Zur Frage der Nervenenerregung durch Wechselströme hoher Frequenz.

Von

Rich. v. Zeynek und **E. v. Bernd.**

(Mit 21 Textfiguren.)

Unter den Theorien über die Art, in welcher elektrische Ströme den Nerven erregen, ist die von Nernst aufgestellte und kürzlich in diesem Archive¹⁾ näher ausgeführte, dass die an der Nervenwand hervorgebrachten Konzentrationsänderungen die Erregungsursache sind, wohl die einzige Theorie, der eine klare Vorstellung zugrunde liegt.

Nernst hat schon hervorgehoben, dass diese Theorie nicht anwendbar ist auf Einzelreize längerer Dauer, wie Gleichstrom oder einen langsam wechselnden Strom. Es haben dies für sensible Nerven Versuche ergeben, die auf Veranlassung von Nernst zuerst der eine von uns²⁾ im Göttinger physikal.-chemischen Institute ausgeführt hat, während für motorische Nerven schon früher die analogen Beobachtungen von v. Kries³⁾ gemacht worden sind. Seither sind diese Resultate mehrfach bestätigt worden⁴⁾.

Dass der Unterschied in der Wirkung der langsam wechselnden Ströme resp. des Gleichstroms gegenüber den rascheren Schwingungen auf chemische Veränderungen in der Nervensubstanz zu beziehen ist, ist von vornherein sehr wahrscheinlich. Nernst hat in seinen Ausführungen lediglich von einem „Akkommodationsgebiet“ gesprochen. Es sei darauf hingewiesen, dass bei sensiblen Nerven, bei denen die Stromarbeit zur Reizauslösung zweifellos eine geringere ist als bei

1) Pflüger's Arch. Bd. 122 S. 275.

2) Göttinger Nachrichten, math.-physik. Klasse 1899.

3) Verhandl. d. naturforsch. Gesellsch. zu Freiburg Bd. 8.

4) Nernst und Barratt, Zeitschr. f. Elektrochemie 1904. Reiss, Pflüger's Arch. Bd. 117. — Raïssa Golant. Dissertation. Freiburg i. Br. 1908. — Auch Imamura, Arch. f. Anat. u. Physiol. 1901.

motorischen Nerven, auch das Akkommodationsgebiet ein kleineres ist, indem (nach unserer Vorstellung) bei dem geringen Potentialabfall im Nerven elektro-chemische Nebenwirkungen vermindert werden; ferner dass das Akkommodationsgebiet mit der Temperatursteigerung zunimmt.

Abgesehen von den angeführten Stromarten hat sich aber das Nernst'sche Gesetz für periodische elektrische Schwingungen und für Stromstösse konstanter Intensität glänzend bestätigt.

Ob das Gesetz für sehr rasche Stromwechsel seine Gültigkeit behält, lässt sich aus den vorliegenden Versuchen nicht entscheiden; Nernst selbst bezeichnete es als nicht unwahrscheinlich, dass bei zunehmender Frequenz des Wechselstromes dieser unverhältnismässig an Wirksamkeit zur Nervenirregung einbüsst. Versuche, die Zeynek (a. a. O.) mit Teslaschwingungen ausgeführt hat, haben recht unregelmässige Resultate gegeben. Nernst und Barratt berichten (a. a. O.) ähnliches über Versuche mit Wechselströmen, die ein sogen. singender Lichtbogen lieferte. Inzwischen sind mehrfach Reizversuche mit hochfrequenten Wechselströmen ausgeführt und für und gegen einzelne Nervenreizungstheorien herangezogen worden. Die Versuche haben kein übereinstimmendes Resultat gegeben, daher scheint es wünschenswert, durch neue Versuche zur Klärung der Frage beizutragen.

Über vorliegende Erfahrungen sei folgendes angeführt.

Schon Tesla¹⁾ hatte versucht zu erklären, warum hochfrequente Ströme weitaus besser vom Organismus vertragen werden als Ströme niederer Frequenz, die unter Umständen bei der gleichen Stromstärke lebensschädigend wirken. Er nimmt an, dass entweder die Ströme sich im Körper verschieden verteilen, oder dass die Gewebe wie Kondensatoren wirken; bei Verwendung von Induktionsspulen mit sehr vielen Windungen schliesslich käme die geringe nutzbare Energie in Betracht.

In einem zweiten, von Tesla revidierten Buche²⁾ sind die physiologischen Effekte dieser Ströme eingehend besprochen, auch die Meinungen anderer Autoren zitiert, die zum Teil dahin gehen,

1) Th. C. Martin, N. Tesla's Untersuchungen, deutsche Ausgabe. Knapp's Verlag, Halle.

2) Fodor, Experimente mit Strömen hoher Wechselzahl. Hartleben.

dass die Raschheit der Schwingungen keine Reaktion der nervösen Organe mehr auslöse.

Korthals¹⁾ bezieht die Unwirksamkeit der Ströme auf die Kapazität des Körpers, ähnlich E. T. Houston auf die Konzentrierung dieser Ströme auf der Oberfläche des Leiters.

Während hier von den meisten Autoren angenommen wurde, dass diese hochfrequenten Ströme an der Oberfläche des Leiters bleiben, hatte d'Arsonval erkannt, dass sie in das Innere des Körpers gelangen, und dass kein prinzipieller Unterschied in ihrer Wirkung gegenüber den langsamer schwingenden Strömen besteht. d'Arsonval war der Ansicht, dass die hochfrequenten Ströme nicht nerven-erregend wirken, weil die Nerven nur auf bestimmte Wellen reagieren. Eine Analogie davon böte das Auge. „Chaque ordre de nerfs obéit à des fréquences déterminées qui ne sont pas les mêmes, par exemple, pour les nerfs musculaires que pour les nerfs vasculaires“²⁾.

Gegen diese Annahme hätte der Einwand gemacht werden können, dass in der damaligen Zeit nicht genügend starke Ströme zur Erzielung von Reizwirkungen zur Verfügung standen.

Obwohl weiterhin Nernst im Jahre 1897 den direkten Beweis³⁾ erbracht hatte, dass die ersterwähnten Erklärungen unrichtig sind, da bei hochfrequenten Schwingungen kein Auseinanderdrängen der Stromlinien in den organischen Geweben stattfinden kann, so dass die geringe physiologische Wirkung solcher Ströme nicht auf ihre Verteilung an der Körperoberfläche bezogen werden kann, mögen nicht gar viele Physiologen die Wichtigkeit dieses Beweises und der Erfahrungen d'Arsonvals erfasst haben. So finden wir, dass mehrere Jahre später Einthoven⁴⁾ durch Rechnung das gleiche Resultat verkündet, und auch Einthoven's Mitteilung scheint nach unseren Erfahrungen bei vielen Physiologen und Physikern nicht anerkannt worden zu sein. Hierbei kommt wohl in Betracht, dass die glänzenden Demonstrationen mit Teslaströmen und die zu denselben gegebenen Erklärungen bei allen, welche nicht selbst mit solchen Strömen gearbeitet haben, nachhaltig in Erinnerung blieben.

