

C 10712

AUS DEM PHYSIOLOGISCHEN LABORATORIUM
DER UNIVERSITÄT LEIDEN.

P. A. MOERMAN.

Ueber die Methode einen isolirten Nerven durch
frequente Wechselströme zu erregen.

LEIDEN,
S. C. VAN DOESBURGH.
1901.

UEBER DIE METHODE EINEN ISOLIRTEN
NERVEN DURCH FREQUENTE WECH-
SELSTRÖME ZU ERREGEN.

UEBER DIE METHODE EINEN ISOLIRTEN NERVEN DURCH
FREQUENTE WECHSELSTRÖME ZU ERREGEN.

INAUGURAL-DISSERTATION

ZUR ERLANGUNG DER

MEDICINISCHEN DOCTORWÜRDE

VORGELEGT DER

HOHEN MEDICINISCHEN FACULTÄT

DER

Albert-Ludwig's-Universität zu Freiburg i/B.

AM

3. AUGUST 1900

VON

P. A. MOERMAN,

Arzt aus Leiden.

LEIDEN

S. C. VAN DOESBORGH.

1901.

Gedruckt mit Genehmigung der medicinischen Facultät.

Der Decan:

Hofrath Prof. Dr. SCHOTTELIUS.

Der Referent:

Hofrath Prof. Dr. VON KRIES.



MEINEM VATER.

Mein verbindlicher Dank sei hier den Herren Professoren der philosophischen und medicinischen Facultäten zu Leiden gebracht für den von Ihnen empfangenen Unterricht.

Besonders bin ich meinem hochgeschätzten Lehrer, Prof. EINHORNEN, für die mir bei der Bearbeitung dieser Dissertation geleistete Hilfe zu Dank verpflichtet.

INHALT.

| | Seite |
|---|-------|
| Einleitung | 1 |
| CAPITEL I. | |
| Historische Bemerkungen | 4 |
| CAPITEL II. | |
| Uebersicht der Untersuchungsmethode. Messungen des Widerstandes, der Capacität und der Selbstinduction. | 28 |
| CAPITEL III. | |
| Versuche mit dem Nervenmuskelpräparat | 44 |
| CAPITEL IV. | |
| Messungen mit dem rotirenden Spiegel | 58 |
| CAPITEL V. | |
| Die Stärke des erregenden Stromes | 69 |
| CAPITEL VI. | |
| Schlussbetrachtungen | 86 |

EINLEITUNG.

Vor sieben oder acht Jahren war die einst so blühende Elektrotherapie im Verfall. Man glaubte, dass die günstige Wirkung der Elektrizität auf den kranken Organismus nur scheinbar sei. Suggestion, so meinte man, hätte einen wichtigen Antheil an der Heilung der Leidenden, welche auch ohne die Anwendung der Elektrizität ebenso schnell genesen würden. Die Elektrotherapie wurde beinahe als ganz nutzlos betrachtet.

Jetzt haben sich die Ansichten, Dank sei der Anwendung der frequenten Wechselströme durch d'Arsonval, wieder ganz geändert und spielt in der medicinischen Praxis die Behandlung der Patienten mit dieser Form der Elektrizität eine wichtige Rolle.

Nach den Angaben zahlreicher Kliniker, welche, mit Paris zum Mittelpunkt, über die ganze gebildete Welt verbreitet sind, werden Kranke, welche an Neurasthenie, Diabetes, Rheumatismus, Fettsucht, Hautkrankheiten und

noch vielen anderen Uebeln leiden, erfolgreich mit frequenten Wechselströmen behandelt.

Wenn man hieraus ableiten wollte, dass nun auch die Wirkung dieser Ströme auf den gesunden Organismus wohl hinreichend bekannt sein müsste, würde man sich sehr irren. Die Angabe von d'Arsonval, dass sie durch Vermittlung der nervösen Centralorgane und der Vasomotoren den Stoffwechsel befördern, wird von anderen Forschern bezweifelt und bestritten. Ja, sogar auf die allerersten Fragen, welche der Physiolog sich stellt, ob und wie diese Ströme im Stande sind Muskeln und Nerven zu reizen, werden ganz verschiedene Antworten gegeben. Eine befriedigende Untersuchung über die angewendeten Stromstärken und die Beziehung zwischen Wechselfrequenz und Intensität von Strömen, welche noch gerade eine Minimumreaction eines Muskels oder eines Nerven hervorrufen können, ist noch nicht angestellt worden.

Und es braucht uns keineswegs Wunder zu nehmen, dass man während der Behandlung von Patienten mehrmals auf Erscheinungen stößt, die vorläufig räthselhaft erscheinen müssen ¹⁾.

In dieser Dissertation wird versucht, in Anschluss an den unlängst erschienenen Aufsatz von Prof. Einthoven ²⁾ einen Beitrag zur Lösung einiger der oben erwähnten Fragen zu liefern. Während Prof. Einthoven in seiner Publication hauptsächlich bezweckt hat, mit aller Strenge zu beweisen, dass bei unsern gemeinsam genommenen Experimenten die wahrgenommenen Reactionen des Nervmuskelpräparats ausschliesslich die Folge von der Wirkung

¹⁾ Siehe Baudet. Applications des courants de haute fréquence. Annales d'Electrobiologie. Mars-Avril 1900.

²⁾ Pflüger's Archiv f. d. ges. Physiol. 1900, Bd. 82, S. 101.

der angewendeten frequenten Wechselströme sind, wird es hier meine Aufgabe sein, sowohl die Methode als die erhaltenen Ergebnisse ausführlich zu beschreiben.

Eine historisch-kritische Skizze von der physiologischen Wirkung von Wechselströmen im allgemeinen und mehr besonders von frequenten Wechselströmen, möge vorangehen.

CAPITEL I.

Historische Bemerkungen.

Es ist erwünscht, die historisch-kritische Übersicht in zwei Theile einzutheilen. Der erste Theil *A* handelt über die physiologische Wirkung von weniger frequenten Wechselströmen, wie diese erhalten wurden, bevor man auf die Weise d'Arsonval's und Tesla's von Condensator-entladungen Gebrauch machte. Der zweite Theil *B* behandelt die Wirkung der später angewendeten d'Arsonval- und Tesla-Ströme, bei denen die Frequenzen leicht zu Hunderttausenden und Millionen Perioden per Secunde gesteigert werden können.

A. Weniger frequente Wechselströme.

Die ältere Literatur dieses Gegenstandes findet man in den Arbeiten von Kronecker und Stirling¹⁾, und

¹⁾ Kronecker und Stirling. Die Genesis des Tetanus. Archiv für Physiologie 1878, S. 1.

in denjenigen von von Kries¹⁾ und von Roth²⁾ schon in der Weise besprochen, dass es unnöthig ist, hier darauf zurückzukommen. Dagegen dürfen einige Bemerkungen über die obenerwähnten Autoren selbst hier nicht fortbleiben.

Kronecker und Stirling erreichten bei ihren Experimenten die grösste Wechselfrequenz, 11 000 Perioden per Secunde. Sie benutzten ein Werkzeug, das sie Ton-inductorium genannt haben: Ein Eisenstab war in der Mitte festgeklemmt, während über jede der Hälften eine Inductionsrolle geschoben war. Die eine Rolle diente zur Magnetisirung des Stabes und wurde von einem constanten Strom durchströmt, während die Drahtenden der andern Rolle mit einem Paar Electroden in Verbindung waren, welche den Erregungsstrom auf den Muskel oder den Nerven überbringen mussten. Dieser Erregungsstrom kam in der Form eines Wechselstromes zu Stande, indem der Stab in longitudinale Vibration versetzt wurde und das magnetisirte Eisen auf diese Weise Wechselströme in die zweite Rolle inducirte. Dadurch dass sie Eisenstäbe von verschiedener Länge nahmen, waren Kronecker und Stirling im Stande, die Frequenz der erregenden Wechselströme zwischen 500 und 11 000 Perioden per Sec. variiren zu lassen.

Es gelang ihnen, Froeschmuskeln durch Erregung mit Wechselströmen von 4000, 6000, ja sogar von 11 000 Perioden per Sec. in Tetanus zu bringen. Die Myogramme, welche sie publiciren, zeigen aber Unregelmässigkeiten,

¹⁾ Von Kries. Über die Erregung des motorischen Nerven durch Wechselströme. Berichte über die Verhandlungen der naturforschenden Gesellschaft zu Freiburg i. B. 8. 2. 1884.

²⁾ Julius Roth. Über die Wirkung höchster electricischer Reizfrequenzen auf Muskeln und Nerven. Pflüger's Archiv f. d. ges. Physiol. 1888. Bd. 42, S. 91.

welche um so stärker werden, je frequenter der den Tetanus verursachende Wechselstrom wird. Die beiden Autoren weisen selbst schon darauf hin, versuchen aber zu beweisen, dass die Unterbrechungen des gleichmässigen Tetanus doch nicht die Beweiskraft ihrer Experimente vermindern; sie behaupten thatsächlich bewiesen zu haben, dass ein Muskel durch einen Wechselstrom von 11 000 Perioden per Sec. in bleibende Contraction gebracht werden kann.

Mit den Folgerungen beider Autoren, dass durch ihre Experimente die Bedenken gegen E. du Bois-Reymond's allgemeines Gesetz der Nervenerregung aufgehoben sein sollten, weil der Nerv noch durch Ströme erregt wird, welche in weniger als 0,00005 Sec. ihr Maximum erreichen, können wir uns nicht vereinigen. Es muss ja, um nach dem Gesetz E. du Bois-Reymond's die Wirkung eines Stromes beurtheilen zu können, nicht nur seine Dauer, sondern auch seine Stärke als Funktion der Zeit bekannt sein und Messungen der Stromstärken sind von Kronecker und Stirling nicht verrichtet worden.

Von Kries stellte sich die Frage: Wie ändert sich die erregende Wirkung eines elektrischen Stromes, dessen Intensität eine periodische Funktion der Zeit ist, wenn diese Periode variiert wird? „Wenn wir im Stande sind,“ so fährt er fort, „Strom-Oscillationen hervorzurufen, deren Periode wir variiren können und die gleichzeitig in ihrer Intensität (Amplitude) beliebig abgestuft werden können, so muss es zunächst gelingen jene Frage in der Weise zu beantworten, dass wir für jeden Werth der Periode diejenige Amplitude bestimmen, welche eben hinreicht, um einen minimalen Tetanus des Muskels hervorzubringen.“

Er begnügte sich mit der Anwendung von nur annähernd genauen Sinusschwingungen. Wenn in einer Spirale ein

Eisenkern steckt, so wird bekanntlich jedesmal ein Strom inducirt, wenn der Eisenkern seinen Magnetismus verändert. Stellt man die Spitze des Eisenkernes E dem Pol P eines constanten Magneten gegenüber, so wird jedesmal ein Strom inducirt, wenn zwischen E und P ein Stück Eisen gebracht wird. Auch dieses nämlich wird sofort magnetisch gemacht und es ändert somit auch der Magnetismus des Eisenkernes. Lässt man demgemäss zwischen der freien Fläche des Eisenkerns und dem Magnetpol eine Scheibe rotiren, deren Peripherie abwechselnd Eisen und nicht magnetisirbare Substanz (etwa Messing) enthält, so erhält man in der Spirale Strom-Oscillationen. In der von von Kries gebrauchten Scheibe waren 30 Eisenzähne, durch gleich breite Messing-Intervalle getrennt, vorhanden. Die Scheibe konnte bis auf etwa 35 Umdrehungen in der Secunde gebracht werden, womit also eine Periodenzahl von 1050 in der Secunde gewonnen wurde.

Die Intensität der Strom-Oscillationen welche bei verschiedenen Rotations-Geschwindigkeiten der Scheibe erzielt wurden, wurde nicht direct gemessen, sondern nach einer mehr oder weniger complicirten Methode berechnet. Obgleich die absoluten Stromstärken hiermit nicht gefunden wurden, wurden doch die Verhältnisse der Stromstärken bekannt und durch die Berechnung wurde das Ziel, das von Kries sich stellte, völlig erreicht. Eine Kontrolle für die Richtigkeit seiner Ergebnisse fand er im Arbeiten mit grössern und kleinern Widerständen, wobei dennoch dieselben Resultate erhalten wurden.

Es zeigte sich, dass bei Zimmertemperatur das Nervmuskelpräparat für Wechselströme von bestimmter Frequenz und zwar von ungefähr 100 Perioden per Sec. am empfindlichsten ist. Bei constanter Stromstärke nimmt der Erregungseffect ab, sowohl wenn die Frequenz wächst, wie

wenn sie abnimmt. Wenn der Nerv auf eine andere Temperatur gebracht wird, wird das Minimum der erforderlichen Stromstärke verschoben. Ist er bis ungefähr 37° oder 38° erwärmt, so kommt das Minimum bei einer Frequenz von mehr als 200, ist er bis 3° oder 4° abgekühlt, bei einer Frequenz von weniger als 50 Perioden per Secunde zum Vorschein. Ein einfaches Verhältniss zwischen den Stromstärken und den Wechselfrequenzen giebt von Kries nicht an. Nur constatirt er, dass wenn einmal eine gewisse Frequenz überschritten ist, bei weiter zunehmender Frequenz auch die Stromstärke, welche für das Erzielen des Tetanus erforderlich ist, fortwährend wächst.

Höchst merkwürdig ist die Erscheinung, dass das Minimum der erforderlichen Stromstärke nur bei Temperaturveränderung des Nerven verschoben wird, nicht bei Temperaturveränderung des Muskels. Dies veranlasst von Kries, die *Entladungshypothese* zu verwerfen und die *Uebertragungshypothese* an ihre Stelle zu setzen.

Roth benutzte bei seinen Experimenten einen Microphon, den er mittelst angeblasener Pfeifen in Vibration versetzte. So erhielt er sehr regelmässige Wechselströme von verschiedener Frequenz, welche durch den Nerven eines Nervemuskelpräparats geleitet werden konnten. Roth kommt nebst andrem zu den folgenden Ergebnissen:

„Wird der Werth der Stromintensität als constant betrachtet, so entsteht bei einem bestimmten Werthe der Reizfrequenz kein Tetanus mehr, sondern einfache Schliessungszuckung. Bei einem ganz bestimmten Grenzwerte der Reizfrequenz reagirt der Muskel absolut gar nicht mehr.

Wird der Werth für die Reizfrequenz als constant betrachtet, so entspricht diesem ein ganz bestimmter Werth der Stromintensität, bei dem ebenfalls kein Tetanus auftritt.“

Die höchste Anzahl von Perioden per Sec. der von

Roth gebrauchten Wechselströme betrug 2500. Stromstärken wurden nicht gemessen.

Von Zeynek¹⁾ ist, ausser von Kries, der einzige, der versucht hat, die zwischen der Wechselfrequenz und der für eine Reaction erforderlichen Stromstärke bestehende Beziehung durch directe Experimente näher kennen zu lernen. Im Gegensatz zu den meisten frühern Forschern, welche die motorischen Nerven, speziell den N. ischiadicus eines Nervemuskelpräparats des Frosches zum Gegenstand ihrer Experimente machten, wählte von Zeynek die Enden der sensiblen Nerven. Zwei Finger einer Probestange wurden in etwa 3 cm tiefe, mit 0,7%iger Steinsalzlösung gefüllte Ausbohrungen einer dicken Paraffinplatte gehalten. Die Cylinderoberfläche der Paraffinöpfe waren mit Kupferblechen ausgekleidet, welche mit der Stromquelle in Verbindung standen.

Die Sinusströme mit langsamem Wechsel (0,15—0,5 Periode per Sec.) wurden von einer Spule geliefert, in welcher sich eine zweite von Gleichstrom durchflossene Spule gleichmässig dreht. Für eine Periodenzahl von 2,5 bis 55 per Sec. diente ein Kohlrausch'scher Sinusinductor; für Wechselströme von ca 300—2500 Perioden per Sec. eine auf besondere Weise construirte Dynamo. Zur Messung der Stromstärken diente das Maltby'sche Elektrometer und Weber's Dynamometer, aus dessen beweglicher Spule der Eisenkern entfernt war. Bei den Wechselströmen von höheren Wechselzahlen wurde fast ausschliesslich das Dynamometer verwendet.

Die Resultate von von Zeynek stimmen nicht mit denen von von Kries überein, in sofern, dass ersterer

1) R. von Zeynek. Über die Erregbarkeit sensibler Nervenendigungen durch Wechselströme. Nachrichten von der Königl. Gesellsch. d. Wissensch. zu Göttingen. Mathemat.-physikal. Classe 1899. Heft I.

nicht durch directe Beobachtungen ein Minimum der erforderlichen Stromstärke für eine bestimmte Wechselfrequenz findet. Zwar versucht von Zeynek einen Theil der erhaltenen Ergebnisse graphisch durch eine Parabel darzustellen, allein diese Curve ist construirt worden ohne den mit Strömen von geringer Wechselfrequenz erhaltenen Ergebnissen Rechnung zu tragen. Und eben letztere könnten uns am meisten über ein eventuell vorkommendes Minimum belehren. Für frequentere Wechselströme, d. h. also für einen relativ kleinen Theil aus der ganzen Beobachtungsreihe stimmt von Zeynek in Uebereinstimmung mit einer Theorie von Nernst¹⁾ die Stromstärken als der Wurzel aus der Wechselfrequenz proportional zunehmend dar.

Die Folgerungen von von Zeynek sind uns nicht den erwünschten Grad von Sicherheit zu geben. Der Beweis, dass die frequenten Wechselströme, welche durch die Dynamo geliefert werden, wirklich Sinusströme sind, fehlt. Auch bleibt einiger Zweifel über die Frage, ob das Elektrodynamometer wohl im Stande sei, die Intensität von Wechselströmen von 2500 Perioden per Sec. genau zu messen, was nicht speziell untersucht worden ist und endlich weisen wir auf die Ungleichheiten in den Ergebnissen hin, welche in Sicherheit und Regelmässigkeit hinter den von Kries erhaltenen Resultaten zurückstehen. Die Versuche, welche von Zeynek machte, mit Wechselströmen von viel grösserer Frequenz als 2500 Perioden per Sec., d. h. mit d'Arsonval- oder Tesla-Strömen zu erregen, kommen im jetzt folgenden zweiten Theile unserer historischen Skizze noch mit ein paar Worten näher zur Sprache.

1) W. Nernst. Zur Theorie der elektrischen Reizung. Nachrichten von der Königl. Gesellsch. d. Wissensch. zu Göttingen. Mathemat.-physikal. Classe 1899. Heft I. S. 104.

B. d'Arsonval- und Tesla-Ströme.

Obgleich Feddersen¹⁾ schon vor dem Jahre 1861 bewiesen hatte, dass die Elektricitätsbewegung, welche bei der Entladung einer Leydener Flasche durch einen metallischen Schliessungsbogen stattfindet, ein oscillatorisches Hin- und Herfliessen ist, war es doch namentlich die Arbeit von Heinrich Hertz²⁾, welche die Entdeckungen d'Arsonval's und Tesla's veranlasste.

Tesla's Verdienste liegen hauptsächlich in der Entdeckung der merkwürdigen Lichterscheinungen, welche frequente Wechselströme von hoher Spannung begleiten. Er war im Stande, diesen Strömen eine grosse Energie zu geben, sodass die Lichterscheinungen, welche besonders deutlich zum Vorschein traten, das Interesse der Elektrotechniker erregten. Jetzt werden frequente Wechselströme von hoher Spannung von Elektrotechnikern und Physikern gewöhnlich Tesla-Ströme genannt.

Die biologischen Fragen, welche sich an die frequenten Wechselströme anknüpfen, sind von Tesla nur eben berührt. In einer besonderen, kurzen Mittheilung, welche „Massage mit Strömen von hoher Frequenz“ betitelt³⁾ ist,

1) W. Feddersen. Ueber die elektrische Flaschenentladung. Poggendorff's Annalen der Physik und Chemie 1861, Bd. 113 S. 437. Feddersen verweist den Leser nach seiner Doctor-Dissertation, Kiel 1857 und nach den Berichten der Königl. Sächs. Gesellsch. d. Wissensch. Bd. 11, S. 171 und Bd. 13, S. 13. Siehe übrigens noch dieselben Annalen 1862, Bd. 116, S. 132.

2) H. Hertz. Ueber sehr schnelle elektrische Schwingungen. Wiedemann's Annalen 1887, Bd. 31, S. 421. Sieh auch: Gesammelte Werke von Heinrich Hertz, Bd. II, Untersuchungen über die Ausbreitung der elektrischen Kraft.

3) „Electrical Engineer“ N. Y. vom 23. Decemb. 1891. Citirt nach Ni-

spricht er den Gedanken aus, dass es vielleicht möglich sei, verschiedene Krankheiten mittelst dieser Ströme zu heilen.

Uebrigens finden wir nur die Beobachtung erwähnt, dass Wechselströme von grosser Frequenz durch den menschlichen Körper leicht vertragen werden, obgleich ihre Spannung enorm sein kann.

