Ueber die elektrische Erregung durch Wechselströme.

Von

J. L. Hoorweg.

(Mit 4 Textfiguren.)

1. Bekanntlich hat Nernst auf Grund der Ionentheorie für die Erregung durch Wechselströme eine Formel gegeben, nach welcher die zur minimalen Zuckung ausreichende Stromintensität der Quadratwurzel der Wechselzahl direct proportional ist, also:

$$i = C \sqrt{n} \dots \dots \dots (1).$$

Zur Controlirung dieser Formel haben Nernst und Barratt im Jahre 1904 in Zeitschrift für Elektrotherapie Band 6 Heft 8 Seite 254 eine Reihe Versuche mitgetheilt, welche nach Meinung dieser Forscher (l. c. S. 259) beweisen, dass „diese Formel mit einer Strenge gilt, wie sie vielleicht für wenige physiologische Gesetze bisher nachgewiesen werden konnte“.

Auf diese Versuche ist jetzt eine neue Reihe von Emil Reiss¹⁾ angestellter Versuche gefolgt, die wiederum die Wahrheit dieses Quadratwurzelgesetzes sonnenklar anzeigen sollen.

Emil Reiss hat meistens wie Zeynek auf die sensiblen Nerven der Finger experimentirt, giebt aber auch Versuche über die directe Reizung der Muskeln, und alle diese Versuche sollen wieder die Wahrheit dieses Gesetzes ins hellste Licht setzen.

Sobald mir die Nernst'sche Formel bekannt war, habe ich sie als unhaltbar bestritten, und zwar aus diesem einfachen Grunde, dass es nach allen bisherigen mit Wechselströmen angestellten Versuchen von d'Arsonval²⁾, v. Kries³⁾, Prevost et Batelli⁴⁾ und anderen hierbei eine Optima-Frequenz giebt, für welche der Nerv oder der Muskel am meisten empfindlich ist. Sowohl für

1) Pflüger's Arch. Bd. 117 S. 582. 1907.

2) Arch. de physiol. norm. et pathol. 1893 p. 401.

3) Bericht der naturf. Gesellsch. zu Freiburg i. B. Bd. 8.

4) Journ. de physiol. et de pathol. générale t. 2 p. 255.

höhere wie für niedrigere Frequenzen nimmt die Empfindlichkeit ab. Die Curve, die das Verhältniss zwischen i und n darstellt, muss also irgendwo einen Beugepunkt B Fig. 1, Curve ABC besitzen, und dieser Beugepunkt fehlt in der Nernst'schen Formel ganz. Die Nernst'sche Formel (1) gibt eine Parabel $OGLH$, nach welcher für zunehmende Werthe von n die Intensität i stetig und gleichmässig anwächst. Ich glaubte, dass eine einfache Vergleichung der wirklichen Curve ABC mit der hypothetischen Curve $OGLH$ genügen würde, die Unhaltbarkeit der Nernst'schen Formel ad oculos zu demonstrieren. Weil aber jetzt wieder diese Formel als die einzige wahre Erregungsformel angepriesen wird, so ist es erwünscht, die betreffenden Versuche einer genauen Prüfung zu unterwerfen.

Fig. 1.

2. Reiss sagt (l. c. S. 587): Reizversuche am motorischen Nerven habe ich nur in geringem Umfange angestellt, weil hierüber bereits exacte Untersuchungen von Nernst und Barratt vorlagen und bringt dann S. 588 die Tabellen derselben nochmals in Abdruck. Es zeigt sich dann, dass alle Versuche von Nernst und Barratt in drei Tabellen zusammengefasst sind, von welcher die erste vier, die zweite sechs und die dritte Tabelle fünf Versuche enthält. In Tabelle III Versuch 3 steht in der Zeitschrift für Elektrotechnik $n = 485$, bei Reiss aber $n = 785$, aber die Constante C ist von Reiss nach $n = 485$ berechnet; also habe ich $n = 785$ wie einen Druckfehler betrachtet und dafür $n = 485$ genommen. Nach diesen Angaben habe ich jetzt die Curven für alle drei Tabellen in Fig. 2 gezeichnet; man sieht dann gleich, dass in Tabelle II der dritte Versuch und in Tabelle III auch der dritte Versuch fehlerhaft ist, dass also von Tabelle II nur fünf und von Tabelle III nur vier Versuche übrig bleiben.

