

XXXV.

Aus der medicinischen Klinik des Herrn Geheimrath Gerhardt.

Experimentelle Untersuchungen zur Elektrodiagnostik.

Von

Stabsarzt Dr. **Martius**,

Assistent der Klinik.

(Hierzu Taf. XIII. und XIV.)

I. Ueber die Veränderungen des Leitungswiderstandes der menschlichen Haut durch den constanten Strom.

Mit der Aufnahme elektrischer Statén für die zweite medicinische Klinik beauftragt, habe ich seit dem vorigen Wintersemester mehrfach Veranlassung gefunden, die üblichen elektrodiagnostischen Untersuchungsmethoden auf ihre physikalische und physiologische Werthigkeit einer erneuten und eingehenden Prüfung zu unterwerfen. Ermöglicht und erleichtert wurde mir diese Arbeit durch die Beschaffung der nöthigen in absolutem Maasssystem construirten Apparate Seitens der Klinik.

Der von Herrn Hirschmann gelieferte, grosse stationäre Apparat, dessen ich mich hauptsächlich bediente, weicht von den seither aus dieser Firma hervorgegangenen in seiner Einrichtung insofern ab, als auf meine Veranlassung die Widerstände sowohl des Rheostaten als des absoluten Galvanometers statt in S. E. in absolutem Masse (in Ohm's) hergestellt sind. Diese scheinbar geringfügige Aenderung ist insofern nicht ohne Bedeutung, als sie, wie wir sehen werden, die für die Zwecke dieser Arbeit vielfach nöthigen Rechnungen wesentlich erleichtert, ja eigentlich erst möglich macht.

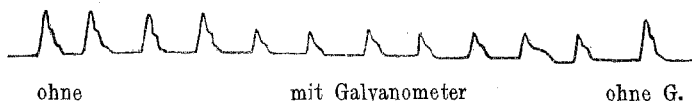
Als Ausgangspunkt meiner Untersuchungen diente die von

v. Ziemssen in der eben erschienenen zweiten Hälfte seines berühmten Buches „Die Elektrizität in der Medicin“ gegebene allgemeine Vorschrift über den typischen *modus procedendi* bei einer jeden Erregbarkeitsprüfung. Nachdem v. Ziemssen den wohl von keiner Seite mehr verkannten, grossen Fortschritt hervorgehoben, der in der Schaffung eines practisch verwendbaren, absoluten Galvanometers gegeben ist, bemerkt er, dass es vortheilhaft sei, das Galvanometer durch Einfügung eines gewöhnlich geschlossen gehaltenen du Bois'schen Schlüssels in den Stromkreis auszuschalten und dasselbe jedesmal nur im Moment des Bedarfes durch Oeffnen des Schlüssels einzuschalten. Dementsprechend wird nun als feststehende Regel hingestellt, man solle die einzelnen Minimalzuckungen bei geschlossenem du Bois'schen Schlüssel ansuchen und erst nach Constatirung derselben jedesmal besonders durch Oeffnen des Schlüssels das Galvanometer einschalten, um die gesuchte Stromstärke abzulesen. Erb⁴¹⁾ giebt dieselbe Vorschrift: „sowie die erste schwache Zuckung eintritt, schaltet man das Galvanometer ein und bestimmt die Nadelablenkung bei der gerade in Wirksamkeit gewesenen Elementenzahl“. Der Grund dieses Verfahrens ist darin zu suchen, dass die durch wiederholte Oeffnungen und Schliessungen hervorgerufenen heftigen Schwankungen der Galvanometernadel möglichst vermieden werden sollen. Aber das Verfahren ist physikalisch nicht unanfechtbar. Durch die nachträgliche Einschaltung des Galvanometers wird ein neuer Widerstand in den Gesamtstromkreis eingeführt, der, wenn er gross genug ist, die Intensität des Stromes beeinflussen wird. Nur unter der Voraussetzung, dass der Widerstand des Galvanometers gegenüber dem Gesamtwiderstande des übrigen Kreises verschwindend klein, d. h. so klein ist, dass er ohne merklichen Fehler ganz vernachlässigt werden kann — nur unter dieser Voraussetzung ist die gegebene Vorschrift zu rechtfertigen. Andernfalls ist sie fehlerhaft. Die Stromstärke, die abgelesen wird, ist kleiner, als diejenige, bei welcher die Zuckung wirklich Statt hatte.

Die Verwendbarkeit der angegebenen Regel steht und fällt also mit dem Nachweis, ob der theoretisch nicht wegzuleugnende Fehler unter allen Umständen klein genug ist, um in praxi niemals störend hervortreten. Wie lässt sich das entscheiden? Für diejenigen, die weder lange Rechnungen, noch physikalische Betrachtungen lieben, giebt es ein sehr einfaches Mittel, das Auftreten eines in der That unter Umständen recht merklichen Fehlers bei Befolgung der Ziemssen'schen Methode unmittelbar *ad oculos* zu demonstrieren. Man hat nur nöthig, die Zuckungen, etwa die Kathodenschliessungs-

zuckungen eines Muskels bei unverändertem Stromkreis durch eine geeignete Vorrichtung sich selbst graphisch verzeichnen zu lassen und zwar einmal mit eingeschaltetem Galvanometer, das andere Mal ohne dasselbe. Man wird dann finden, dass die Zuckungen im letzteren Falle merklich grösser ausfallen, wie im ersteren. Beifolgende Curve

K. S. Zuckungen des M. flexor carpi rad.



zeigt das auf's deutlichste. Als registrierender Apparat diene das Grunmach'sche Polygraphion, das eigentlich zur Aufnahme von Puls-, Spitzenstoss- und Athmungscurven bestimmt, sich mir sehr geeignet erwiesen hat auch zur Registrirung der Muskelzuckungen bei elektrodiagnostischen Untersuchungen. Die Pelotte des Tambours wird genau so auf die Sehne des zu untersuchenden Muskels aufgesetzt, wie bei Pulsuntersuchungen auf die betreffende Arterie. Die Empfindlichkeit des Apparates ist eine recht grosse. Bei richtiger Fixirung des Apparates, die natürlich einige Uebung erfordert, gelingt es, Zuckungen deutlich aufzuschreiben, die so schwach sind, dass sie ohne weitere Hilfsmittel kaum wahrgenommen werden, jedenfalls der blossen Beobachtung leicht entgehen. Ich werde im Laufe dieser Untersuchungen noch ausführlicher auf diese Methode, die Muskelzuckungen objectiv darzustellen, zurückzukommen haben.

Durch diesen graphischen Versuch — so instructiv er ist — gewinnen wir aber noch keine rechte Vorstellung über die mögliche Grösse des allerdings bewiesenen Fehlers. Dieselbe lässt sich jedoch nicht unschwer auf rein theoretischem Wege berechnen. Nach der Ohmschen Formel ist die Intensität des Stromes bei Aus-

schaltung des Galvanometers zur Zeit der Zuckung $I = \frac{E}{W_i + W_a}$

und die Intensität desselben Stromes nach Einschaltung des Galvano-

mers $I_1 = \frac{E}{W_i + W_a + W_g}$, wenn W_g den Widerstand des Galvano-

mers bedeutet. Der gesuchte Fehler $I - I_1$ ist also ohne Weiteres zu berechnen, wenn wir die elektromotorische Kraft der angewandten Elemente (E), den inneren Widerstand derselben (W_i), den Widerstand des Galvanometers und den des eingeschalteten menschlichen Körpers (W_a) kennen. Nach einer von mir vorgenommenen für unsere praktischen Zwecke wohl hinreichend genauen Messung²⁾ beträgt nun die

elektromotorische Kraft jedes einzelnen der im Hirschmann'schen grossen Apparate verwendeten Siemens'schen Papp Elemente ziemlich genau 1 Volt, der innere Widerstand 15 Ohm, der Widerstand des Hirschmann'schen absoluten Galvanometers bei jeder beliebigen Stöpselung 500 Ohm. Bleibt nur fraglich, wie gross wir W_a , den Widerstand des menschlichen Körpers ansetzen sollen. Auf diese Frage sind bekanntlich die Antworten bisher sehr verschieden ausgefallen. Während frühere Beobachter, wie R. Remak und Runge — allerdings meist ohne Beachtung des verwendeten Elektrodenquerschnitts — einen Gesamtwiderstand des Körpers von 2000 bis 6000 S. E. fanden, haben die neueren Messungen von Gaertner³⁾ und von Jolly⁴⁾ übereinstimmend ergeben, dass der Anfangsleitungswiderstand, d. h. der Widerstand im Moment des Stromschlusses ein ganz ausserordentlich grosser ist. Er beträgt bei Anwendung von Elektroden von ungefähr 12,5 Qu.-Ctm. Querschnitt fast an allen Körperstellen weit über 100,000 S. E., ja er kann 400,000 S. E. übersteigen. Hätten wir es bei unseren elektrodiagnostischen Untersuchungen stets und ausschliesslich mit diesem Anfangsleitungswiderstand zu thun, so würden die 500 Ohm Galvanometerwiderstand jenem gegenüber in der That nicht in Betracht kommen. Der Fehler ($J - J_1$) würde verschwindend klein ausfallen und vernachlässigt werden können. Nun ist es aber eine alte Erfahrung, die schon R. Remak⁵⁾ gemacht und gebührend berücksichtigt hat, dass durch die Einwirkung des Stromes selbst der Widerstand der menschlichen Haut sehr schnell und sehr erheblich herabgesetzt wird. Diese Widerstandsabnahme wird um so grösser, je stärker der Strom ist. Ein kräftiger Strom setzt nach Gaertner den Anfangswiderstand schon nach 5 Sec. auf die Hälfte, nach 30 Sec. auf ein Viertel, nach genügend langer Einwirkung bis auf $\frac{1}{30}$ seiner ursprünglichen Grösse herab. Wer nun jemals selbst elektrodiagnostische Untersuchungen in der allgemein üblichen Form gemacht hat, weiss, dass wir, um beispielsweise eine normale Erregungsformel aufzustellen, erstens eine sehr lang dauernde Durchströmung der Haut nicht vermeiden können, und zweitens, um etwa die $KaOZ$ festzustellen, mit sehr starken Strömen arbeiten müssen. Damit sind aber alle Bedingungen für eine maximale Herabsetzung des Widerstandes gegeben. Die Thatsache des so ausserordentlich, man möchte sagen erschreckend hohen Anfangsleitungswiderstandes ist daher, wie Erb⁶⁾ hervorhebt, zwar an sich sehr interessant, für die praktische Elektrotherapie (und Diagnostik) aber von ganz untergeordneter Bedeutung, da wir es bei diesen stets mit dem schon durch den Strom modificirten L.-W. der Epidermis zu thun haben.

Wenn wir nun, den älteren Bestimmungen entsprechend, diesen modificirten Leitungswiderstand der Haut im Mittel zu 4000 Ohm annehmen, so hätten wir sämtliche Daten zusammen, um den gesuchten Fehler für jede Elementenzahl berechnen zu können. Es zeigt sich dabei, dass derselbe um so grösser wird, je grösser die Zahl der Elemente ist, die zur Verwendung kommt. Bei Anwendung eines Elements beträgt er 0,04 M.-A., bei 20 El. 0,48, also nahezu $\frac{1}{2}$ M.-A., und bei 50 El. 0,94, also nahezu 1 M.-A. Damit ist jedenfalls zur Genüge bewiesen, dass die Regel, das Galvanometer erst zum Zweck der Ablesung einzuschalten, allgemein gegeben physikalisch fehlerhaft ist. Allerdings ist noch ein Punkt zu berücksichtigen. Je grösser der Widerstand des benutzten Galvanometers ist, desto grösser wird der Fehler ausfallen. Nun hat das Hirschmann'sche absolute Vertikalgalvanometer den verhältnissmässig hohen Widerstand von 500 Ohm (resp. den etwas geringeren von 500 S. E.). Das von Ziemssen, wie es scheint, ausschliesslich benutzte Edelmann'sche Einheitsgalvanometer hat einen geringeren Widerstand (330 Ohm bei der empfindlichsten Anordnung). Aber die Regel ist ganz allgemein gegeben und als solche (ohne dass von verschiedenen Arten der Galvanometer die Rede wäre) beispielsweise schon in das vortreffliche Buch von Möbius: „Allgemeine Diagnostik der Nervenkrankheiten“, Leipzig 1886. S. 142 übergegangen. Es bedarf dieselbe daher in der That einer principiellen Einschränkung, wenn man physikalisch exact vorgehen und immerhin unter Umständen ins Gewicht fallende Fehler vermeiden will.

