachtet. Es ergab sich bei dem Rahmen mit Paste:

Kistenstrom Milliampère	Rahmenstrom	
	Erstwert	Endwert
100	1,020	1,000
60	0,613	0,595
30	0,308	0,290

Bei dem Rahmen ohne Paste:

100	0,555	0,455
60	0,350	0,265
30	0,175	0,140

Die in diesem Falle an dem Rahmen ohne Paste beobachteten Schwankungen wurden bei einer Wiederholung noch etwas grösser gefunden:

100	0,575	0,440
60	0,350	0,245

Der Unterschied zwischen gepastetem und blankem Rahmen macht sich auch in den Rahmenfehlern sehr geltend. Sie erreichen beim blanken Rahmen vorübergehend 0,05 Milliampère, wenn nämlich der Kistenstrom unterbrochen und die erste Einstellung des Galvanometers — bei 1 Ohm im Nebenschluss — beobachtet wird, bei welcher noch erhebliche Polarisation der Platten wirksam ist. Auch nach einigem Zuwarten waren die Rahmenfehler stets grösser als bei dem gepasteten Rahmen, bei dem sie in einer Reihe weiterer Beobachtungen zu 0,004 bis 0,006 Milliampère sich ergaben.

Betrachten wir die für den gepasteten Rahmen ermittelten Zahlen näher, so lehren die Beobachtungen an dem 16 Stunden eingegrabenen Rahmen, dass dieser danach zu hohe Werte zeigte. Offenbar dringt Schwefelsäure aus der Paste langsam durch die Pergamentpapierlage in das Erdreich heraus und vermindert den Rahmenwiderstand. Deshalb macht, wie die Messung zeigt,

danach der Rahmenstrom etwas mehr als 1 % des Kistenstromes aus. Aber die Abweichung ist nicht gross. Wir haben gelegentlich, um festzustellen, welche äusserste Abweichung denkbar ist, die Erde, mit der der Rahmen ausgestrichen wird, direkt mit 20 prozentiger Schwefelsäure angeteigt und dann den Rahmenstrom gleich dem doppelten des Wertes gefunden, den er normalerweise haben musste.

Anderseits haben wir den Widerstand des Rahmens erhöht, indem wir zwischen die Kupferplatten nicht nur das Galvanometer, sondern auch einen variablen Widerstand einfügten. Wir fanden folgende Werte:

Zusatz- wider- stand	Gef. Milliampère <i>i</i>	<i>i</i> be- rechnet	Zusatz- wider- stand	Gef. Milliampère <i>i</i>	<i>i</i> be- rechnet
0	0,723	0,742	100	0,548	0,554
10	0,705	0,718	200	0,441	0,442
20	0,679	0,695	300	0,366	0,368
30	0,658	0,673	500	0,274	0,275
40	0,640	0,653	700	0,232	0,220
50	0,625	0,634	1000	0,173	0,169
60	0,604	0,617	3000	0,066	0,066
70	0,592	0,600			

Die als berechnet angeführten Werte sind gewonnen, indem für die Beziehung des Zusatzwiderstandes W zur Stromstärke J die Gleichung

$$E = (W + x)J$$

angenommen wurde, in welcher E die als unveränderlich angenommene Spannung zwischen den Rahmencndflächen, und x der Widerstand des Rahmens abgesehen vom Zusatzwiderstande ist. Die Polarisation wurde also vernachlässigt. Nach der Methode der kleinsten Quadrate lassen sich die wahrscheinlichsten Werte von x und E auf Grund dieser Gleichung berechnen. Die Rechnung liefert:

$$x = 294,9 \text{ Ohm}; E = 0,2188 \text{ Volt.}$$

Mit diesen Werten von x und E sind dann wieder rückwärts die Stromstärken berechnet, die in der Tabelle zugefügt sind. Die nahe Uebereinstimmung der gefundenen und berechneten Werte bestätigt die Geringfügigkeit der Polarisation, die hier vernachlässigt ist. Zugleich ist die Tabelle sehr belehrend hinsichtlich des Einflusses, den ein zu grosser Rahmenwiderstand üben wird, der in seiner Wirkung offenbar einem Zusatzwiderstand gleichkommt. Der Rahmenwiderstand von 294,9 Ohm fällt so gut wie ausschliesslich zu Lasten des Erdreiches, mit dem der Rahmen vollgestrichen ist. Da diese Erdschicht im ganzen 36 mm Dicke hat, so berechnet sich ihr spez. Widerstand aus dem abgeleiteten Werte von 294,9 Ohm zu 79,0 Ohm pro Kubikmeter-Würfel. Wir erwähnten zuvor, dass die Versuchskiste 170 Ohm Widerstand besass, womit im Hinblick auf ihre Masse ein spezifischer Widerstand des Erdreichs von 68 Ohm pro Kubikmeter-Würfel folgt. Die zur Füllung der Kiste

in beiden Fällen benutzte Erde war nicht dieselbe. Die Zahlen sind also nicht direkt vergleichbar. Wohl aber sind es die folgenden, mit etwas grösserer Stromstärke ausgeführten Messungen:

Zusatz- wider- stand	Gef. Milliampère <i>i</i>	<i>i</i> be- rechnet	Zusatz- wider- stand	Gef. Milliampère <i>i</i>	<i>i</i> be- rechnet
0	2,113	2,127	100	1,577	1,561
10	2,030	2,053	200	1,256	1,233
20	1,964	1,984	300	1,030	1,019
30	1,905	1,919	500	0,762	0,756
40	1,851	1,858	700	0,595	0,601
50	1,751	1,801	1000	0,464	0,460
60	1,744	1,747	3000	0,179	0,197
70	1,697	1,697			

Es wurde dieselbe Art der Berechnung angewendet, welche lieferte:

$$x = 275,9 \text{ Ohm}; E = 0,5869 \text{ Volt.}$$

Er erschien wertvoll, das Ergebnis der voranstehenden Versuche, denen zufolge die zufälligen Fehler beim Vollstreichen und Eingraben praktisch verschwinden, wenn man durch einige Vorversuche in einer grossen Kiste sich die richtige Art des Streichens und Eingrabens angeeignet hat, durch einen unabhängigen Beobachter nachprüfen zu lassen.

Der Chemiker des Karlsruher Gaswerkes, Herr Dr. Franz Richardt, hatte die Güte, sich dieser Bemühungen zu unterziehen und gelangte zu demselben Ergebnis.

Es wurden im Anschluss an diese Versuche noch Bestimmungen ausgeführt, bei denen Silberrahmen, wie zuvor Kupferrahmen, in die grosse Erdkiste eingesetzt wurden. Der durch die Kiste gehende Strom wurde mit Hilfe eines grossen Kupfervoltameters ermittelt. Die Ergebnisse waren:

- I. Zunahme der Kupferkathode 3,5026 g,
Hundertster Teil des Silber-
äquivalents 0,1188 „
Zunahme der Silberkathode . 0,1186 „
Abnahme der Silberanode . 0,1192 „
- II. Zunahme der Kupferkathode 3,4165 „
Hundertster Teil des Silber-
äquivalents 0,1161 „
Zunahme der Silberkathode . 0,1159 „
Abnahme der Silberanode . 0,1162 „

Es sei noch bemerkt, dass die Paste aus essigsäurem Silber, welche im Gegensatz zur Sulfatpaste nur mit Wasser statt Säure ange-macht ist, zu jener Widerstandsverminderung des Rahmens, die S. 837 beschrieben ist, keinen Anlass geben kann. Zur Bestimmung der Rahmenfehler beim Silbercoulometer wurden weiterhin zwei Versuche gemacht, bei welchen Rahmen mit Silberplatten in die stromlose Kiste gesetzt und die Gewichtsänderung nach 24 Stunden bestimmt wurde. Dieselbe betrug $\frac{1}{3}$ bis $\frac{1}{2}$ mg.

An dieser Stelle seien schliesslich noch einige ältere Versuche mit Kupferrahmen angeführt, bei denen diese wie die Silbercoulometer benutzt wurden. Auch hier wurde das Quantum des Stromes in der Kiste mit einem Kupfercoulometer bestimmt, seine Stärke betrug gegen 300 Milliampère:

	Kupferniederschlag im Vergleichscoulo- meter in Gramm	Kupferrahmen	
		Kathode + Gramm	Anode — Gramm
I.	25,94	0,27	0,31
II.	15,12	0,15	0,20
III.	19,00	0,18	0,20
IV.	20,32	0,203	0,205

§ 6. Beziehungen zwischen Coulometern, Tastelektroden und Widerstand der Erde.

