Zeitschrift: Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft Bern

Herausgeber: Naturforschende Gesellschaft Bern

Band: - (1888)

Heft: 1195-1214

Artikel: Untersuchungen über die physiologische Wirkung der Condensatorenentladungen

Autor: Dubois

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-319015

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Dr. med. Dubois.

Untersuchungen
über die
physiologische Wirkung
der
Condensatorenentladungen.

(Vorgetragen in der Sitzung vom 19. November 1887.)

Die vorliegenden Untersuchungen wurden nicht in der Absicht unternommen, vom rein practischen Standpunkte aus die Condensatoren zu studiren und die etwaige Verwerthbarkeit dieser Instrumente für die Electrotherapie nachzuweisen. Sie verdanken vielmehr ihre Entstehung rein theoretischen Erwägungen über die Factoren, welche den electrischen Strömen und Entladungen ihre physiologische Wirksamkeit verleihen. Man wird die Resultate dieser Versuche am besten beurtheilen können, wenn ich meinen Gedankengang vorlege, wenn ich sage, was mich veranlasst hat, diese Experimente anzustellen. Es gibt nämlich in der Electricitätslehre verschiedene Fragen, und zwar nicht Détailfragen, sondern Grundfragen, über welche die Lehrbücher nicht genügenden Aufschluss geben. So scheinen mir namentlich die Angaben über die Ursache der verschiedenen Wirkung der galvanischen und der Inductionsströme sehr dürftig. Man stösst dabei auf gewisse Widersprüche, auf Unklarheiten, und ich hoffte, mir durch diese Versuche Klarheit über diese Punkte zu verschaffen. Treten wir auf den Gegenstand näher ein. —

Jeder, mit der Electrisation des menschlichen Körpers vertraute Arzt weiss, dass wir mit einer relativ geringen Anzahl galvanischer Elemente im Stande sind, eine Muskelzuckung auszulösen. Wenn wir,

beispielsweise, die Anode einer galvanischen Batterie auf den Nacken der Versuchsperson fixiren, die Kathode, in Form einer knopfförmigen Electrode auf den Nervus medianus, am Handgelenk, aufsetzen und nun den Strom im metallischen Theil der Kette schliessen, so können wir allenfalls schon eine Zuckung der Daumenmuskeln erzielen mit fünf Leclanché'schen Elementen, also mit einer electromotorischen Kraft von circa 7 Volts. — Dabei zeigt das Edelmann'sche Galvanometer z. B. eine Stromstärke von 0,5 Milliampère an. Wir können darnach den Widerstand nach der Ohm'schen Formel $I = \frac{E}{R}$ und $R = \frac{E}{I}$ ungefähr berechnen. Er beträgt in diesem Falle $\frac{7 \text{ Volts}}{0{,}0005} = \text{circa } 14000$ Ohms. Nehmen wir nun 10 Elemente statt 5, also 14 Volts statt 7. Dadurch wird die Stromstärke keineswegs verdoppelt. Der galvanische Strom hat bekanntlich die Eigenschaft, vermöge seiner electrolytischen, cataphorischen und gefässerweiternden Wirkung, den Leitungswiderstand der Haut herabzusetzen.*)

Mit 10 Elementen kann die Stromstärke schon eine 4fache sein, d. h. 2,0 Milliampères, entsprechend einem Widerstand von $\frac{14 \text{ Volts}}{0{,}002} = 7000$ Ohms betragen. Die erzielte Muskelzuckung ist

---

*) Die Arbeiten von Gärtner, Jolly, Stintzing und Graeber und Anderer haben diese Wirkung galvanischer Ströme nachgewiesen. Ich habe selbst längere Zeit die Leitungswiderstände der Haut bestimmt und genaue Versuche darüber angestellt. Da inzwischen die erwähnten Arbeiten erschienen sind und den Gegenstand nahezu erschöpften, verzichtete ich auf eine weitere Publication meiner Versuche und begnügte mich, meine Resultate in einer Mittheilung an der schweizerischen Naturforschenden Versammlung in Genf kurz zu resümiren und zwar an Hand eines einzigen practischen Versuches, der die Thatsache genügend illustrirt. Da die Resultate für unsere heutige Frage von Wichtigkeit sind, gebe ich hier die betreffende Tabelle. Der Versuch wurde in folgender Weise gemacht: Die Anode lag auf dem Nacken, die Kathode auf der Vorderfläche des Vorderarms und nun liess ich successive 1—20 Leclanchés einwirken und zwar für jede Elementenzahl während 1 Minute. Auf 20 Elemente angelangt, ging ich nun wieder zurück, die Elementenzahl von 20 auf 1 reducirend. Die dritte Colonne entspricht diesem Versuch mit abnehmender Elementenzahl. Der herabgesetzte Widerstand wächst wieder mit abnehmender Voltspannung, bleibt aber hochgradig vermindert. Die Tabelle gibt die Elementenzahl, die Voltspannung, die galvanometrisch bestimmte Stromstärke am Anfang und am Ende jeder Minute. Die entsprechenden Widerstände sind berechnet nach $R = \frac{E}{I}$. Wir sehen in diesem Versuch den Widerstand sinken von 30000 auf 690 Ohms.

schon dabei eine ziemlich starke. Mit 15 Elem. resp. 21 Volts ist die Stromstärke nicht 3 fach, sondern vielleicht 12 fach. Die Stromstärke kann schon 6 Milliampères betragen und eine heftige, während der Stromdauer tetanisch andauernde Zuckung auslösen. Mit 20 Elementen ist die Zuckung höchst schmerzhaft und kaum erträglich. — Auch in den Fällen wo, wegen Dicke der Epidermis und kleinen Querschnitts der Electrode der Leitungswiderstand ein grösserer ist, kann man mit einer Batterie von 40 bis 50 Leclanchés, d. h. Spannungen von 56—70 Volts, die unangenehmsten, unerträglichsten Zuckungen bewirken. Es versteht sich von selbst, dass solche starke Ströme, die an den Extremitäten kaum ertragen werden, auf das Gehirn eine viel grössere Wirkung entfalten würden. Heftiger Schwindel, Erbrechen, ja Ohnmacht könnten die Folge einer solchen Application am Kopfe sein.

Diese Wirkung des galvanischen Stromes ist also eine ganz intensive. Sie findet um so energischer und um so rascher statt, je grösser die Voltspannung, resp. die Intensität ist. — Die Electrotherapeuten kennen diese Wirkung galvanischer Ströme zur Genüge, der Physiker aber weniger, wesshalb wir hier diese Tabelle als Beispiel wiedergeben.

Elem.-Volts.		Stromstärke in Milliampères.				Widerstand in Ohms.			
1	1,5	0	—	0	0,45	?	—	?	3333
2	3	0,10	—	0,10	1,65	30000	—	30000	1818
3	4,5	0,20	—	0,25	3	22500	—	18000	1500
4	6	0,35	—	0,40	5	17140	—	15000	1200
5	7,5	0,50	—	0,60	7	15000	—	12500	1071
6	9	0,72	—	0,85	9	12500	—	10590	1000
7	10,5	1,05	—	1,25	11	10000	—	8400	954
8	12	1,55	—	2,00	13	7640	—	7000	923
9	13,5	2,40	—	3,0	15	5625	—	4500	899
10	15	3,6	—	4,5	18	4166	—	3330	833
11	16,5	5,4	—	6,5	20,5	3055	—	2530	804
12	18	7,5	—	9,0	23	2400	—	2000	782
13	19,5	10,0	—	12,5	26	1950	—	1550	750
14	21	14,0	—	16,35	28	1500	—	1270	750
15	22,5	18,0	—	20,25	31	1250	—	1100	725
16	24	22,0	—	25,0	33,5	1090	—	960	716
17	25,5	27,0	—	30,0	36	940	—	850	708
18	27	32,0	—	34,5	39	840	—	780	697
19	28,5	37,0	—	39,0	42	770	—	730	678
20	30	41,0	—	43,5		730	—	690	

Erfahrungen über die Wirkung grösserer Batterien besitzen wir nicht, da solche meist nicht in Gebrauch sind. Dagegen kennen wir seit der Einführung der Dynamomaschinen in der Technik die verderbliche Wirkung hochgespannter Ströme. Diese Maschinen liefern allerdings Inductionsströme; dieselben sind aber bei der jetzt üblichen Construction gleichgerichtet und üben die gleiche Wirkung aus wie die galvanischen Ströme. Sie lenken die Galvanometernadel in gleicher Weise ab, sie verrichten die gleiche chemische Arbeit, so dass sie in der galvanoplastischen Technik an Stelle der Elemente gebraucht werden. Auch physiologisch wirken sie in gleicher Weise: bei Schluss des Stromes entsteht eine Muskelzuckung, die natürlich mit der Intensität des Stromes immer stärker wird. Erreicht die Voltspannung einer Dynamomaschine den Werth von mehreren Hundert Volts, so ist ein solcher Strom nicht mehr als unangenehm zu bezeichnen; er ist direct lebensgefährlich. Es ist schon öfters vorgekommen, dass Menschen durch den Strom einer Dynamomaschine von 500, 800, 1000 Voltsspannung, wie durch den Blitzstrahl getödtet wurden. Noch sicherer wird diese Wirkung eintreten bei den höheren Spannungen von 5—6000 Volts, wie sie von Marcel Deprez bei seinen Versuchen über Kraftübertragung angewendet wurden.

In all diesen Thatsachen liegt wohl nichts Befremdendes. Wenn 7 Volts schon genügen, um eine Muskelzuckung auszulösen, so ist es wohl begreiflich, dass 1000 Volts den Tod herbeiführen können. Wir begreifen dies noch besser, wenn wir die erwähnte Thatsache berücksichtigen, dass der Leitungswiderstand der Haut unter dem Einflusse des Stromes selbst erheblich abnimmt, so dass bei steigender Voltspannung die Stromstärke viel rascher zunimmt als der Vermehrung der Elementenzahl entsprechen würde. Die Verhältnisse sind also bei Besprechung solcher Ströme sehr klar.

Wenn wir uns nun über die Voltspannung anderer Electricitätsquellen, anderer Electromotoren erkundigen, so erfahren wir, dass die Spannung eines kleinen medicinischen Inductionsapparates mehrere Hundert, ja über Tausend Volts betragen kann. Enorm viel grösser ist die Spannung einer Influenzmaschine oder eines Rumkorf'schen Inductoriums. 100 — 300 Tausend Volts Spannung sind die Zahlenangaben, die wir in den Lehrbüchern darüber finden. Die Funkenlänge eines Inductoriums oder einer Electrisirmaschine gibt einen ungefähren Maasstab für ihre Voltspannung. Von technisch competenter Seite wurden mir darüber folgende Angaben gemacht:

Einer	Funkenlänge	von	0,18	mm	entspricht	eine	Spannung	von	1000	Volts
„	„	„	0,7	„	„	„	„	„	2000	„
„	„	„	5,0	„	„	„	„	„	5000	„
„	„	„	12,2	„	„	„	„	„	9000	„
„	„	„	15,6	„	„	„	„	„	12000	„
„	„	„	16,5	„	„	„	„	„	13000	„
„	„	„	17,1	„	„	„	„	„	14000	„
„	„	„	18,8	„	„	„	„	„	15000	„

Und doch ist, so viel ich weiss, durch eine solche Entladung noch kein Mensch getödtet worden. Wohl sind zuweilen Experimentatoren zu Boden geworfen worden, haben sogar während einigen Minuten Lähmungserscheinungen empfunden, doch kamen Alle davon. Ich versuchte mit einer Condensatorentladung von 5000 Volts ein Hühnchen zu tödten. Obgleich ich die Electroden zu beiden Seiten des Kopfes ansetzte, war die Gefahr für das Thier keine grosse. Es wurde nicht einmal betäubt; höchstens konnte man von unangenehmer Ueberraschung reden. Der Blitzstrahl sogar, dessen Spannung mehrere Millionen Volts betragen muss, tödtet nicht immer die Betroffenen; ich habe zwei Mal Gelegenheit gehabt, Patienten zu untersuchen, die vom Blitze getroffen wurden und nichts davon trugen als Hautverbrennungen und localisirte Lähmungen.

Woran liegt es nun, dass eine Dynamomaschine von 800 Volts den Tod eines Menschen bewirken kann, während eine Entladung von vielen Tausend Volts Spannung gefahrlos bleibt? Darüber finden wir in den Lehrbüchern wohl Andeutungen, ja sogar positive Angaben, jedoch keine auf exacte Versuche und Zahlen gestützte Antwort.

Wir lesen z. B., dass Inductionsströme oder Condensatorentladungen eine *geringe Quantität* haben. Dieses Wort wird aber so oft gebraucht, wo es keinen Sinn hat, dass ich berechtigt bin, die Antwort als ungenügend zu betrachten.

Der Physiker von Fach wird sich zwar mit dieser Erklärung zufrieden geben; der Begriff der *Quantität* ist ihm ein geläufiger. Fragen Sie aber physikalisch gebildete Aerzte, sogar Techniker, so werden Sie sehen, dass dieser Begriff kein klarer ist, oder, besser gesagt, dass dieser, an sich sonnenklare Begriff nicht viel gebraucht wird, dass wir nicht gewohnt sind, ihn in Einheiten auszudrücken, dass es mit einem Worte kein geläufiger Begriff ist, wie etwa der der Voltspannung oder der Intensität in Ampères.

Es ist wahr, Inductionsströme, Entladungen von Electrisirmaschinen und Condensatoren haben eine geringe Quantität, und dies erklärt

ihre im Verhältniss zur *Voltspannung geringe* Wirkung, aber so lange wir über den Werth dieser Quantität keine Zahlenangaben haben, so kann uns die Erklärung nicht ganz befriedigen.

Schon klarer ist der häufig ausgesprochene Satz, dass Inductionsströme und Entladungen *kurzdauernde Ströme* sind. In dieser Form ist die Erklärung verständlicher; sie befriedigt nicht nur den Fachmann, sondern ist auch für den Laien leicht fassbar. Es stimmt diese Auffassung mit anderen Erfahrungen im Gebiete der Physiologie und Physik. — Gestatten Sie mir einige Beispiele:

Eine ruhende Flintenkugel ist gross genug, um bei genügender Beleuchtung gesehen zu werden, d. h. die Intensität des von ihr zum Auge kommenden Lichtstrahles ist genügend, um auf die Retina einzuwirken. Wird nun die Flinte abgefeuert, so sehen Sie das Geschoss in seinem Fluge durch die Luft nicht. Die Lichtstrahlen, die von ihm zum Auge gehen, haben noch immer die gleiche Intensität. Die Dauer der Einwirkung ist aber zu kurz. Die Retina antwortet auf zu kurz dauernde Reize nicht, so stark sie auch sein mögen.

Auch im Gebiete der Electricität finden wir analoge Erscheinungen. Gibt man nur einen kurzen, aber kräftigen Schlag auf den Knopf einer electrischen Läutvorrichtung, so antwortet die Glocke nicht. Der Contact wurde dadurch geschlossen, der Strom konnte auch während dieser kurzen Zeit seine volle Intensität erreichen, aber der Vorgang war zu kurzdauernd, um die Anker genügend anzuziehen.

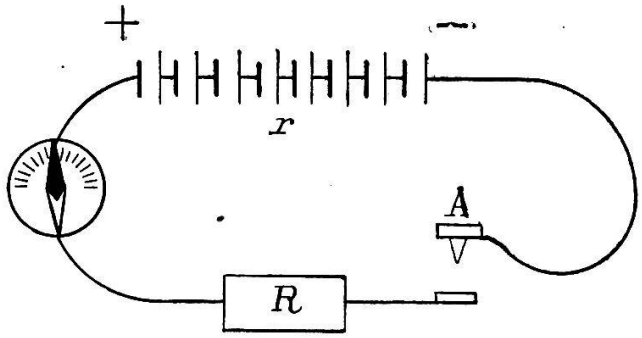
Ebenso antwortet ein mässig empfindliches Galvanometer auf ganz kurze Berührung der Leitungsdrähte nicht.

Den ganz gleichen Gedankengang entwickelt Mousson in seinem Lehrbuche der Physik bei der Besprechung der auseinandertreibenden Kraft der Electricität. «Im electrischen Mörser, einer kleinen Elfenbeinkugel, die genau in eine Höhlung aus gleichem Stoffe passt und unter welcher die Entladungsstelle liegt, wirkt der Schlag zur Fortbewegung der Kugel. Freilich steht die kleine Wurfhöhe von wenigen Decimetern in keinem Verhältniss zu der Stärke der Entladung; doch erklärt sie sich aus der ungemein kurzen Dauer des Schlages. Die Kraft, welche in $\frac{1}{1152000}$ einer Secunde (Dauer eines Funkens nach Wheatstone) die Geschwindigkeit zu 1 Decim. Wurfhöhe mittheilt, nämlich 14 Decim., vermöchte, eine Secunde gleich fortwirkend, eine Beschleunigung von 14 . 1,152,000 Decim. oder 161,200 M. hervorzubringen, eine ungeheure Zahl».

Sie sehen, dass dieser Begriff der *Dauer* ein sehr klarer ist, klarer als der der Quantität. Es ist im Grunde dasselbe in anderen Worten, aber in einer für jeden Kopf fassbaren Form. Noch viel befriedigender wäre diese Erklärung, wenn wir die Dauer des Stromes in Bruchtheilen einer Secunde ausdrücken könnten, wenn wir sagen könnten: Jener galvanische Strom von relativ niederer Spannung hat eine grosse Wirkung entfaltet, weil er $^1/_{100}$ einer Secunde andauerte; dieser Inductionsstrom von enorm viel grösserer Spannung hat im Vergleich weniger gewirkt, weil seine Dauer nur einige Milliontel einer Secunde betrug.

Zu einer solchen Bestimmung wollte ich nun kommen und sagte mir: Wenn Ströme von vielen Hundert, ja vielen Tausend Volts, durch die kurze Dauer ihrer Entladung, in ihrer Wirkung wesentlich beeinträchtigt werden, so wird es ein Leichtes sein, galvanische Ströme von relativ niederer Spannung durch *kurze Dauer des Schliessungszeit* abzuschwächen, ja vielleicht unwirksam zu machen. Um die theoretische Richtigkeit dieses Planes zu begründen, muss ich einiges über die galvanischen Ströme vorausschicken. Betrachten wir eine Batterie von X Elementen (Fig. 1), in der Ruhe, d. h. die offene Kette. So lange der Schliessungskreis der Batterie nicht geschlossen wird, ist an der Batterie nichts nachweisbar. Und doch lehrt die Prüfung mit dem Quadrantelectrometer oder mit einem Condensator nebst Galvanometer, dass, an den Endpolen der Batterie eine electrische *Spannung* herrscht. An diesen Polen ist eine Kraft aufgespeichert, welche die Tendenz hat, sich zu entspannen, so bald die sie bändigenden Widerstände gehoben sind. Je nachdem man diesen oder jenen Gedanken hervorheben will, spricht man von *Spannung,* von *Potential,* von *electromotorischer Kraft.*

Fig. 1



Es ist hier nicht am Platze, auf die Präcisirung dieser Begriffe einzugehen. In diesem speziellen Falle sind diese Ausdrücke gleichwerthig. Ich werde im Fernern meist das Wort Spannung gebrauchen.

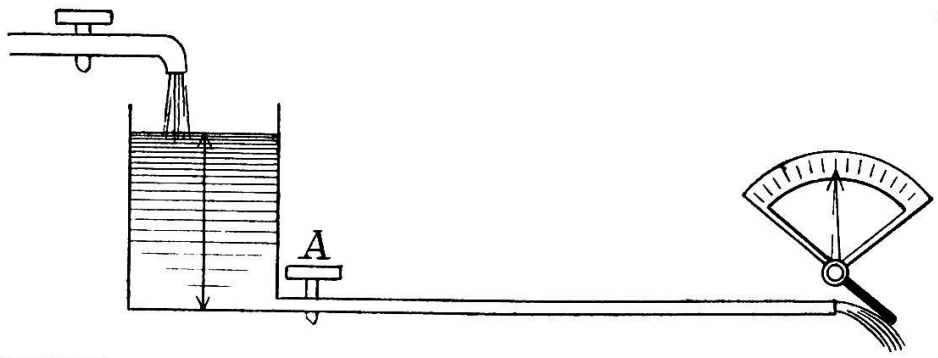
Schliessen wir nun den Kreis durch Druck auf den Contact A, so fliesst nun die angesammelte Electricitätsmenge längs des Conductors, mit einer *Geschwindigkeit* die, einerseits von der Spannung E, ander-

seits vom Widerstand der Schliessung abhängig ist. Diese Geschwindigkeit des Stromes ist, was wir als die *Intensität,* die *Stromstärke,* bezeichnen.*) Die Ohm'sche Formel lehrt uns, dass die Stromstärke der Spannung direct, dem Gesammtwiderstand des Stromkreises umgekehrt proportional ist. $I = \frac{E}{R + r}$, wobei R den ausserwesentlichen, r den Batteriewiderstand bezeichnet. Im speziellen Falle der Electrotherapie, wo der Strom auf den mehrere Tausend Ohms messenden Körperwiderstand geschlossen wird, kommt der innere Widerstand, weil verschwindend klein, meist nicht in Betracht. Die Stromstärke hängt nur von der Spannung und vom ausserwesentlichen Widerstande ab, $I = \frac{E}{R}$.

