

DER PHYSIK UND CHEMIE.

NEUE FOLGE BAND V.

1. *Der Durchgang des galvanischen Stromes
durch das Eisen; von Felix Auerbach.*

Der dem Eisen charakteristische enorme Werth des specifischen Magnetismus ist, wie in den letzten Jahrzehnten durchgeführte Untersuchungen gezeigt haben, nicht ohne Einfluss auch auf die galvanischen Eigenthümlichkeiten dieses Metalls. Leitet man nämlich durch einen Eisendraht einen Strom, so treten Erscheinungen auf, welche bei anderen Metallen ausbleiben. Einige dieser Erscheinungen sollen im Folgenden auf Grund neuer Versuche der Betrachtung unterworfen und von einem einheitlichen Gesichtspunkte, welchen ich bisher bei der Literatur über diesen Gegenstand zu vermissen meinte, beurtheilt werden.

Ich beginne damit, die bekannten Thatsachen, soweit ich mich auf dieselben werde zu beziehen haben, kurz zusammenzustellen.

§. 2. 1) Die Angaben über die galvanische Leitungsfähigkeit schwanken, selbst wenn man die anzufechtenden ausschliesst, innerhalb verhältnissmässig weiter Grenzen. Es fanden nämlich, die entsprechende Zahl für Silber gleich 100 gesetzt:

E. Becquerel (1846),	$\lambda = 12,35$	Matthiessen (1858),	$\lambda = 14,44$
Bénoit ¹⁾ (1873),	12,7	Buff (1857),	14,77
Lenz (1838),	13,1	Arndtsen (1858),	14,83
Pouillet (1846),	14,1	Frick u. Müller (1848),	15,9

2) Die Leitungsfähigkeit nimmt mit der Tem-

1) C. R. LXXVI. p. 342. Auch im Philos. Mag. (4) XXXV. p. 314 (1873) und XLIX. p. 78 (1875).

peratur ab, oder der Widerstand nimmt zu. Setzt man:

$$\lambda_t = \lambda_0 (1 - \alpha t + [\alpha^2 + \beta] t^2)$$

und:

$$w_t = w_0 (1 + \alpha_1 t - \beta_1 t^2),$$

so ist jedenfalls zunächst:

$$\alpha_1 = \alpha \quad \text{und} \quad \beta_1 = \beta.$$

Also:

$$\beta_1 = 0, \quad \text{falls } \beta = 0 \text{ ist.}$$

Diese letztere Beziehung ist von E. Becquerel, Arndtsen (annähernd) und Mousson gefunden worden. Gleichzeitig gibt:

Becquerel	$\alpha = 0,004726$	
Arndtsen	0,00413	
Mousson	0,004207	an.

Dagegen findet Matthiessen β_1 von 0 verschieden; aus:

$$\lambda = \lambda_0 (1 - 0,0051182 t + 0,000012915 t^2)$$

folgt nämlich:

$$w = w_0 (1 + 0,0051182 t - 0,000013281 t^2).$$

Man kann jedoch auch hier die Formel:

$$w = w_0 (1 + \alpha t)$$

mit grosser Annäherung als erfüllt ansehen. Diese Annahme führt nämlich zu der Gleichung:

$$\lambda = \lambda_0 (1 - \alpha t + \alpha^2 t^2 - \dots)$$

oder:

$$\lambda = \lambda_0 \left(1 - \alpha t + \frac{\alpha^2 t^2}{1 + \alpha [t]} \right),$$

wo $[t]$ einen mittleren Werth von t bedeutet, den man bei jenem Correctionsgliede an Stelle des wahren einführen kann. Freilich liefern die Angaben des Beobachters hierfür keinen sicheren Anhaltspunkt. Setzt man ihn aber in runder Zahl gleich 200°C. , so erhält man:

$$\lambda = \lambda_0 \left(1 - \alpha t + \frac{\alpha^2 t^2}{2} \right),$$

wie Matthiessen in der That nahezu gefunden hat.

3) Die von dem Strome in einem Eisendrahte erzeugte

Wärmemenge ist näherungsweise durch das Joule'sche Gesetz bestimmt. Ich habe hierüber keine genaueren Zahlen auffinden können, als die alten Lenz'schen, welche wegen der mit der Stromstärke wachsenden Temperatur nicht genau vergleichbar sind. Die Mittelwerthe der zu gleichen Erwärmungen erforderlichen Zeiten sind für:

Kupfer	478,9	Platin	451,7
Neusilber . . .	460,4	Eisen	448,0.

4) Wenn man einen aus einer Batterie und einem geradlinigen Eisendrahte bestehenden Kreis schliesst, so beobachtet man einen Extrastrom, welcher dem Hauptstrome¹⁾ entgegengerichtet ist; beim Oeffnen des Kreises entsteht ein mit dem Hauptstrome gleichgerichteter Extrastrom. Diese Ströme sind von Villari entdeckt und Erschütterungsströme genannt worden. Auf Grund der Annahme einer Transversal- oder Circularmagnetisirung der Eisendrähte erklärt hat sie zuerst G. Wiedemann²⁾, später haben sich Herwig³⁾ und Streintz⁴⁾ eingehender mit ihnen beschäftigt.

5) Längsmagnetisirung von Eisenstäben oder Drähten ist von Einfluss auf ihren Widerstand. Ich erwähne diesen Punkt zuletzt, weil die bisher hierüber erhaltenen Resultate am unregelmässigsten und theilweise einander widersprechend ausgefallen sind. Edlund und Mousson haben keine Aenderung, Thomson⁵⁾ und Beetz⁶⁾ haben Zunahme des Widerstandes gefunden, während auch eine Abnahme aus älteren Beobachtungen geschlossen und neuerdings bestätigt worden ist. Die Er-

1) Den zur Messung benutzten, durch das Eisen hindurchgehenden Strom will ich im Folgenden stets als den Hauptstrom bezeichnen.

2) Galvanismus. 2. Aufl. II. (2) §. 743. (1873).

3) Pogg. Ann. CLIII. p. 115. (1874).

4) Wien. Ber. LXXVI. 1877.

5) Philos. Trans. 1856. III. p. 737.

6) Pogg. Ann. CXXVIII. p. 202. (1866).

gebnisse von Beetz sind kürzlich durch eine kurze Mittheilung von Chwolson¹⁾ bestätigt worden.

§. 3. Bei meinen Versuchen und Betrachtungen, die ich über die hier zusammengestellten Thatsachen ausgeführt habe, bin ich gerade von den beiden letzten Punkten ausgegangen, theils weil mir hier das vorliegende Material noch am wenigsten für das volle Verständniss der Erscheinungen ausreichend zu sein schien, theils weil ich der übereinstimmenden Ansicht von Beetz und Herwig, man müsse die von ihnen behandelten Fälle (4 und 5) völlig auseinander halten, mich nicht meinte anschliessen zu dürfen. Ich habe vielmehr mit G. Wiedemann²⁾ aus ihren Ergebnissen die Ueberzeugung gewonnen, dass beide Erscheinungen sehr wohl im Zusammenhange miteinander stehen können und daher von einem gemeinsamen Gesichtspunkte aus aufzufassen sind.

Ich beginne mit der Untersuchung des Einflusses der Magnetisirung auf den Widerstand.

Zur Widerstandsmessung bediente ich mich der Wheatstone'schen Brücke. Die Widerstände w_1 w_2 w_3 der 3 Parallelzweige lieferte ein Universalwiderstandskasten von Siemens. Das Verhältniss $w_1:w_2$ war bei den Versuchen fast stets gleich 1000:10, in einigen Fällen gleich 100:10; im ersten Falle stellt mithin der Widerstand w_3 den zu messenden Widerstand w_1 in hundertfacher Vergrösserung dar. Da sich noch 0,01 Siemens'sche Widerstandseinheiten mit Sicherheit messen liessen, reicht die Genauigkeit der Bestimmung bis in die vierte Decimalstelle hinein. Nur falls w_1 mehr als 10 Einheiten betrug, wurde dieselbe unsicher.

Als messendes Instrument habe ich zuerst ein Wiedemann'sches Galvanometer mit den dünnsten der ihm gewöhnlich beigegebenen Drahtrollen, später ein nach Magnus' Angabe von Sauerwald construirtes benutzt. Mittelst

1) Carl's Rep. XIII. p. 232. (1877).

2) Galvanismus. 2. Aufl. II. 1. p. 593.

der Spiegelablesung konnte ich noch 0,1 Scalentheile = 0,1 mm mit Sicherheit schätzen. Das letztgenannte Instrument ist wegen der raschen Dämpfung der Schwingungen in hohem Grade zu solchen Untersuchungen geeignet, bei denen es auf Schnelligkeit der Beobachtung ankommt.

Die erste und schwierigste Aufgabe war die, den Einfluss von Temperaturänderungen auszuschliessen. Bedenkt man nämlich, dass nach den vorliegenden Angaben von Thomson, Beetz, Chwolson die obere Grenze der Widerstandsänderungen durch Magnetisirung durch das Verhältniss 1:1000 angegeben wird, und dass eine diesem Grenzwerte entsprechende Widerstandsänderung beim Eisen bereits durch eine Temperaturänderung von $0,2^{\circ}$ C. hervorgerufen wird, so sieht man ein, welche Sorgfalt auf diesen Punkt zu richten ist. Man kann Temperatureinflüsse entweder durch die Versuchseinrichtung vor Beginn der Beobachtungen beseitigen, oder durch Rechnung nach Schluss der Beobachtungen eliminiren. Hinsichtlich desjenigen Theils jener Einflüsse, welcher durch den Hauptstrom selbst hervorgerufen wird, habe ich mich nach einigen Vorversuchen für das letztere entschieden. Ich hätte allerdings in der Gleichung der Wheatstone'schen Brücke das Verhältniss $w_4:w_3$ mit Leichtigkeit von der Temperatur unabhängig machen können, indem ich den Widerstand w_3 zum allergrössten Theile aus Eisen herstellte und nur den kleinen, zur jedesmaligen Regulirung erforderlichen Theil dem Widerstandskasten entnahm. Dazu wären aber, da das Verhältniss $w_2:w_1=1:100$ war, Eisendrähte beträchtlicher Länge erforderlich gewesen, welche ich aus anderen Gründen vermeiden musste. Auch zeigte sich, dass die Erwärmung durch 1 bis 3 Daniell'sche Elemente, wie ich sie für den Hauptstrom benutzte, während der meist sehr kurzen Dauer des Stromschlusses äusserst klein war; und gerade bei kleinen Werthen fremder Einflüsse, (welcher Art dieselben auch sein mögen) liefert die Elimination bekanntlich sehr zuverlässige Er-

gebnisse. Dadurch nahm das Schema sämtlicher Versuche, welche ich anstellte, die Form $a_1 - b - a_2$ an, wo a_1 den Versuch vor der Magnetisirung, b denjenigen nach erfolgter und a_2 den nach aufgehobener Magnetisirung bedeutet. Die Resultate b und $\frac{a_1 + a_2}{2}$ sind dann gut vergleichbar, falls die Differenz $a_1 - a_2$ klein ist.

Auch ein zweiter Theil von Temperatureinflüssen, der durch die Umgebung verursachte, liess sich leicht auf ein Minimum reduciren, und dieses Minimum eliminiren. Das letztere geschieht hier besonders leicht, da die Perioden der äusseren Temperaturschwankungen mit den Perioden der durch die Versuche bedingten Widerstandsänderungen in gar keinem Zusammenhange stehen.

Es bleibt noch der dritte, erheblichste Theil von Temperatureinflüssen zu besprechen, nämlich der durch die magnetisirende Vorrichtung bedingte. Diese Vorrichtung bestand anfangs in einer, auf eine Glasröhre gewundenen Spirale dicken, besponnenen und überwachten Drahtes, durch welchen der magnetisirende Strom floss. In die Glasröhre wurde der Eisendraht geschoben und der ganze Apparat in einer Entfernung von mehreren Metern vom Galvanometer aufgestellt, so dass weder der Magnetismus noch auch der magnetisirende Strom direct auf das Galvanometer wirkte. Es zeigte sich jedoch, dass die erwärmende Wirkung des magnetisirenden Stromes von der Spirale aus durch Bestrahlung sich auf den Eisendraht fortpflanzte und hier Widerstandsschwankungen hervorrief, welche, theils durch ihre bedeutende Grösse, theils deshalb alle zu messenden Aenderungen verdeckten, weil die Perioden beider Schwankungen identisch sind.¹⁾ Es galt daher einen adiathermanen magnetisirenden Apparat zu construiren. Dies gelang mir durch Benutzung des von Joule bei seinen thermischen Untersuchungen vielfach angewandten

1) Diese Widerstandsschwankungen liefern eine sehr brauchbare Methode, die Temperatur in der galvanischen Kette zu verfolgen; hierauf beabsichtige ich an anderer Stelle zurückzukommen.