Die Kupferrahmen stellen zwei aneinandergelegte unpolarisierbare Elektroden dar. Diese Eigenschaft gibt ihnen einen nahen Bezug zu den Tastelektroden von Haber und Goldschmidt. Man könnte mit Hilfe eines Kupferrahmens die Werte des Spannungsfalles, der Stromstärke und des Widerstandes an einer Erdstelle im Prinzip auf einmal finden; wenn man nämlich ein Voltmeter von sehr hohem Widerstande statt des Drehspulengalvanometers von sehr kleinem Widerstande in den Rahmenstromkreis schaltet, so wird man die Spannung zwischen den Rahmenendflächen erhalten, und wenn man diese Spannung dividiert durch die mit dem anderen Instrument ermittelte Stromstärke, so hat man den Widerstand der in den Rahmen gestrichenen Erde und damit den spezifischen Widerstand des Erdreichs. Die Möglichkeit, so zu messen, ergibt sich ohne weiteres aus den S. 838 angeführten Beobachtungen. Statt des Voltmeters mit hohem Widerstande könnte auch eine Kompensationsschaltung verwendet werden, bei welcher überhaupt kein Stromfluss durch den Rahmen stattfindet. Diese Möglichkeit, mit einem Kupferrahmen allein Spannung, Stromstärke und Erdwiderstand zu messen, wird aber dadurch illusorisch, dass man die Richtung des Spannungsfalles in der Erde schon kennen muss, ehe man den Rahmen richtig eingraben kann, damit die Stromlinien die Kupferplatten senkrecht treffen. Man muss also doch zuvor Tastelektroden benutzen, die auch bequemer in der praktischen Behandlung sind. Auf der anderen Seite ist die Ableitung des Erdwiderstandes aus zwei Messungen an einem Rahmen zwar bei konstantem Strom recht einfach, bei den starken Stromschwankungen, welche die vagabundierenden Ströme in der Erde zeigen, aber jedenfalls ungenauer als die direkte Bestimmung des Erdwiderstandes an einer ausgehobenen Probe. Dieselbe wird in eine mit Eisenelektroden an den Schmalwänden aus-

gerüstete längliche Kiste gegeben, deren Widerstandskapazität aus ihren Dimensionen folgt, und mit Wechselstrom und Telephon der Widerstand festgestellt. Schwarzbleche als Elektroden geben ein so ausgezeichnetes Minimum, dass die Beobachtung selbst auf geräuschvollen öffentlichen Strassen volle Genauigkeit hat. Bei dieser Feststellung des Erdwiderstandes ist es natürlich immer schwierig, genau den Zustand des Bodens zu reproduzieren. Am zweckmässigsten erscheint es, das Volumgewicht der Erde an einer ausgestochenen Probe von bestimmten Abmessungen festzustellen und dann in die Widerstandskiste so viel Erde hineinzubringen, bezw. zu pressen, dass das Volumgewicht dasselbe ist.

Das vornehmlich praktische Interesse haftet an der Stromdichte an der Austrittsstelle des Stromes aus den Rohren. Kennt man die Richtung, in welcher der vagabundierende Strom von den Rohren wegfliessen, die meist nahezu mit der kürzesten Verbindungslinie Rohr—Schiene zusammenfällt, so wird man den Rahmen möglichst dicht am Rohr so eingraben, dass der Stromfluss ihn senkrecht trifft. Je weiter man vom Rohr ableibt, um so geringer fallen die gemessenen Werte aus, weil der Strom dort, wo Rohr und Schiene parallel laufen, in der Ebene senkrecht zu ihrer Längsrichtung, dort, wo sie sich kreuzen, aber in allen Vertikalebene sich ausbreitet. Die Stromdichte ist deshalb in der Richtung des Spannungsfalles im allgemeinen am Rohr ein Maximum und sinkt, wenn wir uns den Schienen nähern. Den erneuten Anstieg, der schliesslich bei immer stärkerer Annäherung an die Schienen zu gewärtigen ist, haben wir in der Praxis nie konstatieren können, da wir uns den Schienen mit dem Rahmen nirgends auf mehr als etwa 30 cm nähern konnten. Denn die Schienen ruhen in der Strassendecke, deren Beschaffenheit (Schotter, Asphalt, Pflaster) unmöglich macht, einen Rahmen in angemessener Art zu benutzen.

Ueber die Grösse der Stromdichteabnahme, oder, was dasselbe ist, über die Grösse der Ausbreitung der Stromlinien ist es nun leicht, sich mit Hilfe von Rahmen und Tastelektroden zu unterrichten. Misst man nämlich einmal das Gefälle in der Richtung, in der es am stärksten ist, mit zwei Tastelektroden, von denen die eine dicht am Rohr sitzt, die andere $\frac{1}{2}$ bis 1 m entfernt eingesetzt ist, andererseits die Stromdichte pro Quadratdecimeter mit dem an die Stelle der ersten Tastelektrode eingesetzten Rahmen, so erhält man als Produkt aus dieser Stromdichte und dem Widerstand einer Erdsäule von 1 qdm Querschnitt und von der Rahmendicke (4 cm) das Gefälle dicht am Rohr pro 4 cm Gefällsweg. Das Verhältnis beider Gefällswerte kennzeichnet die Ausbreitung.

Wie man sieht, greifen die verschiedenen möglichen Messungen mit Rahmen und Tastelektroden mit Widerstandsbestimmungen der Erdproben in der Art ineinander, dass man die Strombewegung, -Richtung und -Stärke in der Erde ebenso verfolgen kann, wie man die gleichen

starker Erdschlüsse in den von der elektrischen Hochschulzentrale versorgten Instituten erweckte die Vermutung, dass vielleicht messbare vagabundierende Ströme im Boden nachweisbar sein möchten. Es ergab sich indessen lediglich ein geringer vagabundierender Strom, der in das

Lageplan der Bohrlöcher auf dem Gelände der Techn. Hochschule.

Fig. 315.

Größen in metallisch leitenden Systemen zu verfolgen pflegt.

§ 7. Messungen auf dem Gelände der Technischen Hochschule.

Zur Prüfung der praktischen Anwendbarkeit der Tastelektroden in Verbindung mit den Rahmen stellten wir zunächst eine Reihe von Versuchen auf dem Gelände der Technischen Hochschule an. Die örtlichen Verhältnisse werden durch den Plan verdeutlicht. Das Auftreten

unbebaute Gelände östlich der Hochschule von einer jenseits führenden Strassenbahn hinein gesandt wurde. In der Fig. 315 sind 20 Stellen angegeben, an denen Bohrungen angestellt und Tastelektroden eingesetzt wurden. Die Stelle 5 bezeichnet eine in Fig. 316 besonders dargestellte Grube, die übrigen 19 Punkte Bohrlöcher von $1\frac{1}{2}$ m Tiefe.

Es wurde zunächst ermittelt, dass auf dem freien Gelände östlich der Hochschule Spannungsdifferenzen zwischen den Bohrlöchern am

und zwar bei Herbeiführung eines Erdstromes seitens des elektrotechnischen Institutes einen etwas kleineren Betrag als ohne diesen, während nach der Stromrichtung das Gegenteil eigentlich zu vermuten gewesen wäre. Auch hier also machte sich die Erdung im elektrotechnischen Institute nicht bemerkbar.

Innerhalb der Grube 5 (Fig. 316) liess sich ein kleines Vertikalgefälle nachweisen, wie aus folgenden, mit Hilfe von Tastelektroden ausgeführten Beobachtungen hervorgeht:

1	gegen 3		+ 0,085 Volt,
1	"	4	 + 0,04 "
2	"	3	 + 0,05 "

Schliesslich wurden noch Widerstandsmessungen ausgeführt, indem das Erdreich aus jeder einzelnen Grube in die Messkiste gebracht und untersucht wurde. Der Boden des Messgeländes war durch ehemalige Bautätigkeit in seiner natürlichen Beschaffenheit ziemlich weitgehend gestört worden. Die ermittelten Zahlen sind also ein Anhalt dafür, wie grosse Unterschiede durch solche zufälligen Eingriffe zu stande kommen. Es wurde im Mittel ein Widerstand von 300 Ohm pro Kubikmeter-Würfel gefunden. Im einzelnen ergaben sich folgende Werte:

Loch	Widerstand pro Kubikcentimeter- Würfel in Ohm	Temperatur in Grad C.
1	164	+ 2
2	255	+ 2
3	985	+ 4
4	146	+ 4
5	310	+ 2
6	201	+ 3
7	456	+ 2
8	493	+ 2
9	292	+ 3
10	328	+ 1
12	420	+ 0,5
13	219	+ 1,0
14	365	+ 2
15	310	+ 2
16	328	+ 2
17	365	+ 2
18	420	+ 2
19	310	+ 2
20	420	+ 2

Das Gesamtergebnis der Ermittlungen geht über den Nachweis eines vagabundierenden Stromes, der von Osten her in das Gelände der Technischen Hochschule eintritt und durch das Gas- und Wasserrohr zwischen dem elektrotechnischen und dem chemisch-technischen Institut aufgenommen wird, nicht hinaus. Der vagabundierende Strom ist zu schwach, als dass sich genauere Ermittlungen mit unseren Hilfsmitteln hätten durchführen lassen.

§ 8. Strassenmessungen in Karlsruhe.

