

(Aus dem physiologischen Institut in Göttingen.)

Neue Untersuchungen über die am Nerven unter der Wirkung erregender Einflüsse auftretenden elektrischen Erscheinungen.

Von

Dr. Heinr. Boruttau,

Assistenten am physiologischen Institut der Universität Göttingen.

Mit Tafel I und 2 Holzschnitten.

I.

Im Jahre 1863 machte *Matteucci*¹⁾ die Beobachtung, dass Kombinationen von einem mit feuchtem Leiter umhüllten metallischen Leiter, beim Hindurchleiten eines konstanten Stromes durch eine gewisse Strecke, extrapolar abgeleitet, Ströme zeigen, welche den elektrotonischen des Nerven entsprechen. Er verwendete umwickelte Platindrähte, später auch Kohle oder Graphit in feuchten Hüllen, und fand, dass amalgamirte Zinkdrähte in Zinksulfatlösung die Erscheinungen nicht zeigen, woraus er schloss, dass sie auf innerer Polarisation beruhen.

Abgesehen von kleineren Mittheilungen von *Cantoni* und *Eccher*²⁾, hat *Schiff*³⁾ alle diese Resultate im Jahre 1868 bestätigt und später, 1872⁴⁾, die Versuche auf verschiedene Metalle mit verschiedenen feuchten Leitern ausgedehnt.

Noch im nämlichen Jahre begann *Hermann* über diesen Gegenstand ausgedehnte experimentelle Untersuchungen mit wich-

1) *Comptes Rend.* 1863. I. p. 760; 1867. II. p. 151. 194. 884; 1868. p. 580.

Annales de chim. et de phys. 1867. XII. p. 97. 104.

2) *Rendic. dell' Ist. Lomb.* 2. 1. *Nuovo cimento.* 1872. p. 171.

3) *Notes sur quelques phénomènes de polarité secondaire*, *Nuovo cimento*, avr. 1868.

4) *Zeitschr. f. Biologie.* 1872.

tigen Modificationen der Einrichtung jener von ihm zuerst als Kernleiter bezeichneten Kombinationen zu publiziren¹⁾. Er unterwarf auch die übrigen Versuchsbedingungen zahlreichen Abänderungen und entwickelte unter Betheiligung von H. Weber²⁾ eine Theorie der Erscheinungen, aus welcher auch hervorging, dass dieselben nicht auf Kernleiter mit metallischem Kern beschränkt, sondern auch für übrigen gleich angeordnete Kombinationen von zwei Elektrolyten mit polarisirbarer Grenzfläche zu erwarten waren. Die letzteren wurden indessen von Hermann nicht experimentell herangezogen.

Durch diese Untersuchungen ist für das Wesen der elektrischen Erscheinungen am polarisirten Nerven eine Erklärung gegeben, welche auch durch eine Reihe dagegen erhobener Bedenken und Einwände nicht ernstlich in Frage gestellt werden konnte. Unter diesen Umständen musste sich die Frage aufdrängen nach dem Verhalten der Kernleiter gegenüber raschen Stromschwankungen, z. B. Induktionsströmen, einzeln und als Wechselströme angewandt, also überhaupt allen solchen, zunächst elektrischen, Einwirkungen gegenüber, welche den Nerven zu erregen im Stande sind.

Versuche über die Einwirkung von Induktionsströmen auf Kernleiter hat zuerst Schiff angestellt und aus ihnen auf ein gleichartiges Verhalten von Nerv und Kernleiter hinsichtlich des Ueberwiegens des Anelektrotonus geschlossen³⁾. Die Versuche von Fleischl⁴⁾ mit Anwendung von Induktionsströmen auf den Kernleiter waren nicht sowohl darauf abgesehen, in der vorher angedeuteten Richtung weiterzuführen, als vielmehr auf eine Kritik der Anwendung der Erscheinungen am Kernleiter auf den Nerven bezüglich des Elektrotonus. Hermann hat mit Samways⁵⁾ das Verhalten eines Kernleiters bei Zuleitung kurzer, frequenter Kettenströme mittels des Rheotoms untersucht und bemerkt hinsichtlich der Anwendung von Induktionsströmen nur, „dass es nie

1) Pflüger's Arch. V. S. 264; VI. S. 312; VII. S. 301.

2) Borchardt's Journ. f. Math. LXXVI. S. 1. Pflüger's Arch. VII. S. 319.

3) Zeitschr. f. Biologie. 1872.

4) Ueber den interpolaren Elektrotonus; Wiener Akad.-Ber. 3. Abth. 9. Mai 1878.

5) Pflüger's Archiv. XXXV. S. 1.

gelang, mit ihnen statt der Kettenströme — immer unter Anwendung des Rheotoms — Resultate zu erhalten.“

Es war die Aufgabe der hier mitzutheilenden Untersuchungen, das Verhalten von Kernleitern verschiedener Zusammensetzung zunächst gegenüber sämmtlichen beim Nerven in Betracht kommenden elektrischen Einwirkungen zu prüfen, wobei dann im weitem Verlaufe die Veranlassung auftrat, auch einige andere Einwirkungen, welche für die Erregung des Nerven in Betracht kommen, in den Kreis der Untersuchungen zu ziehen. Einen grossen Theil der grundlegenden hierhergehörigen Erscheinungen hatte Prof. Meissner schon vor längerer Zeit beobachtet und in Vorlesungen demonstriert. Auf seine Veranlassung und unter seiner beständigen Antheilnahme unternahm ich die Wiederholung und die nach verschiedenen Richtungen hin nothwendige Weiterführung und Vervielfältigung der Versuche, die im folgenden mitgetheilt werden sollen.

Die Beobachtungseinrichtungen waren die folgenden. Das Galvanometer war eine Spiegelbussole nach Hermanns Angabe¹⁾ von J. F. Meyer in Zürich, mit 40800 Windungen, deren Magnet durch den Haüy'schen Stab ein Grad von Astasie ertheilt war, wie er mit Rücksicht einerseits auf hinreichende Empfindlichkeit, andererseits auf Sicherheit und Präzision der Bewegungen sich als der zweckmässigste erwies, ohne dass es etwa auf das zu erreichende Maximum abgesehen war. Ausser der Bussole kam für alle dazu geeigneten Wirkungen auch ein empfindliches Kapillar-Elektrometer in Anwendung, dessen Kapillare sich hundertfach vergrössert unter geeigneter Beleuchtung auf einer mit Massstab versehenen matten Glasscheibe abbildete. Diese und das Ablesefernrohr für das Galvanometer waren so aufgestellt, dass die Beobachtungen an beiden Instrumenten unmittelbar nacheinander ausgeführt werden konnten, indem ein Stromwähler gestattete, den Ableitungskreis entweder durch die Galvanometerrolle oder durch das Kapillarelektrometer zu schliessen. Dass letztere wurde in der Zwischenzeit in Kurzschluss gehalten. Ein Kommutator gewährte freie Wahl der Art der Ladung für die Kapillare. Die Heranziehung dieser beiden Untersuchungshilfsmittel war nicht nur nützlich und erwünscht in der Beziehung, dass ihre Angaben gegebenenfalls

1) Pflüger's Arch. XXI. S. 480.

sich gegenseitig kontrolliren konnten, sondern auch namentlich deshalb, weil bei manchen der zarteren Erscheinungen entweder das eine oder das andere Instrument für deutliche Angabe geeigneter sich erwies.

Für die Zu- und Ableitung dienten für gewöhnlich Chlorsilberelektroden nach d'Arsonval¹⁾, denen je nach Umständen verschiedene Formen, meistens Stäbchenform, gegeben waren. Dieselben waren durch sorgfältige Herstellung des Chlorsilberüberzugs über dem reinen Silber paarweise stets vollständig gleichartig und erlitten bei den hier in Betracht kommenden Strömen entweder überhaupt keine, oder höchstens sehr geringfügige Polarisation, welche dann durch Abspülen in verdünnter Kochsalzlösung leicht zu beseitigen war. Wenn diese Elektroden benutzt wurden, war die Hülle des Kernleiters 0,6% Kochsalzlösung, so dass ebenso wie beim Nerven unmittelbares Anlegen möglich war; häufig waren theils zur Vermeidung der Austrocknung (beim Nerven), theils zur Herstellung möglichst inniger Berührung die Elektroden mit einer in der Kochsalzlösung getränkten indifferenten Hülle umwickelt. Bei einem Theil der Versuche war die Vermittlung durch sog. Seilelektroden — in Kochsalzlösung getränkte Fäden — nützlich oder auch nothwendig; für einige besondere Versuche mussten die Chlorsilberelektroden durch amalgamirte Zinkelektroden in Zinklösung ersetzt werden.

Etwaigen Täuschungen durch unipolare Abgleichungen wurden theils durch sorgfältige Isolation der dabei in Betracht kommenden Apparate und Leitungen, theils auch, wo es erforderlich schien, durch Erdableitung in bekannter Weise, besonderer Prüfung nach wirksam begegnet.

Was die benutzten Kernleiter mit metallischem Kern betrifft, so wurden theils solche der ursprünglichen Art nach Matteucci angewendet, nämlich mit Baumwolle möglichst gleichmässig umspinnene Drähte — Platin, Nickel, Aluminium — bei deren Herstellung sehr sorgfältig auf die Entfernung aller Luftbläschen aus der mit dem Elektrolyten getränkten Hülle geachtet wurde; theils nach Hermann's Vorgange, mit dem Elektrolyten gefüllte Glasröhren, durch deren Achse der Draht gespannt war. Diese Röhren hatten eine Länge von 200—250 mm bei einer lichten Weite von

1) Archives de physiologie. 1889. S. 423 ff.

etwa 4 mm und waren, um völlige Freiheit für die Anordnung der zu- und ableitenden Elektroden zu gewähren, der Länge nach durch Einschleifen geschlitzt. Sie konnten mit Hilfe von Schlauchstücken zu mehreren der Länge nach verbunden werden.

Kernleiter, welche nur aus zwei differenten Elektrolyten mit polarisirbarer Grenzfläche bestehen, pflegten im hiesigen Institut aus Laminariastiften von geeigneter Dicke durch Ueberziehen mit Froschdarm hergestellt zu werden; erstere z. B. in Kupfersulfatlösung gequollen, letzterer mit 0,6% Kochsalzlösung getränkt. Statt des Froschdarms habe ich auch umgewickeltes feines Pergamentpapier benutzt, statt der Laminariastifte dünne Zeichenwischer aus ungefärbter Papiermasse, und statt der Metallsalzlösung für den Kern auch Natriumphosphatlösung benutzt. Es bedarf kaum der besonderen Erwähnung, dass solche Kernleiter immer nur für eine gewisse Zeit brauchbar sind und dann auseinander genommen und erneuert werden müssen. Länger benutzbar und wirksamer, als die soeben beschriebenen Kombinationen, erwiesen sich nach dem Vorgange von Grünhagen¹⁾ aus Thonpfeifenhöhren hergestellte Kernleiter, auf deren Anwendung ich erst zu einer Zeit geführt wurde, wo die meisten der zu beschreibenden Versuche bereits ausgeführt waren. Dieselben konnten sowohl zur Herstellung von Kernleitern aus zwei Elektrolyten, wie von solchen mit metallischem Kern benutzt werden: im ersteren Falle wurden sie mit 0,6% Kochsalzlösung getränkt und hierauf die Lichtung mit Kupfersulfatlösung gefüllt; für den andern Zweck wurde erst die Lichtung mit Quecksilber gefüllt und hierauf das Rohr in die verdünnte Kochsalzlösung gelegt, bis es sich vollgesogen hatte.

Was zunächst die unter Einwirkung des konstanten Stroms an den Kernleitern auftretenden extrapolaren Polarisationserscheinungen im allgemeinen betrifft, so habe ich vielfach Gelegenheit gehabt und genommen, die hierüber vorliegenden Angaben der Autoren, namentlich Hermann's, auch unter Ausdehnung der Versuche auf die Kernleiter mit nicht metallischem Kern, durchaus zu bestätigen, so dass ich auch hinsichtlich der Auffassung und Erklärung der elektrotönenischen Erscheinungen am Nerven, von dem durch Hermann begründeten Standpunkte aus alle weiteren Untersuchungen unternahm.

1) Pflüger's Archiv. XXXV. S. 551.

Die bei Anwendung von Induktionsströmen auf Kernleiter zu beobachtenden Erscheinungen hängen sowohl in quantitativer wie qualitativer Hinsicht von der Wahl der den Kernleiter zusammensetzenden Stoffe ab; ich werde zunächst das Verhalten von solchen Kernleitern erörtern, welche aus Platindraht, umgeben von 0,6% Kochsalzlösung bestanden, die, was den Elektrolyten betrifft, dem Nerven am nächsten vergleichbar sind und unmittelbares Anlegen der Chlorsilberelektroden gestatten. Die primäre Rolle des Schlitteninduktoriums wurde von einer durchschnittlich zwei Daniell äquivalenten Stromquelle (Trockenelemente, grosse Noë'sche Thermosäule) bedient. In den Kreis der sekundären Rolle waren ein Stromwender und ein Vorreiberschlüssel zum Abblenden eingeschaltet¹⁾.

Es wurden zunächst die zwei Ableitungselektroden a und b extrapolar, also ausserhalb der von den Zuleitungselektroden begrenzten Strecke rr , angelegt, und zwar so, dass die durchströmte und die abgeleitete Strecke ihre Längen beibehielten, während der Abstand zwischen beiden, sowie auch der Rollenabstand (RA) am Induktorium verändert wurde. Werden einzelne Induktionsschläge unter Ausschaltung des Wagner'schen Hammers mittels Schlüssels durch die Strecke rr geleitet, so zeigt das Galvanometer sowohl wie das Kapillar-Elektrometer stets präzise und deutlich einen momentanen Strom, resp. Ladung im Sinne der Richtung des Schläges an: der einzelne Induktionsstrom wirkt also qualitativ, d. h. was den Sinn der extrapolaren Wirkung betrifft, gerade so wie ein entsprechend gerichteter Kettenstrom. Näher auf die Wirkung der einzelnen Induktionsschläge — das Quantitative betreffend — einzugehen, muss ich mir auf eine unten sich ergebende Gelegenheit vorbehalten. Spielt der Wagner'sche Hammer in der gewöhnlichen Weise, so tritt folgendes ein: Bei der allmählichen Annäherung der sekundären Rolle aus unwirksamem Abstand beginnt die Busssole einen Strom anzuzeigen, welcher in der Bussolrolle von der der Zuleitungsstrecke ferner stehenden („distalen“)

1) Die verschiedenen im Laufe der Versuche in Anwendung gekommenen Induktionsvorrichtungen mit ihrem Eisenkern, sowie auch sonstige elektromagnetische Apparate waren stets in solcher Entfernung vom Galvanometer aufgestellt, dass jede Spur von Wirkung auf dessen Magneten sicher ausgeschlossen war.

Elektrode, mit b bezeichnet, nach a , der näheren („proximalen“) Elektrode geht, sodass letztere also „negativ“ ist, und zwar gleichgültig, welche Richtung der Schliessungs- und Oeffnungsschlag haben. Bei weiterer Annäherung der Rollen nimmt dieser Strom plötzlich ab, und bei einem gewissen Rollenabstande schwankt der Bussolspiegel um die Gleichgewichtslage, oder aber er zeigt schwache definitive Ablenkungen im Sinne der Richtung der Schliessungsschläge. Verkleinert man den Rollenabstand noch mehr, so zeigt sich ein Ausschlag, welcher dem obigen entgegengesetzt ist, so dass also a „positiv“ wird. Auch diese Richtung ist vollständig unabhängig von der Kommutatorstellung im Zuleitungskreise. Wird statt des gewöhnlichen Hammerspiels die Helmholtz'sche Anordnung eingerichtet, welche, statt den primären Strom zu unterbrechen, eine gutleitende Nebenschliessung herstellt, so bleibt der erstgenannte negative Ausschlag bis nahe an den Rollenabstand Null (sekundäre Rolle vollständig auf die primäre aufgeschoben). Erst dann tritt das Schwanken um die Gleichgewichtslage, also jener Wendepunkt ein, und bisweilen bei vollständiger Deckung der Rollen auch positiver Ausschlag. Dem letzteren geht bei beiden Arten des Hammerspiels oft ein negativer Vorschlag voraus, ebenso dem negativen Ausschlag kurz vor dem Wendepunkt ein positiver Vorschlag. Der wahre Sinn des Stromes ergibt sich immer aus der bleibenden Ablenkung, welche sich bei dauernder Einwirkung der Wechselströme zeigt.

Leitet man, statt zum Galvanometer, zum Kapillarelektrometer ab, so zeigen sich durchweg die gleichen Phänomene, welche durch die Stromwendung im Ableitungskreise noch eine Kontrolle erfuhren, die deshalb nicht unwichtig ist, weil die Quecksilbersäule bisweilen im Sinne positiver Ladung nach der Spitze der Kapillare zu sich bewegt, während ein Ausschlag im entgegengesetzten Sinne erwartet wird¹⁾. Das Nähere hinsichtlich dieser qualitativen Re-

1) Nach meinen gelegentlichen Wahrnehmungen zeigt das Quecksilber der Kapillare bei gewissen diskontinuierlichen Einwirkungen je nach Art derselben Bevorzugung positiver oder auch negativer Ladung. Erstere sah ich, wie Fleischl (du Bois' Arch. 1879. S. 269 ff.) bei Anwendung der zeitlich sehr ungleichmässigen Wechselströme der gewöhnlichen Induktionsapparate mit Eisenkern, sowie des Telephons; letzteres kam bei Anwendung des Sinus-

sultate, also des Sinnes der Ausschläge bei verschiedenen Anordnungen und Rollenabständen ist aus der nachstehenden Auswahl aus den tabellarischen Versuchsprotokollen zu ersehen.

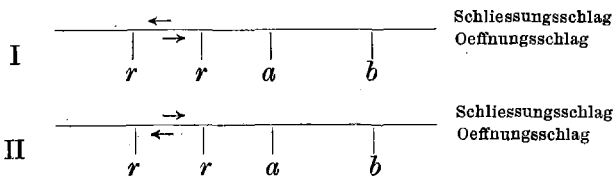
Tabellen 1—4 geben den Sinn des Ausschlags bei extrapolarer Ableitung ab und Zuleitung rr der Wechselströme des Schlitteninduktoriums zu Kernleitern aus Platindraht und 0,6 % NaCl-Lösung. Die Kommutatorstellungen im Zuleitungskreise sind durch I und II bezeichnet, welche Anordnungen durch untenstehende Schemata verdeutlicht sind, wobei die Richtung der Schliessungs- und Oeffnungsschläge im Kernleiter durch Pfeile bezeichnet ist.

Sämmtliche Vorzeichen beziehen sich auf die proximale Elektrode a ; es bedeutet also „+“, dass der abgeleitete Strom von a durch das Galvanometer nach b ; „—“, dass er umgekehrt von b nach a fliesst. 0 bedeutet die Ruhelage; die eingeklammerten Zeichen sind Vor- bzw. Nachschläge, je nach ihrer Stellung zu den Nichteingeklammerten.

Links sind die Ausschläge des Galvanometers, rechts die Ladungen des Kapillarelektrometers verzeichnet, letztere in zwei Doppelreihen A und B; unter A ist die Kapillare, unter B das Basisquecksilber mit der Elektrode a verbunden.

Die durchströmte Strecke rr und die abgeleitete Strecke ab bleiben je stets gleich, nämlich $rr = 10$ mm und $ab = 25$ mm. Der Abstand zwischen beiden ra variirt laut Tabellen.

Kommutatorstellungen:



induktors (s. u.) zur Beobachtung. Auf diese, der nähern Untersuchung wohl sehr bedürftigen Erscheinungen weiter einzugehen, musste ich vorläufig verzichten.

1 und 2.

Platindraht von 200 mm Länge und 1 mm Dicke; Umspinnung von Baumwolle 1 mm dick, mit 0,6 % NaCl-Lösung getränkt.

 1. $ra = 10$ mm.

a) Gewöhnliches Hammerspiel.

RA in mm	Galvanometer		Kapillarelektrometer			
	I	II	A		B	
	I	II	I	II	I	II
150	0	0	0	0	0	0
120	—	—	—	—	0	0
105	(—) +	(+) —	(—) 0	—	(—) +	(—) +
90	(—) +	+	(—) +	+	(—) +	+
75	(—) +	+	(—) +	+	(—) +	+
60	+	+	(—) +	+	(—) +	+
45	+	+	(—) +	+	(—) +	+
30	+	+	(—) +	+	(—) +	+
15	+	+	(—) +	+	(—) +	+
0	+	+	(—) +	+	(—) +	+

β) Helmholtz'sche Anordnung.

	I	II	I	II	I	II
150	0	0	0	0	0	0
120	—	(+) —	0	0	0	0
105	—	(+) —	—	(+) —	—	—
90	—	(+) —	—	(+) —	—	(+) —
75	(+) —	(+) —	(—) +	(+) —	—	(+) —
60	(+) 0 (—)	(+) —	(—) 0 (+)	(—) +	(+) 0 (—)	(+) —
45	+	(+) 0 (—)	+	(—) +	+	(+) 0 (—)
30	+	(+) 0 (—)	+	+	+	+
15	+	+	+	+	+	+
0	+	+	+	+	+	?