Im Gegensatz zu Tesla stellte d'Arsonval vor allem den Einfluss, den Wechselströme von grosser Frequenz und hoher Spannung auf den lebenden Organismus ausüben, in den Vordergrund. Die Frage, wer zuerst mittelst oscillirender Entladungen derartige Ströme angewendet hat, muss entschieden zum Nachtheil Tesla's und zu Gunsten d'Arsonval's beantwortet werden. Die ersten Publikationen d'Arsonval's findet man in den C. R. de

la Société de Biologie vom 2. Mai 1891. Darin werden Experimente mit dem Vibrator und dem Resonator von Hertz beschrieben, welche zeigen, dass die elektrischen Schwingungen keine erregende Wirkung auf das Nervmuskelpräparat des Frosches ausüben. Später hat er in den Annales d'Électrobiologie einen Aufsatz geschrieben, in dem er über die Daten seiner ersten Publikationen einige unrichtige historische Bemerkungen macht. Er sagt, dass er seine Mittheilungen in der Soc. de Biol. am 24. Februar und am 24. April 1891 machte. Nach den C. R. fanden an den Tagen aber keine Sitzungen statt. Muthmasslich wird also von d'Arsonval der 21. oder 28. Febr. und der 25. Apr. gemeint sein. Allein wir finden an diesen Daten in den C. R. keinen gedruckten Bericht eines Vortrages von ihm. Die erste gedruckte Publikation, welche wir gefunden haben, befindet sich, wie oben schon gesagt worden ist, in den C. R. vom 2. Mai 1891.

Die ersten Mittheilungen Tesla's fanden später statt und zwar in einem Vortrage, der vor dem American Institute of Electrical Engineers Columbia College N. Y. am 20. Mai 1891 abgehalten wurde. Man könnte also mit mehr Recht von d'Arsonval- als von Tesla-Strömen sprechen.

Die Publikationen d'Arsonval's¹⁾ sind in verschiedenen Zeitschriften verbreitet; die Technik seiner Experimente ist allmählich verbessert, seine Resultate sind umfangreich geworden. Schliesslich hat er in den Annales d'Électrobiologie²⁾ einen ausführlichen Aufsatz veröffentlicht,

1) C. R. de la Société de Biologie. C. R. de l'Académie des Sciences. Archives de Physiologie normale et pathologique. Annales d'Électrobiologie, d'Électrothérapie et d'Électrodiagnostic.

2) 1896, I, S. 1.

in dem er alle von ihm erhaltenen Ergebnisse vereinigt hat und der uns auf leichte Weise die Materialien für eine Beschreibung seiner Arbeit verschafft.

Im Wesentlichen wird die von ihm benutzte Vorrichtung im Folgenden beschrieben. Die Innenbelegungen von zwei Leydener Flaschen sind mit einem Funkenmicrometer verbunden und zugleich mit einer Elektrizitätsquelle, welche periodisch so grosse Spannungsunterschiede aufweist, dass zwischen den Kugeln des Funkenmicrometers Funken überschlagen. Die Aussenbelegungen der Leydener Flaschen sind durch ein Solenoid mit einander verbunden. Jedesmal wenn ein Funke zwischen den Kugeln des Funkenmicrometers überschlägt, findet eine hin- und hergehende Elektrizitätsbewegung in dem Solenoid statt und zwar mit einer Frequenz, welche durch die Selbstinduction des Solenoids und die Capacität der Leydener Flaschen bestimmt wird.

Als Elektrizitätsquelle wird eine Elektrisirmaschine, ein Ruhmkorff-Inductor oder ein mit der Lichtanlage in Verbindung stehender Transformator gebraucht. Mit dem Transformator wurden die treffendsten Resultate erhalten. Von der Wechselstrom-Lichtanlage konnten 30 Ampère bei 110 Volt in einen Strom von 0,2 Ampère und 15 000 Volt transformirt werden, sodass die enorme Energie von 3 Kilowatt für die Experimente zur Verfügung stand.

Eine Reihe zahlreicher hinter einander geschalteter Glühlampen von 110 Volt und 1 Ampère, die als Nebenschluss des Solenoids mit den Leydener Flaschen in Verbindung gebracht waren, wurde weissglühend. Bei einer Demonstration übernahmen Cornu und Marey folgendes Experiment. Sie bildeten mit ihren Körpern von Hand zu Hand einen offenen Kreis, in den noch 6 Glühlampen von 125 Volt und 0,8 Ampère eingeschaltet wurden. Dieser Kreis wurde als Nebenschluss mit dem Solenoid verbunden, was zur Folge

hatte, dass die Lampen zum Glühen gebracht wurden, ohne dass die beiden Gelehrten auch die geringste Wirkung des Stromes empfanden. Wenn die Windungen des Solenoids weit genug gemacht sind, kann eine Person sich mitten hinein begeben, und mit den Armen einen Bogen bildend kann er eine kleine zwischen den Händen gehaltene Glühlampe zum Glühen bringen, ohne dass er irgendwo mit dem Solenoid Contact hat. Letzteres inducirt dabei den Strom in den durch die beiden Arme gebildeten Kreis. Selbstverständlich wird dabei der ganze Körper von Wechselströmen durchströmt. Eine derartige Durchströmung wird von d'Arsonval *Autoconduction* genannt.

Wir haben die Experimente d'Arsonval's wiederholt und können seine Resultate vollkommen bestätigen. Der Strom der in einen Alternator veränderten Dynamomaschine des Laboratoriums wurde durch die primäre Leitung eines grossen Ruhmkorff-Inductors von 60 cm Funkenlänge geleitet. Der Inductor wurde also zum Transformator gemacht. Die Dynamomaschine ist für 3250 Watt construirt, aber die Veränderung in einen Alternator führte einen kleinen Verlust von Energie herbei. Weiter wurde die Hälfte der Energie durch den Ruhmkorff-Inductor verbraucht, dessen secundärer Draht einen Widerstand von ungefähr 100 000 Ohm besitzt. Zwar verfügten wir also nicht über eine Vorrichtung mit ebenso viel Energie wie d'Arsonval, allein die frappirende Erscheinung des Glühens von einer oder mehr Glühlampen, welche sich in demselben Kreise befinden, in den auch der Körper der Probestperson aufgenommen ist, war doch leicht zum Vorschein zu bringen.

Bei der Ausführung der Experimente waren die praktischen Rathschläge d'Arsonval's uns von grossem Nutzen. Die Funken des Funkenmicrometers zeigten die sehr

störende Neigung zu einem Lichtbogen zu verschmelzen. Weder das Ausblasen durch einen Luftstrom, noch das Anbringen eines stark magnetischen Feldes, wie von Tesla angegeben wird, liefert befriedigende Resultate. Dagegen wird die Schwierigkeit ganz beseitigt, wenn in die Leitung von dem Alternator nach der primären Wickelung des Transformators eine regulirbare Selbstinduction eingeschaltet wird.

Bei der Beschreibung der Wirkung der frequenten Wechselströme theilt d'Arsonval an erster Stelle mit, dass sie sogar bei ungeheurer Stromstärke keine Empfindung der Reizung noch irgend eine Art von Bewegung verursachen. Man kann bis zu 3 Ampère gehen; wenn diese Stärke jedoch überschritten wird, erfährt man in den Pulsen eine unangenehme Wärmeempfindung. Bei unseren eigenen Experimenten konnten wir auch die Wärmeempfindung in den Pulsen constatiren, obgleich die mittlere Stromstärke gewiss nicht mehr als 1 Ampère betrug.

Weiter wird erwähnt, wie bei localer Application auf die Oberfläche der Haut oder auf Schleimhäute rasch eine Gefühllosigkeit eintritt. Dann wird die Erhöhung des Stoffwechsels erörtert, welche durch vermehrte Sauerstoffaufnahme und Kohlensäureproduction, vermehrte Ureamsecretion, grössern Verlust an Körpergewicht und erhöhte Wärmeentwicklung constatirt wird. Die Circulation wird geändert und zwar in der Weise, dass der Blutdruck, der erst abnimmt, schon nach kurzer Zeit bis über seinen mittleren Werth ansteigt und dann auf der erreichten Höhe stehen bleibt. Microorganismen werden in ihrer Entwicklung gestört und bei anhaltender Anwendung der frequenten Wechselströme getödtet. Toxinen werden in immunisirende Substanzen umgesetzt. Weiter werden eine Anzahl von Krankheiten geheilt, wie viele Hautkrankheiten, Diabetes, Fettsucht, Rheumatismus und Gicht.

Zur Erklärung der Thatsachen, dass frequente Wechselströme sogar bei grosser Stromstärke keine Gefühlsempfindung noch irgend welche Bewegung veranlassen, spricht d'Arsonval die Hypothese aus, dass sowohl die sensibeln wie die motorischen Nerven derartig organisirt sind, dass sie nur auf Reize von bestimmten Frequenzen reagieren. Gleichartig verhalten sich das Auge und das Ohr. Ersteres ist nicht erregbar durch Aetherschwingungen von weniger als 497 Billionen und mehr als 728 Billionen per Sec., während auch letzteres nur für Luftschwingungen von innerhalb gewisser Grenzen liegenden Frequenzen empfindlich ist.

Wir dürfen hier einige kritische Bemerkungen über die geniale und fruchtbare Arbeit d'Arsonval's nicht unterlassen. Sie gelten im allgemeinen den Mangel an Messungen, sowohl der Oscillationsfrequenz wie der Stromstärke. Die Berechnung der Periodenzahl per Secunde nach der Formel Kelvin's

$$n = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

worin n die Periodenzahl per Sec., L den Selbstinductionscoefficient und C die Capacität bedeutet, ist ungenügend. Denn erstens darf die Capacität der Leydener Flaschen wegen des Rückstandes nie ganz in Rechnung gebracht werden. Zweitens hält es schwer, den Selbstinductionscoefficient von Solenoiden, wie sie d'Arsonval gebrauchte, zu berechnen. Wien¹⁾ sagt kurzweg dass eine Berechnung bei Spiralen nicht möglich sei. Drittens bringt der Körper der Versuchsperson als Nebenschluss des Solenoids Veränderung in dem scheinbaren Widerstande oder der Impedanz sämtlicher Strombahnen; also wird auch die Periodenzahl

1) Wiedemann's Annalen der Physik, 1894, Bd. 53, S. 942.

per Sec. dadurch geändert. Der Einfluss des Körpers der Versuchsperson auf die Elektrizitätsbewegung ist auch direct wahrnehmbar, weil bei Einschaltung des Nebenschlusses das Geräusch der überschlagenden Funken im Funkenmicrometer sich sehr merklich ändert.

Die von d'Arsonval verrichteten Intensitätsmessungen lehren nichts über die wirklichen Intensitäten der durch den Körper gehenden Ströme. Er benutzte Glühlampen, ein verändertes Cardew-Galvanometer oder andere Werkzeuge, mit denen die Energie des Stromes durch Erwärmung eines Drahtes oder einer Röhre beurteilt wird. Aus der Energie, welche der Strom per Sec. entwickelt, kann leicht in Verbindung mit der Resistanz des Leiters die mittlere Stromstärke per Sec. gefunden werden. So war d'Arsonval denn auch in der Lage anzugeben, dass durch den menschlichen Körper geleitete Ströme von 3 Ampère eine unangenehme Wärmeempfindung hervorrufen. Aber diese mittlere Stromstärke per Sec. belehrt uns durchaus nicht über die Stärke der wirklich vorhandenen Ströme. Jedesmal wenn ein Funke zwischen den Kugeln des Funkenmicrometers überschlägt, entsteht ein Wechselstrom, dessen Intensität anfangs maximal ist, darauf durch Dämpfung allmählich abnimmt, um schliesslich bis auf 0 reducirt zu werden.

Während dieses an Intensität regelmässig abnehmenden Wechselstromes weist die Lichterscheinung zwischen den Kugeln des Funkenmicrometers Oscillationen auf, welche wir aber sämmtlich als einen einzigen Funken betrachten wollen. Mit der Anzahl derartiger Funken, welche per Sec. überschlagen, wird unter sonst gleichen Umständen die Energie, welche in den Stromleitern entwickelt wird, direct proportional sein. d'Arsonval gelang es mit Hilfe seines kräftigen Transformators eine sehr grosse Anzahl

von Funken per Sec. im Funkenmicrometer überschlagen zu lassen und er entwickelte also in seinen Stromleitern eine grosse Energie per Sec. Allein die Energie, welche beim Ueberschlagen eines einzigen Funkens entwickelt wurde, blieb dabei unbekannt. So auch die Stromstärke in den verschiedenen Phasen des Wechselstromes. Und doch ist letztere, für die Beurtheilung der Wirkung der Ströme von grösster Bedeutung.

Nach obenstehender ausführlichen Auseinandersetzung der Arbeit d'Arsonval's wird es uns ein Leichtes sein, die weitem Untersuchungen über die Wirkung frequenter Wechselströme zu besprechen. Wir unterscheiden dabei drei Gruppen.

In die erste Gruppe werden die Untersuchungen auf dem Gebiete der Bacteriologie, Pathologie und Therapie aufgenommen. Auf den vorhergehenden Seiten erwähnten wir schon einige elektrotherapeutische Beobachtungen, aber, weil es uns zu weit von dem Ziel dieser Dissertation entfernen würde, wenn wir dieselben ausführlich behandelten, beschränken wir uns weiter nur auf die Verweisung nach den „Annales d'Électrobiologie, d'Électrothérapie et d'Électrodiagnostic und der Zeitschrift für Electrotherapie und ärztliche Electrotechnik," in welchen Zettschriften eine Anzahl von Gegenständen aus obenerwähnten Wissenschaften erörtert ist.

In die zweite Gruppe werden die Untersuchungen aufgenommen, welche sich auf den vermehrten Stoffwechsel beziehen, der durch die Anwendung frequenter Wechselströme im Körper des Menschen und der Säugethiere hervorgerufen werden soll, während wir in der dritten Gruppe die Versuche besprechen werden, durch welche man das Problem zu lösen versucht hat, ob Nerven und Muskeln durch frequente Wechselströme erregbar sind oder nicht,

oder, um uns schärfer auszudrücken, wie die Wechselfrequenz sich zu der Stromintensität, welche noch gerade hinreichen würde eine Reaction hervorzurufen, verhält.

So wichtig für die Physiologie und die biologischen Wissenschaften überhaupt die Untersuchungen auch sein mögen, welche wir in die zweite Gruppe aufgenommen haben, die Zahl der Arbeiter auf diesem Gebiete ist dennoch sehr gering. Nächste d'Arsonval nennen wir an erster Stelle Bergonié und Sigalas¹⁾, welche einen Aufsatz schrieben, dessen Titel sehr entschieden andeutet, dass über die Wirkung frequenter Wechselströme gehandelt werden soll, aber dessen Inhalt aus einer Mittheilung verschiedener Beobachtungen besteht, welche keine von allen in directem Zusammenhang mit der Anwendung von Elektrizität stehen. Man findet zwar das Versprechen erwähnt, dass spätere Untersuchungen folgen werden, allein, so viel wir wissen, sind diese bis jetzt noch nicht veröffentlicht worden.

Eine sorgfältige Untersuchung über den vermehrten Stoffwechsel unter dem Einfluss frequenter Wechselströme ist von L. Querton²⁾ verrichtet worden.

Er weist auf die Schwierigkeiten hin, welche die verschiedenen Methoden, nach denen man den Betrag des Stoffwechsels untersucht hat, darbieten, wenn die Messungen nicht länger als ein paar Stunden hinter einander fortgesetzt werden können. Die calorimetrischen Methoden erheischen für genaue Messungen sehr viel Sorgfalt und werden beson-

1) J. Bergonié et C. Sigalas. Sur l'action des courants de haute tension et de grande fréquence. C. R. de la Société de Biologie, 25 janv. 1896, p. 99.

2) L. Querton. Action des courants à haute fréquence et à haute tension au point de vue physiologique, et spécialement des effets sur le taux de l'oxydation chez le cobaye. Institut Solvay. Travaux de laboratoire publ. par Paul Heger, 1899 T. III, fasc. 1.

ders deshalb nicht empfohlen, weil durch die Anwendung der frequenten Wechselströme selbst schon eine grosse Quantität Wärme entwickelt wird, wodurch die Ergebnisse der Messungen an Deutlichkeit verlieren müssen.

Die Methode, das Thier vor und nach dem versuch zu wägen, liefert zu inconstante Resultate, als dass man viel Vertrauen darin setzen könnte. Analysen des Urins müssen jedesmal für Zeiträume von wenigstens drei Tagen geschehen, um einen zuverlässigen Maassstab für den Stoffwechsel zu liefern. Sodass schliesslich die Messung des Gaswechsels, namentlich die Messung der Quantität producirter CO₂, übrig bleibt.

Die ausführliche von Querton gegebene Beschreibung seiner Versuche gestattet nur wenig Zweifel an den erhaltenen Ergebnissen. Sein Resultat ist, dass im Gegensatz zu den Angaben d'Arsonval's der Betrag des Stoffwechsels durchaus nicht durch den Einfluss frequenter Wechselströme geändert wird.

Wir müssen hinzufügen, dass die Angaben d'Arsonval's selbst immer sehr kurz gewesen sind; alle Einzelheiten der angewendeten Methoden sind unerwähnt geblieben und es fehlt die so erwünschte Kontrolle durch Vergleichung einer Anzahl von unter verschiedenen Umständen erhaltenen Resultaten. Deshalb legen wir für diesen Theil den Ergebnissen Querton's grössere Bedeutung bei als denen d'Arsonval's. Zudem werden die Resultate Querton's durch eine sorgfältige Untersuchung Spasski's¹⁾ bestätigt. Dieser untersuchte den Gaswechsel von Cavia's mit Hilfe einer Vorrichtung, welche im Wesentlichen mit der

1) N. Spasski. De l'action physiologique des courants à haute tension et à grande fréquence. Le physiologiste Russe rédigé par Léon Morokhowetz 1899 vol. I, p. 236.

von Regnault und Reiset übereinstimmt und gelangte zu dem Resultat, dass Wechselströme von grosser Frequenz und hoher Spannung keinen merklichen Einfluss auf die O-Absorption und die CO₂-Production ausüben.

Die Ergebnisse der Forscher der dritten Gruppe gehen ebenso aus einander wie die der zweiten. Während d'Arsonval und einige mit ihm entschieden die Meinung aussprechen, dass sehr frequente Wechselströme weder Gefühlsempfindung noch Muskelcontraction hervorrufen, behaupten andere, dass dies sehr leicht geschieht. Keiner von allen hat befriedigende Messungen der erforderlichen Stromstärken verrichtet; aber überdies muss gegen die Versuche derer, welche durch Anwendung frequenter Wechselströme wohl Gefühlsempfindung oder Muskelcontraction verursacht zu haben glauben, ernstliche Einwendung erhoben werden.

Ihre Versuche sind ohne genügende Gewähr, dass die beobachteten Erscheinungen wirklich die Folge des frequenten Wechselstromes waren, genommen worden. Muskeln und Nerven sind für das Schliessen eines constanten Stromes oder für eine nicht oscillirende Condensatorentladung viel empfindlicher als für frequente Wechselströme.

Wie schon von Prof. Einthoven mitgetheilt wurde, und wir in den folgenden Abschnitten noch näher bestätigen werden, muss ein Wechselstrom von einer Million Perioden per Sec. rund sechzehntausend Mal grössere mittlere Stromstärke haben als ein constanter Strom, der durch den Nerven geschlossen wird, um eine gleiche Reaction hervorzurufen. Bei allen Versuchen mit frequenten Wechselströmen wird man also Vorsorgen nehmen müssen, um zu verhindern, dass eine Elektricitätsbewegung von anderer als der verlangten Art, auf das Ergebniss störend einwirkt. Man muss thatsächlich von dem Experimentator den strengen Beweis fordern, dass die Muskelcontraction, welche wahrgenommen

wurde, die Folge von nichts Anderem als von dem frequenten Wechselstrom war.

Dieser Beweis fehlt in den Beschreibungen, welche die Forscher von ihren Experimenten geben. Wir werden versuchen, dies für jeden von ihnen kurz zu zeigen.