1900 erschien eine Mitteilung Einthoven's (l. c.) über Nervenreizung mit frequenten Wechselströmen, im Anschlusse daran eine

1) Elektrotechnische Zeitschrift 1892.

2) Annales d'Electrobiologie 1898 p. 28.

3) Wiedemann's Annalen S. 60.

4) Pflüger's Arch. Bd. 82 S. 131. 1900.

Dissertation seines Schülers Moermann über das gleiche Thema. In diesen Abhandlungen wurde ausgesprochen, dass hochfrequente Wechselströme eine Nervenreizung bewirken können. Besondere Sorgfalt war auf die genaue Berechnung der Wechselstromfrequenz gelegt. Es finden sich aber nur wenige Zahlenwerte über die zur Nervenregung notwendige Stromstärke mitgeteilt, im wesentlichen sind es folgende Vergleichswerte, bei denen die zur Nervenregung des Nervmuskelpreparates notwendige Stromstärke eines aufsteigenden Gleichstroms = 1 gesetzt wurde:

Für die Wechselzahl pro Sekunde von $8,8 \times 10^5$, $2,0 \times 10^5$, $6,6 \times 10^4$
 Stromstärke an der Reizschwelle 16 250, 2020, 360

Andere Versuchsergebnisse werden mehr beiläufig mitgeteilt, so z. B., dass bei einem anderen Präparate vergleichsweise statt des Wertes 16 250 . . . 10 530 (von uns aus den in der Abhandlung gegebenen Verhältniszahlen berechnet) gefunden wurde.

Der Wert 16 250 entspricht einer mittleren Stromstärke von $9,66 \times 10^{-3}$ A.; bei einer Temperatur des Nerven von 1° wurde die Reizstromstärke zu $5,53 \times 10^{-3}$ A., bei 24° zu $28,1 \times 10^{-3}$ A. gefunden.

Diese Differenzen sind wohl imstande, einen Zweifel zu begründen, ob diese Versuche im Sinne Einthoven's zu verwenden seien, zumal die breitere Darstellung der Versuchsergebnisse in Moermann's Dissertation auf ähnliche regellose Schwankungen der Versuchsergebnisse hinweist. Auch Nernst und Barratt (l. c.) haben die Ergebnisse Einthoven's als offenbar rein zufälliger Natur erklärt und darauf hingewiesen, dass Nernst und Zeynek sich schon klar waren, oszillatorische Entladungen von Leydner-Flaschen seien zur Prüfung einer Nervenreiztheorie zunächst ungeeignet.

Wenn schon bei der Reizung sensibler Nerven am Lebenden Unregelmässigkeiten in der Wirkung dieser Ströme aufgefallen sind, die als Superpositionen aufgefasst werden mussten, um so mehr Irrtümern ist der Versuch mit dem Nervenmuskelpreparate ausgesetzt, wo keine Kontrolle unregelmässiger Stromwirkungen möglich ist. Daran ändert nichts, dass Einthoven in einer späteren Arbeit gefunden hat, dass der Grad der Dämpfung von Oszillationsstössen bei einer Wechselfrequenz von $\frac{2 \times 10^5}{\text{Sek.}}$ keinen Einfluss mehr auf die Grösse der erregenden Wirkung habe.

Schliesslich ist noch eine Arbeit von Wertheim-Salomonson¹⁾ hervorzuheben, welcher, die Erfahrungen neuerer Methodik anwendend, die Gefahren der ausserordentlich hohen Spannungen für solche Versuche vermieden hat. Er verwendete die „Resonanzmethode“ zur Bestimmung der Schwingungszahl und nahm die zu den Reizversuchen verwendeten Ströme durch Lufttransformation ab, so dass auch dadurch eine Reihe verschiedener störender Schwingungen entfernt worden sind. Doch hebt er selbst hervor, dass der von ihm zur Gewinnung der hochfrequenten Ströme verwendete Lichtbogen keine konstante, sondern eine periodisch wechselnde Lichtintensität aufwies. Wertheim's Versuche sind nicht auf Stromstärken berechnet, sondern enthalten nur die auf verschiedene Weise berechneten Potentialdifferenzen, die jedoch untereinander vergleichbar sind. Wir haben die zugehörigen Stromstärken berechnet unter der wohl zulässigen Voraussetzung, dass der Widerstand der Nerven auch bei hochfrequenten Wechselströmen keine Änderung erfährt. Werden diese Stromstärken und die zugehörigen Wechselzahlen in Kurvenform dargestellt, so ergeben sich (selbst weitgehend interpoliert) Kurven, auf deren Natur nicht näher eingegangen werden mag, da die einzelnen Werte keine Proportionalität zeigen²⁾. In Pflüger's Archiv Bd. 117 S. 602 hat übrigens auch Nernst schon Bedenken gegen die Resultate Wertheim-Salomonson's vorgebracht.

Es ist noch hervorzuheben, dass Wertheim mit steigender Wechselzahl eine der Wechselzahl proportionale Stromzunahme für die Nervenregung erwartet (im Koordinatensystem eine Gerade) und geringere erhaltene Werte auf die Erhöhung der Nervenregbarkeit durch Wärme zurückführt, während Einthoven eine bedeutende Abnahme der Nervenregbarkeit in der Wärme konstatiert, abgesehen davon eine weitaus grössere Zunahme der Stromstärke mit zunehmender Wechselzahl.

1) Pflüger's Arch. Bd. 106. 1905.

2) Zur Berechnung wurden die Werte von Tabelle II, IV, VI, VII, VIII verwendet. In der am Schlusse S. 140 gegebenen Berechnung ist vermutlich durch die Kumulierung zweier Versuche ein Rechenfehler unterlaufen, indem statt $17,85:49800$ wohl $17,85:42200 = 42,3$ Mikroampère zu setzen wäre. Dadurch würde die Wattmenge um ca. 20% zunehmen. Betreffend die Berechnung des Froschnervengewichts, welches mit dem in Einthoven's Arbeit angenommenen übereinstimmt, dürfte ein Irrtum vorliegen. Herr Prof. Einthoven war so freundlich mitzuteilen, dass der von ihm angenommene Wert infolge eines Schreibfehlers um das Zehnfache zu gross angegeben wurde.