Damit ist aber diese Angelegenheit noch keineswegs erledigt.

Ich würde mich bei der ganzen Sache und ihrer physikalisch von vornherein durchsichtigen und eigentlich selbstverständlichen Lösung nicht so lange aufgehalten haben, wenn sie nicht der Ausgangspunkt für neue Widerstandsmessungen geworden wäre, die ich angestellt habe und deren Resultate ich im Folgenden mittheilen möchte. Bei der eben angestellten Rechnung ist der durch den Strom modificirte Hautwiderstand, als im Mittel 4000 Ohm betragend, angenommen worden. Nun folgt aber bereits aus allen bisherigen Widerstandsmessungen mit einiger Sicherheit, dass auch der modificirte Leitungswiderstand nicht constant ist, sondern je nach Anwendung verschiedener elektromotorischer Kräfte im Kreise, und in Folge von Stromwendungen fortwährend erheblichen Schwankungen unterliegt. Es würde daher auch unser Fehler nicht constant sein, sondern bald zu-, bald abnehmen müssen. Aber auch ganz im Allgemeinen muss man sagen, dass wir bei keiner elektrodiagnostischen Erregbarkeits-

prüfung die richtige Einsicht darüber gewinnen können, was physikalische Wirkung von Widerstandsschwankungen, was physiologischer Effect von Erregbarkeitsänderungen ist, wenn es nicht gelingt, genauer als bisher den zeitlichen Ablauf der Widerstandsschwankungen und die Umstände festzustellen, von denen dieselben in jedem Zeitmomente abhängen.

Alles, was bis jetzt über die Widerstandsveränderungen der menschlichen Haut durch den constanten Strom bekannt war, lässt sich in folgende Sätze zusammenfassen:

1. Die Grösse der Widerstandsabnahme ist abhängig von der Intensität des angewandten Stromes und von der Schliessungsdauer desselben (Gaertner⁷).

2. Ein durch den Strom von einer bestimmten Richtung hervorbrachter verringerter Widerstand wird durch Wendung des Stromes noch weiter herabgesetzt, welch' letztere Abnahme jedoch bald wieder einer Zunahme Platz macht (E. Remak).

3. Die Ursache der Widerstandsverminderung ist der Hauptsache nach in der kataphorischen Wirkung des Stromes zu suchen und findet demnach hauptsächlich an der Anode statt (Gaertner).

Ist diese letztere Behauptung richtig, so muss bei der gebräuchlichen Anwendung verschieden grosser Elektroden die Widerstandsänderung eine merklich verschiedene sein, je nachdem die indifferente grosse Elektrode Anode oder Kathode ist. Dieses gegensätzliche Verhalten muss auch bei Stromwendungen hervortreten. Ueber diese Punkte wissen wir bisher nichts. Aber auch über den zeitlichen Verlauf der Widerstandsabnahme und dessen Aenderung bei verschiedener Grösse der elektromotorischen Kräfte im Kreise, sowie über den Einfluss der Stromwendung unter den verschiedenen möglichen Bedingungen waren unsere Kenntnisse bisher höchst oberflächlicher Natur.

Um diese sehr wesentliche und merkbare Lücke auszufüllen, war es erforderlich, alle hier in Betracht kommenden Variablen nach einander durch zu experimentiren. Da die mir zur Verfügung stehenden Apparate Widerstandsmessungen nach der Brückenmethode von Wheatstone nicht gestatteten, musste ich mich mit der mit dem Hirschmann'schen grossen Apparate sehr wohl ausführbaren Substitutionsmethode begnügen. Ich sah darin für meine Zwecke jedoch keinen Fehler, sondern eher gewisse Vorthelle, und zwar aus folgenden Gründen: Die Methode besteht bekanntlich darin, dass in den Stromkreis einer Batterie ein Galvanometer, der zu suchende Widerstand und ein genügend abstufbarer Rheostat eingeschaltet wird.

Man beobachtet nun zuerst den Ausschlag der Nadel, während nur der zu messende Widerstand (x), nicht der Rheostat eingeschaltet ist. Hierauf wird x ausgeschaltet und am Rheostat soviel Widerstand (r) eingeschaltet, bis wieder derselbe Ausschlag sich zeigt. Es ist dann $x = r$. Man kann also den gesuchten Widerstand unmittelbar ablesen.

Der Rheostat des Hirschmann'schen Apparates hat im Maximum nur 5000 Ohm Widerstand. Dieser Umstand scheint in Anbetracht der hohen Zahlen von Gaertner und Jolly die Anwendung desselben von vornherein auszuschliessen. Aber wir haben es ja bei unseren Versuchen mit den Anfangswiderständen ausdrücklich niemals zu thun. Wir wollen ja gerade den Gang der Widerstandsabnahme bei längerer Durchströmung und denjenigen Stromstärken, die practisch in Betracht kommen, feststellen, und da wird sich zeigen, dass bei Anwendung genügend grosser Elektroden, wie sie die polare Untersuchungsmethode von selbst mit sich bringt, wir es in praxi so gut wie niemals mit Widerständen zu thun haben, die grösser als 5000 Ohm sind. Was nun die jetzt soviel hervorgehobene grössere Genauigkeit der Brückensmethode betrifft (Erb nennt sie beispielsweise „die allein zuverlässige“), so ist das für physikalische Zwecke, bei denen der Widerstand während der Messung sich nicht ändert, ja ohne Weiteres zuzugeben und aus leicht ersichtlichen Gründen anerkannt. Aber bei Widerstandsmessungen, wie die vorliegenden, bei denen die Widerstände innerhalb sehr kurzer Zeit den angegebenen ungeheuren Schwankungen unterliegen und bei denen es nur darauf ankommt, den Gang der Widerstandsabnahme im Ganzen und Grossen festzustellen, für jedes Zeitmoment im physikalischen Sinne genaue Messungen vornehmen zu wollen, erscheint mir unmöglich und vor allen Dingen auch überflüssig. Für diesen Zweck erweist sich gerade die Substitutionsmethode als vortheilhaft, weil bei länger dauerndem Stromschluss die Wanderung der Nadel, bezogen auf die Zeit, den Gang der Widerstandsabnahme unmittelbar zu berechnen oder zu messen gestattet. Natürlich ist es zu mühsam und vor Allem dem Zweck der Untersuchung widersprechend, wenn man für jede Stromstärke im Einzelfalle jedesmal den Körper aus- und dafür die entsprechende Rheostatlänge einschalten wollte, um so die Grösse des Widerstandes immer wieder von Neuem zu bestimmen. Diese Unterbrechungen sollen ja gerade vermieden werden. Für einen gegebenen Apparat, bei dem man die elektromotorische Kraft der Elemente und deren inneren Widerstand für die Dauer der Untersuchung, also etwa für Wochen als annähernd constant ansehen kann, ist es vielmehr vortheilhaft und vorzuziehen, von vornherein und ein für allemal eine Tabelle aufzustellen, die für

jede der angewandten Elementenzahlen und für jede Stromstärke die Widerstände abzulesen gestattet. Diese Tabelle lässt sich ebenso leicht berechnen, wie empirisch bestimmen. Ich habe für meine Zwecke beides gethan und in der genügenden Uebereinstimmung beider Zahlenreihen den Beweis für die Richtigkeit der Voraussetzungen gefunden. Um die Tabelle nicht zu umfangreich werden zu lassen, habe ich die Zahl der Elemente stets um 5 wachsen lassen, also für 5, 10, 15, 20, 25, 30 und 35 Elemente (stärkere Ströme kommen practisch kaum zur Anwendung) die Widerstände bestimmt, wenn die Intensitäten um je 1 M.-A. wachsen. Die empirische Bestimmung gestaltet sich in der Weise, dass beispielsweise bei 10 Elementen derjenige Rheostatwiderstand aufgesucht und notirt wird, bei dem das Galvanometer 1 M.-A. anzeigt, dann derjenige, bei dem die Nadel auf 2, auf 3 M.-A. zur Ruhe kommt u. s. f. Die Berechnung derselben Zahlen ist dann eine sehr einfache, wenn man die elektromotorische Kraft des einzelnen Elementes und den inneren Widerstand desselben kennt und ferner, worauf ich schon in der Einleitung hinwies, die Rheostatwiderstände und die des Galvanometers in absolutem Maasse gegeben sind. Ein Beispiel wird genügen, um die Sache klar zu legen. Ich will wissen, welchen Widerstand der Körper darbietet, wenn bei Anwendung von 20 Elementen das Galvanometer 5 M.-A.

anzeigt. Ich habe dann nach der Formel $\frac{J}{1000} = \frac{\Sigma E}{\Sigma W_i + W_g + W_x}$ die Gleichung $\frac{5}{1000} = \frac{20}{20 \cdot 15 + 500 + x}$. Das giebt $x = 3200$ Ohm.

Die auf diese Weise aufgestellte Tabelle gilt natürlich nur so lange, als elektromotorische Kraft und innerer Widerstand der Elemente annähernd constant bleiben. Eine Veränderung dieser Factoren würde dann anzunehmen sein, wenn die berechneten Widerstände mit den gemessenen nicht mehr genügend übereinstimmen.

Nunmehr können wir an die Versuche selbst gehen. Eine selbstverständliche Voraussetzung derselben sind unpolarisirbare Elektroden. Bei Benutzung der gewöhnlichen überzogenen Messingelektroden kann nach meinen Messungen der Polarisationsstrom, wenn grössere Stromstärken zur Verwendung kommen, 1 M.-A. übersteigen, also schon erhebliche Fehler verursachen. Da mir die unpolarisirbaren Elektroden Hitzig's zu theuer und zu unbequem waren, habe ich von Herrn Hirschmann nach meinen Angaben neue anfertigen lassen, die sich für den vorliegenden Zweck als sehr practisch erwiesen. Dieselben bestehen aus amalgamirten runden Zinkplatten von verschiedener, aber genau bekannter Grösse, auf deren Rückseite sich die gewöhn-

lichen Elektrodenhandgriffe einschrauben lassen. Für jede Elektrode wurden aus gutem, leicht Flüssigkeit aufnehmendem Filz zwei Platten von genau derselben Grösse wie die Zinkplatte ausgestanzt. Je eine dieser Filzplatten wurde vor dem Versuch in concentrirte Zinkvitriollösung gelegt, während die andere in 1proc. Kochsalzlösung kam. Nachdem sie gut mit der betreffenden Flüssigkeit durchtränkt waren, wurde zuerst der leicht ausgedrückte Kochsalzfilz auf die gewählte Hautstelle aufgelegt, darauf der Zinkvitriolfilz, auf beides die Metallelektrode gesetzt. Auch während der längsten, über eine Viertelstunde dauernden Versuche blieben die dicken Filzplatten gleichmässig feucht. Nach Abnahme der Elektroden liessen sie sich in heissem Wasser leicht auslaugen, während die Zinkplatten jeder Zeit sehr bequem zu amalgamiren waren. Kurz, da es sich niemals um eine sogenannte labile Anwendung des Stromes handelte, vielmehr stets während der ganzen Dauer eines Versuches die Elektroden durch gleichmässigen Druck Seitens eines besonderen Gehülfen genau auf derselben Hautstelle fixirt blieben, erwiesen diese Elektroden sich in der angegebenen Form als sehr bequem zu handhaben und practisch.