Verfahrens, welches in der fortgesetzten Uebereinanderschichtung je eines adiathermanen, eines schlechtleitenden und eines Stoffes von grosser Wärmecapacität besteht. Die Kupferspirale wurde demgemäss auf eine weite Glasröhre gewickelt, diese über einen dickwandigen Kautschukschlauch gezogen, in diesen eine engere Glasröhre geschoben und in die letztere, meist noch mit Papier umwickelt, der Eisendraht. Hätte ich das Princip vollständig anwenden wollen, so hätte ich zwischen die engere Glasröhre und den Eisendraht noch eine Schicht von grosser Wärmecapacität bringen müssen, z. B. einen stationären Alkoholstrom oder schmelzendes Eis. Es sind jedoch in neuester Zeit mehrfach Erfahrungen über dielectriche, diamagnetische und electrolytische Einflüsse solcher umgebenden Flüssigkeiten gemacht worden, welche mir in dem vorliegenden Falle nicht unbedenklich erschienen. Auch reichte der so construirte Apparat wenigstens für zwei der von mir benutzten magnetisirenden Kräfte, für eine Daniell'sche sowie für eine Bunsen'sche Batterie (von höchstens 5 Elementen) aus; bei der dritten magnetisirenden Kraft, dem Strome einer durch eine Dampfmaschine getriebenen Gramme'schen Maschine, blieben freilich in den meisten Fällen noch thermische Einflüsse merklich; sie waren jedoch klein genug, um eine Elimination zuzulassen. Die Anwendung so starker magnetisirender Kräfte könnte vielleicht überhaupt überflüssig erscheinen, da man gewöhnlich annimmt, schon durch viel kleinere magnetisirende Kräfte würden Eisendrähte bis zur sogenannten Sättigung magnetisirt. Ob dieselbe aber in solchen Fällen wirklich erreicht ist, möchte ich doch bezweifeln. Sie ist vielleicht „nahezu“ erreicht.¹⁾ Es weichen vielleicht die Molecularmagnete im Mittel nur noch einen Bruchtheil eines Grades von der Axe der Magnetisirung ab. Aber gerade der Einfluss der nun noch möglichen Drehung kann bezüglich solcher Fragen, wie die hier zu untersuchenden, erheblich sein.

1) So drückt sich auch Hr. Beetz vorsichtigerweise aus.

Thermoströme waren bei der getroffenen Anordnung nicht zu fürchten; möglichst reducirt musste dagegen die Stärke der oben erwähnten Extraströme werden. Man wird die Nothwendigkeit hiervon vielleicht nicht ohne weiteres einsehen. Handelt es sich bei der vorliegenden Untersuchung doch um dauernde Einflüsse, und von diesen müssen jene momentanen Erscheinungen mit Leichtigkeit zu unterscheiden sein. Aber erstens ist es aus mancherlei Gründen erwünscht, auch diese dauernden Einflüsse gleich nach Schluss des Stromes feststellen zu können, um denselben bald wieder öffnen zu dürfen, und zweitens sind jene Extraströme nichts weniger als momentane Erscheinungen. Ich habe vielmehr gefunden, dass die unter dem Namen der Nachwirkung bekannten Erscheinungen hier eine grosse Rolle spielen. Es ist dies um so unangenehmer, als auch die noch übrigen Temperatureinflüsse infolge der Zeitdauer der Strahlung und Leitung nachwirken. Ich habe deshalb durchweg mit Eisendrähten operirt, welche die Villari'schen Ströme ungleich schwächer zeigen, als Stäbe. Dem dadurch zugleich erreichten Vortheile, infolge des grösseren Widerstandes von Drähten auch grössere Widerstandsänderungen erwarten zu dürfen, steht freilich der Nachtheil gegenüber, dass Eisendrähte eines geringeren specifischen Magnetismus fähig sind als dicke Stäbe.

§. 4. Es lässt sich schon a priori erwarten, dass die Natur des Drahtes (ob derselbe aus Stahl oder Eisen besteht, ob er hart oder weich ist u. s. w.) für die Erscheinungen, die er zeigt, von Einfluss ist, dass ein galvanisch noch nicht bearbeiteter Draht sich anders verhält als ein solcher, durch welchen vor längerer oder kürzerer Zeit Ströme hindurch gegangen sind, oder welcher bereits mehrfache Längs- oder Quermagnetisirungen erfahren hat. Dazu kommt aber noch ein wesentliches Moment, welches in dem Verhältniss der Intensitäten des magnetisirenden und des Hauptstroms besteht, und an welches ich weiter unten meine theoretischen Betrachtungen knüpfen werde. Aus

diesen Gründen zeigen die Zahlen der folgenden Tabellen eine grosse Mannichfaltigkeit.

Von den Versuchsreihen mit schwachen magnetisierenden Strömen sind schon vor Vervollkommnung des magnetisierenden Apparates einige brauchbar. Ich bezeichne mit:

H die den Hauptstrom,

M die den magnetisierenden Strom erzeugende electromotorische Kraft,

D die electromotorische Kraft eines Daniell'schen,

B diejenige eines Bunsen'schen Elementes,

n die Anzahl der Windungen der magnetisierenden Spirale.

l die (angenäherte) Länge,

d die Dicke des Eisen- resp. Stahldrahtes,

w_0 den in Siemens'schen Einheiten gemessenen Widerstand desselben für $M = 0$,

w dasselbe für $M > 0$,

w_k den Widerstand der kupfernen Zuleitungsdrähte zum Widerstandskasten.

δ den Quotienten $\frac{w - w_0}{w}$.

t die Zeit des Versuches.¹⁾

Den zeitlichen Verlauf der Erscheinungen übergehend, gebe ich zunächst nur die hierher gehörigen Zahlen.

1. $H = M = 1D$. $n = 106$. (Geglüh-
ter Eisendraht f_1 . (d etwa
0,5 mm).

$w_0 + w_k$	$w + w_k$	$w_0 + w_k$
1,0300	1,0296	1,0304

($w_k = 0,5209$)

$\delta = -0,0012$.

3. H, M, n wie oben. Geglüh-
ter Eisendraht f_2 . (d etwa 0,5 mm).

$w_0 + w_k$	$w + w_k$	$w_0 + w_k$
1,7478	1,7459	1,7476

($w_k = 0,5210$)

$\delta = -0,0015$.

2. H, M, n wie oben. f_1 .

$w_0 + w_k$	$w + w_k$	$w_0 + w_k$
1,0304	1,0294	1,0302

($w_k = 0,5211$)

$\delta = -0,0018$.

4. H, M, n wie oben. $n = 166$.
Draht f_1 .

$w_0 + w_k$	$w + w_k$	$w_0 + w_k$
1,0227	1,0216	1,0229

($w_k = 0,5201$)

$\delta = -0,0024$.

¹⁾ Bei den älteren Versuchen fehlen mir leider meist einige dieser Angaben, deren Erforderlichkeit nicht von vornherein einzusehen war.

Im Mittel aus 1 bis 3: $\delta = -0,0015$.

Dagegen bei 4: $\delta = -0,0024$.

Die magnetisirende Kraft ist mit n proportional. Es ist also hiernach δ mit der magnetisirenden Kraft proportional. Seinem Vorzeichen nach ist δ negativ. Die Länge des Drahtes (Versuch 3) scheint ohne Einfluss zu sein.

5. $H = 3D$, $M = 1D$. Draht f_3 . $n = 106$. Der magnetisirende Strom blieb eine Stunde lang geschlossen.

$$w_0 + w_k = 1,7429 \quad w + w_k = 1,7326 \quad w_0 + w_k = 1,7386 \\ (w_k = 0,5207), \text{ also } \delta = -0,0068.$$

Hier ist also erstens eine grössere vorübergehende, zweitens eine dauernde Abnahme des Widerstandes eingetreten, obgleich eine dauernde Magnetisirung nicht nachweisbar war. Die temporäre Abnahme wird noch grösser, wenn man bei ihrer Berechnung von der permanenten abieht, d. h. bei der Berechnung der Differenz $w - w_0$ nur das ursprüngliche w_0 berücksichtigt. Dann wird:

$$\delta_1 = -0,0084.$$

6. $H = 5D$, $M = 1D$, $n = 106$. Draht f_2 .

$$w_0 + w_k = 1,7366 \quad w + w_k = 1,7139 \quad w_0 + w_k = 1,7299 \\ (w_k = 0,5210), \text{ also } \delta = -0,0159.$$

Sieht man von der permanenten Aenderung ab, so ergibt sich:

$$\delta_1 = -0,0186.$$

Hier ist die temporäre Aenderung des Widerstandes noch grösser und erreicht nahezu den Werth von 2 Proc. Aber auch die permanente ist grösser als im vorigen Falle.

Einige Versuchsreihen an ungeglühten Eisendrahten zeigen dieselben Erscheinungen, nur schwächer. Dagegen nahm bei einem dünnen, ungeglühten Stahldrahte der Widerstand um nahezu 3 Proc. ab, als $H = 3B$, $M = 1D$ gewählt war.

Die meisten der vor Vervollkommnung des Electro-

magneten angestellten Versuche zeigen dagegen eine Zunahme des Widerstandes mit der Magnetisirung, und zwar eine grössere temporäre und eine geringere remanente. Da es jedoch hierbei nicht leicht möglich ist, den Einfluss der Temperaturzunahme abzusondern, habe ich diese Versuche bis auf einige anscheinend zuverlässige unverwerthet gelassen.

7. Zunächst erwähne ich zwei Versuche mit dünnen, ungeglühten Eisendrähten, bei welchen keine Widerstandsänderung um 0,0002 pro Einheit des Widerstandes eintrat. Bei beiden war $H=2D$, $n=92$; bei dem einen war ferner $M=3D$, bei dem andern $M=2B$.

8. Geglühter Eisendraht f_3 .
(d etwa = 0,6). $H=1D$, $M=3D$,
 $n=92$. Der Widerstand der Zu-
leitungsdrähte ist bereits abge-
zogen.

$$w_0=0,5213 \quad w=0,5234 \quad w_0=0,5214$$

$$\delta = + 0,0038.$$

9. Versuch 8 mehrmals wie-
derholt.

$$w_0=0,5214 \quad w=0,5232 \quad w_0=0,5214$$

$$\delta = + 0,0035.$$

So gering wie in diesem Falle erwies sich der Einfluss der mehrfachen Wiederholung desselben Versuches selten.

10. Statt des Widerstandskastens wurde ein geradliniger Rheostat benutzt. Die Zahlen für w_0 und w sind in einer willkürlichen Einheit ausgedrückt. $H=1D$, $M=2D$, $n=92$. Mittelwerthe:

$$\left. \begin{array}{l} [w_0] = 6019,8 \\ [w] = 6023,2 \end{array} \right\} [w - w_0] = + 3,4$$

$$\delta = \frac{w}{w_0} \cdot \frac{100000 - w_0}{100000 - w} - 1 = + 0,00135.$$

(Der Gesamtwiderstand des Rheostaten ist gleich 100000 gesetzt; die obige Rechnung war nothwendig, weil hier das Gleichgewicht durch Verschiebung einer Klemmschraube hergestellt wurde.)