Nach diesen vorliegenden sich widersprechenden Untersuchungsergebnissen schien es wohl wünschenswert, durch neue Erfahrungen zur Klärung der Frage nach der Wirkung hochfrequenter Ströme auf die Nerven beizutragen. In den letzten Jahren sind die Methoden des Arbeitens mit Hochfrequenzströmen, insbesondere durch die Fortschritte der drahtlosen Telegraphie derart ausgebildet worden, dass mit weit grösserer Sicherheit als früher derartige Versuche ausgeführt werden können. Seit einer Reihe von Jahren sind wir überdies mit der Verwendung solcher Ströme zu medizinischen Zwecken beschäftigt, vorwiegend im Sinne der von Zeynek im Jahre 1899 gemachten Mitteilung¹⁾. Für die Möglichkeit, zu unseren Versuchen die Präzisionsapparate des Wiener elektrotechnischen Institutes benutzen zu können, sind wir Herrn Hofrat Professor Dr. Hohenegg, für sein lebenswürdiges Interesse an unseren Arbeiten und die vielfachen Ratschläge insbesondere Herrn Professor Dr. Reitthofer zu besonderem Danke verpflichtet.

A. Versuche an sensiblen Nerven.

Diese Versuche wurden in analoger Weise durchgeführt, wie seinerzeit von Zeynek im Göttinger physikal-chemischen Institute, nachdem wir vergeblich versucht hatten, die Zunge oder Schleimhautpartien des Mundes einwandfrei als Reizobjekt zu verwenden. Als Versuchsobjekt dienten also zwei benachbarte Finger, welche mit Wasser und Seife gut gewaschen, in zwei bis zu einer Marke mit physiologischer Steinsalzlösung gefüllte Gläschen gehalten wurden. Die Seitenflächen der Gläschen waren mit Kupferblechen ausgekleidet, und letztere standen mit der Stromquelle in Verbindung. Es wurde auf die Einhaltung aller Vorsichtsmaassregeln, welche Zeynek schon angegeben hat, besonders geachtet, ferner darauf, dass keine Ermüdung der Arme eintrat, und dass kein Druck auf die Finger ausgeübt wurde. Auch die Ermüdung des Gehirns darf bei anhaltenden Arbeiten nicht übersehen werden!

Vor den Versuchen mit Hochfrequenzströmen und zwischen denselben wurde immer ein Reizversuch mit Strömen niedrigerer Frequenz, welche von einer Wechselstromsirene geliefert wurden, durchgeführt, damit eine Vergleichsbasis für die Stromwirkung erhalten werde.

Gleich anfangs hat sich bei diesen Versuchen herausgestellt, dass die Finger des einen von uns (v. Bernd) weitaus weniger

1) Göttinger Nachrichten.

empfindlich waren als die des anderen. Es war gegenwärtig nicht zu entscheiden, ob diese Unempfindlichkeit von vornherein vorhanden war oder auf vielfache Hautläsionen infolge seines vierjährigen fast kontinuierlichen Arbeitens mit Hochfrequenzströmen zurückzuführen sei. Daher wurden die Versuche an den Fingern Zeynek's ausgeführt.

Die Versuchsanordnung ergibt sich aus Fig. 1. Es sind in dieser Figur die Stromkreise *I*, *II* und *II_a* zu unterscheiden. *J₁* bedeutet eine Wechselstromsirene der Firma Edelmann, München, welche die relativ wenig frequenten Wechselströme (näherungsweise

Fig. 1.

Sinusströme von $n=500-1500$: Sekunden) liefert, *D* ist ein aus Isolationsmaterialien gebautes (wirbelstromfreies), gut gedämpftes Dynamometer, dessen innere Spule mit dem Kommutator *c* kommutierbar ist, *a* ist ein Ausschalter des Stromkreises, *d₁* und *d₂* sind Drosselspulen, *w* ein regulierbarer Borsäure-Mannitwiderstand mit gut platinieren Platinen Elektroden, *b* die Gefäße zur Aufnahme der Finger.

Stromkreis *II_a* enthält den Hochfrequenz-Wechselstromgenerator *J₂*, durch Lufttransformation werden die im Stromkreis *II* gebrauchten Ströme dem Stromkreise *II_a* durch die Spulen *s_a* resp. *s* entnommen. Im Stromkreise *II* ist ein Hitzdrahtampermeter *h* und ein Kondensator *k*, welcher nur den Übertritt von Strömen niederer Frequenz in diesen Stromkreis hindert, ebenso wie die Drosselspulen *d₁*, *d₂*

den Eintritt von Hochfrequenzströmen in den Stromkreis I verhindern. Durch Nähern und Entfernen der Spulen s und s_a konnte die Intensität der Versuchsströme geändert werden.

Durch die geschilderte Anordnung war es möglich, in rascher Folge die Versuche durchzuführen und fast unmittelbar vom hochfrequenten zum niederfrequenten Strome und umgekehrt überzugehen.

Von Hochfrequenzströmen haben wir solche mit gleichbleibender Amplitude, also ungedämpfte Schwingungen verwendet, in der Befürchtung, dass der stark gedämpfte, den Nerven nicht mehr erregende Stromanteil doch bei längerer Einwirkung eine Alteration des Nerven bewirken könne. Wir bedienten uns zur Erzeugung der Hochfrequenzströme einer etwa nach der Poulsen'schen Anordnung konstruierten, mit Gleichstrom gespeisten Lampe, der Stromkreis war durch eine variable Kapazität und eine unveränderliche Selbstinduktion geschlossen.

Von diesem Kreise haben wir zuerst durch „lose Kuppelung“, wie schon erwähnt, die Versuchsströme abgezweigt, indem die Sekundärspule s der Selbstinduktion s_a so lange genähert wurde, bis ein leichtes Prickeln in den Fingern gespürt wurde; gleichzeitig wurde der Ausschlag des Hitzdrahtinstrumentes abgelesen. Ein einzelner Versuch dauerte kaum 3 Sekunden. Die Frequenz der elektrischen Schwingungen haben wir für diese Versuche aus Kapazität und Selbstinduktion berechnet, letztere nach der Coffin'schen Formel (nb. die Berechnung nach Rayleigh gab einen fast genau gleichen Wert). Eine derartig gewonnene Versuchsreihe sei hier mitgeteilt.

Tabelle I.