Ein weiterer sachverständiger Gehülfe, ein Studirender der Medicin, übernahm die Protocollirung und die möglichst genaue Zeitbeobachtung an einer Secundenuhr. Ich selbst besorgte die Handhabung des Apparates (Stromschluss, Einschaltung der für den Versuch jeweilig erforderlichen Anzahl von Elementen, die Stromwendungen u. s. w.) und zugleich die Ablesung am Galvanometer, deren Ergebnisse ich dem Studirenden dictirte, während derselbe gleichzeitig möglichst genau die Zeit notirte, in der die betreffende Stromstärke erreicht war. Hinterher wurden dann die den beobachteten Intensitäten entsprechenden Widerstände nach der Tabelle eingetragen. Da es nun aber sehr schwierig ist, aus dem blossen Durchlesen der so gewonnenen Zahlenreihen ein wirklich klares und anschauliches Bild von dem unter verschiedenen Bedingungen so ausserordentlich wechselnden Gange der Widerstandsveränderungen zu gewinnen, habe ich die graphische Darstellung zu Hülfe genommen, die das Verständniss und die Uebersicht der gewonnenen Resultate ganz ausserordentlich erleichtert. Wie eine Besichtigung der Curven ohne weiteres ergibt, bedeutet die Abscissenaxe die Zeit (die durch stärkere Linien begrenzten Abschnitte = 1 Minute, jeder kleinste Abschnitt also = 20 Sekunden); während auf der Ordinatenaxe die Widerstände, und zwar um je 100 Ohm abnehmend, aufgetragen sind. Ausdrücklich glaube ich darauf hinweisen zu müssen, dass die Curven nicht etwa aus verschiedenen Versuchen abgeleitete verallgemeinerte Schemata der

wirklichen Vorgänge darstellen, sondern diese letzteren selbst. Jede Curve ist das möglichst genau construierte Bild eines wirklichen Versuches, der unter vielen seinesgleichen als besonders typisch ausgesucht wurde.

Versuch 1a. (Dazu: Curven Fig. 1 a.)

| Name. | Grösse und Ansatzstellen der Elektroden. | Elementenzahl. | Zeit. | | Nadelablenk. gleich Widerstand. | | Anmerkungen. |
|-------|--|----------------|---------------|------|---------------------------------|--------|--|
| | | | Min. | Sec. | (M.-A.) | (Ohm.) | |
| Huth | Grosse Anode (72 Qu.-Ctm. Qu.) auf das Sternum. | 10 | N. Str. Schl. | 30 | 1,5 | — | N. Str. Schl. bedeutet (Columnne 4) erste Ablenkung unmittelbar nach Stromschluss, sobald die Nadel zur Ruhe gekommen. |
| | | | | | 3 | 2610 | |
| | | | | | 3,5 | 2230 | |
| | | | | | 4,0 | 1860 | |
| | Kleine Kathode (12,57 Qu.-Ctm. Qu.) auf den rechten Vorderarm. | 15 | N. Str. Schl. | 30 | — | — | |
| | | | | | 4,5 | 2800 | |
| | | | | | 6 | 1790 | |
| | | | | | 7 | 1470 | |
| | Stellungswechsel der Kathode bei jeder neuen Elementenzahl. | 20 | N. Str. Schl. | 30 | 7,5 | — | |
| | | | | | 8 | 1260 | |
| | | | | | — | — | |
| | | | | | 8 | 1790 | |
| | | | | | 9 | 1480 | |
| | | | | | 10 | 1220 | |
| | | | | | — | — | |

Versuch 1b. (Dazu: Curven Fig. 1 b.)

| Name. | Grösse und Ansatzstellen der Elektroden. | Elementenzahl. | Zeit. | | Nadelablenk. gleich Widerstand. | |
|-------|---|----------------|---------------|------|---------------------------------|--------|
| | | | Min. | Sec. | (M.-A.) | (Ohm.) |
| Huth. | Genau wie in Versuch 1a., nur mit dem Unterschiede, dass die Kathode auf den linken Vorderarm aufgesetzt wurde. | 10 | N. Str. Schl. | 30 | 1,5 | — |
| | | | | | 2,5 | 3160 |
| | | | | | 3 | 2610 |
| | | | | | 3,5 | 2230 |
| | | 15 | N. Str. Schl. | 30 | — | — |
| | | | | | 5 | 2290 |
| | | | | | 6 | 1790 |
| | | | | | 6,50 | — |
| | | 20 | N. Str. Schl. | 30 | 7 | 1470 |
| | | | | | 6 | 2610 |
| | | | | | 7 | 2110 |
| | | | | | 8 | 1790 |
| | | | | | 9 | 1480 |
| | | | | | — | — |

Die Bedingungen dieser Versuche, d. h. die Grösse der Elektroden und ihre Ansatzstellen (grosse indifferente Elektrode auf das Sternum, kleine differente auf eine der Extremitäten), ferner die Stromrichtung (differente Elektrode = Kathode), sind mit Absicht so gewählt, wie sie bei den Erregbarkeitsprüfungen von vornherein, also zur Aufsuchung der Anfangszuckung bei Kathodenschliessung gewöhnlich zur Anwendung gelangen. Es folgt aus diesen Versuchen:

1. Dass (unter den angegebenen Bedingungen) die absolute Grösse der für ein und dieselbe Stromrichtung erreichbaren Widerstandsverminderung mit der elektromotorischen Kraft im Kreise, d. h. mit der Zahl der angewandten Elemente wächst.

2. Dass diese Widerstandsverminderung jedoch eine gewisse Grenze nicht überschreitet. Ist die Grenze (in unseren Versuchen etwa 1300 Ohm) erreicht, so bringt eine weitere Steigerung der elektromotorischen Kraft keine weitere Widerstandsverminderung mehr hervor.

Dieser letztere Satz tritt noch deutlicher hervor, wenn man, anstatt wie in Versuch 1, vor jeder Steigerung der Elementenzahl die Ansatzstelle der Kathode zu wechseln, beide Elektroden während der ganzen Dauer des Versuches unverrückt stehen lässt.

Versuch 2a. (Dazu: Curve 2a.)

| Name. | Grösse und Ansatzstellen der Elektroden. | Elementenzahl. | Zeit. | | Nadelablenk. gleich Widerstand. | |
|-------------------------------|---|----------------|-------|------|---------------------------------|---------|
| | | | Min. | Sec. | (M.-A.) | (Ohm.) |
| Herling. Bleiläh- mung. | Grosse Anode (72 Qu.-Ctm. Qu.) links neben das Sternum; kleine Kathode (10 Qu.-Ctm. Qu.) auf die Rückseite des linken Vorderarms. | 5 | — | 30 | eben merkbar. Ablenk. | |
| | | 10 | 1 | — | | 37400 |
| | | | 1 | — | | 18700 |
| | | | 1 | 30 | | 0,25 |
| | | | 2 | — | | 0,5 |
| | | | 2 | — | | 1,0 |
| | | | 3 | — | | 1,25 |
| | | 15 | — | — | | 3,5 |
| | | | 4 | — | | 3530 |
| | | | 5 | — | | 4,0 |
| | | | 5 | — | | 3030 |
| | | 20 | — | — | | 4,5 |
| | | | 5 | 30 | | 2610 |
| | | | 6 | 30 | | 6 |
| | | | 6 | 30 | | 6,5 |
| | | 25 | 7 | — | | 8 |
| | | | 7 | 30 | | 10 |
| | | | 8 | — | | 11 |
| | | 30 | 9 | — | | 11 |
| | | | 10 | — | | 13 |
| | | 35 | 11 | — | | 14 |
| | | 3 | 12 | — | | 17 |
| | | 1 | 12 | 30 | | 1,8—1,9 |
| | | | | | | 0,6 |
| | | | | | | 1160 |

Versuch 2b. (Curve: Fig. 2 b.)

| Name. | Grösse und Ansatzstellen der Elektroden. | Elemen- tenzahl. | Zeit. | | Nadelablenk. gleich Widerstand. | |
|---------|---|---------------------|-------|------|---------------------------------------|--------|
| | | | Min. | Sec. | (M.-A.) | (Ohm.) |
| Herling | Alles wie in Ver- such 2a. nur links. | 5 | — | — | 0 | |
| | | | — | 30 | eben merkbar. | |
| | | 10 | 1 | — | 0,25 | 37400 |
| | | | 1 | 45 | 0,5 | 18700 |
| | | | 2 | 30 | 0,75 | — |
| | | 15 | 3 | — | 1,5 | — |
| | | | 3 | 45 | 2,6 | 5000 |
| | | | 4 | — | 2,75 | — |
| | | | 4 | 30 | 3,0 | 4240 |
| | | | 5 | — | 3,25 | 3600 |
| | | 20 | — | — | 5,0 | 3300 |
| | | | 5 | 30 | 6,0 | 2610 |
| | | | 6 | 15 | 6,5 | 2350 |
| | | 25 | 7 | — | 9 | 2000 |
| | | | 8 | — | 10 | 1660 |
| | | | 8 | 30 | 10,5 | 1550 |
| | | 30 | 9 | — | 13,0 | 1350 |
| | | | 10 | 30 | 14,0 | 1200 |
| | | 35 | 11 | — | 16,5 | 1160 |
| | | | 12 | — | 17,0 | 1000 |
| | | 3 | 12 | — | 1,7 | 1440 |
| | | 1 | 13 | — | 0,5 | 1500 |

Weiter folgt aus den Curven dieser Versuche, dass es angezeigt ist, zwischen relativen Widerstandsminimis und dem absoluten Widerstandsminimum zu unterscheiden. Unter den ersteren sind die für bestimmte elektromotorische Kräfte, beispielsweise für 15 Elemente erreichbaren, nicht maximalen Widerstandsverminderungen zu verstehen. Das absolute Widerstandsminimum ist dann erreicht, wenn eine weitere Steigerung der elektromotorischen Kraft keine weitere Widerstandsherabsetzung mehr ergibt.

Aber diese Versuche zeigen noch ein neues Moment. Nachdem das absolute Widerstandsminimum erreicht war, wurde die Zahl der Elemente, ohne den Stromkreis zu unterbrechen, von 35 zuerst auf 3, dann auf 1 Element reducirt.

Dabei wuchs der Widerstand wieder, jedoch, wie ein Blick auf die Curve zeigt, nur um verhältnissmässig geringe Werthe. Nachdem die Nadel nach einigen Schwankungen sich eingestellt, blieb sie auf der neuen Stellung unverändert stehen. Dasselbe Verhalten zeigt sich,

wenn man nach erreichtem Widerstandsminimum die Elementenzahl allmählig verringert.

Versuch 2c. (Curve: Fig. 2c.)

| Name. | Grösse und Ansatzstellen der Elektroden. | Elementenzahl. | Zeit. | | Nadelablenk. gleich Widerstand. | |
|-------|---|----------------|-------|------|---------------------------------|--------|
| | | | Min. | Sec. | (M.-A.) | (Ohm.) |
| Huth. | Grosse Anode (72 Qu.-Ctm. Qu.) auf das Sternum, kleine Kathode (10 Qu.-Ctm. Qu.) auf den rechten Vorderarm. | 30 | — | 10 | 10 | 2110 |
| | | | — | 20 | 12 | 1590 |
| | | | — | 50 | 13 | 1350 |
| | | 35 | 1 | 40 | 14 | 1200 |
| | | | 2 | — | 16,5 | 1150 |
| | | 30 | 3 | — | 14,25 | 1175 |
| | | 25 | 4 | — | 12,0 | 1230 |
| | | 20 | 5 | — | 10,0 | 1220 |
| | | 15 | 6 | — | 7,0 | 1470 |
| | | 10 | 7 | — | 4,6 | 1600 |
| | | 5 | 8 | — | 2,25 | 1600 |
| | | 1 | 9 | — | 0,4—0,5 | 1600 |

Wie verhält sich aber die Widerstandszunahme bei Abnahme der elektromotorischen Kraft, wenn vorher das absolute Widerstandsminimum nicht erreicht war?