Wir gingen nun dazu über, die Verhältnisse der vagabundierenden Ströme in den Strassen der Stadt zu untersuchen. Zu dem Ende bestimmten wir zunächst mit einem Voltmeter von hohem Widerstande im ganzen städtischen Strassenbahnnetz die Spannungsdifferenzen zwischen Rohren und Schienen. Die Hydranten gaben die Verbindungsstellen der Rohre mit dem Voltmeter ab. Alle Kontaktstellen wurden sorgfältig blank gefeilt. Die Fig. 317 gibt ein Bild der Strassenbahnlinien und der mittleren Spannungen zwischen Schienen und Hydranten. Man erkennt, dass im Hauptteil der Stadt die Rohre negativ gegen die Schienen sind, so dass Angriffe in diesem Gebiete nicht zu erwarten sind. Zwar ist schliesslich denkbar, dass auch in einem solchen Gebiete positiver Strom aus dem Rohre austritt, falls nämlich irgendwo in der Nähe eine metallische Ableitung vorhanden sein sollte, die nicht nur gegen die Schiene, sondern auch gegen das Rohr negativ wäre. Bei der Untersuchung zweier Punkte in dem Stadtgebiete, in welchem das Rohr negativ gegen die Schiene war, haben wir indes für eine solche Vermutung keinen Anhalt gefunden. Sie ist überdies, allgemein betrachtet, äusserst unwahrscheinlich, wenngleich nicht geleugnet werden soll, dass gelegentlich auch einmal ein solcher Fall vorkommen mag, der indessen nach unseren Erfahrungen nur eine vereinzelte Merkwürdigkeit bilden könnte. Das positive und negative Rohrgebiet sind auf dem Stadtplan durch eine strichpunktirte Linie geschieden. Erhebliche positive Spannungen des Rohres gegen die Schiene treten nur auf der Durlacher Allee und der Tullastrasse auf. Auf der Aussenstrecke nach Durlach östlich der Tullastrasse liegen keine Rohrleitungen mehr im Boden. Der Anschluss der Zentrale an die Schienen ist an der Ecke der Tullastrasse und Durlacher Allee bewirkt. Ein Widerstand ist in diese Verbindung nicht eingeschaltet. Deshalb ist ein Rückleitungskabel, welches am Marktplatz an die Schienen angeschlossen ist, von relativ geringer Wirkung. In der Fig. 317 sind noch die fünf Speisepunkte an der Tullastrasse, am Bahnhof, am Mühlburger Tor und auf den Aussenstrecken nach Beiertheim und dem Kühlen Krug eingetragen. Ferner sind die fünf Stellen durch schwarze Kreise gekennzeichnet, an denen wir nähere Untersuchungen nach den zuvor beschriebenen Methoden vorgenommen haben.

Der Betrieb der Strassenbahn in der Stadt geschieht im Winter während rund 17, im Sommer während rund 18 Stunden. Während der ersten und letzten Betriebsstunden ist die Stromabgabe der Zentrale relativ klein. Eine Durchsicht der Diagramme für die während der

benutzten einige Abend- und Nachtstunden unmittelbar vor der Auswechslung zu den Messungen, wobei für die Bestimmung der Stromstärke nur die Erdampèremeter benutzt werden konnten, während die Zeit für die Benutzung der Erdcoulometer nicht reichte, weil die Grube aus Verkehrsrücksichten noch in derselben Nacht zugeschüttet werden musste. Wir fanden bei Tage folgende, durch den Schnitt Fig. 318 verdeutlichte Mittelwerte¹⁾:

A) Tagesmessungen.

Rohr gegen Schiene

— 1,5 Volt.

Rohr gegen Tastelektrode im Punkte:

1. im Mittel + 0,15 Volt,

2. " " + 0,09 "

Vertikalgefälle der Spannung im Boden:

Tastelektrode in 2. gegen Tastelektrode in 3.

-- 0,18 bis -- 0,28 Volt.

Fig. 318.

Fig. 319.

Strommessungen dicht über dem Rohr mit Hilfe des Erdampèremeters:

0,02 bis 0,10 Milliampère.

Richtung des positiven Stromes:

Von der Schiene zum Rohr.

B) Nachtmessungen.

Rohr gegen Schiene

Um 12 Uhr . . . + 0,03 Volt,

" 12 " 50 Min. . + 0,03 "

Rohr gegen Tastelektrode in

2. + 0,41 Volt,

6. + 0,47 "

1) Die Vertikalebene, welche in ihrer Lage durch die eine Schiene definiert ist, fällt zusammen mit der einen Erdwand der Grube, in welche die Tastelektroden hineingedrückt wurden. Das Wasserrohr wird von dieser Ebene nicht geschnitten, sondern liegt hinter ihr. Es ist nur aus Deutlichkeitsgründen in der Figur so gezeichnet, als würde es durch diese Ebene geschnitten.

Vertikalgefälle:

Tastelektrode in 5. gegen Tastelektrode in

4. + 0,075 Volt,

6. + 0,01 Volt.

Der Nachtwert der Spannung des Rohrs gegen die dicht darüber bei 2. eingesetzte Tastelektrode entspricht mit guter Annäherung dem früher erwähnten Normalwert von + 0,45 Volt. Der Tageswert zeigt in charakteristischer Weise die kathodische Polarisation (Wasserstoffpolarisation) des Rohres, welche, wiederum ganz im Einklang mit der Erwartung, auf der den Schienen zugekehrten Seite stärker als auf der den Schienen abgewendeten Seite ist. Das Spannungsgefälle in der Erdwand zwischen den 1 1/2 m entfernten Punkten 3. und 2. beträgt im Mittel am Tage 0,24 Volt. Die Stromstärke dicht am Rohr, die gleich dem Spannungsgefälle und der Polarisation mit dem Verkehre ausserordentlich lebhaft pulsiert, hat einen Mittelwert von 0,06 Milliamp/qdm. Die Gesamtspannung von 1 1/2 Volt verteilt sich folgendermaassen:

A) Polarisation der Schiene, nebst Ausbreitungswiderstand an ihr und Widerstand der

Strassendecke 0,94 Volt

B) Spannungsgefälle von 50 cm

Tiefe bis zum Rohr 0,24 "

C) Polarisation des Rohrs 0,32 "

1,50 Volt

Das kleine zur Nachtzeit noch bestehende Gefälle in der Erdwand liess sich in der kurzen verfügbaren Zeit nicht näher verfolgen. Für die Tatsache des Stromverlaufs von der Schiene zum Rohr und die damit verbundene Schutzpolarisation des Rohres ist es ohne Belang.

Messpunkt II.

Der Messpunkt II befindet sich an der Karlstrasse. Das Pflaster besteht dort aus Granit. Seine Fugen sind nicht mit Asphalt vergossen. Wenige Meter entfernt ist ein Droschkenhalteplatz, so dass die tierischen Defäkationen ins Erdreich gelangen können. Rohr und Schiene laufen parallel die Strasse entlang. Ihr Vertikalabstand beträgt 2 m, ihr Horizontalabstand wenige Centimeter. Es wurde eine Grube ausgehoben, deren Verhältnisse aus der Fig. 319, ersichtlich sind. Das aus der Grube ausgehobene Material war Sand von dem hohen spezifischen Widerstand von 492 Ohm/cbm. Nach Osten grenzte an die Grubenwand gewachsener Boden von dem kleineren spezifischen Widerstand von 307 Ohm/cbm. Der westlich gelegene Droschkenhalteplatz hatte offenbar, wie aus der Widerstandsmessung hervorging, keine leitenden Salzfasen in die Nähe des Rohres entsandt.

Die Beobachtungen ergaben folgende Mittelwerte:

A) Tagmessung:

Rohr gegen Schiene:

— 1,0 Volt.

Rohr gegen Tastelektrode in

1. + 0,38 Volt.

Tastelektrode in 1. gegen Tastelektrode in

2. — 0,2 Volt,

3. — 0,36 "

4. — 0,5 "

Strommessungen mit Erdampèremetern:

Rahmenlage I: 0,01 Milliampère

" II: 0,03 "

Strommessungen mit Erdcoulometern:

Gewichts- veränderung	Rahmenlage I	Lage II
der Kathode . .	+ 0,0005 g	+ 0,0012 g Ag,
" Anode . .	— 0,0010 "	— 0,0005 " "

B) Nachtmessung:

Rohr gegen Schiene:

Null.

Rohr gegen Tastelektrode in

1. + 0,48 Volt.

Derselbe Wert ergab sich, wenn die Tastelektrode 50 cm östlich oder westlich eingesetzt wurde.

Tastelektrode in 2. gegen Tastelektrode in 4:
Null.

Der stromlose Nachtzustand ist gekennzeichnet durch das Fehlen jedes Spannungsgefälles im Erdreich und durch die dem Normalwert der Spannungsdifferenz Rohr—Tastelektrode sehr nahekommende Zahl von 0,48 Volt. Bei Tage fließt, wie die Gefällsmessungen in sehr deutlicher Weise lehren, positiver Strom von der Schiene zum Rohr. Die Stromdichtigkeit am Rohre ist ungemein gering, erheblich kleiner als am Messpunkte I. Immerhin reicht sie noch aus, um eine Wasserstoffpolarisation von $\frac{1}{10}$ Volt hervorzubringen. Die Stromdichten am Rohr gehen nur wenig über die Fehlergrenzen der Apparate hinaus. Die Angaben des Erdcoulometers stimmen aber doch mit denen des Erdampèremeters befriedigend überein. Beide zeigen denselben Stromsinn von der Schiene zum Rohr. Da die Messungen während der Winterbetriebsperiode gemacht wurden, so gewinnen wir nach den früheren Angaben die Stromstärke in Hundertstel Milliampères aus den Gewichtsveränderungen des Erdcoulometers in Milligramm durch Multiplikation der letzteren mit 1,66. Dies liefert für beide Rahmenlagen 0,01 bis 0,02 Milliampère.