Zeigen nun die gefundenen Punkte irgend eine Neigung, eine Parabel zu bilden? Nein, viel besser schmiegt sich die gerade Linie AB in allen drei Fällen der Lage der Punkte an.

Nun ist ein gewisser Theil jeder Parabel (siehe Fig. 1 der Theil LN) immer recht gut mit einer geraden Linie zu vergleichen. Bloss im Anfange (auf den Theil OG der Curve) zeigt die Parabel

eine deutliche Krümmung. Gerade aber für diesen Theil der Curve, also für kleine Frequenzen, behauptet Nernst, dass seine Formel nicht mehr zutrifft, und hiermit entfällt uns ein wichtiges Mittel, die Genauigkeit der Nernst'schen Formel zu controliren. Die Berechnung der Constante C , wie es Reiss in seiner Arbeit thut, hat wenig Werth; weit besser ist die Vergleichung in der Zeitschrift für Elektrotherapie der beobachteten und der berechneten Stromintensität, und ich gestehe gern, dass für die übergebliebenen Versuche (4 aus

Fig. 2.

Tabelle I, 5 aus Tabelle II und 4 aus Tabelle III) die Uebereinstimmung recht gut ist, behaupte aber, dass die Zahl der Beobachtungen viel zu klein ist, die Gültigkeit des Gesetzes zu beweisen, um so mehr, weil die Untersuchung eine ausserordentlich schwierige ist. Nernst und Barratt sagen (l. c. S. 259), dass „eine Reihe verschiedenartiger Grössen mit grosser Schnelligkeit gemessen werden müsste, was nothwendig eine zufällige Häufung von Versuchsfehlern zu Folge hat“.

Weiter muss man bedenken, dass die Nernst'sche Formel bloss für reine Sinusströme gilt, und es ist zweifelhaft (l. c. S. 256),

ob dieses erreicht ist. Nach den Untersuchungen von G. Weiss¹⁾ mit einem Blondel'schen Oscillograph giebt es nur sehr wenige magneto-elektrische Maschinen, die reine Sinusströme geben.

Auch ist es bedenklich, dass die Stromstärke i nicht direct gemessen aber berechnet wurde aus der Polspannung und dem Widerstand (l. c. S. 257). Der Widerstand des Nerven und des benutzten Flüssigkeitswiderstand wurde nach der Kohlrausch'schen Methode mit einer Walzenbrücke gemessen. Die gefundenen Zahlen aber gelten dann nach Wien²⁾ und Neumann³⁾ bloss für dieselben Wechselströme, mit welchen sie gemessen sind; denn wegen der auftretenden Polarisirung nimmt der scheinbare Widerstand mit der Wechselzahl zu.

Für kleinere Wechselzahl ist also der scheinbare Widerstand kleiner als die gemessenen, und deshalb ist dann die wirkliche Stromstärke grösser als die angegebene, was die Form der Curve stark beeinflussen muss. Das Platiniren schützt nicht vollkommen für diesen Einfluss der Polarisirung.

Alles zusammen genommen kann ich den Versuchen von Nernst und Barratt keinen grossen Werth beilegen.

3. Die später von Reiss im Nernst'schen Laboratorium vollführte Untersuchung umfasst eine viel grössere Zahl von Versuchen und ist mit grosser Sorgfalt unter Anwendung genau geachter Instrumente angestellt.

Bei weitem die meisten Versuche betreffen die sensiblen Nerven der eignen Fingerspitze, was natürlicherweise eine grosse Objectivität des Experimentators erfordert, um so mehr, „weil ein stärkeres Andrücken des Fingers eine etwas grössere Ablenkung am Messapparat verursachte“ (l. c. S. 590).

Auch bei den Reiss'schen Versuchen kommen Fehler bis 10 % vor (l. c. S. 589) und bei den kleinsten Frequenzen entstehen, gleich wie bei den Nernst'schen Versuchen, Abweichungen in einer bestimmten Richtung, die zeigen, dass hierbei die Nernst'sche Formel fehlschlägt. Nernst giebt für diese Abweichungen bei kleinen Frequenzen diesen Grund, dass alsdann die Concentrationswellen von grösserer Länge sind als die Dimensionen des Gefässes. Wir wollen diese Erklärung Nernst's dahinlassen; aber es klingt doch

1) Annales d'Electrobiol. t. 5 p. 206. 1902.