Versuch 2d. (Curve: Fig. 2d.)

| Name. | Grösse und Ansatzstellen der Elektroden. | Elementenzahl. | Zeit. | | Nadelablenk. gleich Widerstand. | |
|--------|--|----------------|-------|------|---------------------------------|--------|
| | | | Min. | Sec. | (M.-A.) | (Ohm.) |
| Wagner | Querdurchströmung der rechten Schulter. Beide Elektroden von Erb'scher Normalgrösse (10 Qu.-Ctm. Qu.). | 25 | — | 10 | 5 | 4240 |
| | | | — | 40 | 8 | 2360 |
| | | | 1 | — | 8 | 2360 |
| | | 3 | 1 | — | 0,8 | 3250 |
| | | 1 | 2 | — | 0,25 | 3680 |
| | | 35 | 2 | 5 | 10,0 | 2500 |
| | | | 2 | 15 | 13 | 1700 |
| | | | 2 | 55 | 16 | 1210 |
| | | 3 | 3 | — | 1,6 | 1560 |
| | | 1 | 3 | 30 | 0,5 | 1500 |

Wie die Betrachtung der Curve II d. ergibt, lehrt dieser Versuch, dass die Zunahme des Widerstandes bei Abnahme der elektromotorischen Kraft nur dann verhältnissmässig gering ist, wenn zuvor durch

den starken Strom das absolute Widerstandsminimum erreicht war. Ist dies nicht der Fall, so kann bei plötzlicher bedeutender Verminderung der Elementenzahl die dem entsprechende plötzliche Widerstandszunahme sehr erhebliche Werthe erreichen. Wir kommen also zu folgenden Schlussfolgerungen:

3. Wenn die elektromotorische Kraft im Kreise durch Verminderung der Elementenzahl eine erheblich negative Schwankung erfährt, so wird der Hautwiderstand grösser. Die Differenz zwischen dem Hautwiderstand bei starkem Strom und dem bei schwachem Strom ist um so grösser, je weniger durch den starken Strom bereits das absolute Widerstandsminimum erreicht war.

Was nun die absolute Grösse des erreichbaren Widerstandsminimum betrifft, so unterliegt dieselbe zunächst bei verschiedenen Versuchspersonen individuellen Schwankungen. Ebenso zeigen sich bei ein und derselben Versuchsperson Differenzen an den verschiedenen Hautstellen. Natürlich sind die gewonnenen Werthe nur bei Gleichheit der Elektrodengrösse vergleichbar. Bei der gewöhnlichen Versuchsanordnung: grosse Anode (72 Qu.-Ctm. Qu.) auf das Sternum, kleine Kathode (10 oder 12,5 Qu.-Ctm. Qu.) auf eine der Extremitäten schwankt jedoch nach zahlreichen Versuchen das Widerstandsminimum bei verschiedenen Personen nur innerhalb verhältnissmässig enger Grenzen. Der niedrigste Werth, den ich nach genügend langer Einwirkung eines Stromes von 35 El. mehrmals erhalten habe, ist etwa 900 Ohm, meist beträgt er etwa 1100 Ohm, 1500 Ohm überschreitet er selten. Dabei ist jedoch ein Umstand wesentlich, dessen Bedeutung bisher so gut wie gar nicht erkannt ist. Bei verschiedener Grösse der Elektroden, wie sie die jetzt allgemein übliche polare Untersuchungsmethode mit sich bringt, ist der zeitliche Ablauf der Widerstandsverminderung sowie die absolute Grösse des für jede Elementenzahl erreichbaren Widerstandes eine andere, je nachdem die grosse Elektrode Anode oder Kathode ist.

(Die hierher gehörigen Tabellen siehe umseitig.)

Da, wie diese Versuche zeigen (3 a. und 3 b.), die Widerstandsverminderung höhere Werthe erreicht, wenn *ceteris paribus* die Querschnittsgrösse der Anode die der Kathode übertrifft, als im umgekehrten Falle, so muss 4. die Widerstandsverminderung unter der Anode erheblich grösser sein als die unter der Kathode. Dieser von Gaertner aus Versuchen an der Leiche gefolgerte Satz lässt sich also auch am lebenden Menschen als zutreffend erweisen. Weiter folgt aber noch aus unserem Versuche, dass auch die Steilheit des zeitlichen

Verlaufes der Widerstandsverminderung wächst, je mehr die Querschnittsgrösse der Anode die der Kathode übertrifft.

Versuch 3a. (Curve: Fig. 3a.)

| Name. | Grösse und Ansatzstellen der Elektroden. | Elementenzahl. | Zeit. | | Nadelablenk. gleich Widerstand. | |
|-------|--|----------------|-------------|------|---------------------------------|--------|
| | | | Min. | Sec. | (M.-A.) | (Ohm.) |
| Huth | Grosse Anode (72 Qu.-Ctm. Qu.) rechts neben das Sternum; kleine Kathode (3 Qu.-Ctm. Qu.) auf die Rückseite des rechten Vorderarms. | 20 | U. n. Schl. | | 4 | 4240 |
| | | | — | 5 | 5 | 3300 |
| | | | — | 10 | 6 | 2610 |
| | | | 1 | 30 | 6,50 | — |
| | | | 4 | — | 6,75 | — |
| | | | 5 | 55 | 7,0 | 2110 |
| | | | 8 | — | — | — |

Versuch 3b. (Curve: Fig. 3b.)

| Name. | Grösse und Ansatzstellen der Elektroden. | Elementenzahl. | Zeit. | | Nadelablenk. gleich Widerstand. | |
|-------|---|----------------|-------------|------|---------------------------------|--------|
| | | | Min. | Sec. | (M.-A.) | (Ohm.) |
| Huth | Grosse Kathode links neben das Sternum; kleine Anode (3 Qu.-Ctm. Qu.) auf den linken Vorderarm. | 20 | U. n. Schl. | | 1 | 19200 |
| | | | — | 15 | 2 | 9200 |
| | | | — | 55 | 3 | 5860 |
| | | | 2 | 15 | 4 | 4240 |
| | | | 4 | — | 4,50 | — |
| | | | 5 | 20 | 5,0 | 3300 |
| | | | 9 | 20 | 5,25 | 3200 |
| | | | 10 | — | — | — |

Um nun die Wirkung von Stromwendungen auf den Widerstand der Haut festzustellen, war es nach den oben mitgetheilten Erfahrungen über den Einfluss der Elektrorendifferenz selbstverständlich nothwendig, zunächst mit zwei Elektroden von gleicher Grösse zu arbeiten, wenn anders die Wirkung der Stromwendung rein hervortreten sollte. Es handelt sich dabei um die Frage, ob der Hautwiderstand, wenn er durch einen starken Strom einer Richtung sein Minimum erreicht hat, durch Wendung des Stromes noch weitere Veränderungen erfährt und welche.

Versuch 4b. (Curve: Fig. 4b.)

| Name. | Grösse und Ansatzstellen der Elektroden. | Elemen- tenzahl. | Zeit. | | Nadelablenk. gleich Widerstand. | |
|-------|---|---------------------|-------------|------|---------------------------------------|--------|
| | | | Min. | Sec. | (M.-A.) | (Ohm.) |
| Lübke | Unpolarisierbare Elektroden von Erb'scher Nor- malgrösse. An- fangsstellung: Anode auf das Sternum, Katho- de auf die Radial- seite des linken Vorderarms. | 35 | U. n. Schl. | | 8 | 3360 |
| | | | — | 10 | 10 | 2500 |
| | | | — | 30 | 11,50 | — |
| | | | — | 45 | 12 | 1930 |
| | | 30 | 1 | 30 | 13 | 1500 |
| | | | 2 | — | 11,50 | 1700 |
| | | | 3 | — | 11,50 | 1700 |
| | | Wendung | 4 | — | Ausschl. 13 | — |
| | | | — | 10 | Einst. 12 | 1590 |
| | | | 5 | 30 | 12,25 | 1450 |
| | | Wendung | 6 | — | 12,25 | 1450 |
| | | | 8 | — | Ausschl. 16 | — |
| | | | — | 10 | Einst. 16,50 | 900 |
| | | Wendung | — | 20 | fängt an zurück- zuwandern. | — |
| | | | — | 30 | 16,0 | 990 |
| | | | — | 45 | 15,0 | 1100 |
| | | Wendung | 9 | 15 | 14,0 | 1200 |
| | | | 10 | — | 13,50 | 1300 |
| | | | 12 | — | Ausschl. 17 | — |
| | | Wendung | — | 9 | Einst. 16 | 990 |
| | | | — | 25 | fängt an, zurück- zuwandern. | — |
| | | | — | 45 | 15 | 1100 |
| | | Wendung | 13 | — | 14 | 1200 |
| | | | 14 | — | 13,75 | — |
| | | | 15 | — | 14 | 1200 |
| | | Wendung | 16 | — | Ausschl. 17 | — |
| | | | — | 10 | Einst. 17,50 | 800 |
| | | | — | 25 | fängt an, zurück- zuwandern. | — |
| | | Wendung | — | 50 | 16 | 990 |
| | | | 17 | 20 | 15 | 1100 |
| | | | 17 | 50 | 14 | 1200 |
| | | Wendung | 20 | — | Ausschl. 17 | — |
| | | | — | 8 | Einst. 17 | 900 |
| | | | — | 20 | fängt an, zurück- zuwandern. | — |
| | | Wendung | — | 50 | 16 | 990 |
| | | | 21 | 20 | 15 | 1100 |
| | | | 22 | — | 14 | 1200 |
| | | Wendung | 14 | — | Ausschl. 17 | — |
| | | | — | 10 | Einst. 18 | 700 |
| | | | — | 30 | fängt an, zurück- zuwandern. | — |
| | | Wendung | — | 45 | 17 | 810 |
| | | | 25 | 18 | 16 | 990 |
| | | | 25 | 40 | 15 | 1100 |
| | | Wendung | 26 | 20 | 14 | 1200 |

Versuch 4a. (Curve: Fig. 4a.)

| Name. | Grösse und Ansatzstellen der Elektroden. | Elemen- tenzahl. | Zeit. | | Nadelablenk. gleich Widerstand. | | Anmer- kungen. | |
|-------------------|---|---------------------|-----------------|-------|---------------------------------------|------------------|-------------------|--|
| | | | Min. | Sec. | (M.-A.) | (Ohm.) | | |
| Schiefel- bein | Querdurch- strömung des linken Vor- derarms mit unpolarisirba- ren Elektro- den von Erb's Normalgrösse (10 Qu.-Ctm. Qu.) | 20 | U. n. | Schl. | 3 | 5860 | | |
| | | | — | 30 | 4 | 4240 | | |
| | | | 1 | — | 5 | 3300 | | |
| | | | 2 | — | 5 | 3300 | | |
| | | 25 | U. n. | Schl. | 6,50 | 3100 | | |
| | | | 2 | 30 | 7 | 2750 | | |
| | | | 3 | — | 7 | 2750 | | |
| | | | 4 | — | 5,50 | 3100 | | |
| | | 20 | 5 | — | 5,50 | 3100 | | |
| | | | Wendung | 6 | — | Nadelausschlag 8 | | |
| | | | | 6 | 20 | Einst. 6,75 2110 | | |
| | | | | 7 | — | 6,25 — | | |
| | | 8 | | — | 6,0 2610 | | | |
| | | Wendung | 9 | — | — | | | |
| | | | 10 | — | Nadelausschl. 7,50 | | | |
| | | | — | — | Einst. 7,25 1790 | | | |
| | | | 10 | 30 | Beginnt zurück- zu wandern. | | | |
| | | Wendung | 11 | — | 7,0 | 2110 | | |
| | | | 11 | 30 | 6,50 | — | | |
| | | | 12 | — | 6,25 | — | | |
| | | | 13 | — | 6,0 | 2610 | | |
| Wendung | 14 | — | Ausschl. 8,75 | | | | | |
| | 14 | 20 | Einst. 8 1790 | | | | | |
| | 15 | — | 7 | 2110 | | | | |
| | 15 | 30 | 6,50 | — | | | | |
| Wendung | 16 | — | 6,0 | 2610 | | | | |
| | 18 | — | Ausschl. 8,50 | | | | | |
| | 18 | 30 | Einst. 8,0 1790 | | | | | |
| | 19 | 30 | 7,0 | 2110 | | | | |
| | 21 | — | 6,0 | 2610 | | | | |
| | | | | | | | | |