11. Bei Versuch 10 floss der Hauptstrom im Eisendrahte vom Südpol zum Nordpol. Nun wurde der Haupt-

strom in der entgegengesetzten Richtung durchgeschickt. Es fand sich im Mittel:

$$[w_0] = 6021,0, [w] = 6024,0, [w - w_0] = + 3,0 \\ \delta = 0,00122.$$

(Nach derselben Rechnung wie oben.) Hierzu ist jedoch zu bemerken: erstens, dass der Eisendraht, mit welchem diese beiden Versuchsreihen angestellt sind, schon mehrfache Stromdurchgänge erlitten hatte, und zweitens, dass bei der Berechnung der Mittelwerthe in 11 die ersten abweichenden Zahlen unberücksichtigt blieben. Die vollständigen Reihen sind nämlich folgende:

10. $\left. \begin{array}{l} [w_0] = 6019 \\ [w] = 6024 \\ [w_0] = 6021 \\ [w] = 6023 \\ [w_0] = 6019 \\ [w] = 6022 \\ [w_0] = 6020 \\ [w] = 6024 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{also stets} \\ w > w_0 \end{array}$	11. $\left. \begin{array}{l} [w_0] = 6022 \\ [w] = 6020 \\ [w_0] = 6022 \\ [w] = 6025 \\ [w_0] = 6022 \\ [w] = 6024 \\ [w_0] = 6020 \\ [w] = 6023 \\ [w_0] = 6020 \end{array} \right\} \begin{array}{l} w < w_0 \\ \\ \\ w > w_0 \end{array}$
---	---

Die Umkehr der Stromesrichtung im Eisen hat also wohl einen momentanen, aber keinen dauernden Zeichenwechsel von δ zur Folge. Dass das wiederholte Oeffnen und Schliessen des magnetisirenden Stromes keinen Einfluss übte, lag vermuthlich daran, dass infolge des langen Gebrauchs des Drahtes bereits stationäre Verhältnisse eingetreten waren. Um diese Vermuthung zu prüfen, gab ich einem gleich beschaffenen, noch unbenutzten Eisendrahte dieselben Dimensionen und erhielt:

$$12. \quad \begin{array}{cccccc} [w_0] = & 6018 & 6020 & 6017 & 6015 & 6013 \\ [w] = & 6011 & 6011 & 6008 & 6006 & \end{array}$$

$$\text{Mittel: } [w_0] = 6016,6, [w] = 6009,0, [w - w_0] = - 7,6 \\ \delta = - 0,0032.$$

Hier ist also δ negativ. In der That nahm, nachdem ich den magnetisirenden Strom etwa 100mal geschlossen und geöffnet hatte, der absolute Werth von δ ab, und am

nächsten Tage erhielt ich, wie bei 10 und 11, einen kleinen positiven Werth von δ . Solche Zeichenwechsel von δ habe ich jedoch nur beobachtet, wenn (für $n = 92$) das Verhältniss $H : M = 1 : 2$ oder nicht erheblich hiervon verschieden war. Nur wenn sehr starke Ströme durch das Eisen längere Zeit hindurchgegangen waren, oder wenn ich die Richtung der Magnetisirung wiederholt umgekehrt hatte, wurden die Ergebnisse auch in anderen Fällen und vollständig unregelmässig.

Kurz vor Herstellung des adiathermanen Apparates stellte ich noch Versuche an, bei welchen ich zwar einen Einfluss der Erwärmung constatirte, denselben jedoch durch Vergleichung mit Versuchen an Kupferdrähten glaubte eliminiren zu können. Es verhalten sich nämlich die specifischen Wärmen von Eisen und Kupfer etwa wie 7:6, und annähernd in demselben Verhältniss stehen nach Bénéoit ihre Temperaturcoëfficienten α für den galvanischen Widerstand. Wendet man also denselben Werth von M und denselben magnetisirenden Apparat an, und gibt den Oberflächen des Eisendrahtes und des Kupferdrahtes gleiche Grösse, wodurch auch ihr Volumen dasselbe wird, so erhält man bei beiden nahezu gleiche Widerstandserhöhungen durch die Ausstrahlung des magnetisirenden Apparats. Ich verfuhr daher auf die angedeutete Weise und erhielt:

13.	14.	15.
Widerstandskasten. H $= 1 D$, $M = 2 B$, $n = 73$. (Die Indices f' und c be- ziehen sich resp. auf den weichen Eisendraht und auf den Kupferdraht.	Wiederholt. $\delta_c = 0,0026$, $\delta_{f'} = 0,0039$. $\delta = + 0,0013$.	$H = 1 D$, $M = 3 B$, $n = 73$. Dickere Drähte. $\delta_c = 0,0017$. $\delta_{f'} = 0,0044$. $\delta = + 0,0027$.
$\delta_c = 0,0023$ $\delta_{f'} = 0,0042$ $\delta_c - \delta_{f'} = \delta = + 0,0019$.		

Hier hat δ genau im Verhältniss der magnetisirenden Kraft gegen Versuch 13 zugenommen.

Die nun folgenden Versuchsreihen sind sämmtlich mit dem adiathermanen Apparate angestellt.

Bei ungeglühten Eisendrähten ist die Nachwirkung der Extrastrome nach Schluss des magnetisirenden und des Hauptstromes eine sehr langwierige, so dass man hier vorübergehende und dauernde Erscheinung oft schwer trennen kann. Ich bezeichne daher mit w_1 den Widerstand in der ersten Zeit (oft bis zu einigen Minuten) nach Schluss beider Ströme, mit w_2 den constant gewordenen Widerstand.

16. $H = 1D$, $M = 3B$, $n = 150$.
Eisendraht f_4 . (d etwa $= 0,60$).
Mittelwerthe:

$$w_k + \begin{cases} w_0 = 0,79046 \\ w_1 = 0,79107 \\ w_2 = 0,79052 \\ w_0 = 0,79044 \end{cases} \begin{cases} w_k = 0,0698 \\ w_1 - w_0 = 0,00062 \\ w_2 - w_0 = 0,00007 \end{cases}$$

$$\frac{w_1 - w_0}{w_0} = \delta_1 = + 0,00084$$

$$\frac{w_2 - w_0}{w_0} = \delta_2 = + 0,00010.$$

17. Wiederholt.

$$w_k + \begin{cases} w_0 = 0,78998 \\ w_1 = 0,79050 \\ w_2 = 0,79010 \\ w_0 = 0,78998 \end{cases} \begin{cases} w_1 - w_0 = 0,00052 \\ w_2 - w_0 = 0,00012 \end{cases}$$

$$\delta_1 = 0,00072$$

$$\delta_2 = 0,00016.$$

Es hat also bei der Wiederholung des Versuches δ_1 abgenommen, δ_2 zugenommen. Damit stimmt es überein, dass vielfach benutzte Drähte meist keinen Unterschied zwischen δ_1 und δ_2 merken liessen.

18. $H = 1D$, $M = 3B$. Starker Eisendraht f_5 . (d etwa $= 1,3$).

$$w_k + \begin{cases} w_0 = 0,16617 \\ w_1 = 0,16640 \\ w_2 = 0,16630 \\ w_0 = 0,16613 \end{cases} \begin{cases} w_1 - w_0 = 0,00024 \\ w_2 - w_0 = 0,00016 \end{cases}$$

$$\delta_1 = 0,00260 \quad \delta_2 = 0,00156.$$

Hier sind nicht nur absolut genommen δ_1 und δ_2 grösser als bei den beiden vorhergehenden Versuchsreihen, sondern es ist auch δ_3 im Vergleich zu δ_1 viel grösser.

Dort war nur der 5. bis 8. Theil der anfänglichen Widerstandserhöhung dauernd, hier mehr als die Hälfte.

19. Starker, geglühter Eisendraht f_6 . $H = 1D$, $M = 4B$, $n = 212$. Mittelwerthe:

$$w_0 = 0,5029 \quad w = 0,5171 \quad w_0 = 0,5078$$

$$\delta = 0,0240.$$

Dauernde Erhöhung $\Delta = 0,0097$. Sieht man von dieser ab, so erhält man für die vorübergehende:

$$\delta = 0,0281.$$

Diese Werthe sind ganz aussergewöhnlich gross. Auch die dauernde Erhöhung des Widerstandes lässt darauf schliessen, dass man es hier mit abnormen Verhältnissen zu thun hat. Freilich müsste man diesen Schluss bis zu einem gewissen Grade dann auch auf die folgende Versuchsreihe ausdehnen, welcher ein anderer Draht zu Grunde liegt.

20. H , M , n wie bei 19. Dünner, geglühter Eisendraht f_7 , mehrfach galvanisch bearbeitet. $d = 0,19$.

$$w_0 = 6,3549 \quad w = 6,4532 \quad w_0 = 6,3644$$

$$\delta = + 0,0147.$$

Ferner wird (mit derselben Bedeutung wie oben):

$$\Delta = 0,0015 \quad \text{und} \quad \delta_1 = 0,0156.$$

Der gegen 19 unverhältnissmässig kleine Werth von Δ kann aus dem Umstande erklärt werden, dass der Draht f_7 infolge häufigen Stromdurchganges seinem stationären Verhalten sich bereits erheblich genähert hat.

21. $H = 2D$, $M = 3B$. Dünner, harter Eisendraht f_8 . $d = 0,15$. $w_0 + w_k = 11,6142$.

Keine Widerstandsänderung auch nur um 0,0001, obgleich hier sogar, trotz der sehr geringen Dicke, die Extrastrome einer erheblichen Widerstandserhöhung für den Moment des Stromschlusses entsprachen.

22. $H = 2D$, $M = 1D$, $n = 92$. Harter Eisendraht f_9 . $l = 1670$, $d = 0,20$.

$$w_0 = 7,3961 \quad w = 7,3903 \quad w_0 = 7,3973 \\ \delta = - 0,0009.$$

Derselbe Draht zeigte aber nach längerer Bearbeitung, nachdem δ sich der Null immer mehr genähert hatte, zuletzt kleine positive Werthe von δ (inzwischen war er dem Versuche 23 unterworfen worden).

23. $H = 1D$, $M = 2D$. Draht f_9 .

$$w_0 = 7,3991 \quad w = 7,3997 \quad w_0 = 7,3993 \\ \delta = - 0,0002.$$

24. Wiederholung von 22. Dieselbe ergab, wie erwähnt, eine, wenn auch kaum merkliche Erhöhung von w_0 . Zur Controle stellte ich aus derselben Drahtrolle, welcher f_9 entnommen war, einen neuen Draht von nahezu gleichen Dimensionen her und fand für $H = 2D$, $M = 1D$ (also wie in 22):

$$w_0 = 7,3608 \quad w = 7,3559 \quad w_0 = 7,3602 \\ \delta = - 0,0006.$$

also wie in 22 einen negativen Werth von δ .

25. Bei den Versuchsreihen 7 und 21 war erreicht worden, dass der Widerstand der harten Eisendrähte sich durch Magnetisirung nicht änderte. Ich suchte denselben Fall bei einem geglühten dicken Stahldrahte F_1 ($l = 1450$, $d = 1,31$) zu verwirklichen. Es gelang, während $H = 2D$ und $n = 92$ war, mit fast gleicher Annäherung bei $M = 2D$ und bei $M = 3D$. Noch schärfer liess sich dieser Punkt bei geglühten Eisendrähten fixiren. Dagegen trat bei harten Stahldrähten stets eine Aenderung des Widerstandes ein, und zwar, bei constantem H , im allgemeinen eine desto kleinere, je geringer die magnetisirende Kraft war. Von den Versuchen mit geringen Magnetisirungen führe ich nur an, dass sie meist kleinere Werthe von δ ergaben, als die Versuche mit Eisendrähten; nur bei den kleinsten Werthen des Verhältnisses $Mn : H$ findet das Gegentheil statt. Dagegen gebe ich noch einige Versuchsreihen mit magnetisirenden Kräften, welchen bei Eisen

und geglühtem Stahl bereits positive Werthe von δ entsprochen haben würden.

26. $H = 1D$, $M = 3B$, $n = 110$. Draht F_3 aus englischem Stahl (Claviersaite, music steel). $l = 1280$, $d = 0,91$. Mittelwerthe (unter Ausschluss der ersten Versuche):

$$w_k + \left\{ \begin{array}{l} w_0 = 0,40091 \\ w = 0,40079 \end{array} \right\} w - w_0 = -0,00012$$

$$(w_k = 0,050 \text{ etwa}).$$

$$\delta = -0,00034.$$

Wurde nun der magnetisirende Strom umgekehrt, so ergab sich, wie am Anfang der ersten Reihe, zunächst eine Zunahme von δ durch Magnetisirung, welche jedoch nach zweimaligem Durchgange des Stromes bereits einer Abnahme gewichen war. Ueberhaupt erwies sich dieser Draht als sehr günstig nicht nur für diese Messungen, sondern auch für diejenigen, auf welche ich im Laufe der Untersuchung noch zu sprechen kommen werde. Nur sind die absoluten Werthe von δ hier viel kleiner als bei andern Drähten; schon am 25. Mai hatte ich mit einer Kette (M) von $5B$ kaum erheblichere δ erhalten.