Wechselzahl $n/\text{Sek.}$	Ampère zur Nervenenerregung	Wechselzahl $n/\text{Sek.}$	Ampère zur Nervenenerregung
751	$5,32 \times 10^{-4}$	88 600	0,070
1 127	$5,89 \times 10^{-4}$	639	$4,95 \times 10^{-4}$
70 800	0,043	939	$5,75 \times 10^{-4}$
88 600	0,075	94 500	0,078
112 000	0,115	145 000	0,120
902	$5,61 \times 10^{-4}$	751	$5,1 \times 10^{-4}$
620	$4,89 \times 10^{-4}$	1 127	$6,53 \times 10^{-4}$
79 100	0,05		

Diese Werte entsprechen betreffend die Versuche mit den wenig frequenten Wechselströmen vor und nach den Hochfrequenzversuchen den Werten der Nernst'schen Kurve, soweit es von solchen Ver-

suchen erwartet werden kann. Grössere Abweichungen zeigen nur die beiden letzten Werte, jedoch sind diese Abweichungen nicht gleichsinnig. Da es für uns von Interesse war, ob die länger dauernde Einwirkung der hochfrequenten Ströme Veränderungen in der Empfindlichkeit der Nerven hervorbringt, haben wir solche Versuche mehrfach und in der verschiedensten Reihenfolge der Stromfrequenzen wiederholt, konnten aber in Anbetracht der Differenzen, welche unvermeidlich sind, zu keinem ganz verlässlichen Resultat kommen. Die Aufzählung der letzteren Versuche ist für die Aufgabe dieser Arbeit ohne Wert.

Betreffend die Versuche mit hochfrequenten Strömen zeigt diese Tabelle, dass zwar die nervenerregenden Stromstärken mit der Wechselfrequenz zunehmen, doch sind gegenüber einer erwarteten Proportionalität immerhin nicht unbeträchtliche Differenzen vorhanden. Mit Beziehung auf die Nernst'sche Theorie ergeben sich diese Werte weitaus grösser als erwartet; für $n=100\,000$ würde eine Stromstärke von nur 0,0054 A aus der Nernst'schen Gleichung berechnet.

Zweifellos kommen für die mitgeteilte Versuchsreihe mehrfache Fehlerquellen in Betracht. Abgesehen davon, dass die Berechnung der Frequenz aus der Kapazität und der Selbstinduktion nur zur groben Orientierung geeignet ist und keine genauen Werte gibt, war bei diesen Versuchen, sobald dem Stromkreise *IIa* beträchtliche Strommengen entnommen wurden, die Koppelung dieses Stromkreises mit dem Stromkreis *II* keine so extrem lose, dass nicht eine Rückwirkung auf die ursprünglich vorhandene Wechselfrequenz erfolgt wäre; ferner kommen sicher mehrere Schwingungen nebeneinander vor. Schliesslich sind, wenn auch unsere Einrichtung keine wesentlichen Differenzen in den Stromamplituden bei ruhigem „Lampengang“ erwarten liess, doch kurzdauernde Intermissionen nicht ausgeschlossen. Letztere Fehlerquelle konnten wir nicht ausschliessen. Die erstgenannten glauben wir in folgender Weise beseitigt zu haben, indem wir die schon von Wertheim-Salomonson versuchte Resonanzmethode weiter ausgebildet haben.

Es standen uns zwei sog. Wellenmesser der Gesellschaft für drahtlose Telegraphie zur Verfügung. Über den die unreinen Schwingungen liefernden Primärkreis kam eine Selbstinduktionsspule eines Wellenmessers, welcher, wie Fig. 2 zeigt, noch mit einer zweiten Spule armiert war. Die Resonanz wurde an einem elek-

trischen gekoppelten Hitzdrahtinstrument abgelesen. Über jener Spule, welche vom Primärstromkreis entfernt war, befand sich eine Spule der Strombahn eines zweiten Wellenmessers, welcher analog auf Resonanz eingestellt wurde. Von dieser Spule wurde der Strom durch Luftkoppelung entnommen. Herrn Ingenieur Medinger sind wir für die liebenswürdige Überlassung der sorgfältigen Eichungskurven für beide Instrumente zu besonderem Danke verpflichtet.

Bei den Versuchen gingen wir so vor, dass zuerst bei Entnahme des ungefähr notwendigen Stromes, indem zwei Finger der zu den eigentlichen Versuchen nicht verwendeten Hand eingeschaltet wurden, das ganze System in das Resonanzgleichgewicht gebracht

Fig. 2.

wurde. Dabei waren begreiflicherweise diese Finger eventuellen Insulten ausgesetzt. Erst wenn die richtige Einstellung der beiden Wellenmesser auf scharfe Resonanz ermittelt war, wurden zwei Finger der Versuchshand eingeschaltet, und gleichzeitig wurde die Reizstromstärke abgelesen.

Durch diese allerdings komplizierte Anordnung konnten wir erwarten, so gut wie alle Nebenschwingungen ausgeschaltet zu haben und nur mit einem ungedämpften, reinen Sinusstrom von jeweilig bestimmter Frequenz zu arbeiten. Durch den Grad der Übereinstimmung in den Angaben der Wellenmesser wurde eine sichere Kontrolle der Wechselzahl gegeben. Das „Stromgefühl“ liess sich immer auf ein ganz geringfügiges Prickeln einstellen.

Auf diese Weise erhielten wir folgende Werte.

Tabelle II.

Frequenz bestimmt in		Reizstromstärke in Ampère
Wellenmesser I	Wellenmesser II	
$2,46 \times 10^5$	$2,48 \times 10^5$	0,135
$2,46 \times 10^5$	$2,48 \times 10^5$	0,175
770 ³⁾	—	$4,6 \times 10^{-4}$
$3,03 \times 10^5$	$3,00 \times 10^5$	über 0,2, Schwelle nicht erreichbar
$2,61 \times 10^5$	$2,69 \times 10^5$	über 0,15, es konnte nicht mehr Strom entnommen werden
$2,83 \times 10^5$	$2,86 \times 10^5$	0,115
$2,60 \times 10^5$	$2,65 \times 10^5$	0,17
$2,03 \times 10^5$	$2,2 \times 10^5$ ¹⁾	0,054
nicht berechnet	$4,38 \times 10^5$	über 0,2, Schwelle nicht erreichbar
do.	$6,95 \times 10^5$	do.
do.	$1,15 \times 10^5$	do.
$1,23 \times 10^5$	$1,44 \times 10^5$ ¹⁾	0,110
$1,23 \times 10^5$	$2,24 \times 10^5$ ²⁾	0,09
nicht notiert	$2,29 \times 10^5$	über 0,15, Schwelle nicht erreichbar
1165 ³⁾	—	$6,16 \times 10^{-4}$

Wir glauben, dass diese Versuchstabelle, verglichen mit der S. 27 gegebenen keinen Kommentar erfordert: in jenen Fällen, wo auf scharfe Resonanz eingestellt werden konnte, wie es die Übereinstimmung der Frequenzwerte in beiden Wellenmessern ergibt, waren die Schwellenwerte in den meisten Fällen überhaupt nicht erreichbar; wenn eine Nervenreizung entstand, so folgten die erhaltenen Zahlenwerte nicht irgendeiner Gesetzmässigkeit, sondern waren ganz unregelmässig. In jenen Versuchen, bei denen keine scharfe Resonanz erzielt wurde, sind dagegen die Reizstromstärken weitaus niedriger gefunden worden.