Diese beiden Versuche unterscheiden sich dadurch, dass in dem ersten die Wendungen vorgenommen wurden, nachdem das absolute Widerstandsminimum erreicht war, während in dem zweiten nur ein relatives Widerstandsminimum (das für einen Strom von 20 Elementen) den Ausgangspunkt bildete. Dem entsprechend bleiben die absoluten Werthe der Widerstandsabnahme im zweiten Falle in allen Punkten hinter denen des ersten Versuches zurück. Gleichwohl ist der allgemeine Gang der Widerstandsveränderungen, wie ein Blick auf die Curven lehrt, in beiden Fällen genau derselbe. Das Resultat dieser und übereinstimmender weiterer Versuche lässt sich folgendermassen zusammenfassen:

5. Wenn bei Anwendung gleich grosser Elektroden durch den Strom einer Richtung das Widerstandsminimum für diesen Strom erreicht ist, so bringt jede Wendung des Stromes, sowohl die primäre, als die Wendung zurück zur Anfangsstellung in gleicher Weise eine Widerstandsverminderung hervor, die jedoch nach wenigen Secunden einem Wiederanwachsen des Widerstandes Platz zu machen beginnt. Der neue definitive Widerstand wird etwa in 1 bis 1½ Minuten nach der Wendung erreicht. Durch die erste Wendung wird der definitive Widerstand absolut herabgesetzt; durch die folgenden Wendungen kann eine weitere Herabsetzung des definitiven Widerstandes nicht mehr erreicht werden.

Wie auf Grund unseres 4. Satzes von vornherein sich annehmen lässt, erleidet das letztformulierte Gesetz der Widerstandsschwankungen bei Wendungen des Stromes eine wesentliche Aenderung, wenn Elektroden von sehr verschieden grossem Querschnitt zur Verwendung kommen.

Versuch 5a. (Curve: Fig. 5a.)

| Name. | Grösse und Ansatzstellen der Elektroden. | Elementenzahl. | Zeit. | | Nadelablenk. gleich Widerstand. | |
|-------|--|----------------|-------|------|--|--------|
| | | | Min. | Sec. | (M.-A.) | (Ohm.) |
| Lübke | Grosse Anode (72 Qu.-Ctm. Qu.) auf das Sternum; kleine Kathode (0,8 Qu.-Ctm. Qu.) auf den Vorderarm. | 30 | — | 30 | 5,0 | 5000 |
| | | — | 1 | — | 6,0 | 4130 |
| | | 25 | 3 | — | 5,20 | 4200 |
| | | Wendung | 5 | — | Nadelausschlag bis 8,0 | |
| | | — | — | — | Einstellung 4 gl. 5375, wandert sofort zurück. | |
| | | — | 5 | 30 | 3,0 | 7460 |
| | | Wendung | 8 | — | Nadelausschl. 5,50 | |
| | | — | — | — | Einst. 6,0 3330 | |
| | | Wendung | 11 | — | Nadelausschlag bis 8,0 | |
| | | — | — | — | Einst. 6,50 3000 | |
| | | — | 12 | — | 4,50 | 4790 |
| | | Wendung | 12 | 30 | 4,0 | 5375 |
| | | — | 15 | — | Ausschl. bis 6,0 | |
| | | — | — | — | Einst. 6,5 3000 | |
| | | — | — | — | bleibt auf 6,5 stehen. | |

Versuch 5b. (Curve: Fig. 5b.)

| Name. | Grösse und Ansatzstellen der Elektroden. | Elementenzahl. | Zeit. | | Nadelablenk. gleich Widerstand. | | Anmerkungen. |
|-----------|--|----------------|-------|------|--|--------|-------------------------------------|
| | | | Min. | Sec. | (M.-A.) | (Ohm.) | |
| Schuhmann | Grosse Kathode (72 Qu.-Ctm. Qu.) auf das Sternum, kleine Anode (0,8 Qu.-Ctm. Qu.) auf den Vorderarm. | 30 Wendung | — | — | 5,0 | 5000 | nach genügend langer Durchströmung. |
| | | | — | — | Grosser Nadelauschlag. | | |
| | | | — | — | Einstellung 11,0 gleich 1790, bleibt auf 11,0 gl. 1790 stehen. | | |
| | | Wendung | — | — | Ausschl. bis 12,0 Nadel wandert sehr schnell zurück. | | |
| | | | — | 30 | 6,0 | 4130 | |
| | | | 1 | — | 5,50 | — | |
| | | | 1 | 30 | 5,0 | 5000 | |
| | | | — | — | bleibt auf 5,0 gl. 5000 stehen. | | |

Dem Zweck dieser beiden Versuche entsprechend, wurde die Querschnittsdifferenz der beiden Elektroden möglichst gross gewählt. Während als indifferente Elektrode die gewöhnliche grosse von 72 Qu.-Ctm. Qu. zur Verwendung kam, hatte die differente nur einen Durchmesser von 1 Ctm. (= 0,8 Qu.-Ctm. Qu.). Trotz dieses allerdings recht erheblichen Unterschiedes überraschen die nach diesen Versuchen construirten Curven durch die colossalen Widerstandsschwankungen, die durch Stromwendungen herbeigeführt werden, und durch die von den Curven der vorigen Versuche gänzlich abweichende Gestalt. Um das Gesetzmässige derselben leicht verständlich ausdrücken zu können, soll im Folgenden die Stromwendung stets mit ausschliesslicher Beziehung auf die kleine (differente) Elektrode bezeichnet werden. „Wendung von der Anode auf die Kathode“ bedeutet also, dass die kleine Elektrode, die bisher Anode war, durch die Wendung zur Kathode wird und umgekehrt.

Unsere Versuche lassen nun folgenden allgemeinen Schluss zu:

5. Ist bei Verwendung der kleinen Elektrode als Kathode das Minimum des Widerstandes für diese Stromrichtung erreicht, so bringt eine Wendung auf die Anode eine sehr schnell (in wenigen Secunden) verlaufende Widerstandsverminderung hervor, die alsbald einer beträcht-

lichen Widerstandsvermehrung Platz macht. Die nun folgende Wendung auf die Kathode bringt eine definitive Widerstandsverminderung hervor, während durch erneute Wendung auf die Anode der Widerstand wieder einen grösseren definitiven Werth erreicht, als er vor der ersten Wendung hatte und so fort.

Dies Resultat ist theoretisch und practisch von recht einschneidender Bedeutung. Bisher war über den Einfluss der Stromwendungen auf die Widerstandsveränderungen der Haut wenig Sicheres bekannt. Die meisten Autoren begnügen sich, wie Erb, mit der allgemeinen Bemerkung, dass bei jeder Stromwendung der Widerstand abnehme. Die einzige genauere Angabe findet sich bei E. Remak, der schon vor 10 Jahren fand, „dass der Widerstand durch einen gleichgerichteten Strom für diesen stetig abnimmt, diese Abnahme alsdann noch durch Schliessung des entgegengesetzten Stromes vermehrt werden kann, letztere Abnahme jedoch bald wieder einer Zunahme Platz macht.“ Das ist, wie die Curve 4a. und 4b. zeigen, vollkommen richtig, aber nur bei Anwendung gleich grosser Elektroden. Für die gewöhnliche Versuchsanordnung bei Erregbarkeitsprüfungen nach der polaren Methode, d. h. bei Anwendung verschieden grosser Elektroden, verhält sich die Sache jedoch anders. Hier kann, wie wir sahen, eine Stromwendung eine unter Umständen recht erhebliche Widerstandsvermehrung zur Folge haben, der eine allerdings ausserordentlich rasch verlaufende Widerstandsabnahme vorausging. Unsere Curven lehren ferner, dass die unter den angegebenen, practisch so häufig realisirten Bedingungen auftretenden grossen Widerstandsschwankungen so schnell verlaufen können, dass selbst Stintzing's Ideal⁸⁾, das Galvanometer von Edelmann, bei der üblichen Untersuchungs- und Ablesungsmethode vor Fehlern kaum wird schützen können. Wie weit man beispielsweise diesen Thatsachen gegenüber die Bedeutung der Voltaschen Alternativen noch in rein physiologischen Erregbarkeitsverhältnissen wird suchen dürfen, diese Frage will ich hier nur andeuten.

Soweit gehen die von mir ermittelten Thatsachen. Es handelt sich, wie wir gesehen haben, um durchaus gesetzmässig ablaufende Vorgänge, deren besonderer Charakter in jedem einzelnen Falle von der jeweils gewählten Combination bestimmter Versuchsbedingungen abhängt und bei Kenntniss derselben sich voraussagen lässt. Diese Factoren, deren Variirung den Gang der Widerstandsveränderungen und deren absolute Werthe bestimmt, sind: 1) die Grösse der im Kreise herrschenden elektromotorischen Kraft; 2) die absolute Querschnittsgrösse der unpolarisirbaren Elektroden und, ein besonders

wichtiger Factor, deren Grössenverhältniss untereinander; 3) bei verschiedenen grossen Elektroden die Stromrichtung; 4) in jedem Falle die Stromwendung; 5) die Auswahl der Hautstellen, die als Ein- und Austrittsstelle des Stromes dienen. Nur dadurch, dass keines dieser Variablen unberücksichtigt blieb und dieselben in den verschiedensten möglichen Combinationen als Versuchsbedingungen eingeführt wurden, konnte es gelingen, die „Gesetze der Widerstandsveränderungen der menschlichen Haut durch den constanten Strom“ rein und erschöpfend zur Darstellung zu bringen.

Wenn ich nunmehr zur Erklärung der so gewonnenen Gesetze übergehe, so bin ich mir wohl bewusst, dass ich mich damit von dem festen Gebiete der Thatsachen auf das schwankende und unsichere der Hypothese begeben. Wenn ich trotzdem nicht anstehe, auch diesen Theil meiner Untersuchungen für einigermassen fest begründet und abgeschlossen zu halten, so hat das folgende Gründe: Einmal ist die Aussicht, die genügende Erklärung für einen complexen Naturvorgang zu finden, von vornherein um so grösser, je vollständiger es gelungen ist, das Gesetzmässige desselben unter genau angebbaren Bedingungen rein darzustellen. Dann aber wird, wenn dies auf rein heuristischem Wege geschehen ist, das empirische Gesetz zur Theorie, d. h. der Naturvorgang darf als vollkommen erklärt gelten, sobald es gelingt, ihn vollständig aus bereits anderweitig bewiesenen allgemeineren Gesetzen deductiv abzuleiten. Und das Letztere glaube ich in unserem Falle leisten zu können.

Schon die Versuche von Gaertner an der Leiche haben es im Allgemeinen ausser Zweifel gestellt, dass die Widerstandsverminderung der Epidermis durch den Strom weniger, wie man früher glaubte, durch physiologische Wirkungen desselben (Erweiterung der Blutgefässe, Anregung der Schweisssecretion etc.), als der Hauptsache nach durch die rein physikalische „kataphorische“ Wirkung des Stromes hervorgebracht wird. Im Anschluss an diese Auffassung Gaertner's lassen sich nun alle am lebenden Menschen auftretenden Widerstandsveränderungen durch den Strom, auch die unter gewissen Bedingungen, wie wir sahen, gesetzmässig auftretenden Widerstandserhöhungen aus den von Munk^{*)} physikalisch eingehend studirten und vollständig dargestellten Gesetzen der kataphorischen Wirkung des Stromes in vollkommen befriedigender Weise ableiten.