 2. $ra = 20$ mm.

a) Gewöhnliches Hammerspiel.

	I	II	I	II	I	II
135	0	0	0	0	0	0
120	—	—	—	—	—	(—) +
105	—	—	—	—	—	(—) +
90	—	—	—	— (+)	—	(+) — (+)
75	(—) +	(—) 0 (+)	(—) +	+	(—) +	+
60	(—) +	(—) +	(—) +	+	(—) +	+
45	+	+	(—) +	+	(—) +	+
30	+	+	(—) +	+	(—) +	+
15	+	+	(—) +	+	(—) +	+
0	+	+	(—) +	+	(—) +	+

β) Helmholtz'sche Anordnung.

	I	II	I	II	I	II
135	0	0	0	0	0	0
120	—	—	0	0	—	—
105	—	—	—	—	—	—
90	—	(+) —	—	—	(+) —	(+) —
75	—	(+) —	—	—	(+) —	(+) —
60	—	(+) —	(+) —	—	(+) —	(+) 0 (—)
45	—	(+) 0 (—)	(+) —	+	(+) —	(+) 0 (—)
30	— (+)	(—) +	(+) 0 (—)	+	(+) —	(—) +
15	(—) +	(—) +	(—) +	+	(+) — (+)	(—) +
0	+	+	(—) +	+	+	(—) +

3 und 4.

Platindraht von 0,2 mm Dicke, in mit 0,6 % NaCl-Lösung gefüllter Glasröhre von 250 mm Länge und 4 mm Lumen ausgespannt.

3. $ra = 25$ mm.

a) Gewöhnliches Hammerspiel.

RA in mm	Galvanometer		Kapillarelektrometer			
	I	II	A		B	
135	0	0	0	0	0	0
120	—	—	?	?	?	?
105	—	—	(+)—	(+)—	(+)—	(+)—
90	(+)—	(+)—	(+)—	(+)—	(+)—	(+)—
75	(-) 0 (+)	(+) 0 (-)	— (+)	— (+)	(+) 0 (-)	(-) 0 (+)
60	(-) 0 (+)	(-) +	(-) +	(-) +	(-) +	(-) +
45	(-) +	(-) +	(-) +	(-) +	(-) +	(-) +
30	(-) +	(-) +	(-) +	(-) +	(-) +	(-) +
15	(-) +	(-) +	(-) +	(-) +	(-) +	(-) +
0	(-) +	(-) +	(-) +	(-) +	(-) +	(-) +

β) Helmholtz'sche Anordnung.

120	0	0	0	0	0	0
105	—	—	(+)—	(+)—	(+)—	(+)—
90	—	—	(+)—	—	(+)—	(+)—
75	—	—	(+)—	—	(+)—	—
60	—	—	(+)—	—	(+)—	—
45	—	—	(+)—	—	(+)—	—
30	(+)—	—	(+)—	—	(+)—	—
15	(+)—	—	(+)—	—	(+)—	—
0	(-) 0 (+)	(+)—	(+)—	—	(+)—	—

4. $ra = 40$ mm.

a) Gewöhnliches Hammerspiel.

120	—	—	—	—	(+)—	(+)—
105	—	—	—	—	(+)—	(+)—
90	—	—	—	—	—	(+)—
75	— (+)	— (+)	—	—	—	—
60	— (+)	— (+)	—	—	—	—
45	(-) 0 (+)	(-) 0 (+)	(-) +	(-) 0 (+)	—	—
30	(-) 0 (+)	(-) 0 (+)	(-) +	(-) +	— (+)	—
15	(-) +	(-) +	(-) +	(-) +	— (+)	(-) 0 (+)
0	(-) +	(-) +	(-) +	(-) +	(-) +	(-) +

β) Helmholtz'sche Anordnung.

120	0	0	0	0	0	0
105	—	—	0	0	0	0
90	—	—	— (+)	— (+)	(-) 0 (+)	(-) 0 (+)
75	—	—	—	—	—	—
60	—	—	—	—	—	—
45	—	—	—	—	—	—
30	—	—	—	—	—	—
15	(+)—	(+)—	(+)—	(+)—	(+)—	(+)—
0	(+)—	(+)—	(+)—	(+)—	(+)—	(+)—

Vorsichtshalber wurde nicht unterlassen, die zu den beiden Elektrodenpaaren dienenden Chlorsilberstäbchen sowohl je unter sich, als paarweise zu vertauschen, sowie auch die abgeleitete Strecke auf die eine oder andere Seite der durchströmten zu verlegen: ohne jede Aenderung der Erscheinungen. Vergrösserung des Abstandes zwischen beiden Strecken wirkt in dem Sinne, dass der Wendepunkt der Ausschläge erst bei grösserer Annäherung der sekundären Rolle, also Verstärkung der Induktionswirkung erfolgt.

Da die Schwingungen des W a g n e r'schen Hammers, wie derselbe an den Schlitteninduktorien angebracht zu werden pflegt, unter allen Umständen ziemlich unregelmässige sind, wurde derselbe durch den sog. akustischen Stromunterbrecher von B e r n s t e i n ersetzt und dabei eine ähnliche „Nivellirung“ des Schliessungs- und Oeffnungs-Induktionsstroms wie durch die H e l m h o l t z'sche Anordnung des W a g n e r'schen Hammers, dadurch hergestellt, dass eine Nebenschliessung zu dem Quecksilberkontakt von veränderlichem Widerstand eingeschaltet war, die leicht so eingestellt werden konnte, dass der Oeffnungsfunke bis auf ein kaum wahrnehmbares Minimum beseitigt war. Zu diesem auch bei manchen anderen Versuchen wichtigen Zweck haben sich hier seit langem die E n g e l m a n n'schen K o h l e n r h e o s t a t e als sehr geeignet bewährt, so lange es nicht auf M e s s u n g e n der in diese Nebenschliessung einzuschaltenden Widerstände, sondern nur auf rasche zweckentsprechende E i n s t e l l u n g ankommt.

Die Regulirbarkeit des Widerstandes der Kohlenrheostate gestattet aber, die Steilheit der Schwankung des primären Stroms in weiten Grenzen, und damit die elektromotorische Kraft der Induktionswirkung zu variiren: unter Benutzung dieses Moments wurde erkannt, dass jener Wendepunkt für die Richtung des extrapolar abzuleitenden Stromes bei einem um so kleineren Rollenabstande erst eintritt, je kleiner der Widerstand in der Nebenschliessung ist.

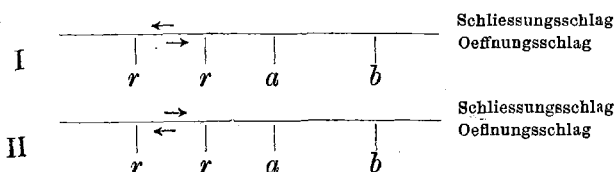
Als der Kohlenrheostat durch einen nach O h m graduirten Stöpselrheostaten ersetzt war, konnte diese Thatsache ziffernmässig zum Ausdruck gebracht werden, wie die folgende Tabelle des Näheren angiebt.

Widerstände in der Nebenschliessung des B e r n s t e i n'schen akustischen Unterbrechers, welche bei dem betreffenden *RA* des Induktoriums am Kernleiter aus dickem

Platindraht, umspinnen mit Baumwolle in 0,6 % NaCl, extrapolar den „Wendepunkt“ auftreten lassen.

$$ra = 20 \text{ mm.}$$

Kommutatorstellungen:



RA in mm	Widerstand in Ω	
	I	II
120	∞	∞
105	∞	∞
90	700	650
75	180	170
60	35	30
45	17	16
30	12	11
15	9	9
0	8	8

Dass der Wendepunkt bei grösseren Abständen zwischen zu- und ableitender Strecke erst bei kleinerem Rollenabstande eintritt, zeigte sich auch bei diesen Versuchen mit dem akustischen Unterbrecher deutlich.

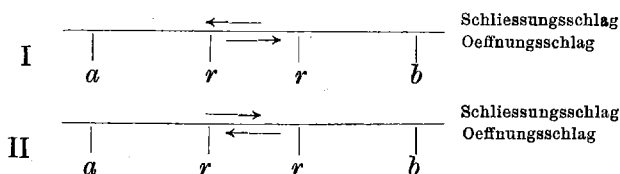
Gegenüber den Versuchen mit extrapolarer Ableitung wurden nun solche an denselben Kernleitern und mit denselben Einwirkungen angestellt, bei welchen die beiden Ableitungselektroden symmetrisch zu den zuleitenden lagen, und zwar entweder zu beiden Seiten ausserhalb oder aber innerhalb der durchströmten Strecke. Ich will erstere Anordnung „amphipolar“, letztere „intrapolar“ nennen. Die Resultate waren bei beiden Anordnungen gleich, nämlich kurz zusammengefasst die folgenden: Sowohl beim gewöhnlichen Hammerspiel wie bei der Helmholtz'schen Anordnung erfolgt bei allmählicher Annäherung der Rollen zuerst Ablenkung im Sinne der Schliessungsschläge, dann zeigt sich auch hier ein Wendepunkt, von dem an der Ausschlag im Sinne der Öffnungsschläge erfolgt. Dieser Wendepunkt findet sich bei Anwendung der Helmholtz'schen Anordnung wiederum bei einem viel geringeren Rollenabstand, als

bei Anwendung der nicht nivellirten Schläge. Von diesem Resultate sind Beispiele in den folgenden Tabellen 5 und 6 gegeben.

Tabelle 5

gibt den Sinn der Ausschläge bei Zuleitung der Induktionsströme des Schlitteninduktoriums zum Röhrenkernleiter aus Platindraht in 0,6% Kochsalzlösung und „amphipolarer“ Ableitung, welche durch folgende Schemata verdeutlicht wird. I und II bedeuten wieder die Kommutatorstellungen.

$rr = 20$ mm, ra und rb je $= 35$ mm.



Nur Galvanometerausschläge.

α) Gewöhnliches Hammerspiel.

β) Helmholtz'sche Anordnung.

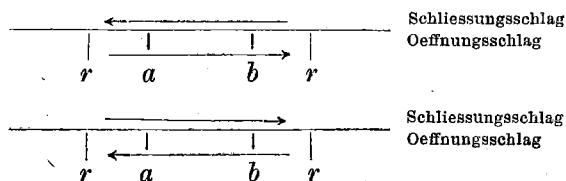
RA in mm	I	II
135	(-) +	(+) -
120	(-) +	(+) -
105	(-) 0 (+)	(+) 0 (-)
90	- (+)	+ (-)
75	-	+
60	-	+
45	-	+
30	-	+
15	-	+
0	-	+

RA in mm	I	II
135	+	-
120	+	-
105	+	-
90	+	-
75	+	-
60	(-) +	(+) -
45	(-) +	(+) -
30	(-) 0 (+)	(+) 0 (-)
15	(+) 0 (-)	(-) 0 (+)
0	-	+

Tabelle 6

zeigt den Erfolg der „intrapolaren“ Ableitung nach folgenden Schemata:

ra und rb je $= 10$ mm, $ab = 20$ mm.



Nur Galvanometeraussschläge.

α) Gewöhnliches Hammerspiel.

β) Helmholtz'sche Anordnung.

RA in mm	I	II
120	+	—
105	+	—
90	(—) 0 (+)	(+) 0 (—)
75	(—) 0 (+)	(+) 0 (—)
60	—	(—) +
45	—	+
30	—	+
15	—	+
0	—	+

AR in mm	I	II
120	+	—
105	+	—
90	+	—
75	+	—
60	(—) +	(+) —
45	(—) +	(+) —
30	(—) 0 (+)	(+) 0 (—)
15	(—) 0 (+)	(+) 0 (—)
0	—	+

Während also bei der zuerst oben untersuchten extrapolaren Ableitung die Richtung des abgeleiteten Stroms sich unabhängig davon erwies, welche Richtung der Schliessungs- und Oeffnungsschlag in der durchströmten Strecke hat, so erweist sich bei intrapolarer und amphipolarer Ableitung die Richtung des abgeleiteten Stromes durchaus abhängig von der Richtung des einen oder andern der beiden, zeitlich verschieden verlaufenden Induktionsströme, und zwar so, dass auf der einen Seite von einem auch hier auftretenden Wendepunkt — grösserer Rollenabstand — der Schliessungsschlag, auf der andern Seite — kleinerer Rollenabstand — der Oeffnungsschlag die Richtung bestimmt.

Zum Zweck weiterer Prüfung einerseits der bei der extrapolaren Ableitung hervortretenden Unabhängigkeit, andererseits der bei intrapolarer und amphipolarer Ableitung sich zeigenden Abhängigkeit des abgeleiteten Stromes von der Richtung der Schliessungs- und Oeffnungsschläge in der durchströmten Strecke, — machte sich die Nothwendigkeit geltend, über solche in rascher Folge Richtung wechselnde Ströme zu verfügen, welche die Garantie völliger Gleichheit in jeder andern Beziehung, ausser der Richtung, darboten. Zunächst unter Beibehaltung von induzirten Strömen der Volta-Induktion bietet sich das einfache Mittel, die verschieden steilen Schliessungs- und Oeffnungs-Induktionsströme des Schlitteninduktoriums so anzuordnen, dass nicht nur das für die Fernwirkung allein massgebende Zeitintegral $\int i dt$ der beiden Stromarten gleich ist, sondern auch in der Zeiteinheit gleich steile Schwankungen um die Intensität Null (Abszissenachse) stattfinden, dadurch, dass man nach je einem Schliessungs-

und zugehörigen Oeffnungsstrom kommutirt, so dass die Schläge paarweise die Richtung wechseln.

Zu diesem Zwecke standen Apparate zu Gebot, welche kurz als „automatische Wippen“ bezeichnet werden können. Das Prinzip derselben ist dieses: Durch einen vertikalstehenden, vor resp. zwischen den Polschuhen eines horizontal liegenden hufeisenförmigen Elektromagneten federnden Arm, welcher den keilförmigen Anker für denselben trägt und, von einem besonderen Strom getrieben, sich nach dem Principe des Wagner'schen Hammers bewegt, werden die gleichfalls von dem Arm getragenen beiden Bügel einer Pohl'schen Wippe in Schwingung versetzt, so dass die Zuleitung des den Induktionsapparat speisenden Stromes in die Bügel konstant bleibt, die Quecksilberkontakte für den Austritt des Stromes mit den Schwingungen wechseln. Die betreffenden zwei Paare von Quecksilbernäpfchen können gekreuzt und ungekreuzt verbunden werden. Ist die schwingende Wippe in den primären Stromkreis eingeschaltet, so erhält man auf jede ganze Schwingung zwei Paare von Induktionsschlägen, je einen Schliessungs- und einen Oeffnungsschlag, deren Richtungen bei gekreuzter Verbindung der Quecksilbernäpfe paarweise wechseln, während bei nicht gekreuzter Verbindung die Wippe den Dienst des Wagner'schen Hammers leistet. Dies Prinzip war in zwei verschiedenen Grössen und Konstruktionen ausgeführt, von denen der grössere Apparat auch noch die Einrichtung zur Kommutation für die nach dem Helmholtz'schen Prinzip „nivellirten“ Induktionsströme besitzt. Für die hier mitzutheilenden Versuche kam der kleinere, grössere Frequenz gewährende Apparat in Anwendung. Die durch Einstellung veränderliche, chronographisch bestimmte Schwingungszahl desselben betrug in den mitzutheilenden Versuchen 60 in der Sekunde, so dass 120 Schliessungs- und 120 Oeffnungsschläge ausgelöst wurden.

Durch Einschaltung eines Kohlenrheostaten als Nebenschliessung konnte auch bei diesen Versuchen der Oeffnungsfunke aufgehoben, bezw. die Steilheit der Schwankungen des primären Stroms abgestuft werden.

Die Versuche ergaben bei extrapolarer Ableitung derselben Kernleiter dasselbe Resultat wie die obigen, nämlich wiederum bei schrittweiser Annäherung der sekundären Rolle zuerst negativen Ausschlag (Elektrode a negativ in Bezug auf die Bussrolle), dann

Wendepunkt, dann positiven Ausschlag. Wie bei der Anwendung von Bernsteins akustischem Unterbrecher kommt der Wendepunkt bei um so kleinerem Rollenabstand, je kleiner der Widerstand in der Nebenschliessung des primären Stromkreises ist, je schwächer also die inducirten Ströme sind.

Wenn nun auch durch die vorstehend erörterte Vorrichtung dieses als vollkommen sicher geleistet anzusehen ist, dass dasjenige, was an elektrischer Bewegung der durchströmten Strecke in wechselnder Richtung zugeführt wird, für jede der beiden Richtungen insoweit ganz gleich ist, wie die Akte des Ein- und Austauschens der Wippenarme in den Quecksilbernäpfen gleichartig verlaufen, — so ist doch eben diese letztere Voraussetzung keineswegs zutreffend, wie die Versuche mit obiger automatischer Wippe bei amphipolarer und intrapolarer Ableitung des Kernleiters aufs deutlichste zeigen. Der Bussolspiegel geräth dann in lebhafte Unruhe; er schwingt zwar im allgemeinen um den Nullpunkt, macht aber unregelmässig bald nach der einen, bald nach der andern Seite ziemlich bedeutende Excursionen. Das Gleiche zeigt sich am Kapillarelektrometer, dessen Quecksilberkuppe unregelmässig auf- und abzuckt.

Schwingende Federn, durch welche in rascher Folge, seien es feste Kontaktstellen, seien es Quecksilberkontakte, geschlossen und unterbrochen werden, geben eben niemals ganz gleichmässige Wirkungen; dazu kommt noch das Eisendrahtbündel in der primären Rolle des Induktoriums, dessen magnetisches Verhalten gegenüber den frequenten Stromschwankungen in der Rolle möglicherweise noch komplizirend einwirken könnte¹⁾. Jedenfalls gibt die Vorrichtung auch noch keine Ströme von einfachem, konstantem, ohne weiteres angebbarem Verlaufe, und entsprach noch nicht der Forderung, der durchströmten Strecke Wechselströme zuzuführen, welche eben ausser durch den Wechsel der Richtung sich durch nichts von einander unterscheiden sollten.

Die Magnetinduktion ist es, welche in der Form des von F. Kohlrausch²⁾ angegebenen und gerade auch für elektro-physiologische Zwecke empfohlenen Sinus-Induktors solche kongruente Wechselströme von genügender Intensität liefert³⁾.

1) Vergl. darüber übrigens: Du Bois-Reymond, Gesamm. Abh. Bd. I. S. 253—55.

2) Poggendorffs Ann., Jubelband. S. 290 ff.

3) Nach ähnlichem Prinzip hat Fleischl (du Bois' Archiv. 1882. S. 25)

Innerhalb des flachen Rahmens einer Spule mit 6500 Windungen eines 0,2 mm dicken Kupferdrahtes rotirte eine zur Sättigung magnetisirte kreisrunde Stahlscheibe von 50 mm Durchmesser und 3 mm Dicke mit diametral einander gegenüberliegenden Polen, welche, durch kleine, aus genügender Entfernung wirkende Elektromotoren angetrieben, 40 bis 140 Umdrehungen in der Sekunde machte.

Wurden die in der Rolle induzirten Ströme¹⁾ direkt der Bussole zugeleitet, so verharrte, abgesehen von einem Anfangs- und Schlussschlag, der Magnet vollkommen ruhig auf seinem Nullpunkte. Dasselbe zeigte sich, wenn diese Wechselströme einem Kernleiter zugeführt wurden, bei der amphipolaren und intrapolaren Ableitung desselben. Wurde dagegen der Kernleiter *extrapolar* auf der einen oder andern Seite der durchströmten Strecke abgeleitet, so traten auch unter der Wirkung dieser ganz gleichmässigen Wechselströme wiederum am Galvanometer dauernde Ströme, am Kapillarelektrometer bestimmte, regelmässige Ladungswirkungen auf. Beide Instrumente zeigen einen positiven Vorschlag (die proximale Elektrode *a* positiv), dem dann ein starker negativer Ausschlag folgt, welcher in *dauernde negative Ablenkung*, resp. Ladung (proximale Elektrode *a* negativ) zurückgeht, welche konstant bleibt, so lange die Wechselströme zugeführt werden. Wird der Abstand zwischen durchströmter und abgeleiteter Strecke vergrössert, und wird die Frequenz der Ströme gesteigert, so schwindet der positive Vorschlag und der folgende anfängliche starke negative Ausschlag, und die bleibende konstante Negativität der proximalen Elektrode *a* stellt sich ruhiger sofort her.

Zu allen bisher erörterten Versuchen dienten Kernleiter aus mit 0,6% Kochsalzlösung umgebenem Platindraht bestehend. Kernleiter mit Nickeldraht oder Aluminiumdraht als Kern, und Hülle von 0,6% Kochsalzlösung verhielten sich darin ver-

ein „Sinusrheonom“ konstruirt, dessen Ströme indessen zu schwach waren. Ferner schlug Joubert auf dem Pariser Elektrikerkongresse eine dem Sinusinduktor ähnliche Konstruktion vor (Elektrotechn. Zeitschrift 1881. S. 431) und endlich hat d'Arsonval kürzlich magnetelektrische Maschinen angegeben, welche ebenfalls in Sinuskurven verlaufende Wechselströme liefern sollen. (Archives de physiologie. 1892. S. 69 ff; 1893. S. 387 ff.)