Battelli¹⁾ setzt jede der Hinterpfoten eines getödteten Frosches in ein isolirtes Glas Wasser, z. B. die linke Hinterpfote in das Glas A, die rechte Hinterpfote in das Glas B. Neben der linken Pfote in dem Glase A werden die beiden Pole eines Tesla-Inductoriums gehalten und die Wirkung der Tesla-Vorrichtung wird dermassen abgeschwächt, dass die Pfoten sich nicht mehr contrahiren. Jedesmal, wenn unter diesen Umständen das Glas B, worin sich die rechte Hinterpfote befindet, mit der Erde verbunden wird, sieht man die Pfoten in Tetanus gerathen. Battelli glaubt diese Erscheinung erklären zu müssen, indem er annimmt, dass die Periode der Wechselströme durch die Erdableitung verlängert wird. Es liegt aber viel mehr auf der Hand, zu denken, dass die Inductionsrolle Tesla's jedesmal beim Ueberschlagen eines Funkens als Ganzes eine gewisse Ladung bekommt. Die beiden in das Glas A getauchten Pole verursachen zwar, jedesmal wenn ein Funke überschlägt, im Wasser des Glases A Wechselströme, allein laden sie zugleich die beiden Gläser sammt dem Körper des Frosches. Dabei muss, um das Glas B zu laden, ein Strom von A durch die Hinterpfoten des Frosches nach B gehen. Man kann die Ladung leicht so gering machen, dass der durch die Pfoten gehende Strom nicht mehr im Stande ist, die Muskeln zur Contraction zu bringen. Sobald man

1) Battelli, Contribution à l'étude des effets des courants à haute fréquence sur les organismes vivants. Archives des sciences physiques et naturelles. Genève, 4^{ème} Période, t. 7, p. 1.

jedoch das Glas *B* mit der Erde verbindet, sodass die elektrische Ladung von *B* leicht wegfließt, wird der Strom durch die Pfoten verstärkt und müssen die Muskeln sich contrahiren. Da Battelli nicht den Beweis liefert, dass beim Ueberschlagen eines Funkens der eine Pol des Inductoriums von Tesla gerade soviel positive als der andere negative Spannung zeigt, sodass die mittlere Spannung im Glase *A* immer unverändert bleibt, ist sein Experiment auch nicht von beweisender Kraft für die erregende Wirkung der frequenten Wechselströme.

Battelli variirt sein Experiment auf vielerlei Weise, ohne aber zu einem andern Schlusse kommen zu können als diesem, dass Umstände, welche bei der Anwendung gewöhnlicher Ströme vernachlässigt werden dürften, auf die Wirkung frequenter Wechselströme einen wichtigen Einfluss ausüben können.

Derselbe Einwand, der gegen die Experimente Battelli's erhoben werden muss, gilt auch für die von Radzikowski ¹⁾ und von von Zeynek ²⁾.

Radzikowski streckte ein physiologisches Rheoskop auf ein gläsernes Untergestell aus und brachte auf dem entblösten Nerven zwei Electroden an, welche jede mit einem der Pole eines Apparates von Tesla oder von Hertz direct verbunden waren. Durch diese Vorrichtungen wurden Wechselströme von grosser Frequenz, bis zu 12 Million Oscillationen per Secunde entwickelt.

Ohne etwas von den angewendeten Stromstärken zu melden, sagt Radzikowski ³⁾, dass „der entblöste und

gut isolirte Nerv immer durch die Tesla- und die Hertz'schen Ströme erregt wird.“ Diese Ströme sollen „immer“ einen „sehr heftigen Tetanus“ hervorrufen ¹⁾.

Nach unsern vorigen Auseinandersetzungen können wir uns darauf beschränken, kurz auszusprechen, dass Radzikowski hätte beweisen müssen, dass jedesmal beim Ueberschlagen eines Funkens die eine Electrode ebenso viel negativ als die andere positiv geworden, sodass das durchschnittliche Potential des interpolären Nervenstückes unverändert geblieben wäre. Er beweist dies nicht, also liegt es auf der Hand, anzunehmen, dass der Nerv jedesmal beim Ueberschlagen eines Funkens geladen wurde und um auch den Muskel zu laden einen elektrischen Strom der ihn erregte, musste durchgehen lassen.

Von Zeynek versuchte, seine Messungen von weniger frequenten Wechselströmen, welche wir im Anfang dieses Capitels schon ausführlich mitgetheilt haben, bis auf frequente Tesla-Ströme zu erstrecken. Wie sehr er dabei durch andere als die verlangten Electricitätsbewegungen gehindert wurde, kann aus den folgenden von ihm geschriebenen Zeilen hervorgehen ²⁾: „Die Versuche,“ sagt er, „haben jedoch bisher kein sicheres Resultat ergeben. Bei langsamem Funkenspiel wurde in einzelnen Fällen ein Prickeln beobachtet, doch setzte dieses viel heftiger ein und liess sich nicht für die Grenze der Fühlbarkeit einstellen. Es kam bei diesen letzteren Versuchen mit langsamem Funkenspiel auch vor, dass bei einer Stromstärke, die eine Zeit lang keine Reaction gab, plötzliche Zuckungen hervorgerufen wurden, sodass der Verdacht naheliegt, diese seien als superponirt aufzufassen. Bei einer Schwingungszahl von einigen

¹⁾ C. Radzikowski. Immunité électrique des nerfs. Institut Solovay. Travaux de laboratoire publiés par P. Heger, 1890, T. III, fasc. 1.

²⁾ A. a. O.

³⁾ A. a. O. S. 11.

¹⁾ A. a. O. S. 7.

²⁾ A. a. O. S. 101.

Zweischenkelpräparat möge gegen den Entlader in der Weise symmetrisch liegen, dass der linke Schenkel *a* mehr durch *A* influencirt wird, der rechte Schenkel *b* mehr durch *B*. Es sei weiter zu einer bestimmten Zeit die Kugel *A* mit negativer, die Kugel *B* mit positiver Electricität geladen, so erhalten wir links in *a* eine Ansammlung der positiven, rechts in *b* dagegen der negativen Electricität. Sobald der Funke überspringt, werden sich die durch Influenz im Präparat getrennten Electricitäten wieder vereinigen. Hierdurch entsteht ein Strom, der die Nerven durchläuft und erregt.

Es ist gerade um diesen elektrischen Reiz, der in der Form mit einer nicht oscillirenden Condensatorentladung übereinstimmt und wofür das Nervmuskelpräparat so besonders empfindlich ist, zu vermeiden, dass man seine Vorsorgen nehmen muss, wenn man mit einiger Aussicht auf Erfolg die Wirkungen der wirklichen Oscillationen studiren will. Dies ist die Grundlage, auf welche jede Untersuchung über die Wirkung frequenter Wechselströme sich stützen muss.

CAPITEL II.

Uebersicht der Untersuchungsmethode. Messungen des Widerstandes, der Capacität und der Selbstinduction.

Die Grundsätze der von uns angewendeten Untersuchungsmethode sind, mit schematischen Zeichnungen erläutert, schon von Prof. Einthoven in seinem mehrerwähnten Aufsätze beschrieben worden. Wir brauchen darauf hier

nicht ausführlich zurückzukommen, sondern können uns auf Folgendes beschränken.

In einem ringförmigen Leiter werden nach den bekannten Vorschriften mit Hilfe eines *Ruhmkorff*-Inductors und zweier Batterien von Leydener Flaschen frequente Wechselströme erzeugt. Von dem Ringe wird ein Strom nach einem Nervmuskelpräparat abgeleitet, sodass der Nerv einen Nebenschluss von einem Theile des Ringes bildet.

Die Stärke des Stromes durch den Nerven wird geregelt, in dem man die Funkenlänge in dem zwischen den Leydener Flaschen aufgestellten Funkenmicrometer verändert und auch, indem das Stück des Ringes, vom dem der Strom nach dem Nerven abgeleitet wird, grösser oder kleiner genommen wird.

Die wichtigste Eigenschaft der Aufstellung aller Untertheile der Vorrichtung ist gewiss wohl diese, dass der Nerv durch keine andere Electricitätsbewegung getroffen wird als nur durch die frequenten Wechselströme, welche man dem Ringe entzieht; und dies zu beweisen, war, wie wir schon in der Einleitung mittheilten, der Hauptzweck des Aufsatzes von Prof. Einthoven, an den unsere Dissertation sich anschliesst.

Widerstandsmessungen.

Es mussten während der Untersuchung verschiedene Widerstände gemessen werden: 1. die absichtlich in die Nebenleitung geschalteten inductionslosen Widerstände, wofür Glühlampen und U-förmige mit Kupfersulphatlösung gefüllte Glasröhren gebraucht wurden; 2. der Widerstand des interpolären Nervenstückes und 3. derjenige der Erdverbindungen.

Einige Widerstände wurden nach der Methode *Wheatstone's* gemessen. Diese kann namentlich zweckmässig bei der Untersuchung von Glühlampen angewendet werden.

Zweischenkelpräparat möge gegen den Entlader in der Weise symmetrisch liegen, dass der linke Schenkel *a* mehr durch *A* influencirt wird, der rechte Schenkel *b* mehr durch *B*. Es sei weiter zu einer bestimmten Zeit die Kugel *A* mit negativer, die Kugel *B* mit positiver Electricität geladen, so erhalten wir links in *a* eine Ansammlung der positiven, rechts in *b* dagegen der negativen Electricität. Sobald der Funke überspringt, werden sich die durch Influenz im Präparat getrennten Electricitäten wieder vereinigen. Hierdurch entsteht ein Strom, der die Nerven durchläuft und erregt.

Es ist gerade um diesen elektrischen Reiz, der in der Form mit einer nicht oscillirenden Condensatorentladung übereinstimmt und wofür das Nervmuskelpräparat so besonders empfindlich ist, zu vermeiden, dass man seine Vorsorgen nehmen muss, wenn man mit einiger Aussicht auf Erfolg die Wirkungen der wirklichen Oscillationen studiren will. Dies ist die Grundlage, auf welche jede Untersuchung über die Wirkung frequenter Wechselströme sich stützen muss.

CAPITEL II.

Uebersicht der Untersuchungsmethode. Messungen des Widerstandes, der Capacität und der Selbstinduction.

Die Grundsätze der von uns angewendeten Untersuchungsmethode sind, mit schematischen Zeichnungen erläutert, schon von Prof. Einthoven in seinem mehrerwähnten Aufsätze beschrieben worden. Wir brauchen darauf hier

nicht ausführlich zurückzukommen, sondern können uns auf Folgendes beschränken.

In einem ringförmigen Leiter werden nach den bekannten Vorschriften mit Hilfe eines *R u h m k o r f f*-Inductors und zweier Batterien von Leydener Flaschen frequente Wechselströme erzeugt. Von dem Ringe wird ein Strom nach einem Nervmuskelpräparat abgeleitet, sodass der Nerv einen Nebenschluss von einem Theile des Ringes bildet.

Die Stärke des Stromes durch den Nerven wird geregelt, in dem man die Funkenlänge in dem zwischen den Leydener Flaschen aufgestellten Funkenmicrometer verändert und auch, indem das Stück des Ringes, vom dem der Strom nach dem Nerven abgeleitet wird, grösser oder kleiner genommen wird.

Die wichtigste Eigenschaft der Aufstellung aller Untertheile der Vorrichtung ist gewiss wohl diese, dass der Nerv durch keine andere Electricitätsbewegung getroffen wird als nur durch die frequenten Wechselströme, welche man dem Ringe entzieht; und dies zu beweisen, war, wie wir schon in der Einleitung mittheilten, der Hauptzweck des Aufsatzes von Prof. Einthoven, an den unsere Dissertation sich anschliesst.

Widerstandsmessungen.

Es mussten während der Untersuchung verschiedene Widerstände gemessen werden: 1. die absichtlich in die Nebenleitung geschalteten inductionslosen Widerstände, wofür Glühlampen und U-förmige mit Kupfersulphatlösung gefüllte Glasröhren gebraucht wurden; 2. der Widerstand des interpolären Nervenstückes und 3. derjenige der Erdverbindungen.

Einige Widerstände wurden nach der Methode *W h e a t s t o n e*'s gemessen. Diese kann namentlich zweckmässig bei der Untersuchung von Glühlampen angewendet werden.

Aber bei feuchten Leitern wie einem Nerven, den U-Röhren und auch den Erdverbindungen bringt sie ihre eigenthümlichen Schwierigkeiten mit sich, welche die Folge der Polarisation sind. Ein einziges Mal benutzten wir eine Vorrichtung mit Inductorium und Telephon¹⁾, zogen jedoch auf die Dauer die einfache, schnelle und für unsern Zweck hinreichend genaue Widerstandsbestimmung durch Strommessung vor.

Mit dem Ausschalter *A*, Sieh Fig. 1, schliesst oder öffnet

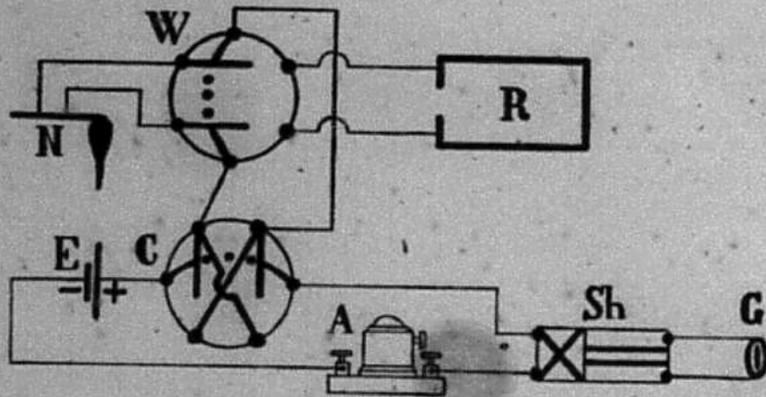


Fig. 1.

man den Kreis durch welchen das Element *E* einen Strom schiebt. Letzterer wird mittelst der Pohl'schen Wippe *W* entweder durch den Nerven oder durch den Rheostat *R* geleitet, während der Commutator *C* es ermöglicht, den Strom im Nerven umzuwenden. Als Galvanometer *G* wird ein Instrument benutzt, das nach dem Prinzip d'Arsonval's

¹⁾ Sieh Kohlrausch. Leitfaden der praktischen Physik, 1896, S. 334.

aus einer zwischen den Polen eines starken Magneten aufgehängten drehbaren Drahtrolle besteht. Die Ablesungen geschehen mit Hilfe eines Fernrohrs und einer etwa 3 m vom Galvanometerspiegel aufgestellten stark beleuchteten Glasskale. Die Ausschläge des Galvanometers können, wie eine früher absichtlich dazu angestellte Untersuchung gezeigt hat¹⁾, als vollkommen den Stromstärken proportional betrachtet werden, und durch die Benutzung der sorgfältig controlirten Shunt, ist es möglich, Ströme von sehr auseinandergehender Stärke zu messen. Die Glasskale ist 1 m lang und lässt im Felde des Fernrohrs leicht die Schätzung von Zehnteln eines Millimeters zu. Die Ausschläge des Galvanometers sind bei eingeschalteter Shunt *Sh* aperiodisch, während die Dauer des Ausschlages auf ungefähr 1 Sec. geschätzt werden darf.

Bei der Berechnung konnte der Widerstand des Galvanometers selbst, im Nebenschluss zur Shunt vernachlässigt werden. Ist also die Galvanometerabweichung = *i* bei Einschaltung des Widerstandes *w* und ist sie = *I* bei Einschaltung des Nerven, so ist der Widerstand des Nerven

$$R = w \frac{i}{I}.$$

Hierbei wird vorausgesetzt, dass die elektromotorische Kraft des Elementes in beiden Fällen gleich ist. Diese Bedingung wurde bei unsern Experimenten erfüllt, weil das Element, — ein transportabler Accumulator von 16 Ampèrestunden, — sogar nach vielwöchigem Gebrauch, immer denselben Galvanometerausschlag bei der Einschaltung eines Widerstandes von 10.000 Ohm hervorrief. Die Variationen betragen weniger als 0.2 %.

¹⁾ Sieh E. de Lint. Inauguraldissertation, Leiden 1896. Auch in *Onderzoekingen Physiol. Laborat. Leiden II*, 3, S. 83.

Der durch die Polarisation im Nerven verursachte Fehler wurde durch die Anwendung des Commutators *C* so gering wie möglich gemacht. Von zwei Ablesungen, welche jede bei einem andern Stande des Commutators verrichtet wurden und welche nur sehr wenig Unterschied aufwiesen¹⁾, wurde immer das mittlere Ergebniss genommen.

Die Widerstände des interpolären Stückes der gebrauchten Nerven wechselte zwischen etwa 50.000 und 150.000 Ohm.

Der Widerstand der mit Kupfersulphatlösung gefüllten U-Röhren bot für die Messung keine Schwierigkeiten dar. Die grosse Oberfläche der kupfernen Electroden, welche in die gesättigte Kupfersulphatlösung getaucht waren, verursachte nur eine sehr geringe Polarisation. Wir hatten eine Anzahl derartiger Röhren mit zwischen 1000 und 18.000 Ohm wechselnden Widerständen stets in Bereitschaft stehen.

Die Widerstände waren jedoch nicht constant, der Temperaturwechsel der Umgebung übte offenbar einen grossen Einfluss darauf aus und es wurde denn auch nicht versäumt, sie täglich bei den Versuchen aufs neue zu messen. Da die Messungen jedesmal in wenigen Secunden abgelaufen waren, darf man kaum sagen, dass die Anwendung der U-Röhren mit dem Nachtheil von Zeitverlust verbunden ist. Sie haben bei unsern Versuchen einen entschiedenen Vortheil über die Glühlampen. So zweckmässig diese auch sein mögen, wenn inductionslose Widerstände erforderlich sind und nur schwache Ströme gebraucht werden, bei der Anwendung starker Ströme werden alle Messungen schwierig. Der dünne Kohldraht in der Lampe wird durch starke Ströme schon bald erwärmt und hierdurch kann der Widerstand sehr bedeutend vermindert werden, wovon wir uns leicht haben überzeugen können. Wir kommen hierauf in Capitel 3 noch näher zurück.

1) Sieh über die gebrauchten Electroden das folgende Capitel.

Die von uns gebrauchten Glühlampen waren von Siemens und Halske für 110 Volt und 5 Kerzen und hatten Widerstände, welche zwischen 1360 und 1399 Ohm schwankten.

Schliesslich sagen wir noch ein Wort über den Widerstand der Erdverbindungen. Es waren drei Röhren aus verzinktem Eisen bis unters Niveau des Grundwassers in den Boden geschlagen worden. Die Polarisation zwischen den Röhren unter einander war verhältnissmässig gering, sodass die Messung des Widerstandes zwischen einer Röhre und der anderen einfach war.

Zwischen Röhre I und II betrug er 9,4 Ohm.

" " I " III " " 11,0 "

" " II " III " " 11,7 "

Als der Widerstand sämmtlicher Röhren einerseits und der Wasserleitung andererseits bestimmt wurde, zeigte es sich, dass ein grosser Potentialunterschied zwischen beiden bestand, sogar gross genug, um die Widerstandsmessung ohne Element ausführen zu können. Der Strom wurde von der Wasserleitung durch das Galvanometer (mit Shunt) nach den verzinkteisernen Röhren geleitet, erst ohne, danach mit Einschaltung eines Widerstandes *R*. Der gesuchte Widerstand heisse *W*, der Ausschlag des Galvanometers bei der ersten Schaltung *I*, bei der zweiten *i*, so ist

$$W = \frac{Ri}{I-i}$$

Als Mittelwerth von 5, mit verschiedenen Widerständen ausgeführten Messungen, wurde gefunden

$$W = 4,88 \text{ Ohm.}$$

Messungen der Capacität.

Um eine symmetrische Aufstellung für die Versuche zu bekommen, war es nöthig, zwei Batterien von Leydener

Flaschen zusammenzustellen, welche eine gleich grosse Capacität besaßen. Von jeder von 12 zur Verfügung stehenden Leydener Flasche wurde erst die Capacität gesondert bestimmt; darauf wurden 8 ausgesucht, welche zu zwei gleich grossen Batterien jede von 4 Flaschen vereinigt wurden.

Die Messung der Capacität geschah mittelst der Entladung durch einen ballistischen Galvanometer, wie in Fig. 2 schein-

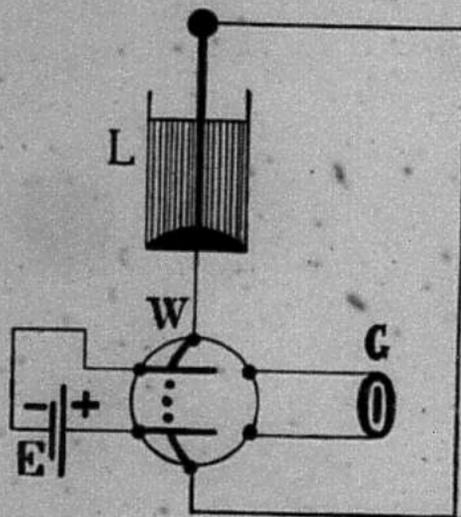


Fig. 2.

matisch dargestellt worden ist. Die Figur bedarf kaum einiger Erläuterung: *E* ist eine Batterie von Elementen, *W* eine Pohl'sche Wippe, *G* das Galvanometer und *L* die Leydener Flasche. Anfangs stiessen wir auf Schwierigkeiten bei der Messung, welche durch unvollkommene Isolation verursacht wurden. Als alle Vorsorgen für eine vollständige Isolation getroffen und u. a. die gewöhnliche Pohl'sche Wippe

durch ein derartiges Werkzeug, das aber aus einem Block Paraffine angefertigt, ersetzt worden war, waren die Schwierigkeiten beseitigt und erhielten wir sehr constante, in jeder Hinsicht befriedigende Resultate.