Wenn wir, wie üblich, die electrischen Erscheinungen mit den hydraulischen vergleichen, so ist die Analogie eine auffallende. Ein galvanisches Element, eine galvanische Batterie ist vergleichbar mit einer Quelle im eigentlichen Sinne des Wortes, mit einer unversiegbaren Quelle, die einen constanten, gleichmässigen Strom liefert.

Das galvanische Element ist auch vergleichbar mit einem mit Flüssigkeit gefüllten Gefäss, bei welchem durch eine passende Zuflussvorrichtung das *Flüssigkeitsniveau constant* erhalten bleibt.

Fig. 2



*) Wenn ich hier die Intensität als eine Geschwindigkeit bezeichne, so ist dies nicht ganz richtig. Im electrodynamischen Maasssystem hat die Intensität nicht die Dimension einer Geschwindigkeit. Die Geschwindigkeit ist aber der Intensität proportional, bei Annahme eines constanten Querschnitts der Leitung; wie die Intensität ist auch in diesem Falle die Geschwindigkeit der treibenden Kraft direct, dem Widerstand umgekehrt proportional. Man kann sich über die Intensität übrigens verschiedene Vorstellungen machen. Bei der Intensität 1 Ampère fliesst in der Secunde 1 Coulomb Electricitätsmenge ab. Hat der Strom die Stärke von 2 Ampères, so kann man ebenso gut sagen: bei gleichbleibender Geschwindigkeit floss eine doppelte Menge ab oder eine gleiche Menge floss mit doppelter Geschwindigkeit ab. In beiden Fällen ist die abgelieferte Menge 2 Coulombs. Auf diese Frage kann ich nicht näher eintreten. Der Vergleich der Intensität mit einer Geschwindigkeit muss hier bildlich verstanden werden.

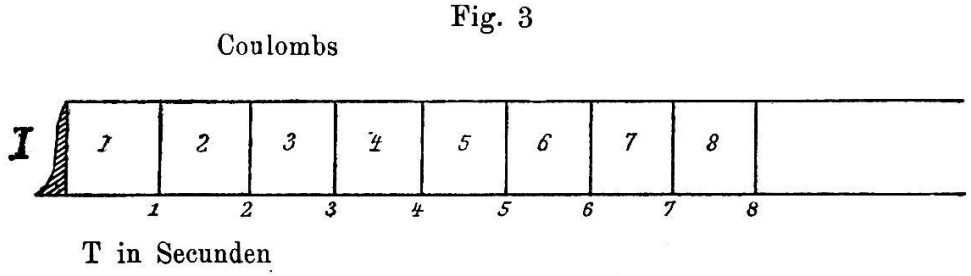
So lange der Hahn A geschlossen ist (offene Kette), bleibt die, durch die Höhe der Wassersäule ausdrückbare Kraft in Ruhe. Wird nun der Hahn geöffnet, so fliesst das Wasser mit einer Geschwindigkeit (Intensität) ab, die von der Druckhöhe und vom Widerstand abhängt. So wie das Galvanometer uns die Intensität des Stromes anzeigt, so können wir uns auch eine Vorrichtung denken, die ebenfalls durch ihre Ablenkung die Stärke des Stromes anzeigt. (Fig. 2.)

Bei Wasserläufen kann die Stärke des Stromes durch die in der Zeiteinheit ausgeflossene Wassermenge ausgedrückt werden. In gleicher Weise können wir aber auch die Intensität des galvanischen Stromes messen. Ein Strom von der Intensität = *1 Ampère*, ist ein Strom, bei welchem in der *Secunde* eine Electricitätsmenge von *1 Coulomb* abfliesst.

Diese Verhältnisse lassen sich auch schematisch darstellen. Wenn ein galvanischer Strom auf einen gewissen Widerstand geschlossen wird, so erreicht er theoretisch nicht sofort seine der $\frac{\text{Voltspannung}}{\text{Widerstand}}$ entsprechende Intensität. Es vergeht eine äusserst kurze Zeit, die Zeit des sog. variablen Zustandes, bis der Strom von 0 auf die maximale Höhe steigt. — Nach dieser sehr kurzen Zeit hat der Strom seine maximale Intensität erreicht und behält sie, so lange der Strom geschlossen bleibt, weil durch die Arbeit im Element die Spannung erhalten bleibt. Es fliesst also ein *constanter* Strom von der $I = \frac{E}{R}$

Die *Quantität* dieses Stromes hängt namentlich ab von der Schliessungszeit. So lange Zink noch vorhanden ist, so lange der Strom geschlossen bleibt, wird in der Secunde 1 Coulomb Electricitätsmenge geliefert, wenn die Intensität 1 Ampère beträgt.

Fig. 3



In der Fig. 3 ist die Intensität des Stromes I als Ordinate, die Dauer T als Abscisse aufgetragen. Die Quantität Q ist das Product aus der Intensität und Zeit, $Q = I\,T$.

Die Quantität eines constanten Stromes ist also nur abhängig von seiner Intensität und von der Schliessungsdauer. Sie lässt sich

immer in Einheiten der Quantität, in Coulombs, ausdrücken. Fliesst der Strom von der Intensität 1 Ampère während einer Secunde, so ist die Quantität 1 Coulomb, fliesst er 10 Secunden, so beträgt sie 10 Coulombs; dauert der Strom nur ein Milliontel einer Secunde, so beträgt die Quantität 1 Milliontel eines Coulombs oder *1 Microcoulomb*. Kurz oder lang dauernd hat der Strom die Intensität 1 Ampère. Im Ausdruck des Ampère $= \frac{\text{Volt}}{\text{Ohm}}$ fehlt der Begriff der Zeit.

Nun dachte ich: Wenn es gelingt, die Schliessungszeit eines galvanischen Stromes auf ein gewisses *Minimum* zu verkürzen, so wird dessen Wirkung abnehmen, und vielleicht gelingt es, ihn dadurch so abzuschwächen, dass keine Wirkung mehr eintritt.

Andererseits lehrt eine oberflächliche Erfahrung, dass es, wenigstens für schwache Ströme, eine *maximale Schliessungszeit* gibt, bei welcher der Strom seine *volle*, Nerv und Muskel erregende Wirkung hat. Wenn man mit einem Strom von 2 Milliampères eine Muskelcontraction auslöst, so ist es vollkommen gleichgiltig, ob der Strom 0,1 Sec. oder 1,0 Sec. dauert. Die Zuckung bleibt die gleiche, sie wird nicht ausgiebiger, nicht effectvoller. Ich setze also voraus: Hat ein Strom die genügende Intensität, um überhaupt eine Zuckung auszulösen, so gibt es eine *minimale Stromdauer*, unter welcher keine Wirkung eintritt, und eine *maximale Stromdauer* (wenigstens für schwache, nicht tetanuserregende Ströme), bei welcher die maximale Wirkung voll erreicht wird.

Dieses Minimum und Maximum der wirksamen Stromdauer zu bestimmen, war das Ziel meiner Arbeit.

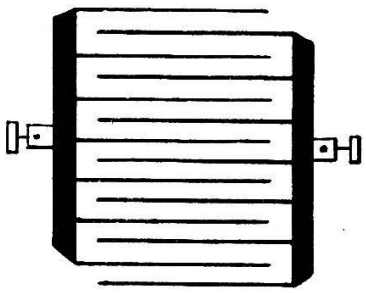
Ich suchte nun die kurzen Schliessungszeiten durch mechanische Vorrichtungen zu erzielen, rotirendes Rad, Pendel etc., bei welchen durch Schleifcontacte der Strom kurz geschlossen wurde. Ich sah aber bald ein, dass es unmöglich sei, eine Vorrichtung zu construiren, die für kleinere Zeiten als $^1/_{1000}$ Secunde einen sichern Contact gegeben hätten. Das Resultat meiner Versuche bestätigte dies auch und ich musste auf diese Versuchsanordnung verzichten.

In der Verlegenheit griff ich nun zu den *Condensatoren*.

Die Quantität eines Stromes ist, haben wir gesagt, das Product aus der Intensität und Stromdauer, $Q = I\,T$. — Bei gleichbleibendem I, T verkürzen, heisst die *Quantität* Q verkleinern. Nun gibt es Instrumente, die gegenwärtig technisch verwerthet werden und welche erlauben, ganz bestimmte, abgewogene Electricitätsmengen zu sammeln

und auf einen Leiter zu entladen. Diese *Condensatoren* bestehen aus abwechselnden Lagen von Stanniol und Parafinpapier (oder auch Micaplatten), welche in grosser Zahl aufeinander geschichtet werden. Sie repräsentiren eine sehr grosse, zusammengefaltete Franklin'sche Tafel. Die Stanniolplatten gerader Zahl sind mit einander verbunden und bilden eine der Belegungen. Die ungeraden sind ebenfalls unter einander in Verbindung und bilden die andere Belegung des Condensators.

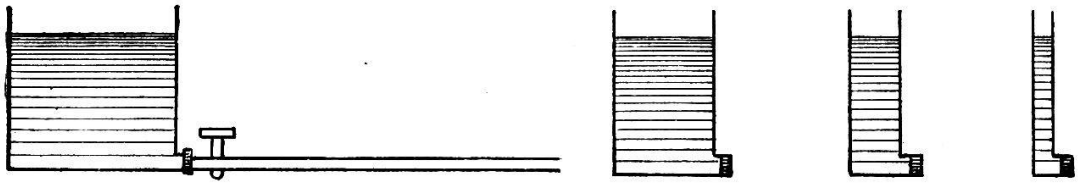
Fig. 4



Mittelst passender Klemmschrauben kann der Condensator mit der Ladungsquelle in Verbindung gebracht werden. (Fig. 4.) Die *Menge Electricität*, die *Quantität*, die ein solcher Ansammlungsapparat aufnehmen kann, hängt einerseits von seiner *Capacität*, d. h. namentlich von seiner Oberfläche, andrerseits von der *Spannung* der ladenden Batterie ab.

Wenn wir den Vergleich mit der Hydrostatik fortsetzen, so sind Condensatoren vergleichbar mit Gefässen verschiedener Capacität, welche abgemessene Flüssigkeitsmengen enthalten können. Wie der *Druck* einer Wassersäule nur von ihrer Höhe, nicht von der Grösse der Gefässe und Menge des Wassers abhängt, so ist die *Spannung* eines Condensators nur von der Spannung der ladenden Stromquelle abhängig. Wird er auf 10 Volts geladen, so bleibt die Spannung 10 Volts, sei der Condensator klein oder gross. Dagegen ist dann die

Fig. 5



Quantität eine verschiedene und diese beeinflusst die *mögliche Dauer* der Entladung. Ist ein Wassergefäss klein, so kann es nur einen kurzdauernden Strom liefern. Enthält es viel Wasser, so kann es, bei gleichbleibender Intensität einen dauernden Strom geben. (Fig. 5.)

Ebenso wird, bei gleicher Spannung, ein Condensator von kleiner Capacität nur eine kurze Entladungszeit haben, während ein sehr grosser längere Zeit Electricität liefern kann.

Nur in einem Punkte ist der Vergleich mit der Hydrostatik nicht vollkommen zutreffend. Ein Gefäss von der Capacität 1 Liter kann unter allen Umständen nur 1 Liter Wasser enthalten, weil das

Wasser incompressibel ist. 1 *Microfarad* (practische Einheit der Capacität) kann aber 1, 2, 3, 100 *Microcoulombs* enthalten, je nachdem er mit 1, 2, 3, 100 Volts geladen wird. Der Vergleich mit den Gasen ist hier am Platze. Ein Gefäss von 1 Liter kann ebenfalls mehr oder weniger Gas enthalten, wenn dasselbe unter Druck gehalten wird.

Bei den Condensatoren ist folglich die *Quantität* das Product aus der Capacität und der Spannung, $Q = CV$. Das ist die Formel der *statischen Quantität*, während $Q = IT$ die Formel der *dynamischen Quantität* darstellt. —

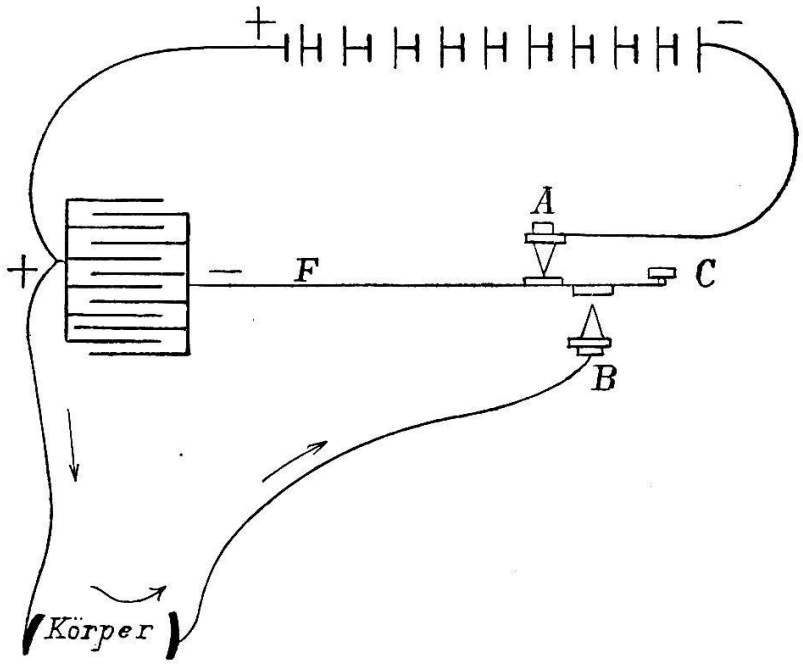
Es war für mich zuerst ein verlockender Gedanke, von der statischen auf die dynamische Quantität überzugehen und die gesuchte Zeit T zu bestimmen nach der Formel $T = \frac{Q}{I}$. Q ist bekannt, resp. lässt sich berechnen durch Multiplication von Capacität in Microfarads mit Spannung in Volts. I kann bestimmt werden, da ich die Spannung und den Widerstand kenne, resp. letzteren messen kann. Der Quotient, aus Quantität in Microcoulombs dividirt durch die Intensität in Ampères, gibt die Zeit T in Milliontel einer Secunde. Die Einfachheit dieser Berechnung kam mir jedoch verdächtig vor. Herr Prof. Dr. Forster, sowie Herr Dr. Rothen waren mir bei dieser Angelegenheit behülflich. Sie machten mich darauf aufmerksam, dass es nicht möglich sei, diese Formel der dynamischen Quantität hier anzuwenden, weil die Curve einer Condensatorentladung eine andere ist wie die eines galvanischen Stromes. Beide Herren waren auch so freundlich, mir werthvolle Instrumente anzuvertrauen und mir mit Rath und That beizustehen. Ich benutze die Gelegenheit, ihnen meinen besten Dank auszusprechen.

Ich liess daher die Frage der Zeitberechnung momentan bei Seite und machte mich an's Experimentiren mittelst der Condensatoren.

Dr. Boudet de Pâris in Paris hat vor Jahren schon die Condensatoren in der Electrotherapie angewendet und eine Unterbrechungsvorrichtung, einen Neef'schen Hammer, construirt, der rasch hintereinander den Condensator ladet und auf den Körper entlädt. Ich zog vor, *isolirte Entladungen* zu benutzen, und wendete dabei folgende Vorrichtung an. (Fig. 6.)

Der positive Pol der Batterie steht in Verbindung mit einer der Belegungen des Condensators und ferner mit dem Körper. Der negative

Fig. 6



Pol führt zum Contact A, welcher bei Ruhelage der Feder F geschlossen ist. Somit ist der Condensator auf die Spannung der Ladungsbatterie gebracht. Durch Druck auf den Knopf C wird der Contact A geöffnet, der Contact B geschlossen. Die Batterie ist ausgeschaltet und der Condensator entlädt sich auf den Körper. Der Körper wird nun von einem kurzdauernden Strom durchflossen.

Die Batterie von 50 Leclanchés erlaubt, die Spannung beliebig von 1,4 Volts bis auf 70 Volts*) zu verändern. Der Condensator, den ich der Güte des Herrn Dr. Rothen, Adjunkt der eidgenössischen Telegraphendirection, verdanke, ist ein Instrument von Elliott in London und ist in Tausendstel eines Microfarads getheilt. Ich kann somit die Quantität genau dosiren zwischen 1,4 Volt × 0,001 Microfarad = 0,0014 Microcoulomb und 70 Volts × 1,000 = 70 Microcoulombs. Vom physikalischen Cabinet der Hochschule bekam ich noch einen Condensator von 1 Microfarad und von Herrn Dr. Borel in Cortaillod (Fabrik von Cabeln und Condensatoren) 3 Condensatoren zu je 2 Microfarads; ich verfügte somit über Quantitäten von 0,0014 Microcoulomb bis 560 Microcoulombs.

Die Versuche wurden nun in folgender Weise angestellt: Die *Anode* als breite Platte von 64^{c^2} oder 100^{c^2} wurde als sog. indifferente Electrode auf Nacken, Sternum oder Bauch fixirt. Die Kathode (meist die normale Kathode von Stintzing mit 3^{c^2} Oberfläche) wurde auf den zu prüfenden Nerv fixirt und der Condensator nun mit wechselnder Spannung, resp. Quantität auf den Nerv entladen. Die, an verschie-

*) Eine genaue Messung der electromotorischen Kraft jedes Elementes vor jedem Versuch vorzunehmen wäre viel zu zeitraubend gewesen. Ich prüfte nur einige Elemente und fand ihre electromotorische Kraft im Mittel = 1,40 Volts.

denen Tagen, auf den gleichen Nerv derselben Versuchsperson erhaltenen Resultate zeigen namhafte Verschiedenheiten, die jedem Electrotherapeuten begreiflich sein werden. Es ist nicht immer möglich, den Nerv gleich zu treffen, die Dichtigkeit des Stromes in demselben gleichmässig herzustellen. Es sind diess Unregelmässigkeiten, die bei jeder diagnostischen und therapeutischen Application der Ströme vorkommen und welche die Resultate jedes einzelnen Versuches in keiner Weise trüben.

Ich gebe hier die detaillirte Schilderung des ersten Versuches, der mit einer Batterie von 50 Leclanchés vorgenommen wurde.

Versuch 1.

Anode 100^{c^2} auf Nacken. Normale *Kathode* 3^{c^2} auf den linken Medianus am Handgelenk. Ungefähre Bestimmung des Leitungswiderstand durch Beobachtung des Nadelausschlages (grosser Edelmann'scher Einheitsgalvanometer) bei der Annahme einer electromotorischen Kraft von 1,4 Volts per Element. 5 Elemente, resp. 7 Volts geben eine Stromstärke von 0,0016 Ampère, folglich ist der berechnete Widerstand $\frac{7 \text{ Volts}}{0{,}0016} = 4375$ Ohms. Galvanisch erreicht man in diesem Versuch die erste Kathodenschliessungszuckung (KSZ) mit 6 Elementen, resp. 8,4 Volts und I = 1,9 Milliampère. Unter solchen Versuchsbedingungen gibt der Condensator von 1 Microfarad, geladen mit 56 Volts, eine sehr starke Zuckung. Ich suche nun durch Verminderung der Capacität die Wirkung allmählig abzuschwächen, bis die *minimale Zuckung* eintritt.

Es zeigt sich nun, dass die Entladung von 56 Volts die minimale Zuckung bei einer Capacität von 0,007 Microfarad gibt. Die Bestimmung ist eine sehr genaue, da jede weitere Verminderung der Capacität die Zuckung zum Verschwinden bringt. Bei 56 Volts und 0,006 Microfarad ist absolut keine Zuckung sichtbar, auch keine fühlbar. Diese Entladung bleibt vollkommen erfolglos. Sofort tritt aber eine deutliche, regelmässige Zuckung ein, sobald die Capacität 0,007 Microfarad beträgt.