1) Dieselben werden, bei einer Umdrehungszahl von über 100, dem menschlichen Körper durch die Hände zugeleitet, deutlich empfunden.

schieden von jenen, dass bei extrapolarer Ableitung die proximale Elektrode a bei jeder überhaupt wirksamen Stellung der sekundären Rolle des Schlitteninduktoriums, sowie bei jeder zur Verfügung stehenden Stärke der Ströme des Sinusinduktors stets nur positiv wurde, auch dieses unabhängig von der den Schliessungs- und Oeffnungsschlägen gegebenen Richtung, also kein „Wendepunkt“ sich zeigte, jenseits dessen, bei schwächeren Stromwirkungen etwa eine Negativität der proximalen Elektrode eingetreten wäre. Bei intrapolarer und amphipolarer Ableitung zeigte sich an diesen Kernleitern stets das der Richtung der Schliessungsschläge entsprechende Verhalten der Elektroden, ebenfalls ohne „Wende“, während die ganz gleichmässigen Ströme des Sinusinduktors unter diesen Umständen keinerlei abzuleitende Stromwirkungen hervorriefen.

Ganz verschieden von dem oben beschriebenen Verhalten der Kernleiter aus Platin und verdünnter Kochsalzlösung ist dasjenige solcher, bei denen diese Lösung durch destillirtes Wasser (rein im gewöhnlichen technischen Sinn) ersetzt war: nur starke Ströme des Schlitteninduktoriums gaben überhaupt wahrnehmbare Wirkung, und bei extrapolarer Ableitung ist der abgeleitete Strom stets im Sinne der zugeleiteten Oeffnungsströme gerichtet, bei intrapolarer und amphipolarer Ableitung stets im Sinne der zugeleiteten Schliessungsströme, also überhaupt durchaus abhängig von den Richtungen der zugeleiteten Wechselströme.

Mässige Steigerung der Konzentration der Kochsalzlösung der Hülle über 0,6% änderte im wesentlichen nichts an dem Verhalten, wie es oben besprochen ist.

Kernleiter endlich, deren Kern Platindraht, deren Hülle konzentrierte Zinksulfatlösung war, zu und von denen mittels amalgamirter Zinkelektroden zu- und abgeleitet wurde, zeigten folgendes Verhalten unter der Einwirkung von Wechselströmen. Ein von der Richtung der beiderlei Induktionsschläge unabhängiges Verhalten der extrapolaren Strecke ergibt sich auch hier, wenn der Abstand derselben von der durchströmten Strecke sehr klein ist, und zwar Negativität der proximalen Elektrode a bei dem kleinsten Abstände der beiden Strecken, positives Verhalten bei etwas grösserem Abstände¹⁾. Näheres ergeben die folgenden Tabellen 7 und 8.

1) Dies positive Verhalten sah schon Schiff (a. a. O.) bei (allerdings unipolarer) Zuleitung von Wechselströmen zum Zinksulfat-Platinkernleiter.

Tabellen 7 und 8 geben die Galvanometerausschläge bei extrapolarer Ableitung und Zuleitung der Ströme des Schlitteninduktoriums zu einem Röhrenkernleiter aus 0,2 mm dickem Platindraht in konzentrierter ZnSO_4 -Lösung. Schema wie für Tabellen 1—4.

7. rr und ab je = 30 mm; ra = 3 mm.

RA in mm	α) Gewöhnliches Hammerspiel		β) Helmholtz'sche Anordnung	
	I	II	I	II
120	0	0	0	0
90	—	—	0	0
60	—	—	0	0
30	—	—	—	—
0	(+) —	(+) —	—	—

8. rr und ab je = 30 mm; ra = 10 mm.

RA in mm	α) Gewöhnliches Hammerspiel		β) Helmholtz'sche Anordnung	
	I	II	I	II
120	+	+	0	0
90	+	+	0	0
60	+	+	0	0
30	+	+	+	+
0	+	+	+	+

Ist der Abstand zwischen durchströmter und abgeleiteter Strecke zu gross, dann erhält man entweder gar keine Wirkung, oder den (von Fleischl in der genannten Abhandlung über den interpolaren Elektrotonus erwähnten) Ausschlag im Sinne der Öffnungsströme bei gewöhnlichem Hammerspiel und kleinem Rollenabstand. Bei intrapolarer oder amphipolarer Ableitung von diesem Zinksulfat-Platin-Kernleiter erhält man Ablenkung im Sinne der Schliessungsschläge ebenfalls bei Zuleitung starker Ströme des Schlitteninduktoriums ohne Anwendung der Helmholtz'schen Einrichtung. Bei Zuleitung der wirklich kongruenten Ströme des Sinusinduktors ergibt intrapolare und amphipolare Ableitung, wie überhaupt bei allen Kernleitern, Ruhestand des Bussolspiegels.

Die Kernleiter aus zwei differenten Elektrolyten, deren Herstellung oben beschrieben ist, und welche, wie schon kurz erwähnt wurde, bei Zuleitung konstanter Ströme und extrapolarer Ableitung dieselben, noch genauer zu besprechenden

Wirkungen zeigen, wie ein Theil der Kernleiter mit metallischem Kern, und wie der Nerv¹⁾, — verhalten sich bei Zuleitung der Wechselströme des Induktoriums wie der Kernleiter aus Platin in 0,6% Kochsalzlösung; d. h. sie ergeben, extrapolar abgeleitet, bei grösserem Rollenabstande Negativität, dann Wendepunkt, und bei kleinem Rollenabstande Positivität der proximalen Elektrode *a*, unabhängig von der Richtung der Schliessungs- und Oeffnungsschläge.

Um zu einer Erklärung der vorstehend beschriebenen Erscheinungen zu gelangen, ist von den bekannten Wirkungen auszugehen, welche bei Durchleitung eines konstanten Stromes durch Kernleiter mit polarisirbarer Grenzfläche zwischen Kern und Hülle, extrapolar zu beobachten sind, den Erscheinungen also, welche den elektrotischen am Nerven entsprechen. Wird ein Strom einer Strecke des Kernleiters zugeleitet, so breiten sich sowohl von der Anode, wie von der Kathode aus positive, resp. negative Stromfäden durch die ganze Hülle aus, weil der durch die entstehende Polarisation geschaffene Uebergangswiderstand an der Grenze von Kern und Hülle den Stromausgleich durch den nächstliegenden Theil des Kernes hindert; legt man extrapolar Schliessungsbögen an, so nehmen Stromfäden diesen Weg, weil er besser leitet, als das entsprechende Stück Hülle (Hermann). Man erhält somit extrapolar Ströme, welche im ableitenden Bogen dem zugeleiteten gleichgerichtet sind; auf der Anodenseite den dem anelektrotischen Strom des Nerven (positiven Zuwachs des Ruhestroms), auf der Kathodenseite den dem katelektrotischen Strom des Nerven (negativen Zuwachs des Ruhestroms) entsprechenden Strom. Diese Ströme

1) An den Kernleitern, welche aus in Kupfersulfatlösung gequollenen Laminariastiften und in 0,6 % Kochsalzlösung inhibirtem Froschdarm bestehen, liess sich besonders gut zeigen, dass, wenn zunächst jedes der beiden Stücke für sich allein geprüft wird, keine Spur von extrapolarer Wirkung des Stromes wahrzunehmen ist, und sobald dann das Stäbchen in den Darm-schlauch eingeführt ist, die extrapolare Stromwirkung auftritt. Entsprechend verhält sich auch das in 0,6 % Kochsalzlösung imbibierte Thonpfeifenrohr, wenn es erst leer, dann mit Kupfersulfatlösung gefüllt untersucht wird. Uebrigens ist es bei der ziemlichen Dicke dieser Kernleiter für die extrapolare Wirkung nicht, wie bei den Drahtkernleitern, gleichgültig, ob zu- und ableitende Elektroden auf derselben Seite angelegt werden oder nicht; jedoch muss ich es unterlassen, hier näher darauf einzugehen.

werden nun aber nur dann gleich stark sein, oder überhaupt beide vorhanden sein, wenn an beiden Elektroden gleich starke Polarisation erzeugt wird, resp. an beiden Elektroden gleichzeitig gleich starke Polarisation besteht.

Hermann hat gezeigt, dass es Kernleiter gibt, in welchen überhaupt nur an einer Elektrode Polarisation und Stromfäden-Ausbreitung stattfindet, und ferner solche, wo dieselbe an der einen Elektrode grösser ist, als an der andern. Indem Hermann den Nerven zu diesen letzteren zählte, erklärte er hierdurch die von du Bois-Reymond seinerzeit gefundene Ueberlegenheit des anelektrotonischen Stromes über den katelektrotonischen, des positiven Zuwachses über den negativen. Das entgegengesetzte Verhalten der beiden Polarisationen in einem Kernleiter wird ebenfalls auftreten können.

Leitet man nun einem an beiden Elektroden verschieden stark polarisirbaren Kernleiter Wechselströme zu, so ist es klar, dass an beiden Elektroden, die ja jede abwechselnd Anode und Kathode sind, die gleiche, nämlich die bevorzugte Polarisation überwiegen muss; es entsteht also ein Ueberschuss von Stromfäden, welche beiderseits entweder in der Richtung nach oder von der Zuleitungsstrecke verlaufen; es wird also, unabhängig von der Richtung der Schliessungs- und Oeffnungsströme ein „positiver“ Strom extrapolar sich zeigen, wenn die Anodenpolarisation, ein „negativer“, wenn die Kathodenpolarisation überwiegt.

Solches Verhalten ist bereits bekannt, sofern du Bois-Reymond¹⁾ Fälle, in denen man am Nerven bei grosser Nähe der Ableitungs- und Reizstrecke positive statt der erwarteten negativen Schwankung erhält, durch Ueberwiegen des Anelektrotonus erklärt, — Fälle, welche auch Hermann auf S. 155, Bd. II seines Handbuches erwähnte und als falsche, vermeintliche positive Schwankung bezeichnete, — und sofern Schiff nach demselben Prinzip seinen am Kernleiter extrapolar erhaltenen positiven Strom (a. a. O.) als „Differentialstrom“ (richtiger wohl Differenzstrom) in

1) Untersuchungen. Band II. 1. S. 413, 414, 470; Archiv. 1861 S. 786 — gegenüber Moleschott; vergl. darüber auch Ranke. *ibid.* 1862. S. 241.

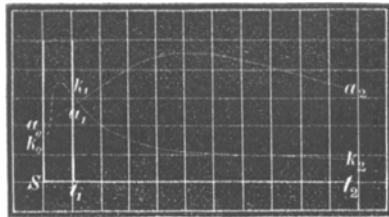
diesem Sinne erklärte, unter Bezugnahme auf das soeben erwähnte Verhalten des Nerven.

Nun haben wir es aber zunächst bei dem gewissermassen als typisch hier im Vordergrund stehenden Kernleiter von Platin und verdünnter Kochsalzlösung nicht einfach mit ständigem Ueberwiegen der Polarisationswirkung nur eines der beiden Pole zu thun, sondern mit einem nach bestimmten Umständen wechselnden Ueberwiegen der Polarisationswirkung beider Pole, indem je nach der Stärke der zugeführten Induktionsströme (Rollenabstand) und je nach dem Abstand zwischen durchströmter und abgeleiteter Strecke, durch den sog. Wendepunkt getrennt, der negative oder positive Pol die Oberhand hat. Zum Verständniss dieser Erscheinung wurde es nothwendig, zunächst Kettenströme durch die Kernleiter zu führen und die Grösse und den zeitlichen Verlauf der extrapolar abzuleitenden Ströme zu beobachten. Hierbei zeigten sich nun zunächst die schon bekannten Erscheinungen, dass die von der extrapolaren Strecke gewonnenen Ausschläge mehr oder weniger rasch abnehmen und nach der Oeffnung des Kettenstroms je nach Umständen verschieden gerichtete Nachströme auftreten, auf welche letztere näher einzugehen jedoch hier keine Veranlassung vorliegt. Der Vergleich der verschiedenen Kernleiter ergab aber Folgendes: Von Platindraht in konzentrirter Zinksulfatlösung oder auch in konzentrirter Kochsalzlösung sind extrapolar Ströme abzuleiten, welche auf beiden Seiten der durchströmten Strecke gleich rasch auftreten, ungefähr gleiche Maxima gleich schnell erreichen und merklich gleich langsam wieder abnehmen.

Nickel- und Aluminiumdraht in verdünnter Kochsalzlösung zeigen wesentlich das gleiche Verhalten, doch nehmen die Ströme viel rascher ab, und zwar auf der Kathodenseite schneller als auf der Anodenseite. Letzteres gilt auch für das Verhalten des Platindrahtes in der 0,6% Kochsalzlösung; indessen kann man hier bei schwachen Strömen erkennen, dass der erste Ausschlag auf der Kathodenseite plötzlicher erfolgt, als auf der Anodenseite.

Diese Differenzen im zeitlichen Verhalten der Polarisationswirkungen auf Seiten der beiden Pole am Kernleiter sind von grösster Bedeutung, weil sie einerseits, wie sich zeigen wird, den

Schlüssel zum Verständniss der oben beschriebenen Erscheinungen bei Wechselströmen darbieten, andererseits wiederum vollständige Analogie zum zeitlichen Verlauf der elektrotonischen Ströme am Nerven herzustellen gestatten. Nach du Bois-Reymond¹⁾ wächst der anelektrotonische Strom nach Schliessung des polarisirenden langsam an und übertrifft dann an Stärke den katelektrotonischen, während dieser letztere schon sinkt, nachdem er bisweilen bei der ersten Ableseung nach Schliessung des polarisirenden Stroms seinerseits den anelektrotonischen übertroffen hat; wahrscheinlich hat dieser katelektrotonische Strom vorher, sehr bald nach Schliessung des polarisirenden, ein Maximum. Ich habe dieses Verhalten am Froshnerven in einer Anzahl darüber angestellter Versuche bestätigt gefunden. Du Bois veranschaulicht diesen zeitlichen Verlauf der elektrotonischen Ströme durch die beiden nebenstehenden Kurven, welche also zu einem gewissen Zeitpunkt nach Schliessung des polarisirenden Stromes einen Durchschnittspunkt haben. (t_1 ist der Zeitpunkt der ersten Ablesung.) Die von dem aus Platin in 0,6% Kochsalzlösung



Figur 1.

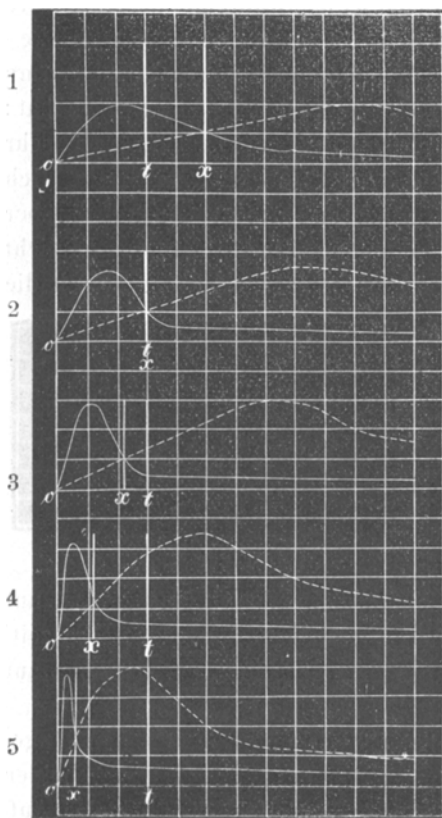
bestehenden Kernleiter extrapolar abzuleitenden Ströme zeigen, nur auf kleinere absolute Zeitwerthe zusammengedrängt, dasselbe zeitliche Verhalten, wie der Nerv, so dass dasselbe Kurvenschema zur Erläuterung dienen kann.

Darf man nun das, was bei Einwirkung von Strömen längerer Zeitdauer sich ergibt, hinsichtlich des Verlaufs jener beiden Kurven in du Bois' Schema und speziell hinsichtlich des Auftretens eines Durchschnittspunkts derselben, übertragen auf die bei der Einwirkung kurzdauernder Ströme eintretenden Vorgänge, so muss zugleich die — durch später mitzutheilende Rheotomversuche gerechtfertigt erscheinende — Annahme gemacht werden, dass die unter diesen Umständen allein in Frage kommenden Anfangstheile der beiden Kurven auf kürzere Abszissen resp. Zeitwerthe zusammengedrängt sind, der Art, dass ein Durch-

1) Du Bois' Arch. 1867. S. 446 ff. Ges. Abh. II. S. 256 ff.

schnittpunkt auch unter diesen Verhältnissen auftritt, aber der Ordinatenachse entsprechend genähert liegt, so dass das, was derselbe zu bedeuten hat, überhaupt zur Beobachtung kommen kann.

Auf Grund dieser — wie gesagt durch Rheotomversuche zu stützenden — Vorstellung kann nun die, wenn auch zunächst nicht



direct zu beweisende, aber durch eine Reihe von That-sachen nahe gelegte Annahme gemacht werden, dass die Lage jenes Durchschnittspunktes der beiden Kurven bei gleicher Frequenz der Stromstösse von deren Intensität, bzw. von der Entfernung, über welche sie extrapolar zu wirken haben — Abstand der durchströmten von der abgeleiteten Strecke — abhängig ist; derart, dass mit zunehmender Intensität der Durchschnittspunkt der Ordinatenachse näher rückt. Alsdann ergibt sich sehr einfach, dass, wenn kurz dauernde Ströme von konstanter Frequenz in wechselnder Richtung durch den Kernleiter geführt werden, die Erscheinung bei extrapolarer Ableitung von

Fig. 2.

dem Verhältniss des Abszissenwerths $o x$ des Durchschnittspunkts zu der Grösse des (konstanten) Intervalls zwischen zwei Stromstössen $o t$ abhängen muss. (Siehe die Kurven 1—5 Fig. 2.) Fällt nämlich dieser Durchschnittspunkt entweder erstens jenseits des ganzen Intervalls (Kurve 1), oder zweitens gerade auf die Grenze des Intervalls, also auf den Zeitpunkt t (Kurve 2), oder drittens derart in das Intervall selbst hinein, dass das Zeitintegral der katelektrotonischen Kurve von o bis x in höhe-

rem Masse das Zeitintegral des entsprechenden Stücks der anelektrotonischen Kurve übertrifft, als umgekehrt das Zeitintegral der anelektrotonischen Kurve von x bis t das Zeitintegral des entsprechenden Stücks der katelektrotonischen Kurve übertrifft (Kurve 3), so wird in allen diesen drei Fällen ein Ueberwiegen der Kathodenpolarisation, also „negative“ Wirkung (Negativität der proximalen Elektrode) sich zeigen. Fällt aber der Durchschnittspunkt derart in das Intervall hinein, dass innerhalb desselben zu beiden Seiten des Durchschnittspunktes die Differenzen der Zeitintegrale je der beiden Kurvenstücke gleich sind (Kurve 4), so werden die Polarisationswirkungen beider Pole sich gerade aufheben; mithin entspricht diese Lage des Durchschnittspunkts dem von uns so bezeichneten „Wendepunkt“.

Fällt endlich der Durchschnittspunkt derart in das Intervall zwischen zwei Stromstössen, dass nach ihm das Zeitintegral der Kurve des anelektrotonischen Stroms in höherem Masse überwiegt, als vor ihm das Zeitintegral der Kurve des katelektrotonischen, so wird, extrapolar abgeleitet, positive Wirkung sich zeigen (Kurve 5).

Eine sehr wesentliche Stütze für die dieser Erklärung zu grunde liegende Annahme, und damit für die entwickelte Vorstellung, lieferten solche Versuche, in denen nicht Induktionsschläge, sondern kurzdauernde, frequente Kettenströme dem Kernleiter zugeführt wurden. Die oben als „automatische Wippe“ bezeichnete Vorrichtung, eingeschaltet in den Kettenstromkreis, besorgt, je nachdem die Quecksilbernäpfe gekreuzt oder ungekreuzt verbunden sind, kurzdauernde Ströme von entweder wechselnder oder gleichbleibender Richtung, welche letztere durch einen gewöhnlichen Kommutator bestimmt wird.

Die Zuleitung nun gleichgerichteter, frequenter, kurzdauernder Kettenströme zu dem Kernleiter aus dünnem Platindraht in 0,6% Kochsalzlösung ergab die Thatsache, dass auf der Anodenseite durchaus nicht etwa solche positive Ausschläge ceteris paribus erhalten werden, welche den negativen auf der Kathodenseite an Grösse entsprächen, vielmehr sind jene kleiner, ja man bemerkt bei der schon erwähnten Inkonzanz der Ablenkungen eine deutliche Tendenz zum Auftreten von Negativität der proximalen Elektrode a auf der Anodenseite. Dieselben Ströme in wechselnder Richtung (gekreuzte Wippenverbindung) liefern

extrapolar eine kleine definitive Negativität dieser Elektrode, wie die Induktionsströme des Sinusinduktors. Beides lässt sich nur durch die vorher dargestellte Annahme erklären: die extrapolaren katelektrotonischen Ströme erreichen eher ein Maximum, entwickeln sich vielleicht überhaupt schneller, oder pflanzen sich schneller fort, als die anelektrotonischen, so dass sie unmittelbar nach Schluss des polarisirenden Stromes, unter der Anode durchgehend, extrapolar auf der Anodenseite ihre Wirkung zeigen.