Als Batterie von Elementen wurden 4 Accumulatoren benutzt, während ein Galvanometer von Thomson mit grossem Widerstande, als ballistisches Galvanometer aufgestellt, das Messwerkzeug darstellte. Der hohle Spiegel war hierin durch einen ebenen ersetzt und die Ablesung der Ausschläge geschah auf die gewöhnliche Weise mit Hilfe eines Fernrohrs.

Beim Umschlagen der Wippe von links nach rechts wurde die geladene Leydener Flasche durch das Galvanometer entladen. Die Skala, welche hierdurch eine zeitweilige Abweichung erlitt, kam nach einigen hin- und hergehenden Bewegungen wieder vollkommen auf ihren Nullpunkt zurück. Obgleich der Nullpunkt sich im Laufe des Nachmittags wohl einige Millimeter verlegte, war diese Verlegung jedoch für die kurze Zeit einer einzigen Beobachtung ganz unmerklich.

Für die Untersuchung einer selben Leydener Flasche wurde die Wippe 6 oder 7 Mal umgeschlagen und aus den beobachteten ersten Ausschlägen der Durchschnittswert berechnet. Wir fanden für dieselbe Leydener Flasche alle ersten Ausschläge beinahe ganz einander gleich. So wurde z. B. bei sieben Messungen der ersten der untersuchten Leydener Flaschen ein maximaler Ausschlag von 40,5 mm und ein minimaler von 39,5 mm gefunden. Die Capacität der einen Leydener Flasche war jedoch wohl von der anderen verschieden. Als maximaler Ausschlag wurde gefunden 53,7 mm für die Leydener Flasche Nr. 8, als minimaler Ausschlag 37,0 mm. für die Leydener Flasche Nr. 4. Es war schliesslich leicht, zwei Batterien von glei-

cher Capacität zusammenzustellen. Die Batterie der Nummern 4 + 6 + 7 + 8 verursachte wie die Batterie der Nummern 2 + 3 + 5 + 9 einen ersten Galvanometerausschlag von 178 mm.

Um die gefundene Capacität in Farad ausdrücken zu können, machten wir von den folgenden Formeln ¹⁾ Gebrauch:

$$C = \frac{Q}{E},$$

worin C die Capacität in Farad, Q die Quantität der Electricität in Ampèresec. und E die Spannung in Volt bedeutet.

$$Q = K \frac{T}{\sqrt{\pi^2 + \Lambda^2}} k^{\frac{1}{\pi}} \cdot \text{arc tg} \frac{\pi}{\Lambda} \cdot e_1,$$

worin K der Reductionsfactor des Galvanometers, T die Oscillationszeit des gedämpfeschwingenden Magneten, k das Dämpfungsverhältniss und e_1 der Galvanometerausschlag bedeutet. Weiter ist $\Lambda = \log \text{nat } k$.

Der Reductionsfactor K wurde mittelst derselben Batterie bestimmt, welche bei den vorigen Messungen benutzt worden war, wodurch die Berechnung vereinfacht wurde. Der Strom wurde durch einen Rheostaten geleitet, in dem sich 7000 Ohm befand und das Galvanometer wurde derartig mit dem Rheostaten verbunden, dass es einen Nebenschluss eines Theiles des Rheostaten von 0,1 Ohm darstellte. Der Widerstand des Galvanometers betrug $w = 5870$ Ohm und der constante Ausschlag $e = 36$ mm. Hieraus lässt sich der

Reductionsfactor berechnen auf $K = \frac{E}{70000 w e} = \frac{E}{1,478 \times 10^{10}}$

Wir bemerken hierbei noch, dass die bleibenden Ausschläge

1) Sieh Kohlrausch, A. a. O.

des Galvanometers sich vollkommen proportional den Stromstärken zeigten.

Der aus einer grossen Anzahl von Beobachtungen berechnete Betrag von T war 3,3 Sec., während für das Dämpfungsverhältniss k aus fünf Beobachtungen mit einem Minimum von 1,94 und einem Maximum von 1,96 als Durchschnittswerth 1,95 gefunden wurde.

Das Resultat der Berechnung ist, dass die Capacität des Condensators

$$C = 9,28 \times 10^{-11} e_1 \text{ Farad}$$

beträgt, worin e_1 der Galvanometerausschlag in Millimetern bedeutet.

Für jede der Batterien betrug e_1 178 mm, also ist auch für jede die Capacität = $16,51 \times 10^{-9}$ Farad.

Messungen der Selbstinduction.

Es wurden eine Anzahl von Rollen gemacht, deren Selbstinduction gemessen wurde. Zur Basis der Messungen aller übrigen Rollen diente eine grosse Rolle A . Diese besteht aus 224 Windungen von durch Guttapercha isolirtem Kupferdraht. Der Diameter der äussern Peripherie der Rolle ist 44,76 cm, der der innern Peripherie 40 cm, während die Höhe 9,58 cm beträgt. Der Widerstand ist 15,8 Ohm. Man kann den Selbstinductions-Koefficient nach Wien ¹⁾ berechnen, der für einen runden zu einem Kreise gebogenen Draht folgende Formel giebt:

$$L = 4 \pi R \left\{ \log \text{nat} \frac{R}{r} + 0,333 \right\},$$

worin L den Selbstinductions-Koefficient, R den Halbmesser

1) M. Wien. Ueber die Berechnung und Messung kleiner Selbstpotentiale. Wiedemann's Annalen 1894, Bd. 53, S. 931.

des Kreises und r den Halbmesser des Drahtquerschnitts bedeutet. Für unsere Rolle A wird R berechnet als der Durchschnittsbetrag aus dem Halbmesser der äusseren Peripherie und dem Halbmesser der innern Peripherie, mit dem Ergebnis, dass $R = 21,19$ cm. Der Werth von r muss so berechnet werden, dass

$$ab = r^2 \pi,$$

worin a die Dicke der Masse bedeutet, aus der die Rolle besteht, d. h. den halben Unterschied zwischen dem Durchmesser der Aussenperipherie und dem der Innenperipherie: $a = 2,38$ cm; und b die Höhe der Rolle vorstellt: $b = 9,58$ cm.

Hieraus ergibt sich, dass $r = 2,7$ cm.

Stellt man weiter den Selbstinductions-Koeffizient proportional der zweiten Potenz der Windungszahl und dividirt man das in absoluten electromagnetischen Einheiten erlangte Ergebnis durch 10^9 , um dasselbe in Henry's ausdrücken zu können, so findet man für die Selbstinduction der Rolle A

$$L_A = 3,195 \times 10^{-2} \text{ Henry.}$$

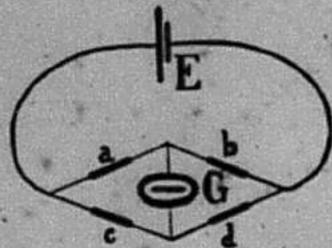


Fig. 3.

Widerstände der übrigen Zweige b , c und d werden so geregelt, dass, während die Leitung bleibend geschlossen ist,

Die nach Wien ausgeführte Berechnung wurde durch eine Messung nach der Methode Rayleigh's controlirt¹⁾. In dem Zweig a einer Wheatstone'schen Brücke, siehe Fig. 3, wird die Rolle A gestellt und die inductionlosen

1) Siehe Kohlrausch a. a. O. S. 393.

das Galvanometer nicht durchströmt wird, also $a : b = c : d$. Beim plötzlich Öffnen oder Schliessen des Hauptkreises entsteht wegen der Selbstinduction der Rolle A ein Stromstoss im Galvanometer. Der Ausschlag des Galvanometers sei e mm.

Nun wird nach Hinzufügung eines bekannten kleinen Widerstandes w in den Zweig a die Abweichung des Galvanometers für einen bleibenden Strom gemessen, diese sei e_1 . So ist der Koeffizient der Selbstinduction:

$$L = w \cdot \frac{T}{\pi} \cdot \frac{e}{e_1} k \frac{1}{\pi} \arctg \frac{\pi}{\Delta},$$

worin T die Schwingungsdauer und k das Dämpfungsverhältniss des Galvanometers bedeutet. Für die Untersuchung wurde dasselbe Galvanometer gebraucht, das schon beim Messen der Capacitäten gedient hatte, allein durch die Verschiebung eines starken Magneten war sowohl die Schwingungsdauer als das Dämpfungsverhältniss verändert. Sie betragen nun

$$T = 3,46 \text{ Sec. und } k = 2,12.$$

Weiter war $w = 0,1$ Ohm, $e = 28$ mm und $e_1 = 135$ mm. Hieraus wird berechnet, dass

$$L_A = 3,15 \times 10^{-2} \text{ Henry.}$$

Das Ergebnis der Messung stimmt in genügendem Maasse mit der Berechnung nach Wien überein, sodass wir die gefundene Selbstinduction der Rolle A ohne Bedenken als Basis für die Messungen der übrigen Rollen gebrauchen dürfen. Es zeigte sich nämlich, dass die Selbstinduction letzterer zu gering war, um nach der Methode Rayleigh's gemessen werden zu können. Wir fanden sie durch Vergleichung und indem wir im Wesentlichen die Vorschriften

befolgten, welche von Wien ¹⁾ und Prerauer ²⁾ gegeben worden sind, richteten wir unsere Messungen auf die folgende Weise ein.

In der Wheatstone'schen Brücke, Fig. 3 (S. 38), enthält der Zweig *a* den Widerstand w_1 , und die Selbstinduction L_1 , der Zweig *b* den Widerstand w_2 und die Selbstinduction L_2 , während die Zweige *c* und *d* beziehungsweise die inductionslosen Widerstände w_3 und w_4 enthalten. Das Element *E* wird durch eine elektromagnetische Stimmgabel ersetzt, welche 128 ganze Schwingungen per Sec. macht und eben so viele Stromunterbrechungen im Hauptkreis hervorruft. Das Galvanometer *G* wird durch ein Telephon ersetzt. Nach Maxwell muss dieses in Ruhe bleiben, sobald die Bedingung erfüllt wird, dass

$$L_1 : L_2 = w_1 : w_2 = w_3 : w_4,$$

sodass aus L_2 und $\frac{w_1}{w_2}$ oder aus L_2 und $\frac{w_3}{w_4}$ der Betrag von L_1 berechnet werden kann.

Für L_2 wird die grosse Rolle *A* genommen, deren Selbstinductions-Koefficient in Henry's schon durch Messung und Berechnung gefunden worden ist, während eine der übrigen Rollen mit unbekannter Selbstinduction die Stelle von L_1 einnimmt. Die zwei Rollen werden, ziemlich weit von einander entfernt im selben Niveau derartig aufgestellt, dass die Achse der einen Rolle vertikal, die der andern horizontal gerichtet ist und die Ströme durch die Rollen einander mithin nicht induciren können. Als Widerstände werden bifilar gewundene Manganindrähte aus Rheostaten gebraucht

1) A. a. O.

2) O. Prerauer, Ueber die Messung des Selbstpotentials gerader Drähte. Wiedemann's Annalen 1894, Bd. 53 S. 772.

und überdies ein gerade gespannter Manganindraht, um den Widerstand in einem der Wheatstone'schen Zweige continuirlich verändern zu können. Der gesammte Widerstand der Zweige *a* und *b* muss so gering wie möglich sein, sodass eine der Rollen ohne hinzugefügten Widerstand im Zweige allein stehen muss. Dies wird meist die Rolle mit unbekanntem, kleinerem Selbstinductions-Koefficienten sein, da im Verhältniss zur Selbstinduction der Widerstand in der Regel nicht ebenso viel abgenommen haben wird. Trotz all dieser Vorsorgen hielt es, zumal bei der Messung kleiner Selbstinductionen, schwer, ja war es bisweilen unmöglich ein sicheres Resultat zu erzielen.

Wenn die Widerstände in den vier Zweigen der Brücke derartig geregelt waren, dass $w_1 : w_2 = w_3 : w_4$, so liess das Telephon einen Laut hören, der immer stärker wurde, sobald man in einem der Zweige den Widerstand änderte. Hierbei brauchte durchaus nicht die Bedingung erfüllt zu werden, dass $L_1 : L_2 = w_1 : w_2$, in Übereinstimmung womit auch der Laut im Telephon durchaus noch nicht verschwunden war. Wenn man nun für $\frac{w_1}{w_2}$ einen andern, willkürlichen Betrag nahm, so war wieder ein neues Minimum des Telephonlautes vorhanden, sobald nur wieder $\frac{w_1}{w_2} = \frac{w_3}{w_4}$ gemacht worden war. Man lernte in der Weise nichts von dem Verhältniss $\frac{L_1}{L_2}$ kennen, das gesucht wurde. Indessen wurde beobachtet, dass das eine relative Minimum sehr viel von dem andern unterschieden war, wodurch der Weg gezeigt wurde, das absolute Minimum zu finden.

Man geht dabei folgendermaassen vor. Es wird ein relatives Minimum des Telephonlautes unter den Umständen, dass $\frac{w_1}{w_2} = \frac{w_3}{w_4} = p$ gesucht. Nun werden von einem

Helfer die Widerstände w_2 (im Zweige b) und w_4 (im Zweige d) plötzlich lerartig geändert, dass $\frac{w_1}{w_2} = \frac{w_3}{w_4} = q$ wird, wobei der Beobachter zu beurtheilen hat, ob der Telephonlaut schwächer oder stärker geworden ist. Ist derselbe schwächer geworden, so weiss er, dass die Widerstandsveränderungen in der richtigen, ist derselbe stärker geworden, in der falschen Richtung stattgefunden haben und in der Weise suchend findet er den Betrag von $\frac{w_1}{w_2}$, bei dem der Telephonlaut aufhört. Derselbe Betrag giebt dann zugleich das Verhältniss $\frac{L_1}{L_2}$ wieder.

Obgleich wir in dieser Weise eine Anzahl sehr befriedigender Resultate erzielen, dürfen wir nicht unterlassen zu erwähnen, dass die Arbeit später durch die Benutzung eines Instruments erleichtert wurde, das das Telephon ersetzte und das, mit dem optischen Telephon von Wien ¹⁾ wie wohl nicht in der Form, dennoch in der Wirkung übereinstimmte. Die Beschreibung dieses Werkzeuges bleibt hier fort, während wir uns jetzt auf die Erwähnung des Ergebnisses der Messungen beschränken.

Bei der Vergleichung der Rollen A und B wurde für w_2 zuerst 2 Ohm genommen. Da musste $w_4 = 176$ Ohm gemacht werden, um das optische Telephon zur Ruhe zu bringen.

$$\frac{L_B}{L_A} \text{ war also } \frac{2}{176} = \frac{1}{88}$$

Zur Kontrolle wurde darauf für $w_2 = 5$ Ohm genommen. Da war für w_4 der Betrag von 439 Ohm erforderlich. Das Verhältniss ist jetzt wie 1:87,8. Nimmt man das mittlere

1) Wiedemann's Annalen 1891, Bd. 42 S. 593 und Bd. 44, S. 681.

Ergebniss 1:87,9 als das wahre an, so zeigt es sich folglich, dass die Abweichungen nur 0,11% betragen.

Ausser den Rollen A und B wurden noch 4 andere, E , F , G und H gemessen. Die directen Ergebnisse der Messungen waren:

$$L_B : L_E = 0,84 : 1,$$

$$L_B : L_F = 2,25 : 1.$$

Hieraus wird berechnet, dass

$$L_E : L_F = 2,68 : 1,$$

während die directe Vergleichung der Rollen E und F mit Hilfe des optischen Telephons das Verhältniss der Selbstinductionen als $L_E : L_F = 2,70 : 1$ kennen lehrte. Der Unterschied zwischen dem Ergebniss der directen Messung und der Berechnung ist gering und beträgt nur 0,74%.

Durch directe Messung wird weiter gefunden

$$L_B : L_G = 5,09 : 1 \text{ und}$$

$$L_B : L_H = 9,20 : 1,$$

woraus sich berechnen lässt, dass $L_G : L_H = 1,81 : 1$. Die directe Messung lehrte das $L_G : L_H = 1,82 : 1$.

Der Unterschied zwischen dem Ergebniss der Berechnung und der directen Messung ist wieder gering und beträgt nicht einmal 0,6%.

Nehmen wir für den Koeffizienten der Selbstinduction der Rolle A $3,15 \times 10^{-2}$ Henry, so wird für B und für die übrigen Rollen durch Vergleichung mit B berechnet:

$$L_B = 3,58 \times 10^{-4} \text{ Henry}$$

$$L_E = 4,27 \times 10^{-4} \text{ "}$$

$$L_F = 1,595 \times 10^{-4} \text{ "}$$

$$L_G = 0,704 \times 10^{-4} \text{ "}$$

$$L_H = 0,390 \times 10^{-4} \text{ "}$$

CAPITEL III.

Versuche mit dem Nerymuskelpräparat.

Der N. ischiadicus wurde mit dem M. gastrocnemius des Frosches entweder frisch oder nachdem er einige Zeit in einer 0,6 procentigen Kochsalzlösung gelegen hatte auf die gewöhnliche Weise mittelst einer Femurklemme in das Pflüger'sche Myographion befestigt. Obgleich an diesem Werkzeug bezüglich der Isolation nichts auszusetzen ist, war es bei unsern Versuchen, um das Überspringen von Funken zu vermeiden, doch erwünscht, die Öffnung im Boden der feuchten Kammer breiter zu machen. Die grössere Gefahr des Austrocknens, der hierdurch das Präparat ausgesetzt war, wurde beseitigt, indem wir die Glaskammer erhöhten und die Electroden so lang nahmen, dass der Nerv so weit wie möglich von der Öffnung entfernt im obersten Theile der feuchten Kammer ausgespannt wurde. Der Nerv wurde entweder direct auf frisch amalgamirte Zink-Electroden gelegt, oder es wurden unpolarisirbare Electroden benutzt, welche nach den von Hermann geänderten Vorschriften von E. du Bois-Reymond angefertigt waren.

Es bedarf keiner Erörterung, dass es nöthig ist, alle Theile der ganzen Vorrichtung, die Leydener Flaschen, den Ring, der die beiden Batterien von Leydener Flaschen verbindet, die Leitungsdrähte, die Wippen u. s. w. vollständig zu isoliren, was mittelst Paraffinblöcke und gläserner Füsse auf bequeme und zweckmässige Weise geschehen kann. Der Ring war mittelst porzellanener Isolationsklemmen um ein Gestell von 8 hölzernen Stäben herum befestigt, welche die Kanten eines regelmässigen achteckigen Prisma's darstellten.

Der Abstand zwischen zwei Windungen eines Solenoids

betrug 2 cm, und der Draht, welcher die Verbindung des Ringes oder des Solenoids mit dem Nerymuskelpräparat bewerkstelligte, war mittelst einer dicken Guttapercha-Schicht sogar gegen Funken von 14 cm isolirt.

Während die periphere Electrode eben so wie die Mitte des Ringes fortwährend mit der Erde in Verbindung gehalten wurde, wurde der frequente Wechselstrom immer durch die centrale Electrode nach dem Nerven geführt. Um zu verhüten, dass er ausser durch die periphere Electrode auch noch durch den Muskel selbst nach der Erde abfliessen konnte, wurde das ganze Stativ, woran das Pflüger'sche Myographion befestigt war, auf drei gläsernen Füßen isolirt.

Als Kugeln des Funkenmicrometers dienten die abgerundeten Enden von 1 cm dicken Zinkstäben. Die Abrundung geschah in der Weise, dass das Ende des Stabes möglichst genau mit einer Halbkugel, deren Radius 0,5 cm war, übereinstimmte. Das Zink wurde später durch Messing ersetzt, ohne dass davon Einfluss auf den Gang der Experimente beobachtet werden konnte. Die Kugeln wurden wiederholt polirt.

Ihre gegenseitige Distanz wurde mittelst einer Micrometerschraube geregelt, während als Hilfsmittel ein richtiges Maass zu erhalten, Platten aus Mica und Glas von genau bekannter Dicke, welche man noch gerade zwischen die Kugeln schieben konnte, gebraucht wurden.

Wir erwähnen noch, dass der Alkohol in dem Interruptor der Allg. Elektr. Gesellsch. mit Vortheil durch Petroleum ersetzt werden kann. Die Regelmässigkeit der Unterbrechungen nimmt hierdurch zu; man ist aber gezwungen, den Apparat mehrere Male zu reinigen als bei dem Gebrauch von Alkohol. Wie Prof. Einthoven schon erwähnte, war mittelst einiger Zahnräder und eines Schleifcontactes die Unterbrechungsfrequenz bis auf wenig mehr

als eine Unterbrechung per Sec. vermindert, während dennoch die Turbine rund 10 Umdrehungen per Sec. machte.