Die beiden Rahmenlagen waren gewählt aus Rücksicht auf die Wahrscheinlichkeit, dass der Strom durch das besser leitende Erdreich ostwärts ausbog. Zur Vermeidung von Missverständnissen sei bemerkt, dass die beiden Rahmenlagen nur der Richtung nach in der Schnitt-

zeichnung der Grube angegeben sind. Die Rahmen selbst waren in der Südwand der Grube eingegraben und wurden durch den in der Zeichnung dargestellten Schnitt natürlich nicht getroffen. Die Verteilung der Spannung Schiene-Rohr ist an dieser Messstelle die folgende:

- A) Polarisation der Schiene nebst Ausbreitungswiderstand an ihr und Widerstand der Strassendecke 0,40 Volt,
 B) Spannungsgefälle von 50 cm Tiefe bis zum Rohr 0,50 "
 C) Polarisation des Rohrs 0,10 "
 1,00 Volt.

In diesen Zahlen kommt zum Ausdruck, dass der Widerstand der Strassendecke kleiner und der des Erdreichs grösser ist als am Messpunkt I.

Messpunkt III.

Der Messpunkt III befindet sich an der Kreuzungsstelle der Melanchthonstrasse. Dort

Schnitt durch die Grube bei der Melanchthonstrasse

Fig. 320.

kreuzt ein Wasserrohr die Schienen in 1,6 m Tiefe.

Die Durlacher Allee wie die Melanchthonstrasse sind gestückt und darüber geschottert. Die Strassenbahn fährt auf einem einige Centimeter erhöhten Damme, der weder gestückt noch geschottert, sondern nur gekiest ist. Es wurde eine Grube ausgehoben, die durch einen Schnitt, Fig. 320, verdeutlicht ist. Die Messungen ergaben:

A) Tagmessung:

Rohr gegen Schiene:

+ 2,5 Volt.

Rohr gegen unmittelbar daneben oder darüber befindliche Tastelektrode:

+ 0,74 Volt.

Vertikalgefälle in der Wand, welche mit der einen Schiene in derselben Vertikalebene lag:
 Tastelektrode in 3. gegen Tastelektrode in 4:

+ 0,32 Volt,

Tastelektrode in 4. gegen Tastelektrode in 5:

+ 0,09 Volt.

Strommessung mit dem Erdampèremeter dicht über dem Rohr:

0,1 bis 0,2 Milliampère.

Strommessung mit dem Erdcoulometer binnen 24 Stunden:

Gewichtsänderung der Kathode $+0,0058 \text{ g Ag}$,
" " Anode $-0,0039 \text{ „ Ag}$.

Aus der kathodischen Gewichtsänderung berechnet sich eine Stromstärke von:

0,1 Milliampère.

Die anodische Aenderung ist vermutlich dadurch zu klein geworden, dass die Platte beim Herausnehmen aus dem Rahmen eine Schramme erhielt.

B) Nachtmessung.

Rohr gegen Schiene:

Null.

Rohr gegen Tastelektrode in:

1. $+0,59 \text{ Volt}$ | 4. $+0,56 \text{ Volt}$
2. $+0,58 \text{ „}$ | 5. $+0,56 \text{ „}$

Widerstand des Erdreichs:

115 Ohm pro Kubikmeter.

Fig. 321.

Der Nachtwert des Rohres gegen das Erdreich zeigt hier eine jener gelegentlich vorkommenden Abnormitäten, indem er mehr als 0,1 Volt über dem Normalwert liegt. Die Tagesmessungen ergeben die Tatsache positiven Stromflusses vom Rohr zur Schiene und dem charakteristisch entsprechend eine Polarisierung des Rohres, welche, auf den Normalwert des Eisens bezogen, 0,3 Volt, auf den anormalen Nachtwert bezogen, 0,15 Volt beträgt, die Stromdichte dicht am Rohre geht über die schlechterdings unbedenklichen Beträge hinaus. Die Spannungsverteilung zeigt folgendes Bild:

- A) Polarisierung der Schiene, nebst Ausbreitungswiderstand an ihr und Widerstand der oberen Strassenschicht **1,79 Volt,**
B) Spannungsgefälle von 50 cm Tiefe bis zum Rohr **0,41 „**
C) Polarisierung des Rohres **0,30 „**
2,50 Volt.

Der abnorme Spannungsverbrauch unter A) schreibt sich daher, dass die Schiene dort freiliegt, indem die Oberkante der Holzschwellen zu Tage tritt. Unter die auf Kies liegenden Schwellen sind mit der Spitzhacke noch Schottersteine geschlagen. Der relativ niedere Widerstand des Bodens unter der Strassendecke kommt hinzu, um das Verhältnis des Spannungsverbrauches unter A) zum Spannungsverbrauch unter B) sehr gross zu machen. Dieser niedere Bodenwiderstand wieder hängt mit dessen lehmiger Beschaffenheit zusammen.

Messpunkt IV.

Der IV. Messpunkt liegt an der Kreuzung der Tullastrasse und Durlacher Allee, und zwar gerade dort, wo ein Wasserrohr die Schienen in 2,2 m Tiefe schneidet. Hier befinden sich mehrere im Winter stets mit Salz bestreute Weichen, da hier der gesamte Wagenverkehr von und nach dem Strassenbahndepot zusammenläuft. Die daselbst ausgehobene Grube ist wieder durch einen Schnitt Fig. 321 verdeutlicht. Ferner ist eine besondere Skizze Fig. 322 zugefügt, welche das Strassenbild der Tullastrasse und die Lage der Untersuchungsstelle verdeutlicht.

Es wurden an diesem Messpunkt nur Tagesmessungen ausgeführt, da die im letzten unmittelbar benachbarten Messpunkt auf der Tullastrasse ermittelten Nachtwerte ohne Bedenken auch für diesen Messpunkt als massgeblich gelten dürfen. Es wurden folgende Ergebnisse im Mittel gefunden:

Rohr gegen Schiene:

$+4,5 \text{ Volt}$.

Rohr gegen Tastelektrode dicht über dem Rohr:

Erster Tag $+0,89$, anderer Tag $+1,07 \text{ Volt}$
Vertikalgefälle:

Tastelektrode in 1. gegen Tastelektrode in
2. erster Tag $+1,36$, anderer Tag $+1,52 \text{ Volt}$,
3. " " $+1,69$, " " $+1,85 \text{ „}$

Strommessungen mit Erdampèremeter dicht über dem Rohr:

0,6 bis 1,2 Milliampère.

Strommessungen mit Erdcoulometer ebenda, Gewichtsänderung:

Anode $-0,0809 \text{ g Ag}$,

Kathode $+0,0821 \text{ „ Ag}$.

Daraus berechnet sich eine Stromstärke von **1,35 Milliampère/qdm.**

Das Erdreich in 2,15 m Tiefe wies einen Widerstand von 135 Ohm pro Kubikmeter-Würfel auf. In 1 m Tiefe betrug derselbe bei verschiedenen Messungen nur 67,5 und 47,4 Ohm, was mit dem regelmässigen Salzstreuen im Winter seine Erklärung findet.

Wir haben hier eine unzweifelhafte Gefahrenstelle vor uns.

Die Spannungsverteilung zeigt folgendes Bild:

- A) Polarisation der Schiene, nebst Ausbreitungswiderstand an ihr und Widerstand der Strassen-
decke **2,20 Volt,**
B) Spannungsgefälle von 40 cm
Tiefe bis zum Rohr hinab . **1,77 "**
C) Polarisation des Rohres . . . **0,53 "**
4,50 Volt.

Man wird erkennen, dass sich das Rohr anodisch vergleichsweise schwerer als kathodisch polarisiert. Das ist ein Verhalten, welches bei Metallen in verdünnten Lösungen ihrer Salze von der Theorie vorausgesagt wird.

Es sei betont, dass an diesem und an dem nächsten Messpunkt die Mittelwerte aus den Einzelbeobachtungen relativ am schwersten und

Wetter Wasser ab, während sie bei Regen Wasser aufnehmen: Damit werden die Leitfähigkeiten und mit ihnen Strom- und Spannungswerte geändert. Dieser Sachverhalt kommt in dem Unterschied der an verschiedenen Beobachtungstagen gefundenen Zahlen zum Ausdruck. Die durch den Bahnbetrieb bedingten Wertschwankungen sind stets am grössten zwischen der Schiene und dem ihr nächstgelegenen Ansatzpunkt der Tastelektrode; sie werden kleiner zwischen diesem Ansatzpunkt der Tastelektrode und einem tieferen: Relativ am stabilsten sind alle Werte, die ganz tief unten am Rohr gefunden werden, also Polarisation des Rohres und Stromdichten an demselben. Aber auch sie schwanken noch immer mehr, als dem Beobachter angenehm ist.

Fig. 322.

quantitativ am unsichersten zu finden waren. Die Ursache liegt darin, dass die Spannung Rohr—Schiene in den weiten Grenzen von 3 bis 6 Volt schwankte. Mit ihr schwanken stets alle anderen Zahlen, sowohl das Gefälle im Erdreich, als die Polarisation des Rohres, als schliesslich die erdampèremetrisch gemessenen Ströme. Nur das Erdcoulometer gibt einen richtigen Summenwert. Bei allen anderen Messungen kämpft man mit der Schwierigkeit, dass die Schwankungen nicht nur bald grösser, bald kleiner sind, sondern auch, dass die Zeiten, während deren jeder Einzelwert sich erhält, bald kürzer, bald länger sind. Es ist Sache der Uebung, danach einen leidlich richtigen Mittelwert zu schätzen. Genau kann derselbe ohne registrierende Instrumente schlechterdings nicht ausfallen. Lässt man eine Grube, wie in diesem Falle geschehen, mehrere Tage offen, so geben ihre Wände bei trockenem

Messpunkt V.