Ich vermindere nun die Elementenzahl um 5 Elemente, resp. die electromotorische Kraft um 7 Volts und bestimme wieder die zur Auslösung der *minimalen Zuckung* erforderliche Capacität. Sie beträgt nun für 49 Volts 0,009 Microfarad.

In gleicher Weise verfahre ich bei 42, 35, 28, 21, 14 und 9,8 Volts. Bei jeder Spannung erhielt ich somit die *gleiche minimale Zuckung*.

Folgende Tabelle stellt die Resultate dieses Versuchs zusammen. Auf den Widerstand von circa 4375 Ohms gibt:

die	Entladung	von	56	Volts	die	minim.	Zuckung	mit	0,007	Microfarad
„	„	„	49	„	„	„	„	„	0,009	„
„	„	„	42	„	„	„	„	„	0,011	„
„	„	„	35	„	„	„	„	„	0,014	„
„	„	„	28	„	„	„	„	„	0,018	„
„	„	„	21	„	„	„	„	„	0,027	„
„	„	„	14	„	„	„	„	„	0,070	„
„	„	„	9,8	„	(7 Elemente)		„	„	0,290	„

Das Resultat dieses Versuchs ist in keiner Weise befremdend. Wenn bei kleinerer Voltspannung die Wirkung die gleiche bleiben soll, so ist dies nur erreichbar, wenn die Capacität grösser wird.

Da *constant* die gleiche minimale Zuckung auftrat, so war zu erwarten, dass in den physikalischen Eigenschaften der Entladung *etwas constant sein werde*. Bei Betrachtung obiger Zahlen, wo die Voltspannung allmählig *abnimmt*, die Capacität dagegen *zunimmt*, schien es wahrscheinlich, dass das Product, *die Quantität*, constant bleibe.

Die Berechnung bestätigt dies *nicht*. Bestimmen wir die Quantität nach der Formel $Q = CV$, so finden wir dass:

56	Volts	die	minim.	Zuckung	geben	bei	circa	Q =	0,392	Microcoulomb.
49	„	„	„	„	„	„	„	Q =	0,441	„
42	„	„	„	„	„	„	„	Q =	0,462	„
35	„	„	„	„	„	„	„	Q =	0,490	„
28	„	„	„	„	„	„	„	Q =	0,504	„
21	„	„	„	„	„	„	„	Q =	0,567	„
14	„	„	„	„	„	„	„	Q =	0,980	„
9,8	„	(7 Elem.)		„	„	„	„	Q =	2,842	„

Interessant ist in diesem Versuch schon die Thatsache, dass 56 Volts die minimale Zuckung bei einer Quantität von 0,392 Microcoulomb auslösen.

Wie ungeheuer klein diese physiologisch wirksame Quantität ist, lässt sich bestimmen, wenn wir ausrechnen, welche chemische Wirkung eine solche Entladung verrichten würde. Bekanntlich hängt die chemische Wirkung nur von der *Quantität*, nicht von der Form der Entladung ab. Die Wirkung bleibt die gleiche, ob ein schwacher Strom lang dauert oder ob ein starker Strom nur kurze Zeit einwirkt.

Ein Strom von 1 *Ampère*. während 1 *Secunde* fortwirkend, hat eine Quantität von 1 *Coulomb*. Diese Quantität schlägt im Silbervoltameter ein Gewicht von circa 1 Milligramm (genau 1,1183) Silber nieder.

Unsere Entladung würde nicht einmal $^1/_2$ Milliontel Milligramm niederschlagen, genau 0,000000392 mg, circa $\frac{1}{2500000}$ eines Milligramms.

Wir haben somit durch diese einfache Berechnung einen Begriff von der ungeheuer kleinen Electricitätsmenge, welche genügt, um bei 56 Volts und 4375 Ohms eine zwar schwache, jedoch deutliche Zuckung zu geben.

Aus obigem Versuch geht auch die Thatsache hervor, *dass das Product aus Voltspannung und Capacität kein constantes bleibt*. Bei sinkender Spannung muss die Quantität *steigen*, wenn die Wirkung die gleiche bleiben soll. Die Zahlen zeigen diess in unverkennbarer Weise. Während die Entladung von 56 Volts schon mit einer Quantität von 0,392 Microcoulomb die minimale Zuckung gibt, so ist eine Quantität von 0,504 erforderlich, wenn die Voltspannung 28 Volts beträgt. —

A priori scheint das Resultat begreiflich. Wir wissen z. B., dass der Schliessungsinductionsstrom physiologisch eine viel geringere Wirkung entfaltet als der Oeffnungsstrom. Beide Ströme haben, wie Voltameter und Galvanometer lehren, die gleiche Quantität. — Wir ziehen daraus den Schluss, dass es für die physiologische Wirkung nicht auf die Quantität ankommt.

Von diesen Erfahrungen ausgehend, kann man sich vorstellen was eben der Versuch zeigt, dass sinkende Voltspannung durch *steigende* Quantität compensirt werden muss.

Wenn wir uns vorläufig an die Formel der dynamischen Quantität $Q = IT$ halten, so ist das Resultat wohl begreiflich. — Sinkt, bei gleichbleibendem Widerstand, die Voltspannung, so wird I kleiner. Soll dennoch die gleiche minimale Zuckung erzielt werden, so muss die verminderte Intensität durch längere Dauer T compensirt, resp. übercompensirt werden. Es scheint nicht zu genügen, wenn das Product $Q = IT$ gleich bleibt.

Aehnliches muss sich herausstellen, wenn die berechnete Intensität auf andere Weise vermindert wird, z. B. durch Einschaltung von Widerständen. Das Experiment bestätigt diess.

Als ich, nach Vornahme des Versuchs 1, den Widerstand approximativ bestimmte, ergab das Galvanometer bei 5 El., resp. 7 Volts eine Stromstärke von 1,8 Milliampère, einem Widerstand von circa 3888 Volts entsprechend. Ich schaltete nun mittelst eines Flüssigkeitsrheostaten (den ich den Drahtwiderständen zur Vermeidung etwaiger Extracourants vorzog) so viel Widerstand ein, bis 7 Volts eine Stromstärke von 0,9 Milliampère (statt 1,8) ergaben. Der Widerstand war dadurch approximativ verdoppelt, betrug nun circa 3888 × 2 = 7776 Ohms. Der Versuch wurde nun unter diesen, *nur hinsichtlich Widerstand*, veränderten Bedingungen in gleicher Weise angestellt und ergab nun folgendes Resultat. —

Versuch 1a.

Die	Entladung	von	56	Volts	ist	wirksam	bei C	= 0,010	Microfarad
„	„	„	49	„	„	„	„	= 0,012	„
„	„	„	42	„	„	„	„	= 0,016	„
„	„	„	35	„	„	„	„	= 0,023	„
„	„	„	28	„	„	„	„	= 0,040	„
„	„	„	21	„	„	„	„	= 0,100	„
„	„	„	16,8	„	(12 El.)	„	„	= 1,000	„

Ich musste also bei doppelten Widerstand ebenfalls die Capacität vergrössern. Die Berechnung der Quantität ergibt, dass:

56	Volts	die	Zuckung	geben	bei	Q	= 0,560	Microcoulomb.
49	„	„	„	„	„		= 0,588	„
42	„	„	„	„	„		= 0,672	„
35	„	„	„	„	„		= 0,805	„
28	„	„	„	„	„		= 1,120	„
21	„	„	„	„	„		= 2,100	„
16,8	„	(12 El.)	„	„	„		= 16,800	„

Als ich die I durch Verminderung der Voltspannung von 56 auf 28 Volts herabsetzte*), war eine grössere Quantität nothwendig, nämlich 0,504 statt 0,392. Diese Quantitäten verhalten sich wie 1 : 1,285 Bewirkte ich die Verminderung der Intensität durch ungefähre Verdoppelung des Widerstandes, so war das Verhältniss 0,392 : 0,560 = 1 : 1,429. Wenn man bedenkt, dass bei solchen Versuchen die Bestimmungen nur approximativ gemacht werden können, so ist die Uebereinstimmung genügend. Es ist unmöglich, vor jedem Versuch die Batterie auf ihre electromotorische Kraft zu prüfen, unmöglich, den variablen

*) Versuch 1.

Körperwiderstand zu bestimmen; der Versuch kann daher nicht die Exactheit eines physikalischen Experimentes haben. Das Resultat muss immerhin nur als ein approximatives gelten. —

Uebereinstimmende Resultate gaben nun die folgenden Versuche, die ich in Kürze beschreibe.

Versuch 2.

2 Anodenplatten von je 400 c^2 auf Rücken und Bauch zur Verminderung des Leitungswiderstandes.

Kathode 3 c^2 auf den linken Medianus am Handgelenk. — Galvanisch erreicht man die erste KSZ mit 5 El., resp. 7 Volts und eine Stromstärke von 1,4 Milliampère, woraus sich ein Widerstand von circa 5000 Ohms ergibt. — Die minimale Zuckung tritt auf bei:

Spannung.		Capacität.		Quantität.	
70	Volts	0,007	Microfarad	0,490	Microcoulomb
63	„	0,008	„	0,504	„
56	„	0,009	„	0,504	„
49	„	0,011	„	0,539	„
42	„	0,013	„	0,546	„
35	„	0,016	„	0,560	„
28	„	0,021	„	0,588	„
21	„	0,031	„	0,651	„
14	„	0,077	„	1,078	„
9,8	„	1,000	„	9,800	„

Versuch 2a.

Nach Vollendung des Versuchs 2, geben 5 El. resp. 7 Volts einen Ausschlag von 1,6 Milliampère. Der Widerstand scheint somit etwas gesunken zu sein, auf circa 4375. — Ich schalte Widerstand ein, bis 7 Volts eine Ablenkung von 0,8 M.A. geben, somit ist der Widerstand annähernd verdoppelt und beträgt circa 8750 Ohms. Bei diesem Widerstand erreicht man galvanisch die erste KSZ mit 13 El. resp. 18,2 Volts und eine abgelesene Stromstärke von 2 Milliampères.

$$\text{(Momentaner Widerstand} = \frac{18{,}2 \text{ Volts}}{0.002} = 9100 \text{ Ohms.)}$$

Unter diesen neuen Bedingungen ergibt der Versuch folgende Zahlen.

Die erste Zuckung tritt ein bei:

Spannung.	Capacität.	Quantität.
70 Volts	0,009 Microfarad	0,630 Microcoulomb
63 „	0,011 „	0,693 „
56 „	0,013 „	0,728 „
49 „	0,016 „	0,784 „
42 „	0,023 „	0,966 „
35 „	0,040 „	1,400 „
28 „	0,110 „	3,080 „
21 „	0,950 „	19,950 „
19,6 (14 Elem.)	1,000 „	19,600 „

Auch in diesem Versuch zeigt sich dieselbe Erscheinung, die zunehmende Quantität bei abnehmender Voltspannung.

In Versuch 2 war das Verhältniss der Quantität bei 70 und 35 Volts 0,490 : 0,560 = 1 : 1,142. In Versuch 2a (Verdoppelung des Widerstandes) war das Verhältniss 0,490 : 0,630 = 1 : 1,230, ebenfalls eine genügende Uebereinstimmung.

Versuch 2 b.

Nach Beendigung der Versuche 2 und 2 a geben 7 Volts 0,7 Milliampère. Der Widerstand beträgt also circa 10000 Ohms. Ich bringe ihn auf circa 20000 Ohms. Die erste KSZ tritt ein bei:

Spannung.	Capacität.	Quantität.
70 Volts	0,026 Microfarad	1,820 Microcoulomb
63 „	0,032 „	2,016 „
56 „	0,058 „	3,248 „
49 „	0,106 „	5,194 „
42 „	0,715 „	30,030 „
39,2 „	1,000 „	39,200 „

In Versuch 2a, bei Verminderung der Voltspannung auf die Hälfte ihres Werthes, sind die erforderlichen Quantitäten 0,630 : 1,400 = 1 : 2,222.

Im Versuch 2 b, bei Verdoppelung des Widerstandes, ist das Verhältniss 0,630 : 1,820 = 1 : 2,888.

Versuch 3.

Anode 100^{c^2} auf Nacken. Kathode 3^{c^2} auf den linken Medianus am Handgelenk. Versuchsperson 23 j. Mann. Grosser Leitungswiderstand. 7 Volts ergaben am Galvanometer nur 0,25 Milliampère.

R somit circa 28000 Ohms. Erste KSZ, galvanisch bei 11 Elementen resp. 15,4 Volts. Bei dieser Elementenzahl ist der anfängliche Widerstand schon gesunken, die Stromstärke ist 1,3 Milliampère, R = 11846.

Bei diesem grossem Widerstand tritt die minimale KSZ ein bei:

Spannung.	Capacität.	Quantität.
70 Volts	0,012 Microfarad	0,840 Microcoulomb
63 „	0,014 „	0,882 „
56 „	0,017 „	0,952 „
49 „	0,022 „	1,178 „
42 „	0,026 „	1,092 „
35 „	0,032 „	1,120 „
28 „	0,087 „	2,436 „
21 „	0,180 „	3,780 „
18,2 „	0,990 „	18,180 „

Nach dem Versuch geben 7 Volts 0,4 Milliampère, R = 17500.

Die Beobachtung war in diesem Versuch etwas schwierig, die Muskelcontraction war nicht so deutlich, nicht so leicht auf das Minimum zu reduciren. Daher zeigen die Zahlen Unregelmässigkeiten. Doch tritt auch hier die Thatsache heran, dass bei sinkender Spannung die Quantität erheblich zunehmen muss. Zugleich erhellt aus diesem Versuch recht deutlich die Schwierigkeit, über den Widerstand sichere Angaben zu machen. Derselbe lässt sich am besten galvanisch bestimmen. Galvanische Ströme vermindern aber, wie erwähnt, den Leitungswiderstand. So war bei 5 Elementen der Widerstand circa 28000, während er bei 11 Elem. nur noch 11846 betrug! Condensatorenentladungen wirken auch im gleichen Sinne, aber in viel geringerem Grade.

Versuch 4.

Anode 100^{c^2} auf Nacken. Normale Kathode auf meinem linken Medianus am Handgelenk. Galvanometerausschlag bei 7 Volts = 0,6 Milliampère. R = 11666 Ohms. Galvanisch 1te KSZ mit 9 Elem. = 12,6 Volt.

Die Condensatorentladung gibt nun die 1te KSZ bei:

Spannung.	Capacität.	Quantität.
70 Volts	0,007 Microfarad	0,490 Microcoulomb
63 „	0,008 „	0,504 „
56 „	0.009 „	0,504 „
49 „	0,011 „	0,539 „
42 „	0,013 „	0,546 „
35 „	0,017 „	0,595 „
28 „	0,024 „	0,672 „
21 „	0,040 „	0,840 „
14 „	0,180 „	2,520 „
12,6 „	0,480 „	6,048 „

Nach dem Versuch geben 7 Volts 0,7 M. A. R circa 10,000 Ohms.

Versuch 4 a.

Alle Bedingungen gleich, nur R = 20000 Ohms.

Spannung.	Capacität.	Quantität.
70 Volts	0,011 Microfarad	0,770 Microcoulomb
63 „	0,013 „	0,819 „
56 „	0,016 „	0,896 „
49 „	0,021 „	1,029 „
42 „	0,032 „	1,344 „
35 „	0,074 „	2,590 „

Die Quantitäten verhalten sich bei R = 10000 (Versuch 4) und R = 20000 (Versuch 4 a)

bei 70 Volt wie 1 : 1,571
„ 63 „ „ 1 : 1,625
„ 56 „ „ 1 : 1,777
„ 49 „ „ 1 : 1,999
„ 42 „ „ 1 : 2,461
„ 35 „ „ 1 : 4,368

Bei Versuch 4 war das Verhältniss bei Verminderung der Voltspannung auf 35 wie 1 : 1,214.

Bei Verdoppelung des Widerstands wie 1 : 1,571.

Versuch 5.

Doppelte Anode auf Brust und Bauch. 800 $^{c^2}$. Kathode auf Medianus. 5 El. = 1,4 MA., R = 5000 Ohms.

Die Entladung gibt die 1te KSZ bei:

Spannung.	Capacität.	Quantität.
70 Volts	0,007 MF	0,490 MC
63	0,008	0,504
56	0,009	0,504
49	0,011	0,539
42	0,010	0,546
35	0,017	0,595
28	0,025	0,700
21	0,045	0,945
14	0,122	1,708
12,6 (9 El.)	0,990	12,470

Versuch 5 a.

R = 10000 Ohms. Sonst alles gleich geblieben.

Spannung.		Capacität.	Quantität.
70 Volts		0,010 MF	0,700 MC
63		0,013	0,819
56		0,017	0,950
49		0,021	1,029
42		0,030	1,260
35		0,057	1,995
28		0,140	3,920
23,8	(17 El.)	0,990	23,562

Versuch 5 b.

R = 20000 Ohms.

Spannung.		Capacität.	Quantität.
70 Volts		0,022 MF	1,540 MC
63		0,031	1,953
56		0,057	3,192
49		0,101	4,949
42		0,671	28,182
40,6	(29 El.)	0,990	40,194

Verhältniss der erforderlichen Quantitäten bei:

	5000	10000	20000 Ohms
für 70 Volts	1 :	1,428 :	3,142
63	1 :	1,625 :	3,875
56	1 :	1,884 :	6,333
49	1 :	1,909 :	9,181
42	1 :	2,307 :	51,615

Versuch 6.

Anode 100^{c^2} an Nacken. Normale Kathode auf dem motorischen Punkte des Ulnaris oberhalb des Ellenbogens. 1te KSZ galvanisch bei 7 Volts und 1,6 MA. R = 4370. Ich bringe ihn durch Rheostat auf 5000, so dass nun 6 El. resp. 8,4 Volts die Zuckung geben. Die Condensatorentladung gibt die minimale KSZ bei:

Spannung.	Capacität.	Quantität.
70 Volts	0,008 MF	0,560 MC
63	0,009	0,567
56	> 0,010 <0,011	> 0,560 <0,616
49	0,012	0,588
42	0,015	0,630
35	0,019	0,665
28	0,026	0,728
21	0,042	0,882
14	0,113	1,582
9,8	0,990	9,702

Nach dem Versuch ist R = 3888 Ohms.

Ich bringe ihn auf 7776 Ohms. Nun wirkt der Condensator bei:

Spannung.	Capacität.	Quantität.
70 Volts	0,011 MF	0,770 MC
63	0,013	0,819
56	0,016	0,896
49	0,020	0,980
42	0,025	1,050
35	0,038	1,330
28	0,074	1,924
21	0,174	3,696
16,8	0,990	16,632

Ich bringe den Widerstand auf circa 15552 Ohms.

Spannung.	Capacität.	Quantität.
70 Volts	0,021 MF	1,470 MC
63	0,026	1,638
56	0,036	2,016
49	0,056	2,744
42	0,095	3;990
35	0,255	8,925
30,8	0,990	30,492

Bei diesem Versuch, wo anfangs der Widerstand nur 5000 Ohms beträgt, erweist sich die Graduation des Condensators in Tausendstel als ungenügend. Wenn bei der Spannung 56 Volts die Capacität 0,010 beträgt, so tritt die Zuckung wohl hie und da ein, aber selten, nicht bei jeder Schliessung. *Da wir nur die bei jedem Schluss auftretende Zuckung als die minimale anerkennen,* so ist die Capacität 0,010 MF zu klein. Bei der Capacität 0,011 ist aber die Zuckung sofort stark. Ein in $^1/_{10000}$ eines Microfarad getheilter Condensator wäre zur genauen Graduation erforderlich.

Versuch 7.

Anode 100^{c^2} auf Nacken. Kathode am Ulnaris oberhalb des Ellenbogens. Nerv wird sehr gut getroffen, so dass die erste KSZ galvanisch mit 6 Elem. resp. 8,4 Volts und 0,65 MA eintritt. Doch ist der Widerstand erheblich. 7 Volts geben 0,5 MA. R = 14000 Ohms.