Um festzustellen, ob die Ursache hiervon ausschliesslich die schwache Abhängigkeit des Widerstandes von der Magnetisirung des englischen Stahls sei, oder ob hier nicht vielleicht erheblich stärkere magnetisirende Kräfte erforderlich seien, um den Zustand der sogenannten Sättigung, wenn auch nur nahezu, zu erzeugen, bediente ich mich der Gramme'schen Maschine neuerer Construction (1875), welche vor kurzem von Hrn. Prof. O. E. Meyer für das hiesige Laboratorium erworben worden ist, und welche, getrieben durch eine Dampfmaschine, erheblicher Arbeitsleistung fähig ist. Ihre Entfernung vom Galvanometer betrug etwa 25 m; zwischen beiden war der Electromagnet aufgestellt, von der Maschine 5, vom Galvanometer 20 m entfernt und nach beiden Richtungen durch dicke Kupferdrähte verbunden. Die Spirale wurde nie so heiss, dass man sie nicht ungestraft hätte berühren dürfen. Der

Kautschukschlauch zeigte nie eine Spur von Erwärmung, selbst nicht bei der schnellsten Rotation der Gramme'schen Maschine (1200 Umgänge pro Minute); trotzdem zeigen viele von den mit weichen Eisendrähten, besonders mit dünnen, angestellten Versuchsreihen einen Verlauf, den ich mir nicht anders, als durch Temperatureinflüsse erklären kann. Sucht man dieselben zu eliminiren, so erhält man Widerstandszunahmen durch Magnetisirung, welche bis zu 1 Proc. und darüber ansteigen. Einfacher und zuverlässiger sind die Ergebnisse der Versuche mit Stahldrähten, deren Mittelwerthe hier auszugsweise folgen.

27. $H = 1D$, $M = \text{Gramme'sche Maschine. (Umdrehungszahl } p = 700).$ $n = 110$. Dünner Stahldraht F_5 . $l = 2000$. $d = 0,21$.

$$w_0 = 8,4960 \quad w = 8,4803$$

$$\delta = - 0,0019.$$

28. Wiederholt. (4 Versuchsreihen).

$$w_0 = 8,6415 \quad w = 8,6346$$

$$\delta = - 0,0008.$$

29. Stahldraht F_3 . $H = 1D$, $M = \text{Gr. Masch., } (p = 800).$

$$w_0 = 0,3435 \quad w = 0,3419 \quad w_0 = 0,3435$$

$$\delta = - 0,0047.$$

30. Unmittelbar an diesen Versuch schloss sich ein Controlversuch mit einem Kupferdrahte. (Auch früher waren derartige Controlversuche von Zeit zu Zeit angestellt worden). $H = 1D$, $M = \text{Gr. Masch. } (p = 1000 \text{ bis } 1200).$ $l = 2220$, $d = 0,70$. Mittelwerthe:

$$w_0 = 0,14138 \quad w = 0,14149$$

$$w_0 = 0,14144$$

$$\delta = + 0,00056.$$

Es ist also für Kupfer δ erstens positiv und zweitens seinem absoluten Werthe nach viel kleiner als in 29, obgleich p grösser ist. Uebrigens haben alle übrigen Versuche mit Kupferdrähten noch erheblich kleinere Werthe von δ ergeben. Sollten diese Widerstandsänderungen mit dem magnetischen Verhalten des Kupfers in Zusammenhang stehen, so würden sie die Allgemeinheit der von Schuster und Stewart¹⁾ an einem magnetisirten Kupferdrahte beobachteten Widerstandsabnahme widerlegen.

1) Phil. Mag. (4) XLVIII. p. 535. (1874); auch Pogg. Ann. CLIII. p. 205.

31. Die folgende Versuchsreihe diene dazu, zu zeigen, dass auch bei beträchtlichen Temperatureinflüssen der Einfluss der Magnetisirung nachweisbar ist. Es lässt sich unter gewissen vereinfachenden Annahmen leicht das Gesetz ermitteln, nach welchem der Widerstand im Hauptstrome durch Bestrahlung seitens der Spirale mit der Zeit sich ändert. Führt man nun überdies eine längere Reihe abwechselnder Bestimmungen von w_0 und w aus und notirt bei jeder die Zeit t , so erhält man durch die Zahlen w_0 die Constanten jenes Gesetzes. Construiert man dann die das Gesetz darstellende Curve (dieselbe ist im allgemeinen transcendent) und vergleicht sie mit der Beobachtungcurve, so findet man für die den Zeiten der Bestimmung der Grössen w entsprechenden Abscissen verschiedene Ordinaten. Diese Differenzen beziehen sich auf die Magnetisirung. Ich führe eine derartige Versuchsreihe mit der Gramme'schen Maschine und dem Drahte F_3 auf. w_0 , w_1 , w_2 seien die Widerstände für $p = 0$, $p = 400$, $p = 800$.

t	w_0 beobachtet.	w_1 beobachtet.	w_0 berechnet.	w_2 beobachtet.	w_0 berechnet.	
2h 50'	0,3285	—	—	—	—	$w_1 - w_0$
3h 7'	—	0,3294	0,3299	—	—	0,0005
13'	0,3315	—	—	—	—	—
17'	0,3326	—	—	—	—	—
20'	—	0,3332	0,3339	—	—	0,0007
22'	—	0,3338	0,3348	—	—	0,0010
27'	—	—	—	0,3346	0,3381	$w_2 - w_0$
34'	0,3416	—	—	—	—	0,0035

Für $\frac{w_1 - w_0}{w_0} = \delta_1$ findet man hiernach 3 Werthe von steigender Grösse, für δ_2 einen einzigen, nämlich:

$$\delta_1 = -0,0015 \quad -0,0021 \quad -0,0030$$

im Mittel also:

$$\delta_1 = -0,0022 \quad \text{und} \quad \delta_2 = -0,0106.$$

Vorausgesetzt ist hierbei natürlich, dass die durch die Aenderung von p hervorgerufenen Discontinuitäten durch die thermische Nachwirkung verdeckt werden.

Mit dem Werthe von δ in 29 sollte der Werth von δ_2 hier übereinstimmen. Denn H , M , n haben dieselben Werthe. Er ist jedoch mehr als doppelt so gross. Einen Theil der beobachteten und berechneten Curve gibt Taf. III Fig. 1 wieder.

§. 5. Hand in Hand mit den Versuchen über den Einfluss der Magnetisirung gingen Versuche über die Extraströme, welche durch jeden Strom im Eisen erzeugt werden. Ich will darauf verzichten, diese Versuche ausführlich mitzutheilen, da sie ihren wesentlichen Ergebnissen nach mit denen der Herren Herwig und Streintz übereinstimmen. Quantitative Angaben über die Stärke der Extraströme in irgendeinem vergleichbaren Maasse liegen jedoch seitens des letzteren Beobachters gar nicht vor, und auch Herwig gibt nur einmal an, dass dem nach Oeffnen des Hauptstromes erhaltenen Ausschlage der Galvanometernadel, falls der Strom fortbestanden hätte, eine Abnahme des Widerstandes um 0,0011 bis 0,00014 entsprochen haben würde. Da ich im allgemeinen von einer Erschütterung der Drähte absah, erhielt ich auch meist länger dauernde Extraströme, wodurch ich die Möglichkeit erzielte, zuweilen recht genaue Widerstandsmessungen der obigen Art auszuführen. Die Werthe, welche ich erhielt, sind zum Theil nicht unerheblich grösser, als der obige Herwig'sche. Die Vorzeichen dieser Werthe waren mit wenigen Ausnahmen, die sich durch fremde Einflüsse erklären, stets derart, dass beim Schluss des Hauptstromes der Maasswiderstand erhöht, beim Oeffnen dagegen verringert werden musste. Ferner finde ich beim Stahl die Ausschläge, wie Herwig, kleiner als beim Eisen; verfolge ich jedoch den zeitlichen Verlauf beider, der beim Eisen, besonders bei geglühten Drähten, ein viel schnellerer ist, als beim Stahl, so finde ich für die den Ausschlägen entsprechenden Integralströme nicht wesentlich verschiedene Werthe.

Weit stärkere Extraströme erhielt ich nun aber, wenn ich den Strom durch magnetisirte Eisen- oder Stahldrähte leitete, wenn auch ihre Richtung stets dieselbe war, als ob der Draht nicht magnetisch gewesen wäre. In denjenigen Fällen, in welchen der definitive Widerstand durch Magnetisirung erhöht wurde, entsprach dem Extrastrome stets ein noch grösserer Widerstand. Es machte sich dies dadurch kenntlich, dass, nachdem die Brücke für den unmagnetischen Zustand des Drahtes abgeglichen war, nun ein Ausschlag nach der Seite der grösseren Widerstände erfolgte, welcher grösser war, als der dauernden Ablenkung der Nadel entsprochen hatte, und auch diese letztere nahm, nachdem die Schwingungen der Nadel längst erloschen waren, in den meisten Fällen langsam noch ein wenig ab, bis sie den in den Tabellen des §. 4 wiedergegebenen Werth annahm. Aber auch in denjenigen Fällen, in welchen der Widerstand im magnetischen Zustande kleiner ist, erfolgte der Ausschlag stets zuerst nach der Seite der grösseren Widerstände. Auf Zahlenangaben verzichte ich, weil in denselben eine ähnliche Mannichfaltigkeit herrscht, wie in den Zahlen des §. 4. Mit der Grösse der magnetisirenden Kraft nimmt die Stärke der Extraströme zu, und zwar anfangs schneller, später (d. h. bei grossen Magnetisirungen) langsamer als diese.

Vorausgesetzt ist hierbei, dass der Hauptstrom erst einige Zeit nach dem magnetisirenden geschlossen werde. Schliesst man ihn kurz nach oder gar gleichzeitig mit demselben, so werden die Erscheinungen sehr unregelmässig. Gänzlich geändert werden sie, wenn man erst den Hauptstrom und dann den magnetisirenden schliesst. Die Schliessungsströme sind dann ungleich schwächer; sind sie aber der Beobachtung zugänglich, so ergibt sich ihre Richtung als die entgegengesetzte, d. h. sie entsprechen einer Widerstandsabnahme; zuweilen beobachtet man eine ganze Reihe oscillirender Extraströme.

§. 6. Die im §. 4 mitgetheilten Versuche scheinen mir geeignet, zwischen den bezüglichlichen Ergebnissen früherer Beobachter zu vermitteln. In der That finden sich fast alle diese, so divergent sie auch lauten mögen, in meinen Resultaten wieder und erhalten durch die Verschiedenheit der Umstände, unter denen sie gewonnen wurden, ihre vorläufige Erklärung. Beetz fand unter allen Umständen eine Zunahme des Widerstandes. Er scheint jedoch stets sehr starke magnetisirende Kräfte angewendet und nur mit Eisen-, nicht aber mit Stahlstäben operirt zu haben, und unter diesen beiden Bedingungen erhielt auch ich stets positive Werthe von δ . Stewart und Schuster beobachteten an einem magnetisirten Kupferdrahte bei grosser magnetisirender Kraft eine Abnahme des Widerstandes; er verhielt sich also wie meine Stahldrähte. Leider ist nicht angegeben, ob der Draht aus reinem (diamagnetischem) oder aus eisenhaltigem (paramagnetischem) Kupfer bestand, wie man ihn im Handel gewöhnlich erhält. Edlund und Mousson erhielten keine Aenderungen des Widerstandes durch die Magnetisirung, obgleich die Genauigkeit ihrer Messungen hinter der von Thomson nicht wesentlich zurückstand. Auch in meinen Tabellen finden sich einige, welche für δ den Werth Null ergeben. Endlich hat Adams¹⁾ eine vorläufige Mittheilung von H. Tomlinson veröffentlicht, deren Ausführung ich jedoch in den Transactions vergeblich gesucht habe. Nach diesen Angaben, welche übrigens äusserst wenig Anhaltspunkte gewähren, hat die Magnetisirung beim harten Stahl eine Abnahme, beim Eisen und weichen Stahl eine Zunahme des Widerstandes zur Folge. Dies ist in völliger Uebereinstimmung mit meinen Angaben, wenn man annimmt, dass die Magnetisirung, welche Tomlinson anwandte, stets eine beträchtliche war. Dafür spricht auch die enorme Grösse der Zahlen, welche ich mit δ bezeichne. Meine Werthe liegen zwischen den Grenzen:

1) Proceed. Royal Soc. June 17. 1875.

$$- 0,0186 \quad \text{und} \quad + 0,0281, ^1)$$

die Werthe Tomlinson's zwischen:

$$- 0,06 \quad \text{und} \quad + 0,04 (?).$$

Fügt man den Grenzwertb aus den Versuchen von Beetz:

$$+ 0,0006$$

hinzu, mit welchem der von Chwolson genau, der von Thomson einigermaassen übereinstimmt, so sieht man, dass meine Zahlen die Mitte halten.