Nennen wir den Punkt des Ringes, der mit der Erde verbunden ist, den 0-Punkt und verbinden wir die centrale Electrode des Nervmuskelpräparates mittelst eines Leitungsdrahtes und einer Klemme mit einem willkürlichen Punkte P des Ringes. Die Bogenlänge zwischen P und dem 0-Punkt wird l genannt. Der Nerv bildet dann eine Zweigleitung des Stückes l des Ringes. Bei einer bestimmten Funkenstrecke im Funkenmicrometer muss l einen gewissen Betrag haben, um jedesmal beim Überschlagen eines Funkens eine minimale Reaction im Nervmuskelpräparat hervorzurufen. Macht man l kleiner, so bleibt die Muskelzuckung aus, macht man l grösser, so wird die Zuckung stärker.

Als Beispiel möge dienen, dass bei einem frischen Präparat für eine Funkenstrecke von

| | | |
|--------------|----------------|--------------|
| $v = 5,8$ mm | gefunden wurde | $l = 25$ cm |
| $v = 4,4$ " | " | $l = 32$ " |
| $v = 2,9$ " | " | $l = 51,5$ " |

Bei einem andern Präparat für

| | | |
|---------------|-----------|--------------|
| $v = 1,53$ mm | | $l = 120$ cm |
| $v = 2,25$ " | | $l = 92,5$ " |
| $v = 2,96$ " | | $l = 72$ " |
| $v = 3,68$ " | | $l = 61,5$ " |
| $v = 4,39$ " | | $l = 51,5$ " |

Bei einem dritten Präparat für

| | | |
|---------------|-----------|----------------|
| $v = 1,53$ mm | | $l = 124,5$ cm |
| $v = 2,25$ " | | $l = 86$ " |
| $v = 2,96$ " | | $l = 68$ " |
| $v = 3,68$ " | | $l = 59$ " |
| $v = 4,39$ " | | $l = 51$ " |
| $v = 5,11$ " | | $l = 47$ " |

Der Werth von l in den letzten zwei Tabellen wurde gefunden, indem der Durchschnittswerth von zwei Messungen, einer links und einer rechts vom Nullpunkte genommen wurde.

Wir kommen im fünften Capitel auf die obenerwähnten Zahlen zurück. Es wird sich alsdann zeigen, dass bei jedem der Präparate eine bestimmte unveränderliche Stromstärke als Grenzwerth für eine Reaction des Nervmuskelpräparates erforderlich war, weil jede Veränderung in der Funkenlänge des Funkenmicrometers durch eine Veränderung in entgegengesetztem Sinne der Bogenlänge l gerade compensirt wurde. Diese Compensation liefert den Beweis für die Zweckmässigkeit der gebrauchten Vorrichtung und die Genauigkeit der Messung.

Wenn man einen Widerstand oder eine Selbstinduction in die Leitung, welche den Ring mit dem Nerven verbindet, aufnimmt, so muss bei gleicher Funkenlänge v im Funkenmicrometer die Bogenlänge l verändert werden. Um dabei die Veränderung von l berechnen zu können, genügt es nicht, die Widerstände und die Selbstinductionen der Zweigleitung zu kennen, weil diese in ihren verschiedenen Theilen eine zwar kleine, allein bei der Berechnung doch nicht zu vernachlässigende Capacität besitzt.

Es hält schwer, den Betrag dieser Capacität mit einiger Genauigkeit kennen zu lernen. Deshalb wird bei den Versuchen ein Condensator von so grosser Capacität in den Kreis aufgenommen, dass die Capacitäten der Leitung dagegen vernachlässigt werden dürfen.

Der Condensator besteht aus zwei Spiegelglasplatten, auf jede von denen eine runde Stanniolscheibe von 40 cm Durchmesser geklebt ist. Die mit Stanniol belegten Flächen sind einander zu gewandt; die eine Platte ist fest, die andere an

einer Stelltafel befestigt, die mittelst Micrometerschrauben in verschiedene Richtungen verschoben und überdies noch um eine verticale Achse dermaassen gedreht werden kann, dass die bewegliche Spiegelglasplatte der festen parallel gestellt und die Distanz zwischen den beiden Platten geregelt werden kann.

Um diese Distanz genau zu messen, werden die Platten erst bis dicht an einander geschraubt und wird aus einer Anzahl von Drähten von verschiedener Dicke untersucht, welcher noch gerade ohne Kraftanstrengung zwischen die beiden Platten geschoben werden kann. Die Drähte haben eine Dicke von 0,1, 0,2, 0,3 mm u. s. w. und werden einer nach dem andern an den vier Ecken der Platten geprüft. Obgleich wir versucht haben, die Spiegelglasplatten nicht zu beugen oder zu drücken, sind sie doch nicht vollkommen flach geblieben, sodass es unmöglich ist, die Distanz zwischen denselben an den vier Ecken gleich gross zu machen und wir uns jedesmal mit der Berechnung eines mittleren Ergebnisses begnügen müssen. Nun wird mit Hilfe eines Messzirkels mit Nonius, auf dem Fünfzigstel eines Millimeters abgelesen werden können, die Distanz zwischen einem willkürlichen festen Punkte P und einem Punkte Q , der zugleich mit der beweglichen Glasplatte verschoben wird, bestimmt. Bei jedem andern Stande der beweglichen Platte genügt dann eine neue Bestimmung der Distanz PQ , um die Distanz zwischen den Spiegelglasplatten kennen zu lernen.

Für die Formel mit Hilfe deren aus den Dimensionen und der Distanz der Stanniolscheiben die Capacität des Condensators berechnet wird, verweisen wir auf Kohlrausch¹⁾.

1) A. a. O. S. 409.

Beschreiben wir jetzt einige Experimente bei denen in die Leitung zwischen dem Ringe und dem Nerven ein inductionsloser Widerstand — Resistanz — und eine Capacität eingeschaltet sind. Durch diese Einschaltung wird die Stromstärke im Nerven verringert und zwar ceteris paribus um so mehr, je grösser die Oscillationsfrequenz des Wechselstromes ist. Aus der Verminderung der Stromstärke im Nerven bei der Einschaltung einer bekannten Resistanz und einer bekannten Capacität kann die Periodenzahl per Sec. des Wechselstromes berechnet werden.

Der Betrag der Verminderung der Stromstärke im Nerven folgt unmittelbar aus dem Betrage der Veränderung der Bogenlänge l , welche nöthig ist, um in beiden Fällen die Minimumreaction des Nervenmuskelpräparates hervorzurufen. Hierbei muss die Funkenlänge e im Funkenmicrometer unverändert bleiben, während wir annehmen, dass, wie im Aufsätze von Prof. Einthoven gezeigt worden ist, erst der Strom in der Zweigleitung keinen merkbaren Einfluss auf die Stromstärke im Ringe ausübt und zweitens dass die Schwankungen im Potentialunterschied an verschiedenen Punkten des Ringes proportional den vom Nullpunkte aus gemessenen Bogenlängen zunehmen.

l_1 sei die Bogenlänge, von welcher der Strom nach dem Nerven abgeleitet werden muss um eine Minimumreaction des Präparates hervorzurufen zu können, ohne dass eine Resistanz und eine Capacität in die Zweigleitung aufgenommen sind — Schaltung α .

l_2 sei die Bogenlänge, wenn in die Zweigleitung absichtlich eine Resistanz und eine Capacität aufgenommen sind — Schaltung β .

So ist

$$\frac{l_2}{l_1} = \lambda,$$

und
$$n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\lambda^2 - 1 - \frac{2r}{R}}{C^2 r^2 - 2LC}} \quad (1)$$

worin n die Periodenzahl per Sec., r die zwischen dem Ringe und dem Condensator eingeschaltete Resistanz, R die Resistanz des Nerven, C die Capacität des Condensators und L die Selbstinduction des den Ring mit dem Condensator verbindenden Leitungsdrahtes bedeutet. Der Werth von L ist zwar sehr gering, darf aber unter unsern Bedingungen doch nicht ganz vernachlässigt werden. Für die Ableitung der Formel verweisen wir auf den Aufsatz von Prof. Einthoven.

Jetzt mögen einige Beobachtungsergebnisse folgen. Die Stanniolscheiben werden auf eine Distanz von 2,735 mm von einander gestellt, woraus hervorgeht, dass $C = 3,095 \times 10^{-10}$ Farad. Der eingeschaltete inductionslose Widerstand war eine Glühlampe mit $r = 1395$ Ohm, der Widerstand des Nerven war $R = 75000$ Ohm, während die Selbstinduction der Leitungen nach den Formeln von Wien so gut wie möglich auf $L = 0,121 \times 10^{-4}$ Henry berechnet wurde.

Bei einer bestimmten Funkenlänge wurde während der Schaltung α gefunden $l_1 = 34,5$ cm
und während der Schaltung β $l_2 = 83$ "

woraus berechnet wird, dass $\lambda = \frac{l_2}{l_1} = 2,40$ "

Bei einer andern Funkenlänge wurde gefunden $\lambda = 2,36$ "
bei noch einer andern Funkenlänge " " $\lambda = 2,36$ "

Im Durchschnitt $\lambda = 2,37$ cm

Nach obenstehenden Ergebnissen wird die Periodenzahl per Sec. des Wechselstromes auf $n = 8,05 \times 10^5$ berechnet.

Diese Frequenz ist, wie wir gleich darthun werden, zu

niedrig. Es hat uns einige Mühe gekostet, die Ursache hiervon zu finden, aber es wird sich unzweideutig zeigen, dass dieselbe in der Glühlampe liegen muss.

Wie wir in Capitel II schon bemerkt haben, ist der Widerstand des Kohldrahtes einer Glühlampe sehr viel geringer während des Glühens als in der Kälte und die Möglichkeit ist nicht ausgeschlossen, dass jedesmal beim Überschlagen eines Funkens im Funkenmicrometer der in der Glühlampe erzeugte Wechselstrom im Stande ist, den Kohldraht für kurze Zeit soviel zu erwärmen, dass dessen Widerstand merklich abnimmt. Die Stromstärken von Wechselströmen, welche bei Condensatorentladungen entstehen, sind oft sehr gross. Prof. Einthoven berechnete die maximale Stromstärke im Ringe beim Überspringen eines Funkens von 1 cm im Funkenmicrometer auf 1120 Ampère. Die Stromstärke in der Zweigleitung nach dem Condensator, d. h. also in der Glühlampe, ist zwar bedeutend geringer, allein man bedenke, dass ein constanter Strom von nur 0,14 Ampère schon im Stande ist, den Kohldraht weissglühend zu machen.

Dass während der Versuche keine Spur von Glühen des Kohldrahtes wahrzunehmen war, auch nicht, als das Zimmer dunkel gemacht worden war, beweist nicht, dass keine Erwärmung stattfand. Die Dauer des Wechselstromes bei jedem Funken muss kurz gewesen sein, und die Anzahl von Funken, welche per Sec. überschlug, betrug nur 1 oder 2. Der Kohldraht kann also jedesmal beim Überspringen eines Funkens für sehr kurze Zeit ziemlich stark erwärmt gewesen sein, während dennoch seine Durchschnittstemperatur sich kaum änderte. Seine Wärmecapacität muss sicher wohl sehr gering sein, wenn man in Betracht zieht, dass er, in glühendem Zustande gemessen, einen Diameter von nur 0,053 mm besitzt.

Der directe Beweis für die Widerstandsverminderung der Glühlampe während des Ueberschlagens des Funkens wird geliefert, wenn man anstatt einer einzigen Lampe eine Batterie von 4 Lampen in die Zweigleitung einschaltet. Die Lampen werden zu je 2 neben einander eingeschaltet, sodass der gesammte Widerstand der Lampenbatterie ungefähr, mit dem einer einzigen Lampe übereinstimmt.

Während alle übrigen Umstände unverändert blieben wie bei dem oben beschriebenen Versuch mit einer Glühlampe, wurde jetzt mit der Batterie von 4 Glühlampen gefunden $r = 1380$ Ohm und $\lambda = 2,60$. Die Veränderung in r ist nach der Messung in der Kälte unbedeutend, die Veränderung von λ aber ist auffallend. Mit diesen Ergebnissen wird die Periodenzahl auf $n = 9,104 \times 10^4$ berechnet.

Einige andern Beobachtungen bestätigen obiges Resultat vollständig.

Bei einer Distanz zwischen den Stanniolplatten von 2,63 mm, wobei $C = 4,354 \times 10^{-10}$ Farad war und R und L unverändert geblieben waren, wurde gefunden:

mit 1 Glühlampe $r = 1395$ Ohm, $\lambda = 3,12$ und $n = 7,84 \times 10^4$
mit der Batterie von 4 Lampen $r = 1380$ „ „, $\lambda = 3,38$ und $n = 8,67 \times 10^4$

Bei einer Distanz zwischen den Stanniolscheiben von 5,405 mm, wobei $C = 2,172 \times 10^{-10}$ Farad, $L = 0,121 \times 10^{-4}$ Henry und $R = 90000$ Ohm war, wurde gefunden:

mit 1 Glühlampe $r = 1396$ Ohm, $\lambda = 2,09$ und $n = 9,99 \times 10^4$
mit der Batterie von 4 Lampen $r = 1380$ „ „, $\lambda = 2,13$ und $n = 10,25 \times 10^4$

Wir sehen, dass λ bei der Messung mit einer einzigen Lampe regelmässig kleiner ist als bei der Messung mit einer Batterie von Lampen und dass demgemäss die berechnete Oscillationsfrequenz auch immer bei der ersten Messung geringer ist. Der Unterschied ist nur klein, wenn durch eine

grosse Distanz zwischen den Stanniolscheiben die Capacität des Condensators und damit auch die Stromstärke in den Lampen gering ist.

Es ist nicht gestattet, die Capacität des Condensators während der Versuche noch mehr zu verringern, weil die befolgte Messungsmethode ganz auf der Voraussetzung beruht, dass die Capacität der Zweigleitung mit ihren Verbindungsdrähten, Klemmschrauben und Glühlampen gegen die Capacität des Condensators vernachlässigt werden darf.

Vergleichen wir die drei mit der Batterie von Glühlampen erhaltenen Ergebnisse mit einander, so fällt es auf, dass für die Oscillationsfrequenz eine grössere Zahl berechnet wird, je geringer die Capacität des Condensators ist:

| | |
|---|---------------------------------------|
| Bei einer Capacität von $4,354 \times 10^{-10}$ Farad | wurde gefunden $n = 8,67 \times 10^4$ |
| „ „ „ „ $3,095 \times 10^{-10}$ „ „ | „ „ „ $n = 9,104 \times 10^4$ |
| „ „ „ „ $2,172 \times 10^{-10}$ „ „ | „ „ „ $n = 10,25 \times 10^4$ |

Hierfür können von vornherein zwei Ursachen genannt werden: erstens könnten die Capacitäten des Condensators zu klein sein, um die Capacität der ganzen weiteren Zweigleitung dagegen vernachlässigen zu dürfen und zweitens kann der Strom in der Batterie von Lampen noch so stark sein, dass auch hier der Einfluss der Erwärmung auf die Widerstandsverringering ins Gewicht fällt. Dass die zweite Ursache die einzige ist, der bei unsern Experimenten Rechnung getragen werden muss, kann aus den Messungen hervorgehen, bei denen die Batterie von Glühlampen durch eine U-Röhre ersetzt wurde: für verschiedene Einstellungen der Stanniolblätter wurde dann immer derselbe Betrag für n berechnet. Da hierüber Prof. Einthoven schon auf hinreichend ausführliche Weise berichtet hat¹⁾, können wir

1) Man kann die von Prof. Einthoven erwähnten Zahlen nicht ohne

diese Art von Messungen weiter unbesprochen lassen um zur Beschreibung der Experimente überzugehen, bei denen in die Zweigleitung anstatt einer Resistanz eine Selbstinduction eingeschaltet würde.

Die Rolle mit Selbstinduction, welche in die Zweigleitung aufgenommen wird, muss eine geringe Resistanz, aber vor allem auch eine sehr geringe Capacität besitzen. Der ersten Forderung kann man leicht genügen, indem man die Rolle von nicht zu dünnem Kupferdraht anfertigt, aber der zweiten Forderung, der der geringen Capacität, ist schwieriger zu genügen. Selbstverständlich muss jede Rolle mit einer mehr oder weniger bedeutenden Selbstinduction einen nicht zu vermeidenden Betrag der Capacität besitzen. Wir fanden in der Literatur keine Angaben, diesen Betrag auf ein Minimum zu reduciren.

Die Rollen *A* und *B*, welche aus verschiedenen Schichten von durch Guttapercha isolirtem Kupferdraht bestanden, waren für unsere Messungen durchaus unbrauchbar. Auch ein um ein Cylinderglas gewundener Kupferdraht befriedigte uns nicht ganz, da das Dielektricum, das sich zwischen den Windungen befindet, theilweise aus Luft, theilweise aus Glas besteht, während es ein Vortheil sein muss, die Dielektricitätsconstante des Dielectricums so gering wie möglich zu machen und also für letzteres nur Luft zu nehmen.

In Uebereinstimmung mit diesem Gedankengang wurden die Rollen *E*, *F*, *G* und *H* auf folgende Weise angefertigt.

In eine Fibreplatte *F* (Sich Fig. 4) werden acht Löcher gebohrt, welche die Ecken eines regelmässigen Achtecks bilden. Die Seiten des Achtecks sind ungefähr 3 cm lang.

Weiteres mit den von uns genannten vergleichen. Es sind zwischen beiden Reihen kleine Unterschiede vorhanden, welche durch geringe in den gebrauchten Vorrichtungen angebrachte Änderungen verursacht werden.

Senkrecht auf die Platte werden gerade, 8 cm lange Glasröhren mit ihren Enden klemmend in die Öffnungen gesteckt, während eine zweite der ersten ganz gleich gemachte Fibreplatte *F*, mit ihren acht Öffnungen die andern Enden der Glasröhren umklemmt. Das Ganze bekommt so das Aussehen einer Haspel, um die ein Kupferdraht *C* gewunden werden kann.

Die Drahtwindungen, welche so weit von einander ent-

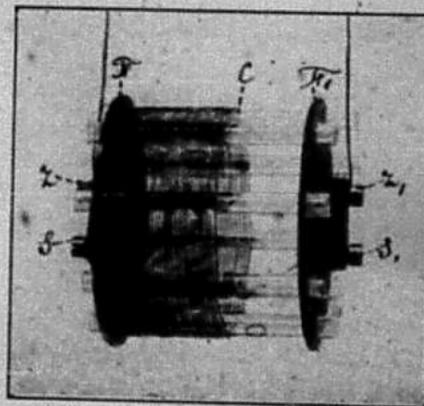


Fig. 4.

fernt angebracht werden, dass keine Funken von einer Windung nach der andern überschlagen können, werden mit Firnis und einer Mischung von Harz und Wachs auf die Glasröhren festgeklebt. Mit der Erwähnung von vier kleinen, auf die Fibreplatten befestigten Klebenschrauben *S*, *S*₁, *Z* und *Z*₁, mit welchen die Enden des Drahtes verbunden sind und woran die ganze Rolle aufgehängt werden kann, ist die Beschreibung zu Ende.

In wiefern die Capacität einer derartigen Rolle ihren

Einfluss auf unsere Messungen geltend machen kann, mag einigermaassen aus dem folgenden Versuche beurtheilt werden, bei dem das Dielektricum zwischen den Windungen abwechselnd aus Luft und Petroleum bestand. In die Zweigleitung nach dem Nerven werden die Rolle *E* und ein regulirbarer Condensator eingeschaltet. Der Condensator ist ganz auf dieselbe Weise wie der schon beschriebene eingerichtet, nur von kleineren Dimensionen. Die Bogenlänge, von der der Strom nach dem Nerven abgeleitet werden muss um noch gerade eine Reaction des Präparates hervorzurufen zu können, ist von der Capacität des Condensators abhängig und zwar wird diese Bogenlänge ein Minimum sein, wenn der Bedingung genügt wird, dass

$$n = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \dots \dots \dots (2)$$

in welcher Formel die Buchstaben *n*, *L* und *C* die schon mehr erwähnte Bedeutung haben. Die minimale Bogenlänge kann 20 und 30 Mal kleiner sein als die Bogenlänge, welche ohne Einschaltung von Capacität und Selbstinduction erforderlich ist, was dadurch verursacht wird, dass in der Zweigleitung bei zweckmässigen Werthen von *C* und *L* ein kräftiges „Mitschwingen“ mit der Elektrizitätsbewegung im Ringe stattfindet.

Aus der Formel geht hervor, dass es für bestimmte Werthe von *n* und *L* nur einen einzigen Werth von *C* oder anders ausgedrückt, nur eine bestimmte Distanz der Stanniolblätter gibt, bei welchen man das gesuchte Minimum bekommt.