Den Messpunkt V bildet die Tullastrasse. Hier wurden zu verschiedenen Zeiten vier Gruben (1, 2, 3, 3a) ausgehoben. Die Strasse ist gestückt und geschottert. Ihre Verhältnisse gehen im übrigen aus der Fig. 322 hervor. Es seien zunächst die Messungen in der Grube 3a erörtert, die zuletzt ausgehoben wurde, nachdem die anderen Gruben einige Monate früher untersucht und danach wieder geschlossen worden waren. Die Grube legte das Rohr in 2 m Tiefe bloss. Es läuft der Schiene in einer Horizontalentfernung von 8 m parallel. Die Messung hatte nur den Charakter einer Kontrolle und wurde darum nur bei Tage ausgeführt.

Rohr gegen Schiene:

+ 5,0 Volt.

Rohr gegen unmittelbar östlich davon eingeführte Tastelektrode:

+ 0,82, mittags bei starkem Verkehr
+ 0,93 Volt.

Vertikalgefälle in der Ostwand der Grube:
Tastelektrode in 2 m Tiefe gegen Tastelektrode:

in 1,5 m Tiefe + 0,25 Volt,

„ 1,0 „ „ + 0,42 „

„ 0,5 „ „ + 0,53 „

Stromstärke erdampèremetrisch:
etwa 0,3 Milliampère,

Erdcoulometrische Messung:

Gewichtsabnahme Anode — 0,0124 g Ag,

Gewichtszunahme Kathode + 0,0119 „ Ag.

Daraus berechnet sich, da die Messung in die Sommerbetriebszeit fiel, 0,19 Milliampère während der mittleren Tagesstunden. Die Rahmen wurden auch in diesem Fall so eingegraben, dass die kürzeste Verbindungslinie Rohr—Schiene senkrecht auf der Plattenmitte stand. Zur Ermittlung des Gefälles auf dieser Linie wurde 1 m von den Schienen ein 40 cm tiefes Loch gegraben. Eine Tastelektrode dicht am Rohr war gegen eine Tastelektrode in diesem Loch:

+ 3,0 Volt.

Daraus ergibt sich für die Spannungsverteilung:

A) Polarisierung der Schiene, nebst Ausbreitungswiderstand an ihr und Widerstand der nächsten Erdschichten	1,57 Volt,
B) Spannungsgefälle 1 m von der Schiene bis zum Rohr . . .	3,00 „
C) Polarisierung des Rohres . . .	0,43 „
	5,00 Volt.

An vorgestreckten Teilen des Rohres war eine höhere Stromstärke zu erwarten. Eine solche Stelle war in einem Rohrstutzen gegeben, der an der Untersuchungsstelle sich östlich gegen die Schiene 25 cm weit vorstreckte. Dort ergab sich erdcoulometrisch eine Gewichtsänderung von:

0,0164 mg Ag in 24 Stunden,

entsprechend:

0,26 Milliampère/qdm

bei der 16stündigen Sommerbetriebszeit.

Mit dem Erdampèremeter wurden an derselben Stelle im Mittel:

0,52 Milliampère/qdm

gefunden. Die Stelle vor dem Stutzen war schwer zugänglich, und es war wegen der Muttern, die den Deckel des Stutzens festhielten, nicht leicht, die Rahmen in gleicher Richtung und gleich dicht vor dem Stutzen einzusetzen; daher dürften die Unterschiede des Erdampèremeters und Erdcoulometers rühren. Wurde das Erdampèremeter lotrecht, und zwar so eingesetzt, dass seine Platten in die Richtung der

kürzesten Verbindung Schiene—Rohr fielen, so war die angezeigte Stromstärke:

0,01 Milliampère.

Derselbe Versuch wurde in Grube 2 an demselben Messpunkt gemacht. Diese Messungen, wie alle in den Gruben 1 bis 3 ausgeführten, lagen in der Zeit vor dem 1. Mai, also in der Winterbetriebsperiode.

Das Erdampèremeter zeigte dort dicht am Rohr:

a) Wenn die Verbindungslinie Rohr—Schiene senkrecht auf der Ebene der Kupferplatten stand:

0,18 Milliampère/qdm,

der Wert stieg um 30%, wenn auf dem der Grube nächst gelegenen Schienenstück ein Wagen anfuhr.

b) Wenn die Verbindungslinie Rohr—Schiene in die Ebene der Kupferplatten fiel und diese

1. horizontal lagen:

0,005 bis 0,02 Milliampère/qdm

2. vertikal lagen:

0,02 bis 0,04 Milliampère/qdm.

Ebenso ergab sich in Grube 3:

a) 0,18 Milliampère,

b) 1. 0,00 Milliampère,

2. 0,01 bis 0,025 Milliampère.

In beiden Fällen zeigt sich eine, wenn auch kleine Horizontalkomponente des Stromes längs dem Rohre. Für eine solche kleine Komponente ist indessen auch ein besonderer Grund vorhanden. Zwei Stellen desselben Wasserrohres, die 20 m entfernt lagen, wiesen nämlich eine Spannungsdifferenz von nicht weniger als 0,21 Volt auf, und zwar war das Wasserrohr im Norden negativ gegen die südlicheren Teile. Dem entspricht naturgemäss eine schwache Komponente des Erdstromes längs dem Rohr. Was den Erdwiderstand anlangt, so wurden beim Ausheben der Grube 1 aus 2 m, 1,2 m und 0,5 m Tiefe Proben untersucht:

2 m: gelber, gewachsener Boden

255 Ohm/cbm bei 7°C.

1,2 m: schwarzer

Gartenboden . 237 „ „ 4°C.

0,5 m: Aufschüttung 292 „ „ 4°C.

Beim Graben des Loches 7 stiess man in 1,2 m Tiefe auf Lehmboden. Dessen Widerstand war 100 Ohm/cbm bei 3°C.

In Loch 8 fand sich schwarzer Humusboden von 219 Ohm/cbm bei 3°C.

In der Grube 1 (Fig. 323) wurde die Polarisierung des Rohres auf der den Schienen zugekehrten und der ihnen abgekehrten Seite bestimmt (Tastelektrode in 1, bzw. 2). Die letztere ergab sich auch hier, wo der grosse Abstand Rohr—Schiene die Ausbreitung der Stromlinien in der Vertikalebene begünstigt, kleiner. Die Spannung Rohr—Tastelektrode war bei

Nacht dem Normalwert nahe, nämlich **0,47** bis **0,48** Volt. Bei Tage war sie nach Osten **0,68**, nach Westen **0,64** Volt, die Polarisierung betrug also nach der Seite der Schiene **0,20** Volt, nach der den Schienen abgekehrten Seite **0,16** Volt. Die Spannung Rohr—Schiene betrug während der Nacht **+0,015** bis **+0,020** Volt. Bei Nacht zeigten sich in Grube 1 die Tastelektroden in 1, 3, 5, 7 innerhalb 0,02 Volt äquipotentiell. Dagegen war auch bei Nacht eine Spannungsdifferenz von 0,055 Volt zwischen zwei Tastelektroden zu konstatieren, von denen die eine im Loch 7, die andere im Punkt 1 der Grube 1 sich befand. Letztere war positiv. Hier ist naheliegend, die Ursache in der Verschiedenheit des Bodens zu vermuten, der in der Tiefe der Grube 1 und in Loch 7, wie zuvor mitgeteilt, ganz andere Leitfähigkeit hatte. Bekanntlich kann man aus zwei gleichen Elektroden, die in denselben Elektrolyten tauchen, also hier aus zwei Zinkelektroden in Zinkvitriol eine galvanische Kette dadurch herstellen, dass man zwischen sie verschiedene leitende Flüssigkeiten bringt, da das Spannungsgesetz für Elektrolyte nicht gilt. Die Potentialdifferenzen an der Grenze von zwei verschiedenen Elektrolyten, welche auf der Ionenbeweglichkeit beruhen, liefern bei symmetrischer Anordnung der Elektroden, wie es unsere Tastelektroden sind, Flüssigkeitsketten, deren inzwischen vielfach bestätigte Theorie wir Nernst¹⁾ verdanken. Solche Flüssigkeitsketten können leicht einige Hundertstel Volt Kraft haben. Es ist also bei erweislich erheblicher Bodenverschiedenheit nicht nötig, aus einem mit Tastelektroden ermittelten Spannungsunterschied von einigen Hundertstel Volt auf einen Stromfluss zu schliessen, sondern ein solcher Unterschied kann möglicherweise vom Konzentrationsunterschiede der in beiden Böden gelösten Stoffe herrühren, welche eine Flüssigkeitskette erzeugen. Messungen des Tagesgefälles in der vertikalen Ostwand der Grube 1 ergaben, dass eine Tastelektrode dicht am Rohr gegen eine 1,5 m höhere Tastelektrode etwa **+0,5** Volt, gegen eine 1 m höhere etwa **+0,42** Volt, gegen eine 0,5 m höhere etwa **+0,3** Volt Spannungsdifferenz hatte. Die Vertikalkomponente des Gefälles ist entsprechend der Lage des Rohres zu den Schienen in der Nähe des Rohres erheblich und wird nach der Strassendecke zu klein.