Uebrigens scheint Tomlinson die Magnetisirungen ausgeführt zu haben, während der Hauptstrom geschlossen war. Ich habe erwähnt, dass in solchen Fällen ein Extrastrom auftritt, welchem eine Abnahme des Widerstandes entspricht. Da nun diese Extrastrome bei hartem Stahl oft sehr langsam verlaufen, so könnte vielleicht ein Theil der Abnahme um 6 Proc. hierauf kommen. Auch von der Zunahme um 1 bis 4 Proc. bei weichen Drähten könnte man einen Theil auf die von Tomlinson selbst zugegebene Erwärmung abrechnen.

§. 7. Im Folgenden will ich es versuchen, auf Grund der Theorie drehbarer Molecularmagnete die beobachteten Erscheinungen zu erläutern. Dabei bediene ich mich des Begriffes der Arbeit und definire dieselbe für den vorliegenden Fall als das Product aus der Kraft, welche zur Drehung eines Molecularmagnetes überwunden werden muss, in die Winkelgrösse dieser Drehung. Die im Eisen auftretenden Extrastrome sind bereits allgemein als Ausdruck derartiger Arbeitsleistung erkannt worden. Wenn ein durch eine constante electromotorische Kraft erzeugter Strom von einem bestimmten Momente an eine Arbeit leistet, welche er bis dahin nicht leistete, so gilt das Ohm'sche Gesetz nur noch unter der Voraussetzung, dass entweder die

¹⁾ Nur ein Versuch mit einem Stahldrahte hat bei sehr kleinem M ; H und sehr grossem absoluten Werthe von H den Werth $- 0.03$ ergeben.

Stromstärke i oder der Widerstand w einen andern Werth erhält. Gewöhnlich schreibt man, den ersteren Fall voraussetzend:

$$i = \frac{e - \frac{1}{a} \frac{\partial V}{\partial t}}{w},$$

d. h. man betrachtet die Grösse $\frac{1}{a} \frac{\partial V}{\partial t}$ (in welcher a den Arbeitswerth der Wärmeeinheit, V z. B. das Potential des Stromes Eins auf den Magneten bedeutet, in Bezug auf welchen Arbeit geleistet wird) als neue electromotorische Kraft, welche der ersten entgegenwirkt. Ich sehe jedoch nicht ein, warum es nicht auch erlaubt sein soll, zu schreiben:

$$i = \frac{e}{w + w_A},$$

wo w_A einen neuen, infolge der äusseren Arbeit zu w hinzukommenden Widerstand bezeichnet.²⁾ Jedenfalls lässt sich nicht, wie Colley³⁾ will, beweisen, dass diese letztere Gleichung falsch ist. Colley glaubt folgendermaassen schliessen zu dürfen: bezeichnet man mit T und T' die Zeiten, welche ohne und mit Arbeitsleistung erforderlich sind, um 1 g Zink in der Kette aufzulösen, so wäre, falls w sich änderte:

$$(1) \quad \frac{e^2}{w} T = \frac{e^2}{w + w_A} T' + q T',$$

wo q die in der Zeiteinheit geleistete Arbeit bedeutet; nun ist aber:

$$(2) \quad \frac{e}{w} T = \frac{e}{w + w_A} T';$$

folglich:

$$e = e + \frac{q}{e} (w + w_A),$$

was unmöglich ist.

1) Helmholtz, die Erhaltung der Kraft. Berlin 1847.

2) Vgl. jedoch Wiedemann, Galv. II. 2. p. 521.

3) Pogg. Ann. CLVII. p. 370. (1876.)

Die Gleichung (1) ist richtig, aber die Gleichung (2) ist ebenso wenig anwendbar, wie in dem andern Falle (wo e als veränderlich betrachtet wird) die entsprechende Gleichung:

$$(2a) \quad \frac{e}{w} T = \frac{e - \varepsilon}{w} T',$$

wo ε die Aenderung von e bedeutet. Beide Gleichungen sind vielmehr durch die gemeinsame:

$$(3) \quad T = T'$$

zu ersetzen, welche aussagt, dass mit i auch die Wärmeentwicklung abgenommen hat; und diese führt in unserem Falle zu der sehr wohl möglichen Gleichung:

$$\frac{e^2}{w} = \frac{e^2}{w + w_A} + q,$$

aus welcher sich ergibt:

$$(4a) \quad w_A = \frac{w^2 q}{e^2 - w q}, \quad \text{und} \quad q = \frac{e^2 w_A}{w (w + w_A)}. \quad (4b)$$

Diese Gleichung lässt sich leicht verificiren, wenn man den Extrastrom verfolgt, welcher bei Schliessung eines bekannten Stromes auftritt, wenn der Strom eine Magnetnadel von bekanntem Momente ablenkt, und wenn überdies die horizontale Componente der Intensität des Erdmagnetismus bekannt ist.¹⁾

In praktischer Hinsicht ist es jedenfalls am bequemsten, bei jeder Arbeitsleistung, sei es momentane

1) Dass auch in dem von Hrn. Colley vertretenen Falle (e veränderlich), die Gleichung (2a) nicht anwendbar ist, kann man schon daraus entnehmen, dass sie zu einem Widerspruche führt. Hr. Colley gelangt nämlich durch richtige Schlüsse zu der (der Gl. 4b) entsprechenden Gleichung:

$$q = \frac{\varepsilon (e - \varepsilon)}{w}$$

welche nicht richtig sein kann, da sie für unendlich kleine ε die Gl.

$$q = \frac{e d e}{w}, \quad \text{statt} \quad q = \frac{2 e d e}{w}$$

ergibt. Benutzt man dagegen auch in diesem Falle, wie oben, die Gl. (3) so kommt man zu der richtigen, zuletzt angeführten Gleichung.

oder dauernde, eine Aenderung des Widerstandes anzunehmen.

Hiernach muss der Widerstand eines Eisendrahtes im ersten Momente nach der Schliessung grösser, im ersten Momente nach der Oeffnung kleiner sein, als während der übrigen Dauer des Stromes. Denn dort gehen die Molecularmagnete infolge der richtenden Kraft des Stromes in eine der circularen Anordnung mehr oder weniger genäherte Stellung über, wobei der Strom Arbeit in Bezug auf die Directionskraft der Molecüle zu leisten hat; hier kehren die Molecüle mehr oder weniger in ihre natürliche Lage zurück; die Directionskraft leistet also Arbeit in Bezug auf den Strom. Hiermit stimmen die Beobachtungen vollständig überein.

Sobald diejenige actuelle Energie, welche die Molecularmagnete von der drehenden Kraft des Stromes empfangen, vollständig in potentielle umgesetzt ist, hat der Strom keine Arbeit in Bezug auf die Richtung der Molecularmagnete mehr zu leisten. Man müsste daher den Schluss ziehen, dass der Widerstand nunmehr seinen wahren, dem in innerer Ruhe (oder in bestimmter Wärmebewegung) befindlichen Eisendraht entsprechenden Werth annehmen werde, wenn man nicht zu bedenken hätte, dass durch die Wirkung der von dem Strome ausgeübten Drehkräfte der innere Zustand des Eisens (wie man sich denselben auch vorstellen möge) ein anderer geworden ist und bleibt, bis der Strom unterbrochen wird. Das Eisen könnte sonach zwei verschiedene Widerstände besitzen; der eine allein, nämlich derjenige des circularmagnetisirten Eisens, wäre ohne weiteres der Beobachtung zugänglich; der andere, der Widerstand des unmagnetischen, hätte aber eine wichtige theoretische Bedeutung, insofern er allein mit den Grössen vergleichbar ist, welche wir bei anderen Metallen schlechtweg den Widerstand nennen.

Angenommen nun, diese beiden Grössen seien in der That verschieden — und die Erfahrung zeigt, dass es sich so verhält, — so lässt sich doch kein auf speciellen Schlüs-

sen beruhender Weg vorstellen, auf welchem man entscheiden könnte, welche die grössere sei. In solchen Fällen sind in neuerer Zeit häufig mit Erfolg Betrachtungen angewendet worden, deren Ausgangspunkt das Princip von der Erhaltung der Kraft ist. Indem ich hier denselben Weg einschlage, stelle ich ein allgemeines Princip an die Spitze, welches aus jenem folgt, und das bisher, so viel mir bekannt ist, nur für specielle Fälle ausgesprochen worden ist. Dasselbe lautet:

Keine Kraft ist im Stande, „von selbst“ Zustände herzustellen, welche für ihr eigenes Wirken günstiger sind, als diejenigen, welche sie vorfand.

Hierin bedarf nichts der Erläuterung: auch die Bedeutung des Ausdruckes „von selbst“ ist allgemein bekannt, seit derselbe von Clausius¹⁾ eingeführt worden ist. Das Princip, in welchem er sich desselben zuerst bedient, „Wärme kann niemals von selbst von einem kälteren auf einen wärmeren Körper übergehen“, ist selbst ein specieller Fall des obigen Princip. Ein anderer ist das Lenz'sche Gesetz, welches die Richtung des inducirten Stromes bestimmt. Ferner gehören hierher die Thatsachen, dass bei den festen Körpern der kubische Compressionscoefficient mit dem Drucke abnimmt, die specifische Wärme und der galvanische Widerstand der festen Körper mit der Temperatur zunimmt u. s. w.

Für den vorliegenden Fall ist aus obigem Principe zu schliessen, dass der Widerstand des Eisens, wie wir ihn bei der Durchleitung eines Stromes beobachten, grösser ist, als jener ideale Werth. Daraus folgt zunächst, dass circularmagnetisirtes Eisen einen grösseren Widerstand hat, als unmagnetisches, wenigstens wenn die Grösse der Circularmagnetisirung diejenige nicht übersteigt, welche der Strom selbst hervorrufen könnte. Man kann jedoch offenbar diese Einschränkung fallen lassen. Ist nämlich

1) Die mechanische Wärmetheorie. I, p. 81.

die Circularmagnetisirung grösser, als der Strom allein sie zu erzeugen vermag, so gibt es doch stets eine andere Stromstärke von dieser Eigenschaft. Für diese letztere gilt also der obige Satz. Nun ist aber der Widerstand eines Eisendrahtes von bestimmtem magnetischem Zustande¹⁾ von der Stromstärke unabhängig; folglich ist jener Satz für jeden Betrag der Circularmagnetisirung gültig.

Es folgt aber weiter, dass durch schwache Längsmagnetisirungen der Widerstand verringert werden muss. Denn nach dem obigen ist anzunehmen, dass circularmagnetisches Eisen den Strom um so schlechter leitet, je stärker die Circularmagnetisirung ist; durch die hinzukommende Längsmagnetisirung wird aber ein Theil der circularen aufgehoben. In der That zeigen meine Versuche bei Eisen sowohl wie bei Stahl eine Abnahme des Widerstandes infolge schwacher Magnetisirungen.