Daraus glauben wir folgern zu dürfen, dass die erhaltenen Reizeffekte auf anderes als auf die Wirkung der schnell schwingenden Sinusströme von gleicher Amplitude bezogen werden müssen.

In erster Linie denken wir an die Wirkung der schon erwähnten, möglichen Stromintermissionen. Wir glauben beobachtet zu haben, dass bei unruhigem Brennen der Lampe, bei welchem das geringfügige, gleichmässige, surrende Geräusch stärker wird — und dies trat gelegentlich infolge der enormen Belastung der Apparatur zu Beginne eines Versuches ein —, auch ein deutliches Prickeln in den

1) Maximum unscharf.

2) Oberton.

3) Strom der Wechselstromsirene.

Versuchsfingern auftrat. Um den Einfluss gröberer Stromänderungen zu erfahren, haben wir zwei Arten von Versuchen ausgeführt.

Bei möglichst geringem und gleichmässigem Lampensurren wurde der Strom rasch durch einen Ausschalter unterbrochen und gleich wieder geschlossen. Dies erfolgte so rasch, dass im Hitzdrahtamperemeter sich keine beträchtliche Änderung des Ausschlages zeigte. Während der Strom sonst unfühlbar war, wurde er sowohl bei der plötzlichen Unterbrechung wie bei der Schliessung recht heftig gefühlt — kurze Zeit nach der Schliessung war das Prickeln wieder verschwunden. Wir trachteten die Reizstromstärke für diesen Fall zu ermitteln. Sehr genau konnten allerdings diese Versuche nicht werden, da von dem Ampèremeter bei häufigen Unterbrechungen doch nicht die volle mittlere Stromstärke angezeigt wird. Zum Beispiel wurde bei der Wechselfrequenz $n = 2,29 \times 10^5$ bei ruhigem Lampengang eine Stromstärke von mehr als 0,15 A. nicht empfunden, bei einer zwei- bis dreimal in der Sekunde erfolgten raschen Unterbrechung und Schliessung wurde dagegen ein Strom von 0,08 A. ziemlich stark empfunden. Die mittlere Stromstärke dürfte 0,1 A. betragen haben. Durch die dreimalige Luftkoppelung mittels zweier auf nur eine Schwingung eingestellter Systeme sind grosse Änderungen in der Wechselzahl ausgeschlossen. Wenn auch nicht ziffernmässig genau, so ist das Resultat doch eindeutig, dass die plötzlichen Unterbrechungen eine Empfindung auslösten.

Auf eine zweite Art lässt sich eine Empfindung auslösen, wenn die Spule *s* (Fig. 2) rasch, bei nicht empfundenem, relativ grossem Hochfrequenzstrom, von der Spule des Wellenmessers II entfernt oder ihr rasch wieder genähert wird. Jedesmal tritt da das „Stromgefühl“ auf, wenn auch der Versuchsstrom weitaus nicht die bei gleichmässigem Strom noch nicht empfundene Stromstärke erreicht hat. Bei dieser Versuchsanordnung fallen die oben geäusserten Bedenken einer Frequenzänderung insofern weg, als zwar bei der Annäherung der Spule (*s*) eine Verminderung der Wechselzahl des Versuchsstroms eventuell behauptet werden könnte, bei der Entfernung der Spule (*s*) die Wechselzahl nur steigen könnte.

Ob bei Versuchen, wie sie hier beschrieben sind, auch elektrostatische Ladungen in Betracht gezogen werden müssen — wie bei den hochgespannten Teslaströmen —, können wir nicht entscheiden. Eine deutliche einpolige Wirksamkeit wurde nicht beobachtet.

Beim Überschlagen von Funken infolge eines schlechten Kontaktes können sehr starke Nervenreize ausgelöst werden.

Durch diese Erfahrungen kommen wir zu dem Schlusse, dass gleichmässige Sinusschwingungen einer Frequenz von ca. 10^5 /Sek. keinen Nervenreiz mehr ausüben, dass jedoch Stromschwankungen empfunden werden.

Es scheint uns noch der Einwand möglich, dass die Reizschwelle bei viel höheren Stromstärken liege; ihn können wir durch den direkten Versuch nicht entkräften, da unsere Apparatur einerseits auf das äusserste beansprucht war, bei Überschlagen von Funken in den Kondensatoren natürlich heftige Reizerscheinungen auftreten, eine Deformierung der Spulen, die bei den Versuchen sich stark erwärmen, die Eichung illusorisch gemacht hätte, andererseits aber (und dies bestimmte uns, nicht auf leistungsfähigere Apparate zu reflektieren) eine Steigerung der Ströme sich durch die drohende Gefahr einer Schädigung der Gewebe durch die Hitzewirkung verbot; zum mindesten ist bei länger dauernden Versuchen mit höheren Stromstärken das subjektive Wärmegefühl ein beängstigendes.

Es schien aber doch eine gefahrlose Prüfung dieses Einwandes möglich, von folgender Erwägung ausgehend.

Wenn die hochfrequenten, ungedämpften Sinusströme tatsächlich Nervenreize bewirken können, und nur die Reizschwelle nicht erreicht wurde, so müssen sich ihre Wirkungen bei gleichzeitiger Verwendung von weitaus langsamer schwingenden Wechselströmen, deren Stromstärke auch unterhalb der Reizstromstärke liegt, so addieren, dass bei bestimmten Stromstärken die Reizschwelle erreicht wird. Die Gestalt der Stromkurve wäre eine übersichtliche: Die Kurve wird die doppelten Konturen des langsam schwingenden Stromes zeigen, die Entfernung der Konturen entspricht der Amplitude des hochfrequenten Stromes. Diese Anordnung hätte den Vorteil, dass die Hochfrequenzapparate nicht überlastet zu werden brauchen, und dass durch die extrem lose Koppelung der Systeme bei der erwarteten geringen Stromentnahme wesentliche Änderungen in der Schwingungsfrequenz nicht zu befürchten sind.

B. Versuche an sensiblen Nerven mit Superposition eines langsam schwingenden und eines hochfrequenten Wechselstromes.

Wird die mittlere Stromstärke des langsam schwingenden Stromes A_1 , die des Hochfrequenzstromes A_2 betragen, so ist die des resul-

tierenden Stromes $\sqrt{A_1^2 + A_2^2}$. Da die zur Nervenreizung notwendigen Stromstärken des niederfrequenten Stromes gering sind im Verhältnis zu jenen des hochfrequenten Stromes, so wird die resultierende Stromstärke im wesentlichen A_2 betragen. Zur Ausführung der Versuche ist die in Fig. 1 beschriebene, mit der Hochfrequenzeinrichtung, welche Fig. 2 zeigt, kombinierte Einrichtung geeignet.