Die Zuckung tritt ein bei:

Spannung.	Capacität.	Quantität.
70 Volts	0,006 MF	0,420 MC
63	0,007	0,431
56	0,008	0,448
49	0,009	0,441
42	0,010	0,420
35	0,013	0,455
28	0,019	0,532
21	0,035	0,735
14	0,081	1,134
9,8	0,990	9,702

In diesem Versuch ist die regelmässige Zunahme der Quantität nicht deutlich; die Berechnung ergibt sogar Verminderung der Quantität bei Sinken der Voltspannung von 56 auf 49 und 42. Sicherlich sind diese Unregelmässigkeiten nur die Folge der ungenügenden Theilung des Condensators. Die Thatsache fiel der Versuchsperson (cand. med.) sofort auf. Bei allen Capacitäten von 0,006 bis 0,010 war dieser Mangel fühlbar. Bei 0,006 und 70 Volts war die Contraction ziemlich stark, bei 0,005 blieb sie aus; hätte man bis auf $^1/_{10000}$ graduiren können, so wäre die wirksame Capacität zwischen 0,005 und 0,006 gewesen u. s. w.

Die Theilung in $^1/_{1000}$ Microfarad zeigt sich namentlich da ungenügend, wo der Nerv sehr gut getroffen wird, wo geringe Stromstärke, resp. geringe Quantität zur Erregung genügt. Nach dem Versuch geben 7 Volts 0,7 Milliampère. Der Widerstand beträgt nun 10000. Ich bringe ihn auf 20000.

Die Zuckung tritt nun ein bei:

Spannung.	Capacität.	Quantität.
70 Volts	0,011 MF	0,770 MC
63	0,013	0,819
56	0,018	1,008
49	0,022	1,078
42	0,025	1,050
35	0,037	1,195
28	0,085	2,380
21	0,350	7,350
18,2 (13 Elem.)	0,990	18,018

Die Nothwendigkeit einer noch feineren Eintheilung des Condensators ergibt sich auch im Versuch 8, wo der Nerv ebenfalls sehr gut getroffen wurde und auf sehr kleine Quantitäten reagirte. Desshalb gibt auch die Berechnung der Quantitäten für 56—28 Volts annähernd gleiche Zahlen. In folgendem Versuch 8 ist auch im Vergleich die Wirkung der Anode geprüft. Es zeigt sich, *dass die Anodenschliessungszuckung erst bei grösseren Quantitäten eintritt als die Kathodenschliessungszuckung.*

Versuch 8.

Anode 100$^{c^2}$ am Nacken. Kathode am Ulnaris am Ellenbogen. Die erste KSZ, resp. ASZ tritt ein bei

	KSZ	ASZ	KSZ	ASZ
70 Volts	0,004 MF	—	0,280 MC	—
63	0,005	—	0,315	—
56	0,006	0,008	0,336	0,448
49	0,007	0,009	0,343	0,441
42	0,008	0,010	0,336	0,420
35	0,010	0,012	0,350	0,420
28	0,012	0,016	0,336	0,448
21	0,019	0,028	0,399	0,588
14	0,039	0,084	0,546	1,176
8,4	0,990		8,316	

Wie leicht ersichtlich, wirkt die Anode schwächer. Bei gleicher Voltspannung muss für die Anode die Capacität, resp. Quantität grösser sein. Die Verhältnisse sind

für 56 Volts 0,336 : 0,448 = 1 : 1,333
„ 49 „ 0,343 : 0,441 = 1 : 1,285
„ 42 „ 0,336 : 0,420 = 1 : 1,250
„ 35 „ 0,350 : 0,420 = 1 : 1,200
„ 28 „ 0,336 : 0,448 = 1 : 1,333
„ 21 „ 0,399 : 0,588 = 1 : 1,476
„ 14 „ 0,546 : 1,176 = 1 : 2,153

Versuch 9.

Anode 100$^{c^2}$ auf Nacken. Kathode auf motorischen Punkt des Facialis. 7 Volts = 1,6 MA. R = 4666 Ohms. Die erste KSZ tritt ein bei:

Spannung.	Capacität.	Quantität.
70 Volts	0,013 MF	0,910 MC
63	0,014	0,882
56	0,016	0,896
49	0,018	0,882
42	0,022	0,924
35	0,028	0,980
28	0,045	1,260
21	0,085	1,785
14	0,500	7,000

Der Versuch 9 ist als ein nicht ganz gelungener zu bezeichnen. Es ist am Facialis der Versuchsperson schwer die minimale Zuckung zu beobachten, sichere Zahlen zu bekommen.

Versuch 10.

Hysterie ohne Veränderungen der electrischen Erregbarkeit. Anode 100^{c^2} zwischen den Schulterblättern. Stintzing's normale Kathode an N. peroneus links.

Die Condensatorentladung wirkt bei:

Spannung.	Capacität.	Quantität.
70 Volts	0,010 MF	0,700 MC
63	0,011	0,693
56	0,013	0,728
49	0,015	0,735
42	0,017	0,714
35	0,023	0,805
28	0,032	0,896
21	0,059	1,239
14	0,240	3,360

Versuch 11.

Doppelte Anode auf Brust und Bauch. 800^{c^2}. Kathode auf Medianus. 7 Volts = 0,5 MA. R = 14,000 Ohms. 1te KSZ resp. ASZ bei

	KSZ	ASZ	KSZ	ASZ
56 Volts	0,009 MF	0,014 MF	0,504 MC	0,784 MC
49	0,010	0,015	0,490	0,735
42	0,012	0,019	0,504	0,798
35	0,014	0,025	0,490	0,875
28	0,019	0,050	0,532	1,400
21	0,050	0,085	1,050	1,785
14	0,095	0,440	1,330	6,160

Mit 5 El. = 7 Volts tritt keine Zuckung ein, weder mit 7 Microfarads, noch galvanisch. Die erste KSZ tritt galvanisch auf bei 7 El. = 9,8 Volts. Die Anode wirkt deutlich schwächer. Bei Capacität = 0,050 muss die Spannung 28 Volts für die Anode betragen, während die Kathode schon bei 21 Volts die Zuckung gibt. Die Quantitäten müssen für die Anode grösser sein. Die Verhältnisse sind

für	56	Volts	0,504 :	0,784	=	1 :	1,484
„	49	„	0,490 :	0,735	=	1 :	1,500
„	42	„	0,504 :	0,798	=	1 :	1,583
„	35	„	0,490 :	0,875	=	1 :	1,785
„	28	„	0,532 :	1,400	=	1 :	2,631
„	21	„	1,050 :	1,785	=	1 :	1,700
„	14	„	1,330 :	6,160	=	1 :	4,631

Ich verzichte darauf, alle zahlreichen, in dieser Weise angestellten Versuche zu beschreiben. Sie geben alle, abgesehen von einigen Versuchsfehlern, ganz analoge Resultate. Es lassen sich aus diesen Versuchen folgende Schlüsse ziehen.

1. Der Nerv, resp. Muskel des Menschen, reagirt auf sehr geringe Quantitäten, die bei Voltspannungen von 35 bis 70 kaum einen $^1/_2$ Microcoulomb übersteigen.

2. Die gleiche minimale Zuckung kann auch mit geringer Voltspannung erreicht werden, wenn die Capacität resp. Quantität eine grössere wird. Soll das Sinken der Spannung compensirt werden und die gleiche minimale Zuckung erzielt werden, so muss der Condensator mit grösseren Quantitäten geladen werden. Diese Zunahme der Quantität ist in allen Versuchen unverkennbar, sie ist aber für höhere Voltspannung gering, so dass in Folge kleiner Versuchsfehler, bei ungenügend feiner Theilung des Condensators, annähernd gleiche Zahlen herauskommen. Doch sind diese Unregelmässigkeiten nicht gross und namentlich bei niederer Voltspannung tritt die Nothwendigkeit deutlich hervor, *die Quantität erheblich zu vermehren, wenn die minimale Zuckung erreicht werden soll.* Darüber lassen die Versuche keinen Zweifel. —

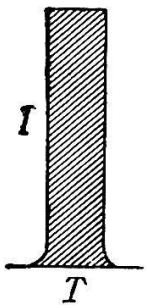
Deutlich ist auch das Vorwiegen der Kathode. Die Anode wirkt gewöhnlich erst bei einer höheren Quantität, die sich zur Quantität für die Kathode, ungefähr wie 1,5 zu 1 verhält. Wenn wir das Resultat in der Weise ausdrücken, dass Sinken der Voltspannung durch Steigen der Quantität compensirt ist, so berücksichtigen wir dabei den

Widerstand nicht. Die Versuche zeigen aber, was auch a priori sicher war, dass Einschaltung von Widerständen in gleicher Weise wirkt wie Sinken der Voltspannung. Bei doppeltem Widerstand muss auch die Quantität steigen, soll die Wirkung constant bleiben.

Ich suchte nun die Thatsache allgemeiner auszudrücken und sagte: Wenn die Intensität der Entladung sinkt, so kann dieses Sinken durch längere Dauer der Entladung compensirt werden und die Wirkung bleibt die gleiche. Ich benutze bei dieser Erklärung die Formel der dynamischen Quantität $Q = IT$. Physikalisch ist dies nicht statthaft, weil eine Condensatorentladung eine ganz andere Curve hat wie ein kurzdauernder constanter Strom.

Ein galvanischer Strom von der Spannung E. auf einen Widerstand R geschlossen, erreicht nach der kurzen Zeit des variablen Zustandes die $I = \frac{E}{R}$ und bleibt auf dieser Intensität während der ganzen Schliessungszeit. Wird der Strom im metallischen Theil der Kette unterbrochen, so fällt die Intensität plötzlich auf 0.

Fig. 7.



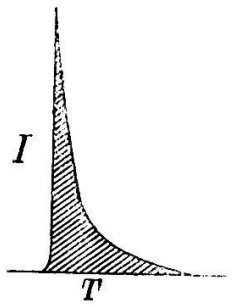
Die Curve eines solchen kurz dauernden galvanischen Stromes ist, wie Fig. 7 zeigt, bei welcher die Ordinate die Intensität I, die Abscisse die Zeit T, repräsentirt. — Die Quantität ist genau das Product aus $I \times T$.

Nur auf diesen Fall eines wirklich constanten Stromes, nach Ablauf der Periode des variablen Zustandes, passt die Formel der dynamischen Quantität $Q = IT$.

Ganz anders gestaltet sich aber die Curve einer Condensatorentladung. Wir haben es hier mit einer abgemessenen Electricitätsmenge zu thun, welche, bei der Entladung sich selbst überlassen ist, sich unter ihrem eigenen Druck entlädt. Hier ist nicht, wie beim galvanischen Strom, dafür gesorgt, dass die Spannung erhalten bleibt, dass die abgelaufene Menge sofort ersetzt werde. Der Condensator ist vergleichbar mit einem Wassergefäss, welches eine bestimmte Menge Flüssigkeit enthält. Vergegenwärtigen wir uns, was bei einer solchen Vorrichtung geschieht, wenn durch Oeffnen des Hahnes A, Fig. 5, der Flüssigkeit freien Lauf gelassen wird. Im ersten Augenblick fliesst das Wasser unter dem hohen Druck der *ganzen* Wassersäule sehr rasch ab. Sobald ein Theil davon abgelaufen ist, so ist der Druck geringer. Die Geschwindigkeit des Stromes nimmt ab, es fliesst in der Zeiteinheit weniger ab. Je mehr Wasser abfliesst, desto geringer ist der Druck; der Strom wird von Moment zu Moment langsamer, seine Intensität nimmt ab.

Vollkommen gleich sind die Verhältnisse bei der Entladung eines Condensators. Er enthält eine bestimmte Menge Electricität Q, von bestimmter Spannung E. Bei der Entladung wird folglich die Intensität die der $\frac{\text{Voltspannung}}{\text{Widerstand}}$ entsprechende Höhe erreichen, wie bei einem galvanischen Strom der gleichen Spannung. Unter diesem Druck fliesst eine gewisse Menge Electricität ab. Die Spannung ist nun eine geringere, und während in der ersten Zeiteinheit z. B. die Hälfte der Ladung abfloss, fliesst jetzt nur circa $^1/_3$ heraus, später $^1/_4$ etc. Die Curve einer Condensatorentladung ist eine Differenzialcurve. *Der Gipfel derselben ist auf gleicher Höhe, wie beim galvanischen Strome derselben Spannung auf den gleichen Widerstand fliessend.* Während aber beim letztern die Intensität constant bleibt, sinkt sie bei der Condensatorenladung mit jedem Augenblick und zwar immer langsamer. Die Curve fällt asymptotisch zur Abscisse wie Fig. 8 zeigt.

Fig. 8.



Für diese Curve passt die Formel der dynamischen Quantität $Q = IT$ nicht. Die Quantität einer Entladung ist $Q = \int I\,d\,T$. Von *Intensität* im eigentlichen Sinne wird bei Entladungen nicht gesprochen, weil dieselbe mit jedem Augenblicke abnimmt. Doch können wir von einer *initialen Intensität* reden, welche nach der Ohm'schen Formel $I = \frac{E}{R}$ berechnet werden kann.

Aus diesem Werth $Q = \int I\,d\,T$ lässt sich nun T nicht in einfacher Weise wie aus $Q = IT$ berechnen, und doch war mir sehr viel daran gelegen, nicht nur die Quantität in Microcoulombs zu kennen, sondern auch zu einer annähernden Bestimmung der *Dauer der Entladung* in Bruchtheilen der Secunde zu kommen.

Eine Methode, die Dauer der Entladung T zu berechnen, fand ich, nach längerem Suchen, in dem ausgezeichneten Werke von Kempe (französische Uebersetzung: Traité élémentaire des mesures électriques. Paris 1885.) Es ist die Siemens'sche Methode für die Bestimmung der electrostatischen Capacität von Condensatoren und Kabeln. Wir übersetzen aus dem Werke von Kempe: „Das Prinzip dieser Methode ist, die Geschwindigkeit zu bestimmen, mit welcher ein Condensator von unbekannter Capacität sich durch einen bekannten Widerstand entlädt; die Capacität lässt sich dann durch die weiter zu entwickelnde Formel bestimmen.

Ausgedrückt wird bei diesem Problem:

die Capacität in Farads, resp. Microfarads,
der Widerstand in Ohms,
die Quantität in Coulombs, resp. Microcoulombs,
die Zeit in Secunden,
das Potential in Volts.

Setzen wir voraus, der Condensator habe eine Capacität von F Farads und sei geladen auf das Potential V Volts; er enthält $Q = VF$ Einheiten der Elektricitätsmenge, d. h. Q Coulombs. Nehmen wir an, dass er sich, während 1 Secunde, auf einen Widerstand von R Ohms entlade.

Die im Anfang im Condensator enthaltene Electricitätsmenge ist Q Einheiten.

Denken wir uns eine sehr kurze Zeit t; wir können annehmen, dass während dieser kurzen Zeit der Strom ein constanter sei. Dies ist nicht mathematisch richtig, denn die Intensität sinkt beständig, je kleiner aber der Werth t ist, desto richtiger sind die Resultate.

Man weiss, dass die Menge Electricität, welche aus dem Condensator abfliesst, dem treibenden Potential und der Dauer der Strömung direct proportional ist; sie ist auch dem Widerstand umgekehrt proportional. Diese Quantität kann also ausgedrückt werden durch

$$q = K \frac{Vt}{R},$$

wo K eine zu bestimmende Constante ist.

Nun sind die elektrischen Einheiten so gewählt, dass ein Condensator von der Capacität 1 Farad, geladen auf das Potential 1 Volt, d. h. mit einer Quantität von 1 Coulomb sich in 1 Secunde durch einen Widerstand von 1 Ohm entlädt.

Wenn wir in die Formel setzen: $q = 1$, $V = 1$, $t = 1$ und $R = 1$, so erhält man für die Constante den Werth $K = 1$.

Die in der kleinen Zeit t ausgeflossene Elektricitätsmenge ist also dargestellt durch:

$$\frac{Vt}{R}.$$

Die Quantität, welche nach der Zeit t noch im Condensator zurückbleibt, wird sein:

$$Q - \frac{Vt}{R} = Q - \frac{VFt}{FR} = Q\left(1 - \frac{t}{FR}\right).$$

Um also die Menge zu bestimmen, welche nach dem Zeittheil t im Condensator bleibt, müssen wir die Anfangsquantität durch den Factor $1 - \frac{t}{FR}$ multipliciren.

Die Regel ist eine allgemeine. Am Ende des zweiten Zeittheiles t ist die im Condensator bleibende Quantität:

$$\left[Q\left(1 - \frac{t}{FR}\right)\right]\left(1 - \frac{t}{FR}\right) = Q\left(1 - \frac{t}{FR}\right)^2.$$

Am Ende des n^{ten} Zeitintervalles ist die noch bleibende Quantität:

$$q = Q\left(1 - \frac{t}{FR}\right)^n.$$

Wir setzen voraus, dass die Summe dieser n Zeitintervalle sei $= T$, somit $nt = T$.

Man kann nun schreiben:

$$(1) \qquad q = Q\left(1 - \frac{T}{nFR}\right)^n.$$

Wir haben aber gesehen, dass, je kleiner die Zeit t ist, desto exacter unsere Resultate sind. Wenn wir also t unendlich klein setzen, indem wir n unendlich gross nehmen, so dass das Produkt nt constant und $= T$ bleibe, so ist der Werth der im Condensator nach der Zeit T bleibenden Menge gegeben durch die Formel (1), wo $n = \infty$.

Um q zu berechnen, setzen wir:

$$\frac{T}{nFR} = -\frac{1}{x},$$

Das ergibt $x = \infty$ für $n = \infty$.

Man zieht daraus $n = -\frac{Tx}{FR}$, und indem wir in (1) substituiren, so bekommt man:

$$q = Q\left[\left(1 + \frac{1}{x}\right)^x\right]^{-\frac{T}{FR}},$$

wo $x = \infty$.

Was aber in Klammern steht, hat als Grenzwerth die Basis e der natürlichen Logarithmen. Wir erhalten somit:

$$\frac{q}{Q} = e^{-\frac{T}{FR}}.$$

Man zieht daraus durch Einsetzen der natürlichen Logarithmen der zwei Glieder:

$$\frac{T}{FR} = \log_e \frac{Q}{q}, \text{ woraus } F = \frac{T}{R \log_e \frac{Q}{q}}$$

Wenn wir aber mit v das der Quantität q entsprechende Potential bezeichnen, so haben wir:

$$\frac{Q}{q} = \frac{VF}{vF} = \frac{V}{v}$$

Die Formel ist nun:

$$(2) \qquad F = \frac{T}{R \log_e \frac{V}{v}} = \frac{T}{2{,}303\ R \log \frac{V}{v}},$$

in welcher 2,303 das constante Verhältniss der natürlichen zu den gemeinen Logarithmen darstellt. Die Formel (2) kann natürlich verschiedene Formen annehmen, je nach der zu bestimmenden Unbekannten.“ —

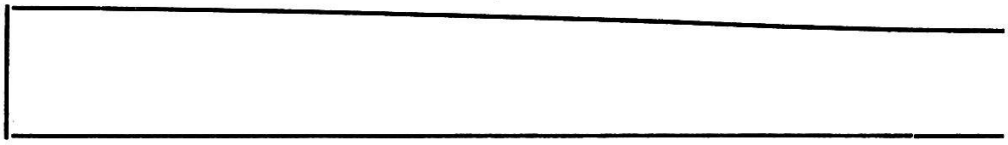
In unserm speziellen Falle ist T unbekannt. Unsere Formel ist also:

$$T = 2{,}303 \times F \times R \log \frac{V}{v}.$$

Einer allfälligen Einwendung möchte ich hier begegnen.

Der Techniker, der die Kempe'sche Formel, zur Bestimmung der Capacität eines Condensators oder Kabels anwendet, entlädt denselben auf ganz enorme Widerstände, z. B. auf 500 Megohms = 500 Millionen Ohms. In Folge dessen ist die Dauer der Entladung eine ganz enorme, sie dauert Minuten. Die Curve ist eine langgestreckte, wie Fig. 9 zeigt.

Fig. 9.



Man könnte sich nun fragen: Hat die Formel, die für diese langgezogene Curve passt, noch ihre Berechtigung bei der viel steileren Curve der Fig. 8. Es wäre dies unbedingt nicht der Fall, wenn wir die Zeit der Entladung nur in sehr viele, sehr kleine Zeitintervalle getheilt hätten, z. B. in 1000000 Zeittheilchen. Möglicherweise erhielten wir noch bei diesem Verfahren approximative Werthe für die

langgezogene Curve, die einem constanten Strom ähnlich ist. Dagegen wäre das Resultat für die steile Curve absolut unrichtig. Wir haben aber die Zeit der Entladung in unendlich kleine Zeitintervalle getheilt. Der Begriff ∞ ist in der Formel aufgenommen. Somit gilt die Formel sowohl für die steile Curve wie für die langgezogene.