Anders verhält es sich, wenn die längsmagnetisirende Kraft gross ist. Dann wird aus ihrem Zusammenwirken mit der circularmagnetisirenden Kraft des Hauptstromes eine Längsmagnetisirung resultiren. Und hier lässt die Theorie eine Lücke. Es kann der Widerstand längsmagnetisirten Eisens kleiner oder grösser sein als derjenige des unmagnetischen; im ersten Falle hat die Widerstandsfunktion nirgends ein Minimum oder Maximum; vielmehr steigt der Widerstand stetig vom Zustande des gesättigten Längsmagnetismus bis zum Zustande des gesättigten Circularmagnetismus; dieser Fall ist, wie die Versuche zeigen, beim harten Stahl verwirklicht; im andern Falle hat die Widerstandsfunktion ein Minimum für den unmagnetischen Zustand. Beim Eisen und beim weichen Stahl haben meine Versuche dies in der That ergeben; einer und derselben Ordinate der Widerstandscurve entsprechen hier zwei Abscissen, d. h. demselben

1) Dass dieser Zusatz erforderlich ist, zeigt sich im §. 8.

Widerstände entsprechen zwei magnetische Zustände, nämlich ein längs- und ein circularmagnetischer; die muthmaassliche Gestalt der Widerstandscurven gibt Taf. III Fig. 2 wieder. Hierdurch finden die Versuche 7, 21, 25 ihre Erklärung, sowohl, soweit ihre Ergebnisse positiv, als auch, soweit sie negativ waren. Mit Benutzung der Gesetze, welche über die Magnetisirung durch einen Kreisstrom bezüglich durch eine Spirale¹⁾, und über die circulare Magnetisirung durch den Draht selbst durchfliessenden Strom²⁾ aufgestellt sind, liesse sich das Verhältniss der electromotorischen Kräfte des magnetisirenden und des Hauptstroms, d. h. das Verhältniss $M:H$ berechnen, welches bei gegebenen Werthen von n , w_0 , l und d stattfinden muss, damit δ (für Eisen und weichen Stahl) verschwinde. Da jedoch die Kleinheit der Werthe von δ eine Prüfung dieser Berechnung kaum zulässt, verzichte ich darauf sie auszuführen. Nur erwähnen will ich, dass jenes Verhältniss nach den Versuchen ausser von n , w_0 , l , d auch von der Natur des Drahtes abzuhängen scheint. Dass die Abhängigkeit von der Dicke eine erhebliche sein muss, kann man durch folgende Betrachtung einsehen. Das längsmagnetische Moment, welches der Draht annimmt, ist bei gleichen magnetisirenden Kräften der Quadratwurzel aus der Dicke nahezu proportional³⁾; anders verhält es sich mit dem circularmagnetischen Moment; zwar scheint bei gleicher magnetisirender Kraft das circulare magnetische Moment nicht wesentlich von der Dicke abzuhängen; aber die magnetisirende Kraft ändert sich sehr beträchtlich mit der Dicke. Dieselbe ist nämlich:

$$P = c \int_0^{2\pi} \int_0^l \int_0^d \frac{r^2}{d^2} i dr dl d\varphi.$$

Führt man die Integration aus und benutzt die Gleichung:

1) Vgl. Wiedemann, Galv. II. 1. p. 180 und 329.

2) Streintz l. c.

3) Dub. Electromagnetismus. (1861.) p. 197.

$$i = \frac{H}{w_k + \frac{4f}{\pi d^2} l},$$

in welcher f den specifischen Widerstand des Eisens bedeutet, so erhält man für das Moment:

$$K = \frac{\text{const. } H l d}{w_k + \frac{4f}{\pi d^2} l} \cdot \varphi(d) \cdot \psi(l),$$

wo $\varphi(d)$ eine ganze, bei Aenderungen von d sich langsam in gleichem Sinne ändernde Function von d und $\psi(l)$ eine Function von l ist, auf welche es hier nicht ankommt. Für grosse l kann man es, wenigstens wenn d nicht zu gross ist, einrichten, dass w_k zu vernachlässigen ist; man findet dann:

$$K = \text{const. } H d^3 \varphi(d) \cdot \psi(l).$$

Aber selbst wenn d so gross ist, dass man umgekehrt $\frac{4fl}{\pi d^2}$ gegen w_k vernachlässigen kann, ist noch:

$$K = \text{const. } H d \varphi(d) \cdot l \psi(l).$$

während doch, wie erwähnt, das längsmagnetische Moment:

$$K' = \text{const. } M n \sqrt{l} \chi(l) \quad \text{ist.}$$

Als Ausdruck der Arbeit, welche der Strom bei Drehung der Molecularmagnete leistet, tritt, wie wir sahen, beim Schliessen des Stroms ein Extrastrom oder, wie dies ausgedrückt wurde, eine vorübergehende Vergrösserung des Widerstandes auf. Ist der Draht vorher längsmagnetisirt worden und befindet er sich beim Schlusse des Hauptstromes noch in diesem Zustande, so ist die Drehung durch letzteren jedenfalls viel geringer; hieraus könnte man auf den ersten Blick geneigt sein zu schliessen, dass auch die Arbeit kleiner sei, was der beobachteten Thatsache, dass die Extrastrome in diesem Falle stärker sind, widersprechen würde. Aber man hat zu erwägen, dass zwar die Drehung geringer ist, weil die längsmagnetisirende Kraft die Molecüle stärker zurückhält als die Directions-kraft, welche in dem ersten Falle allein der Kraft des

Hauptstromes entgegenwirkte, dass aber der andere Factor des Productes, welches die Arbeit darstellt, eben jene längsmagnetisirende Kraft, viel grösser ist als die Directionskraft. So lange die Drehungen unendlich klein sind, ändert sich nun die Kraft umgekehrt proportional mit dem Drehungswinkel; die Arbeit des Stromes bleibt also constant; wenn aber die längsmagnetisirende Kraft erheblich ist, also die Drehungen in die axiale Lage nicht mehr als unendlich klein betrachtet werden dürfen, so wächst die Arbeit, welche der Strom zu leisten hat, obgleich die Circulardrehung, welche er hervorbringt, kleiner ist. Bezeichnet man, um dies nachzuweisen, mit D die Directionskraft, mit H die richtende Kraft des Hauptstromes, so erhält man, zunächst von einer Längsmagnetisirung absehend, für die bei Drehung um den Winkel ψ für irgendein Molecül zu leistende Arbeit:

$$A = \int_0^{\psi} D \sin \psi \, d\psi.$$

Bildet nun die Richtung von D für dieses Molecül mit der Axe des Drahtes den Winkel φ , so ist ψ durch die Gleichung:

$$D \sin \psi = M \cos(\varphi + \psi)$$

bestimmt, aus welcher:

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{H \cos \varphi}{D + H \sin \varphi}$$

folgt. Setzt man diesen Werth in die Gleichung:

$$A = D (1 - \cos \psi)$$

ein, so findet man:

$$A = D \left(1 - \frac{D + H \sin \varphi}{W} \right),$$

wo W die Grösse $\sqrt{D^2 + 2HD \sin \varphi + H^2}$ bezeichnet.

Wollte man nun die Erscheinungen der Extrastrome mit Strenge beschreiben, so hätte man folgende Aufgaben zu lösen:

1) Wie gross ist der Mittelwerth von A für alle Molecüle des Drahtes?

2) Wie gross ist die entsprechende Arbeit für ein Molecül, auf welches ausser den Kräften D und H noch die Kraft M senkrecht zu H wirkt?

3) Wie gross ist der Mittelwerth dieser Arbeit für alle Molecüle?

Ich habe diese Rechnung unter folgenden Annahmen verfolgt: a) im unmagnetischen Zustande seien alle Werthe von φ zwischen 0 und $\frac{\pi}{2}$ gleich häufig vertreten; Werthe zwischen $\frac{\pi}{2}$ und π schienen mir wegen des labilen Gleichgewichtes, welches dann an gewissen Stellen des Drahtes herrschen müsste, sehr unwahrscheinlich; übrigens ist der Werth des Integrals, soweit er in Betracht kommt, hier von unabhängig. b) Die Richtungsunterschiede der Molecüle sollen mit zunehmendem M , also mit abnehmender Abweichung von der Axe des Drahtes rasch abnehmen, d. h. das Integral, welches, durch die Differenz seiner Grenzen dividirt, jenen Mittelwerth darstellt, soll in rasch sich nähernde Grenzen eingeschlossen sein und bei Werthen von M , welche gegen D gross sind, durch ein Differential zu ersetzen sein, also jener Quotient durch einen Differentialquotienten; der endliche Werth desselben stellt dann den Grenzwert der Arbeit des Stromes für gesättigten Längsmagnetismus dar.

Die Arbeit im zweiten Falle ist aus doppeltem Grunde grösser, als die erste. Einmal weil mit der zu überwindenden Kraft die Arbeit wächst; dies kann man schon ohne Kenntniss jener allgemeinen Ausdrücke auf folgende Weise einsehen; es ist:

$$\frac{\partial A}{\partial D} = 1 - \frac{2D + H \sin \varphi}{W} + \frac{D(D + H \sin \varphi)^2}{W^3}$$

$$\text{oder: } \frac{\partial A}{\partial D} = 1 - \frac{D + H \sin \varphi}{W} - \frac{DH^2 \cos^2 \varphi}{W^3}.$$

Nun kann man W in der Form:

$$W = \sqrt{(D + H \sin \varphi)^2 + H^2 \cos^2 \varphi}$$

schreiben. Die in dem Ausdrucke für $\frac{\partial A}{\partial D}$ von 1 abziehende Summe ist daher am grössten, wenn gerade:

$$D + H \sin \varphi = H \cos \varphi$$

ist, und in diesem Falle ist sie gleich:

$$\frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1.$$

Daraus folgt, dass $\frac{\partial A}{\partial D}$ niemals < 0 ist. (Man kann auch $\frac{\partial A}{\partial D}$ auf die Form:

$$1 - \frac{(D + H \sin \varphi)^3 + 2H^2 D \cos^2 \varphi + H^3 \sin \varphi \cos^2 \varphi}{W^3}$$

bringen, aus welcher man durch Entwicklung von W denselben Schluss zieht).

Was hier für $\frac{\partial A}{\partial D}$ bewiesen ist, gilt aber auch für $\frac{\partial A}{\partial M}$, falls D sehr klein gegen M ist; denn die längsmagnetisirende Kraft ist von derselben Natur wie die Directionskraft. Dies ist der eine Grund, weshalb die Arbeit des Stromes für längsmagnetisirtes Eisen grösser ist, als für unmagnetisches. Aber auch wenn die zu überwindende Kraft dieselbe ist, ist die Arbeit grösser, sobald der Winkel zwischen der Richtung der Kraft, welche die Arbeit leistet, und der Richtung des Molecüls bei Beginn der Arbeitsleistung grösser ist. Ich will wenigstens die obere Grenze dieser Aenderung berechnen; es bilde also das Molecül den Winkel φ mit der Axe; das eine mal wirke H sofort und magnetisire vollständig, d. h. der Drehungswinkel ψ sei gleich $\frac{\pi}{2} - \varphi$; diese Arbeit sei A_1 ; das andere mal wirke zuerst M und magnetisire vollständig; drehe also um φ ; sodann wirke H und magnetisire seinerseits vollständig, drehe also um $\frac{\pi}{2}$; diese Arbeit sei A_2 . Grösser als in diesem Falle, in welchem M von höherer Ordnung als D , H von höherer als M ist, kann das Verhältniss $\frac{A_2}{A_1}$ offenbar nie werden. Nun ist:

$$A_1 = D(1 - \sin \varphi) \quad A_2 = D,$$

also die Mittelwerthe:

$$[A_1] = \frac{2D}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} (1 - \sin \varphi) d\varphi = \frac{\pi - 2}{\pi} D,$$

$$[A_2] = \dots \dots \dots D,$$

$$\text{d. h.} \quad \frac{[A_2]}{[A_1]} = \frac{\pi}{\pi - 2} = 2,752\dots$$

Wenn also M wächst, so wächst A schneller als M ; erstens weil man mit immer grösserer Genauigkeit D gegen M vernachlässigen kann, und daher die obige Formel für $\frac{\partial A}{\partial D}$ immer strenger anwendbar wird; und zweitens, weil der längsmagnetische Zustand selbst eine Rückwirkung ausübt, die sich (in roher Annäherung) in Rechnung ziehen lässt, indem man zu A einen mit M von dem Werthe 1 bis zum Werthe 2,752... stetig wachsenden Factor hinzufügt. Wer die angestellten Beobachtungen über die Extrastrome auf diese Angaben hin prüft, wird sie qualitativ und, soweit dies bei der durchschnittlichen Unerheblichkeit der überhaupt auftretenden Ausschläge möglich ist, auch quantitativ bestätigt finden.