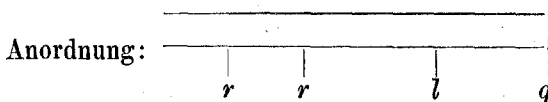
Dass bei Zuleitung kurzdauernder, frequenter, gleichgerichteter Ströme extrapolar auf der Kathodenseite grössere Ablenkungen erhalten werden, ist am Nerven bereits von du Bois-Reymond¹⁾ gefunden worden. Ja, derselbe Autor gibt an, dass bei besonders frequenter Stromunterbrechung durch den Magnetelektromotor auf der Anodenseite rein negative Ablenkung erhalten werden kann.

Ich habe am Froshnerven ebenfalls derartige Versuche mit der oben beschriebenen Vorrichtung angestellt und durchgehends dies letztere, von du Bois angegebene Resultat erhalten, wovon ich ein Beispiel in folgender Tabelle 9 gebe²⁾.

Tabelle 9.

Zuleitung von kurzen und frequenten Kettenströmen zu einem Frosch-Ischiadicus vermittelt der „automatischen“ Wippe.

rr und lq je = 10 mm; rl = 20 mm.



Ruhestrom lq = + 35 Skalentheile.

Zwischen rr gleich- $\left\{ \begin{array}{l} l \text{ auf Kathodenseite: } - 11 \text{ Sk.} \\ l \text{ auf Anodenseite: } - 4 \text{ Sk.} \end{array} \right.$

Ströme in wechselnder Richtung: — 10 Skalentheile.

1) Untersuchungen über thier. Elektr. II. 1. S. 396 ff.

2) Diese und alle noch zu beschreibenden Versuche am Nerven wurden ohne Anwendung der Kompensation des Ruhestroms ausgeführt, um die Einführung jeder komplizirend wirkenden Versuchsbedingung zu vermeiden.

Die bisher mitgetheilten Untersuchungen über die Erscheinungen, welche bei Einwirkung der verschiedenartigen elektrischen Prozesse — Kettenströme von längerer und von kurzer Dauer, von konstanter und wechselnder Richtung, Induktionsströme verschiedener Erzeugungs- und Zuleitungsweise — auf Kernleiter zu beobachten sind, insbesondere den Kernleiter aus Platindraht umgeben von 0,6% Kochsalzlösung, sowie die aus zwei Elektrolyten bestehenden Kernleiter, haben die grösste Aehnlichkeit ergeben zwischen diesen Erscheinungen und denen, welche als unter den gleichen Einwirkungen am frischen, leistungsfähigen, sogenannten lebenden Nerven sich zeigend bekannt sind, insofern man zunächst absieht von dem Umstande, dass am Nerven sich die sämmtlichen hierher gehörigen Erscheinungen auf einem ursprünglich vorhandenen sog. ruhenden Nervenstrom gewissermassen aufbauen, bezw. als Veränderungen desselben entgegentreten oder aufgefasst werden können; während am Kernleiter wesentlich dieselben Erscheinungen ohne solchen vorgängigen Bestand von nach aussen sich geltend machenden elektrischen Gegensätzen auftreten.

Von den aus vorstehender Zusammenfassung sich ergebenden weiteren Fragen soll zunächst diejenige erörtert werden, bei welcher es sich darum handelt, ob und inwieweit die hervorgehobene Aehnlichkeit zwischen dem Verhalten des Kernleiters und des Nerven die Beschaffenheit des letzteren als frisch, leistungsfähig, „lebend“ voraussetzt.

II.

Somit handelt es sich um das elektrische Verhalten des sich selbst überlassenen Nerven nach dem Tode des Thieres oder nach dem Ausschneiden und namentlich um das Verhalten desselben bei Applikation jener verschiedenen elektrischen Einwirkungen.

Während die Persistenz des sogenannten ruhenden Nervenstromes zwischen Längsoberfläche (sog. Längsschnitt) und künstlichem Querschnitt für längere Zeit nach Aufhören der Erregbarkeit der Muskeln vom Nerven aus, lange bekannt ist, findet sich hinsichtlich der elektrotonischen Ströme sowie der sog. negativen Schwankung vielfach die Angabe, dass dieselben mit Aufhören der indirekten Reizbarkeit des Muskels, also mit Aufhören der Wirksamkeit einer reizenden Einwirkung auf den Nerven zur Aus-

lösung einer Muskelzuckung, ebenfalls verschwinde. Indessen finden sich schon aus früherer Zeit (1868) Angaben von Valentin¹⁾, dass die elektrotonischen Ströme und die negative Schwankung noch lange nach dem Aufhören der Muskelreizbarkeit zu beobachten seien.

L. Hermann giebt in Band II seines Handbuchs, S. 120 an, am Kaninchenerven galvanische Erregungsphänomene noch mehrere Stunden nach Aufhören der indirekten Reizbarkeit des Muskels, ja selbst zur Zeit des Versagens der direkten Muskelreizung beobachtet zu haben.

L. Frédéricq²⁾ beobachtete die negative Stromesschwankung am Nerven des Kaninchens, Hundes und Pferdes bei elektrischer Reizung noch bis zu 24 Stunden nach dem Tode, also sicherlich lange Zeit nach dem Aufhören der bei Homoiothermen so schnell erlöschenden sowohl indirekten, wie direkten Muskel-erregbarkeit.

Dass am Froschnerven, wenn unter geeigneter kühler Aufbewahrung der Präparate die direkte und indirekte Reizbarkeit der Muskeln sich Tage lang — abnehmend — erhält, auch alle galvanischen Phänomene der Art nach so wie am frischen Nerven, eben so lange noch zu beobachten sind, ist durch du Bois-Reymond bekannt, der diese Erscheinungen bis zu weit über hundert Stunden nach dem Tode persistiren sah³⁾.

Aber auch für den Froschnerven hat, um diese galvanischen Erscheinungen erhalten zu können, eine Einschränkung auf die Zeit, in welcher Muskelzuckungen vom Nerven aus oder direkt noch zu erhalten sind, keine Gültigkeit. So wie im hiesigen physiologischen Institut der ruhende Nervenstrom, die elektrotonischen Erscheinungen und die negative Stromesschwankung sowohl gelegentlich an lange Zeit aufbewahrten Säugethiernerven, wie namentlich an bis über acht Tagen aufbewahrten Froschpräparaten, an denen keine Spur von Muskelaktion mehr zu erhalten ist, schon seit vielen Jahren demonstriert zu werden pflegt, so habe auch ich mich von dieser Thatsache überzeugen können. Die enthäuteten und dabei vor der Berührung mit der äusseren

1) Pflüger's Archiv. I. S. 423 ff.

2) Du Bois' Archiv. 1880. S. 70.

3) Untersuchungen. II. 1. S. 286.

Hautoberfläche geschützten Hintertheile der Frösche, sog. Galvanische Präparate, wurden unter Einhaltung der nöthigen Sauberkeit im verschlossenen Gefäss, ohne Gefahr des Vertrocknens an einem kühlen Ort, gegen Ende des Bestehens von Reizbarkeit auf Eis, aufbewahrt, und gelang es (im Winter) stets, die Präparate völlig „abgestorben“, aber ohne jede Spur von Fäulnisserscheinungen weit über acht Tage zu erhalten; der Nervenstamm am Oberschenkel kann gleich von vorn herein freigelegt und isolirt werden, oder auch bis zur Vornahme der Untersuchung in seiner Lage zwischen den Muskeln belassen werden, im erstern Falle natürlich durch geeignete Lagerung auf andern Theilen des Präparats vor Austrocknen besonders geschützt.

Ruhestrom, elektrotonische Ströme unter der Wirkung des Kettenstromes, und die sog. negative Stromesschwankung bei Einwirkung von Wechselströmen (Sinusinduktor, Schlitteninduktorium) wurden an 7 bis 8 Tage lang aufbewahrten Präparaten stets vollkommen deutlich und präzis, aber je nach der Zeit schwächer, und viel schwächer als am frischen Nerven beobachtet, sowohl am Galvanometer, als namentlich auch an dem recht empfindlichen Kapillarelektrometer.

In einer zur Grenzbestimmung ausgeführten Versuchsreihe sah ich die negative Schwankung unter der Einwirkung von Wechselströmen am zwölften Tage noch eben deutlich sich bemerkbar machen und am dreizehnten verschwinden oder an der Grenze des Verschwindens: die mikroskopische Untersuchung des Nerven ergab, dass an sämtlichen Nervenfasern die Struktur zerstört, die Markscheide in eine zerbröckelte Masse umgewandelt war, im Gegensatz zu dem Verhalten solcher nicht so lange aufbewahrter, galvanisch noch wirksamer Präparate, in deren Nervenstämmen immer noch eine grössere oder geringere Zahl wohl-erhaltener doppeltkontourirter Fasern zu finden sind.

Es erschien in der That zunächst zweifellos, dass die Persistenz derjenigen Eigenschaft des Nerven, auf Grund deren die galvanischen Erscheinungen an ihm in der Ruhe und bei elektrischen Einwirkungen (Kettenströme und Wechselströme) zu beobachten sind, nicht sowohl dadurch bestimmt wird, dass zugleich auch dasjenige besteht, auf Grund dessen vom Nerven aus auch noch eine Auslösung von Muskelaktion möglich ist, als vielmehr durch die Konservirung der normalen Struktur, was alsdann keine

andere Auffassung oder Ausdeutung zuzulassen scheinen musste, als die, dass es sich um die in der Struktur begründete Eigenschaft als Kernleiter handelt.

Eine wichtige Beobachtung Steinach's¹⁾ scheint hiermit in voller Uebereinstimmung zu sein, insofern derselbe an bis dahin noch frischen eben trocken gewordenen Froshnerven nach Wiederaufweichung in 0,6% Kochsalzlösung auf Einwirkung von Induktionsströmen deutliche negative Schwankung erhielt: man weiss, wie gut ein rasches Eintrocknen von manchen vorher unversehrten Geweben die Struktur für die mikroskopische Untersuchung im wieder gequollenen Zustande konservirt. Ich habe den in Rede stehenden Versuch Steinach's wiederholt und bestätigt gefunden, dass ein Nerv, der soweit ausgetrocknet ist, dass er den ruhenden Nervenstrom nicht mehr aufweist, nach längerem Quellen in 0,6% Kochsalzlösung zugleich mit dem Wiedererscheinen des Ruhestromes auch dessen negative Schwankung zunächst bei Zuleitung von Induktionsströmen, zeigt, wenn auch viel schwächer, als vor dem Austrocknen.

Nun aber musste in Betracht gezogen werden, dass die sog. negative Stromesschwankung, also eine der in die vorhergehenden Schlussfolgen einbegriffenen galvanischen Erscheinungen, am frischen Nerven auch dann zur Beobachtung kommt, wenn seine Reizung auf nicht elektrischem Wege, z. B. mechanisch vorgenommen wird, wobei, wie man meinen musste, jede Beziehung zu Begriff und Eigenschaft des Kernleiters von vorn herein völlig ausgeschlossen zu sein schien.

Was zunächst die Frage betrifft, ob überhaupt bei nicht elektrischer Reizung des frischen Nerven die Erscheinung der negativen Stromesschwankung auftritt, so ist bekannt, mit wie viel Umsicht und Sorgfalt du Bois-Reymond²⁾ diese Frage von fundamentaler Wichtigkeit für den Froshnerven zur Entscheidung zu bringen suchte und als, wenn auch experimentell schwierig, so doch mit voller Sicherheit zu bejahende hinstellte; auch ist bekannt, dass Frédéricq³⁾ dagegen am Säugethiernerven die Erscheinung unter den gedachten Umständen vermisste. In neuester

1) Pflüger's Arch. LV. S. 516. Anm.

2) Untersuchungen. II. 1. S. 507—528.

3) Du Bois' Archiv. 1880. S. 70.

Zeit wurde angesichts einerseits gewisser von Grützner¹⁾ bei Versuchen am Froschnerven gemachter, für die Sicherheit der in Rede stehenden Erscheinung bedenklicher Beobachtungen, — andererseits angesichts einer vereinzelt positiven Angabe Herings für den N. olfactorius des Hechtes — die Frage nach dem Eintreten der negativen Stromesschwankung bei nicht elektrischer Reizung des Froschnerven durch Steinach²⁾ einer erneuten gründlichen Untersuchung unterzogen. Er wendete mechanische Reizung mittelst Durchschneidung, ferner chemische Reizung (Kochsalz, Alkohol, Austrocknung) an, sowie endlich Durchhätzen und Durchfrieren des Nerven und beobachtete in allen diesen Versuchen, welche er auf Hering's für feine nervenphysiologische Untersuchungen angegebene Empfehlung, an sog. Kaltfröschen anstellte, stets deutlich die negative Stromesschwankung.

Ich habe ebenfalls verschiedene, gleich namhaft zu machende Arten nicht elektrischer Reizung ausgeführt, und zwar am frischen, dem lebenden Frosche entnommenen Nerven fast ausnahmslos mit positivem Resultat bezüglich der negativen Stromesschwankung, mochte der Frosch nun vorher besonders abgekühlt gewesen sein oder nicht (Winterfrösche).

Die mechanische Reizung gelangte in zwei Arten zur Ausführung, erstens als Durchschneidung, zweitens als Hämmern mit einem mechanischen Tetanomotor. Durchschnitten wurde zunächst mit gewöhnlichen stählernen Scheren; da aber möglicherweise die beiden Scherenblätter elektrisch nicht ganz gleichartig waren, somit bei Anlegen an den Nerven, sofern dies nicht in absolut transversaler Richtung stattfindet, die Möglichkeit gleichzeitiger elektrischer Längsdurchströmung nicht als absolut ausgeschlossen anzusehen war, so wurde auch eine mit Blättern aus zugeschärften Elfenbein- oder Glasplatten versehene Schere versucht. Dieselbe wirkte aber zu unsicher; besser und präziser gelang die Durchschneidung mit Hilfe der scharfen Kante eines Glassplitters, welche schräg über eine andere, den Nerven stützende Glaskante geführt wurde. Auch bei diesem Versuchsverfahren, ja selbst schon bei kräftigem Quetschen des Nerven mit einer Elfenbeinpincette kam die negative Schwankung deutlich zur Wahrnehmung. Als mechanischer Tetanomotor

1) Pflüger's Archiv. XXV.

2) Pflüger's Archiv. LV. S. 487 ff.

stand ein für diesen Zweck sehr praktisch eingerichteter elektromagnetischer Hammerapparat zu Diensten, welcher bei gleicher Leistungsfähigkeit wie die des bekannten Heidenhain'schen Apparats einige Vorzüge bezüglich der Leichtigkeit und Vielseitigkeit der Applikation hat, deren nähere Beschreibung jedoch hier nicht nöthig erscheint. Bei beiden Arten der Ausführung der mechanischen Reizung sind zwei Quellen der Täuschung besonders sorgfältig zu vermeiden: erstens jede Lockerung der Berührung zwischen Nerv und Ableitungselektroden durch Erschütterung insofern durch Vermehrung des Widerstandes eine negative Schwankung des abgeleiteten Nervenstromes vorgetäuscht werden könnte, zweitens die dauernde Veränderung des abgeleiteten Nervenstroms, welche sich bemerklich macht, wenn der Schnitt oder die Zerschnittung in zu grosser Nähe von der abgeleiteten Strecke ausgeführt wird.

Zur Vermeidung der Erschütterungswirkungen verfuhr ich folgendermassen: Die Ableitung geschah in den meisten Fällen durch dünne Baumwollfaserbündel — aus einfachsten Lampendochten — welche mit 0,6% Kochsalzlösung getränkt, um den Nerven geschlungen oder leicht geknotet und mit ihren Enden auf plattenförmigen Chlorsilberelektroden gelegt waren. Diese Art der Ableitung durch sog. Seilelektroden schwächt allerdings durch Einführung eines grösseren Widerstandes die Bussolwirkung ab, nicht aber die Anzeigen des Kapillarelektrometers, deren Grösse nur von der elektromotorischen Kraft abhängig ist.

Da ein in dieser Weise abgeleiteter dünner Froschnerv auf der betreffenden Strecke stark belastet, einer Stütze bedarf, die keine Nebenschliessung einführt, so wurde er über die geschliffenen Kanten zweier im nöthigen Abstand stehender Glasplatten (dicke Objektträger) gelegt.

Was jene zweite Täuschungsquelle, die Einmischung dauernder elektrischer Zustandsänderungen betrifft, so habe ich an der Bussole immer sorgfältig auf die präzise und vollständige Rückkehr des Spiegels geachtet; vom Kapillarelektrometer ist in Bezug auf diesen Punkt nicht immer direkt sichere Entscheidung zu gewinnen, worauf ich hier nicht näher eingehen möchte, da die durch die Bussole gewährte Kontrolle vollkommen genügend ist.

Steinach hat die erste Durchschneidung, welche er am nächsten dem Rückenmark anlegte, meist am wirksamsten ge-

funden; ich meinerseits sah beim ersten Schnitt nahe dem Rückenmark die Wirkung zuweilen ausbleiben und dann bei den folgenden Schnitten deutlich hervortreten, stets mit präzisiertem Rückgang des Spiegels, wobei allerdings allmähliche Verkürzung des Abstandes zwischen Schnittstelle und abgeleiteter Strecke stattfand.

Beim Hämmern mit dem oben erwähnten Tetanomotor, wobei die mit dem Nerven in Verbindung gelassene Unterschenkelmuskulatur in kräftigen Tetanus gerieth, wurde eine negative Stromesschwankung beobachtet, die bedeutender, bis zum doppelten und dreifachen der Ablenkung des Magneten war, als diejenige beim Schnitt, auf welche aber nicht so präziser und zuweilen auch nicht so vollständiger Rückgang folgte. Die gehämmerte Stelle war bei einigermassen längerer Dauer des Hämmerns vollständig zerquetscht, unerregbar und unfähig die Erregung zu leiten.

Die Prüfung der Wirkung chemischer Reizung führte ich in der Weise aus, dass nach Ablesung des Bussolspiegelstandes auf das zu reizende Nervenende gepulvertes Kochsalz aufgestreut wurde: nach Ablauf einiger Sekunden begann langsamer Ausschlag im Sinne der negativen Stromesschwankung, erreichte ein Maximum, in welchem der Magnet etwa eine Minute lang verharrete, um dann allmählich zurückzugehen; wenn das mit dem Kochsalz bestreute Nervenende abgeschnitten wurde, wie in Steinach's Versuchen, stellte sich sofort der ursprüngliche Stand (Ruhestrom) wieder her. Letzteres erfolgte auch (ähnlich wie in Steinach's Versuchen mit Alkoholreizung), als das mit dem Kochsalz bestreute Nervenende mit 0,6% Kochsalzlösung abgespült wurde.

Zur Prüfung der Wirkung sog. adäquater Reizung des motorischen Nerven, also Reizung von den Centralorganen aus, bezüglich des Auftretens der negativen Schwankung, wiederholte ich den schon von du Bois-Reymond mit Erfolg angestellten Versuch mit Hilfe des Strychnintetanus¹⁾. An einem auf passendem

1) Hier muss übrigens erwähnt werden, dass galvanische Erregungsphänomene auch bei adäquater Reizung eines Sinnesnerven schon vor längerer Zeit beobachtet sind. Ich meine die von Holmgren, sowie Kühne und Steiner (Untersuchungen aus dem physiolog. Institut zu Heidelberg. III. S. 278 ff; 327—377. IV. S. 64—168) an mehreren Thierarten untersuchten positiven und negativen Schwankungen des am Sehnerven bezw. seiner Ausbreitung in der Netzhaut abzuleitenden ruhenden Nervenstromes (sog. Dunkelstromes). Diese sog. photoelektrischen Schwankungen haben

Korkrahmen möglichst unbeweglich aufgespannten grossen Frosche wurde der eine N. ischiadicus auf möglichst grosse Länge unblutig bis zum Knie freigelegt, nach Durchschneidung in der Kniekehle herausgehoben und auf stäbchenförmige Chlorsilberelektroden, die mit in 0,6% Kochsalzlösung getränkten Baumwollfäden umwickelt waren, mit Längsoberfläche und Querschnitt so gelagert, dass der Nervenstamm überall locker und ohne Spannung war und bei eintretenden Krämpfen keine Verschiebung an den Ableitungsstellen stattfinden konnte. Nachdem dann Strychninlösung in mässiger Dosis, wie sie sich geeignet erwies, um unter Vermeidung zu frühen Eintritts des allgemeinen Starrkrampfes, reflektorisch einzelne Anfälle hervorrufen zu können — in einen Lymphsack unter die Rückenhaut injiziert war, wurde der Stand des Bussolspiegels fortwährend beobachtet: es zeigte sich jedesmal bei Eintritt eines Krampfanfalls ein deutlicher negativer Ausschlag, der nach Aufhören des Anfalls präzise zurückging.