2) Wiedemann's Annalen Bd. 58.

3) Wiedemann's Annalen Bd. 67.

sonderbar, als Reiss behauptet: diese Abweichung selber sei ein neuer Beweis der Wahrheit der Nernst'schen Theorie.

Wenn wir die Zahlen der Reiss'schen Tabellen in Curven abbilden, so finden wir auch hier niemals eine Spur der Parabelform. Immer sind es gerade Linien, in welcher sich die verschiedenen Beobachtungspunkte zusammenreihen. Siehe Fig. 3, wo die oberen Punkte die Zahlen der S. 591 gegebenen Reihe für die Reizung sensibler Nerven, die unteren die der S. 599 gegebenen Reihe für die Reizung curaresirter Muskeln angeben.

In beiden Fällen liegen die gefundenen Punkte ebenso viele Male über als unter der geraden Linie AB . In beiden Fällen steigt

Fig. 3.

die minimale Stromstärke geradlinig mit der Frequenz n der Wechselströme. Von einer Parabel wieder keine Spur.

Auch nicht bei den kleinen Frequenzen von 7—38 pro Secunde.

Hier sieht man bei Reiss statt der Parabel eine in drei separirten Schwingen aufsteigende Curve (Fig. 4) $CDEF$, die jetzt an die Stelle der geraden Linie kommt. Es ist schade, dass Reiss bei seiner Arbeit nicht besser die betreffende Literatur nachgeschlagen hat; denn alsdann hätte Reiss gewiss bei diesen kleinen Frequenzen schärfer nach einem eventuellen Beugepunkt der Curve rundgesehen und diesen vielleicht gefunden. Ich habe nach der Methode der kleinsten Quadrate die betreffende Tabelle Reiss, auf meiner Formel

$$i = an + \frac{b}{n}$$

untersucht und die also gefundenen Punkte in Fig. 4 eingetragen. Sie bilden die Curve $C'D'E'F'$, die sich der beobachteten Curve dicht heranschmiegt und für $n = 13$ einen minimalen Werth erreicht.

Wahrscheinlich ist diese die wahre Curve, zu welcher die Reiss'sche Versuchsreihe sich ohne Beobachtungsfehler nähern würde.

Dass auch bei diesen Versuchen dergleichen Fehler sich vorfanden, kann man nicht widersprechen.

Wie leicht doch kann bei so geringer Geschwindigkeit ein kleiner Fehler in den regelmässigen Gang des Instrumentes eintreten!

Die Stromintensität wurde hier direct mit einem Siemens'schen Spiegelelektrodynamometer gemessen, welches Instrument bekanntlich nicht die gefragte normale Stromstärke, sondern das Quadrat der mittleren Stromstärke des Wechselstromes anzeigt, und nur bei reinen Sinusströmen ist diese mittlere Intensität ein exactes Maass der maximalen Stromstärke. Auf Grund aber der oben genannten Weiss'schen Versuche bezweifle ich, ob hier reine Sinusströme vorlagen.

Fig. 4.

Wenn man weiter die oben gemeldete Thatsache überlegt, dass ein kleinerer oder grösserer Druck des Fingers auf die benetzende Flüssigkeit des Apparates eine Aenderung in der Angabe des Messinstrumentes verursacht, so kann man auch den Reiss'schen Versuchen keinen grossen Werth beilegen.

4. Im Jahre 1901 habe ich ¹⁾ die Erregung durch Wechselströme aus meinem allgemeinen Grundgesetz:

$$\eta = \alpha \int i e^{-\beta t} dt \dots \dots \dots (2)$$

in folgender Weise abgeleitet:

$$\text{setzend: } i = J \sin pt, \text{ wo}$$

$$p = 2\pi n,$$

so findet man die für die minimale Zuckung nothwendige maximale Stromstärke:

$$J = \frac{\eta}{\alpha} \cdot \frac{p^2 + \beta^2}{p}$$

oder

$$J = an + \frac{b}{n} \dots \dots \dots (3),$$

1) Pflüger's Arch. Bd. 85 S. 115.

welche Formel für $n = \sqrt{\frac{b}{a}}$ wirklich einen minimalen Werth erreicht und also viel besser als die Nernst'sche Formel (1) mit der Erfahrung stimmt.