Ich habe die Extrastrome im Eisen als Ausdruck von Drehungsarbeit gekennzeichnet und diese Arbeit durch eine Widerstandszunahme, resp. Abnahme beschrieben. Der dem Schliessungsstrom entsprechende Werth des Widerstandes geht in den durch den Durchgang eines constanten Stromes oder durch eine dauernde Längsmagnetisirung (oder beides zugleich) bedingten Werth nicht plötzlich über, sondern ist mit ihm meist durch eine Nachwirkungserscheinung verknüpft. Auch von dem Wesen dieser kann man sich nach dem obigen leicht eine Vorstellung machen. Wirkt ausser der Directionskraft nur der Hauptstrom, so ertheilt derselbe den Moleculen eine Drehungsgeschwindigkeit, welche, je nach dem Werthe von H , stets positiv ist (Rotation) oder ihr Zeichen periodisch wechselt (Schwingung). Beobachten wir nun schon bei

einer in einer Kupferhülse sich bewegenden Magnethülse eine rasche Umsetzung der Massenbewegung in thermische, so wird dieselbe bei einem Molecule eines Eisendrahtes noch viel rascher erfolgen. Es tritt also eine Erwärmung auf, welche sich erst allmählich durch Leitung und Strahlung ausgleicht, und der Ausdruck dieser Erwärmung ist die Nachwirkungserscheinung. In der That wird nicht nur durch Längsmagnetisirung, sondern, wie Villari¹⁾ nachgewiesen hat, auch durch circulare Wärme erzeugt. Hierauf gehe ich nicht näher ein und erwähne nur, dass die Versuchsreihen 16 bis 18 des §. 4 und die Bemerkungen auf p. 308 (§. 5) hierher gehören; dass bei jenen Versuchen ausser D und H auch M wirkte, hat, wie sich zeigt, keinen wesentlichen Einfluss. Ueber den Verlauf dieser Art von Nachwirkung füge ich noch einige charakteristische Zahlen bei.

1) $M = 2B$, $H = 1D$, $n = 150$. Diese Zahlen waren so gewählt, dass δ fast gleich Null war. Draht f_1 . Der Hauptstrom wurde nach dem magnetisirenden geschlossen. t bedeutet die Zeit zwischen zwei Beobachtungen. Wegen der beträchtlichen Entfernung des magnetisirenden Stromes verstrichen meist einige Secunden zwischen Schluss oder Oeffnung des magnetisirenden Stromes und der ersten Beobachtung; die absolute Widerstandsänderung infolge der Drehungsarbeit lässt sich daher aus den Zahlen nicht entnehmen. s bedeutet Schliessen, \bar{o} Oeffnen des magnetisirenden Stromes. In Taf. III Fig. 3 sind dieselben Verhältnisse graphisch dargestellt; die verstärkt gezeichneten Stellen entsprechen Nachwirkungen.

Man sieht, dass beim Oeffnen die Nachwirkungsdauer geringer ist als beim Schliessen.

1) Nuovo Cim. (2) IV. Nov. — Dec. 1870.

t	w	Dauer der Nachwirkung beim Schliessen. beim Öffnen.		t	w	Dauer der Nachwirkung beim Schliessen. beim Öffnen.	
	0,7906			35''	0,7906	—	35''
s	0,7911	?		s	0,7911		
\bar{o}	0,7904	—	keine Nach- wirkung.	30	0,7906	} 50''	
s	0,7912			20	0,7905		
20''	0,7907	40''		20	0,7905		
20	0,7905			\bar{o}	0,7903	—	} 20''
\bar{o}	0,7903	—	} 20''	20	0,7905	—	
20	0,7905	—		s	0,7912	} 50''	
s	0,7911			40	0,7905		
15	0,7909		30''	10	0,7904		
15	0,7908			20	0,7904		keine Nach- wirkung.
30	0,7908	—		\bar{o}	0,7904		
\bar{o}	0,7905	—	35''	Mittel 45''		Mittel 15''	

2) Ohne Magnetisirung. $H = 2D$. Dicker, weicher Stahldraht F_6 . Es wurde abwechselnd die Brücke in welcher das Galvanometer stand, bei geschlossenem Strom und der Strom bei geschlossener Brücke geschlossen und geöffnet. Im ersten Falle kann ein Extrastrom überhaupt nicht auftreten. (Die Schwächung des Stromes im Draht durch Abzweigung ins Galvanometer konnte bei meiner Anordnung durchaus keinen merklichen Einfluss haben.) Im zweiten Falle tritt dagegen der volle Extrastrom in die Erscheinung; stark war derselbe nicht, aber trotzdem war die Nachwirkung gross. Es zeigte sich das in folgender Weise: Im ersten Falle trat ein erster Ausschlag s_1 und eine definitive Ablenkung u_1 ein; beide standen in einem constanten, nur durch die Natur der Galvanometernadel und der Dämpfung bedingten Verhältniss; im zweiten Falle trat ein Ausschlag s_2 auf, welcher grösser war als s_1 und, als die Nadel eben ihre periodischen Schwingungen beendet hatte, eine Ablenkung u_2 , ebenfalls grösser als u_1 , welche erst allmählich auf u_1 sank. In der Tabelle enthält jede Reihe zwei Versuche, nämlich einen jeder Art. Es war

$$w + w_k = 0.2389.$$

Nr.	s_1	u_1	s_2	u_2	sinkt auf (u_1)
1.	4,3	2,3	5,2	4,0	2,6
2.	4,9	2,9	6,0	3,9	2,9
3.	5,2	3,0	6,1	3,9	?
4.	5,5	3,4	6,4	4,1	3,4
5.	5,6	3,5	6,6	4,1	?
Mittel	5,1	3,0	6,1	4,0	3,0

Auf das langsame Wachsen aller Zahlen von Versuch zu Versuch werde ich bald zu sprechen kommen.

Hierher gehören auch einige schon gelegentlich erwähnte Thatsachen; so die Erscheinung, dass selbst in den Fällen, in welchen die Magnetisirung den Widerstand verringert, der erste Versuch das entgegengesetzte Ergebniss liefert; es wirkt nämlich die bei der Arbeitsleistung durch Reibung verursachte Wärmeentwicklung noch nach. Ferner hat das Oeffnen oft den entgegengesetzten Einfluss; d. h. der Widerstand wird durch die Magnetisirung verringert, wo er sonst vergrössert werden würde: oder, er wird stärker herabgedrückt, als es sonst der Fall wäre. Besonders stark tritt diese Erscheinung bei der Umkehr des Stromes hervor (vgl. §. 4. Versuchsreihen 10 und 11).

Mit grösserem Rechte glaube ich einige von den eben beschriebenen verschiedene Erscheinungen als specifisch magnetische Nachwirkung bezeichnen zu dürfen¹⁾; ich beschränke mich jedoch hier auf eine kurze Angabe.²⁾ Erstens nimmt die Stärke der Extraströme bei häufigem Hindurchleiten des Stromes, bezüglich bei häufiger Magnetisirung zu. Diese Erscheinung hat schon Herwig beobachtet und durch eine zunehmende Beweglichkeit der Theilchen erklärt. Die Tabelle 2 (p. 325)

1) Wie ich aus einer soeben erschienen Abhandlung von Fromme (Wied. Ann. IV. p. 76) ersehe, bedient sich auch der Verfasser derselben für analoge Erscheinungen desselben Ausdrucks.

2) Vgl. Herwig, Streintz l. c., ferner Herwig, Pogg. Ann. CLVI. p. 430 (1875).

zeigt dieselbe sehr deutlich. Zugleich ergibt sich aus ihr, dass die Nachwirkung infolge der Arbeitsleistung, welche der Gegenstand jener Tabelle ist, nicht gleichzeitig zunimmt. Denn die Zahlen u_2 sind nahezu constant und die Differenz $u_2 - u_1$ sinkt von 1,7 durch 1,0 — 0,9 — 0,7 bis auf 0,6. — Im Zusammenhange hiermit steht es, dass der Widerstand des Eisens bei häufigem Hindurchleiten des Stromes überhaupt nicht unerheblich wächst. Diese Erscheinung ist nicht mit der von v. Quintus Icilius beobachteten zu verwechseln, nach welcher der Widerstand aller Metalle nach einmaligem, aber lange anhaltendem Stromdurchgange zunimmt. Die Erscheinung beim Eisen tritt vielmehr in der ersten Zeit der galvanischen Benutzung auf und verschwindet meist schon nach zehn- bis hundertmaligem Schliessen. So ergab sich bei einem Eisendrahte ($l = 1670$, $d = 0,20$, $H = 2D$, $M = 1D$):

ursprünglich:	$w = 7,3501$	längsmagnetisirt . . .	7,3547
nach 10mal. Schliessen	7,3539	10 mal magnetisirt . . .	7,3541
„ 100 „ „	7,3552(const.)	entmagnetisirt . . .	7,3559

Diese Zahlen zeigen die Nachwirkung sowohl bei der Quermagnetisirung durch den Strom als bei der Längsmagnetisirung. Dass die Abnahme des Widerstandes infolge der letzteren so gering erscheint (nachdem die Verhältnisse des Drahtes stationär geworden waren, wurde sie bei gleichen Werthen von H , M , n viel grösser), liegt offenbar daran, dass die beiden Nachwirkungen, wie es ja bei diesen Erscheinungen meist der Fall ist, nicht voneinander unabhängig verlaufen, dass also infolge der beschleunigten Nachwirkung der häufigen Quermagnetisirung ein Theil der Widerstandsabnahme verdeckt wird.

Nach dem vorangegangenen scheint die Vermuthung nahe zu liegen, es möchten auch die mit dem magnetischen Zustande andauernden Aenderungen des Widerstandes durch Magnetisirung als Ausdruck gewisser Arbeitsleistungen aufzufassen sein. In der That werden beim Durchgange eines Stromes durch

einen Eisendraht constante Rotationen der Molecüle erzeugt werden, welche bei einer Aenderung der Anordnung, wie sie die Magnetisirung hervorruft, nicht ungeändert bleiben können. Sind diese Betrachtungen auch sehr hypothetischer Natur, so scheinen sie mir doch immerhin noch mehr Anhaltspunkte zu gewähren, als die Betrachtungen von Beetz.

Von verschiedenen Seiten sind Versuche gemacht worden, neue Anhaltspunkte durch künstliche Quermagnetisirung des vom Strome durchflossenen Eisens zu gewinnen. Ich habe diese Idee deshalb bisher experimentell nicht verfolgt, einmal, weil nicht, wie man aus den stillschweigenden Voraussetzungen der betreffenden Autoren schliessen könnte, der Längsmagnetisirung einfach die Quermagnetisirung gegenübersteht, vielmehr hier wiederum, je nach der Anordnung, eine Menge verschiedenartiger Magnetisirungen denkbar sind; (der Bestimmtheit halber habe ich deshalb die hier behandelte als Circularmagnetisirung bezeichnet); sodann, weil diese Versuche nothwendig eine noch grössere Feinheit der Messung erfordern, als die Versuche mit Längsmagnetisirung. Die Theorie fordert, dass künstliche (d. h. zu der durch den Hauptstrom erzeugten hinzukommende) Circularmagnetisirung den Widerstand, falls sie ihn überhaupt noch ändert, vergrössert oder verkleinert, je nachdem der Sinn der künstlichen und der natürlichen Circularmagnetisirung derselbe oder der entgegengesetzte ist, und je nach der Stärke beider. Ein Versuch hierüber ist mir nicht bekannt. Dagegen hat W. Thomson¹⁾ den Strom durch eine quadratische Eisenplatte in einer zu der Magnetisierungsrichtung geneigten Richtung hindurchgeleitet. Die Pole des Electromagneten lagen an zwei gegenüberliegenden Seiten des Quadrats, die Electroden des Hauptstroms in zwei gegenüberliegenden Ecken. Von den einzelnen Stromfäden, in welche die Platte unter diesen Um-

ständen zerfällt, untersuchte Thomson die beiden am Rande sich hinziehenden, von denen jeder aus zwei aufeinander folgenden Kanten besteht, ABC und ADC (Taf. II Fig. 4). Das Ergebniss des Versuchs war, dass die Magnetisirung die Niveaulinie DB in die Lage DE verschob, dass also der Widerstand längs AB kleiner als längs AD und längs DC kleiner als längs BC war. Beetz und andere haben darauf hingewiesen, dass schon der mechanische Zug, der mit der Magnetisirung verknüpft ist, für sich allein dieses Ergebniss gefordert hätte. Ich glaube mich dieser Erklärung anschliessen zu müssen. Ich will jedoch zeigen, dass meine Theorie mit der Thomson'schen Beobachtung nicht im Widerspruche steht, dass sie dieselbe unter Umständen fordert und endlich, dass diese Umstände bei dem entsprechenden Versuche von Beetz¹⁾, welcher ein negatives Resultat hatte, nicht vorhanden waren.