Es wurden zwei kurze Stollen horizontal vom Rohr östlich und westlich in die Erde getrieben und in ihnen 70 cm östlich und 70 cm westlich vom Rohr eine Tastelektrode eingesetzt, die mit je einer dicht am Rohr in 1, bzw. 2 (Grube 1) eingesetzten Tastelektrode verglichen wurden. Die östliche Elektrode zeigte **-0,33** Volt, die

westliche nur **-0,1** Volt. Das Rohr gibt also nicht nur in Richtung der Schienen, sondern auch nach rückwärts positive Elektrizität ab, aber viel weniger, wie es auch nach rückwärts schwächer anodisch polarisiert ist. Schliesslich liess sich auch noch folgende Frage aufwerfen: In der Nacht ist das Erdreich, von den kleinen bereits erörterten Spannungsgefällen, die auf Bodenverschiedenheiten und Flüssigkeitsketten beruhen mögen, abgesehen, äquipotentiell. Schiene und Rohr, die ebenfalls untereinander äquipotentiell sind, liegen bei der hier angenommenen Zählung gemeinsam um 0,45 Volt über dem Potentialniveau des stromlosen Erdreichs. Bei Tage, wenn die Ströme fliessen, wird dennoch in einer gewissen erheblichen Entfernung von Rohr und Schiene das Erdpotential dasselbe wie in der Nacht sein. Welches diese Entfernung ist, erkennen wir daran, dass wir mit den Tastelektroden kein nennenswertes weiteres Gefälle finden, wenn wir uns noch weiter von Rohr und

Fig. 323.

Schiene entfernen. Bei einem entsprechenden Versuch ergab sich, dass eine Tastelektrode in einem 1 m tiefen Loche 55 m östlich von der Schiene im freien Feld gegen eine zweite Tastelektrode in einem ebenso tiefen Loch 105 m östlich im freien Feld nur noch 0,02 Volt negativ war. Eine so kleine Spannungsdifferenz auf einen so grossen Abstand belehrt, dass hier nennenswerte Ströme nicht mehr vorhanden waren und demgemäss annähernd Gleichheit des Tag- und Nachtzustandes bestand. Man konnte nun fragen, wie sich das Potentialniveau der Schiene bei Tage zu diesem Potentialniveau der Erde in 50 bis 100 m Abstand verhielt. Wenn bei Nacht Schiene und Rohr gemeinsam um **+0,45** Volt über dem Potentialniveau des Bodens liegen, während bei Tage das Rohr **+5** Volt gegen die Schiene besitzt, so kann dieses Verhältnis darin begründet sein, dass die Schiene auf ein sehr tiefes Potentialniveau gesunken oder das Rohr auf ein sehr hohes gestiegen ist, oder schliesslich, dass sich das eine Gebilde im Potential annähernd so viel erhöht, wie das

1) Zeitschr. f. physik. Chemie 4, 129 (1889).

andere erniedrigt hat. Es fand sich nun bei Tage die Schiene gegen die Tastelektrode im
Loch 7 — 2,1 Volt,

„ 8 — 2,85 „

Anderseits zeigte sich eine Tastelektrode in Loch 10 gegen eine solche in dem 55 m von der Schiene in der Richtung über 3a) → 10) hinaus liegenden Loche 2,5 Volt negativ. Aus diesen Messungen, die nur vorläufigen Charakter tragen und leicht durch zahlreichere Bestimmungen werden kontrolliert werden können, scheint immerhin hervorzugehen, dass im wesentlichen die Schiene in ihrem Potential durch die ihr beim Strassenbahnbetrieb aufgezwungenen Ströme gegenüber ihrem Nachtzustande stark geändert wird, während dies bezüglich der Rohre nicht der Fall ist. Damit stimmt dann recht gut, dass das in dem Strassenplane der Tullastrasse eingezeichnete, von der Schiene weiter entfernt als das Wasserrohr gelegene Gasrohr mit diesem letzteren annähernd äquipotentiell gefunden wurde. Dieses Verhältnis wird auch anderweitig berichtet. Ebenso ist damit die mehrfach berührte Vorstellung in Harmonie, dass der angeblich grosse Uebergangswiderstand zwischen Rohr und Erde, der nur an vereinzelten Anfressungsstellen fehlen soll, in Wirklichkeit gar nicht vorhanden ist. Schliesslich ist damit die Beobachtung im Einklang, dass die Schwankungen der Spannungen sich abdämpfen, je tiefer wir von der Schiene zum Rohr hinabsteigen. Das Rohrnetz erscheint als ein grosses, in gutem Kontakt mit der Erde stehendes Leitersystem, welches bei Tage von Strömen durchflossen wird, deren Dichtigkeit vergleichsweise klein ist. Es wird durch den Uebertritt der Elektrizität von der Erde und in die Erde in Grenzen, die bei den in Karlsruhe untersuchten Stellen nur selten über $\pm 0,5$ Volt hinausgehen, gegen die benachbarten Erdschichten in seinem Potential geändert. Diese Erdschichten selbst bleiben immer in ihrem Potential der Gesamtmasse des tieferen Bodens ähnlich. Die Schienen hingegen, welche von viel dichteren Strömen durchflossen werden und in der Strassendecke einen viel schlechteren Kontakt mit dem Boden haben, weichen während des Betriebes, dort, wo ihre Spannungsdifferenz gegen das Rohr erheblich ist, von dem Potentialniveau, das ihren Nachtzustand kennzeichnet, sehr stark ab. Verbildlicht man, wie das gern geschieht, elektrische Verhältnisse durch hydrostatische, so gleicht das Rohrnetz einem Wasserbehälter von wenig, das Schienennetz einem solchen von stark schwankendem Druck.

Das praktische Resultat der Messungen für die Stadt Karlsruhe geht dahin, dass die Rohre, welche die Durlacher Allee von der Melanchthonstrasse bis zur Tullastrasse kreuzen, und diejenigen auf der Tullastrasse selbst nicht frei

von Gefährdung sind. Direkt unerträglich erschien vom praktisch-technischen Standpunkte aus der Zustand an der Kreuzung der Tullastrasse und Durlacher Allee.

Die Direktion der Städtischen Gas- und Wasserwerke, deren Unterstützung uns während dieser Versuche in dankenswerter Weise zuteil geworden ist, sah sich deshalb zu Ausgrabungen an dieser Stelle veranlasst. Die leitenden Beamten dieser Behörde und der Elektrotechniker der Erdstromkommission des Deutschen Vereins von Gas- und Wasserfachmännern, Herr Besig, haben die blossgelegten Rohre mit uns besichtigt. Bei Gelegenheit dieser Ausgrabungen wurden sowohl an dem bereits früher untersuchten Wasserrohr, wie auch an dem Gasrohr, das auf dem Plane an der Kreuzungsstelle der Tullastrasse und Durlacher Allee kenntlich ist, neue elektrische Messungen angestellt. Die Spannung zwischen dem Wasserrohr und der Schiene war dieselbe wie früher, d. h. im Mittel 4,5 Volt. Das Gasrohr war um einen geringen Betrag, nämlich um 0,05 Volt positiv gegen das Wasserrohr und zeigte gegen die Schienen demgemäss fast ganz dieselbe Spannung wie das Wasserrohr. Das Wasserrohr zeigte gegen eine Tastelektrode, die dicht über ihm eingesetzt war, im Mittel $+0,95$ Volt, also denselben Wert wie früher, und auch das Vertikalgefälle zwischen zwei Elektroden, von denen die eine dicht über dem Wasserrohr, die andere 1 m höher eingesetzt war, entsprach mit etwa 1,8 Volt ziemlich dem früheren Werte. Bei der Blosslegung des Wasserrohres erwies sich, dass es auf der ganzen Oberseite angegriffen war. Das Bild dieser Anfressung war sehr charakteristisch. Wenn man bedenkt, dass die Rohre ursprünglich geteert in die Erde kommen und dass diese Teerhaut an unzähligen Stellen Risse hat, durch die dann der elektrolytische Angriff auf das Rohr hinabgeht, so wird man erwarten, dass eine runzlige Anfressung entsteht, indem die einzelnen Teerpartikeln unterfressen werden. Ungleichheiten des Rohrmateriales werden sie an einigen Stellen begünstigen. Aber jene gewaltigen Unterschiede, die man oft antrifft — tiefe Löcher neben im wesentlichen intakten Flächen — wird man ohne besondere weitere Gründe nicht voraussehen. Das Bild des Angriffs entsprach ganz dieser Erwartung. Die letzte Erdschicht dicht um das Rohr war mit Rost in einer Weise durchsetzt, die nach dem Urteil der anwesenden Gasfachmänner durch die Annahme gewöhnlicher Verrostung des noch jungen Rohres nicht erklärt wurde. Nach ihrer Entfernung zeigte sich die ganze Oberfläche des Rohres korrodiert. An manchen Stellen war diese Korrosion stärker, an manchen schwächer, aber vorhanden war sie überall. Die Rückstände von der weggefressenen Oberhaut bildeten eine mit dem

Messer leicht wegschabbare, dünne Haut auf dem Metall.