Als die Rolle *E*, wie in Fig. 4 abgebildet wird, frei in der Luft aufgehängt war, betrug diese Distanz 7,75 mm; als die Rolle dagegen in einen mit Petroleum gefüllten gläsernen Behälter getaucht wurde, musste die Distanz auf 8,25 mm

gebracht werden. Eine Wiederholung des Versuchs lieferte dasselbe Resultat. Mit der Rolle in der Luft wurde wieder die Distanz 7,75, mit der Rolle im Petroleum die Distanz 8,25 mm gefunden.

Setzt man die Dielektricitätsconstante von Luft = 1, so ist die von Petroleum ¹⁾ 2,2. Durch das Eintauchen wird also die Capacität der Rolle vergrössert, sodass die Capacität des Condensators verkleinert werden muss, um den Bedingungen des kräftigen „Mitschwingens“ noch immer zu genügen.

Der durch Petroleum verursachte Unterschied der Capacität der Rolle ist nicht sehr gross und hat uns bei den weiteren Messungen besonders darum nicht gehindert, weil der kleine Condensator durch den erst beschriebenen ersetzt wurde, dessen Capacität bei gleicher Distanz der Stanniolblätter ungefähr viermal grösser war.

Ist die minimale Bogenlänge gefunden, so kann nach obenstehender Formel aus *L* und *C* der Werth von *n* berechnet werden. Die Berechnungen sind für Beobachtungen mit den Rollen *F*, *G* und *H* ausgeführt worden. Die Selbstinductionen dieser Rollen sind schon in Capitel II angegeben.

$$L_F = 1,595 \times 10^{-4} \text{ Henry}$$

$$L_G = 0,704 \times 10^{-4} \text{ „}$$

$$L_H = 0,390 \times 10^{-4} \text{ „}$$

Die Selbstinduction der Zweigleitung wird auf $0,103 \times 10^{-4}$ Henry geschätzt und muss also, will man die totale Selbstinduction bei der Einschaltung einer Rolle kennen lernen, zu derjenigen der Rolle selbst addirt werden.

Die Stanniolblätter mussten bei Einschaltung der Rolle *F* einmal auf 8,125 mm gesetzt werden, womit die Capacität auf

1) Sieh Kohlrausch a. a. O. S. 480.

$C = 1,477 \times 10^{-10}$ Farad gebracht und n auf $10,05 \times 10^3$ berechnet wurde.

Einige Tage später wurde die Messung wiederholt und wurde $C = 1,5 \times 10^{-10}$ Farad, $n = 9,93 \times 10^3$ gefunden.

Mit Rolle G wurde gefunden:

an einem Tage $C = 3,415 \times 10^{-10}$ Farad, $n = 9,60 \times 10^3$

einige Tage später $C = 3,42 \times 10^{-10}$ „ $n = 9,48 \times 10^3$

Mit Rolle H wurde gefunden:

an einem Tage $C = 5,69 \times 10^{-10}$ Farad, $n = 9,50 \times 10^3$

einige Tage später $C = 4,91 \times 10^{-10}$ „ $n = 10,24 \times 10^3$

noch einige Tage später $C = 5,45 \times 10^{-10}$ „ $n = 9,71 \times 10^3$

Die Ergebnisse stimmen auf befriedigende Weise mit einander überein.

CAPITEL IV.

Messungen mit dem rotirenden Spiegel.

Zur Kontrolle der Messungen, welche im vorigen Capitel beschrieben worden sind, wurde versucht, die Oscillationsfrequenz des Wechselstromes noch auf ganz andere Weise kennen zu lernen und zwar mittelst der Analyse des elektrischen Funkens. Dabei wurde im Wesentlichen die Methode mit dem rotirenden Spiegel Feddersen's¹⁾ angewendet.

Die von uns angestellten Versuche, die zwischen den beiden Batterien von Leydener Flaschen überschlagenden Fun-

1) A. a. O.

ken, welche mittelst des Ruhmkorff-Inductors und des Turbine-Interruptors erhalten wurden, zu analysiren, scheiterten, da es sich als unmöglich erwies, eine Interruption jedes Mal vollständig mit einem sehr bestimmten Stande des rotirenden Spiegels zusammenfallen zu lassen. Der Spiegel war durch eine Anzahl von Zahnrädern auf eine derartige Weise mit dem Interruptor und einem Schleifcontact verbunden, dass er gegen eine Interruption 50 Umdrehungen vollbrachte, und da eine oder zwei Interruptionen per Sec. stattfanden, betrug die Rotationsgeschwindigkeit des Spiegels 50 bis 100 Umdrehungen per Sec. Die anscheinend mit soviel Regelmässigkeit stattfindende Unterbrechung im Quecksilberstrahl geschah thatsächlich in fortwährend wechselnden Phasen der Turbinenbewegung. Die Phasenunterschiede wurden in dem sich 50 Mal schneller drehenden Spiegel, worin der Funke beobachtet wurde, 50 Mal vergrössert, wodurch das Funkenbild jedes Mal eine so bedeutende Ortsveränderung erlitt, dass keine nähere Analyse ausgeführt werden konnte.

Der Ruhmkorff-Inductor wurde darum verlassen und durch eine Elektrisirmaschine ersetzt, wovon jeder der beiden Pols respective mit einer der beiden Kugeln des Funkenmicrometers verbunden wurde. In den Kreis, welcher die Innenbelegungen der Leydener Flaschen einer Batterie mit denen der andern verband, wurde ausser dem Funkenmicrometer noch eine Vorrichtung eingeschaltet, welche das Uberschlagen des elektrischen Funkens nur bei einem sehr bestimmten Stande des rotirenden Spiegels ermöglichte. Diese Vorrichtung ist in Fig. 5 abgebildet.

Ein 28 cm langes und 20 cm hohes Messinggestell $ABCD$ ist bei C und D an einem Tisch befestigt, während überdies die Enden A und B des Apparates durch ein paar nicht auf der Figur abgebildete schräge Stützen mit dem

Tischblatt verbunden sind. Eine auf Spitzen laufende 8 cm lange und 6 mm dicke stählerne Achse aa_1 , wird durch ein paar Schrauben s und s_1 gehalten, die mittelst der Schraubenmütter c und c_1 , auf die messingnen Querbalken EE , und FF_1 , festgesetzt sind. An der Achse sind befestigt

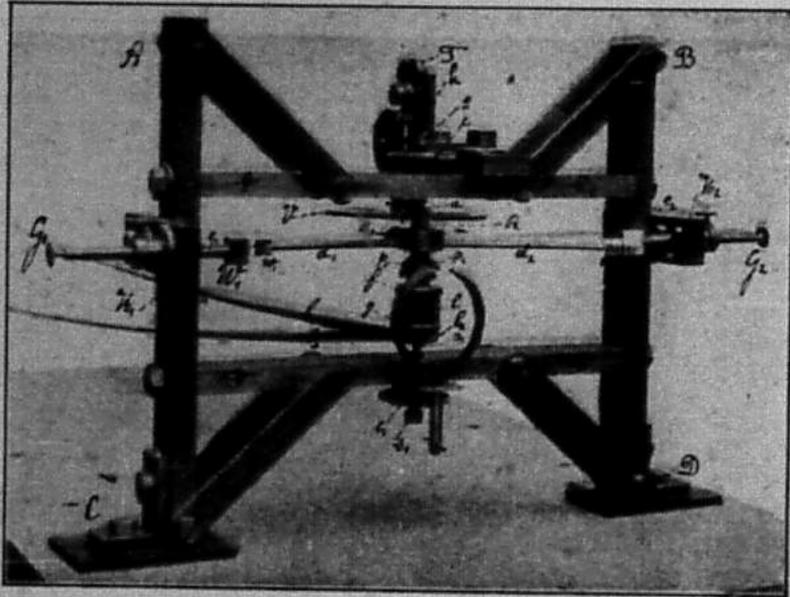


Fig. 5.

tigt der Trieb R , die Messingscheibe m , der Spiegel l und eine Schnurscheibe, welche in der Figur durch die Schnur b_1, b_2, b_3 bedeckt ist. In die Scheibe m sind drei Messingstäbe geschraubt d_1, d_2 und d_3 , von denen der letztere nur kurz ist und in der Figur noch gerade eben gesehen werden kann. Die Stäbe d_1 und d_2 sind jeder, von der Mitte der Achse

ab gemessen, etwa 10,5 cm lang; sie tragen an ihrem Ende die Messingkeile w_1 und w_2 , welche beim Rotiren der Achse dicht an den gleichfalls aus Messing angefertigten Blöcken W_1 und W_2 vorbeistreichen. Letztere sind durch die Stangen e_1 und e_2 mit den Klemmschrauben G_1 und G_2 verbunden, welche durch Stücke Hartgummi H_1 und H_2 vom Gestell isolirt sind, und, wie ohne weitere Erklärung aus der Figur ersichtlich ist, verschoben und festgesetzt werden können um den Blöcken W_1 und W_2 die richtige Stellung gegenüber den Keilen w_1 und w_2 zu gewähren.

In den das Funkenmicrometer enthaltenden Kreis ist die ganze auf vier Hartgummiplatten von der Erde isolirte Vorrichtung derartig eingeschaltet, dass der Strom, welcher bei der Klemmschraube G_1 angeführt wird, den Apparat bei G_2 wieder verlässt. Dies kann aber nur geschehen, wenn die Achse denjenigen Stand eingenommen hat, dass die Stäbe d_1 und d_2 nach W_1 und W_2 gerichtet sind und der Raum zwischen w_1 und W_1 , und zugleich der zwischen w_2 und W_2 sehr gering ist. Da der Stab d_2 nicht ganz in der Verlängerung von d_1 liegt, findet dies bei jeder Umdrehung nur einmal statt.

Der Stab d_3 ist in der Absicht angebracht worden, die Achse auszubalanciren. Er ist so gerichtet, dass er den Winkel zwischen den Stäben d_1 und d_2 halbirt, während sein Moment geändert werden kann, indem man zwei Schraubenmütter welche noch eben in der Figur sichtbar sind, mehr oder weniger nach der Achse zu verschiebt. Das Gleichgewicht des drehbaren Theiles muss mit grosser Sorgfalt, schliesslich mit Hilfe einer Feile hergestellt werden.

Der 2×2 qcm messende Spiegel besteht aus einem planparallelem Glase, dessen nach dem Funken zugekehrte Fläche versilbert ist. Er passt mit einem kleinen Spielraum in die Gruben von zwei Messingscheiben f und g , welche an der

Achse befestigt sind und erleidet gar keinen Druck. Zur Wahrung des Gleichgewichts ist ein zweites, in der Figur nicht sichtbares, an Dimensionen dem ersten gleiches Planparallelglas hinter die Achse symmetrisch zwischen die genannten Scheiben eingesetzt. Dieses zweite Glas ist mit schwarzem Firnis überstrichen.

Um den Spiegel zu drehen, wird die Schnurscheibe unter an der Asche aa_1 mittelst einer starken endlosen Kautschukschur b_1, b_2, b_3 mit der Achse eines Electromotors von 0,1 P.S. verbunden, während die Rotationsgeschwindigkeit mittelst eines Tourenzählers T gemessen wird. Der Trieb R hat 18 Zähne und greift in das Rad V , welches 180 Zähne hat. Das Rad V ist um die Achse geschoben, in welche das Schraubengewinde k des Tourenzählers geschnitten ist, sodass letzterer 1 Umdrehung notirt, jedesmal wenn der Spiegel 10 vollbracht hat.

Der Kreis, der die Innenbelegungen der Leydener Flaschen der einen Batterie durch das Funkenmicrometer und die oben beschriebene Vorrichtung hin mit den Innenbelegungen der Leydener Flaschen der andern Batterie verbindet, ist einige Meter lang, während bei unserer frühern Aufstellung, als von dem R u h m k o r f f-Inductor Gebrauch gemacht wurde, die Verbindungen des Funkenmicrometers mit den Batterien bedeutend kürzer waren und demgemäss weniger Selbstinduction besaßen. Die Folge der neuen Aufstellung mit der Elektrisirmaschine muss also sein, dass die Periode des Wechselstromes länger ist und wir auf weniger als 9×10^4 Perioden per Sec. rechnen können. Nichtsdestoweniger gelang es uns nicht, die hin- und hergehende Elektricitätsbewegung im Funken zu zeigen. Wir hatten erst guten Erfolg nachdem der Ring, welcher die Aussenbelegungen der Leydener Flaschen der einen Batterie mit

denen der anderen verband, durch ein Solenoid ersetzt worden war.

Es wurden für die Messungen zwei Solenoide gebraucht, ein von 6 und ein von 30 Windungen, mittelst welcher, wie gleich noch näher erörtert werden wird, Wechselströme von beziehungsweise $2,04 \times 10^4$ und 65000 Perioden per Sec. erhalten wurden.

Beim Beobachten des Funkenbildes in dem sich drehenden Spiegel kann man sehen, dass es bei zunehmender Rotationsgeschwindigkeit breiter wird um sich bei sehr grosser Rotationsgeschwindigkeit endlich in eine Anzahl von Lichtstreifen aufzulösen. Das Bild war jedoch zu matt und zu flüchtig um eine einigermaassen genaue Messung zu gestatten, sodass wir nothwendig die Photographie zur Hilfe nehmen mussten.

Eine photographische Camera wird ohne Objectiv nach dem Spiegel gerichtet, mit der empfindlichen Platte EE_1 , sieh Fig. 6, senkrecht auf die Linie AB . A bedeutet die Mitte des Spiegels und B die Mitte der empfindlichen Platte. Nabe an der Camera wird das Funkenmicrometer M aufgestellt, von dem die Linse G ein scharfes Bild auf den Spiegel wirft. Ein Diaphragma DD_1 mit einer spaltförmigen Öffnung befindet sich hinter der Linse G . Eine zweite

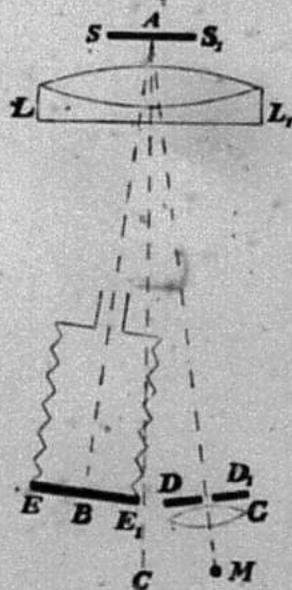


Fig. 6.

Linse LL_1 ist derartig vor dem Spiegel aufgestellt, dass ihre durch das Centrum des Spiegels gehende Achse AC den Winkel BAM halbiert. Die Linse LL_1 ist ein achromatisches Objectiv aus einem Fernrohr und wird, wie in der Figur angegeben ist, mit der flachen Seite nach der Camera und dem Funkenmicrometer, mit der convexen Seite nach dem Spiegel gekehrt. Ihr Focalabstand beträgt ungefähr 45 cm.

Das Diaphragma DD_1 hat eine spaltförmige Öffnung von etwa 0,5 mm Breite und wird bei stillstehendem Spiegel scharf auf der empfindlichen Platte EE_1 abgebildet. Um die Camera einzustellen wird ihre Hinterwand mittelst einer Stellschraube vor- und rückwärts geschoben, während eine Lampe bei dem Funkenmicrometer das Licht der Funken ersetzt. Der Spiegel wird in den richtigen Stand gebracht, während die Scheibe m_1 , siehe Fig. 5, noch um die Achse aa_1 drehbar gehalten wird. Erst dann wird sie mittelst drei Schrauben, von denen zwei, p_1 und p_2 , in der Figur sichtbar sind, festgesetzt und zwar so, dass die Keile w_1 und w_2 so nahe wie möglich zu W_1 und W_2 kommen.

Das scharfe Einstellen des Bildes des Funkenmicrometers auf den Spiegel findet mit Hilfe derselben Lampe statt; diese muss den Schatten der Kugeln auf den Spiegel werfen. Jede Kugel war mit einem Häutchen von Kautschuk überzogen, worin sich gerade auf der Spitze eine kleine Öffnung befand. Dies geschah nach den Vorschriften *Feddersen's* in der Absicht, den Funken möglichst zu concentriren. Gelingt dies in genügendem Maasse, so ist die Aufstellung des Diaphragma's DD_1 mit der Linse G überflüssig und kann man von dem Funkenbilde ohne dasselbe erst auf den Spiegel zu projectiren, direct befriedigende Photographie erhalten.

Feddersen erreichte auf diese Weise sein Ziel, schaltete aber in den Kreis, durch welchen die Entladung der Batterien stattfand, Widerstände ein, was uns nicht gestattet war. Wir wünschten, mit Rücksicht auf die Erregung des Nervmuskelpräparates, die Periode des Entladungsstromes nicht zu ändern und seine Dauer nicht zu verkürzen und konnten weder mit kupfernen, noch mit zinkenen oder messingenen Kugeln die Funken fein genug machen, um sie mit günstigem Erfolg für die Messung direct zu photographiren. Die Projection mit der Linse G und dem Diaphragma DD_1 , ergab jedoch befriedigende Resultate.

Die Elektrisirmaschine, ein kleines Instrument von *Wimshurst*, wird durch einen Elektromotor in Bewegung gesetzt und lädt die Batterien von Leydener Flaschen mit einer solchen Geschwindigkeit, dass jedesmal nach etwa 30 Sec. ein Funke überspringt.

Im nicht absolut dunkel gemachten Zimmer wird, um die empfindliche Platte vor ungewünschtem Licht zu schützen, ein Schirm vor der Öffnung der Camera gehalten. Ein paar Secunden bevor der Funke erwartet wird, entfernt man den Schirm um gleich nach dem Überschlagen des Funkens die Öffnung wieder zu bedecken.

Während des Photographirens wird die Rotationsgeschwindigkeit des Spiegels mit dem Tourenzähler gemessen. Wir verfahren dabei derweise, dass auf einer Uhr mit Hemmungsvorrichtung die Zeit von 1000 oder einigen Malen 1000 Spiegelumdrehungen markirt wird. Um einigermaßen über die Constanz der Rotationsgeschwindigkeit urtheilen zu können, wurden jedes Mal beim Anfertigen eines Photographies drei Messungen ausgeführt: erstens kurz vor dem Überschlagen des Funkens; zweitens während einer Periode, in der das Überschlagen des Funkens statt fand

und drittens einige Zeit später. Die Zahlen zeigen, dass die Regelmässigkeit der Rotation hinreichend verbürgt war; die Abweichungen waren selten grösser als 1 %.

In den Photogrammen kann man deutlich sehen, dass die Elektricitätsbewegung im Funken hin- und bergehend ist. Die Lichtstreifen, in welche der Funke aufgelöst wird, haben abwechselnd am obern und am untern Ende eine grössere Intensität. Bei der Berechnung der Periodenzahl muss also beachtet werden, dass der Distanz zwischen zwei Lichtstreifen nur eine halbe Periode entspricht.

Die Messung des Negativs findet mittelst einer in Millimetern eingetheilten Glasskale der Firma Carl Zeiss statt. Die Periodenzahl des Wechselstromes heisse n , die Distanz zwischen dem Spiegel und der lichtempfindlichen Platte f , die Zahl der Rotationen des Spiegels per Sec. o und der Abstand zwischen zwei Streifen des Photogrammes a , so ist

$$n = \frac{2 f \pi o}{a} \dots \dots \dots (3)$$

Weiter ist $o = \frac{p}{t}$, und $a = \frac{l}{m}$, worin p die Zahl der Umdrehungen, welche der Spiegel in t Sec. vollbringt, bedeutet und m die Zahl der Lichtstreifen, welche sich in einer Länge von l cm auf dem Photogramm befinden. Während der Messungen mit dem Solenoid von 6 Windungen war f constant = 46 cm, während die Rotationsgeschwindigkeit absichtlich variirt wurde und von 50,9 bis 90,9 Rotationen per Sec. wechselte.

Als Ergebnis von 5 Messungen erwähnen wir die hier folgenden Zahlen:

$$\begin{aligned} \text{I } p &= 4000, \quad t = 78,6, \text{ also } o = 50,88 \\ l &= 0,93 \text{ cm}, \quad m = 13, \text{ also } a = 0,07154; \quad n = 205\,500. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{II } p &= 4000, \quad t = 64,4, \text{ also } o = 62,11 \\ l &= 1,5 \text{ cm}, \quad m = 13, \text{ also } a = 0,08824; \quad n = 203\,400. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{III } p &= 6000, \quad t = 84,6, \text{ also } o = 70,92 \\ l &= 1,5 \text{ cm}, \quad m = 15, \text{ also } a = 0,1; \quad n = 205\,000. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{IV } p &= 4000, \quad t = 50,4, \text{ also } o = 79,36 \\ l &= 1,89 \text{ cm}, \quad m = 17, \text{ also } a = 0,1112; \quad n = 206\,400. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{V } p &= 4000, \quad t = 44, \text{ also } o = 90,9 \\ l &= 1,85 \text{ cm}, \quad m = 14, \text{ also } a = 0,1322; \quad n = 198\,700. \end{aligned}$$

Hieraus ergibt sich, dass im Durchschnitt $n = 204\,800$.