Vorerst wurde der Reizschwellenwert für den langsamen Wechselstrom gesucht, dann auf die Empfindung des Hochfrequenzstromes allein geprüft, hierauf wurde der langsame Wechselstrom in einer noch nicht nervenreizenden Stromstärke eingeschaltet und soviel Hochfrequenzstrom zugegeben, bis ein Stromgefühl gefühlt wurde. Die Resultate zeigt die Tabelle III, n bedeutet die Wechselzahl, A die Stromstärke in Amp., $a. u.$ = allein unfühlbar, $u.$ unfühlbar.

Tabelle III.

Niedere Frequenz		Hohe Frequenz	
n	$A \times 10^{-4}$	$n \times 10^5$	A
665	4,57	—	—
—	—	3,36	0,15 <i>u.</i>
—	—	3,49	0,15 <i>u.</i>
665	<i>a. u.</i> 4,33	3,49	0,048
665	<i>a. u.</i> 3,63	3,49	0,09
665	4,57	—	—
—	—	2,42	0,15 <i>u.</i>
665	<i>a. u.</i> 4,04	2,42	0,085
665	<i>a. u.</i> 3,73	2,42	0,066
665	4,41	—	—
564	3,05 ¹⁾	—	—
564	<i>a. u.</i> 3,00	2,29	0,09
—	—	2,29	0,15 <i>u.</i>
1127	4,2	—	—
1127	<i>a. u.</i> 4,0	2,29	0,06

Diese Versuche zeigen keine Gesetzmässigkeit; im Sinne irgend-einer Nervenreiz-Theorie sind sie sicher nicht zu verwenden, obwohl sie sicherlich übersichtlicher und mit besser definierbaren Strömen ausgeführt sind als alle bisher publizierten Versuche. Wir glauben, dass in den positiven Resultaten die Pausen in der Stromlieferung seitens der Lampe zum Ausdruck kommen, d. h. dass Schwankungen im Hochfrequenzstrom bei der Überlagerung von langsamem Wechselstrom besser empfunden werden. Es ist merkwürdig, dass diese mit besonderer Sorgfalt ausgeführten Versuche Resultate, welche einander derart widersprechen, gegeben haben, um so mehr, als andere Versuche, die bei der geringsten Lampenbelastung mit unreinen

1) Leicht verätzte Haut.

Strömen ausgeführt worden waren und zu unserer ersten Orientierung haben dienen sollen, ein positives Resultat uns vortäuschten.

Es sei uns gestattet, einige derartige Versuche hier mitzuteilen, um anderen, welche sich für diese Fragen interessieren, vergebliche Versuche oder direkt Irrtümer durch nur zufällig stimmende Werte zu ersparen.

Bei den im folgenden mitgeteilten Versuchen wurden direkt die Stromkreise, wie Fig. 1 sie zeigt, verwendet. Es kam nur eine Selbstinduktion *sa* zur Verwendung, sodass die aus Kapazität und Selbstinduktion berechneten Wechselzahlen einigermaßen vergleichbar sind. Die stromliefernde Lampe arbeitete fast geräuschlos. Solche Versuche konnten leicht in grosser Zahl ausgeführt werden. In allen Fällen konnte gut auf die Grenze der Stromföhlbarkeit eingestellt werden, nämlich auf ein sehr geringes prickelndes Gefühl. Die Bezeichnungen der Tabelle IV sind dieselben wie die der vorigen Tabelle (*n* = Wechselzahl/Sek., *A* = Amp., *u.* = unföhlbar, *a. u.* = allein unföhlbar).

Tabelle IV.

Niedere Frequenz		Hohe Frequenz	
<i>n</i>	<i>A</i> × 10 ⁻⁴	<i>n</i>	<i>A</i>
658	4,42	—	—
658	<i>a. u.</i> 3,81	+	7,10 × 10 ⁴ 0,02 <i>a. u.</i>
864	<i>a. u.</i> 5,02	+	7,10 × 10 ⁴ 0,02 <i>a. u.</i>
1202	<i>a. u.</i> 5,8	+	7,10 × 10 ⁴ 0,02 <i>a. u.</i>
920	<i>a. u.</i> 4,6	+	7,10 × 10 ⁴ 0,02 <i>a. u.</i>
770	<i>a. u.</i> 3,7	+	7,10 × 10 ⁴ 0,02 <i>a. u.</i>
920	5,6	—	—
864	5,5	—	—
864	<i>a. u.</i> 5,2	+	8,86 × 10 ⁴ 0,02 <i>a. u.</i>
1202	<i>a. u.</i> 6,1	+	8,86 × 10 ⁴ 0,02 <i>a. u.</i>
658	<i>a. u.</i> 4,47	+	8,86 × 10 ⁴ 0,02 <i>a. u.</i>
620	4,58	—	—
620	4,53	—	—
658	<i>a. u.</i> 4,11	+	1,12 × 10 ⁵ 0,02 <i>a. u.</i>
853	4,97	—	—
853	<i>a. u.</i> 4,47	+	1,12 × 10 ⁵ 0,02 <i>a. u.</i>
1202	5,92	—	—
1202	<i>a. u.</i> 5,62	+	1,12 × 10 ⁵ 0,02 <i>a. u.</i>
620	4,58	—	—
620	<i>a. u.</i> 2,67	+	7,10 × 10 ⁴ <i>a. u.</i> 0,027
620	<i>a. u.</i> 2,67	+	8,90 × 10 ⁴ <i>a. u.</i> 0,036
620	<i>a. u.</i> 2,67	+	14,50 × 10 ⁴ <i>a. u.</i> 0,060
620	<i>a. u.</i> 2,67	+	17,50 × 10 ⁴ <i>a. u.</i> 0,073
620	<i>a. u.</i> 4,15	+	8,90 × 10 ⁴ <i>a. u.</i> 0,018
620	<i>a. u.</i> 4,15	+	1,12 × 10 ⁵ <i>a. u.</i> 0,022
620	<i>a. u.</i> 4,15	+	1,45 × 10 ⁵ <i>a. u.</i> 0,032
620	<i>a. u.</i> 4,15	+	1,75 × 10 ⁵ <i>a. u.</i> 0,037
620	<i>a. u.</i> 4,15	+	2,41 × 10 ⁵ <i>a. u.</i> 0,080
620	<i>a. u.</i> 4,15	+	2,64 × 10 ⁵ <i>a. u.</i> 0,15 unföhlbar, nur Hitzegeföhl