Wurde diese Haut mechanisch entfernt, so erschien das Metall geätzt, wie wenn es in einem elektrolytischen Bade gewöhnlicher Art als Anode gedient hätte. Aber so deutlich die Anfressung war, so wenig erschien sie auf dem blossgelegten Stück des Wasserrohres unmittelbar unter den Schienen augenblicklich bedrohlich, denn sie schien an keiner Stelle mehr als wenige Millimeter des Rohrmaterials weggenommen zu haben. Diese Beobachtungen wurden an jenem Stück des Rohres gemacht, welches freigelegt wurde, indem man dicht an der nördlichsten der vier Schienen (Doppelgeleise), die längs der Durlacher Allee laufen, bis auf das Rohr hinabgrub.

Die Verhältnisse am Gasrohr wurden zunächst unter der südlichsten der vier Schienen des Doppelgeleises untersucht. Mit Hilfe des Erdampèremeters fand sich dort dicht über dem Gasrohr eine Stromdichte von 0,94 Milliamp/qdm bei der ersten Messung am Vormittag, während am Nachmittag und am nächsten Tage kleinere Werte von 0,6 Milliampère/qdm sich ergaben. Denselben Wert lieferte das Erdcoulometer:

Gewichtsänderung: Anode $-0,0352 \text{ g Ag}$,
Kathode $+0,0354 \text{ „ „}$

Daraus berechnet sich 0,59 Milliampère als Durchschnittsstromstärke. Obwohl das Rohr nur 1,40 m tief im Boden lag, empfangt es also südlich der Schienen weniger Strom als das 2,2 m tief liegende Wasserrohr nördlich von den Schienen. Dem entsprach auch der Angriff. Beim Blosslegen der Oberseite des Rohres erwies sich dieselbe durchweg angefressen. Aber der Angriff war noch gleichmässiger und zugleich schwächer als am Wasserrohr. Der Unterschied musste im Erdwiderstand begründet sein. Wir haben früher angegeben, wie gut die Erde über dem Wasserrohr leitete. Gleich gutes Leitvermögen fand sich über dem Gasrohr nicht. Mehrere Proben der Erde ergaben im Minimum 83 Ohm Widerstand pro Kubikmeter-Würfel, im Mittel 93 Ohm. Auf dem nördlichen Geleise wird an der Untersuchungsstelle im Winter viel Salz gestreut, weil dort Weichen liegen. Wir vermuteten deshalb Stellen günstigsten Stromüberganges nach Norden zu: Wir gruben nun das ganze unter den Geleisen gelegene Stück des Gasrohres auf und fanden, dass die Anfressung nach Norden zu nicht nur generell zunahm, sondern dass unter dem nördlichen Geleise tiefe vereinzelte Löcher im Rohr in erheblicher Zahl sassen, welche von der Wandung nur etwa 1 bis 2 mm gesunden Materiales übrig liessen und einen Durchbruch in naher Zeit sicher erwarten machten. Diese einzelnen Punkte eines weitgehenden Angriffs in einer in ihrer ganzen Ausdehnung nur mässig korrodierten Fläche sprachen deutlich für die Existenz von besonders

gut leitenden Erdfäden, wie sie von Haber und Goldschmidt als Ursache solcher lokalisierter, starker Anfressungen angesprochen worden sind. Die alte Vermutung, dass der zufällige Kontakt zwischen Rohr und Erde gerade nur an diesen Stellen starker Anfressung gut und an den benachbarten Rohrstellen schlecht sei, war nach dem Tatbestand völlig unhaltbar, denn die Teerhaut war völlig entfernt, da der Angriff überall die oberste Metallschicht weggefressen hatte, auf der allein der Teer haftet. Die Erdhülle um das Rohr aber war überall äusserlich von gleicher Beschaffenheit, feucht, fest anliegend, frei von Steinen und durchsetzt von Eisen, das der Angriff vom Rohr weggefressen hatte, so dass der Gedanke eines erheblichen Uebergangswiderstandes an den Stellen, an denen kein Lochfrass, sondern nur Oberflächenkorrosion zu beobachten war, ausgeschlossen erscheinen musste.

Zusammenfassung der Ergebnisse.

Es wurde eine Anordnung ausgebildet, um die Dichtigkeit im Erdreich fliessender Ströme zu bestimmen. Unter Benutzung von Kupferplatten, welche mit schwefelsaurer Kupfersulfatpaste bedeckt sind, eignet sich diese Anordnung zur Verwendung als Erdampèremeter, mit Silberplatten und einer Paste aus Silberacetat und Wasser zur Benutzung als Erdcoulometer. Die systematischen Fehler der Anordnung wurden im einzelnen untersucht und erwiesen sich sehr gering. Insbesondere wurde festgestellt, dass die Polarisierbarkeit der Platten unter den Pasten geringfügig ist und dass zufällige Potentialverschiedenheiten, die von Ungleichheiten des Materiales herrühren nur sehr kleine Fehler bedingen. Die Silberfällung aus der Silberacetatpaste erfolgt so, dass der Niederschlag gut an der Platte haftet und von der Paste leicht zu trennen ist. In dem Messbereich von 0,05 bis 1 Amp/qdm liefert die Anordnung die genauesten Werte, doch werden auch bei höherer Stromdichte brauchbare Zahlen erhalten. In der Nähe von 0,01 Milliampère verlieren die Angaben ihre Brauchbarkeit. Die zufälligen Fehler bei der Benutzung der Anordnung wurden einer besonderen Untersuchung unterzogen. Es erwies sich, dass man mit geringer Uebung in einer grossen stromdurchflossenen Kiste, in welcher die Dichtigkeit des Stromes bekannt ist, Werte findet, welche von zufälligen Fehlern frei sind. Wer sich der Mühe unterzieht, diese Uebung an einer mit Erde gefüllten Kiste zu erwerben, darf darauf rechnen, keine nennenswerten zufälligen Fehler bei praktischer Benutzung der Anordnung im Strassenboden zu begehen.

Zur Erprobung der praktischen Brauchbarkeit wurden mit den Erdampèremetern und Erdcoulometern in Verbindung mit Tastelektroden

Messer leicht wegschabbare, dünne Haut auf dem Metall.

Wurde diese Haut mechanisch entfernt, so erschien das Metall geätzt, wie wenn es in einem elektrolytischen Bade gewöhnlicher Art als Anode gedient hätte. Aber so deutlich die Anfressung war, so wenig erschien sie auf dem blossgelegten Stück des Wasserrohres unmittelbar unter den Schienen augenblicklich bedrohlich, denn sie schien an keiner Stelle mehr als wenige Millimeter des Rohrmaterials weggenommen zu haben. Diese Beobachtungen wurden an jenem Stück des Rohres gemacht, welches freigelegt wurde, indem man dicht an der nördlichsten der vier Schienen (Doppelgeleise), die längs der Durlacher Allee laufen, bis auf das Rohr hinabgrub.

Die Verhältnisse am Gasrohr wurden zunächst unter der südlichsten der vier Schienen des Doppelgeleises untersucht. Mit Hilfe des Erdampèremeters fand sich dort dicht über dem Gasrohr eine Stromdichte von 0,94 Milliamp/qdm bei der ersten Messung am Vormittag, während am Nachmittag und am nächsten Tage kleinere Werte von 0,6 Milliampère/qdm sich ergaben. Denselben Wert lieferte das Erdcoulometer:

Gewichtsänderung: Anode $-0,0352 \text{ g Ag}$,
Kathode $+0,0354 \text{ „ „}$

Daraus berechnet sich 0,59 Milliampère als Durchschnittsstromstärke. Obwohl das Rohr nur 1,40 m tief im Boden lag, empfangt es also südlich der Schienen weniger Strom als das 2,2 m tief liegende Wasserrohr nördlich von den Schienen. Dem entsprach auch der Angriff. Beim Blosslegen der Oberseite des Rohres erwies sich dieselbe durchweg angefressen. Aber der Angriff war noch gleichmässiger und zugleich schwächer als am Wasserrohr. Der Unterschied musste im Erdwiderstand begründet sein. Wir haben früher angegeben, wie gut die Erde über dem Wasserrohr leitete. Gleich gutes Leitvermögen fand sich über dem Gasrohr nicht. Mehrere Proben der Erde ergaben im Minimum 83 Ohm Widerstand pro Kubikmeter-Würfel, im Mittel 93 Ohm. Auf dem nördlichen Geleise wird an der Untersuchungsstelle im Winter viel Salz gestreut, weil dort Weichen liegen. Wir vermuteten deshalb Stellen günstigsten Stromüberganges nach Norden zu: Wir gruben nun das ganze unter den Geleisen gelegene Stück des Gasrohres auf und fanden, dass die Anfressung nach Norden zu nicht nur generell zunahm, sondern dass unter dem nördlichen Geleise tiefe vereinzelte Löcher im Rohr in erheblicher Zahl sassen, welche von der Wandung nur etwa 1 bis 2 mm gesunden Materiales übrig liessen und einen Durchbruch in naher Zeit sicher erwarten machten. Diese einzelnen Punkte eines weitgehenden Angriffs in einer in ihrer ganzen Ausdehnung nur mässig korrodierten Fläche sprachen deutlich für die Existenz von besonders

gut leitenden Erdfäden, wie sie von Haber und Goldschmidt als Ursache solcher lokalisierter, starker Anfressungen angesprochen worden sind. Die alte Vermutung, dass der zufällige Kontakt zwischen Rohr und Erde gerade nur an diesen Stellen starker Anfressung gut und an den benachbarten Rohrstellen schlecht sei, war nach dem Tatbestand völlig unhaltbar, denn die Teerhaut war völlig entfernt, da der Angriff überall die oberste Metallschicht weggefressen hatte, auf der allein der Teer haftet. Die Erdhülle um das Rohr aber war überall äusserlich von gleicher Beschaffenheit, feucht, fest anliegend, frei von Steinen und durchsetzt von Eisen, das der Angriff vom Rohr weggefressen hatte, so dass der Gedanke eines erheblichen Uebergangswiderstandes an den Stellen, an denen kein Lochfrass, sondern nur Oberflächenkorrosion zu beobachten war, ausgeschlossen erscheinen musste.