Wir können somit die Dauer einer Condensatorentladung berechnen durch die Formel:

$$T = 2{,}303 \times F \times R \log \frac{V}{v}.$$

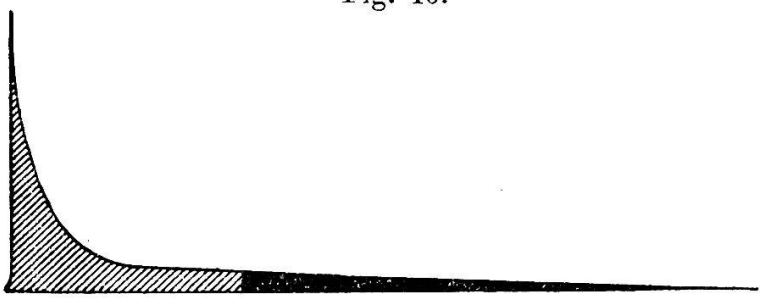
Da die Capacität in Microfarads, resp. $^1/_{1000}$ Microfarad, der Widerstand in Ohms ausgedrückt ist, so ergibt sich die Dauer in Millionteln einer Secunde. Wenn wir nun mittelst dieser Formel die ganze Dauer T der Entladung bestimmen wollen, d. h. die Zeit, die vergeht, bis das Potential auf 0 gesunken ist, so erhalten wir, wenn wir $v = 0$ setzen, den Quotienten $\frac{V}{0} = \infty$. Folglich ist $T = 2{,}303 \times F \times Q \log \infty = \infty$.

T ist unendlich; die Dauer der Entladung ist unendlich; ein Condensator kann sich nicht vollständig entladen. Dieses, durch die Formel gegebene Resultat ist auch a priori zu erwarten. Wir haben ja schon gesagt, dass die Curve einer Condensatorentladung asymptotisch zur Abscisse fällt. Ein Condensator, der einmal geladen wurde, kann sich nie ganz entladen, ebenso wenig wie ein Wassergefäss sich unter dem Drucke der Wassersäule ganz entleeren kann.

Anfangs fliesst unter hohem Druck eine grosse Menge ab, z. B. die $^1/_2$, später $^1/_3$, $^1/_4$, $^1/_5$ etc. Es ist ein Theilungsprocess, welcher bis in's Unendliche geführt werden kann.

Die Berechnung der Gesammtdauer einer Condensatorentladung ergibt mathematisch, dass diese Dauer in allen Fällen, bei grosser oder kleiner Capacität, enorm grossem oder verschwindend kleinem Widerstand unendlich ist. —

Fig. 10.



Und doch sagt der Physiker, der einen Condensator mit einem Galvanometer in Verbindung bringt und keinen Anschlag wahrnimmt, dass der Condensator entladen sei.

Die in demselben noch zurückgebliebene Electricitätsmenge ist so klein, hat so geringes Potential, dass sie keine Wirkung mehr ausübt.

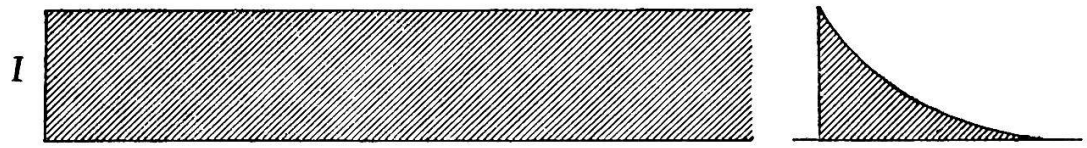
Ohne es wörtlich auszudrücken, betrachtet also der Fachmann einen Theil der Curve, den Schwanz, möchte ich sagen, als unwirksam. In der Fig. 10 ist dieser unwirksame Theil schwarz aufgetragen.

Wenn der Physiker stillschweigend die Curve der Entladung, factisch in 2 Abschnitte, einen *wirksamen,* der im Stande ist, die Galvanometernadel abzulenken, und einen *unwirksamen* theilt, so sind wir wohl berechtigt, in gleicher Weise zu verfahren. Da aber der menschliche Nerv, trotz seiner grossen Reizbarkeit, immerhin viel träger ist als ein Thomson'sches Galvanometer, so wird der *unwirksame Theil* unserer Curve weit grösser ausfallen. Zeigen wir dies an einem practischen Beispiel, nach Versuch 2.

Bei einem Totalwiderstand von circa 5000 Ohms gelang es mir an jenem Tage, durch Reizung meines Nervus medianus am Handgelenk die erste deutliche Kathodenschliessungszuckung zu erreichen mit einer Stromstärke von 1,4 Milliampères und 5 Leclanchés, d. h. circa 7 Volts. Jede Verminderung der Elementenzahl, jede Vermehrung des Widerstandes brachte die Zuckung zum Verschwinden.

Sicher ist, dass an jenem Tage, unter den erwähnten Bedingungen der Nerv auf den Strom von 4 Leclanchés, d. h. $\frac{5{,}6 \text{ Volts}}{5000 \text{ Ohms}} = 1{,}1$ MA in keiner Weise reagirte.

Fig. 11. Fig. 12.



Zeichnen wir die Curve dieses constanten Stromes von $\frac{5{,}6 \text{ Volts}}{5000 \text{ Ohms}}$, indem wir die Voltspannung resp. Intensität als Ordinate, die Zeit als Abscisse auftragen. Fig. 11.

Dieser Strom, dessen Quantität ich beliebig durch längere Schliessungsdauer vergrössern kann, wirkt trotzdem nicht, weil er nicht die *nöthige Geschwindigkeit*, die *erforderliche Intensität* hat. *In diesem Falle fliesst also eine relativ grosse Menge Electricität unter dem ansehnlichen Druck von circa 6 Volts ab, ohne irgend eine Wirkung auf den Nerv auszuüben. Diese Quantität geht physiologisch verloren.*

Wenn, wie nachgewiesen, 6 Volts bei galvanischem Verlauf des Stromes, d. h. mit sozusagen unbegrenzter Quantität, nicht wirken, so wird auch die Condensatorentladung bei 6 Volts und rasch sinkender Intensität auch nichts bewirken. Fig. 12.

Wir sind berechtigt, die Entladung eines beliebigen Condensators als unwirksam zu betrachten, vom Momente an, wo die Spannung nur 6 Volts beträgt. Unter diesem Potential entlädt sich die noch zurückgebliebene Electricitätsmenge mit zu geringer Intensität, sie übt auf den Nerv keine Reizwirkung mehr.

In der folgenden, nach Formel $T = 2{,}303 \times F \times R \log \frac{V}{v}$ berechneten Entladungsdauer nehme ich als untere Grenze des wirksamen Potentials 5 Volts: $v = 5$ Volts. Die *Dauer der Entladung* ist die Zeit, welche vergeht bis das Potential von der Anfangshöhe auf das unwirksame Potential 5 Volts gesunken ist. Wählen wir zu dieser Berechnung den Versuch 2 bei einem Widerstand von 5000 Ohms. Die Entladung des Condensators von der Capacität 0,007 Microfarad, geladen auf 70 Volts gab die minimale Zuckung. Setzen wir diese bekannten Grössen in der Formel ein, so haben wir:

$$T = 2{,}303 \times 0{,}007 \times 5000 \log \frac{70}{5}.$$

Die Berechnung ergibt für die Entladung eine Dauer von 92 Milliontel einer Secunde.

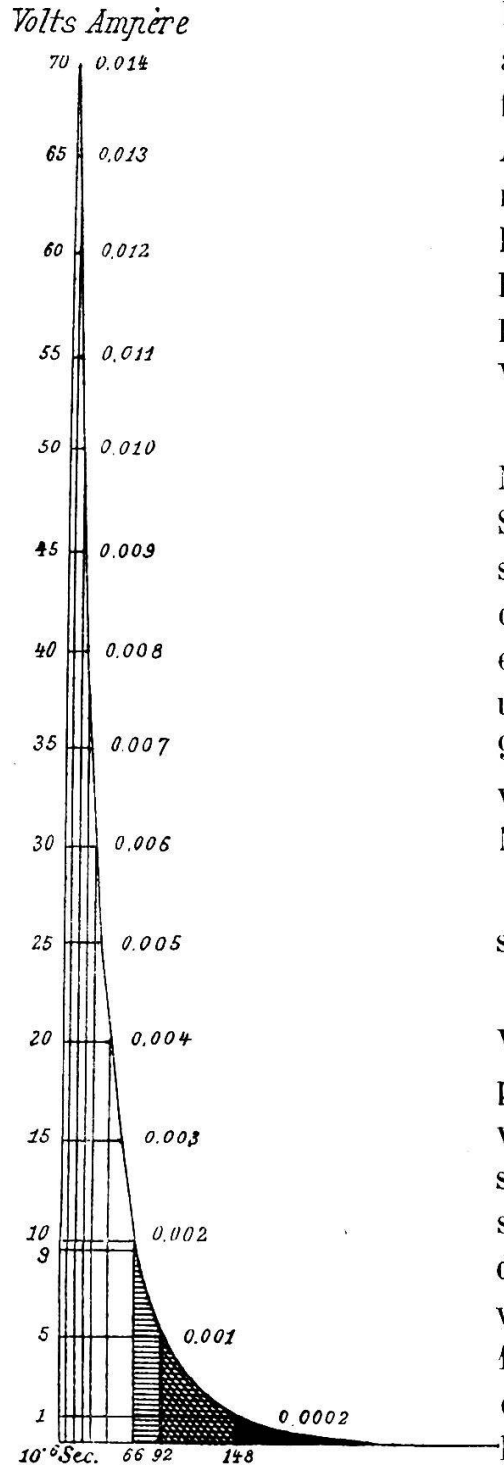
Wir können auch nach dieser Formel die ganze Curve genau construiren, indem wir berechnen, welche Zeit vergeht, bis das Potential successive 65, 60, 55 etc. Volts beträgt.

Wir finden nun, dass das Potential von

						10^{-6} Secunden.
70	auf	65	Volts	fällt	in	2,594
65	„	60	„	„	„	2,801
60	„	55	„	„	„	3,045
55	„	50	„	„	„	3,336
50	„	45	„	„	„	3,688
45	„	40	„	„	„	4,123
40	„	35	„	„	„	4,674
35	„	30	„	„	„	5,396
30	„	25	„	„	„	6,382
25	„	20	„	„	„	7,811
20	„	15	„	„	„	10,070
15	„	10	„	„	„	14,193
10	„	5	„	„	„	24,102
						92,215

Wir können also sagen, dass, bei einem R von 5000 Ohms und Capacität von 0,007 Microfarad eines auf 70 Volts geladenen Condensators, das Potential in der kurzen Zeit von 92 Milliontel Secunden auf das *unwirksame Potential* 5 Volts fällt. — Wenn wir die Dauer als Abscisse, die Potentiale resp. bei Berücksichtigung des Widerstandes die Intensitäten als Ordinate auftragen, so bekommen wir folgende Curve der Entladung Fig. 13. — Die Curve ist in Wirklichkeit noch viel steiler.

Fig. 13.



In der Abscisse entspricht die Milliontel Secunde dem $^1/_{10}$ Millimeter. Sollte die Intensität in gleichem Massstabe aufgetragen werden, so würde die Curve eine Höhe von 1 m. 40 erreichen. Nehmen wir 5 Volts als unwirksames Potential, so ist die Dauer 92 Milliontel Secunde. Setzen wir v = 10 Volts, so ist die Dauer 66 Milliontel.

Berechnen wir bis auf 1 Volt, so ist die Dauer 148 Milliontel Secunde.

Für jeden Versuch muss der Werth des unwirksamen Potentials experimentell bestimmt werden. Es kann vorkommen, dass bei einem Versuch, sei es in Folge grösseren Widerstandes, sei es wegen Mangel an Dichtigkeit, die Zuckung noch nicht auftritt bei viel höherer Voltspannung, z. B. bei 14 . 21 Volts. In diesem Falle muss die Dauer nur bis auf *dieses* Potential berechnet werden.

Berechnen wir die Dauer für jede Voltspannung des Versuchs 2, so bekommen wir folgende Tabelle:

Elem.	Volts.	Microfarads.	Microcoulombs.	Dauer der Entladung.
50	70	0,007	0,490	92 10^{-6} Secunden
45	63	0,008	0,504	101 „
40	56	0,009	0,504	109 „
35	49	0,011	0,539	125 „
30	42	0,013	0,546	138 „
25	35	0,016	0,560	156 „
20	28	0,021	0,588	180 „
15	21	0,031	0,651	222 „
10	14	0,077	1,078	396 „
7	9,8	1,000	9,800	3360 „

Beim ersten Blick scheinen diese Zahlen befriedigend. Bei sinkender *Voltspannung* muss die *Quantität* zunehmen, d. h. bei sinkender *initialer Intensität* muss die *Dauer* der wirksamen Entladung grösser werden.

Doch mit einem Punkte konnte ich mich nicht zufrieden geben. Ich habe schon mehrmals betont, dass bei den verschiedenen Voltspannungen die *minimale Zuckung immer dieselbe war*. Sie war *constant*. Ich erreichte dieses Resultat einfach durch grössere Capacitäten. Wo aber die Wirkung *constant* ist, muss auch in den physikalischen Eigenschaften des Stromes, der Entladung *etwas constant sein*. Ich suchte zunächst diese *Constante* in der Quantität, aber wir haben in allen Versuchen gesehen, dass dieselbe *nicht constant* bleibt, sondern *steigen* muss, wenn die Spannung abnimmt. —

Was ist aber die Quantität Q, die wir durch $C \times V$ bestimmen und in der Tabelle in Microcoulombs ausdrücken? Es ist die *Ladungsquantität*, es ist die Electricitätsmenge, die wir in dem Condensator aufgespeichert haben.

Wird aber diese ganze Quantität zur Hervorrufung der Zuckung verwendet? Offenbar nicht, denn wir wissen, dass auch der galvanische Strom, mit so zu sagen unbegrenzter Quantität nicht wirkt, wenn seine Intensität eine zu geringe ist. Ebenso muss die Entladung physiologisch unwirksam werden, wenn das Potential ungenügend ist, wenn die Entladung unter zu geringem Druck stattfindet. Wir haben 5 Volts als die unwirksame Spannung angenommen; folglich müssen wir überall die *wirksame Quantität* berechnen, indem wir die *unwirksame* von der *Ladungsquantität* subtrahiren.

Bei 70 Volts und 0,007 Microfarad ist die *Ladungsquantität* 0,490 Microcoulomb. Die *unwirksame Menge, die unter zu geringem Druck wirkungslos abfliesst,* ist 5 Volts × 0,007 Microfarad = 0,035 Microcoulomb. Folglich ist die wirklich benutzte Menge 0,490 — 0,035 = 0,455. —

Die *wirksamen Quantitäten* können wir berechnen, wenn wir von der initialen Voltspannung überall 5 Volts subtrahiren. Wir erhalten dann folgende Zahlen:

70	Volts	und	0,007	Microfarad	wirken	bei	einem	wirksamen	Q = 0,455
63	„	„	0,008	„	„	„	„	„	Q = 0,464
56	„	„	0,009	„	„	„	„	„	Q = 0,459
49	„	„	0,011	„	„	„	„	„	Q = 0,440
42	„	„	0,013	„	„	„	„	„	Q = 0,481
35	„	„	0,016	„	„	„	„	„	Q = 0,480
28	„	„	0,021	„	„	„	„	„	Q = 0,483
21	„	„	0,031	„	„	„	„	„	Q = 0,496
14	„	„	0,077	„	„	„	„	„	Q = 0,693!
9,8	„	„	1,000	„	„	„	„	„	Q = 4,800!

Wenn wir von den 2 untern Zahlen absehen, so ist hier die gesuchte *Constante* nicht zu verkennen. Die Zahlen differiren weniger, als man bei einem am Menschen vorgenommenen Versuch hätte erwarten können.

Wir finden im Mittel der 8 ersten Zahlen einen Werth von 0,4697 Microcoulomb oder rund 0,470.

Es fragt sich nun, warum stimmen die 2 untern Zahlen nicht überein? *Sie sind eben nicht richtig, wie folgende Ueberlegung zeigt.*

Zur Berechnung der Dauer, resp. der wirksamen Quantität, bin ich genöthigt, den gewiss ganz berechtigten Begriff der *unwirksamen Quantität* einzuführen. Wenn ich die Entladung von einem gewissen Potential an als wirkungslos bezeichne, so ist dies keineswegs rein hypothetisch. — Ich habe vorher nachgewiesen, dass der *constante Strom* erst wirksam wird bei einem Potential von 7 Volts, dass 6 Volts ungenügend sind. Ist etwa die Curve des galvanischen Stroms, sein *Verlauf* ungünstiger zur Erzielung einer Contraction, als die der Entladung von gleicher Voltspannung? Im Gegentheil, *bei einer gegebenen Voltspannung kann kein Strom eine grössere Wirkung geben, wie der galvanische.* Vorausgesetzt, dass die Schliessung im metallischen Theil, nicht *einschleichend*, stattfindet, so ist der Anstieg der Intensität ebenso steil wie beim Condensator. — Während aber bei

der Entladung *die initiale Intensität* nicht andauert und nur durch den mathematischen Punkt des Gipfels dargestellt ist, bewährt der galvanische seine volle Intensität während der ganzen Schliessungszeit. Der Vergleich der beiden Curven in Fig. 11 und 12 zeigt dies auf's Deutlichste. Eine Condensatorentladung kann niemals eine *grössere* Wirksamkeit entfalten, als der galvanische Strom derselben Voltspannung. Er kann höchstens, wie wir sehen werden, die *gleiche* haben.

Einem allfälligen Einwande möchten wir hier begegnen. Man könnte sich vorstellen, dass bei der Condensatorentladung auch das Aufhören des Stromes, die plötzliche Dichtigkeitsschwankung wirksam ist. Wir können dies in keiner Weise annehmen. Wir sind der Ansicht, dass Aufhören eines Reizes an sich nicht als Reiz wirken kann. Wir sind geneigt, mit Grützner und Tigersted die Oeffnungszuckung galvanischer Ströme als Polarisationserscheinung aufzufassen. Sehen wir aber von jeder Theorie ab. Jeder Electrotherapeut weiss, dass Oeffnungszuckung nur bei einer verhältnissmässig hohen Stromstärke eintritt, dass dieselbe an der Anode eintritt, dass sie eher eintritt, wenn der Strom vorher längere Zeit geschlossen war. Die Oeffnungszuckung tritt nur ein bei länger dauernden Strömen. Sie fällt bei allen Strömen, die den Verlauf einer Entladung haben, Inductionsströmen, Entladungen von Condensatoren und Electrisirmaschinen, weg*). Uebrigens haben wir bei unsern Versuchen die polare Methode angewendet. Die Anode war als indifferente Electrode auf dem Nacken; hätte allenfalls bei einer Condensatorentladung auch eine sogenannte Oeffnungszuckung stattgefunden, so wäre dieselbe an der *Anode* aufgetreten, nicht aber an der differenten Kathode. Die weitern Versuche zeigen, dass *eine Entladung niemals stärker wirken kann, als der galvanische Strom derselben Spannung.* Ist, wie nachgewiesen, der Strom von 4 Leclanchés galvanisch unwirksam, so ist auch jeder Condensator, geladen mit 4 El., unwirksam. *Der im metallischen Theil der Kette plötzlich geschlossene galvanische Strom hat den denkbar günstigsten Verlauf, um die Zuckung auszulösen.*

Ebenso berechtigt ist es, anzunehmen, dass auch eine höher gespannte Entladung, von z. B. 70 Volts, jede Wirksamkeit verliert,

---

*) Polarisationserscheinungen haben die Physiologen auch bei kurzdauernden aber hochgespannten Strömen beobachtet. Beim Menschen, wo die Nervenreizungen percutan stattfinden, ist dies nicht nachgewiesen. Alle Erfahrungen weisen darauf hin, dass, je kürzer der Strom ist, desto geringer die Polarisation und die allfällig auf Polarisation zurückzuführende Zuckung ausfällt.

wenn das Potential auf ein gewisses Minimum gesunken ist. *Die Schwierigkeit liegt aber in der exacten Bestimmung dieses unwirksamen Potentials.*

Im Versuch 2 habe ich am Anfang des Versuches sicher nachgewiesen, dass beim gegebenen Widerstand, bei der momentanen Lage der Electrode auf den Nerv, der galvanische Strom die erste Zuckung bei 7 Volts gab. Es ist dies ein reines Versuchsresultat, gegen welches nichts einzuwenden ist. Ich begann nun die ganze Versuchsreihe mit dem Condensator in der Annahme, dass der auf 4375 Ohms berechnete Widerstand immer constant bleibe. Ganz richtig ist dies jedenfalls nicht. Galvanische Ströme vermindern den Widerstand ganz erheblich, Entladungen beeinflussen ihn viel weniger. Es ist also ganz gut möglich, dass sich der Widerstand während des immerhin 20 Minuten dauernden Versuchs geändert habe. Namentlich kann ich annehmen, dass bei der Entladung von 9,8 Volts der Widerstand grösser war als für einen Strom von 9,8 Volts; letzterer würde nämlich schon in der Zeit, die nöthig ist, um die Ablenkung abzulesen, den Widerstand vermindert haben. Vielleicht war in diesem Moment das *unwirksame Potential* nicht mehr 7, sondern 9 oder noch mehr. In meiner Berechnung bezeichnete ich willkürlich das Potential 5 Volts als unwirksam. Dadurch habe ich die Fehler enorm vergrössert, und *die Fehler beeinflussen namentlich die letzten Zahlen.* Es ist nothwendig, auf diesen Punkt näher einzugehen. Für die Entladung von 70 Volts und geringer Capacität von 0,007 MF ist es nahezu gleichgültig, ob ich 5, 6, 7 oder 9 Volt als *unwirksames Potential*, als 0 bezeichne. Die wirksame Quantität ist dann 0,455, 0,448, 0,441 und 0,427 Microcoulomb. Für die Entladung von 9,8 Volts ist es aber nicht mehr gleichgültig. Wenn ich 5 Volts als unwirksames Potential annehme, so ist die Quantität $9,8 - 5 = 4,8 \times 1,000 = 4,8$ Microcoulombs.