Niedere Frequenz		Hohe Frequenz	
n	$A \times 10^{-4}$	n	A
770	4,75	—	—
770	a. u. 3,76 +	$8,90 \times 10^4$	a. u. 0,026
770	a. u. 3,76 +	$1,45 \times 10^5$	a. u. 0,048
770	a. u. 3,76 +	$1,75 \times 10^5$	a. u. 0,065
770	a. u. 3,76 +	$2,10 \times 10^5$	a. u. 0,085
770	a. u. 3,76 +	$2,40 \times 10^5$	a. u. 0,13
920	5,61	—	—
920	a. u. 5,31 +	$0,89 \times 10^5$	a. u. 0,01
920	a. u. 5,31 +	$1,45 \times 10^5$	a. u. 0,034
920	a. u. 5,31 +	$1,75 \times 10^5$	a. u. 0,044
920	a. u. 5,31 +	$2,10 \times 10^5$	a. u. 0,062
920	a. u. 5,31 +	$2,41 \times 10^5$	a. u. 0,090
920	a. u. 5,31 +	$3,64 \times 10^5$	a. u. 0,160

Diese Werte, in ein Koordinatensystem eingetragen, haben auf den ersten Blick etwas recht Einleuchtendes: Die verbindenden Kurven verlaufen, von Abweichungen, welche als Versuchsfehler gedeutet werden könnten, anfangs gradlinig, bei den hohen Wechselzahlen zeigen sie eine beträchtliche Tendenz nach oben; und wenn auch, wie früher hervorgehoben, die hier mitgeteilten Wechselzahlen für die Hochfrequenzströme nicht verlässliche absolute Werte darstellen, ferner bei diesen Strömen mehrere Schwingungen nebeneinander vorhanden sind, so sind doch diese Versuchswerte zum relativen Vergleiche anscheinend geeignet.

Eine nähere Untersuchung zeigt, dass diese Werte kein Vertrauen verdienen. Es sei nur auf die Differenzen zwischen der Reizstromstärke und der verwendeten Stromstärke beim wenig frequenten Wechselstrom im Zusammenhange mit den zugehörigen Differenzen beim hochfrequenten Strome hingewiesen! So können wir diese Versuche nur dahin deuten, dass gleichbleibende Störungen der Hochfrequenzströme vergleichbare Reizwirkungen derselben vortäuschen.

Die Durchführung derartiger Versuche an sensiblen Nerven im lebenden Gewebe hat zum mindesten vor den gebräuchlichen Versuchen am Nerv-Muskelpräparat den einen Vorteil, dass gröbere Störungen in der Stromlieferung, wie sie doch gelegentlich vorkommen, rasch bemerkt und abgestellt werden können. Eine weitere Schwierigkeit für derartige Versuche am Nerv-Muskelpräparat ist durch die beträchtliche Joule'sche Wärme zu erwarten, worüber Einthoven und Wertheim-Salomonson schon Betrachtungen angestellt haben¹⁾.

1) l. c.

Trotzdem haben wir, um die Kette der Beobachtungen zu schliessen, auch Versuche am Nerv-Muskelpräparat ausgeführt, die Mitteilung derselben dürfte doch einiges Interesse verdienen.

C. Versuche am Nerv-Muskelpräparat vom Frosch.

Die Joulesche Wärme hat in einigen unserer Versuche nach intensivem Tetanus des Muskels zur Koagulation des Nerven geführt. Wir haben dann die Wärmewirkung dadurch einigermaassen zu verringern gesucht, dass wir um die Reizelektroden eine mehrfache Schicht von Filtrierpapier, welches mit physiologischer Kochsalzlösung befeuchtet war, gelegt haben. Es wurde der Gastrocnemius mit dem Ischiadicus in üblicher Weise frei präpariert und vorsichtig vom Froschkörper abgetrennt. Der Nerv wurde durch den Schlitz eines Guttaperchablättchens durchgezogen, an der unteren Seite auf das befeuchtete Filtrierpapier, auf welchem wieder eine gut plattinierte Platinelektrode lag, aufgelegt, auf der anderen Seite des Guttaperchablättchens analog mit der Elektrode versehen, zur Verhütung der Verdunstung wurde das ganze Nervenpräparat mit Guttapercha umhüllt.

Der Muskel wurde mit dem wenig belasteten Schreiber einer Kymographentrommel verbunden. Ausserdem markierte auf der Trommel ein Zeitschreiber $\frac{1}{5}$ Sekunden, der Zeitschreiber trat gleichzeitig mit dem Einschalten des Reizstromes in Tätigkeit. Die Strecke, auf welcher der Strom nur den Nerven durchfloss, betrug ca. 5 mm, der Durchmesser des Nerven etwa 0,3 mm, der Nervenwiderstand etwa 2—10,000 Ω .

Die Versuchsanordnung musste bei den kleinen Stromstärken, die für niederfrequente Ströme schon einen Reiz auslösen, gegenüber der in Fig. 1 dargestellten etwas modifiziert werden. Das Dynamometer hatte trotz der ausgezeichneten Luftdämpfung eine zu grosse Schwingungsdauer; es bewährten sich Spiegelhitzdrahtapparate, von welchen uns ein Duddell'sches Thermogalvanometer für Ströme von $2-22 \times 10^{-4}$ A. und ein Spiegelhitzdrahtinstrument von Hartmann und Braun für Ströme von $2-30 \times 10^{-3}$ A. zur Verfügung standen. Letzteres wurde auch als Spannungsmesser verwendet. Die Eichungen geschahen mit Gleichstrom.

Für niederfrequente Schwingungen wurde das Hartmann- und Braun'sche Spiegelhitzdrahtinstrument als Voltmeter parallel mit dem Nerven plus einem geeichten Borsäuremannitwiderstand

geschaltet, die Summe des Widerstandes des Nerven und des Flüssigkeitswiderstandes wurde nach jedem Versuch mit einer Walzenbrücke nach Kohlrausch's Methode bestimmt, woraus die Stromstärke, die durch den Nerven ging, zu berechnen war. Bei der Widerstandsbestimmung wurde darauf geachtet, dass durch den Nerven nur Ströme geschickt wurden, die ihn nicht erregten; es liess sich trotzdem der Nullpunkt mit dem Telephon gut finden. Zur Änderung der Stromstärke hatten wir bei den wenig frequenten Strömen die variierbare Grösse der Magneterregung für die Wechselstromsirene, zur feineren Einstellung den geeichten Flüssigkeitswiderstand zur Verfügung.

Fig. 3.

Fig. 4.