Setzt man mehr allgemein

$$i = A \sin pt + B \cos pt,$$

so erhält man eine Curve, die ganz mit der Form der Curve ABC der Fig. 1 übereinstimmt. Für grössere Werthe von n reducirt sich letztere Formel zu:

$$J = a n + c \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (4),$$

also zu einer geraden Linie, die wie AB in Fig. 2 und 3 in irgend einem Punkt die Y-Achse durchschneidet, und hiermit ist zugleich bewiesen, dass nicht nur die früheren Versuche Einthoven's und Wertheim-Salomonson's, sondern auch die von Nernst und Barratt nebst den von Reiss mit meinem Grundgesetz in Uebereinstimmung sind.

Von den Wertheim-Salomonson'schen Versuchen hat dieser Forscher selber¹⁾ erklärt, dass sie eine kräftige Stütze für die Richtigkeit der Hoorweg'schen Formel sind, und von den Einthoven'schen habe ich selber²⁾ gezeigt, dass auch diese Versuche meine Formel bestätigen, falls man den Einfluss der Dämpfung der angewendeten Wechselströme richtig in Rechnung bringt. Bei den Wertheim-Salomonson'schen Versuchen stieg n von 2449 bis auf 189400, also auf das 77fache; bei den Versuchen Einthoven's stieg n bis auf $1,64-2,29 \times 10^5$.

Die Einwendungen Nernst's (l. c. S. 260) gegen die Salomonson'schen Versuche mit der singenden Bogenlampe stützen sich auf Versuche Simon's mit Eisentransformatoren. Dass hierbei keine reinen Sinusströme auftreten, war schon von Weiss (l. c. S. 206) bewiesen. Die Resonanzmethode von Wertheim-Salomonson ist viel besser und liefert im Secundärkreise auch dann noch reine Sinusströme, als die der primären Kette nicht vollkommen rein waren. Auch die Einwendungen Nernst's gegen die Einthoven'schen Versuche haben keinen genügenden Grund. Bekanntlich waren die von Einthoven angewendeten Ströme gedämpfte Sinusströme von sehr hoher Frequenz, und nun behauptet

1) Pflüger's Arch. Bd. 106 S. 140.

2) Pflüger's Arch. Bd. 91 S. 215.

Nernst, seine Ableitung der Formel 1 gelte nur für ungedämpfte, nicht für gedämpfte. Ich habe aber die Deduction Warburg's¹⁾, aus welcher die Nernst'sche Formel (1) hervorgegangen ist, genau nachgerechnet für gedämpfte Sinusströme, setzend

$$j = a e^{-\beta t} \sin m t \text{ statt} \\ j = a \sin m t$$

und finde dann, dass für sehr grosse Wechselzahlen das Resultat ungeändert bleibt. Also hätten nach der Nernst'schen Anschauung auch die Einthoven'schen Versuche dem Quadratwurzelgesetz Genüge leisten müssen, was nicht der Fall ist.

5. Aus obigen Gründen muss ich unbedingt das Nernst'sche Quadratwurzelgesetz als unhaltbar erklären.

Indessen kann man nicht widersprechen, dass die daran zugrunde liegende Anschauung unsere höchste Aufmerksamkeit verdient.