Angesichts nun der beiden Thatsachen, dass einerseits die als negative Stromesschwankung bezeichnete galvanische Erscheinung auch am Nerven des abgestorbenen Präparats eintritt, wenn derselbe solchen elektrischen Einwirkungen unterworfen wird, welche am frischen Präparat ihn zur Auslösung von Muskelaktion reizen, und dass andererseits solche galvanische Erscheinung — negative Schwankung — am Nerven des nicht abgestorbenen Präparats auch dann eintritt, wenn derselbe durch nicht elektrische Einwirkungen zur Auslösung von Muskelaktion gereizt wird, drängte sich, wenn auch seltsam erscheinend, so doch unabweisbar die Frage auf, ob etwa solche nicht elektrische Einwirkungen, wie sie den Nerven des nicht abgestorbenen Präparats als sog. inadäquate Reize zur Auslösung von Muskelaktion erregen, auch am Nerven des abgestorbenen Präparates galvanische Erscheinungen hervorrufen.

Dies ist in der That der Fall. Es wurde genau in derselben Weise wie an den Nerven der frischen Präparate, Durchschneidung, Quetschung, Hämmern und Bestreuen mit gepulvertem Kochsalz

neuerdings eine weitere Bestätigung und sogar eine genaue Analyse durch das Rheotom erfahren in einer Arbeit von S. Fuchs in Wien (Pflüger's Arch. LVI. S. 408 ff.).

ausgeführt an den, wie oben für die Versuche mit elektrischen Einwirkungen, lange Zeit aufbewahrten Froschpräparaten, sowie auch an ausgeschnittenen und längere Zeit aufbewahrten Säugethiernerven.

So wie schon die vorher erwähnten derartigen Versuche am frischen Nerven zu den feinsten gehören, sehr empfindliche Apparate und grosse Vorsichtsmassregeln erfordern, auch nicht in jedem einzelnen Versuche ein sicheres positives Resultat erwartet werden kann, so gilt dies ganz besonders und in noch höherem Grade von den jetzt in Rede stehenden Versuchen, welche deshalb ebenfalls, wie auch jene, häufig wiederholt wurden. Wir stellten die mechanischen Einwirkungen auf den Nerven des abgestorbenen Präparates in den Vordergrund. Bei dem grossen, durch die dabei nothwendigen Seilelektroden eingeführten Widerstand war das Kapillarelektrometer zur Prüfung besser geeignet als die Busssole. Geling die Zerschneidung oder Zerquetschung des auch hierfür bis über acht Tage lang aufbewahrten Froschnerven mit Hülfe von Glassplitttern hinreichend präzis, so wurde fast jedesmal eine zwar kleine, aber vollkommen deutliche Zuckung des Quecksilberfadens der Kapillare beobachtet. Zwei Beobachter sind — wie mit Bezug auf das gleiche Erforderniss bei entsprechenden der früher beschriebenen Versuche hier nachträglich erwähnt werden mag — erforderlich, deren einer den Akt der Durchschneidung ausführt und ankündigt, während der andere sehr aufmerksam das Bild der Kapillare zu beobachten und auf die in demselben Moment eintretende, aber sehr rasch verlaufende, meist sehr kleine Zuckung der Quecksilberkuppe zu achten hat. Bei der durch die oben erwähnte Anordnung vollständig gesicherten Unveränderlichkeit der Ableitungsbedingungen war ein Zweifel daran, dass die Erscheinung nur von einer unter der mechanischen Einwirkung an entfernter Stelle sich geltend machenden inneren Veränderung des Nerven abhängig sein konnte, völlig ausgeschlossen, ganz abgesehen davon, dass häufig solche Kontrollversuche angestellt wurden, in denen Erschütterungen und Zerrungen des abgeleiteten Präparats — aber ohne Quetschen oder Schneiden — geschahen, ohne dass die geringste Einwirkung auf das Kapillarelektrometer zu bemerken war.

Zur Beobachtung der Wirkung des Hämmerns des Nerven des abgestorbenen Froschpräparates konnte auch das Galvanometer

benutzt werden, wobei sich zeigte, dass die zu beobachtende galvanische Veränderung des Nerven nicht immer eine „negative“, sondern häufig eine „positive“ Schwankung des vorher im gewöhnlichen Sinne vorhandenen (nicht „umgekehrten“) sog. ruhenden Nervenstroms war, was übrigens auch unter gleichen Umständen am Nerven des nicht abgestorbenen Präparates, jedoch viel seltener, vorkam.

Das Bestreuen des Nerven des abgestorbenen Präparates mit gepulvertem Kochsalz war besonders gut geeignet, die Erscheinung einer auch an diesem Objekt an entfernter Stelle sich geltend machenden galvanischen Veränderung im Sinne der negativen Schwankung vorzuführen.

Ganz so lange Zeit nach dem Tode oder nach dem Ausschneiden der Präparate, wie sie zum Aufweis der letzten Zeichen von Wirksamkeit elektrischer Applikationen abgewartet werden konnte, durfte für die vorstehenden Versuche mit ihren im allgemeinen viel zarteren, kleineren Erscheinungen, nicht abgewartet werden: die Möglichkeit, dieselben zu beobachten, war unter vergleichbaren Umständen ein bis zwei Tage früher geschwunden.

Was die Nerven von Säugethieren betrifft (Kaninchén, Hund, Katze), so sind für diese, wie auch überhaupt für alle in dieses Gebiet gehörigen, zum Theil schon oben erwähnten Versuche die grossen, relativ dicken, mit sehr starken Hüllen versehenen, daher straffen Stämme der Extremitätennerven nicht gut geeignet, besser dagegen der Vagus resp. Vagosympathicus. Ich erhielt auch von diesen Nerven, wenn sie zwei bis drei Tage nach dem Ausschneiden feucht und kühl aufbewahrt, nach der bisherigen Beurtheilung als völlig abgestorben anzusehen waren, beim Hämmern mit dem mechanischen Tetanomotor deutliche Anzeichen der sogenannten negativen Schwankung, wie ich sie — stärker — an frischen derartigen Objekten auch niemals vermisst habe¹⁾.

Nachdem die Fähigkeit des, ohne Austrocknen sich selbst überlassen abgestorbenen Nerven, auch auf nicht elektrische Einwirkungen hin, galvanische Erscheinungen zu zeigen, somit konstatirt war, habe ich auch diese Versuche auf den rasch ausgetrockneten und in 0,6% Kochsalzlösung wieder aufge-

1) Stefani (Sull' eccitazione del nervo vago; lo Sperimentale. XXXVII. S. 268—274) giebt an, bei elektrischer Reizung des Vagus stets positive Schwankung beobachtet zu haben — was ich nicht gesehen habe.

weichten Nerven ausgedehnt. Derselbe zeigt thatsächlich nicht nur beim Elektrisiren mit Induktionsströmen, wie Steinach fand und ich habe bestätigen können (s. o.), sondern auch beim Hämmern mit dem mechanischen Tetanomotor, wenn auch sehr schwach, so doch deutlich, die negative Schwankung des, nach dem Austrocknen verschwundenen, mit dem Wiederaufquellen zurückgekehrten Ruhestroms. Da — im Gegensatz zu den Versuchen an abgestorbenen Präparaten — es möglich ist, einen Theil des noch mit dem lebenden Thiere in Verbindung stehenden Nerven an der Luft austrocknen zu lassen und dann in 0,6% Kochsalzlösung wieder aufzuweichen, so unternahm ich es, die Einwirkung centraler Reize auf den derart behandelten Nerven zu untersuchen. Hierzu wurde ein Frosch wie in dem oben beschriebenen Strychninversuch hergerichtet: der an der Kniekehle durchschnittene und aus der Wunde herausgehobene N. ischiadicus wurde so lange an der Luft dem Austrocknen ausgesetzt, bis er, oberflächlich angefeuchtet und mit Längsoberfläche und Querschnitt den Elektroden angelegt, keine Spur eines Ruhestroms mehr anzeigte. Hierauf wurde er reichlich mit 0,6% Kochsalzlösung getränkt in die Wunde zurückgelegt. Nach längerer Zeit herausgehoben zeigte er, wie vorher abgeleitet, den Ruhestrom, wenn auch schwächer, wieder an. Jetzt wurde dem Frosche die Strychnininjektion gemacht und an der Bussole beständig beobachtet. In mehreren derart ausgeführten Versuchen zeigte sich thatsächlich, wenn auch schwach, so doch präzise, mit jedem Krampfanfall der negative Ausschlag des Spiegels, welcher mit Aufhören des Anfalls präzise zurückging. Jeder Zweifel war vollends dadurch ausgeschlossen, dass der eine Beobachter an der Bussole den Eintritt der Schwankung dem andern Beobachter signalisirte, welcher durch Hautreiz den einzelnen Krampfanfall auslöste, ohne dass der erstere Beobachter hiervon etwas sehen oder sonst auf eine Weise vernehmen konnte: die Anzeige des Eintritts der galvanischen Erscheinung entsprach stets genau dem Augenblick, in welchem der andere Beobachter den Eintritt des Krampfanfalls erblickte.

Nun ist bekannt, dass durch Austrocknen eines Nerven seine Wirksamkeit zur Erregung von Muskelthätigkeit, nach einem Stadium erhöhter Erregbarkeit und Vorübergehen der durch den Reiz der Austrocknung ausgelösten Zuckungen verschwindet, und, einmal verschwunden, nicht wiederkehrt.

Um das Verhalten des Nerven in dieser Richtung unter den eben geschilderten Bedingungen der Austrocknung und Wiederquellung zu prüfen, wurde der N. ischiadicus des, in der in Rede stehenden Art fixirten und operirten Frosches nicht in der Kniekehle durchschnitten, sondern, nach beiden Richtungen die Kontinuität wahrend, der im Oberschenkel verlaufende Theil vorsichtig, unter möglichster Vermeidung jeder Zerrung und Knickung aus der Wunde gehoben und über ein zwischen Wunde und Nerv behutsam eingeschobenes Stück Thonpfeifenrohr oder Glasstäbchen gelegt. Nachdem der Nerv, auf demselben liegend, längere Zeit an der Luft getrocknet war¹⁾, wurde er mit 0,6% Kochsalzlösung angefeuchtet, bis er ohne Anwendung irgend welcher Gewalt von seiner Unterlage, an welcher er angetrocknet war, sich loslöste, und in die Wunde zurückgebracht. Nach Ablauf einiger Zeit wurde der Frosch mit Strychnin vergiftet. Sobald wie die Wirkungen des Strychnins sich zu zeigen begannen, wurde der Oberschenkel derart durchschnitten, dass Unterschenkel und Fuss nur noch durch den ausgetrocknet gewesenen und wieder gequollenen Nerven mit dem übrigen Körper in Verbindung standen, und nun beobachtet, ob mit Eintritt der Strychninkrämpfe sich an dem enthäuteten Unterschenkel und den Zehen Bewegungen zeigten. Dies war in keinem der derart angestellten Versuche der Fall; es konnte keine Spur von Bewegung an diesen Theilen wahrgenommen werden. In einem dieser Versuche wurde dann noch während der Dauer der Strychninwirkung auch der Nerv nahe am Knie durchschnitten und der centrale Stumpf mit Längsoberfläche und Querschnitt den Elektroden angelegt: es zeigte sich ein ruhender Nervenstrom und mit Eintritt jeden Krampfanfalls eine unverkennbare negative Schwankung desselben.

Auch das Ergebniss dieses Versuchs zeigt in Uebereinstimmung mit den vorher erörterten am langsam abgestorbenen Nerven, dass galvanische Erregungsphänomene am Nerven auch unter solchen Umständen sich zeigen können, in welchen eine Wirkung desselben zur Auslösung von Muskelzuckungen nicht mehr zu erhalten ist. Es erinnert dies an die, für das frische Froschpräparat schon durch

1) So lange bis die Applikation mässiger Induktionsreize, welche die Täuschung durch Stromschleifen oder unipolare Wirkungen ausschlossen, keine Muskelaktion mehr hervorrief.

du Bois-Reymond¹⁾ bekannte Thatsache, dass die negative Schwankung des ruhenden Nervenstroms bereits bei so geringen Stärken elektrischer Reizung (so grossem Rollenabstande des Schlitteninduktoriums) zu beobachten ist, dass noch keine Muskelzuckung eintritt, dass somit die negative Schwankung ein feineres Reagens auf den Erregungsvorgang ist, als die Muskelzuckung. An dieser Stelle mag auch in Erinnerung gebracht werden, dass seinerzeit Valentin²⁾ auf Grund der Beobachtung der elektrotischen Ströme und der negativen Stromesschwankung an abgestorbenen Nerven die Ansicht geäussert hat, dass die physikalische Erscheinung der galvanischen Erregungsphänomene mit dem physiologischen Vorgange der Erregungsleitung nichts zu schaffen habe.

Nachdem der — nach der bisher gültigen Beurtheilung — abgestorbene, aber in seiner anatomischen Struktur merklich unveränderte Nerv galvanische Veränderung gezeigt hatte auf Applikation nicht elektrischer Einwirkungen, besonders solcher rein mechanischer Einwirkungen, bei denen alles elektrochemische absolut ausgeschlossen war, konnte es nicht vermieden werden zu fragen, wie bei derartigen Einwirkungen ein gewöhnlicher Kernleiter sich verhalte.

Die Aufgabe war, abgeleitete Kernleiter, zunächst solche mit metallischem Kern ausserhalb der abgeleiteten Strecke zu durchschneiden, insofern Quetschen und Hämmern, als nur die feuchte Hülle beeinflussend, keinen Sinn zu haben schien. Da selbstverständlich keinerlei metallisches Werkzeug in Anwendung kommen konnte, so haben wir uns anfänglich bemüht, Kernleiter mit sehr dünnem Platindraht in der Weise, wie oben für den Nerven angegeben — mittels Glassplitters —, auch mit Elfenbeinbeisszange zu durchschneiden: dies gelang zwar zuweilen, aber doch zu unpräzise und selten, um dabei stehen bleiben zu mögen. Wir versuchten dann Kontakte zweier Drahtstücke so herzustellen, dass, insofern es nur auf Kontinuitätsunterbrechung des Kernes ankommt, eine plötzliche Lösung des Kontakts ausführbar sein sollte. Auch dies führte nicht zum Ziel, indem offenbar die im Innern der Hülle herstellbare Berührungsstelle den von ihr verlangten Dienst, Konti-

1) Untersuchungen. II. 1. p. 457.

2) Pflüger's Archiv. I. S. 580—88.

nuität zu ersetzen, nicht leistete. Endlich fanden wir folgendes, hier mit sicherem Erfolg und fehlerfrei anwendbare Verfahren: der genügend dicke Platin- oder Aluminiumdraht wurde vor dem Umspinnen mit Baumwolle an der zur Kontinuitätstrennung bestimmten Stelle rechtwinklig zur Längsachse so tief eingefeilt, dass er an dieser, durch Messung bekannten Stelle durch eine geringe knickende Bewegung leicht und präzise zum Abbrechen innerhalb der Hülle gebracht werden konnte. Die knickende Bewegung geschah mit den Fingern, während das abgeleitete Ende isoliert fixiert gehalten wurde. Die Ableitung durch Seilelektroden schützte vor sonstigen Störungen durch den mechanischen Akt. Die auf diese Weise ausgeführte „Durchschneidung“ (Durchbrechung) des Kernleiters als solchen bewirkte jedesmal mit grösster Präzision eine relativ grossartige momentane Strom- resp. Ladungserscheinung von der abgeleiteten Strecke aus, welcher sofort die Rückkehr zum vorhergehenden Ruhezustand folgte. Was die Richtung des unter diesen Umständen abgeleiteten Stromes betrifft, so wurde sowohl bei Platin wie bei Aluminium als Kern die der Durchbruchsstelle nächste Elektrode positiv; bei den vorher erwähnten, allerdings seltenen Versuchen, in denen die Durchschneidung eines sehr dünnen Platindrahtes als Kern mit Hilfe eines scharfen Glassplitters gelang, kam auch das entgegengesetzte Verhalten, Negativität der proximalen Elektrode zur Beobachtung.

Zur Entscheidung der Frage, ob an dieser galvanischen Veränderung des Kernleiters durch jenen Akt des Durchbrechens das Moment der Verkürzung oder dasjenige der Herstellung einer neuen resp. frischen Berührungsstelle zwischen Kern und Hüllenelektrolyt schuld ist, wurden zunächst solche Versuche angestellt, in denen das Abbrechen ungleich lange Stücke des Kernleiters abtrennte, wobei zugleich die Aufmerksamkeit auch darauf gerichtet wurde, welchen Einfluss die Ungleichheit des Abstandes der Durchbruchsstelle von der abgeleiteten Strecke hat. Diese Versuche ergaben sofort und sicher, dass die Länge, um welche der Kernleiter verkürzt wird, gleichgültig ist, dagegen mit der Annäherung der Durchbruchsstelle an die abgeleitete Strecke die Wirkung auf letztere wächst. Dass es nun in der That nur auf die Herstellung der neuen oder frischen Kontaktstelle zwischen metallischem Kern und Hüllenflüssigkeit bei der Durchschneidung ankommt, wurde dann auch noch durch einen Versuch bestätigt, in welchem ein Aluminium-

kernleiter die Gestalt eines langen schmalen Streifens mit endständiger fahnenförmiger Verbreiterung hatte, die durch Einfeilen der Länge nach zum Abbrechen vorbereitet war. Der Bruch liess also die Länge des Kernleiters, und den Abstand der abgeleiteten Strecke vom Ende unverändert, wirkte aber gerade so wie die Durchbrechung der Quere nach. Nach einer von Herrn Prof. W. Nernst geäusserten Vermuthung, welche ich hier mittheilen darf, würde es sich um eine nach Art der von F. Kohlrausch untersuchten „Eintauchströme“ an der Bruchstelle entstehende Potentialdifferenz handeln, die, einem elektrotonisirenden Strome ähnlich, längs des Kernleiters sich ausbreitende Wirkungen hervorruft: hiernach würde eine Beziehung zu der von Hermann namentlich verwertheten Negativität verletzter, im „Absterben“ begriffener Nerven- (und Muskel-)substanz, auf welche ja auch die Erregbarkeitszunahme in der Nähe eines Nervenquerschnitts zurückgeführt werden soll, wohl nahe zu liegen scheinen. Indessen glaubten wir doch vorsichtig sein zu sollen in Bezug auf die Frage, ob überhaupt diese so auffallend starke galvanische Wirkung des Durchbruchs eines Kernleiters mit Drahtkern mit der Wirkung der Durchschneidung des Nerven in nähere Beziehung gebracht werden dürfe: möglicherweise handelt es sich um im Wesen ganz verschiedene Vorgänge, die nur zu äusserlich ähnlichen Erscheinungen führen. Mit Rücksicht hierauf wurden Durchbrechungsversuche noch an andern Arten von Kernleitern ausgeführt. Der schon erwähnte Kernleiter aus mit Quecksilber gefüllten und mit 0,6% Kochsalzlösung imbibirten Thonpfeifenröhren kann dadurch, dass die Thonröhre ringsum eingefeilt wird, zu leicht und präzis ausführbarem Durchbrechen mit glattem Bruch vorbereitet werden.

Beim Abbrechen in einigem Abstände von der abgeleiteten Strecke zeigte dieser Kernleiter mit Sicherheit keine auf den Durchbruch zu beziehende galvanische Veränderung, ebenso wenig, wenn mit Hülfe eines Pinsels ausdrücklich Benetzung der Quecksilberkuppe an der Bruchstelle hergestellt wurde; hier mag nachgetragen werden, dass nur chemisch reines, von jeder Beimischung fremder Metalle freies Quecksilber zur Herstellung dieser Kernleiter verwendet wurde. Thonpfeifenkernleiter, mit 0,6% Kochsalzlösung imbibirt, deren Lichtung mit Kupfersulfatlösung gefüllt war, in gleicher Weise durch Einfeilen zum Durchbruch vorbereitet, zeigten bei mehrfach wiederholtem Versuch nur unsichere und, wenn über-

haupt, sehr schwache, daher vorläufig nicht weiter zu verwertende Wirkungen von der abgeleiteten Strecke.

III.

Nachdem wir zur Erklärung der Thatsache, dass bei extrapolärer Ableitung eines Kernleiters aus Platindraht in 0,6 % Kochsalzlösung (sowie auch der aus zwei Elektrolyten bestehenden Kernleiter), dem kongruente Wechselströme zugeleitet werden, sich je nach Umständen bald negatives, bald positives Verhalten der proximalen Elektrode zeigt, — die Annahme gemacht hatten, dass auch bei Zuleitung kurzdauernder Ströme der katelektronische und der anelektronische Strom einen verschiedenen zeitlichen Verlauf, vielleicht auch eine verschiedene Fortpflanzungsgeschwindigkeit haben sollten, war es, wie schon angedeutet, nothwendig, diese Annahme vermittelst des Bernstein'schen Differentialrheotoms zu prüfen. Mittelst dieses Instruments sollten zunächst kurze, frequente Kettenströme dem in Frage stehenden Kernleiter zugeführt und der Ablauf der extrapolar zur Bussole abzuleitenden Ströme beobachtet werden.