Bei der Annahme von 6 Volts ist sie $9,8 - 6 = 3,8$
„ „ „ „ 7 „ „ „ $9,8 - 7 = 2,8$
„ „ „ „ 9 „ „ „ $9,8 - 9 = 0,800$

Die Unsicherheit in der Bestimmung des *unwirksamen Potentials* übt auf die Berechnung der wirksamen Quantität der hochgespannten Entladung keinen grossen Einfluss, dagegen gibt sie ganz verschiedene Zahlen. 0,800 und 4.8 bei Berechnung der wenig gespannten Entladungen. Aber auch bei der Annahme, dass 9 Volts nicht mehr wirken, ist die berechnete Quantität 0,800 noch zu gross gegenüber der Constante von

0,470. Wir müssten annehmen, dass etwa 9,3 das unwirksame Potential sei. — Diese Annahme kann vielleicht als eine sehr willkürliche angesehen werden. *Ich habe aber bestimmte Gründe anzunehmen, dass sie nicht weit von der Wahrheit bringt und schliesse dies aus folgenden Versuchen.*

Ich war mir bewusst, dass die unteren Zahlen meiner 11 beschriebenen Versuche keinen Anspruch auf Genauigkeit machen können. Zunächst ist die Bestimmung der erforderlichen Capacität nicht sehr exact. Bei den hohen Spannungen und geringen Capacitäten genügt es, 0,001 Microfarad auszuschalten, um die Zuckung zum Verschwinden zu bringen. Bei niederer Spannung und grossen Capacitäten von nahezu 1,0 MF ist es nicht möglich, die Grenze so genau zu finden. Die Wirkung bleibt oft die gleiche, ob C 0,900, 0,950 oder 1,000 betrage. Zur Bestimmung des unwirksamen Potentials wäre es von Vortheil, wenn ich die electromotorische Kraft um wenig, z. B. um 0,1 Volt reduciren könnte. Mit meiner Batterie von Leclanchés ist der Sprung aber immer 1,4Volts. — 5 El. resp. 7 Volts wirken noch als galvanischer Strom, 4 El. resp. 5,6 Volts wirken nicht mehr. Möglicherweise und, sagen wir auch, wahrscheinlicherweise, hätten auch 6,5 nicht mehr gewirkt, wenn ich die electromotorische Kraft um einen halben Volt hätte reduciren können. Es wäre dies durch Einschaltung von Widerständen annähernd möglich, aber auch nie genau, wegen der Wirkung der Ströme auf den Hautwiderstand.

Ich müsste immerhin eine Revision für die untern Zahlen vornehmen und dabei die Frage berücksichtigen:

Bei welcher Capacität gibt ein Condensator die gleiche Zuckung wie der galvanische Strom derselben Spannung? oder in anderer Form: *Bei welcher Dauer erreicht die Entladung die volle Wirkung, welche durch weitere Dauer nicht mehr gesteigert werden kann?*

Zu diesem Zwecke versah ich meine Kathode mit einer Vorrichtung, welche es erlaubte, ohne die Electrode zu verschieben, bald den Condensator bald die Batterie bei gleicher Voltspannung anzuwenden.

Versuch 12.

Anode 100$^{c^2}$ auf Nacken. Normale Kathode auf den linken Medianus am Handgelenk.

5 El. resp. 7 Volts geben am Galvanometer Anfangs 0,8, sogleich aber 0,9 und endlich 1,0 Milliampère. Während dieser kurzen

Application hat sich der Widerstand verändert und war successive 8750, 7666 und 7000 Ohms. Unter diesen Bedingungen suche ich die erste KSZ galvanisch zu erreichen. Sie tritt auf bei 6 El., resp. 8,4 Volts. Der Condensator von 6 Microfarads, geladen mit 8,4 Volts, gibt die *gleiche Contraction wie der galvanische Strom.* Ob nun die Capacität 6 oder 2 Microfarads betrage, das ist gleichgültig. Die Contraction ist augenscheinlich die gleiche. Ich versuche nun wieder mit dem galvanischen Strom und erreiche ebenfalls die *minimale Zuckung* mit 8,4 Volts. Schliesse ich genügend lang, um das gut gedämpfte Galvanometer abzulesen, so ist die Stromstärke 1,5 MA. Dies entspricht einem Widerstand von circa 5600. Nun schaltete ich Widerstand ein, bis die Zuckung wirklich als die *minimale* angesehen werden kann, d. h. bis jede weitere Widerstandseinschaltung sie aufhebt. Ich verlange auch von der sog. minimalen Contraction, dass sie bei *jedem Stromschluss* eintrete. *Dieselbe augenscheinlich gleich starke Contraction erreiche ich aber auch wieder mit dem Condensator von 1 Microfarad geladen auf 8,4 Volts.* In diesem Versuch gibt also der Condensator von 1 MF, geladen mit 8,4 V., d. h. mit einer Quantität von 8,4 Microcoulombs die gleiche Zuckung, wie der galvanische Strom von 8,4 Voltspannung. Vielleicht ist diese Quantität nicht ganz gross genug, indem hie· und da die Contraction bei der Condensatorentladung ausbleibt, d. h. auf 10 Schliessungen 8 Mal auftritt. Wenn wir bedenken, dass der galvanische Strom sich den Weg sozusagen bahnt, indem er den Widerstand vermindert, so ist diese Ueberlegenheit des Stromes gegenüber der Entladung begreiflich.

Versuch 13.

Wiederholung des Versuchs 12. Der Nerv wurde aber besser erreicht, so dass ich trotz grösserem Widerstand die Zuckung bei weit geringerer Stromstärke erreichte. 1te KSZ galvanisch mit 7 Volts und 0,6 MA. R = circa 11,666 Ohms.

Die gleiche Contraction erreicht man auch mit dem Condensator von 1 Microfarad, geladen auf 7 Volts. — In beiden Fällen tritt die Contraction nicht immer auf; 9 Mal auf 20 Schliessungen.

Durch Einschaltung von Flüssigkeitswiderständen kommt man zu einem Punkte, wo der galvanische Strom 5 Contractionen auf 20 Schliessungen gibt, während der Condensator 2 auf 20 gibt.

Versuch 14.

Versuchsbedingung gleich. 7 Volts = 0,75 MA. Ich schalte Widerstand ein, bis 7 Volts = 0.70. R also = 10,000 Ohms.

1te KSZ galvanisch bei 6 El. resp. 8,4 Volts
1te KSZ per Condensator „ 6 „ „ 8,4 „ u. 1 Microfarad.

Versuch 15.

Versuchsbedingungen gleich. 7 Volts = 0,85 MA.

R = 8235 Ohms.

1te KSZ galvanisch bei 7 Volts.

1te KSZ per Condensator bei 7 Volts und 0,800 Microfarad.

Mit 4 El. resp. 5,6 Volts ist keine Zuckung zu erzielen, weder galvanisch, noch mit dem Condensator von der grossen Capacität von 7 Microfarad. Mit 7 Volts gibt der Condensator vollkommen die gleiche Zuckung, wie der Strom. Die Sensation ist aber eine andere. Während die Condensatorentladung eine reine Muskelzuckung gibt, hat man beim galvanischen Strom eine stärkere Empfindung, Wärmegefühl und excentrische Empfindung in den Fingern.

In der Annahme, dass ein Condensator von 1 Microfarad genügend Quantität liefert, um der Entladung seine volle Wirksamkeit zu geben, wird nun bei gleichbleibender Capacität, also mit 1 Microfarad, die Voltspannung erhöht.

Die Wirkung der Entladung bleibt die gleiche, wie die des entsprechenden galvanischen Stromes. so lange die Voltspannung nicht 28 Volts übersteigt. Von da an wirkt aber der galvanische Strom stärker als die entsprechende Entladung, weil er schon tetanisirend wirkt.

Versuch 16.

Anode wie in allen übrigen Versuchen auf dem Nacken. Kathode auf dem Medianus am Handgelenk. Widerstand gross. 7 Volts geben nur 0,3 und 0,4 MA, entsprechend Widerständen von 23,333 und 17,500 Ohms.

Durch Einwirkung von 6 El. bringe ich ihn auf 15,274 Ohms
„ „ „ 7 „ „ „ „ „ 14,000

Bei diesem R von circa 14,000 Ohms geben 7 El. resp. 9,8 Volts die 1te KSZ, die minimale Contraction.

Dieselbe wird auch regelmässig erreicht mit dem Condensator von 0,950 Microfarad, geladen mit 9,8 Volts. Nach Verlauf einiger Minuten ist augenscheinlich der Widerstand wieder gestiegen. Die galvanische KSZ tritt seltener auf, nur 2 Mal auf 10 Schliessungen. Die Condensatorentladung gibt ebenfalls 2 Zuckungen auf 10 Entladungen.

Vermehrt man nun bei gleichbleibender Capacität von 1 Microfarad, die Voltspannung, so bleiben galvanische und Condensatorzuckungen ganz gleich bei 9, 8, bis 25,2 Volts. Die Sensation ist aber hier auch, beim constanten Strom, eine andere. Der Condensator gibt die reine Muskelzuckung. Der galvanische Strom gibt die gleiche Zuckung, begleitet aber von Wärmegefühl, von excentrischen Sensationen, von Lichtempfindungen (Wirkung der Nackenanode). Mit 18 El. resp. 25,2 Volts wirkt aber der galvanische Strom entschieden stärker wie die Condensatorentladung. Diese Elementenzahl gibt auch eine Intensität von 7 Milliampères, der Muskel bleibt in tetanischer Contraction (Kathodenschliessungstetanus).

Versuch 17.

Gleiche Versuchsbedingungen. Widerstand circa 4666 Ohms.
1te KSZ galvanisch mit 9,8 Volts.
1te Condensatorzuckung „ 9,8 „ und 0,990, also bei einer Quantität von 9,702 Microcoulombs.

Versuch 18.

Anode auf Nacken. Normale Kathode auf die Thenarmuskeln. Widerstand sehr gross, so dass 16 El., resp. 22.4 Volts nur eine Stromstärke von 0,7 MA. ergeben. R = circa 32,000 Ohms.

Der mit 22,4 Volts geladene Condensator von 0,990 Microfarad gibt anfangs die Zuckung nicht. Einige Entladungen bewirken aber eine Verminderung des LW und nun gibt diese Entladung die Zuckung allerdings etwas seltener wie der galvanische Strom von derselben Spannung.

Versuch 19.

Anode Nacken. Kathode Medianus. Versuch bei Einschaltung von Widerständen.

Widerstand.	Galvanischer Strom.	Condensatorentladung.
R= 6333 Ohms	1te KSZ mit 7 Volts.	1te KSZ bei 7 Volts u. 0,990 MF.
R=18971 „	1te KSZ „ 32,2 „	1te KSZ „ 32,2 „ „ 0,990 „
R=25600 „	1te KSZ „ 44,8 „	1te KSZ „ 44,8 „ „ 0.990 „

Versuch 20.

Anode 64^{c^2} auf Nacken. Kathode auf Medianus. Beginn der Versuche mit Condensatorentladungen, um den Widerstand nicht künstlich herabzusetzen. 1te KSZ mit 1 Microfarad und 9,8 Volts, also bei Q = 9,8 MC. 1te KSZ mit dem galvanischen Strom von 9,8 Volts, obgleich das Galvanometer nur 0,2 MA angibt, was einem enormen Widerstand von 49,000 Ohms entspricht. Mit 0,900 Microfarad keine Zuckung. Die Capacität muss 1 MF betragen, wenn die Zuckung eintreten soll.

Versuch 21.

Anode 64^{c^2} am Nacken. Kathode auf Medianus.

1te KSZ mit 1 Microfarad und 8,4 Volts, bei Q = 8,4 MC.

1te KSZ galvanisch ebenfalls mit 8,4 und I = 0,35 MA, woraus sich der Widerstand auf circa 24,000 Ohms berechnet.

Mit 7 Volts Wirkung = 0, sowohl galvanisch als per Condensator.

Versuch 22.

Unter gleichen Bedingungen.

1te KSZ mit 1 Microfarad und 8,4 V. Q = 8,4 MC.

1te KSZ galvanisch ebenfalls mit 8,4 V.

Aus diesen Versuchen erhellt die Thatsache, dass ein Condensator von 1 Microfarad die gleiche *minimale Zuckung* gibt, wie der galvanische Strom von gleicher Spannung. Die Wirkung der *Entladung* ist die gleiche wie die des *Stromes*, sobald die Ladungsquantität des erstern *so viel Microcoulombs beträgt, als die Spannung Volts zählt.* —

Wenn ich nun mittelst des Elementenzählers die Voltspannung um 1,4 Volt vermindere, so verschwinden beide Zuckungen. Es ist aber sicher, dass schon bei geringerer Verminderung der Voltspannung die Zuckung ausbleiben würde, wenn ich im Stande wäre, die Spannung feiner abzustufen. Ich kann aber mit dem Elementenzähler die Spannung nur um 1,4 Volt vermindern, indem ich 1 Element ausschalte. Sobald ich wenig Widerstand einschalte, tritt die Zuckung unregelmässig auf, zuerst vielleicht nur 5 Mal auf 10 Schliessungen, später nur 2 Mal und endlich gar nicht mehr. Wo 9,8 Volts noch die minimale Zuckung gibt, bin ich ebenso berechtigt, 9,3 als unwirksames Potential zu bestimmen wie 9.

Ich kann es leider nicht experimentell nachweisen. Es bleibt aber klar, dass die untern Zahlen der Tabelle (pag. 38) 0,693 und 4,800 nur deshalb aus der *Constante* schlagen, weil ich dabei zu unvermeidlichen Berechnungsfehlern geführt wurde. Die 8 ersten Zahlen sind constant genug, um die 2 untern zu corrigiren. Die Versuche zwingen mich anzunehmen, dass die Voltspannung, welche mit 1 Microfarad die minimale Zuckung gibt, auch die galvanisch letztwirkende ist und dass das *unwirksame Potential nur wenig davon entfernt liegt.*

Die Tabelle (pag. 38) gibt für die 8 ersten Zahlen das Mittel 0,470 Microcoulomb. Ich bin berechtigt, diese *Constante* auch für die zwei untern Zahlen anzunehmen. Die Quantität musste also berechnet werden bis auf das unwirksame Potential von circa 9,3. Wir erhalten bei dieser Correctur nun folgende Tabelle an Stelle der Tabelle pag. 38.

70	V.	und	0,007	MF	geben	die	minimale	Zuckung	bei	0,425	MC
63	„	„	0,008	„	„	„	„	„	„	0,445	„
56	„	„	0,009	„	„	„	„	„	„	0,420	„
49	„	„	0,011	„	„	„	„	„	„	0,426	„
42	„	„	0,013	„	„	„	„	„	„	0,425	„
35	„	„	0,016	„	„	„	„	„	„	0,411	„
28	„	„	0,021	„	„	„	„	„	„	0,393	„
21	„	„	0,031	„	„	„	„	„	„	0,363	„
14	„	„	0,077	„	„	„	„	„	„	0,362	„
9,8		„	1,000	„	„	„	„	„	„	0,500	„

Die Constante ist keine sehr glänzende und könnte vielleicht bei rein physikalischen Versuchen als eine ungenügende betrachtet werden. Für physiologische Versuche ist sie gewiss merkwürdig constant. Dehnen wir diese Berechnung auf andere Versuche aus.

Bei Versuch 3, bei Annahme des unwirksamen Potentials 17,7 Volts ist die *Constante* (wirksame Quantität).

0,627	
0,634	
0,651	
0,688	Mittel circa 0,647.
0.631	
0,553	
0,896	
0,495	
5,175	

In Versuch 4. — Unwirksames Potential = 12 Volts. Wirksame Quantität:

0,406	
0,408	
0,396	
0,407	
0,390	Mittel = 0,379.
0,391	
0,384	
0,360	
0,360	
0,288	
3,790	

In Versuch 5 ebenfalls bei Annahme des unwirksamen Potentials = 12 Volts.

0,406	
0,408	
0,396	
0,407	
0,390	Mittel 0,401.
0,391	
0,400	
0,405	
0,214	
0,594	
4,011	

In Versuch 8. — Unwirksames Potential 7,9 Volts.

0,284	
0,275	
0,288	
0,287	
0,272	Mittel 0,290.
0,271	
0,241	
0,248	
0,237	
0,495	
2,900	

In Versuch 11. — Unwirksames Potential 9,3 Volts.

0,420	
0,397	
0,392	
0,349	Mittel 0,413.
0,355	
0,585	
0,446	
0,359	
3,302	

Ich verzichte auf die Wiedergabe anderer Berechnungen. In allen Versuchen lässt sich diese *wirksame Constante* herausrechnen. In sämmtlichen gibt es Zahlen, die nicht ganz passen. Es sind dies Unregelmässigkeiten, die in Versuchsfehlern ihren Grund haben. Sie sind sogar geringer, als man bei physiologischen Versuchen erwarten könnte. Jeder, mit der electrischen Untersuchung von Patienten irgendwie vertraute Arzt, wird begreifen, dass die Versuchsresultate an verschiedenen Tagen auch verschieden sind, dass es einmal gelingt, den Nerv zu reizen mit einer Elementenzahl, die am anderen Tage nicht genügt, auch wenn das Galvanometer die gleiche Ablenkung zeigt. Es ist nicht immer möglich, den Nerv genau zu treffen. Berücksichtigt man alle Fehlerquellen, die unsichere Bestimmung der Spannung, des Widerstandes, der Capacität etc., so fällt die gefundene *Constante* eben durch ihre Constanz auf.

Die Resultate dieser Versuche lassen sich in Kürze dahin resumiren:

Condensatorenentladungen lassen sich zur Reizung von motorischen Nerven und Muskeln mit Vortheil gebrauchen. Sie geben, Dank ihrer kurzen Dauer, die reine Muskelzuckung, ohne Schmerz, ohne Brennen, ohne electrolytische Wirkungen,

Bei hoher Voltspannung und nicht zu grossem Widerstand, bis etwa 10000 Ohms, genügt eine ungeheuer kleine Electricitätsmenge, um die minimale Zuckung zu erzielen, 0,280 bis 0,560 Microcoulomb. Geringere Spannung kann durch grössere *Ladungsquantität* genau compensirt werden. Dass bei sinkenden Spannungen der Condensator mit immer grösseren Quantitäten geladen werden muss, hat seinen Grund in der eigenthümlichen Form der Entladung, bei welcher die Intensität continuirlich sinkt. Die Quantität, welche zu geringes Potential hat, reizt den Nerv nicht, sie fliesst wirkungslos ab. Es ist desshalb

nothwendig, die *Ladungsquantität* von der *wirksamen Quantität* zu unterscheiden.