Es ist Nernst's grosser Verdienst, am ersten die neueren Vorstellungen über die Ionenbewegungen zur Ableitung eines Erregungsgesetzes angewendet zu haben, und ich stimme Reiss gern bei, wenn dieser sagt (l. c. S. 580): „Die grosse Bedeutung dieser Formel liegt darin, dass sie einer Anschauung über das Zustandekommen der elektrischen Reizung lebendiger Gewebe entspringt, die ausserordentlich einfach und folgerichtig ist“, und S. 602: „Auch muss nochmals betont werden, dass es sich nicht um eine empirische Formel handelt, sondern dass sie auf Grund theoretischer Vorstellungen mathematisch abgeleitet wurde.“

Die Worte, die Nernst 1899 in den Göttinger Nachrichten schrieb: „Nach unseren bisherigen Kenntnissen kann der galvanische Strom im organisirten Gewebe, also in einem Leiter von elektrolytischer Natur, keine anderen Wirkungen als Ionenverschiebungen, d. h. Concentrationsänderungen verursachen, woraus ich schliesse, dass letztere die Ursache des physiologischen Effectes sein müssen,“ haben meine volle Sympathie. Selbst habe ich schon vor Nernst, im Jahre 1893²⁾, die Concentrationsänderungen als die vermuthliche Ursache der Erregung angedeutet. In dieser Richtung muss also, auch nach meiner Meinung, die Lösung der Erregungsfrage gesucht werden.

1) Wiedemann's Annalen Bd. 67 S. 496.

2) Pflüger's Arch. Bd. 53.

Weil ich aber unmöglich die Nernst'sche Formel als stichhaltig erkennen könnte, so gelang es mir bis jetzt nicht diese Theorie weiter zu bilden.

Ich wage es jetzt einen Schritt weiter in dieser Richtung zu thun, und will versuchen, aus der Nernst'schen Theorie mein Grundgesetz (2) abzuleiten.

Aus der Deduction Warburg's (l. c. S. 496), auf welche die Nernst'sche Formel (2) sich stützt, sieht man deutlich, dass Warburg nur die Berechnung der Concentrationsänderungen durch Wechselströme zum Zweck hatte, und dass Warburg's Formel für andere als Wechselströme nicht anwendbar ist. Diese Formel ist also nicht allgemein genug. Für unseren Zweck brauchen wir eine Formel, die für jede Art von galvanischer Strömung die betreffenden Concentrationsänderungen angiebt.

Schon lange habe ich auf viele verschiedene Weisen versucht, von der gewöhnlichen Diffusionsformel:

$$\frac{dc}{dt} = k \frac{d^2c}{dx^2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (5)$$

eine Lösung zu finden, die für jede Art von i die betreffende Concentrationsänderung liefern könnte und zugleich allen Conditionen der Frage Genüge leistete.

Es ist mir aber niemals gelungen.

Erst als ich später die mehr allgemeine Diffusionsgleichung:

$$\frac{dc}{dt} + h(c - c_0) = k \frac{d^2c}{dx^2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (6)$$

anwendete, verschwanden auf einmal alle Schwierigkeiten.

Die Gleichung (6) hat dieselbe Form als die, welche von Fourier¹⁾ für die Diffusion der Wärme in einem von allen Seiten von Luft von 0° C. umgebenen dünnen Ring gegeben ist:

$$\frac{dv}{dt} + hv = k \frac{d^2v}{dx^2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (7),$$

wo: k den Coëfficienten der inneren Leitung,

h den Coëfficienten der Oberflächeitung

vorstellt.

Die Gleichung (6) ist auch der von Thomson²⁾ und Stokes

1) Théorie de la chaleur p. 266.

2) Philos. Magazine vol. 11 p. 150. 1856.

für die Bewegung der Elektrizität in einem unterseeischen Kabel, dessen Isolirung nicht vollkommen ist, gefundenen gleich:

$$kc \frac{dv}{dt} + hv = \frac{d^2v}{dx^2}.$$

h ist dann der Coëfficient des durch Leitung der Isolirungssubstanz nach aussen verlorenen Elektricität. Dieselbe Gleichung habe ich¹⁾ später auf die Bewegung der Elektricität in einem Kernleiter angewendet.

Die Gleichung (6) stellt jetzt vor, wie in einem dünnen mit einem Elektrolyten gefüllten und allseitig auch von Elektrolyten umgebenen Faden, falls in einem Punkt desselben durch irgend einen galvanischen Strom Concentrationsänderungen stattfinden, diese Concentrationsänderungen sich über die ganze Länge des Fadens fortpflanzen.

c_0 ist die normale Concentration,

c die zeitliche,

k der innere Diffusionscoëfficient,

h der Oberflächecoëfficient der Diffusion.