Die Aehnlichkeit der bisher an dem genannten Kernleiter beobachteten Erscheinungen mit den bei entsprechenden Einwirkungen am Nerven auftretenden musste dann weiter dazu auffordern, die gleichen Rheotomversuche am Nerven zu wiederholen.

Nun ist die genannte Versuchsanordnung an Kernleitern, wie an Nerven bereits angewendet worden. Was die ersteren betrifft, so untersuchten, wie schon am Eingang dieser Arbeit erwähnt wurde, Hermann und Samways¹⁾ das Verhalten des Kernleiters aus Platindraht in konzentrierter Zinksulfatlösung, sowie einiger anderer Kombinationen bei Zuleitung kurzer, frequenter Kettenströme vermittelst des Rheotoms. Indessen haben sie weder die Kombination von Platindraht mit verdünnter Kochsalzlösung in den Bereich ihrer Untersuchung gezogen, noch überhaupt in derselben den zeitlichen Verlauf der beiden elektrotonischen Ströme verglichen. Dagegen fanden sie die wichtige Thatsache, dass bei grossem Abstände zwischen durchflossener und abgeleiteter Strecke die elektrotonischen Ströme erst beginnen, nachdem der

1) Pflüger's Archiv. XXXV. S. 1.

elektrotonisirende bereits wieder geöffnet ist, woraus sie auf einen wellenartigen Ablauf der ersteren längs des Kernleiters schlossen. Auf diese Thatsache, welche ich in vollem Umfange bestätigen konnte, und welche Hermann wegen der durch sie gegebenen Aussicht auf eine Erklärung der galvanischen Erregungsphänomene des Nerven besonders betont, werde ich weiter unten ausführlich zurückzukommen haben unter Hinzufügung weiterer hierher gehöriger Wahrnehmungen, ebenso auf die Ergebnisse der Zuleitung kurzer frequenter Kettenströme zum Nerven vermittelt des Rheotoms, welche Bernstein¹⁾ ausgeführt hat, um die Geschwindigkeit der Ausbreitung des Elektrotonus zu untersuchen.

Für meine jetzt zu beschreibenden Versuche stand ein Rheotom zu Gebote, in der von Hermann²⁾ angegebenen Modification. Dasselbe wurde vermittelt geeigneter Elektromotoren betrieben und konnten bei, für den Grad der Genauigkeit, welcher Rheotomversuchen im allgemeinen zukommt, vollständig genügender Konstanz der Geschwindigkeit Umdrehungszahlen bis zu 50 in der Sekunde — wohl mehr als bisher angewendet — erreicht werden. Auf die bedeutende hierbei erfolgende Deformation der Kontaktbürsten durch die Centrifugalkraft wurde das Augenmerk besonders gerichtet und durch geeignete Einstellung jedes Versagen bez. jede Fehlerhaftigkeit der Kontakte wirksam verhütet³⁾.

Die Versuche waren theils solche, in welchen vermittelt des durch die zwei kurzen Kupferbänke hergestellten sog. „Reizkontakts“ der polarisirende Strom der Strecke *rr* des Kernleiters zugeleitet und vermittelt des durch die langen, auf der drehbaren Ebonitscheibe befindlichen Kupferbänke hergestellten sog. „Bussolkontakts“ der abzuleitende Strom von der Strecke *ab* der Bussole zugeführt wurde, — theils solche, in welchen die Rollen der Kontaktstellen vertauscht waren, so dass die Dauer der Zuleitung des

1) Du Bois' Archiv. 1886. S. 197 ff.

2) Pflüger's Archiv. XXXI. S. 600 ff.

3) Nach meiner Erfahrung kann ich die von Hermann (a. a. O. S. 7. Anm. 1) angegebene Thatsache bestätigen, dass die Dauer des „Reizkontaktes“ sowohl wie diejenige des „Bussolkontaktes“, somit auch die aus beiden zusammengesetzte „Kontaktzeit“, soweit als der Kontakt ein vollständig inniger ist und seine Dauer für die extrapolare Wirkung in Betracht kommt, viel kürzer ist, als die im Vorversuch ermittelte „ganze“ Kontaktzeit beziehungsweise ihre Theile.

polarisirenden Stroms jedesmal die grössere, und die Dauer der Ableitung des zu beobachtenden Stroms die kleinere war¹⁾.

Um abwechselnd den katelektrotonischen und den anelektrotonischen Strom beobachten zu können, war in den polarisirenden Stromkreis ein einfacher Stromwender eingeschaltet. Dadurch, dass Röhrenkernleiter (s. o.) bis zu einem Meter Länge durch Aneinanderfügen kürzerer Stücke hergestellt werden konnten, war es möglich, den Abstand ra zwischen der durchströmten und der abzuleitenden Strecke in weiten Grenzen zu verändern.

Die Versuche, deren Resultate in den untenstehenden Tabellen nach einer Auswahl ziffernmässig mitgetheilt, sowie in den Kurven auf Tafel I graphisch dargestellt sind, ergaben nun, dass thatsächlich der anelektrotonische Strom zu einer späteren Zeit, von der Schliessung des polarisirenden ab gerechnet, sein Maximum erreicht, als der katelektrotonische; ferner aber zeigte sich, wenn der Abstand ra zwischen der durchströmten und der abgeleiteten Strecke eine genügende Grösse hatte, dass der anelektrotonische Strom auch später sich zu zeigen beginnt, als der katelektrotonische, dass er also eine geringere Fortpflanzungsgeschwindigkeit hat, als der letztere. Ferner ergaben die gleichen, bei bedeutend grösserem Abstände zwischen den beiden Strecken des Kernleiters angestellten Versuche, dass die elektrotonischen Ströme in diesem Falle beide überhaupt erst nach der Oeffnung des polarisirenden Stromes an der abgeleiteten Stelle beginnen, und dass sie um so später beginnen, je weiter die abgeleitete Strecke von der durchströmten entfernt ist. Sie pflanzen sich somit thatsächlich wellenartig längs des Kernleiters fort. Auf die Geschwindigkeit dieser Fortpflanzung einzugehen, werde ich weiter unten Gelegenheit nehmen; hier mag es genügen, zu wiederholen, dass, wie aus der graphischen Darstellung mit einem Blick ersichtlich ist, sich thatsächlich der katelektrotonische Strom schneller fortpflanzt und früher sein Maximum erreicht, als der anelektrotonische. Werden also die Kurven auf derselben Seite der Abszissenachse (beide etwa oberhalb derselben) aufgetragen — was in diesen Kurven der Uebersichtlichkeit halber nicht geschehen ist — so haben sie thatsächlich den auch für kurze Dauer des polarisirenden Stromes angenommenen Durchschnittspunkt.

1) Die letztere Anordnung entspricht der von Bernstein in seiner oben genannten Untersuchung angewendeten.

Die weitere Analyse der Versuchsergebnisse zeigt noch, dass nach Ablauf des ersten oder eigentlichen elektrotrotonischen Stromes, welcher dem polarisirenden gleich gerichtet ist, auch bei der hier in Frage kommenden kurzen Dauer des letzteren Nachströme folgen. Der Nachstrom des katelektrotonischen Stroms ist demselben zuerst gleich, dann entgegengesetzt gerichtet, derjenige des anelektrotonischen Stromes ist sofort diesem entgegengesetzt gerichtet. Der gleichgerichtete Theil des katelektrotonischen Nachstroms erreicht bisweilen ein ebenso hohes, ja selbst ein noch höheres Maximum, als der eigentliche katelektrotonische Strom selbst. Die entgegengesetzt gerichteten Nachströme sind von sehr langer Dauer, doch umfassen sie nicht den ganzen Rheotomumfang, so dass sie sich gleichfalls wellenartig fortzupflanzen und nicht, wie dies Hermann und S a m w a y s für den Platin-Zinksulfatkernleiter fanden, lokalisirt zu bleiben scheinen.

Endlich ist aus den Versuchsergebnissen an langen Kernleitern mit grossem Abstände zwischen den beiden Strecken noch zu ersehn, dass auf der Anodenseite vor dem Beginn des anelektrotonischen Stromes Negativität der proximalen Elektrode sich zeigt, und zwar von dem Zeitpunkte an, wo auf der Kathodenseite der katelektrotonische Strom beginnt. Es bewahrheitet sich also die weiter oben zur Erklärung des Ueberwiegens des Katelektrotonus bei der Zuleitung kurzdauernder, frequenter, gleichgerichteter Ströme zum Kernleiter gebildete Vorstellung, dass die am frühesten auftretenden kathodischen Stromfäden gewissermassen unter der Anode durchgehend auf der Anodenseite ihre Wirkung zeigen können.

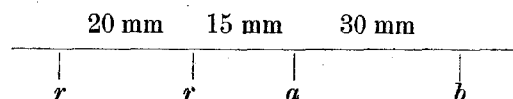
Tabellarische Uebersicht über die Versuche am Rheotom mit Zuleitung von Kettenströmen zu Kernleitern aus Platindraht in 0,6 % Kochsalzlösung.

1) Rheotom-Tourenzahl 40.

Zuleitung des Stromes von 3 Grenet (ohne Nebenschliessung) zum Kernleiter durch den Nadelkontakt („Momentankontakt“).

Ableitung durch den „Bussolkontakt“.

Anordnung der Elektroden am Kernleiter:



Stellung der Ebonitscheibe		Ausschläge des Galvanometers in Skalenteilen	
Theilstrich		Kathodenseite	Anodenseite
S	95,0	— $11\frac{1}{2}$	+ $11\frac{1}{2}$
	97,5	— 5	+ 4
	0	— 10	+ 8
O	1	— 8	+ 8
	2,5	— 5	+ 10
	4	— 5	+ 5
	7,5	— 1	+ 3
	10	— 1	+ 3
	12,5	— 2	— 2
	15	+ 3	— 3
	17,5	+ 3	— 4
	20	+ 4	— 3
	30	+ 2	— 2

Kontaktzeit *SO* von 94,5 bis 0,5.

Graphische Darstellung siehe Kurve Nr. 1 auf Taf. I.

2) Rheotom-Tourenzahl 20.

Kontakt-Vertauschung:

Zuleitung durch den langen Schleifkontakt („Bussolkontakt“).

Ableitung durch den kurzen Schleifkontakt („Reizkontakt“).

8 Grenets, Kohlenrheostat in Nebenschliessung.

Anordnung:

25 mm 125 mm 750 mm			
r r a b			
Stellung auf Theilstrich		Ausschläge des Galvanometers in Skalenteilen	
		Kathodenseite	Anodenseite
S	0	0	0
	97,5	— 10	— 2
O	95	— 11	0
	92,5	— 5	+ 2
	90	— 4	+ 5
	87,5	— 3,5	+ 7
	85	— 3,5	+ 7
	80	— 4	+ 4
	75	— 6	0
	70	— 4	— 4
	35	— 2	0

Kontaktzeit *SO* von 99 bis 96.

Graphische Darstellung siehe Kurve 2 auf Taf. I.

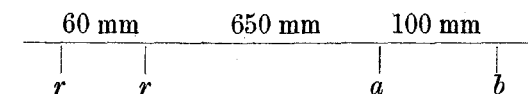
3) Rheotom-Tourenzahl 40.

Zuleitung durch den „Reizkontakt“.

Ableitung durch den „Bussolkontakt“.

5 Grenets, ohne Nebenschliessung.

Anordnung:



Stellung auf Theilstrich		Galvanometer-Ausschläge in Skalentheilen	
		Kathodenseite	Anodenseite
<i>S</i>			
<i>O</i>	0	0	0
	5	0	0
	10	0	0
	15	-1 1/2	-1
	17,5	-2	-1 1/2
	20	-3	-2 1/2
	22,5	-3	-1 1/2
	25	-4	-1
	27,5	-2 1/2	-1
	30	-1 1/2	0
	35	-1	+2
	40	-1	+3
	45	-1	+2
	50	-1/2	+2
	55	+1/2	+1
	60	+1/2	+1
	65	0	-1
	70	0	-1
	80	0	0
	90	0	0

Kontaktzeit von 94 bis 0.

Graphische Darstellung siehe Kurve 3 auf Taf. I.

4) Rheotom-Tourenzahl 20.

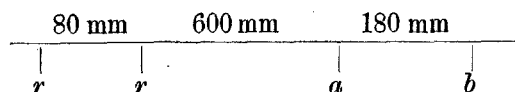
Kontaktumkehrung:

Zuleitung durch den „Bussolkontakt“ (langen Schleifk.).

Ableitung durch den „Reizkontakt“ (kurzen Schleifk.).

8 Grenets, Kohlenrheostat in Nebenschliessung.

Anordnung:



Stellung auf Theilstrich		Galvanometer-Ausschläge in Skalentheilen	
		Kathodenseite	Anodenseite
S O	5	0	0
	0	0	0
	95	-1	-2
	92,5	-4	0
	90	-5	+1
	87,5	-3	+2
	85	-2,5	+5
	82,5	-2	+3
	80	-1	+3
	75	-3	+2
	70	-2	0
	65	0	-1
	60	+?	-1
	50	+1	-1
	40	+1	0
	30	0	0

Kontaktzeit SO von 99 bis 95,5.

Graphische Darstellung siehe Kurve 4, Taf. I.

5) Rheotom-Tourenzahl 25.

Sonst alles wie in Nr. 4.

Stellung auf Theilstrich		Galvanometer-Ausschläge in Skalentheilen	
		Kathodenseite	Anodenseite
S O	5	0	0
	0	0	0
	95	0	0
	90	0	0
	85	-1	-1
	80	-1 $\frac{1}{2}$	-1 $\frac{1}{2}$
	77,5	-3	-2
	75	-3	+2
	72,5	-1	+3
	70	0	+2
	65	-1	-1
	60	+1 $\frac{1}{2}$	-2
	55	+2	-2

Kontaktzeit von 98 bis 92.

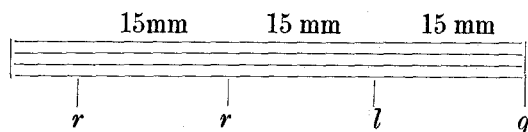
Graphische Darstellung siehe Kurve 5 auf Taf. I.

Tabellarische Uebersicht über die Versuche am Rheotom mit Zuleitung von Kettenströmen zum Nerven.

1) Rheotom-Tourenzahl 30.

Kontaktvertauschung: Zuleitung des Stromes von 4 Grenet (mit Kohlenrheostat in Nebenschliessung) zum Nerven durch den langen, Ableitung zur Bussole durch den kurzen Schleifkontakt.

Versuchsobjekt: Bündel von 3 Froschischiadiceis in folgender Anordnung:



Ruhestrom lq bei der Rotation: + 4 Sk.

Stellung auf Theilstrich	Galvanometer-Ausschlag	
	Kathodenseite	Anodenseite
1	0	0
0	0	0
S 99	-1 1/2	-1
97,5	-3	-1 1/2
O 96,5	-5	-3
95	-2	-3
93,5	0	0
92	-1 1/3	+2
90	-2	+3
87,5	-2	+2
85	-2	+2
80	0	-1 1/2
77,5	0	-1 1/2

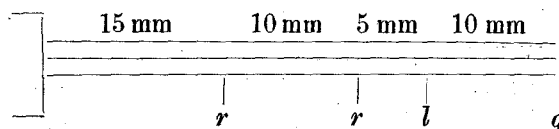
Kontaktzeit SO von 99,5 bis 94.

Graphische Darstellung siehe Kurve 6 auf Taf. I.

2) Rheotom-Tourenzahl 30.

Kontaktvertauschung und Strom wie in 1.

Versuchsobjekt: Doppelnerv in folgender Anordnung:



Ruhestrom lq bei der Rotation: + 3 Sk.

Stellung auf Theilstrich		Galvanometer-Ausschlag	
		Kathodenseite	Anodenseite
<i>S</i>	0	0	0
	99	$-1\frac{1}{2}$	-1
	98	-4	-2
	97	-5	0
	96	-4	+3
	95	-1	+3
<i>O</i>	94	$0(-\frac{1}{2})$	+3
	93	-2	+2
	92	-2	0
	90	-2	-1
	87,5	-1	-1
	85	0	-2

Kontaktzeit *SO* von 99,5 bis 94.

Graphische Darstellung siehe Kurve 7 auf Taf. I.

Ein dieser Gesamtheit von Erscheinungen, wie sie z. B. in den Kurven 4 und 5 sich zeigt, durchaus entsprechendes Verhalten ergaben die unter den gleichen Bedingungen am Nerven angestellten Versuche. Die Kurvenpaare, welche diese Ergebnisse graphisch darstellen, 6 und 7, zeigen eine weitgehende Uebereinstimmung mit den von Bernstein a. a. O. nach den Resultaten seiner unter den gleichen Bedingungen angestellten Versuche mitgetheilten Kurven. Da ich indessen nach den bisher zwischen Nerv und Kernleiter gefundenen Analogieen, ganz besonders aber bei der Uebereinstimmung der an beiden Körpern bei Zuleitung kurzer, frequenter Kettenströme durch das Rheotom erhaltenen Ergebnisse mich für berechtigt halte, die von selbst sich ergebende Deutung der Erscheinungen am Kernleiter ohne weiteres auf den Nerven zu übertragen, so folgt daraus, dass diese Deutung der Kurven von der durch Bernstein gegebenen in folgenden Punkten abweichen muss.

Bernstein betrachtet die auf Seiten beider zuleitenden Elektroden nach Schliessung des polarisirenden Stroms durch das Rheotom zuerst auftretende Negativität der proximalen Ableitungselektroden als wellenförmig ablaufende negative Schwankung des ruhenden Nervenstroms, oder als „negative Schwankungswelle“, den galvanischen Ausdruck der die betreffende Nervenstelle passirenden, durch die Schliessung des Kettenstroms erzeugten „Erregungswelle“; er nennt diese Erscheinung auf der Kathodenseite

die „Kathodenschliessungswelle“, auf der Anodenseite die „Anodenschliessungswelle“. Sodann betrachtet er die von mir als „gleichgerichteter Nachstrom“ aufgefasste zweite Negativitätsperiode auf der Kathodenseite erst als den eigentlichen Katelektrotonus. Somit bliebe nur für einen der wesentlichen Theile des Kurvenpaares meine Erklärung die gleiche wie die Bernstein's: nämlich für die Phase der Positivität der proximalen Elektrode, welche auf der Anodenseite der vorangehenden Negativität folgt, die Erklärung als Anelektrotonus. Indem ich hier nur kurz bemerke, dass diejenigen Besonderheiten an Bernstein's Kurven, welche gegen meine Auffassung zu sprechen scheinen, theils leicht anderweitig zu erklären sind, theils von mir nicht erhalten wurden, fasse ich die aus dem Vergleiche sämtlicher bisher am Kernleiter und Nerven erhaltenen analogen Versuchsergebnisse sich ergebende Auffassung eines bisher als selbständig betrachteten galvanischen Phänomens bei elektrischer Behandlung des Nerven hier in den Satz zusammen: Die sogenannte negative Stromesschwankung bei elektrischer Reizung des Nerven ist nichts weiter als wellenförmig ablaufender Katelektrotonus.

Nachdem die Versuche über die Einwirkung von Wechselströmen auf Kernleiter die Aehnlichkeit des unter bestimmten Umständen überwiegenden Katelektrotonus mit der negativen Stromesschwankung des Nerven gezeigt, und die soeben besprochene Analogie im Verhalten der beiden Versuchsobjekte am Rheotom bei Zuleitung kurzer, frequenter Kettenströme durch dieses Instrument, der Annahme der Wesensgleichheit jener beiden Phänomene eine wesentliche Stütze verliehen hat, musste untersucht werden, wie sich der in Rede stehende Kernleiter aus dünnem Platindraht in 0,6% Kochsalzlösung verhält bei der Zuleitung von Wechselströmen des Schlitteninduktoriums mittelst des Differentialrheotoms, d. h. ob er etwa unter diesen Umständen die gleichen Erscheinungen zeigt, wie sie von Hermann¹⁾ und später auch von Bernstein²⁾ gefunden wurden, als dieselben die eben besprochene Anordnung auf den Nerven anwandten, um, wie beim Muskel es Bernstein zuerst unternommen hatte, ver-

1) Pflüger's Arch. XVIII. S. 574 ff.; XXIV. S. 246 ff.

2) A. a. O. S. 217 ff.

mittelst der „Repetitionsmethode“ den Ablauf der galvanischen Wirkung des einzelnen Doppel-Induktionsschlags zu untersuchen. Die bei extrapolarer Ableitung des Nerven, insbesondere zwischen zwei Punkten des sog. Längsschnittes unter diesen Umständen auftretenden Erscheinungen, welche Hermann als „phasische Aktionsströme“, Bernstein als „(doppelsinnige) Schwan-
kungswellen“ bezeichnet, — habe ich zunächst gleichfalls am Nerven, sowohl vom Frosch, wie von Säugethieren, untersucht, wobei ich sämtliche von Hermann beobachtete Einzelheiten durchaus bestätigen konnte; weiterhin habe ich die in Rede stehende Versuchsanordnung auf den Kernleiter, zunächst auf den aus dünnem Platindraht und 0,6 % Kochsalzlösung bestehenden, ausgedehnt und hierbei den Phänomenen am Nerven genau entsprechende galvanische Wellenerscheinungen erhalten.