Berechnet man letztere, indem man von der Ladungsquantität die unter zu geringem Potential abfliessende Menge subtrahirt, so ergibt sich eine *constante wirksame Quantität*, von welcher die physiologische Wirkung abhängt. — Der Nerv reagirt somit auf die *Quantität*. Es ist gleichgültig, ob der Strom grosse Spannung und geringe Dauer, oder geringe Spannung und lange Dauer habe. Auf die Form der Curve kommt es nicht an, sobald die *wirksame Quantität* dieselbe bleibt.

Es sei mir gestattet, hier auf die Analogie zwischen Nerv und Galvanometer einzugehen. Wird das Galvanometer zu Messungen kurzdauernder Ströme, z. B. der Condensatorenentladungen benutzt, so reagirt dasselbe auch auf *Quantitäten*. Aber das Galvanometer, wenn es die zu solchen Messungen genügende Empfindlichkeit hat, reagirt auf ungeheuer geringe Voltspannungen resp. Intensitäten. Der unwirksame Theil der Entladung ist verschwindend klein, die *wirksame Quantität* ist die *ganze Ladungsquantität*. Darum sind die Ausschläge des Galvanometers genau der Ladungsquantität proportional. Darum ist es auch für das Galvanometer gleichgültig, ob kleine oder grosse Widerstände im Entladungskreis eingeschaltet sind.

Letztere Folgerung leitete ich von theoretischen Betrachtungen über die Reactionsweise des Galvanometers ab. Wenn, wie die Physik lehrt, das Galvanometer die *Quantität* der Entladung misst, so muss es gleichgültig sein, ob letztere auf grosse oder kleine Widerstände stattfindet.

Bei grossen Widerständen muss die Intensität I nach der Ohmschen Formel $I = \frac{E}{R}$ abnehmen.

Die Dauer T ist dagegen eine längere. Das Produkt aber $Q = IT$, oder genauer, für die Entladung $Q = \int IdT$ bleibt dasselbe.

Bei kleinem Widerstand ist die Intensität gross, die Dauer aber kurz, bei grossem Widerstand ist im Gegentheil die Intensität klein, die Dauer aber länger. Q bleibt jedoch constant.

Der Versuch bestätigte diese theoretische Voraussetzung. Auf einem modificirten, aperiodischen Wiedemann'schen Galvanometer entlud ich verschiedene Condensatoren von 1, 2, 3, 4, 5, 6 und 7 Microfarads bei gleichbleibendem Potential von 1,46 Volt. Nun schaltete ich Widerstände ein und bekam folgende Zahlen:

1 Leclanché von 1,46 Volt.

Widerstand in Ohms.	Capacitäten in Microfarads. 1	2	3	4	5	6	7
3,024	18	35	52	64	84	101,5	119
14,024	18	35	52	64	84	101,0	118,5
21,024	18	35	52	64	83,5	100	116,0
42,024	18	35	52	64	81	96	111,0
117,024	<18	33,5	47	56,5	69	80	90
596,024	14,5	23,3	28	31	35	38,5	41
960,024	13,0	19,0	23,5	24	26	28,5	30
2,273,024	8,5	11,0	12,0	12,0	12,8	13,8	14

Dieser Versuch beweist, dass das betreffende Galvanometer nur dann die Quantitäten anzeigt, wenn:

1) der Widerstand nicht zu gross ist;

2) die Capacität nicht zu gross ist.

Beides, Vermehrung des Widerstandes oder der Capacität, verlängert die Dauer der Entladung. Ist nun die Dauer so gross, dass sie, gegenüber der Schwingungsdauer des Galvanometers, nicht mehr als sehr klein betrachtet werden kann, so fängt das Galvanometer an nicht mehr *Quantitäten,* sondern *Intensitäten* anzuzeigen. Berücksichtigen wir nur die ersten Zahlen, so haben wir:

Widerstand in Ohms.	*Capacitäten in Microfarad.* *1*	*2*	*3*	*4*
3024	18	35	52	64
14024	18	35	52	64
21024	18	35	52	64
42024	18	45	51	64
117024	<18	33,5	47	56,5

So lange der Widerstand nicht 100,000 Ohms übersteigt, d. h. so lange die Dauer des Stromes, gegenüber der Schwingungsdauer des Galvanometers, verschwindend klein bleibt, so ist die Einschaltung des Widerstandes gleichgültig. *Geringere Intensität wird genau compensirt durch längere Dauer.*

Auch der Nerv reagirt auf *Quantitäten,* aber die Intensität darf nicht unter ein gewisses Niveau sinken. Die *wirksame Quantität* ist nur ein Bruchtheil der *Ladungsquantität.* Dieser Begriff der *wirksamen Quantität,* welcher der Physiker bei seinen Versuchen nicht begegnet, lässt sich an einem Beispiel leicht illustriren.

Denken wir uns ein Mühlrad, von einem Bach getrieben. So lange das Gefälle ungenügend ist, bleibt es ruhig, wie der Nerv,

der auf ungenügende Stromstärke nicht reagirt. Ist das Gefälle stark, so bewegt sich nun das Rad mit einer Geschwindigkeit, die constant bleibt, so lange der Strom constant ist. — Es sind dies Verhältnisse, wie sie beim galvanischen Strom vorkommen, mit dem Unterschied, dass der Nerv auf verschiedene Weise reagirt, je nachdem die Stromstärke gross oder klein ist. — Bei Stromstärke von etwa 0,5 bis 5 MA. reagirt er mit einer einfachen Schliessungszuckung, allenfalls mit einer Oeffnungszuckung. Bei Stromstärken über 5 MA reagirt er mit einer dauernden Contraction, mit Tetanus.

Nehmen wir nun an, dass im Bächlein plötzlich eine Schleuse geschlossen werde.

Es bleibt nun zwischen Rad und Schleuse eine gewisse Menge Wasser. Die Verhältnisse sind die gleichen wie bei einem Condensator. Anfangs wird sich diese abgemessene Wassermenge mit gleicher Geschwindigkeit bewegen wie vor Schliessung der Schleuse; die Menge nimmt aber rasch ab und mit ihr das Potential. Das Rad wird allmälig sich langsamer drehen und wird zum Stillstand kommen, lange bevor alles Wasser abgelaufen ist. Die Menge Wasser, die zuletzt wirkungslos abfloss, ist, was ich beim Condensator als *unwirksame Quantität* bezeichne. Die Menge, welche genügendes Potential hatte, ist, was ich als die *wirksame Quantität* dargestellt habe. Wir sehen, dass dieser Begriff nicht aus der Luft gegriffen ist, dass er den thatsächlichen Verhältnissen vollkommen entspricht. Schwierig ist nur die exacte Bestimmung dieses unwirksamen Potentials, schwierig desshalb auch die Berechnung der *wirksamen Quantität*.

In der Tabelle pag. 37 haben wir für jedes Potential die Dauer der Entladung berechnet und zwar bei der Annahme eines unwirksamen Potentials von nur 5 Volts. — Wir haben gesehen, dass letztere Annahme unrichtig war. Die Dauer muss nur bis auf das Potential 9,3 Volts berechnet werden. Wir finden dann:

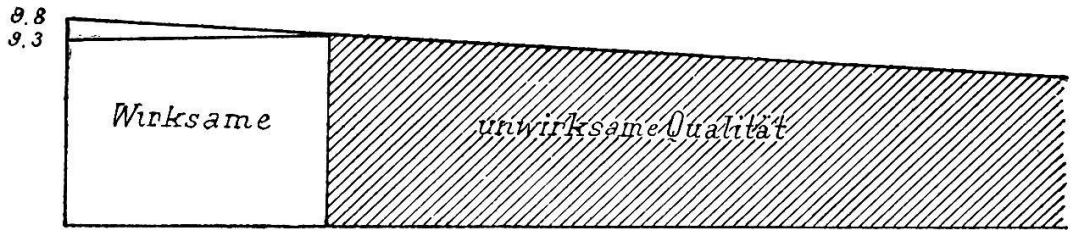
Die Entladung von

70	V.	gibt	d.	minimale	Contraction	bei	e.	wirks.	Dauer	von	70	10^{-6} Sec.
63	„	„	„	„	„	„	„	„	„	„	76	„
56	„	„	„	„	„	„	„	„	„	„	80	„
49	„	„	„	„	„	„	„	„	„	„	91	„
42	„	„	„	„	„	„	„	„	„	„	97	„
35	„	„	„	„	„	„	„	„	„	„	106	„
28	„	„	„	„	„	„	„	„	„	„	115	„
21	„	„	„	„	„	„	„	„	„	„	126	„
41	„	„	„	„	„	„	„	„	„	„	157	„
9,8	„	„	„	„	„	„	„	„	„	„	261	„

Letztere Zahl 261 Milliontel Secunden ist auch die *maximale Dauer*, d. h. die Dauer, die genügt, um die volle Wirkung zu geben. *Der langdauernde galvanische Strom von gleicher Spannung 9.8 hat keine grössere Wirkung.*

Es lohnt sich nicht der Mühe, diese Entladungsdauer in jedem Versuch auszurechnen. Obiges Beispiel genügt, um zu zeigen, wie kurz die Entladungen sind, welche eine Zuckung auslösen; es zeigt, wie eine kleine Vermehrung der Dauer genügt, um den wenig gespannten Strom gleich wirksam zu machen wie den hochgespannten. Endlich muss ich bemerken, dass, je geringer die Spannung und je grösser die Capacität, desto mehr die Entladung einem constanten Strom ähnlich ist. Die Intensität nimmt dann nur sehr langsam ab, wie folgende Curve zeigt, welche im gleichen Massstab gehalten ist wie die Curve der Seite 36.

Fig. 14.



Die Vergleichung dieser beiden Curven genügt, um den Verlauf dieser Entladungen ad oculos zu demonstriren. Die Entladung von 70 Volts sinkt in 70 Milliontel Secunden, die Entladung von 9,8 erst in 261 Milliontel Secunden auf das unwirksame Potential 9,3.

An diese Berechnungen können wir einen Vergleich mit kurzdauernden galvanischen Strömen anreihen. Die physiologische Wirkung ist nach den oben beschriebenen Versuchen proportional der *wirksamen Quantität*. Letztere beträgt ungefähr 0,470 Microcoulomb.

Nun ist bei einem galvanischen Strom, der genügendes Potential hat, die *ganze Quantität* wirksam, und diese $Q = IT$.

Die Dauer eines galvanischen Stromes, welche genügt, um die minimale Zuckung hervorzurufen, lässt sich einfach berechnen nach $T = \frac{Q}{I}$, wobei Q die *berechnete wirksame Quantität* einer Entladung darstellt. Die Rechnung ergibt nun, dass die minimale Zuckung erreicht wird, wenn ein Strom von

									10^{-6} Sec.
70	Volts,	resp.	14	Milliampères	eine	Dauer	hat	von	33,5
63	„	„	12,6	„	„	„	„	„	37,3
56	„	„	11,2	„	„	„	„	„	41,9
49	„	„	9,8	„	„	„	„	„	47,9
42	„	„	8,4	„	„	„	„	„	55,9
35	„	„	7,0	„	„	„	„	„	67,1
28	„	„	5,6	„	„	„	„	„	83,9
21	„	„	4,2	„	„	„	„	„	111,9
14	„	„	2,8	„	„	„	„	„	167,8
9,8	„	„	1,96	„	„	„	„	„	239,7

Letztere Zahl ist auch die *maximale Dauer*. Bei dieser Dauer tritt die volle Wirkung des Stromes ein; eine längere Dauer macht die Zuckung nicht grösser, nicht effectvoller. Dies gilt auch für die Zahlen 167,8 und 111,9 Milliontel. Weiter aber ist die Stromstärke genügend, um bei Menschen die Dauercontraction, den KSTet zu bewirken. Der Condensator kann diese tetanisirende Wirkung nicht haben.

Diese Berechnung hat natürlich nur theoretisches Interesse. Es gibt keine Unterbrechungsvorrichtung, welche einen galvanischen Strom so kurz schliessen kann, dass die Dauer nur circa 240 Milliontel Secunden, d. h. circa $^1/_{4000}$ Secunde betrage. — Bei allen bekannten Vorrichtungen zur Schliessung des galvanischen Stromes ist die Dauer des Contacts jedenfalls genügend, um dem Strom seine volle Nerv und Muskel erregende Wirkung zu lassen. —

Bei dieser Berechnung der zur Hervorrufung der Zuckung erforderlichen Dauer galvanischer Ströme kommen wir dennoch zur Benutzung der Formel $T = \frac{Q}{I}$, was wir (pag. 12) als nicht statthaft bezeichneten. Der Werth Q ist aber jetzt nicht mehr die *Ladungsquantität* = VC, sondern die *wirksame Quantität*, die Electricitätsmenge, welche, wie die Versuche mit Condensatoren lehren, die physiologische Wirkung bedingt. Zur Auslösung der Zuckung ist eine Quantität, eine Electricitätsmenge, nöthig, die gewöhnlich bei nicht zu grossem Widerstande 0,280 bis 0,560 Microcoulomb beträgt. Diese Menge muss sich aber mit einer genügenden Intensität entladen, sie muss sich in einer gewissen, nicht zu langen Zeit entladen. Es ist für den menschlichen Nerv und Muskel gleichgültig, ob eine Entladung von 70 Volts 70 Milliontel Secunden dauert, oder ob eine Entladung von nur 9,8 Volts sich in 261 Milliontel Secunden vollziehe. In

beiden Fällen ist die berechnete wirksame Quantität circa 0,470 Microcoulomb und auf das kommt es an. *Nur innerhalb dieser Grenzen lässt sich aber geringes Potential durch längere Dauer compensiren.* Ist in dem besprochenen Versuch 2 die Spannung geringer als 9,8, z. B. 9, so wirkt diese Entladung nicht, wenn auch durch Vergrösserung der Capacität auf 7 und 8 Microfarads die Quantität viel grösser wird als 0,470 Microcoulomb. Sogar galvanisch, also bei unbegrenzter, nur von der Dauer der Schliessungszeit abhängigen Quantität, bleibt der Strom unwirksam. Die ganze Menge fliesst unter zu geringem Potential ab und bleibt trotz längerer Dauer vollkommen unwirksam.

Nachdem ich die Wirkung der Condensatorenentladungen auf den motorischen Nerv studirt hatte, tauchte mir die Frage auf: *Wie verhalten sich gegenüber den Entladungen die Organe, von welchen wir annehmen, dass sie leichter auf langdauernde Ströme reagiren? Wie verhält sich namentlich die Retina?*

Die Untersuchungen sind über diesen Punkt nicht zu einem Abschlusse gekommen. Es ist leicht nachzuweisen, bei welcher Capacität jede Wirkung einer Entladung verschwindet; es ist aber höchst schwierig zu sagen, ob es eine Lichtempfindung ist. Der Versuch wird in folgender Weise angestellt.

Versuch 23.

Anode 100^{c2} auf Nacken. Frontalelectrode von 12^{c} Länge und $5{,}5^{c}$ Breite. 7 Volts = 3 MA. R = circa 2333 Ohms. Die erste Empfindung tritt auf bei

Spannung.	Capacität.		Quantität.	
	KS	AS	KS	AS
70 Volts	0,008 Microfarad		0,560 Microcoulomb	
63	0,009		0,567	
56	0,010	0,015	0,560	0,840
49	0,011	0,016	0,439	0,784
42	0,013	0,019	0,546	0,798
35	0,016	0,022	0,560	0,770
28	0,019	0,028	0,532	0,784
21	0,025	0,037*)	0,525	0,747
14	0.045	0,069	0,630	0,966
7	0,115	0,124	0,805	0,868
5,6	0,165	0,260	0,924	1,456
4,2	0,310	0,345	1,302	1,449
2,8	0,460	0,500	1,288	1,400

*) Erste unzweifelhafte Lichtempfindung, bei der Anode 21 Volts, 0,037 Capacität, somit 0,777 Microcoulomb.

Es zeigt sich, dass bei dieser Versuchsanordnung die erste Empfindung ungefähr bei gleichen Capacitäten resp. Quantitäten eintritt, wie die Contraction eines Muskels. Aber die Natur dieser Empfindung ist schwer zu definiren.

Bei der Entladung von 70 Volts mit einer Capacität von 0,007 empfand ich nichts; ich konnte nicht sagen, ob die Entladung stattgefunden habe. Bei 0,008 dagegen verspüre ich bei jedem Stromschluss *etwas*, kann aber entschieden nicht unterscheiden, ob es eine kurze, leichte Contraction der Frontalmusculatur, eine Lichtempfindung oder eine Reizung der sensiblen Nerven ist. Im gleichen Zweifel bleibe ich während der ganzen Versuchsreihe; ich kann nur sagen, ich empfinde etwas oder nichts. — Erst bei 21 Volts und bei 0,037 Microfarad, resp. 0,777 Microcoulomb gibt die Anodenschliessung (auf Stirne) eine wahre Lichtempfindung, das Wetterleuchten, aber ohne dass ich im Stande wäre, etwa die Farbe zu unterscheiden. Dieselbe undeutliche Lichtempfindung geben auch die niederen Spannungen bei zunehmender Quantität. Ich kann hier auch die Spannung mehr verringern als beim motorischen Nerv. Die Empfindung tritt noch auf bei 2 Leclanchés, also bei 2,8 Volts und 0,460—0,500 Microcoulomb. — Die Zahlen der Quantität sind hier auch viel unsicherere als beim motorischen Nerv, weil die Controlle eine subjective ist, weil es sich um Sensationen, um äusserst schwache Eindrücke handelt, bei welchen man sich oft fragen muss, ob man etwas verspürt habe oder nicht.

Ganz analoge Ergebnisse gibt der folgende Versuch. Die Versuchsperson war ein 23 J. alter cand. med. Sie empfand die gleichen Schwierigkeiten wie ich, um die Sensation zu definiren.

Versuch 24.

Anode 100^{c^2} auf Nacken. Kathode an der Stirne. 7 Volts = 5,5 MA, also R = circa 1272 Ohms. 1 El. resp. 1,4 Volts gibt, bei 0,5 Stromstärke, eine starke Lichtempfindung mit Brennen an der Haut. Erste Wahrnehmung der Condensatorentladung bei

Spannung.	Capacität.		Quantität.	
	KS	AS	KS	AS
70 Volts	0,005 MF		0,359 MC	0,630
63	0,005		0,315	0,567
56	0,006	0,090	0,336	0,504
40	0,007	0,010	0,343	0,490
42	0,008	0,013	0,336	0,546
35	0,009	0,015	0,315	0,525
28	0,011	0,018	0,308	0,521
21	0,018	0,027	0,378	0,567
14	0,024	0,034	0,336	0,486
7	0,055	0,103	0,385	0,721
5,6	0,078	0,127	0,436	0,711
3,2	0,138	0,212*)	0,579	0,890
2,8	0,314	0,579	0,879	1,681

Hier ist die *Constante* sozusagen = der Ladungsquantität. Die Reaction ist die eines Galvanometers. Die Retina (oder die sensiblen Nerven des Kopfes?) reagirt auf sehr niedrige Spannungen (2,8), ja galvanisch auf 1,4 Volt. Der Fall tritt hier ein, dass die *unwirksame Quantität* eine *minimale* wird, darum genügt es, die Capacität so weit zu vergrössern, dass das Sinken der Voltspannung compensirt werde, d. h. dass die *Quantität* die gleiche bleibe. Der Begriff der wirksamen Quantität, den wir beim motorischen Nerv aufstellen mussten, fällt hier sozusagen weg, ähnlich wie beim Galvanometer. Diese Sensationen sind aber undeutliche und man kann nicht sicher sagen, ob die Retina dabei im Spiele ist. Vielleicht hat die Sensation ihren Sitz in den Trigeminusendigungen. Immerhin ist das Resultat interessant, dass es für diesen Versuch nahezu rein auf die Ladungsquantität ankommt, wie beim Galvanometer.

Ich machte noch darüber einige Versuche mit grösseren Condensatoren, aber auch ohne Erfolg, wie aus folgendem Beispiel ersichtlich.

Versuch 25.

Anode Nacken. Rundliche Kathode auf das rechte Auge.

Mit 1 El. = 1,4 Volts galvanisch geschlossen, gibt die KS eine undeutliche Lichtempfindung mit leichten zickzackförmigen Linien an der Peripherie, sofort nachher Verdunkelung des Gesichtsfeldes.

---

*) Erste sichere Lichtempfindung.

Die AS gibt eine mehr diffuse Lichtempfindung. Der Condensator von 7 Microfarads und 1,4 Volt gibt eine weit schwächere Empfindung ohne Unterschied zwischen Kathode und Anode.