Wenn es gestattet ist, diese Gleichung auf die Muskel- und Nervenfasern anzuwenden (und ich glaube, dagegen besteht kein überwiegendes Bedenken), so kann man von der Nernst'schen Theorie, dass alle Erregungen von Concentrationsänderungen herühren, in einfacher Weise zu meinem Grundgesetz

$$\varepsilon = \alpha \iota e^{-\beta t}$$

gerathen.

Eine Lösung der Gleichung (6) ist:

$$c = c_0 + Ae^{-ax} + Be^{-bt} \cos ax \dots \dots (8)$$

wo alsdann:

$$ka^2 = h \text{ oder } a = \sqrt{\frac{h}{k}} \dots \dots (9)$$

und

$$b = 2h \dots \dots (10).$$

Nun muss für x und $t = \omega$, $c = c_0$

und ebenso für x und $t = 0$, $c = c_0$.

Weiter muss (siehe Warburg l. c. S. 495)

$$\text{für } x = 0 \quad \frac{dc}{dx} = -Ei,$$

wo E das elektrochemische Aequivalent der betreffenden Ione.

Also entstehen noch 2 Gleichungen:

$$A + B = 0 \dots \dots (11)$$

$$Aa = Ei \dots \dots (12)$$

1) Pflüger's Arch. Bd. 71 S. 145.

Gleichung (8) wird dann:

$$c = c_0 + Ei \sqrt{\frac{k}{h}} e^{-x\sqrt{\frac{h}{k}}} - Ei \sqrt{\frac{k}{h}} e^{-zht} \cos k \sqrt{\frac{h}{k}}.$$

Setzen wir jetzt nach der Nernst'schen Anschauung

$$\varepsilon = f \frac{dc}{dt} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (13)$$

also die Elementarerregung ε der Concentrationsänderung mit der Zeit direct proportional, so bekommen wir:

$$\varepsilon = f \cdot 2h Ei \sqrt{\frac{k}{h}} e^{-2ht} \cos x \sqrt{\frac{h}{k}},$$

oder wenn man setzt:

$$2h = \beta \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (14)$$

$$2fE \sqrt{k \cdot h} \cos x \sqrt{\frac{h}{k}} = \alpha \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (15)$$

$$\varepsilon = \alpha i e^{-\beta t} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (16),$$

was mit meinem Grundgesetz übereinstimmt. Dass die Constante α von der Entfernung x der untersuchten Stelle zu der gereizten Stelle abhängig ist, wird Niemand befremden. Bei allen meinen Versuchen war x für jede Versuchsreihe constant¹⁾.

Ich betrachte obenstehende Ableitung als eine sehr wichtige, denn erstens werden jetzt alle die zahlreichen Fälle der Erregung, für welche ich bewiesen habe, dass sie aus Formel (16) erklärt werden können, auf Concentrationsänderungen zurückgeführt, und zweitens wird die Bedeutung der Coëfficienten α und β klarer.

Wir können nun noch einen zweiten Schritt in dieser Richtung machen.

Nicht nur hat jeder Strom Concentrationsänderungen zur Folge, sondern auch ist jede Concentrationsänderung eines Elektrolyten eine Quelle von Elektrizität.

In jedem Zersetzungsapparat wird bei Durchleitung eines galvanischen Stromes die Concentration an der Kathode erniedrigt, an der Anode erhöht, und nach Unterbrechung des Hauptstromes entsteht ein Concentrationsstrom in der entgegengesetzten Richtung, der ganz den Charakter eines Polarisationsstroms besitzt. Gleichfalls tritt nach Ostwald an semi-permeablen Membranen eine starke Polarisation auf, die nach Unterbrechung des Hauptstromes einen ziemlich constanten Nachstrom von entgegengesetzter Richtung gibt.

1) Pflüger's Arch. Bd. 114 S. 222.