Die angenommene kataphorische Wirkung des Stromes besteht bekanntlich darin, dass unter der Anode durch den Strom Aussenflüssigkeit (bei unseren Versuchen gut leitende Kochsalzlösung) in die Poren der Epidermis, deren Enge nach Munk für die kataphorische

Wirkung des Stromes recht günstig ist, eingeführt wird. Die ursprünglich trockene und als solche so gut wie gar nicht leitende Hornschicht wird in Folge dessen unter der Anode um so leitungsfähiger, je besser sie mechanisch mit Aussenflüssigkeit durchtränkt wird. Gleichzeitig findet unter der Kathode wahrscheinlich ebenfalls eine, aber sehr viel geringere Widerstandsherabsetzung dadurch statt, dass ebenfalls in der Richtung des Stromes Gewebsflüssigkeit von innen her in die Epidermis eindringt. Dass diese Widerstandsverminderung unter der Kathode viel geringer ist, als die unter der Anode, geht, wie wir sahen, daraus hervor, dass die Gesamtwiderstandsverminderung erheblich grösser ausfällt, wenn die Anode die Kathode an Grösse übertrifft, als im umgekehrten Falle. Danach kommt bei gleichbleibender Stromrichtung zunächst wesentlich der Vorgang unter der Anode in Betracht. In unseren ersten Versuchen wurde die Anode relativ gross gewählt, weil das mit dem *Modus procedendi* bei Erregbarkeitsprüfungen nach der polaren Methode übereinstimmt. Es war das aber auch, wie wir sehen, besonders günstig, um die kataphorische Widerstandsverminderung bei gleichbleibender Stromrichtung besonders deutlich hervortreten zu lassen. Nach den von Wiedemann¹⁰⁾ aufgestellten Sätzen der kataphorischen Wirkung des Stromes ist nun „die in der Zeiteinheit durch eine poröse Wand fortgeführte Flüssigkeitsmenge der Intensität des angewandten Stromes direct proportional.“ Da also die Menge der in der Zeiteinheit in die Epidermis eingeführten Aussenflüssigkeit mit der elektromotorischen Kraft im Kreise wächst, so muss die Leitungsfähigkeit der Haut mit der Zahl der Elemente zunehmen. Nun nimmt aber, wie Munk gezeigt hat, wenn ein feuchter poröser Körper (die Epidermis unter der Anode) zwischen ungleichartigen Aussenflüssigkeiten (Kochsalzlösung und Gewebsflüssigkeit) durchströmt wird, die Geschwindigkeit der Flüssigkeitsfortführung regelmässig mit der Zeit ab, so dass, wenn einige Zeit nach der Schliessung des Stromes verflossen ist, nur noch eine sehr geringe Menge Aussenflüssigkeit von der Anode her in den Körper eintritt und schliesslich das Eintreten ganz ein Ende nimmt. Hieraus folgt, dass die Widerstandsabnahme zuerst schnell, dann immer langsamer wächst und schliesslich für jede gegebene Elementenzahl einen grössten Werth erreicht, der nicht weiter überschritten werden kann (das relative Widerstandsminimum). Aber auch bei stetiger Vermehrung der elektromotorischen Kräfte im Kreise muss schliesslich eine absolute Grenze der Widerstandsverminderung erreicht werden, dann nämlich, wenn die Epidermis unter der Anode

ihrer Aufnahmefähigkeit entsprechend vollständig mit Aussenflüssigkeit durchtränkt ist (absolutes Widerstandsminimum).

Während diese Vorgänge unter der Anode sich abspielen, ist die Haut unter der Kathode relativ leitungsunfähig geblieben. Wird nunmehr die Stromrichtung plötzlich geändert, so wird die bisher über schlechter leitender Haut stehende Kathode zur Anode. Der kataphorische Flüssigkeitsstrom dringt mit Macht unter der neuen Anode in die Haut. Die Folge ist eine schnell eintretende starke Verminderung des Gesamtwiderstandes. Aber damit ist die Wirkung der Stromwendung nicht erledigt; denn gleichzeitig beginnt auch unter der neuen Kathode eine neue Flüssigkeitsströmung. Die von vorher die Poren der Epidermis erfüllende Aussenflüssigkeit wird unter der Kathode durch den kataphorischen Strom nach aussen geführt. Die neue Kathode saugt gewissermassen wie ein Schröpfkopf die gut durchfeuchtete Hautstelle wieder aus. Da demnach in Folge der Stromwendung die Haut unter der neuen Kathode an Leitungsfähigkeit einbüsst, was sie unter der neuen Anode gewinnt, so sollte man erwarten, dass bei gleich grossen Elektroden diese beiden Factoren sich gegenseitig compensiren müssten, die Leitungsfähigkeit durch die Wendung also keine Aenderung erfahren könnte, was der Erfahrung widerspricht. Aber auch hier kommen uns die physikalischen Erfahrungen Munk's zu Hülfe. Denn wenn auch, sagt er, gleichzeitig am anderen (der Anode entgegengesetzten) Ende vorher eingedrungene Aussenflüssigkeit den Körper wieder verlässt, so ist doch die eintretende Menge Aussenflüssigkeit immer beträchtlich grösser als die austretende. Daraus folgt, dass in der That, wie die Erfahrung lehrt, die Wendung von einer Widerstandsverminderung gefolgt sein muss. Aber während — zunächst immer gleich grosse Elektroden vorausgesetzt — der kataphorische Flüssigkeitsstrom unter der neuen Anode zuerst schnell anwachsend bald wieder nachlässt und allmählig aufhört, die Widerstandsverminderung also bald ihre Grenze erreicht, dauert die aussaugende, also widerstandsvermehrnde Wirkung des kataphorischen Stromes unter der neuen Kathode, die an sich gering ist, fort. Es muss also bald ein Punkt eintreten, wo die anfängliche Verminderung des Gesamtwiderstandes in ihr Gegentheil umschlägt. Der Widerstand wächst wieder, bis auch unter der neuen Kathode ein stationärer Zustand eintritt. So entsteht jenes in den Curven 4a. und 4b. dargestellte Spiel, das schon Munk völlig übereinstimmend mit unseren Ergebnissen folgendermassen geschildert hat: „Zwar führte auch ferner noch jede Umkehrung der Stromrichtung eine Vergrösserung der Stromintensität

herbei; aber immer begann auch wieder die Stromintensität abzunehmen, so dass diese nunmehr in der Zwischenzeit zweier Umkehrungen stets dieselben Veränderungen erfuhr und im Durchschnitt auf der angegebenen Grösse verharrte.“

Was jedoch Munk noch nicht berücksichtigt hat, ist der Umstand, dass dieses Spiel bei Verwendung verschieden grosser Elektroden die in den Curven 5a. und 5b. wiedergegebenen auffallenden Veränderungen erleidet. Aber auch diese lassen sich aus den kataphorischen Wirkungen des Stromes durchaus ungezwungen ableiten. Gehen wir von dem Falle aus, dass das Widerstandsminimum für die Combination: grosse Anode, kleine Kathode, erreicht sei. Bei der Wendung bricht der kataphorische Flüssigkeitsstrom mit voller Macht unter der kleinen neuen Anode in die Haut ein. Die Folge ist eine Widerstandsherabsetzung an dieser Stelle, die jedoch einerseits schnell ihr Maximum erreicht, weil die kleine Hautstelle bald vollkommen durchtränkt ist, die andererseits auf den Gesamtwiderstand nur verhältnissmässig wenig Einfluss hat, weil in Bezug auf diesen nach

der Formel $w = \frac{Q}{I}$ die Widerstandsveränderungen unter der kleinen Elektrode gegen die unter der grossen Elektrode um so mehr zurücktreten, je grösser der Unterschied in der Elektrodengrösse ist. Die grosse Elektrode ist aber Kathode, also Sitz allmäliger Vergrösserung des Widerstandes geworden. Die Folge muss demnach nach sehr schnell vorübergehender Verminderung eine beträchtliche definitive Vermehrung des Gesamtwiderstandes sein, während eine neue Wendung zurück zur Anfangsstellung umgekehrt eine bleibende (nicht, wie bei gleich grossen Elektroden, eine vorübergehende) Verminderung des Widerstandes bewirken muss, weil wiederum die Widerstandsvermehrung unter der nunmehrigen kleinen Kathode nicht zur Geltung kommt gegenüber der Widerstandsverminderung unter der neuen grossen Anode.

Wir können uns also in Betreff der Stromwendungen dahin resumiren, dass bei gleich grossen Elektroden die anfängliche Widerstandsabnahme und die darauf folgende Widerstandszunahme bedingt sind durch den verschiedenen zeitlichen Verlauf der Widerstandsveränderungen unter den beiden Elektroden. Die Widerstandsabnahme unter der Anode verläuft bedeutend schneller, als die nachhinkende Widerstandszunahme unter der Kathode. Bei sehr verschieden grossen Elektroden tritt dieser Factor zurück gegenüber dem Umstand, dass für den Gesamtwiderstand der Haut die Leitungsverhältnisse unter der kleinen Elektrode um so mehr gegenüber denen unter der grossen

Elektrode verschwinden als diese jene an Grösse übertrifft. Wird die grosse Elektrode durch die Wendung Kathode, so muss eine definitive Widerstandsvermehrung, wird sie Anode — eine bleibende Widerstandsverminderung die Folge sein.

Ehe ich diesen Gegenstand verlasse, kann ich nicht umhin, noch in Kürze von dem gewonnenen Standpunkt aus einen kritischen Rückblick auf die Ergebnisse früherer Messungen zu werfen. Sind die von mir gewonnenen Resultate und ihre Erklärung richtig, so dürfen wir von den nun gewonnenen Gesichtspunkten aus auch die Mittel zur Erklärung der bestehenden auffallenden Widersprüche erwarten.

Da der zeitliche Ablauf der Widerstandsveränderungen durch den constanten Strom und der unter verschiedenen Umständen so wechselnde Gang derselben bisher überhaupt wenig beobachtet und beachtet ist, so beziehen sich die bestehenden Widersprüche der bisherigen Messungen untereinander und mit den unsrigen hauptsächlich auf die absoluten Widerstandswerthe, die von den einzelnen Experimentatoren gefunden wurden. Dabei sehen wir von den sogenannten Anfangswiderständen ganz ab, da diese in der vorstehenden Arbeit überhaupt nicht gemessen sind. Es handelt sich vielmehr um die Erklärung der äusserst auffallenden Unterschiede in den Angaben über die absolute Grösse des modificirten Hautwiderstandes, die von denjenigen neueren Experimentatoren, die mit der Brückenmethode arbeiteten, durchweg sehr viel höher gefunden wurde, als die älteren Messungen und meine eigenen ergeben. Am nächsten kommen meinen Zahlen die Angaben von Tschirjew und de Wattewille¹¹⁾, die — allerdings ohne Angabe der Methode — eine Widerstandsabnahme bis auf 2000 Ohm beschreiben. Rosenthal¹²⁾ dagegen fand nach der Brückenmethode mit unpolarisirbaren Elektroden von 28 Mm. Durchmesser Widerstände von 8000—24000 S. E. Diese Zahlen sind allerdings für uns werthlos, da weder über die Stärke der Maasskette noch über die Dauer der Durchströmung irgendwelche Angaben gemacht sind, wir also nicht wissen können, ob die Werthe auf Anfangswiderstände oder auf modificirte Widerstände zu beziehen sind. Dass Rosenthal von der Grösse und der Gesetzmässigkeit der Widerstandsveränderungen durch den Strom nur erst sehr unvollkommene Vorstellungen sich gebildet hat, geht aus folgenden beiden Sätzen hervor¹³⁾. „Auch wirkliche Veränderungen des Widerstandes kommen als Folgen des Stromdurchgangs zu Stande. Häufig nimmt der Widerstand ab und diese Abnahme compensirt ganz oder theilweise die durch die Polarisation bedingte Stromschwächung“!