Mit 2 El., resp. 2,8 Volts galvanisch, habe ich eine stärkere Lichtempfindung, ebenfalls mit zickzackförmigen Linien bei KS und diffuses Licht bei AS.

Der Condensator gibt ebenfalls schwächere Empfindung ohne Unterschied zwischen K und A.

Mit 3 El. resp. 4,2 Volts galvanisch. Starke Lichtempfindung mit geschlängelten Linien für die Kathode und einfache Lichtempfindung für die Anode.

Der Condensator mit 7 Microfarads gibt ebenfalls schwächere Empfindung, die für Kathode und Anode verschieden ist, ohne dass man den Unterschied recht beschreiben könnte.

Mit 4 El. resp. 5,6 Volts gibt die Kathode galvanisch starke Lichtempfindung mit geschlängelten Linien, Verdunkelung des Gesichtsfeldes. Die Anode gibt eine deutlich blaue Lichtempfindung. Der Condensator gibt noch immer schwächere Empfindung ohne sicheren, definirbaren Unterschied zwischen beiden Polen.

Die Dauer einer Condensatorentladung ist auch bei geringer Voltspannung und grosser Capacität von 7 Microfarads nicht lang genug, um die blaue Farbe bei Anodenschliessung zu geben. Ueberhaupt ist die Wirkung der Entlad ung auf die Retina viel schwächer, undeutlicher als die Wirkung des galvanischen Stromes.

Weit interessanter und practisch wichtiger war für mich die Frage: *Wie verhalten sich, gegenüber Condensatorenentladungen, die Muskeln im Zustande der Entartungsreaction?*

Es war mir leider nicht möglich, in letzter Zeit eine grössere Anzahl von Lähmungen aufzutreiben, wo die Reaction in optima forma vorhanden gewesen wäre. Ich wage es daher nicht, die Resultate, die ich namentlich bei Untersuchung eines Falles von traumatischer Lähmung erhielt, zu verallgemeinern. Ich darf nicht behaupten, dass ähnliche Reactionen bei *allen Fällen* von EAR vorkommen, obgleich ich geneigt bin, es anzunehmen. — Ich gebe hier die abgekürzte Krankengeschichte dieses Falles mit eingehender Beschreibung der electrischen Reactionen.

Der 41 Jahre alte Zimmermann S. wurde mir zur elektrischen Untersuchung zugeschickt, 9 Wochen nach Luxation der linken Schulter.

Die Reduction hatte ohne erhebliche Gewaltanwendung stattfinden können. Es blieb aber eine Lähmung aller 3 Armnerven zurück.

Bei der 9 Wochen nach der Verletzung vorgenommenen Untersuchung zeigte sich eine ausgesprochene Atrophie fast sämmtlicher Muskeln der linken oberen Extremität. Der Umfang des Oberarms beträgt in der Mitte 23,5 c, rechts 25 c. Der Vorderarm misst im grössten Umfang links 24, rechts 27.

Der Deltoïdeus ist hochgradig atrophisch, ebenso Triceps und die ganze Muskulatur des Vorderarms. Verschont blieben nur die vom Musculo-cutaneus versorgten Muskeln, Coraco-brachialis, Biceps und Brachialis internus. In allen 3 Armnerven, Medianus, Ulnaris und Radialis war die willkürliche Bewegung aufgehoben. Verschieden waren aber die electrischen Reactionen der Muskeln.

Der atrophische *Deltoïdeus* reagirt in keiner Weise auf den maximalen faradischen Strom meines sehr kräftigen Inductionsapparates (Secundäre Spule von 10,000 Windungen, getrieben durch 2 Zinkkohlen-Elemente).

Er reagirt galvanisch mit unzweifelhaft *träger Contraction*, KSZ 8 Volts und 1,2 MA. ASZ 11,2 Volts und 5,5 MA. Es besteht also EAR, aber ohne Umkehrung der Zuckungsformel ASZ < KSZ.

Derselbe Muskel reagirt aber auch auf die KS des Condensators, *aber bei viel höheren Capacitäten wie der normale Muskel.* Die erste KSZ tritt auf bei:

Versuch 26.

Spannung.	Capacität.	Quantität.
70 Volts	0,125 Microfarads	7,350 Microcoulombs
63	0,120	7,560
56	0,190	10,640
49	0,290	14,210
42	0,600	25,200
35	2,000	70,000
28	3,500	98,000
21	5,000	105,000
14 ohne Wirkung	8,000	112,000

Vergleichen wir mit den Reactionen den *rechten Deltoïdeus,* Hier tritt die 1te KSZ ein bei

Spannung.	Capacität.	Quantität.
60 Volts	0,005 Microfarads	0,350 Microcoulombs
63	0,006	0,378
56	0,007	0,392
49	0,008	0,392
42	0,009	0,378
35	0,011	0,385
28	0,014	0,392
21	0,014	0,441
14	0,040	0,560
12,6	0,047	0,592
11,2	0,055	0,616
9,8	0,074	0,725
8,4	0,150	1,260
7,0	0,500	3,500
5,6	0,700	3,900

Beim rechten Deltoïdeus tritt die galvanische KSZ bei 5,6 Volts und 0,9 MA ein.

Vergleichen wir diese Resultate, so ist der Unterschied ein ganz auffallender.

Die galvanische Erregbarkeit dieses Muskels in Entartungsreaction ist nur etwas herabgesetzt, KSZ links 1,2, rechts 0,9.

Dagegen wirken Condensatorenentladungen nur bei enorm viel grösseren Capacitäten, resp. Quantitäten, auf den kranken Deltoïdeus. Auf der gesunden Seite genügen Quantitäten von 0,350 bis 3,920 Microcoulombs und zwar letztere Zahl bei der sehr geringen Spannung von 5,6 Volts! Auf der kranken Seite sind aber Quantitäten von 7,350 bis 105 Microcoulombs erforderlich! Bei 8 Microfarads und 14 Volts resp. bei 112 Microcoulombs tritt keine Reaction ein, während der galvanische Strom schon mit 7 Volts wirkt. Ein Condensator von 8 Microfarads genügt hier nicht, um durch Entladung die Zuckung bei gleicher Voltspannung zu erreichen, wie beim galvanischen Strom.

Der Widerstand auf der kranken Seite war circa 5000 Ohms. Das letzte galvanisch wirksame Potential 7 Volts. Wir besitzen alle zur Berechnung der Entladungsdauer nöthigen Zahlen.

Die Entladung von 70 Volts hatte eine Dauer von 1209 Milliontel Secunde, etwas mehr als $^1/_{1000}$ Secunde.

Die Entladung von 21 Volts erreicht die Dauer von 27279 Milliontel, resp. nahezu $^3/_{100}$ Secunde.

Die Entladung von 11 Volts erreicht eine Dauer von 27730, also auch $^3/_{100}$ einer Secunde und hat keine Wirkung, obgleich der galvanische Strom schon bei 7 Volts wirkt.

Beim gesunden Muskel genügt eine Entladungsdauer von 70 bis 261 Milliontel Secunden.

Der kranke Deltoïdeus, welcher also auf *die schnellen Unterbrechungen* (etwa 40 in der Secunde) des Inductionsapparates in keiner Weise antwortet, reagirt auf *galvanische Ströme* nahezu wie ein normaler Muskel. Er reagirt auch auf grosse Capacitäten des Condensators, d. h. auf Entladungen, deren Dauer $^1/_{1000}$ bis $^3/_{100}$ Secunden beträgt.

Derselbe Muskel reagirt aber auch sehr deutlich auf langsame Unterbrechungen des Inductionsstromes (circa 30 in der Minute). Die Contraction ist zwar schwach, tritt erst bei 7 Cent. Rollenabstand ein und mit einem Apparat von grosser Voltspannung.

Die Zuckung bleibt eine träge, sowohl bei der galvanischen Zuckung, wie bei den durch Condensatorenentladungen oder Inductionsstrom hervorgerufenen Contractionen. Ebenso reagirt der kranke Deltoïdeus sehr energisch auf die Ströme eines Telephoninductors (Läutvorrichtung der schweizerischen Telephonanlagen). Bei diesem Magnetinductionsapparat finden keine Stromunterbrechungen statt, kein Extracourant, sondern nur alternirende Ströme von relativ geringer Spannung, aber entsprechend längerer Dauer.

Uebereinstimmende Resultate geben andere Versuche auf dem gleichen kranken Deltoïdeus.

Versuch 27.

Anode auf Nacken. Kathode auf Deltoïdeus. 1te KSZ galvanisch bei 4 El. resp. 5,6 Volts und 1,1 MA. Widerstand = circa 5000 Ohms. Die Entladung wirkt bei

Spannung.	Capacität.	Quantität.
70 Volts	0,110 Microfarads	7,700 Microcoulombs,
63	0,200	12,600
56	0,300	16,800
15,4	8,000	124,200

Aehnliche Resultate gibt die Prüfung der Extensoren am Vorderarm.

Versuch 28.

Anode auf Nacken. Kathode auf Extensoren.

5	Elemente	resp.	7	Volts	geben	0,7	MA,	also	R =	circa	10,000	Ohms.
6	„	„	8,4	„	„	1,1	„	„	R =	„	7,636	„
7	„	„	9,8	„	„	1,5	„	„	R =	„	6,533	„
8	„	„	11,2	„	„	1,8	„	„	R =	„	6,222	„

Diese 8 Elemente geben auch eine deutliche *träge* Zuckung, sie tritt aber auch ein bei 7 Elementen. 1te KSZ, also bei 9,8 Volts und 1,5 MA.

Die Condensatorentladung von 8 Microfarads bringt die minimale Zuckung mit 19 Elementen resp. 26,6 Volts, also bei einer Quantität von 212,8 Microcoulombs. Bei der Annahme des unwirksamen Potentials = 9 Volts gibt die Berechnung der Entladungsdauer (Widerstand 6500 Ohms) 56361 Milliontel Secunde, resp. circa $^5/_{100}$ Secunde.

Versuch 29.

Anode auf die Vorderfläche des Handgelenks, um Stromschleifen im nicht gelähmten Biceps zu vermeiden. Kathode auf die Extensoren, speciell auf den *Ulnaris externus*.

1te KSZ bei 8 Microfarads und 22 Elementen, resp. 30,8 Volts, also bei einer Quantität von 246,4 Microcoulombs. Die 22 Elemente geben eine Intensität von 11 MA, folglich ist der Widerstand für diese Stromstärke circa 2800 Ohms. Die erste galvanische KSZ tritt aber schon ein bei 10 Elementen, resp. 14 Volts und 2,1 MA. R = 6666 Ohms. Bei diesem Widerstand und Annahme des unwirksamen Potentials 13,5 Volts, ergibt die Berechnung der Dauer der Entladung 456 Milliontel Secunden. Die Extensoren sind übrigens nicht sehr krank; sie reagiren noch auf den faradischen Strom mit schnellen Unterbrechungen bei 80mm Rollenabstand, noch besser aber auf die langsamen Unterbrechungen. Hier tritt die Zuckung auf den Oeffnungs-Inductionsstrom schon bei 92mm RA ein. Bei 48mm RA ist die Contraction eine doppelte. (Schliessungs- und Oeffnungsinductionsschlag.) Bei RA = 0 gibt die langsame Unterbrechung eine so starke Contraction, dass die Hand bis zur Horizontale gehoben wird. Mit raschen Unterbrechungen (Neef'scher Hammer) ist bei RA = 0 die Wirkung erheblich geringer.

Interessanter sind die electrischen Reactionen bei den am stärksten befallenen *Thenarmuskeln*. Der *Medianus* am Handgelenk reagirt in keiner Weise, weder auf Inductionsstrom, noch auf galvanischen Strom. Die *Erregbarkeit von Nerven aus* ist aufgehoben.

Die Thenarmuskeln reagiren auch auf den Inductionsstrom, mit raschen Unterbrechungen, bei RA = 0 nicht. Die *faradische Erregbarkeit vom Muskel aus* ist ebenfalls erloschen (für schnelle Unterbrechungen).

Dagegen gibt die Kathode des Oeffnungsinductionsstroms bei langsamer Unterbrechung und bei RA = 0 eine deutliche Contraction. Dieselbe ist aber schwach und tritt nur bei den ersten Schlägen auf. Die

Erregbarkeit sinkt aber sofort und nach etwa 3—5 Schlägen bleibt jede Wirkung aus. Weit besser wirkt aber die Anode des Oeffnungsinductionsstromes: Die Zuckung ist nicht mehr eine fibrilläre, sie bringt den Daumen in Adduction und Opposition, und die Zuckung ist deutlich *träge*. Die *faradische Erregbarkeit vom Muskel aus* ist also für *langsame Unterbrechungen* erhalten, wenn auch abgeschwächt. Sehr deutlich ist dabei das *Vorwiegen der Anodenzuckung;* sie wirkt schon bei 35^{mm} RA; bei eingeschobenen Rollen ist sie doppelt (Schliessungsinductionsstrom). Endlich ist sie *träge*. Ebenso reagiren die Thenarmuskeln im Zustande der completen EAR auf Condensatorentladungen, aber erst bei sehr grossen Capacitäten. So ergibt:

Versuch 30.

1te KSZ bei:

Spannung.	Capacität.	Quantität.
70 Volts	6,0 Microfarads	420,0 Microcoulombs
63	8,0	504,0

Auch hier ist Vorwiegen der Anode bemerkbar.

Die ASZ tritt ein bei:

56 Volts 7,5 Microfarads 448 Microcoulombs.

Auf der gesunden Seite tritt die Contraction ein bei:

70 Volts 0,009 Microfarad 0,630 Microcoulomb.

Versuch 31.

KSZ bei 70 Volts, 7 Microfarads und 490 Microcoulombs
ASZ „ 70 „ 5 „ „ 350 „

Versuch 32.

KSZ bei 70 Volts, 6 Microfarads und 420 Microcoulombs
ASZ „ 70 „ 4 „ „ 280 „

Versuch 33.

KSZ bei 70 Volts, 8 Microfarads und 560 Microcoulombs
ASZ „ 70 „ 5 „ „ 350 „

Die Versuche habe ich noch öfters wiederholt. Sie ergaben an verschiedenen Tagen etwas verschiedene Zahlen, wie dies bei täglich wiederholten Versuchen unvermeidlich ist. Ueberall erhellt aber die gleiche Thatsache:

Die Thenarmuskeln im Zustand der completen EAR, reagiren mit träger Zuckung und mit bedeutendem Vorwiegen der Anodenzuckung, sowohl auf einzelne Schläge des Inductionsapparates (Schliessungs- und Oeffnungsstrom), als auf Condensatorenentladungen von grosser Quantität. Die Quantität muss circa 1000 mal grösser sein als bei normalem Muskel. Ebenso reagiren diese Muskeln auf den Strom des Telephoninductors und zwar mit effectvollem Tetanus.

Versuch 34.

Traumatische Lähmung des Radialis am Oberarm. — Leichtere Form der completen EAR in Heilung begriffen. Untersuchung 2 Monate nach der Laesion. Der Radialis reagirt auf Inductionsströme (mit schnellen oder langsamen Unterbrechungen) nicht sicher; die Beobachtung ist aber gestört durch die starken Contractionen der gesunden Muskeln. Dagegen reagirt der Radialis auf galvanische Ströme von 2 Milliampères. Die noch vollkommen gelähmten Extensoren reagiren:

1. Auf die raschen Unterbrechungen des Inductionsstromes bei einem Rollenabstand von 11,5 c. ASZ ganz wenig > KSZ.

2. Auf die langsamen Unterbrechungen des Inductionsstromes schon bei 12,2 c RA. ASZ ebenfalls leicht > KSZ bei gleichem RA.

3. Auf galvanische Ströme, KSZ bei 1,8 MA und 7 Volts.
ASZ „ 1,5 „ „ 5,6 „

4. Auf Condensatorenentladungen bei

Spannung.	Capacität.	Quantität.
70 Volts	0,190 MF	13,300 MC
42	0,900	41,580
28	7,000	196,000

Anodenschliessungszuckung ebenfalls ganz leicht > KSZ.

Der Widerstand ist in diesem Falle circa 4000 Ohms. Galvanisch wirken noch 4 El. resp. 5,6 Volts und doch genügt die grosse Capacität von 7 Microfarads nicht, um die Entladung von 5,6 Volts (galvanisch wirksame) wirksam zu machen.

Die Hauptergebnisse dieser Untersuchungen lassen sich in folgender Weise resumiren:

1. Die Condensatorenentladungen eignen sich sehr gut zur Reizung der Nerven und Muskeln. Dank ihrer kurzen Dauer geben die Entladungen die reine Zuckung ohne Schmerz, ohne electrolytische Wirkungen.

2. Ein Condensator von der Capacität 1 Microfarad gibt die minimale Zuckung bei gleicher Elementenzahl, wie der galvanische Strom.*) Die Wirkung der Entladung ist also die gleiche, wie die des galvanischen Stromes, wenn der Condensator die gleiche Spannung hat, wie der Strom, d. h. wenn die Ladungsquantität so viel Microcoulombs beträgt, als der Strom Volts zählt.

3. Doch gilt dies nur für geringe Voltspannungen, namentlich für die niederste Voltspannung, welche galvanisch die minimale Zuckung gibt. Bei grösserer Voltspannung tritt die Ueberlegenheit des Stromes gegenüber der Entladung wieder hervor, indem der Strom nicht nur bei der Schliessung, sondern auch während seiner Dauer wirkt (Kathodenschliessungstetanus). Die Entladung dagegen ist immer kurzdauernd und kann nicht tetanisiren.

4. Bei geringerer Capacität als 1 Microfarad wird die Wirkung einer Entladung beeinträchtigt. Sinkt sie auf 0,004 Microfarad, so bleibt jede Wirkung aus, auch wenn die Ladungsbatterie eine Spannung von 70 Volts hat.

5. Die Minimal-Zuckung kann bei jeder (galvanisch wirksamen) Spannung eintreten, sowohl bei 7 als bei 70 Volts. Ist die Spannung gross, so darf die Capacität resp. Quantität sehr klein sein. Ist die Spannung geringer, so muss der Condensator mehr Capacität haben, d. h. mit grösseren Quantitäten geladen werden.

6. Die Nothwendigkeit, bei abnehmender Voltspannung die Ladungsquantität zu vermehren, hat ihren Grund in der eigenthümlichen Form der Entladung. Der Verlauf der Ent-

*) Der Vorschlag von Bondet in der Electrotherapie einen Condensator von 1 Microfarad zu benutzen, erweist sich somit als ganz zweckmässig.

ladung bringt es mit sich, dass ein guter Theil der Electricitätsmenge unter zu geringem Potential abfliesst. Je geringer die Voltspannung ist, desto grösser ist die Menge, die physiologisch unverwerthet bleibt.

7. Berechnet man die wirksame Quantität, so zeigt sich, dass der Nerv, resp. Muskel auf eine Quantität von 0,280 bis 0,560 Microcoulomb reagirt.

8. Die Dauer der Entladung ist eine sehr kurze. Bei 70 Volts ist die Dauer 70, bei 9,8 Volts 261 Milliontel Secunden. Die Verlängerung der Dauer von 70 auf 261 genügt, um die Entladung von 9,8 Volts ebenso wirksam zu machen, wie die Entladung von 70 Volts. Beide Entladungen geben die gleiche minimale Muskelzuckung.

9. Kranke Muskeln im Zustande der Entartungsreaction reagiren ebenfalls auf Condensatorenentladungen (mit Vorwiegen der Anodenschliessungszuckung, wenn diese Erscheinung für den galvanischen Strom eintritt). Die Quantität muss aber eine viel grössere sein, als beim normalen Muskel, circa 1000 Mal grösser.

10. Während gesunde Muskeln auf Entladungen reagiren, deren Dauer etwa $^1/_{10000}$ Secunde beträgt, bedarf der kranke Muskel einer Entladungsdauer von circa $^1/_{1000}$ bis $^5/_{100}$.

Es versteht sich von selbst, dass diese Zahlen nur auf unsere Versuche passen und keinen Anspruch auf allgemeine Gültigkeit machen können. Diese Versuche müssen wiederholt und vervollkommnet werden. Ich glaube aber, dass sie geeignet sind, verschiedene für die Physiologie und Electrotherapie wichtige Fragen ihrer Lösung nahe zu bringen. Mein Zweck ist erreicht, wenn es mir gelingt, die Aufmerksamkeit der Collegen auf die Condensatoren zu lenken.