Für die hochfrequenten Ströme war die Schaltung sehr einfach. Hier wurde der Nerv und das Hitzdrahtinstrument allein in die Strombahn des Sekundär-Oszillators (nach Fig. 2) eingeschaltet. Letzterer wurde möglichst ruhig über die stromführende Spule gesenkt. Es genügte dabei eine geringe Senkung, so dass die Koppelung der Systeme als eine gleichbleibend (extrem) lose betrachtet werden konnte. Es zeigte sich gleich anfangs, dass die zur Nervenreizung notwendigen Ströme stärker waren, als das Duddell'sche Instrument anzeigt; das Hartmann-Braun'sche Instrument konnte dagegen mit Erfolg verwendet werden. Die Schaltungen werden in ihren wesentlichen Teilen durch Fig. 3 und 4 dargestellt. I_1 stellt in Fig. 3 die Wechselstromsirene vor, n das

Nerv-Muskelpräparat, w den regulierbaren Borsäuremannitwiderstand, a den Stromunterbrecher, a^1 den entsprechenden Ein- und Ausschalter für den Zeitschreiber, c den Kommutator, der einerseits den Spannungsmesser h , andererseits die Wheatstonesche Brücke mit Telephon usw. B einschaltet. In Fig. 4 ist s die Sekundärspule wie in Fig. 2, h das Amperemeter.

Tabelle I.

n	A	Bezeichnung der Kymographenkurve	Bemerkung
790	$1,66 \times 10^{-6}$	a	Grenze der Ablesbarkeit mit dem Duddell'schen Instrument, gab keine Zuckung
$2,19 \times 10^5$	$2,15 \times 10^{-3}$	—	
1127	$2,20 \times 10^{-6}$	b	

Tabelle II.

564	$3,2 \times 10^{-6}$	wie a	nach einer Pause
$1,11 \times 10^5$	$8,8 \times 10^{-3}$	c	
$1,46 \times 10^5$	$1,46 \times 10^{-2}$	d	
$1,46 \times 10^5$	$1,3 \times 10^{-2}$	$d' 13$	
$1,46 \times 10^5$	$1,15 \times 10^{-2}$	$d' 12,5$	
$1,46 \times 10^5$	$1,9 \times 10^{-2}$	$d' 15$	anscheinend ist der Nerv schon geschädigt; nach längerem wirkungslosem Intervall plötzlich starker Tetanus
564	$7,9 \times 10^{-6}$	—	

Tabelle III.

564	$5,3 \times 10^{-6}$	B_1	Hitzdraht zeigt keine Änderung des Ausschlags
$2,07 \times 10^5$	$4,0 \times 10^{-3}$	b_3	
564	$5,03 \times 10^{-6}$	b_4	
$4,07 \times 10^5$	$3,4 \times 10^{-3}$	b_6	
$9,92 \times 10^4$	$2,8 \times 10^{-3}$	b_8	
$9,92 \times 10^4$	$2,8 \times 10^{-3}$	$b_{8,21}$	
939	$6,0 \times 10^{-6}$	b_{10}	

Tabelle IV.

$1,01 \times 10^6$	$2,2 \times 10^{-2}$	c_1	Lampe brennt	Mischstrom, ohne dar- zwischen geschaltete Wellenmesser ent- nommen, Frequenz aus Kondensator und Selbst- induktor berechnet
$1,01 \times 10^6$	$7,6 \times 10^{-3}$	c_3	Lampe brennt	
$1,01 \times 10^6$	$6,0 \times 10^{-3}$	c_4	unruhig	
			Stromunterbrechung	
564	$1,24 \times 10^{-6}$	c_5		} analoge Bilder wie c_5
1503	$1,98 \times 10^{-6}$			
845	$1,49 \times 10^{-6}$			} unruhige Haltung der Sekundärspule
$1,95 \times 10^5$	$2,8 \times 10^{-3}$	c_9		

Zur Erläuterung der Versuchsergebnisse legen wir einige der am Kymographen verzeichneten Bilder vor.

Die einzelnen Untersuchungen wurden, schon wegen der Widerstandsmessungen, in grösseren Pausen gemacht, so dass die Temperatur des Nerven für jeden Versuch wohl als die gleiche anzunehmen ist. Mit Ausnahme eines Falles (Tab. IV c_1 — c_4) sind die Hochfrequenzströme den Wellenmessern, wie Fig. 2 es zeigt, entnommen, deren Resonanzeinstellungen gut übereinstimmende Werte gaben.

Sicherlich liessen sich diese Versuche noch feiner ausführen; wir haben auf Abstufungen von etwa 5 % nicht geachtet. Aus den Kymographenaufnahmen wird auch die Reizsummation resp. „addition latente“ in einigen Fällen entnommen werden können. Für unsere Aufgabe erschienen feinere Details belanglos, da hier viel grössere Differenzen in Betracht kamen. —

Wir hoffen durch diese Versuche überzeugend dargetan zu haben, dass von einer Gesetzmässigkeit in dem Reizeffekt der reinen sinusoidalen Hochfrequenzströme nicht gesprochen werden kann. Als voller Beweis wäre allerdings nur anzusehen, wenn der Nerv, ohne eine Muskelzuckung auszulösen, koaguliert worden wäre — es ist die Frage, ob dies möglich ist, ob nicht doch einige der Reizerscheinungen oder diese überhaupt als Wärmewirkungen zu deuten sind? Jedenfalls sind die durch den Nerven geschickten Strommengen ganz enorme gewesen, auch weitaus grössere als wir — im Verhältnis der Querschnitte — durch die Finger schicken konnten, wenn man bedenkt, dass der Querschnitt der von uns verwendeten Froschnerven ($dm = \text{ca. } 0,3 \text{ mm}$) ca. 0,07 qmm, der Fingerquerschnitt etwa 200 qmm betrug.

Folgerungen.

Das Nernst'sche Gesetz der Nervenregung gilt nicht für hochfrequente elektrische Schwingungen, wie solche bei der drahtlosen Telegraphie verwendet werden. Diese Ströme scheinen bei gleichbleibender Amplitude keinen Nervenreiz auszulösen; etwaige durch solche Ströme hervorgerufene Reizerscheinungen werden auf Stromunterbrechungen oder Schwankungen in der Amplitude zu beziehen sein, möglicherweise durch Wärmeschwankungen. Nach der Nernst'schen Theorie heisst dies, dass die raschen, gleichförmigen Ionenbewegungen — resp. die entsprechenden Konzentrationsänderungen im und um den Nerven — keinen Impuls für das Erfolgsorgan (resp. das Zentralnervensystem) hervorbringen. Rasche Änderungen der Schwingungsamplitude bei gleich hoher Wechselfrequenz können vom Nerven aus starke Reaktionen auslösen.