Was zunächst die hierhergehörigen von mir an Nerven angestellten Versuche betrifft, so kamen sowohl Nn. ischiadici von Fröschen, je drei bis vier zu einem Bündel vereinigt, zur Verwendung, wie auch der N. vagus vom Kaninchen und der Katze. Die oben erwähnte grosse Umdrehungsgeschwindigkeit des Rheotoms erlaubte es, die Versuche ohne Abkühlung der Nerven anzustellen, durch welche Hermann in seinen früheren Versuchen¹⁾ die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der elektrischen Welle künstlich herabgesetzt hat, um die zwei Phasen zur Anschauung bringen zu können; eine Vorsichtsmassregel, welche auch er bereits bei seinen späteren Versuchen²⁾ mit dem empfindlichen Galvanometer und der erhöhten Rheotomgeschwindigkeit hat fallen lassen können.

Was die Zeitdauer der Phasen betrifft, so fand ich bei der sog. stromlosen Längsschnittableitung die Dauer der ersten, negativen Phase gleich 0,00064 bis 0,0007 Sek., diejenige der zweiten, positiven gleich 0,0012 bis 0,0015 Sek. Ferner fand ich, ebenso wie Hermann, die zweite Phase nicht nur länger, sondern auch niedriger, d. h. die Ausschläge kleiner, als die erste. Bei sog. Längsquerschnittableitung zeigte sich nur die negative Phase, mit einer Zeitdauer von 0,0008 bis 0,001 Sek.

Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Welle ergab sich so-

1) Pflüger's Archiv. XVIII. S. 574 ff.

2) Pflüger's Archiv. XXIV. S. 246 ff.

wohl bei Berechnung aus dem Abstände ra zwischen durchflossener und abgeleiteter Strecke, und der Zeitdauer vom Beginn der Kontaktzeit bis zum Beginn der ersten Phase — wie auch bei Berechnung aus der Zeitdifferenz in zwei Versuchen mit verschiedener Länge des Abstandes ra in gleicher Weise, nämlich zu 25 bis 28 m in der Sekunde beim Froschnerven, zu 30 bis 40 m beim Säugethiernerven. Alle diese Versuche wurden, wie schon angedeutet, bei Zimmertemperatur ($+ 18^{\circ}$) angestellt.

Dagegen wurde in den jetzt zu beschreibenden Versuchen am Kernleiter aus dünnem Platindraht in 0,6 % Kochsalzlösung die Temperatur des Elektrolyten variiert, um zu untersuchen, ob die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der dabei zur Beobachtung kommenden elektrischen Welle etwa durch die Temperatur in ähnlicher Weise beeinflusst wird, wie dies für die gleiche Erscheinung am Nerven bekannt ist. Hierbei ergab sich thatsächlich wieder eine vollständige Analogie zwischen diesen beiden Untersuchungsobjekten, auf welche weiter unten noch besonders hingewiesen werden wird.

Was die Versuchsanordnung anbelangt, so wurden der Strecke rr des langen, in öfter erwähnter Weise aus Einzelstücken zusammengesetzten Röhrenkernleiters die Wechselströme des Schlitteninduktoriums zugeführt, welche dadurch hervorgerufen wurden, dass das Rheotom einmal bei jedem Umlaufe den primären Strom vermittelt des Nadelkontaktes (sog. Momentankontaktes) oder des kurzen Schleifkontaktes (sog. Reizkontaktes) auf eine äusserst kurze Zeitdauer schloss und gleich darauf wieder öffnete. Die zu beobachtenden Ströme wurden von der Strecke ab durch den langen Schleifkontakt (Bussolkontakt) der Bussole zugeführt. Die Umdrehungszahl des Rheotoms betrug in diesen Versuchen 40 in der Sekunde. Die Länge von rr und ab war unveränderlich je 100 mm, während ra verändert wurde. Das Induktorium wurde hier gewöhnlich von drei Grenetelementen betrieben; der Rollenabstand war Null, es deckten sich also die beiden Rollen völlig. Auch beim Kernleiter, zunächst dem aus dünnem Platindraht in 0,6 % Kochsalzlösung bestehenden, ergab, wie schon angedeutet, diese Versuchsanordnung eine in zwei Phasen über die abgeleitete Strecke fortlaufende Welle. Die Länge derselben, wie sie sich aus der Zeitdauer der beiden Phasen ergibt, ist grösser als beim Nerven, vor allem ist aber auch ihre Fortpflanzungsgeschwindigkeit grösser,

so gross, dass nur die, am Nerven nicht entfernt nachzunehmende, bedeutende Länge der abgeleiteten Strecke es überhaupt ermöglicht, das Phänomen mit den beiden Phasen zur Anschauung zu bringen.

Auch hier ist die zweite Phase länger und niedriger, und zwar beträchtlich niedriger als die erste.

Die Variation der Temperatur des im Glasröhrenkernleiter enthaltenen Elektrolyten ergab, dass die Fortpflanzungsgeschwindigkeit in demselben Sinne von der Temperatur abhängig ist, wie beim Nerven, d. h. dass sie mit steigender Temperatur zu- und mit sinkender abnimmt. Das Genauere ist aus folgender Zusammenstellung der ziffernmässigen Ergebnisse dreier derartiger Versuche zu ersehen.

Drei Versuche mit Zuführung von Induktionsströmen mittels des Rheotoms zum Kernleiter aus dünnem Platindraht in 0,6 % Kochsalzlösung.

Zweiphasische extrapolare Ströme.

Rheotomtourenzahl = 40 in der Sekunde. Schliessung und Oeffnung des primären Stromes vermittelt des Nadelkontaktes (Momentankontaktes).

1 Theilstrich des Rheotoms = $\frac{1}{4000}$ Sek. = 0,00025 Sek.; Kontaktzeit von 96,5 bis 0 = 3,5 Theilstriche = 0,000875 Sek.

Streckenlängen: rr und ab je = 100 mm; ra variirt laut Einzelversuch ebenso die Temperatur t der Kochsalzlösung.

1. $t = + 19^{\circ}$.

a) $ra = 650$ mm.

Eintritt der negativen Phase bei 16,5; Dauer bis 21,0, also 4,5 Theilstriche = 0,001125 Sek.

Eintritt der positiven Phase bei 21,0; Dauer bis 27,0, also 6,0 Theilstriche = 0,0015 Sek.

Fortpflanzungszeit von 96,5 bis 16,5 = 20 Theilstriche, also 0,005 Sek. für 650 mm, entspricht einer Geschwindigkeit von 130 mm.

b) $ra = 490$ mm.

Eintritt der negativen Phase bei 12,5; Differenz der Zeiten 16,5 — 12,5 = 4,0 Theilstriche = 0,001 Sek.; Differenz der Wege 650 — 490 = 160 mm.

160 mm in 0,001 Sek. entspricht einer Geschwindigkeit von 160 m.

Das Mittel aus a und b ergiebt eine Geschwindigkeit von 145 m.

2. $t = + 10^{\circ}$.

a) $ra = 650$ mm.

Eintritt der negativen Phase bei Theilstrich 23,0; Dauer bis 30,0 also 7 Theilstriche = 0,00175 Sek.

Eintritt der positiven Phase bei 30,0; Dauer bis 42,0, also 12 Theilstriche = 0,0030 Sek.

Fortpflanzungszeit von 96,5 bis 23 = 26,5 Theilstriche, also 0,006625 Sek. für 650 mm, entspricht einer Geschwindigkeit von 98 m.

b) $ra = 490$ mm.

Eintritt der negativen Phase bei Theilstrich 16,5; Differenz der Zeiten $23,0 - 16,5 = 6,5$ Theilstriche = 0,001625 Sek.; Differenz der Wege $650 - 490 = 160$ mm.

160 mm in 0,001625 Sek. entspricht einer Geschwindigkeit von 100 m.

Mittel aus a und b 99 m.

3. $t = + 26^{\circ}$.

a) $ra = 650$ mm.

Eintritt der negativen Phase bei Theilstrich 13,0; Dauer bis 17,0, also 4 Theilstriche = 0,001 Sek.

Eintritt der positiven Phase bei Theilstrich 17,0; Dauer bis 22,0, also 5 Theilstriche = 0,00125 Sek.

Fortpflanzungszeit von 96,5 bis 13,0 = 16,5 Theilstriche = 0,004125 Sek.; 0,004125 Sek. für 650 mm ergibt eine Geschwindigkeit von 157 m.

b) $ra = 480$ mm.

Eintritt der negativen Phase bei 9,0; Differenz der Zeiten $13,0 - 9,0 = 4$ Theilstriche = 0,001 Sek.; Differenz der Wege $650 - 480 = 170$ mm.

170 mm in 0,001 Sek. entspricht einer Geschwindigkeit von 170 m.

Mittel aus a und b 163,5 m.

Nachträglich habe ich die in Rede stehenden Versuche auch an langen Kernleitern aus zwei Elektrolyten wiederholt, welche aus einer langen Thonpfeifenröhre bestanden, die mit 0,6 % Kochsalzlösung getränkt und deren Lichtung mit Kupfersulfatlösung gefüllt war. Die Resultate entsprachen durchaus den vorstehenden, am Kernleiter aus Platindraht, in 0,6 % Kochsalzlösung erhaltenen; ja das Verhalten nähert sich noch mehr demjenigen des Nerven, insofern die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der elektrischen Welle kleiner ist. Die Variation der Temperatur habe ich bei diesem Kernleiter aus technischen Gründen unterlassen. Einen der Versuche theile ich im folgenden ziffernmässig mit.

Zuführung von Induktionsströmen mittels des Rheotoms zum Kernleiter aus einer mit 0,6 % Kochsalzlösung getränkten und mit Kupfersulfatlösung gefüllten Thonpfeifenröhre.

Zweiphasische extrapolare Ströme.

Rheotomtourenzahl = 20 in der Sekunde. Schliessung und Oeffnung des primären Stromes vermittelt des kurzen Schleifkontaktes.

1 Theilstrich des Rheotoms $= \frac{1}{2000}$ Sek. $= 0,0005$ Sek.; Kontaktzeit von 96 bis 99 $= 3$ Theilstriche $= 0,0015$ Sek.

$$t = + 18^{\circ}; rr = 40 \text{ mm}; ab = 100 \text{ mm.}$$

a) $ra = 260 \text{ mm.}$

Eintritt der negativen Phase bei 6,5; Dauer bis 15, also 8,5 Theilstriche $= 0,00425$ Sek.

Eintritt der positiven Phase bei 15; Dauer bis 28, also 13 Theilstriche $= 0,0065$ Sek.

Fortpflanzungszeit von 96 bis 6,5 $= 10,5$ Theilstriche $= 0,00525$ Sek., also $0,00525$ Sek. für 260 mm entspricht einer Geschwindigkeit von 50 m.

b) $ra = 100 \text{ mm.}$

Eintritt der negativen Phase bei 2,5; Dauer bis 11, also 8,5 Theilstriche $= 0,00425$ Sek.

Eintritt der positiven Phase bei 11; Dauer bis 24, also 13 Theilstriche $= 0,0065$ Sek.

Differenz der Zeiten $6,5 - 2,5 = 4$ Theilstriche $= 0,002$ Sek.; Differenz der Wege $260 - 100 = 160 \text{ mm.}$

160 mm in $0,002$ Sek. entspricht einer Geschwindigkeit von 80 m. Mittel aus a und b 65 m.

Im Anschlusse an die Einwirkung der Temperatur auf die phasischen extrapolaren Erscheinungen am Kernleiter wurde eine weitere Versuchsbedingung von grundlegender Wichtigkeit eingeführt, nämlich die gleichzeitige Polarisirung des vermittelst des Rheotoms von Induktionsströmen durchflossenen und zur Bussole abgeleiteten Kernleiters durch einen konstanten Kettenstrom, welcher dem Kernleiter durch ein drittes Elektrodenpaar zugeführt wird. Es sind also in diesen und den noch zu beschreibenden Versuchen drei Strecken zu unterscheiden: die von den Induktionsströmen „gereizte“, die vom Kettenstrom „polarisirte“ und die „abgeleitete“, in der Mitte zwischen den beiden andern gelegene Strecke.

Das Ergebniss war zunächst im Rheotomversuch das folgende: war die der abgeleiteten Strecke benachbarte Elektrode der polarisirten Strecke Kathode, so war bei spielendem Rheotom die zweite, positive Phase der elektrischen Welle stark geschwächt, oder fehlte ganz, während die erste, negative verstärkt war; das umgekehrte war der Fall, wenn die der abgeleiteten Strecke benachbarte Elektrode der polarisirten Strecke Anode war. Dieses Verhalten des Kernleiters ist wiederum vollkommen gleich dem-

jenigen des Nerven wie es von Hermann¹⁾ beobachtet wurde, und wie ich es ebenfalls bestätigen kann.

Es ist diese Erscheinung der deutlichste Ausdruck für die Thatsache, dass die bei Einwirkung von Wechselströmen auf den Nerven und, wie soeben berichtet, auch auf den Kernleiter, entstehende katelektrotonische Welle (Negativitätswelle der Autoren) an Grösse abnimmt, wenn sie einer Kathode oder einer im Katelektrotonus befindlichen Strecke sich nähert, dagegen umgekehrt an Grösse zunimmt, wenn sie einer Anode oder einer im Anelektrotonus befindlichen Strecke entgegenläuft. Diese, übrigens aus dem Wesen der Sache ganz selbstverständliche Vorstellung bezeichnete Hermann als den Satz vom „polarisatorischen Inkrement“²⁾ der Erregung“; sie führt zu der, experimentell durch Hermann bestätigten, nach meiner Erfahrung auch am Kernleiter demonstrierbaren Folgerung, dass der polarisirende Strom selbst durch das Ablaufen derartiger Wellen verstärkt wird, seine extrapolaren Wirkungen, die elektrotonischen Ströme, dagegen geschwächt werden: in der That ist dieser Satz zu dem Zwecke von Hermann zuerst aufgestellt worden, um eine Erklärung für die von Bernstein³⁾ im Jahre 1866 zuerst beobachtete wichtige Erscheinung zu geben, dass die elektrotonischen Ströme, welche am Nerven bei Zuleitung eines Kettenstromes extrapolar in bekannter Weise auftreten, eine „negative Schwankung“ bei Tetanisation des Nerven mittelst Induktionsströmen zeigen, d. h. also eine Abnahme, welche so lange dauert, wie die Tetanisation.

Es war, nachdem bei Gelegenheit der Untersuchung der phasischen Erscheinungen die Gültigkeit dieses Satzes vom sog. polarisatorischen Inkrement auch für den Kernleiter bestätigt war, zu erwarten, dass die einfachere Erscheinung der Intensitätsschwankung der elektrotonischen Ströme bei der Einwirkung von Wechselströmen ohne Rheotom auch an diesem Versuchsobjekt zu beobachten sein würde.

In der That ergab sich auch die Richtigkeit dieser Voraussetzung, als dem Kernleiter aus Platin in 0,6 % Kochsalzlösung ein konstanter Kettenstrom durch die Strecke *pp* zugeleitet wurde,

1) Handbuch. II. 1. S. 166, 167. Pflüger's Archiv. XXIV. a. a. O.

2) Pflüger's Archiv. VI. S. 359.

3) Du Bois' Archiv. 1866. S. 614.

und, während der durch *ab* abgeleitete elektrotonische Strom an der Busssole beobachtet wurde, durch *rr* die Wechselströme des Schlitteninduktoriums mit Helmholtz'scher Einrichtung oder diejenigen des Sinusinduktors hindurchgeschickt wurden.

Nach einem im Sinne des elektrotonischen Stromes gerichteten Vorschlag erfolgt eine im entgegengesetzten Sinne desselben gerichtete Ablenkung. Ohne jenen Vorschlag und in der schlagendsten Uebereinstimmung mit dem Verhalten des Nerven bei der in Rede stehenden Versuchsanordnung zeigt sich die negative Schwankung der elektrotonischen Ströme bei dem aus zwei Elektrolyten bestehenden Kernleiter, welcher, wie öfter beschrieben, aus einem in 0,6 % Kochsalzlösung imbibirten und mit Kupfersulfatlösung gefüllten Thonpfeifenrohr verfertigt ist.

Während also ohne Zuleitung eines polarisirenden Stromes die Einwirkung von Wechselströmen unter den hier in Betracht kommenden Umständen eine von den sonstigen Versuchsbedingungen durchaus unabhängige Negativität der proximalen Elektrode erzeugt, finden wir bei gleichzeitigem Vorhandensein eines konstanten polarisirenden Stromes als extrapolare Wirkung der Zuleitung von Induktionsströmen eine galvanische Erscheinung, deren Richtung von derjenigen dieses polarisirenden Stromes durchaus abhängig ist, indem sie nämlich eine Intensitätsverminderung oder wirkliche „negative Schwankung“ der extrapolar durch den polarisirenden Strom erzeugten elektrotonischen Ströme darstellt.

Diese Beobachtung war deshalb besonders wichtig, weil sie einen Unterschied zwischen den am Kernleiter und den am Nerven bei der Zuleitung von Induktionsströmen zu beobachtenden Erscheinungen zu erklären berufen ist.

Das bei der „Tetanisation“ des Nerven zu beobachtende Phänomen der negativen Stromschwankung besteht, wie von du Bois-Reymond zuerst gefunden und besonders betont worden ist, in einer wirklichen Intensitätsverminderung¹⁾ des zwischen dem sog. Längsschnitt und dem Querschnitt, oder zwischen zwei Punkten des Längsschnitts, von denen der eine dem Querschnitt näher

1) Da eine Widerstandsveränderung des Nerven experimentell ausgeschlossen worden ist, so ist gewöhnlich direkt von einer Verminderung der elektromotorischen Kraft die Rede.

als der andere ist, auftretenden sog. ruhenden Nervenstroms. Die Grösse der negativen Schwankung ist der Grösse dieses Ruhestroms ungefähr proportional, und es ist der Sinn der Schwankung, gewisse hier nicht näher zu erörternde Fälle ausgenommen, demjenigen des Ruhestroms entgegengesetzt, und für alle Fälle von ihm abhängig, während wir am Kernleiter stets nur die eine Abhängigkeit von der Lage der „tetanisirten“ und abgeleiteten Strecke zueinander beobachtet haben — insofern die proximale Ableitungselektrode negativ wurde. Dieser Unterschied erklärt sich sehr einfach durch die schon von Hermann ausgesprochene Vorstellung, dass der sog. Ruhestrom die elektrotonische Ausbreitung eines am Querschnitt lokal vorhandenen Potentialunterschieds (nach Hermann zwischen absterbender und lebender Substanz) ist. Die negative Schwankung des Ruhestroms bei der Tetanisation ist dann nur ein besonderer Fall der negativen Schwankung der elektrotonischen Ströme, einer Erscheinung, welche, wie oben erörtert, der Kernleiter auch zu zeigen fähig ist, wenn man einen polarisirenden konstanten Strom hindurchleitet. Geschieht dies aber nicht, so fehlt eben am Kernleiter der Ruhestrom, resp. eine dem Ruhestrom entsprechende Erscheinung, welche eine „negative Schwankung“, d. h. eine ihrer eigenen Grösse proportionale Intensitätsverminderung zeigen könnte, weil am Kernleiter die elektrotonische Ausbreitung eines irgendwo etwa lokal vorhandenen Potentialunterschiedes, — wenigstens bei den bisher möglich gefundenen Konstruktionsweisen — fehlt.

Es bleibt nunmehr noch ein anderer Unterschied zwischen den Erscheinungen am Nerv und am Kernleiter zu erklären, welcher darin besteht, dass bei sog. stromloser Ableitung des ersteren, d. h. Ableitung zwischen zwei Punkten, welche vom sog. Aequator gleich weit entfernt sind, die Tetanisation mit kongruenten Wechselströmen keinerlei extrapolare Wirkungen gibt, während uns jene hier zunächst stets gemeinten Kernleiter im gleichen Falle, unabhängig von der Lage der Ableitungsstrecke zur Mitte und den Enden, stets Negativität der proximalen Elektrode zeigten.

Die Erklärung für das Verhalten des sog. stromlosen Nerven ist bereits durch Hermann gegeben, durch die Annahme, dass die „Negativitätswelle“ bei ihrem Ablauf über den Nerven nicht an Grösse abnimmt (kein „Dekrement“ hat).

Da nämlich bei der Applikation frequenter Wechselströme jede von beiden Ableitungselektroden in rascher Folge abwechselnd gleich stark negativ wird, so ist das Ergebniss Ruhelage des Bussolspiegels bzw. des Quecksilbers im Kapillarelektrometer.

Die Erklärung für das abweichende Verhalten des Kernleiters ergibt sich hiernach höchst einfach durch die Annahme, dass bei demselben die „Negativitätswelle“, oder, wie wir sie nach unsern Versuchsergebnissen nennen dürfen, die katelektrotonische Welle ein Dekrement hat, also an jedem von der durchflossenen Strecke entfernten Punkte kleiner anlangt, als am näheren, so dass unter der in Rede stehenden Versuchsbedingung die nähere Elektrode dauernd stärker negativ ist, als die entferntere.