Zusammenfassung der Ergebnisse.

Es wurde eine Anordnung ausgebildet, um die Dichtigkeit im Erdreich fliessender Ströme zu bestimmen. Unter Benutzung von Kupferplatten, welche mit schwefelsaurer Kupfersulfatpaste bedeckt sind, eignet sich diese Anordnung zur Verwendung als Erdampèremeter, mit Silberplatten und einer Paste aus Silberacetat und Wasser zur Benutzung als Erdcoulometer. Die systematischen Fehler der Anordnung wurden im einzelnen untersucht und erwiesen sich sehr gering. Insbesondere wurde festgestellt, dass die Polarisierbarkeit der Platten unter den Pasten geringfügig ist und dass zufällige Potentialverschiedenheiten, die von Ungleichheiten des Materiales herrühren nur sehr kleine Fehler bedingen. Die Silberfällung aus der Silberacetatpaste erfolgt so, dass der Niederschlag gut an der Platte haftet und von der Paste leicht zu trennen ist. In dem Messbereich von 0,05 bis 1 Amp/qdm liefert die Anordnung die genauesten Werte, doch werden auch bei höherer Stromdichte brauchbare Zahlen erhalten. In der Nähe von 0,01 Milliampère verlieren die Angaben ihre Brauchbarkeit. Die zufälligen Fehler bei der Benutzung der Anordnung wurden einer besonderen Untersuchung unterzogen. Es erwies sich, dass man mit geringer Uebung in einer grossen stromdurchflossenen Kiste, in welcher die Dichtigkeit des Stromes bekannt ist, Werte findet, welche von zufälligen Fehlern frei sind. Wer sich der Mühe unterzieht, diese Uebung an einer mit Erde gefüllten Kiste zu erwerben, darf darauf rechnen, keine nennenswerten zufälligen Fehler bei praktischer Benutzung der Anordnung im Strassenboden zu begehen.

Zur Erprobung der praktischen Brauchbarkeit wurden mit den Erdampèremetern und Erdcoulometern in Verbindung mit Tastelektroden

Messungen auf dem Gebiete der Technischen Hochschule Karlsruhe ausgeführt. Es fand sich daselbst ein schwacher vagabundierender Strom, aber seine Dichtigkeit war so gering, dass sie nur an einer Stelle mit unserem Erdampèremeter gemessen werden konnte. Danach untersuchten wir die Verhältnisse in den Strassen der Stadt Karlsruhe, fanden erhebliche vagabundierende Ströme und vermochten nach deren Untersuchung erhebliche Gefährdung an einem bestimmten

Punkte der Stadt vorauszusagen, wo danach beim Aufgraben der Rohre in der Tat gefahrbringende Angriffe gefunden wurden.

Die mitgeteilten Arbeiten sind von Herrn Geh. Hofrat Dr. H. Bunte und von der Direktion der Städtischen Gaswerke in Karlsruhe auf das freundlichste unterstützt worden, wofür wir auch hier unseren Dank abstellen.

(Eingegangen: 4. Oktober.)

SPRECHSAAAL.

Ueber das Verhältnis der Atomgewichte von Wasserstoff und Sauerstoff.

Von Ph. A. Guye und Ed. Mallet.

Beim Durchblättern des letzten Bandes des Jahrbuches der Elektrochemie¹⁾ finden wir, dass uns neue Experimentaluntersuchungen über das Atomgewicht des Wasserstoffs, bezogen auf Sauerstoff, zugeschrieben worden sind. Das gleiche Versehen tritt in der neuesten Auflage des Lehrbuches der anorganischen Chemie von H. Erdmann²⁾ auf. Unsere Arbeit über diesen Gegenstand³⁾, auf die obige Stellen Bezug nehmen, enthält nur eine numerische Studie, die an den vorzüglichen Untersuchungen von Morley⁴⁾ vorgenommen ist. Der Ursprung des Irrtums dürfte in dem Referat

dieser Zeitschrift¹⁾ über unsere Veröffentlichung zu suchen sein.

Genf, Laboratorium für physikalische Chemie der Universität, September 1906.

1) Z. f. Elektroch. **10**, 557 (1904). Uns ist nicht recht klar*), wie dieser Irrtum möglich war, da wir deutlich darauf hingewiesen hatten, dass es sich um eine Umrechnung der Zahlen von Morley handelt, wie übrigens im Chem. Centralblatt **1904** (I), 1471, im Journ. of chem. Soc. **1904** und im Bericht der Internationalen Atomgewichtskommission von 1905 richtig angegeben ist.

*) Mir auch nicht; vielleicht liegt ein Schreibfehler (Berechnungen statt Bestimmungen) vor, der beim Korrekturlesen nicht erkannt wurde, weil Anfertigung der Referate und Lesen der Korrekturen oft zeitlich weit auseinander liegen. Dass das Versehen mit ins Jahrbuch übernommen ist, erklärt sich leicht aus der Personalunion zwischen Zeitschrift und Jahrbuch der Elektrochemie. H. Danneel.

- 1) Jahrb. d. Elektroch. **10**, 5 (1904).
- 2) Erdmann, Lehrb. d. anorg. Chemie **1906**, 100.
- 3) Guye und Mallet, Compt. rend. **138**, 1034.
- 4) Morley, Z. f. physik. Chemie **20**, 68, 242, 417.

Die in Z. f. Elektroch. **12**, 509 (1906) erschienene Mitteilung von Wilh. Palmaer veranlasst mich zu der Bemerkung, dass die dort gegebenen Betrachtungen zum grossen Teil bereits von mir in etwas

anderem Zusammenhang veröffentlicht worden sind (Monatshefte für Chemie **23**, 602—607; Sitz.-Ber. der Wiener Akad., math.-nat. Kl., Abt. IIb, **III**, 444—449 [1902]). R. Wegscheider.

HOCHSCHUL- UND PERSONAL-NACHRICHTEN.

Berlin (Universität). Dr. M. Laue habilitierte sich für Physik.

Boston. Prof. Dr. Lyman C. Newell wurde zum Professor der Chemie ernannt.

Braunschweig. Privatdozent Dr. Emil Baur-Berlin wurde als a. o. Professor der physikalischen Chemie und Elektrochemie berufen.

Breslau. Heinr. Bergius, der verdiente Leiter der chemischen Fabrik Goldschmieden-Breslau, die aus südfranzösischem Bauxit die in Neuhausen auf Aluminium verarbeitete reine Tonerde darstellt, ist im Alter von 57 Jahren gestorben.

Clausthal. An Stelle von Professor O. Doeltz wurde der Königl. Sächsische Vice-Hüttenmeister der Muldener Hütte, Hüttenassessor R. Hoffmann, berufen.

Freiburg. An Stelle von Professor Ledebur tritt als o. Professor für Eisenhüttenkunde und metallurgische Technologie der Direktor des Gussstahlwerkes Annen, Ingenieur J. Galli.

Freiburg (Schweiz). Dr. T. Ritter Estreicher von Kozbierski-Krakau wurde zum a. o. Professor der allgemeinen anorganischen Chemie und zum Direktor eines neu einzurichtenden zweiten chemischen Laboratoriums ernannt. Ein Teil des physikalischen Instituts wurde als Abteilung für physikalische Chemie abgesondert und seine Leitung dem a. o. Professor Dr. A. Gockel übertragen.

Leipzig. Die Redaktion der Annalen der Physik hat an Stelle von Professor Drude Geh. Hofrat Prof. Dr. W. Wien-Würzburg übernommen.

London. Die Royal Society verlieh Frau Dr. W. E. Ayrton die Hughes-Medaille für ihre Untersuchungen über den elektrischen Lichtbogen.

Lyon. An Stelle des als Abgeordneter beurlaubten Professor Cazeneuve ist Dr. Sambo als Dozent für Chemie und Toxikologie berufen.

Rostock. Dr. F. Kohlrausch (Physik) wurde als Dozent für mathematische Physik an die Kaiserl. Telegraphen-Versuchsanstalt Berlin berufen.

VEREINSNACHRICHTEN.

Deutsche Bunsen-Gesellschaft für angewandte physikalische Chemie.

Adressenänderungen.

- Nr. 309. Weise, jetzt: Hohenleuben (Reuss).
 „ 895. Trautz, jetzt: Freiburg i. B., Goethe-Str. 61.
 „ 968. Winkelblech, jetzt: Frankfurt a. M. I, Gutleutstrasse 17 A, III.

Nr. 1009. Lepsius, jetzt: Berlin NW. 23, Klopstock-Strasse 52, Gg.

„ 1048. Soller, jetzt: Winterthur, Graben 37.

Gestorben.

Nr. 144. Bergius.