Oker-Blom¹⁾ und Brünings²⁾ haben die elektromotorische Kraft dieses Nachstromes gemessen und dafür einen Werth gefunden, der mit dem des eignen Stromes des Nerven und des Muskels von derselben Grössenordnung ist (0,053 Volt). Riesenfeld³⁾ und Cremer⁴⁾ haben dieselben Erscheinungen gefunden an den mehr zusammengesetzten Flüssigkeitsketten mit verschiedenen Lösungsmitteln. Man kann also feststellen, dass, wenn in einer Nerven- oder Muskelfaser durch einen galvanischen Strom an einem Punkte Konzentrationsänderungen auftreten, die sich nach Gleichung (8) über die ganze Länge des Fadens fortpflanzen, in jedem entfernten Punkte Konzentrationsänderungen entstehen, die wiederum für sich Elektricitätsbewegung veranlassen müssen. Bei Ableitung zweier verschiedener Punkte muss also am Galvanometer eine Ablenkung entstehen. Also werden die elektrotonischen Ströme erklärt.

Die elektromotorische Kraft dieser elektrotonischen Ströme kann man wie folgt berechnen:

Nach Nernst ist die elektromotorische Kraft jedes Konzentrationsstromes:

$$\pi = f \log \frac{c}{c_0}$$

Nun ist für den stationären Zustand:

$$c = c_0 + Ei \sqrt{\frac{k}{h}} e^{-x} \sqrt{\frac{h}{k}}.$$

Also im Punkte x_1

$$c = c_0 + Ei \sqrt{\frac{k}{h}} e^{-x_1} \sqrt{\frac{h}{k}}$$

und im Punkte x_2

$$c = c_0 + Ei \sqrt{\frac{k}{h}} e^{-x_2} \sqrt{\frac{h}{k}},$$

also:

$$\log \frac{c_1}{c_2} = \log \frac{1 + \frac{Ei}{c_0} \sqrt{\frac{k}{h}} e^{-x_1} \sqrt{\frac{h}{k}}}{1 + \frac{Ei}{c_0} \sqrt{\frac{k}{h}} e^{-x_2} \sqrt{\frac{h}{k}}}$$

1) Pflüger's Arch. Bd. 84.

2) Zentralbl. f. Physiol. Bd. 17. 1903.

3) Inaug.-Dissert. Göttingen 1901.

4) Zeitschr. f. Biol. Bd. 47.

oder nahezu:

$$\log \frac{c_1}{c_2} = \frac{Ei}{c_0} \sqrt{\frac{k}{h}} \left(e^{-x_1 \sqrt{\frac{h}{k}}} - e^{-x_2 \sqrt{\frac{h}{k}}} \right)$$

und also:

$$\pi = f \cdot \frac{Ei}{c_0} \sqrt{\frac{k}{h}} \left(e^{-x_1 \sqrt{\frac{h}{k}}} - e^{-x_2 \sqrt{\frac{h}{k}}} \right) . . . \quad (17).$$

Wir bekommen also einen elektrotonischen Strom, der mit der Intensität des reizenden Stromes zunimmt und um so stärker ist, je weiter die ableitenden Elektroden auseinander liegen, und je dichter die erste ableitende Elektrode sich den reizenden Elektroden nähert; was in Uebereinstimmung ist mit allen physiologischen Versuchen.

Bekanntlich können nach den Untersuchungen Macdonald's¹⁾, Oker-Bloms²⁾ und Bernsteins³⁾ die eignen Ströme der Muskeln und der Nerven als wahre Concentrationsströme betrachtet werden. Später haben Bernstein und Tschermak⁴⁾ dasselbe von den elektrischen Schlägen der elektrischen Fische beweisen. Jetzt können wir schliessen, dass auch alle elektrotonischen Ströme und alle Nachströme höchstwahrscheinlich dieselbe Ursache haben.

Wenn aber jede Concentrationsänderung Erregung zu Folge hat, kann man dann umhin zu schliessen, dass auch jede Erregung Concentrationsänderung und somit auch Bewegung der Elektrizität veranlasst?

Wo ist dann der Unterschied zwischen den elektrotonischen Strömen und den Actionsströme? Hier gelangt man zu einer alten, noch nicht gelösten Streitfrage, deren Behandlung ich mir für eine spätere Arbeit vorbehalte.

1) Proc. Royal Society t. 67 p. 310.

2) Pflüger's Arch. Bd. 84 S. 191.

3) Pflüger's Arch. Bd. 92 S. 527.

4) Sitzungsber. d. Berliner Akademie Bd. 8 S. 301. 1904.