Die jetzt folgenden Versuche mit dem Nervmuskelpräparat wurden zum besseren Vergleich mit denjenigen, wobei der Funke photographirt wurde, auf dieselbe Weise wie diese angestellt. Der Ruhmkorff-Inductor war also auch hier durch die Wimshurst-Maschine ersetzt und die Drahtverbindungen waren unverändert gelassen. Der Widerstand r , der in die Zweigleitung zum Muskel eingeschaltet wird, kann jetzt ohne Bedenken aus Glühlampen bestehen, weil, wie im folgenden Capitel bewiesen werden wird, die Stromstärken, welche nöthig sind um noch gerade eine Reaction des Präparates hervorzurufen, beim Gebrauch des Solenoids vielmals geringer sind als beim Gebrauch des Ringes.

Bei der Messung nach der Formel (1) ergaben sich die folgenden Resultate.

$$\begin{aligned} C &= 4,932 \times 10^{-10} \text{ Farad} \\ R &= 100\,000 \text{ Ohm}, \quad r = 2726 \text{ Ohm} \\ \lambda_1 &= 2,000, \quad \lambda_2 = 1,983, \quad \lambda_3 = 2,000, \text{ also durchschnittlich} \\ \lambda &= 1,994 \\ L &= 0,121 \times 10^{-4} \text{ Henry,} \end{aligned}$$

woraus berechnet wird, dass $n = 203\,500$.

Bei einer zweiten Messung wurde bei unveränderten

Werthen von C , R und L gefunden $r = 3940$ Ohm und $\lambda = 2,581$, woraus berechnet wird, dass $n = 194000$.

Bei einer dritten Messung nach der Formel (2) wurden die Rollen E und F benutzt, welche hinter einander geschaltet wurden und sammt den Leitungen eine Selbstinduction von $L = 6,013 \times 10^{-4}$ Henry besaßen. Der Werth von C betrug zur Erhaltung der Minimumbogenlänge $11,54 \times 10^{-10}$ Farad, woraus berechnet wird, dass $n = 195\,500$.

Die Messungen mit dem Nervenmuskelpräparat lieferten also den Durchschnittsbetrag von $n = 197\,700$. Dieses Ergebniss stimmt auf befriedigende Weise mit dem nach der Methode Feddersen's erhaltenen überein.

Nachdem das Solenoid von 6 Windungen durch eins von 30 ersetzt worden war, wurden die Funken aufs Neue photographirt. Der Werth von ρ war ein wenig verändert und auf 44 cm zurückgebracht. Als Ergebniss von 4 Messungen, bei denen die Rotationsgeschwindigkeit des Spiegels zwischen 38 und 56 Umdrehungen per Secunde wechselte, mögen folgende Zahlen dienen:

- I $p = 4000$, $t = 71$, also $\sigma = 56,3$
 $l = 2,12$ cm, $m = 9$, also $\alpha = 0,235$; $n = 66200$.
- II $p = 3000$, $t = 77,8$, also $\sigma = 38,56$
 $l = 2,14$ cm, $m = 13$, also $\alpha = 0,1646$; $n = 64800$.
- III $p = 3000$, $t = 68,8$, also $\sigma = 43,6$
 $l = 2,2$ cm, $m = 12$, also $\alpha = 0,1833$; $n = 65800$.
- IV $p = 4000$, $t = 77,2$, also $\sigma = 51,8$
 $l = 2,64$ cm, $m = 12$, also $\alpha = 0,22$; $n = 65100$.

Durchschnittlich $n = 65500$.

Die Messungen mit dem Nervenmuskelpräparat ergaben folgende Resultate:

$C = 4,528 \times 10^{-10}$ Farad,
 $R = 97000$ Ohm, $r = 5340$ Ohm,
 $\lambda = 1,447$ und $L = 0,133 \times 10^{-4}$ Henry, woraus nach Formel (1) berechnet wird, dass $n = 65300$.

Bei einer folgenden Messung wurde bei unveränderten Werthen von C , R und L gefunden:

$r = 6700$ Ohm und $\lambda = 1,651$, woraus berechnet wird, dass $n = 66150$.

Die Resultate mit dem Nervenmuskelpräparat stimmen also wieder in genügendem Maasse mit den Ergebnissen, welche nach der Methode Feddersen's erhalten wurden, überein.

CAPITEL V.

Die Stärke des erregenden Stromes.

Es ist nicht möglich mit irgend einem bekannten Werkzeuge die Stromstärke eines Entladungstromes von etwa einer Million Perioden in der Secunde jedesmal beim Überschlagen eines einzigen Funkens in allen Phasen der Electricitätsbewegung direct zu messen. Im ersten Capitel haben wir schon darauf hingewiesen, dass die sogenannten Hitzdrahtgalvanometer zwar die in jeder Secunde entwickelte Energie, also auch die durchschnittliche Stromstärke in der Secunde angeben können, dass jedoch die in dieser Weise gemessenen Beträge noch durchaus kein Maass für die wirklich vorhandenen Stromstärken in allen Phasen des Wechselstromes liefern. Die Anweisungen des Hitzdrahtgalvanometers werden ja auch durch die Dauer des Wechselstromes, der beim Überschlagen jedes Funkens entsteht, und durch die Zahl der Funken, die in einer Secunde überschlagen,

bestimmt. Will man die wirklichen Stromstärken kennen lernen, so ist man genöthigt dieselben aus dem Potentialunterschied und der Impedanz zu berechnen.

Für den Nerven darf unter den Umständen, unter denen wir arbeiteten, die Impedanz der Resistanz gleich gesetzt werden, sodass wir schreiben können

$$i_0 = \frac{e_0}{R} \dots \dots \dots (4)$$

worin i_0 die maximale Stromstärke durch den Nerven, e_0 den maximalen Potentialunterschied und R den Widerstand des Nerven bedeutet.

Der Werth von R ist leicht zu bestimmen und auf den vorhergehenden Seiten sind denn auch wiederholt die Ergebnisse von Messungen von R erwähnt worden. Es kommt also nur noch darauf an, e_0 kennen zu lernen, um nach der Formel (4) die Stromstärke i_0 berechnen zu können.

Um e_0 zu bestimmen muss in erster Linie die Funkenlänge v bekannt sein.

Aus der Funkenlänge v ergibt sich der Potentialunterschied zwischen den Kugeln des Funkenmicrometers. Dieser Potentialunterschied heisse E_0 , so ist beim Gebrauch des Ringes

$$e_0 = \frac{l}{425} \times E_0 \dots \dots \dots (5)$$

worin l die früher schon genannte Bedeutung hat, nämlich die Bogenlänge auf dem Ringe, von welchem der Nebenstrom zum Nerven abgeleitet wird. Die Zahl 425 ist dadurch erhalten worden, dass man zu der Peripherie des Ringes, die vollendet gedacht, 320 cm messen würde, soviel hinzugefügt hat, wie nach Schätzung nöthig ist, einen Ring zu erhalten mit ebenso viel Selbstinduction wie jetzt in den gesammten, den Hauptentladungsstrom führenden Leitungen vorhanden ist.

Einige Beispiele.

Als Beispiele können dieselben Präparate gelten, die schon in Capitel III erwähnt worden sind.

Tabelle I.

Präparat 1.

| v in cm | E_0 in Volt | l in cm | e_0 in Volt | R in Ohm | i_0 in Milliamp. |
|--------------|------------------|--------------|------------------|---------------|-----------------------|
| 0,581 | 19000 | 25 | 1118 | 64600 | 17,3 |
| 0,438 | 15500 | 2 | 1167 | " | 18,0 |

Tabelle II.

Präparat 2.

| v in cm | E_0 in Volt | l in cm | e_0 in Volt | R in Ohm | i_0 in Milliamp. |
|--------------|------------------|--------------|------------------|---------------|-----------------------|
| 0,153 | 6700 | 120 | 1891 | 100000 | 18,91 |
| 0,224 | 9100 | 92,5 | 1980 | " | 19,80 |
| 0,296 | 11300 | 72 | 1914 | " | 19,14 |
| 0,367 | 13400 | 61,5 | 1939 | " | 19,39 |
| 0,438 | 15400 | 51,5 | 1866 | " | 18,66 |

Tabelle III.

Präparat 3.

| v in cm | E_0 in Volt | l in cm | e_0 in Volt | R in Ohm | i_0 in Milliamp. |
|--------------|------------------|--------------|------------------|---------------|-----------------------|
| 0,153 | 6700 | 124,5 | 1939 | 72000 | 26,9 |
| 0,224 | 9100 | 86 | 1840 | " | 25,5 |
| 0,296 | 11300 | 68 | 1808 | " | 25,1 |
| 0,367 | 13400 | 59 | 1859 | " | 25,8 |
| 0,438 | 15400 | 51 | 1847 | " | 25,7 |
| 0,510 | 17500 | 47 | 1913 | " | 26,6 |

An jedem der Präparate der drei obenstehenden Tabellen ist eine Reihe von Messungen verrichtet worden. Jedes Mal wurde die Funkenlänge r mit einer oder zwei Windungen der Micrometerschraube vergrößert oder verkleinert und der entsprechende Potentialunterschied E_0 nach den Angaben von Kohlrausch¹⁾ berechnet. Hierbei muss daran erinnert werden, dass die Kugeln des Funkenmicrometers einen Halbmesser von 0,5 cm hatten. Es ergibt sich aus den angegebenen Zahlen, dass die Bogenlängen l fast genau verkehrt proportional der Spannung E_0 zunehmen, sodass e_0 einen nahezu constanten Werth zeigt. Weil der Betrag des Widerstandes R in jedem der Präparate während der Versuchsreihe unverändert bleibt, wird auch für die Stromstärke i_0 des Wechselstromes, der noch eben im Stande ist eine Muskelsuckung zu erzeugen, ein für jedes Präparat an sich unveränderlicher Betrag gefunden.

Dieses Ergebniss deutet auf die Verwirklichung drei verschiedener Bedingungen hin:

Erstens, dass die Potentialschwankungen in einem Punkte des Ringes direct proportional den vom Nullpunkte aus gemessenen Bogenlängen zunehmen. Dies war schon früher durch absichtliche, in ganz anderer Weise angestellte Messungen bewiesen.

Zweitens zeigt es sich, dass die Weise auf welche der Potentialunterschied mit der Funkenlänge bei unseren Versuchen zunimmt, völlig mit den Angaben von Kohlrausch übereinstimmt. Diese letzteren gründen sich hauptsächlich auf Untersuchungen, wobei der Potentialunterschied zwischen zwei Kugeln langsam vergrößert wird, bis endlich ein Funke überschlägt. Es blieb deshalb einiger Zweifel übrig inbetreff der Frage, ob bei unseren Versuchen, bei

welchen durch eine Unterbrechung in der primären Leitung des Ruhmkorff's eine schnelle Steigung des Potentialunterschiedes hervorgerufen wird, dieselben Verhältnisse zwischen Potentialunterschied und Funkenlänge gelten. Das Ergebniss unserer Messungen, bei denen Funkenlängen von 0,153 bis 0,581 cm angewandt worden sind, gibt hierauf eine bejahende Antwort.

Drittens weisen die Versuche noch auf die Constanz des Präparates hin. Obgleich dasselbe vielfach gereizt werden musste, ehe jedes Mal aufs Neue für einen gewissen Werth der Funkenlänge r der Werth der Bogenlänge l bestimmt worden war, ist in den angegebenen Serien kaum etwas von Ermüdung zu spüren. Dies ist namentlich dem Umstände zu verdanken, dass wir einen, höchstens zwei Funken in der Secunde überschlagen liessen. Ein von einer grossen Anzahl von Funken in der Secunde verursachter Tetanus erschöpft das Präparat in sehr kurzer Zeit.

Es braucht nicht näher erörtert zu werden, dass viel grössere Stromstärken für eine Muskelsuckung erforderlich sind, wenn das Präparat ermüdet ist. Dies kann gezeigt werden, wenn die Messungsreihen wie sie in den obenstehenden Tabellen erwähnt worden sind, länger fortgesetzt werden. Man findet die Ergebnisse in die hierunter folgenden Tabellen IA, IIA und IIIA eingetragen.

1) A. a. O.

Tabelle IA.

Präparat 1.

In Tabelle I ist durchschnittlich gefunden worden:

 $i_0 = 17.65$ Milliampère.

| r in cm | E_0 in Volt | l in cm | e_0 in Volt | R in Ohm | i_0 in Milliamp. |
|--------------|------------------|--------------|------------------|---------------|-----------------------|
| 0.296 | 11300 | 51.5 | 1396 | 64600 | 21.2 |
| 0.224 | 9100 | 75 | 1606 | " | 24.9 |
| 0.153 | 6700 | 117 | 1844 | " | 28.5 |

Tabelle IIA.

Präparat 2.

In Tabelle II ist durchschnittlich gefunden worden:

 $i_0 = 19.2$ Milliampère.

| r in cm | E_0 in Volt | l in cm | e_0 in Volt | R in Ohm | i_0 in Milliamp. |
|--------------|------------------|--------------|------------------|---------------|-----------------------|
| 0.510 | 17300 | 50 | 2035 | 100 000 | 20.3 |
| 0.654 | 20600 | 44 | 2133 | " | 21.3 |
| 0.797 | 23300 | 42 | 2302 | " | 23.0 |

Tabelle IIIA.

Präparat 3.

In Tabelle III ist durchschnittlich gefunden worden:

 $i_0 = 25.9$ Milliampère.

| r in cm | E_0 in Volt | l in cm | e_0 in Volt | R in Ohm | i_0 in Milliamp. |
|--------------|------------------|--------------|------------------|---------------|-----------------------|
| 0.581 | 19000 | 44 | 1967 | 72000 | 27.3 |
| 0.654 | 20600 | 41 | 1985 | " | 27.6 |
| 0.797 | 23300 | 41 | 2247 | " | 31.2 |

Dass die Vergrößerung der erforderlichen Stromstärke wirklich durch die Ermüdung des Präparates verursacht wird und nicht dem Umstande zugeschrieben werden muss, dass vielleicht das von uns zwischen der Funkenlänge und dem Potentialunterschiede angenommene Verhältniss unrichtig sein könnte, ergibt sich unmittelbar aus der Weise, in der wir bei den Versuchen die Funkenlänge geändert haben. In den Tabellen I und IA wurde sie jedesmal um zwei Schraubengänge verkleinert, während sie in den Tabellen II, IIA, III und IIIA jedesmal um einen oder zwei Schraubengänge vergrößert wurde.

Überdies geben wir noch einige Messungsergebnisse mit dem Funkenmicrometer in dem Stande 0,654 cm an, bei welchem der Potentialunterschied zwischen den Kugeln $E_0 = 20600$ Volt betrug. Zwischen zwei Messungen wurde das Funkenmicrometer wiederholt auf eine andere Funkenlänge gestellt, wobei das Präparat jedesmal aufs Neue gereizt und ermüdet wurde. Der Widerstand des Nerven betrug 88000 Ohm.

Tabelle IV.

Präparat 4.

| l in cm | e_0 in Volt | i_0 in Milliamp. |
|--------------|------------------|-----------------------|
| 27 | 1309 | 14.9 |
| 27.5 | 1333 | 15.1 |
| 33 | 1600 | 18.2 |
| 45 | 2181 | 24.8 |

Wir sehen, dass die zweite Messung nahezu dasselbe Resultat ergab wie die erste und dass die Ermüdung sich also erst bei der dritten und vierten Messung geltend machte.

Es würde ein Leichtes sein, die obenstehenden Ergebnisse

um eine Anzahl ähfflicher zu vermehren, aber die genannten Beispiele mögen hier genügen.

Ausser der Ermüdung muss es noch zahlreiche andere Einflüsse geben, welche den Grenzwert der Stromstärke ändern. In erster Linie wird man wohl individuelle Unterschiede berücksichtigen müssen. Es stellt sich heraus, dass dieselben in den 4 Präparaten, welche die Zusammenstellung der Tabellen I bis IV veranlasst haben, schon ziemlich gross sind. In den nicht ermüdeten Präparaten war der Grenzwert der Stromstärken für

| | | | |
|----------|-----|---------------|-----------|
| Präparat | I | $i_0 = 17,65$ | Milliamp. |
| " | II | $i_0 = 19,2$ | " |
| " | III | $i_0 = 25,9$ | " |
| " | IV | $i_0 = 15,0$ | " |

Zum Vergleich mögen hier für die unermüdeten Präparate noch die Intensitäten des aufsteigenden und des absteigenden Stromes erwähnt werden, die bei Schliessung durch den Nerven noch gerade eine Muskelzuckung hervorrufen konnten.

| Nummer des Präparates. | Intensität in Micrampère | | |
|------------------------|--------------------------|-------------------------|------------------|
| | bei aufsteigendem Strome | bei absteigendem Strome | durchschnittlich |
| I | Nicht gemessen. | | |
| II | 0.686 | 0.697 | 0.677 |
| III | 0.925 | 0.683 | 0.804 |
| IV | 0.388 | 0.455 | 0.421 |

In zweiter Linie wird muthmaasslich die Länge des durchströmten Stückes des Nerven ihren Einfluss geltend machen, und in dritter Linie wünschen wir noch die Aufmerksamkeit auf den Einfluss der Temperatur zu lenken.

Schon im Aufsätze von Prof. Einthoven ist ein Beispiel genannt worden, in dem für den Grenzwert der erforderlichen Stromstärke

bei Erwärmung $i_0 = 5,53$ Milliamp.

bei Abkühlung $i_0 = 28,1$

gefunden wurde.

Diesen Beobachtungen mögen noch einige hinzugefügt werden, die mittelst eines anderen Präparates und an einem andern Tage gemacht worden sind. Die Abkühlung und Erwärmung fanden an der peripheren Elektrode statt, während die hierunter folgenden Temperaturangaben die wirkliche Temperatur des Nerven nur annähernd feststellen. Aller Wahrscheinlichkeit nach werden jedoch, — wenn man die angewendete Methode der Erwärmung und Abkühlung in Betracht zieht, — die Unterschiede zwischen den Thermometerablesungen und den wirklichen Temperaturen des Nerven nie mehr als 1° betragen. Die Funkenlänge im Funkenmicrometer blieb während der ganzen Versuchsreihe unverändert 0,86 cm. Der Widerstand des Nerven ist nicht gemessen worden.

Tabelle V.
Präparat 5.

| Temperatur | l in cm | e_0 in Volt |
|------------|-----------|---------------|
| 14° | 33.5 | 1900 |
| 2° | 77 | 4366 |
| 14° | 42.5 | 2410 |
| 25° | 18 | 1021 |
| 14° | 36 | 2042 |

Man sieht, dass die erforderliche Spannung, also auch die erforderliche Stromstärke bei einer Temperatur von

etwa 2° rund $4 \times$ grösser ist als bei etwa 25° . Die bei 14° erhaltenen Werthe zeigen unter einander einen grösseren Unterschied als wir erwartet hätten. Dies muss wahrscheinlich nicht der Ermüdung des Präparates zugeschrieben werden, da die erste und die letzte Messung bei jener Temperatur ungefähr einen gleichen Betrag lieferten.

Muthmaasslich fällt hier der Umstand, dass die vom Thermometer abgelesene Temperatur nicht völlig mit der wirklichen Temperatur des Nerven übereinstimmt, ins Gewicht.

Die Stromstärken, die erforderlich sind, wenn der Ring durch ein Solenoid ersetzt wird.

Die Messung der Stromstärke bei Anwendung des Solenoids findet auf ganz dieselbe Weise wie die mit dem Ringe statt. Dabei muss auch angenommen werden, dass die Potentialschwankungen in einem Punkte des Solenoids proportional den vom Nullpunkt aus gemessenen Drahtlängen zunehmen. Obgleich dies von vornherein bei den von uns benutzten Solenoiden wohl zu erwarten ist, da sie im Verhältniss zu ihrem Diameter nur eine geringe Höhe besitzen, wäre es vielleicht doch nicht unerwünscht, die Proportionalität direct experimentell zu beweisen und beide Solenoide zu sichten. Bis jetzt ist die Aichung nur für das Solenoid von 6 Windungen ausgeführt worden und zwar auf ganz die nämliche Weise wie die Aichung des Ringes.

Die Bogenlänge, von welcher der Strom nach dem Nerven abgeleitet wurde, wurde bei einer Anzahl verschiedener Funkenlängen gemessen und bei jeder Funkenlänge unter zwei Umständen: erstens als in die Zweigleitung eine Capacität und ein Widerstand r_1 eingeschaltet waren (Schaltung α),

zweitens als die Zweigleitung dieselbe Capacität, aber einen andern Widerstand r_2 enthielt (Schaltung β).