Den thatsächlichen Beweis für die Richtigkeit dieser Annahme liefert das Verhalten der beiden extrapolar zu beobachtenden Phasen in den Rheotomversuchen mit Induktionsströmen am Nerven einerseits und am Kernleiter andererseits. Wie Hermann bereits durch genaue Analyse herausgefunden hat, ist beim Nerven die zweite, positive Phase etwas niedriger und etwas länger, als die erste, negative, derart, dass die Zeitintegrale beider Phasen einander gleich sind. Da nun die erste Phase dem Hindurchgehen der Welle unter der proximalen, die zweite dem Hindurchgehen unter der distalen Elektrode entspricht, so folgt aus dieser Gleichheit der Zeitintegrale, dass die Grösse der Welle bei ihrem Ablauf nicht abnimmt. Beim Kernleiter fand ich einen viel beträchtlichen Unterschied in der Höhe beider Phasen (d. h. der Grösse der Ausschläge), womit das Vorhandensein des Dekrements bei diesem Versuchsobjekt denn bewiesen ist. Die Kurve dieses Dekrements ist übrigens keine gerade Linie, sondern eine gegen die Abszissenachse konvexe, an der „Reizstrecke“ steil abfallende und dann weiterhin der Abszissenachse asymptotisch sich nähernde Kurve wie aus folgenden Beobachtungen am langen Kernleiter zu schliessen ist: Die Grösse der negativen Ablenkung beim Hindurchleiten von Wechselströmen ohne Rheotom nimmt mit wachsendem Abstände zwischen der durchströmten und der abgeleiteten Strecke erst langsam, dann rascher ab, während der erwähnte Höhenunterschied der beiden Phasen im Rheotomversuch bei kleinem Abstände zwischen den beiden Strecken grösser ist, als bei grossem Abstände zwischen denselben.

Durch den, von uns am Kernleiter aus Platindraht in verdünnter Kochsalzlösung, sowie an den aus zwei Elektrolyten bestehenden Kernleitern bestätigt gefundenen Satz vom sog. polarisatorischen Inkrement der Erregung, hat Hermann¹⁾ die in der mehrfach erwähnten Arbeit über den interpolaren Elektrotonus von Fleischl²⁾ berichteten Beobachtungen am Nerven zu erklären gesucht. Fleischl schaltete einen auf einem Paar unpolarisierbarer Elektroden in sog. stromloser Anordnung aufliegenden lebenden Froschnerven und das Galvanometer hintereinander in den sekundären Kreis eines Schlitteninduktoriums. Während ohne den Nerven das Galvanometer sowohl bei gewöhnlichem Hammerspiel, wie bei Anwendung der Helmholtz'schen Anordnung in Ruhe blieb, beobachtete Fleischl, dass wenn der Nerv eingeschaltet war, beim gewöhnlichen Spiel des Hammers ein starker Ausschlag im Sinn der Oeffnungsschläge erfolgte, welcher bei Nivellirung der Induktionsströme durch die Helmholtz'sche Einrichtung ausblieb. Fleischl erklärte diese Erscheinung dadurch, dass die beim gewöhnlichen Hammerspiel weniger steil verlaufenden Schliessungsinduktionsschläge stärker elektrotonisirend wirkten, als die Oeffnungsschläge, und deshalb selbst stärker geschwächt würden, so dass nun die Wirkung der Oeffnungsschläge auf die Bussole überwiege. Diese Schwächung beruhe darauf, dass die intrapolaren elektrotonischen Ströme die entgegengesetzte Richtung hätten, als die extrapolaren. Fleischl gab ferner an, bei der gleichen Anordnung am Platin-Zinksulfat-Kernleiter die beschriebene Erscheinung nicht erhalten zu haben, und benutzte dieses Ergebniss zu einem Angriff auf die Kernleitertheorie der elektrotonischen Ströme. Dem gegenüber machte Hermann geltend, dass die Erscheinung am Kernleiter deshalb fehle, weil derselbe kein Modell der galvanischen Phänomene der Erregung sei, und erklärte sie vielmehr durch den Satz vom „polarisatorischen Inkrement“ damit, dass die steileren und deshalb stärker erregenden Oeffnungsströme einen stärkeren Zuwachs erhielten, als die flacheren, schwächer erregenden Schliessungsströme.

Dass der intrapolare Elektrotonus dem extrapolaren entgegengesetzt gerichtet ist, kann bei der Erklärung der elektrotonischen

1) Pflüger's Archiv. XIX. S. 416.

2) A. a. O.

Ströme aus der innern Polarisation gar nicht bezweifelt werden; der intrapolare elektrotonische Strom muss dem extrapolaren entgegengesetzt gerichtet sein, mag man ihn nun vom Gesichtspunkte der Stromfadenausbreitung, oder einfach als Ausdruck des polarisatorischen Gegenstroms betrachten. Da unsere Untersuchungen indessen die Identität des elektrischen Erregungsphänomens mit dem wellenförmig von der Kathode aus nach beiden Seiten sich fortpflanzenden Katelektrotonus ergeben haben, und der Satz vom polarisatorischen Inkrement seine Gültigkeit auch am Kernleiter gezeigt hat, so fallen einerseits, wie sich leicht ergibt, die Fleischl'sche und die Hermann'sche Erklärung gewissermassen zusammen; andererseits war zu erwarten, dass die von Fleischl am Nerven beobachtete Erscheinung an den von uns benutzten Kernleitern auch sich zeigen müsse. Dies ist thatsächlich der Fall. Sowohl der Kernleiter aus dünnem Platindraht in 0,6% Kochsalzlösung, wie auch die aus zwei Elektrolyten zusammengesetzten Kernleiter ergeben bei der oben beschriebenen Anordnung einen Ausschlag im Sinne der Oeffnungsinduktionsströme bei gewöhnlicher Anordnung des Wagner'schen Hammers, — seltsamer Weise aber auch bei Anwendung der Helmholtz'schen Anordnung und geringen Rollenabstände. Die letztere Erscheinung dürfte indessen darin ihre Ursache haben, dass der hier massgebende Unterschied der beiden Stromarten durch die Anwendung der Nebenschliessung nicht ganz ausgeglichen wird.

Der gleiche Unterschied dürfte auch herangezogen werden müssen zur Erklärung der in Theil I näher beschriebenen Resultate bei der Ableitung der Kernleiter in der dort so genannten intrapolaren und amphipolaren Anordnung. Das Auftreten des Wendepunkts und die Umkehr der Richtung der Ablenkungen mit wachsender elektromotorischer Kraft der Induktionswirkung in diesen Versuchen, lässt sich, ähnlich wie bei der extrapolaren Ableitung, durch den verschiedenen zeitlichen Verlauf (das verschiedenen schnelle Auftreten) der Polarisation an der Kathode und Anode gleichfalls genügend erklären. Endlich sind dieselben Gesichtspunkte noch massgebend für das quantitative Verhalten der extrapolaren Erscheinungen bei der Hindurchleitung einzelner Induktionsschläge durch eine Strecke rr der verschiedenen Kernleiter (s. Theil I). Werden dieselben einfach durch Schliessen und Oeffnen des primären Stromkreises des Schlitteninduktoriums erzeugt, so

beobachtet man bei geringem Rollenabstande eine bedeutendere extrapolare Wirkung der Schliessungsschläge gegenüber den Oeffnungsschlägen bei dem Kernleiter aus Platindraht in 0,6% Kochsalzlösung¹⁾ —; werden dagegen auch diese Einzelschläge durch Oeffnen und Schliessen einer Nebenschliessung „nivellirt“ hergestellt, so beobachtet man, unter Anwendung eines Stromwenders, dass die Ausschläge auf der Kathodenseite stets grösser sind, als auf der Anodenseite: ein neuer Beweis für das schnellere Auftreten des katelektrotonischen Stroms auch bei kurzer Dauer des polarisirenden Stroms. Bei den Kernleitern aus Aluminium, Nickel und Quecksilber in 0,6% Kochsalzlösung findet man dagegen die grössere extrapolare Wirkung bei beiden Arten von Einzelschlägen auf der Anodenseite.

Erwähnen möchte ich hier nur noch, dass kürzlich Lohnstein²⁾ einen je nach dem Rollenabstande und der Schwingungszahl des Hammers von der Richtung der Schliessungs- oder Oeffnungsschläge abhängigen Ausschlag mit dazwischen liegendem Wendepunkt beobachtet hat bei Durchleitung der Wechselströme des Schlitteninduktoriums mit gewöhnlichem Hammerspiel durch ein mit Zinksulfatlösung gefülltes Gefäss, vermittelt zweier Elektroden aus amalgamirtem Zink. Ich habe bei Wiederholung des Versuchs und Ausdehnung auf die Chlorsilberelektroden in Kochsalzlösung die Erscheinung nicht erhalten, woraus ich schliessen möchte, dass die Kombination von Lohnstein stärker polarisierbar war.

Dass das Auftreten von Polarisation bei Durchleitung von (kongruenten) Wechselströmen (Sinusinduktor) durch Elektrolyten in hohem Masse von deren Frequenz abhängt, ist schon länger bekannt³⁾; wie indessen der zeitliche Verlauf der Polarisation an jeder von beiden Elektroden sich verhält, ist bis jetzt noch nicht genauer untersucht worden.

Da ausserdem das eigentliche Wesen der galvanischen Polarisation und Elektrolyse noch nicht vollständig erkannt ist, so habe ich auf die Ausdehnung meiner Arbeiten in der angedeuteten Richtung, sowie namentlich auch auf die physikalische Untersuchung

1) Das Gleiche sah Fleischl am Nerven.

2) Wiedemann, Annalen. LI. S. 219.

3) Vergl. Kohlrausch, Pogg., Ann. Jubelband. a. a. O.; ferner z. B. Malagoli, Atti dell' acad. Gioenia. (4) 5. p. 48. seq. 1893.

des Wesens der wellenförmig ablaufenden elektrotönenischen Ströme verzichtet. Es dürfte diese Aufgabe zunächst wohl den Physikern zufallen.

So viel glaube ich aber festgestellt zu haben, dass alle elektrischen Phänomene des Nerven sich erklären lassen, wenn man ihn als Kernleiter auffasst, und es hat in gewisser Beziehung sich die Voraussagung bestätigt, welche Hermann auf S. 195, Bd. II seines Handbuchs ausgesprochen hat:

„Könnte man als Kern oder auch als Hülle des Kernleiters eine Substanz wählen, welche durch Anstöße zersetzt und galvanisch wirksam wird, so wäre es nicht undenkbar, dass auch die Erregungserscheinungen, soweit sie der Nerv an sich zeigt, d. h. wellenförmige Fortleitung einer galvanischen Phase und Inkrement derselben an fest polarisirten Stellen, künstlich reproducirt würden“.

Schlussbemerkungen.

Nachdem es uns somit gelungen ist, sämtliche bei Einwirkungen, welche den Nerven zu erregen im Stande sind, an demselben auftretenden galvanischen Erscheinungen aus seinem Verhalten als Kernleiter zu erklären, bzw. an Kernleitern künstlich nachzuahmen, müssen sich zwei Fragen ohne weiteres aufdrängen: erstens, in welcher Beziehung steht die Eigenschaft des Nerven als Kernleiter zu seiner anatomischen Struktur, soweit uns dieselbe bekannt ist; zweitens, in welcher Beziehung stehen die, durch sein Verhalten als Kernleiter erklärten galvanischen Phänomene des Nerven zu dem eigentlichen Erregungsvorgang.

Was den ersteren Punkt betrifft, so ist vom Standpunkte der Erklärung der elektrotönenischen Erscheinungen durch Hermann und andere die Möglichkeit ins Auge gefasst worden, den Achsen-cylinder der Nervenfasern dem Kern, das Nervenmark der Hülle äquivalent zu setzen. Diese Annahme, welche zunächst auf den markhaltigen Nerven (mit sog. doppeltkontourirten Fasern) Rücksicht nimmt, schien eine Stütze zu finden in den Angaben von Biedermann¹⁾, dass marklose Nerven gewisser wirbelloser Thiere

1) Berichte der Wiener Akademie. 3. Kl. XCIII. S. 56—98.

(Muscheln, Anodonta) bei Zuleitung konstanter Ströme keine extrapolaren elektrotonischen Erscheinungen zeigen. Dagegen findet sich nach diesem Autor an den in Rede stehenden Nerven der Ruhestrom zwischen Längsoberfläche und Querschnitt, sowie eine — erst negative, dann positive — Schwankung desselben bei der Erregung. Nachdem wir nun durch unsere Versuche dazu geführt worden sind, die zuletzt genannten Phänomene als besondere Abarten extrapolarer elektrotonischer Erscheinungen anzusehen, würde eine Wiederholung der von Biedermann angestellten Versuche und Ausdehnung auf die marklosen Nerven womöglich noch anderer Thiere nothwendig erscheinen; ein Unternehmen, auf welches ich der Schwierigkeit halber, das Material zu beschaffen, bisher habe verzichten müssen.

Uebrigens gibt Biedermann selbst an, dass wenigstens der extrapolare (aufsteigende) an elektrotonische Strom auch am marklosen Nerven angedeutet ist, woran Hermann mit Recht die Erinnerung anknüpft, dass die Stärke der in Rede stehenden Erscheinungen, insbesondere ihr Grössenverhältniss auf Seiten beider Elektroden an den verschiedenen Kernleiterkombinationen sehr verschieden ist. Ich glaube mit Rücksicht auf den Zusammenhang zwischen extrapolaren gewöhnlichen elektrotonischen Strömen und der negativen Schwankung einerseits, und auf das von Biedermann angegebene Verhalten des marklosen Nerven andererseits, noch besonders betonen zu müssen, dass ich eine Abhängigkeit der Grösse der Ablenkungen, insbesondere der wellenförmigen Erscheinungen bei Einwirkung von Induktionsströmen auf den Kernleiter einerseits, und der Grösse der gewöhnlichen elektrotonischen Ströme bei der „festen“ Polarisirung des Kernleiters durch einen Kettenstrom andererseits in meinen Versuchen nicht habe konstatiren können; vielmehr ist das Grössenverhältniss dieser verschiedenen Erscheinungsformen sehr verschieden je nach der Zusammensetzung und den Dimensionen der Kernleiter.

Somit wäre es möglich, auch für den marklosen Nerven die galvanischen Phänomene aus seiner Natur als Kernleiter zu erklären, wobei entweder an eine Polarisirung an der Grenze zwischen dem Faserinhalt und der etwa vorhandenen Hülle (Schwann'schen Scheide) zu denken wäre, oder an eine concentrische oder fibrilläre Struktur des Achsencylinders; indessen glaube ich, dass für die Bildung einer bestimmten Vorstellung in dieser Richtung noch die

Grundlage fehlt. Hier sei übrigens daran erinnert, dass, wie bereits Valentin angab und in neuerer Zeit Hermann festgestellt hat, auch die Muskeln Spuren extrapolarer elektrotonischer Ströme zeigen¹⁾, und dass der Ausdruck des Ruhestroms und seiner Schwankung am Galvanometer — die Intensität — bei der geringeren elektromotorischen Kraft des Muskels nur darum grösser ist, als am Nerven, weil der grösseren Dicke des Muskels ein geringerer Widerstand entspricht.

Was den zweiten in Frage stehenden Punkt betrifft, so ist man schon bisher stets geneigt gewesen, die elektrischen Vorgänge bei der Erregung des Nerven mit dem eigentlichen physiologischen Prozesse der Erregungsleitung zu identifizieren. Hierfür spricht vor allem die Thatsache, dass die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des galvanischen Erregungsphänomens mit der experimentell bestimmten Leitungsgeschwindigkeit des Nerven gut übereinstimmt. Ferner ist eine chemische oder thermische Veränderung von irgend welcher Bedeutung bei der Thätigkeit des Nerven mit Sicherheit bisher nicht nachgewiesen, vielmehr durch gar manche Arbeiten anscheinend ausgeschlossen worden.

Schon oben ist daran erinnert worden, dass Valentin auf Grund der Beobachtung elektrotonischer Phänomene und der negativen Schwankung an „abgestorbenen“ Nerven den Zusammenhang zwischen den elektrischen Erscheinungen am Nerven und dem eigentlichen physiologischen Nervenprozess als rein äusserlich hinstellen zu müssen geglaubt hat. Neuerdings hat Biedermann²⁾ sich dieser Auffassung insofern genähert, als derselbe auf Grund von Beobachtungen über die Wirkung von Aether und andern Narkoticis auf die elektrischen Erscheinungen des Nerven die extrapolaren elektrotonischen Erscheinungen galvanischer Natur in zweierlei Arten scheiden zu müssen glaubt: in physiologische, welche durch die Aetherwirkung — ebenso wie die negative Stromesschwankung — aufgehoben werden, und in rein physikalische, welche auch unter der Einwirkung des Aethers fortbestehen.

Angesichts jedoch der oben erwähnten Umstände einerseits und der von uns am Nerven und Kernleiter erhaltenen Versuchsergebnisse andererseits glaube ich daran festhalten zu dürfen, dass

1) Dabei ist zwar stets an intramuskuläre Nerven zu denken.

2) Berichte der Wiener Akademie. (3) XCVII. S. 84 — 123.

das Wesen der Nervenleitung in der Fortpflanzung einer galvanischen — elektrotonischen — Phase begründet ist, welche ihrerseits die Natur des Nerven als Kernleiter zur physikalischen Grundlage hat¹⁾.

Die Thatsache, dass eine derartige Fortpflanzung einer galvanischen Phase (um zunächst nur die elektrische Reizung des Nerven ins Auge zu fassen) an die Hindurchleitung kurz-dauernder Stromstösse (z. B. Induktionsschläge) durch den Kernleiter sich knüpft und hierbei zunächst von der Kathode aus erfolgt, ist geeignet, ein Licht auf das, zuerst von du Bois-Reymond aufgestellte, sogenannte Erregungsgesetz des Nerven zu werfen, dass nämlich nicht das Bestehen eines galvanischen Stromes, sondern seine Intensitätsschwankung erregend wirkt, und zwar um so stärker, je grösser dieselbe in der Zeiteinheit ist, oder mit andern Worten, je rascher sie erfolgt. Was die Bedeutung jedes der beiden Pole für die Erregung betrifft, so ist bereits von Pflüger aus den sog. Erregbarkeitsveränderungen im Elektrotonus der Satz gefolgert worden: Der Nerv wird erregt durch Entstehen des Katelektrotonus und Verschwinden des Anelektrotonus. Indem ich nun daran erinnern möchte, dass schon früher von Peltier, neuerdings von Tigerstedt²⁾ und Grützner³⁾ die Annahme gemacht und nicht ohne Erfolg verteidigt worden ist, die Erregung von der Anode aus beim Verschwinden des Anelektrotonus (Anodenöffnungserregung) beruhe nur auf Entstehen des Katelektrotonus, indem aus der vorherigen Anode nunmehr die Kathode des ent-

1) Für diese Auffassung scheinen mir auch die Ergebnisse gewisser neuerdings von d'Arsonval und Tissot (Archives de physiologie. 1893) angestellten Versuche zu sprechen. Diese Autoren geben an, dass die Muskeln scheinbar abgestorbener Präparate, welche weder bei direkter noch bei indirekter Reizung die geringste Spur von Zuckung zeigen, noch die negative Schwankung geben, und bei sorgfältiger Auskultation mit passenden Apparaten ein Muskelgeräusch hören lassen, wenn der motorische Nerv durch Induktionsströme „tetanisiert“ wird. Dieselbe Erscheinung wurde auch an frischen Präparaten beobachtet bei Applikation so schwacher Reize auf den Nerven, dass noch keine Muskelaktion (Formveränderung) sichtbar wurde. Vergl. damit die von mir unter II beschriebenen Versuche.

2) L o v é n's Mitth. aus dem physiolog. Labor. des Carol. Instituts in Stockholm. II.

3) Breslauer ärztl. Zeitschr. 1882. Nr. 23.

gegengesetzt gerichteten Nachstroms werde: — glaube ich, dass die Beziehung zu der von uns gefundenen schnelleren, und zwar bei kurzer Dauer des polarisirenden Stromes wellenförmigen Fortpflanzung des katelektrotonischen Stromes sich ohne Zwang herstellen lässt.

Da ferner der Zusammenhang zwischen den Erregbarkeitsänderungen im Elektrotonus und dem Satz vom sog. polarisatorischen Inkrement der Erregung, wie schon Hermann betont hat, sehr nahe liegt, so dürfte es auch nicht von der Hand zu weisen sein, an eine Erklärung dieser physiologischen Thatsachen aus der physikalischen Natur des Nerven als Kernleiter zu denken. Indessen glaube ich auf ein näheres Eingehen in diese Frage, als den Rahmen dieser ersten Arbeit überschreitend, zunächst verzichten zu können. Desgleichen wird noch gar manche Frage, z. B. diejenige nach einer Erklärung der Isolirung der Nervenleitung in den einzelnen Fasern, eine gesonderte und ausführliche Bearbeitung erfordern.

Bemerkung zu Tafel I.

In allen Figg. entspricht die ausgezogene Kurve dem zeitlichen Verlauf des katelektrotonischen, die gestrichelte demjenigen des anelektrotonischen Stromes.