Präcisere, aber von den unsrigen ebenso auffallend abweichende

Angaben finden wir bei Gaertner und bei Jolly. Ein einziges Mal giebt Gaertner nach genügend langer Anwendung von 20 Elementen als Maasskette und vielfachen Wendungen des Stromes 4920 S. E. als niedrigsten Werth an, eine Zahl, die den unsrigen wenigstens nahe kommt, während bei Versuchen, die besonders auf die Grösse der Widerstandsabnahme durch den Strom beim lebenden Menschen gerichtet sind (Versuch IV. S. 538), 10960 S. E. den niedrigsten Grenzwert bildet, der nach minutenlanger Durchströmung von 12 Elementen Stöhrer erreicht wird.

Bei Jolly stehen die Zahlen des modificirten Widerstandes mit den unsrigen in einem noch viel schreienderem Widerspruch. Jolly hat eine besondere Versuchsreihe in der Absicht angestellt, zu untersuchen, ob die Widerstandsabnahme an allen Hautstellen gleichmässig stattfindet, eine, wie er meint, bisher allgemein gemachte Voraussetzung, die er als irrig zurückweist. Namentlich findet er, dass Hohlhandfläche und Fusssohle sich abweichend von allen anderen Hautstellen verhalten. Während dieselben von vornherein ein besseres elektrisches Leitungsvermögen als andere Hautstellen besitzen, ist die Herabsetzung des Widerstandes durch den Strom an diesen Stellen ausserordentlich viel geringer als anderswo. Diesen letzteren Punkt kann ich nebenbei durch eigene Versuche bestätigen, die gleichzeitig als eine weitere Illustration von dem Einfluss der Stromrichtung bei verschiedenen grossen Elektroden auf die Widerstandsherabsetzung hier eine kurze Erwähnung finden mögen. Bei folgender Anordnung: Grosse Anode (72 Qu.-Ctm. Qu.) auf das Sternum, kleine Kathode (10 Qu.-Ctm. Qu.) auf die Fusssohle unter den Hacken wurde nach 11 minutenlanger Durchleitung eines Stromes von ursprünglich 15 Elementen, der bis auf 55 Elemente gesteigert wurde, das Widerstandsminimum mit 2240 Ohm erreicht. Wurde dagegen bei demselben Individuum auf der anderen Körperhälfte die grosse Kathode auf das Sternum, die kleine Anode auf die Fusssohle gesetzt, so betrug bei im übrigen derselben Versuchsanordnung (allmähliche Steigerung der elektromotorischen Kraft im Kreise bis schliesslich auf 55 Elemente) das Widerstandsminimum noch 6530 Ohm. Der Grund des Unterschiedes ist klar. Die Widerstandsherabsetzung findet wesentlich unter der Anode statt. Beim zweiten Versuch ist die Widerstandsherabsetzung eine geringere als im ersten, weil bei jenem die Anode die kleinere Elektrode war, bei diesem die Kathode. Dies allein kann aber die grosse Differenz der beiden Widerstandsminima nicht erklären. Es kommt offenbar hinzu, dass die Widerstandsherabsetzung der Haut der Fusssohle *ceteris paribus* geringer ist als die der Haut

über dem Sternum. Zum Beweis stellen wir folgende zwei Versuche an. Grosse Kathode auf das Sternum, kleine Anode einmal auf die Fusssohle, das andere Mal auf den Oberschenkel. Widerstandsminimum bei 35 Elementen im ersten Falle 9000 Ohm, im anderen unter sonst genau denselben Bedingungen 1030 Ohm.

Da wir aber, wie schon Erb hervorgehoben, praktisch selten oder nie in die Lage kommen, zu elektrodiagnostischen Zwecken unsere Elektroden auf Handteller oder Fusssohle aufzusetzen, habe ich von einer weiteren Verfolgung dieses Gegenstandes abgesehen. Meine Messungen sind sämmtlich an Hautstellen gewonnen, die häufig dem Strome zum Zweck von Erregbarkeitsprüfungen ausgesetzt sind. Von solchen Stellen bringt Jolly Messungen beispielsweise an Vorderarm und Unterschenkel. An den Vorderarmen findet er nach Durchleitung eines Stromes von 50 S. Elem. 1 minutelang einen Widerstand von 13000 S. E. (= 12220 Ohm)! in einem anderen Falle mit Durchleitung eines Stromes von 40 S. Elem. durch beide Unterschenkel 1 minutelang sogar noch 17000 S. E. (etwas über 16000 Ohm)! Dagegen lässt ein Blick auf unsere Curven erkennen, dass an den genannten Hautstellen schon bei Anwendung von 30—35 Elementen das Widerstandsminimum bis unter 1500 Ohm sinken kann und 5—6000 Ohm unter normalen Verhältnissen wohl niemals übersteigt. Es ist keine Frage, dass bei verschiedenen Individuen dieselben Hautstellen *ceteris paribus* recht verschiedene Werthe des modificirten Widerstandes darbieten; aber nach meinen Versuchen bewegen sich dieselben für die elektromotorische Kraft von 30—35 Elementen durchaus in den angegebenen Grenzen. Die von Jolly gefundenen Zahlen sind danach zunächst völlig unverständlich. Nun könnte man vielleicht an eine Differenz in der Elektrodengrösse denken. Jolly hat Elektroden von 12,70 Qu.-Ctm. Querschnitt angewandt. Ich habe seine Versuche mit zwei Elektroden von Erb'scher Normalgrösse (10 Qu.-Ctm.) wiederholt, und bin zu den alten Resultaten gekommen. Ebenso ist die Polarisation an den Elektroden ausgeschlossen. Hier liegt also die Ursache der auffallenden Unterschiede nicht. Sollte dieselbe doch in der Methode der Widerstandsmessung liegen? Sollte doch die „allein zuverlässige und einwandsfreie“ Brückenmethode für unsere vorliegenden Untersuchungszwecke eine nicht vermuthete und geahnte Fehlerquelle in sich bergen? Wir werden sehen. Zunächst ergibt die einfache, unbefangene Vergleichung der von Jolly gelieferten Zahlenwerthe des modificirten Widerstandes, dass in denselben in der That irgendwo ein Fehler stecken muss. Jolly hat während der Einwirkung des modificirenden Stromes, genau wie es bei

unseren Versuchen geschah, an einem absoluten Hirschmann'schen Galvanometer die jeweils erreichten Stromstärken abgelesen und notirt. Nach einer Minute wurde dann die Widerstandsmessung mit Hilfe der Brücke vorgenommen. In den beiden Messungen nun, deren absolute Endwerthe bereits oben wiedergegeben sind, finden wir notirt:

(Versuch 1a.) 50 Elemente. Grösste Nadelablenkung 7 M.-A.

Danach $W = 13000$ S. E.

(Versuch 3a.) 40 Elemente. Grösste Nadelablenkung 7 M.-A.

Danach $W = 17000$ S. E.

In beiden Versuchen gab also das Galvanometer $\frac{7}{1000}$ Ampère Stromstärke an. Diese Stromstärke resultirt im zweiten Versuch aus der elektromotorischen Kraft von 40 Elementen und dem Widerstande von 17000 S. E., ist also $= \frac{40 E}{17000 W}$, wenn wir den Widerstand

der Elemente und des Galvanometers als zu klein vernachlässigen. Aber auch im ersten Versuch bei der elektromotorischen Kraft von 50 Elementen zeigt das Galvanometer $\frac{7}{1000}$ Ampère an. Da nun der

Bruch $\frac{E}{W}$ bei Vergrösserung von E nur dann denselben Werth (in unserem Falle 7 M.-A.) behalten kann, wenn W in demselben Sinne wächst, so muss in Versuch 1 der gefundene Widerstand grösser sein als in Versuch 2. Er ist aber erheblich kleiner angegeben. So lange das Ohm'sche Gesetz seine Gültigkeit hat, stehen die beiden Versuchsergebnisse in unlösbarem Widerspruch. Eine der Messungen muss nach Jolly's eigenen Angaben falsch sein. Thatsächlich sind sie es beide. Denn auch die Grösse des Fehlers der Widerstandsmessung in beiden Fällen (sowie in den übrigen hier nicht weiter berücksichtigten dieser Versuchsreihe Jolly's), lässt sich aus den eigenen Angaben Jolly's ohne weiteres berechnen. Unter der im Ganzen und Grossen sicher zutreffenden Annahme, dass die elektromotorische Kraft der von Jolly benutzten S. Elemente $= 1$ Volt, ihr innerer Widerstand $= 15$ Ohm, der Widerstand des absoluten Galvanometers $= 500$ Ohm betrug, folgt aus der Ablesung des Versuchs I.: $\frac{7}{1000} = \frac{50}{50 \cdot 15 + 500 + W}$; also $W = 5892$ Ohm; also etwa 6000 S. E. und nicht 13000. Aus den Zahlen des zweiten Versuches folgt ebenso $W = 4600$ Ohm; also ungefähr 5000 S. E. und

nicht 17000. Berücksichtigen wir nun noch, dass Jolly den modificirenden Strom nur eine Minute geschlossen hielt, dass also nach unseren Erfahrungen bei längerer Durchströmung der Widerstand sicher noch weiter gesunken wäre, so ergibt sich eine so weitgehende Uebereinstimmung mit den von mir gefundenen Werthen, als bei derartigen Versuchen billigerweise erwartet und verlangt werden kann.

Wie kommt es nun, dass, während die Berechnung nach Jolly's eigenen Angaben richtige Werthe liefert, die von Jolly nach Einwirkung des modificirenden Stromes vorgenommene Messung nach der Brückenmethode so auffallend grosse Fehler ergibt. An sich ist, wie ich bereits Eingangs hervor, die Brückenmethode selbstverständlich einwandsfrei und liefert sehr genaue Werthe. Der Fehler liegt in der Anwendung auf den vorliegenden Fall. Gärtner, der, wie ich gleich zeigen werde, denselben Fehler begeht, hätte das aus seinen eigenen Versuchen bereits abstrahiren können. Aus seinem II. Versuch (S. 537) folgert er: „Wurde die Kette, ohne unterbrochen zu werden, von 20 Elementen auf 5 Elemente abgeschwächt, so stieg auch wieder der Widerstand . . .“

Das genauere Gesetz des Wiederaanwachsens des Widerstandes, wenn auf einen starken Strom unmittelbar ein schwacher folgt, haben wir oben unter No. 3 formulirt. Es folgt aus demselben, dass die fast momentan auftretende Differenz zwischen dem Hautwiderstande bei starkem Strom und dem bei schwachem Strom um so grösser ist, je weniger durch den starken Strom bereits das absolute Widerstandsminimum erreicht war. In den den Curven 2c. und 2d. zu Grunde liegenden Versuchen, aus denen das obige Gesetz abstrahirt wurde, ist auch die grösste Widerstandszunahme nach Abschwächung des Stromes von 25 auf 3 und 1 Element, nämlich von 2360 Ohm auf 3250 und auf 3680 Ohm noch eine verhältnissmässig geringe, weil wenig mehr zum Widerstandsminimum fehlte. Weitere nach dieser Richtung angestellte Versuche haben mir nun ergeben, dass in der That innerhalb sehr weiter Grenzen das Gesetz seine Gültigkeit behält, d. h. dass wirklich, je weiter das relative Widerstandsminimum bei einer gegebenen elektromotorischen Kraft von dem absoluten noch entfernt ist, um so grösser die Widerstandszunahme bei Herabminderung der Elementenzahl ausfällt. Betrug beispielsweise das relative Widerstandsminimum bei 30 Elementen noch 5000 Ohm, so stieg der Widerstand nach Herabminderung der Elementenzahl auf 3 unmittelbar auf 7000, bei einem Element auf 9500 Ohm. Aus alledem folgt als allgemeine Regel, dass man das Widerstandsminimum für eine gegebene elektromotorische Kraft messen

muss, so lange eben diese elektromotorische Kraft im Kreise herrscht.