Es sei l_1 die erforderliche Bogenlänge bei Schaltung α , l_2 bei Schaltung β , so ist $\lambda = \frac{l_2}{l_1}$. Die Werthe von l_1 und l_2 variiren bei Veränderung der Funkenlänge, der Betrag von λ muss jedoch, wenn bei einer willkürlichen Funkenlänge die Bogenlängen den Potentialschwankungen proportional sind, unverändert bleiben. Die Ergebnisse einer Reihe von Messungen findet man in Tabelle VI vereinigt.

Tabelle VI.
Präparat 6.

| l_1 in cm | l_2 in cm | $\lambda = \frac{l_2}{l_1}$ |
|-------------|-------------|-----------------------------|
| 29 | 73.5 | 2.54 |
| 72.5 | 174.5 | 2.41 |
| 153 | 386 | 2.52 |
| 306.5 | 760 | 2.48 |

Die in die Tabelle eingetragenen Werthe von l_1 und l_2 sind Durchschnittsbeträge von Messungen rechts und links vom Nullpunkte. Überdies wurde, um den Einfluss der Ermüdung des Präparates auf das Ergebniss auszuschliessen, l_1 jedesmal bestimmt, sowohl vor als nach der Bestimmung von l_2 , sodass die angegebenen Werthe von l_2 die Durchschnittsbeträge von 2, die angegebenen Werthe von l_1 die Durchschnittsbeträge von 4 Messungen vorstellen.

Obgleich nicht besonders schön sind die Resultate der Messungen, welche nahezu die ganze Drahtlänge des Solenoids umfassen, doch ziemlich befriedigend zu nennen und wir dürfen die Voraussetzung, dass die Bogenlängen den Potentialschwankungen proportional sind, als experimentell hinreichend bewiesen erachten.

Erwähnen wir jetzt noch einige Messungen der Stromstärke. In den untenstehenden Tabellen VII und VIII wurden wieder einige Ergebnisse von Messungen gesammelt, bei denen die Funkenlänge jedes Mal mit einem Schraubengang verändert wurde. Die Buchstaben r , E_0 , l , e_0 , R und i_0 haben dieselbe Bedeutung wie in den Tabellen I, II und III.

Der Werth von e_0 ist berechnet als $E_0 \times \frac{l}{1920}$, da die Drathlänge des Solenoids 1920 cm beträgt und die Selbstinduction der übrigen Verbindungen zwischen den Batterien von Leydener Flaschen gegen die des Solenoids vernachlässigt werden darf.

Tabelle VII.
Präparat 7.

| r in cm | E_0 in Volt | l in cm | e_0 in Volt | R in Ohm | i_0 in Milliamp. |
|--------------|------------------|--------------|------------------|---------------|-----------------------|
| 0.296 | 11300 | 120 | 706 | 98000 | 7.21 |
| 0.367 | 13400 | 100 | 698 | " | 7.12 |
| 0.438 | 15400 | 80 | 642 | " | 6.55 |
| 0.510 | 17300 | 74 | 667 | " | 6.81 |
| 0.581 | 19000 | 70 | 693 | " | 7.07 |

Tabelle VIII.
Präparat 8.

| r in cm | E_0 in Volt | l in cm | e_0 in Volt | R in Ohm | i_0 in Milliamp. |
|--------------|------------------|--------------|------------------|---------------|-----------------------|
| 0.581 | 19000 | 31.5 | 313 | 120 000 | 2.60 |
| 0.510 | 17300 | 33.5 | 303 | " | 2.52 |
| 0.438 | 15400 | 37 | 297 | " | 2.48 |
| 0.367 | 13400 | 44 | 307 | " | 2.56 |
| 0.296 | 11300 | 52 | 306 | " | 2.55 |

Der Durchschnittswerth für i_0 ist

nach den Angaben von Tabelle VII 6,95 Milliamp.

" " " " " VIII 2,54

Wenn man das Verhältnisse zwischen der für eine Muskelzuckung erforderlichen Stromstärke und der Periodenzahl des erregenden Wechselstromes kennen zu lernen wünscht, ist es nicht gestattet, die Resultate der letzten beiden Tabellen direct mit denen der Tabellen I, II und III zu vergleichen. Geben doch die Tabellen VII und VIII die Ergebnisse von Messungen wieder, welche mit andern Präparaten erhalten worden sind, während man, um den Einfluss der Oscillationsfrequenz zu untersuchen, nothwendig die Messungen am selben Präparat wird anstellen müssen.

Im Aufsatze von Prof. Einthoven sind eine Anzahl von Beobachtungen erwähnt, welche das gesuchte Verhältniss zwischen der Oscillationsfrequenz und der erforderlichen Stromstärke näher beleuchten und welche zeigen, dass dasselbe im Widerspruch mit der Theorie von Nernst¹⁾ nicht einfach ist. Das Verhältniss ist auch nicht constant und die Vermuthung wurde geäußert, dass von den vielen Einflüssen, die eine Änderung desselben herbeiführen könnten, vielleicht die Temperatur eine wichtige Rolle spiele. Durch die hierunter folgenden Beobachtungen, bei denen die Abkühlung und die Erwärmung des Präparates auf drei verschiedene Weisen bewerkstelligt sind, wird diese Vermuthung vollkommen bestätigt.

Der Nerv vom Präparat IX wurde über eine kleine Strecke von 1 oder 2 mm mitten über der viel breiteren unpolarisirbaren peripheren Elektrode abgekühlt. Die Ab-

1) A. n. O.

kühlung fand mit Hilfe einer dünnen Kautschukröhre statt, durch welche kaltes Wasser strömte und die auf den Nerven gelegt wurde. Die Temperatur des durchströmenden Wassers war nicht sehr niedrig, $4^{\circ},75$ und da die Abkühlung über eine sehr geringe Länge stattfand, war auch die Wirkung der Temperaturänderung nur gering. Nach Ablauf der Messungen bei Abkühlung wurde durch die Kautschukröhre Wasser von 31° geleitet. Um so viel wie möglich die Folgen einer eventuellen Ermüdung des Präparates auf das Resultat der Messungen auszuschließen, gingen Messungen mit dem Ringe immer unmittelbar denen mit dem Solenoid voraus und folgten denselben auch unmittelbar. Da die Messungen wieder rechts und links vom Nullpunkt statt fanden, giebt l in untenstehender Tabelle immer das mittlere Resultat von 2 Messungen mit dem Solenoid und das mittlere Resultat von 4 Messungen mit dem Ringe an.

Mit a_1 wird eine Beobachtung mit dem Ringe bei Abkühlung, mit a_2 bei Erwärmung angedeutet, während b_1 einer Beobachtung mit dem Solenoid bei Abkühlung, b_2 bei Erwärmung entspricht. Die übrigen Buchstaben der Tabelle stimmen mit denen der vorigen Tabellen überein.

Tabelle IX.

Präparat 9.

| Abkühlung und Erwärmung. Ring und Solenoid. | v in cm | E_0 in Volt | l in cm | e_0 in Volt | R in Ohm | i_0 in Milliamp. |
|--|--------------|------------------|--------------|------------------|---------------|-----------------------|
| a_1 | 0.130 | 5880 | 84 | 1162 | 155 000 | 7.50 |
| a_2 | " | " | 65.75 | 909 | " | 5.87 |
| b_1 | " | " | 57 | 175 | " | 1.13 |
| b_2 | " | " | 54 | 166 | " | 1.07 |

Das Verhältniss der Stromstärken ist also

$$a_1 : b_1 = 6,68 : 1$$

$$a_2 : b_2 = 5,50 : 1.$$

Das Präparat 10 wurde auf andere Weise abgekühlt: der Nerv wurde zwischen der peripheren Electrode und dem Muskel auf eine ungefähr 8 mm weite, von Wasser durchströmte, dünnwandige Glasröhre gelegt. Das kalte Wasser hatte eine Temperatur von $2^{\circ},75$, das warme von 33° . Die Beobachtungen mit dem Ringe und die mit dem Solenoid wechselten einander wieder ab.

Tabelle X.

Präparat 10.

| Abkühlung und Erwärmung. Ring und Solenoid. | v in cm | E_0 in Volt | l in cm | e_0 in Volt | R in Ohm | i_0 in Milliamp. |
|--|--------------|------------------|--------------|------------------|---------------|-----------------------|
| a_1 | 0.320 | 12000 | 80 | 2259 | 80 000 | 28.24 |
| a_2 | " | " | 40.5 | 1143 | " | 14.29 |
| b_1 | " | " | 58.75 | 367 | " | 4.59 |
| b_2 | " | " | 36.75 | 230 | " | 2.87 |

Das Verhältniss der Stromstärken ist also

$$a_1 : b_1 = 6,15 : 1$$

$$a_2 : b_2 = 4,98 : 1.$$

Die beim Präparat 10 angewendete Methode von Abkühlung und Erwärmung hat keinen Einfluss auf die erregende Wirkung der Schliessung eines constanten Stromes. Zum Beweise hierfür mögen die Versuche mit Präparat 11 erwähnt werden, dessen Temperatur auf ganz dieselbe Weise geändert wurde.

Tabelle XI.
Präparat 11.

| Temperatur des strömenden Wassers | Intensität in Millionstel Ampère | | |
|---|----------------------------------|----------------------------|------------------|
| | bei aufsteigen- dem Strome | bei absteigendem Strome | durchschnittlich |
| 4° | 1.28 | 1.28 | 1.28 |
| 34° | 1.13 | 1.28 | 1.21 |
| 2° | 1.28 | 1.13 | 1.21 |
| 35° | 1.13 | 1.54 | 1.34 |

Das Präparat 11 wurde noch auf eine dritte Weise abgekühlt und erwärmt und zwar, indem die periphere Elektrode mit einer Glasröhre umgeben wurde, in welche entweder zerstampftes Eis oder warmes Wasser von 30° gebracht wurde. Nicht nur das Stück des Nerven, das in unmittelbarer Berührung mit der Elektrode war, sondern auch der ziemlich ausgedehnte Theil, der sich dicht über der weiten Glasröhre befand, wurde in der Weise dem Einfluss der Temperaturänderung ausgesetzt. Demgemäss waren auch die Folgen grösser.

Tabelle XII.

| Abkühlung und Erwärmung. Ring und Solenoid | r in cm | E_s in volt | l in cm | e_s in Volt | R in Ohm | i_s in Milliamp. |
|---|--------------|------------------|--------------|------------------|---------------|-----------------------|
| a_1 | 0,320 | 12000 | 103,5 | 2922 | 121 000 | 24.11 |
| a_2 | " | " | 47.5 | 1341 | " | 11.09 |
| b_1 | " | " | 72 | 450 | " | 3.72 |
| b_2 | " | " | 24 | 150 | " | 1.24 |

Das Verhältniss der Stromstärken ist also

$$a_1 : b_1 = 6,48 : 1$$

$$a_2 : b_2 = 8,94 : 1.$$

Die Abkühlung und Erwärmung, wie dieselben bei Präparat 11 erzielt wurden, hatten wieder keinen Einfluss auf die erregende Wirkung der Schliessung eines constanten Stromes, wie aus den bei demselben Präparat verrichteten Beobachtungen hervorgeht.

Tabelle XIII.
Präparat 11.

| Temperatur der Elektrode | Intensität in Millionstel Ampère | | |
|--------------------------------|----------------------------------|----------------------------|------------------|
| | bei aufsteigen- dem Strome | bei absteigendem Strome | durchschnittlich |
| 1° | 0.840 | 0.737 | 0.788 |
| 30° | 0.884 | 0.648 | 0.766 |

Aus den Tabellen IX, X und XII ersieht man, dass der Einfluss der Temperatur auf das Verhältniss der erforderlichen Stromstärken bei verschiedener Oscillationsfrequenz ziemlich gross ist. Zudem fällt es auf, dass der Einfluss sich in verschiedenem Sinne geltend macht, je nach der Weise, in der der Nerv erwärmt oder abgekühlt wird. Es zeigte sich, dass die Weise von Erwärmung, welche bei den Beobachtungen der Tabellen IX und X angewendet wurde, relativ günstiger auf die Wirkung frequenterer Wechselströme wirkt, während die Weise von Erwärmung nach Tabelle XII besonders die Wirkung der weniger frequenten Wechselströme begünstigte.

CAPITEL VI.

Schlussbetrachtungen.

Die Schwierigkeit der Untersuchungsmethode über den Einfluss frequenter Wechselströme auf Nerven und Muskeln liegt namentlich darin, dass ein Nervmuskelpreparat sehr empfindlich ist gegen ziemlich langsamen Stromwechsel und dass dagegen eine überraschend grosse Intensität der frequenter Wechselströme für das Hervorrufen einer Reaction gefordert wird.

Nimmt man keine besondere Vorsorgen, so wird man beim Erzeugen von starken frequenter Wechselströmen sehr leicht auch Stromschwankungen von geringer Frequenz hervorrufen, welche, obgleich sie sehr viel schwächer sein dürfen, durch ihren so viel grösseren Einfluss auf Nerven und Muskeln, die Ergebnisse der Versuche mit frequenter Wechselströmen compliciren und undeutlich machen.

Diesem Umstande schreiben wir auch die Beobachtungen zu, welche Baudet¹⁾ in seinem Aufsätze über „Les applications des courants de haute fréquence en Hollande“ beschrieben hat. Eine asymmetrische Anordnung der verschiedenen Werkzeuge, das Schliessen oder Abbrechen einer Zweigleitung mit geringer Impedanz, wodurch eine Aenderung im Hauptstrom und im regelmässigen Gange der Sinuswellen erzielt wird, und andere dergleiche Einflüsse mehr müssen in unerwünschter Weise starke Erregungen zu Folge haben.

In dem schon öfters citirten Aufsätze von Prof. Eint-

¹⁾ Annales d'Electrobiologie, d'Electrothérapie et d'Electrodiagnostic. Mars—Avril 1900.

hoven wurde darauf hingewiesen, dass unsere Ergebnisse nicht in Uebereinstimmung mit den jetzt geltenden Theorien der Nervenregung sind. Einige Theorien sind mit den Erscheinungen in geradem Widerspruche, während andere noch nicht zur Wirkung von frequenter Wechselströmen erweitert wurden. Zu den letzteren gehört auch die Theorie Hoorweg's¹⁾, welche hier noch mit einem Worte näher erörtert werden mag.

Hoorweg nimmt an, dass ein elektrischer Strom, der während einer gewissen Zeit in derselben Richtung durch den Nerven geführt wird, eine erregende Wirkung η ausübt, deren Betrag durch die Formel

$$\eta = \alpha \int_0^t i \times e^{-\beta t} dt \dots \dots \dots (6)$$

ausgedrückt wird. Hierin bedeuten α und β zwei durch die Eigenschaften des Präparats bedingte Constanten; i ist die Stromstärke in der Zeit t und $e = 2.718$.

Wenn die Dauer der Durchströmung sehr kurz ist, wird $e^{-\beta t} = 1$, deshalb

$$\eta = \alpha \int_0^t i dt \dots \dots \dots (7)$$

mit anderen Worten: die erregende Wirkung wird durch das Stromintegral oder die Quantität Elektrizität gemessen, wie auch die Stromstärke mit der Zeit sich ändern möge.

Die erregende Wirkung, die durch das Öffnen eines constanten Stroms hervorgerufen wird, wird von Hoorweg einfach der Polarisation zugeschrieben. Bei der Anwendung von frequenter Wechselströmen kann die Polarisation jedoch nur eine geringe Rolle spielen, da die erregenden Ströme

¹⁾ J. L. Hoorweg. Recherches sur l'excitation électrique des nerfs. Archives Teyler, Série II, T. VI, quatrième partie. 1899.

mit Spannungen von einigen Tausenden Volt zugeführt werden und die Spannung durch Polarisation zwischen den verschiedenen Elementen eines Nerven, welche alle dieselbe Temperatur und ungefähr denselben Wassergehalt besitzen, einen dabei zu vernachlässigenden Betrag liefert. Nach dieser Ansicht soll also die erregende Wirkung des frequenten Wechselstroms aus der Erregung durch eine Anzahl von in einer selben Richtung gehenden kurzdauernden Strömen bestehen, vermehrt mit der Erregung durch kurzdauernde Ströme, welche in entgegengesetzter Richtung durch den Nerven geführt werden. Jede halbe Periode des Wechselstromes, die zwischen zwei Phasen mit der Stromstärke = 0 liegt, müsste also auf sich selbst ein Maass für die erregende Wirkung liefern, und da nach Formel (7) das Maass in der Quantität Elektrizität liegt, muss um eine gleich grosse erregende Wirkung ausüben zu können, die während einer halben Periode durch den Nerven strömende Menge einen unveränderlichen Werth besitzen. Mit anderen Worten: die Stromstärke muss proportional der Oscillationsfrequenz zunehmen.

Mit dieser Schlussfolgerung sind jedoch die Erscheinungen ebensowenig in Uebereinstimmung wie mit der Behauptung Nernet's dass der Grenzwert der Stromstärke der Wurzel aus der Oscillationsfrequenz proportional zunähme. Die Schwingungsfrequenzen der Wechselströme, die erhalten wurden mit dem Ringe und mit dem Solenoid von 6 Windungen verhielten sich ungefähr wie 4,35:1

während für das Verhältniss der erforderlichen Stromstärken verschiedene Werthe gefunden wurden und zwar von 4,98:1
bis 8,94:1

In Bezug auf das Pflüger'sche Gesetz der polaren

Erregung wünschen wir jetzt noch zu fragen, welcher Theil des Nerven bei der Anwendung des frequenten Wechselstroms gereizt wird: der Theil bei der peripheren Elektrode, bei der centralen Elektrode oder die beiden Stellen abwechselnd?

In Zusammenhang mit dieser Frage ist es wichtig zu untersuchen wie stark die Ströme gedämpft werden. Das kräftige Mitschwingen der Elektrizität, das wir beim Einschalten der Selbstinduction und der Capacität in die Zweigleitung haben beobachten können, deutet schon darauf hin, dass die Dämpfung nicht sehr gross sein kann. Wäre sie so bedeutend, dass man namentlich der ersten halben Periode des Stroms Rechnung zu tragen genöthigt wäre und dass die zweite halbe Periode schon eine viel geringere Intensität besäße, so könnte die Richtung der ersten Phase den Grenzwert der Stromstärke beeinflussen. Bei den Versuchen hat sich jedoch nichts von diesem Einflusse gezeigt. Bei der Messung der Bogenlänge l , von welchem der Strom nach dem Nerven abgeleitet wurde, wurde meistens der mittlere Werth von l , rechts und l , links vom Nullpunkte genommen, wodurch der Nerv während der Anfangsphase des Wechselstroms ein Mal in dieser, das andere Mal in entgegengesetzter Richtung durchströmt wurde. Gewöhnlich waren die Unterschiede zwischen l , und l , nicht sehr gross und mehr oder weniger inconstant.

Hierunter folgen einige Angaben, bei denen der Einfluss der Richtung der ersten Phase absichtlich untersucht worden ist. Bei zwei nach einander folgenden Messungen von l , rechts vom Nullpunkte des Solenoids von sechs Windungen wurde der Strom durch die primäre Rolle des Ruhmkorff's erst in eine und nachher in die andere Richtung geführt, während jedes Mal nach jeden zwei Messungen die Funkenstrecke geändert wurde. Die Stromrichtung der ersten

Phase des Wechselstroms war leicht zu finden. Dazu wurde ein Galvanometer, durch welches wir den die Leydener Flaschen ladenden Strom schickten, benutzt.

Tabelle XIV.

Präparat 13.

| Stromrichtung der ersten Phase | | l , in centim |
|--------------------------------|------------|-----------------|
| Aufsteigend | ✓ | 51 |
| | Absteigend | 51 |
| | | 60 |
| | | 70 |
| | | 124 |
| | | 121 |
| | | 170 |
| | | 175 |
| | | 218 |
| | | 230 |
| | | 203 |
| | | 202 |
| | | 418 |
| | | 410 |
| | | 745 |
| | | 728 |

Eine Reihe von Messungen von l , ergab übereinstimmende Werthe, aber die Angaben von l , mögen hier genügen. Sie zeigen deutlich, dass die Stromrichtung der ersten Phase den Grenzwert der erforderlichen Stromstärke nicht beeinflusst. Wünscht man einen derartigen Einfluss hervorzurufen, so wird es wohl nothwendig sein, den Wechselstrom stärker zu dämpfen, was leicht erzielt werden kann, wenn man eine Resistanz zweckmässig in die Hauptleitung einschaltet.

Weiter wird man dann entscheiden können, ob die Erregung, welche bei stark gedämpften Wechselströmen aller Wahrscheinlichkeit nach nur an einer der Electroden localisirt sein wird, bei der peripheren oder bei der centralen Electrode statt findet. Dazu werden Messungen des latenten Stadiums verrichtet werden müssen. Obgleich solche Messungen nicht von uns gemacht worden sind, so glauben wir doch, hier kurz erwähnen zu dürfen, dass sie unseres Erachtens ein wichtiges Hilfsmittel darstellen können zur Aufklärung unserer Einsicht in die erregende Wirkung der frequenten Wechselströme.