Das haben aber, verleitet durch die Anwendung der Brückenmethode, weder Gärtner noch Jolly gethan. Ihre Masskette, mit der sie den durch einen starken Strom modificirten Widerstand messen wollten, betrug bei Gärtner meist 3, bei Jolly nur 1 Elem. Aber auch diese kamen nicht voll zur Geltung, da wegen der Nebenschliessung bei der Brückenmethode nur ein Bruchtheil des von ihnen gelieferten Stromes durch den menschlichen Körper ging. Nur einmal (Versuch II.) macht sich Gärtner von diesem Fehler frei, indem er ohne Stromunterbrechung die Zahl der Elemente in der Masskette selbst vermehrt und vermindert. Es ist dies denn auch jener einzige bereits erwähnte Fall, in dem Gärtner einen modificirten L.-W. unter 5000 S. E. fand. Dass auch in diesem Falle der W. immer noch nahezu 5000 S. E. betrug, liegt darin, dass das absolute Widerstandsminimum eben nicht erreicht war. Gärtner wandte in diesem Falle nur 20 S. Elemente an, deren elektromotorische Kraft wiederum wegen der nach Gärtner nur 2000 S. E. betragenden Nebenschliessung noch nicht zur Hälfte für die Widerstandsherabsetzung zur Geltung kam. Dass man aber mit weniger als 10 S. Elem. weder das absolute Widerstandsminimum je erreichen, noch für practische Untersuchungszwecke auskommen kann, lehren unsere obigen Versuche zur Genüge. Wegen dieser nicht genügenden Stärke des modificirenden Stromes (Gärtner), oder der zu kurzen Einwirkung eines genügend kräftigen Stroms (Jolly), erreicht der auch an sich, wie wir sahen, in der Methode liegende Fehler die angegebenen ausserordentlich hohen Werthe. Zieht man aber all' die hier zur Aufklärung der Widersprüche gegebenen Gesichtspunkte sorgfältig in Betracht, so verschwinden die Widersprüche und die von unseren Resultaten soweit abweichenden Angaben von Gärtner und Jolly über den modificirten Leitungswiderstand der menschlichen Haut können als irgendwie beweiskräftige Instanzen künftighin nicht mehr in Betracht kommen.

Tabelle der Widerstände.

| M.-A. | 5 El. | 10 El. | 15 El. | 20 El. | 25 El. | 30 El. | 35 El. |
|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | 4500 | 9350 | 14275 | 19200 | — | — | — |
| 1,5 | 2920 | 6000 | — | — | — | — | — |
| 2 | 2000 | 4880 | 6775 | 9200 | — | — | — |

| M.-A. | 5 El. | 10 El. | 15 El. | 20 El. | 25 El. | 30 El. | 35 El. |
|-------|-------|--------|----------|--------|--------|--------|--------|
| 2,5 | 1425 | 3160 | 2,6=5000 | — | — | — | — |
| 3 | — | 2610 | 4240 | — | 7460 | — | — |
| 3,5 | — | 2230 | 3530 | 5000 | — | — | — |
| 4 | — | 1860 | 3030 | 4240 | 5375 | — | — |
| 4,5 | — | 1660 | 2610 | 3680 | 4790 | — | — |
| 5 | — | 1350 | 2290 | 3300 | 4240 | 5000 | 5975 |
| 6 | — | — | 1790 | 2610 | 3330 | 4130 | 4860 |
| 7 | — | — | 1470 | 2110 | 2750 | 3290 | 4000 |
| 8 | — | — | 1260 | 1790 | 2360 | 2900 | 3360 |
| 9 | — | — | — | 1480 | 2000 | 2430 | 2930 |
| 10 | — | — | — | 1220 | 1660 | 2110 | 2500 |
| 11 | — | — | — | 1090 | 1470 | 1790 | 2180 |
| 12 | — | — | — | 910 | 1230 | 1590 | 1930 |
| 13 | — | — | — | 750 | 1040 | 1350 | 1700 |
| 14 | — | — | — | — | 910 | 1200 | 1500 |
| 15 | — | — | — | — | 740 | 1100 | 1340 |
| 16 | — | — | — | — | — | 990 | 1210 |
| 17 | — | — | — | — | — | 810 | 1100 |
| 18 | — | — | — | — | — | — | 920 |
| 19 | — | — | — | — | — | — | 820 |

Anmerkungen.

- 1) Erb, Handbuch der Elektrotherapie. II. Aufl. S. 159.
- 2) Methode zur Messung der elektromotorischen Kräfte und der inneren Widerstände der im Apparat verwendeten Elemente.

Nachdem der Rheostat als Körper eingeschaltet ist, werden bei verschiedener Elementenzahl zwei Ablesungen gemacht.

Es ist dann $J = \frac{n x}{n y + w}$ und $J_1 = \frac{n_1 x}{n_1 y + w_1}$, wenn x die ge-

suchte elektromotorische Kraft jedes einzelnen Elementes, y den innern Widerstand bedeutet. Die Auflösung der beiden Gleichungen ergibt

ganz allgemein $x = \frac{J J_1 (n_1 w - n w_1)}{n n_1 (J_1 - J)}$ und $y = \frac{n J_1 w_1 - n_1 J w}{n \cdot n_1 (J - J_1)}$.

Eine grosse Anzahl derartiger Ablesungen ist in der Tabelle der Widerstände gegeben. Es seien als Beispiel zwei beliebige herausgegriffen. Bei Verwendung von 20 Elementen ist $J=5$, wenn $w=3300$.

Bei 30 El. ist $J_1 = 10$, wenn $w_1 = 2110$. Wir haben also

$$\frac{5}{1000} = \frac{20x}{20y + 500 + 3300} \quad \text{und} \quad \frac{10}{1000} = \frac{30x}{30y + 500 + 2110}.$$

Das giebt $x = 1,03$ Volt.
 $y = 16$ Ohm.

Das Mittel aus mehreren derartigen Berechnungen ergibt, wie angegeben, für die von mir verwendeten Elemente $E = 1$ Volt; $W = 15$ Ohm. Diese Methode ist natürlich nur dann verwendbar, wenn ein absolutes Galvanometer zur Verfügung und sämtliche Widerstände in absolutem Masse (Ohm) gegeben sind. (Ev. muss in Ohm umgerechnet werden.)

Auf absolute physikalische Genauigkeit kann die Methode selbstverständlich keinen Anspruch machen, da ihr Voraussetzungen zu Grunde liegen, die kaum jemals ganz zutreffen werden. Sie beruht nämlich auf der Annahme, dass 1. während der Dauer der Versuche die elektromotorische Kraft und der innere Widerstand eines jeden einzelnen Elementes constant bleiben und 2. dass diese beiden Factoren in in den verschiedenen Elementen gleich sind. Wegen der hier möglichen Fehlerquellen sind für physikalisch möglichst genaue Bestimmungen andere, allerdings complicirtere Methoden, namentlich von Poggendorf und Beetz angegeben. (Vergl. Wüllner, Lehrbuch der Experimentalphysik. 3. Aufl. Bd. IV. S. 500 und S. 515.) Für die hier vorliegenden Zwecke ist sie indessen genau genug und von mir vor Allem aus dem Grunde genauer mitgetheilt, weil sie jedem Arzte, der über einen grossen Hirschmann'schen oder ähnlichen Apparat verfügt, gestattet, ohne weitere complicirte physikalische Apparate sich in einfacher Weise selbst eine Vorstellung von E. und W. seiner Elemente zu verschaffen.

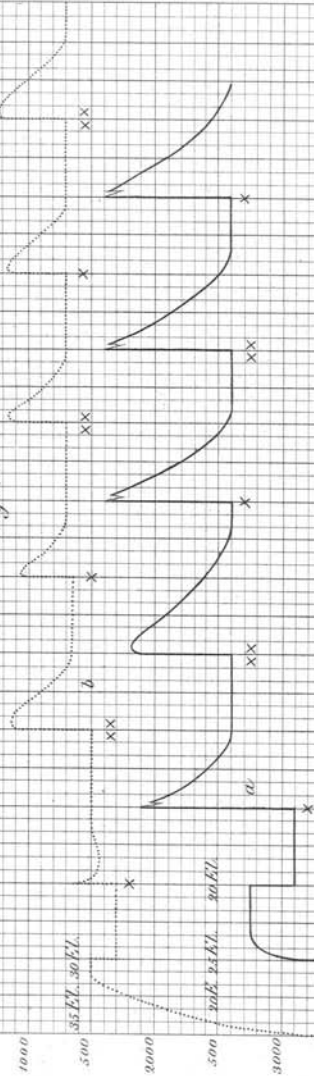
- 3) Gärtner, Ueber das Leitungsvermögen der menschlichen Haut. Wiener medic. Jahrbücher 1882.
- 4) Jolly, Untersuchungen über den elektrischen Leitungswiderstand des menschlichen Körpers. Festschrift etc. Strassburg 1884.
- 5) R. Remak, Galvanotherapie der Nerven- und Muskelkrankheiten. Berlin 1885. S. 80 u. ff.
- 6) Erb a. a. O. S. 56.
- 7) Diese obige Formulirung dieser der Hauptsache nach schon länger bekannten Satzes stammt von Gärtner (l. c. S. 319. Satz 3.)

Ich will gleich hier bemerken, dass ich diese Fassung des inhaltlich durchaus richtigen Satz als correct nicht anerkennen kann. Anstatt „Intensität des Stromes“ muss es offenbar heissen „Zahl der angewandten Elemente“ oder „Grösse der im Kreise herrschenden elektromotorischen Kraft“. Die „Intensität“ resultirt ja erst aus elektromotorischer Kraft und Widerstand und ändert sich im vorliegenden Falle fortwährend

mit diesem. Der einzige constante Factor ist bei gleichbleibender Elementenzahl die elektromotorische Kraft, von der also die Widerstandsänderungen und damit die Intensitätsschwankungen abhängen. Der obige Satz soll nun besagen, dass ceteris paribus der absolute Werth der Widerstandsabnahme um so grösser wird, je grösser die Zahl der angewandten Elemente ist und je länger der Stromschluss dauert.

- 8) Stinzing behauptet in einer eben erschienenen Arbeit: „Ueber elektrodiagnostische Grenzwerte“ (Deutsches Archiv für klin. Med. Bd. 39. S. 70 u. ff.) nicht nur, dass das Edelmann'sche Einheitsgalvanometer allen anderen bekannt gewordenen ähnlichen Instrumenten in jeder Beziehung vorgezogen werden müsse (S. 92), sondern auch, dass es „eben idealen Anforderungen genügt“ (S. 91).
 - 9) H. Munk, Ueber die kataphorischen Veränderungen der feuchten porösen Körper. Archiv für Anatomie und Physiologie etc. 1873. S. 241. Ferner: Ueber die galvanische Einführung differenter Flüssigkeiten in den unversehrten lebenden Organismus. Ebenda S. 505.
 - 10) Wiedemann, Poggendorf's Annalen Bd. LXXXVII. S. 321 und Bd. XCIX. S. 177.
 - 11) Citirt nach Gärtner l. c. S. 527.
 - 12) J. Rosenthal und Bernhardt, Elektrizitätslehre für Mediciner. Dritte Aufl. 1884. S. 190.
 - 13) l. c. S. 189.
-

Fig. 4.



x Stromveränderung
x x Zurück zur Anfangsschaltung.

Fig. 5.