Längs der Linie AB wird, bei dem Thomson'schen Versuche, die richtende Kraft des Electromagneten, je nach ihrer Stärke im Vergleich zu derjenigen des Stromfadens, die Circularmagnetisirung mehr oder wenig zerstören und in eine Quermagnetisirung überführen, bei welcher alle molecularen Nordpole nach derselben Seite des Raumes zeigen. Dabei wird der Widerstand in gewissen Linien des Stromfadens, nämlich in denjenigen, wo beide magnetisirende Kräfte dieselbe Richtung haben oder einen Winkel von 180° miteinander bilden, nicht erheblich sich ändern, in den übrigen aber im allgemeinen abnehmen. Der Gesamtwiderstand wird also entweder abnehmen oder, falls der Electromagnet stark ist, etwas, aber nicht erheblich, zunehmen. Gerade in dem letzteren Falle muss aber der Widerstand des Stromfadens BC sehr bedeutend zunehmen; denn hier vernichtet der Electromagnet die Circularmagnetisirung und erzeugt eine starke Längsmagnetisirung. Wie der Gesamtwiderstand von ABC sich ändert, darüber folgt hieraus freilich nichts; aber

1) l. c. p. 206.

ebenso wenig folgt hierüber etwas aus dem Thomson'schen Versuche; es folgt nur, dass eine etwaige Abnahme des Widerstandes ganz oder grösstentheils, eine etwaige Zunahme dagegen zum kleinsten Theile auf das Stück *AB* entfallen muss, und dies lehrt die obige Betrachtung in der That. Dass ich bei derselben auf die Wirkung der benachbarten Stromfäden keine Rücksicht nahm, ist ohne Einfluss; denn die Folge dieser Wirkung ist für *AB* gerade wie für *BC* die, dass die Molecularmagnete der gegen die Ebene der Platte senkrechten Stellung ein wenig genähert werden.

Bei dem Versuche von Beetz befand sich die zu magnetisirende Eisendrahtspirale innerhalb der magnetisirenden Kupferspirale, so dass die Windungen einander parallel waren. Es wurden mithin die Molecüle mehr oder weniger so gestellt, dass (die Windungen horizontal und der Strom im Kupfer im Sinne der Uhrzeigerbewegung fliessend gedacht) alle Nordpole nach unten zeigten. Der Hauptstrom dagegen rief eine circulare Magnetisirung hervor; in den der vorderen Hälfte der Eisenspirale angehörigen Drahtstücken wurden also, wenn auch der Hauptstrom im Sinne der Uhrzeigerbewegung floss, die Nordpole in den vorderen der Halbcylinder, in welche man jedes Drahtstück zerlegen kann, mehr oder weniger nach oben, in den hinteren (inneren) nach unten gerichtet; umgekehrt wurden in den Drahtstücken der hinteren Halbspirale die Nordpole in den hinteren (äusseren) Halbcylindern nach oben, in den vorderen nach unten gerichtet. Ist also die magnetisirende Kraft des Hauptstroms nicht sehr klein gegen die andere, so bietet die Hälfte der Stromfäden einen grösseren Widerstand, als vor der Quermagnetisirung, die andere Hälfte einen kleineren. Der Gesamtwiderstand bleibt also nahezu ungeändert. Das negative Resultat des Versuches von Beetz darf also nicht verwundern.

§. 8. Es ist noch die Frage zu beantworten, ob die skizzirte Theorie einen Einfluss auf die galvanischen Grundgesetze, sowie auf die galvanischen

Constanten des Eisens bedinge, und im Bejahungsfalle, wie sich dieser Einfluss geltend mache.

Dass ein solcher Einfluss vorhanden sein müsse, zeigt folgende Ueberlegung. In den Grundgesetzen kommt unter anderen wesentlichen Begriffen auch derjenige des Widerstandes vor; derselbe muss also, damit die Geltung jener Gesetze einen Sinn habe, ein für allemal festgestellt sein; für das Eisen ist das nach der durchgeführten Untersuchung eine missliche Aufgabe; der Erwägung, dass man, um Vergleichen mit anderen Metallen zu ermöglichen, den Widerstand des unmagnetischen Eisens in Betracht zu ziehen hat, steht die andere gegenüber, dass diese Grösse der Erfahrung unzugänglich ist. Da nun für sie allein die Gesetze von Ohm, Joule und Lenz etc. gelten, so muss die Erfahrung, welche sich nothgedrungen des empirischen Begriffs des Widerstandes bedient, Abweichungen von den Gesetzen ergeben.

Nach dem Ohm'schen Gesetze ist der Widerstand von der electromotorischen Kraft unabhängig.¹⁾ Das gilt natürlich auch von dem idealen Widerstande eines Eisendrahtes. Der factische Widerstand desselben muss sich dagegen ändern, wenn die electromotorische Kraft und mit ihr die Stromstärke geändert wird. Denn mit letzterer nimmt bis zur Sättigungsgrenze die Circularmagnetisirung zu und mit dieser der Widerstand.

Um diese Forderung experimentell zu prüfen, benutzte ich eine Vorrichtung, welche es gestattet, die electromotorische Kraft momentan zu ändern. Es war dies ein nach Angabe des Hrn. Prof. Meyer construirter Stöpselschalter. Auf einer Platte von Hartgummi sind die in Taf. III Fig. 5 schraffirten Messingstücke angebracht; durch Einsetzen von Metallstöpseln in die conischen Ausschnitte lassen sich dieselben untereinander, durch die schematisch

1) Nach dem jüngst erstatteten Berichte der British Association stimmt dies Gesetz für Kupfer, soweit die Genauigkeit der Beobachtung reicht, vollständig. (Beibl. II. p. 267. 1878.)

angedeuteten Klemmschrauben mit den übrigen Theilen der Schliessung in Verbindung bringen. Verbindet man z. B. ein galvanisches Element (immer den positiven Pol zuerst genannt) mit *E* und *B*, ein zweites mit *A* und *H*, ein drittes mit *G* und *F*, und stecken von den Stöpseln nur die bei *a*, *d*, *e*, *h*, während die Klemmen *C* und *D* zur Fortführung des Stromes dienen, so sind die 3 Elemente hintereinander eingeschaltet. Entfernt man jetzt die Stöpsel bei *a* und *h* und setzt solche bei *b*, *c*, *f*, *g* ein, so sind die 3 Elemente nebeneinander eingeschaltet.¹⁾

Für meinen Zweck schaltete ich den Umschalter bei *A* und *C* in die eine Diagonale des Wheatstone'schen Vierecks ein; zwischen *B* und *D* war ein Daniell'sches Element in der Reihenfolge Kupfer — Zink eingeschaltet, zwischen *F* und *H* zwei, zwischen *G* und *E* drei solche in derselben Richtung und hintereinander. Der Stöpsel bei *b* steckte nie; diejenigen bei *a* und *h* immer; steckte nun ausserdem nur noch:

g u. *f* *c*, *e*, *f* *c*, *g*, *d* *g* u. *d* *c*, *e*, *d* *e* u. *d*
so waren:

1 2 3 4 5 6

Elemente eingeschaltet.

Das doppelte Element und das dreifache können also einfach ausgeschlossen werden; das einfache kann freilich nur durch die Nebenschliessung bei *c* geschwächt werden; ich fand jedoch, dass es factisch dadurch ebenfalls ausgeschlossen wird.

Der Widerstand in den Elementen kam gegen den Widerstand der übrigen Schliessung kaum in Betracht;

1) Bei dieser Gelegenheit sei es mir gestattet, den beschriebenen und einen anderen, ebenfalls von Hrn. Meyer angegebenen, durch die Zeichnung Taf. III Fig. 6 sich selbst erläuternden Umschalter für Vorlesungszwecke zu empfehlen. Eine Combination eines Exemplars der ersten Art und zweier der zweiten Art macht es dem Vortragenden möglich, ausschliesslich durch Versetzung von Stöpseln von einem beliebigen galvanischen Versuche zu fast jedem beliebigen anderen überzugehen. Von Hrn. Mechanikus Pinzger hierselbst sind dieselben in vortrefflicher Ausführung zu beziehen.

die Stromstärke änderte sich also nahezu wie die electromotorische Kraft. Anfangs beabsichtigte ich, diese Versuche mit den schon zu den übrigen Versuchen benutzten Drähten anzustellen; dieselben zeigten jedoch ein so abnormes Verhalten, dass ich neue, galvanisch und magnetisch noch nicht bearbeitete an ihre Stelle setzen musste.

Ich will nur einige Beispiele für diese Abnormitäten anführen. Durch einen dünnen, geglühten Eisendraht (die mit ihm angestellten Magnetisirungsversuche sind nicht unter den oben ausgewählten) wurde der Strom von $2D$ ohne Pausen, je eine Minute lang, in der einen und in der anderen Richtung hindurchgeschickt. Es ergaben sich folgende Widerstände a und b :

a	14,57	14,42	14,29	14,23	14,14	14,11	14,06	14,06	14,03
	14,02	14,03	14,00	13,98	13,96	13,95	13,94	13,94	
b	13,74	13,37	14,15	13,71	13,38	13,69	13,43	13,81	13,39
	13,82	13,44	13,89	13,44	13,81	13,51	13,79	13,39	

Während also a . abgesehen von einer, mit allmählicher Erniedrigung der Umgebungstemperatur zusammenhängenden allmählichen Abnahme um 4 Proc. Constanz zeigt, bilden die Werthe b eine ziemlich regelmässige Zickzacklinie, deren Maxima im Mittel um 3 Proc. der ganzen Ordinaten abweichen. Ferner fand sich am nächsten Tage (bei anderer Befestigung des Drahtes) der Widerstand bei Anwendung von:

$$\left. \begin{array}{l} 1 D: w_1 = 14,92 \\ 2 D: w_2 = 15,63 \\ 3 D: w_3 = 16,33 \end{array} \right\} \begin{array}{l} w_2 - w_1 = 0,71 \\ w_3 - w_2 = 0,70 \end{array}$$

im Mittel:

$$\frac{w_{n+1} - w_n}{w_n} = \delta = 0,048.$$

Eine so kolossale Widerstandsänderung (fast 5 Proc.) hätte den Beobachtern nicht entgehen können; überdies ist sie an sich unwahrscheinlich; überschreitet sie doch sogar die Grenzen der Widerstandsänderungen durch Magnetisirungen, wie ich sie oben (§. 6) angegeben habe.

Eine dritte Versuchsreihe endlich zeigte, dass bei dauerndem Stromdurchgange der Widerstand enorm abnahm; es war nämlich:

Anfangs	nach 1 Min.	wieder nach 3	5	5	5 Minuten.
$w = 16,54$	16,23	16,01	15,92	15,83	15,82 (constant).

Sodann wurde der Strom kurze Zeit geöffnet und wieder geschlossen; ein abermaliges Abnehmen von w war die Folge; bei $w = 15,70$ schien wiederum Constanz eingetreten zu sein, und so ging es fort. Alle diese Erscheinungen charakterisiren sich ohne weiteres als Folgen der gestörten Molecularverhältnisse des Drahtes.

Auch bei neuen Drähten ist eine Schwierigkeit nicht unwesentlich. Durch jede Aenderung der electromotorischen Kraft wird das thermische Gleichgewicht des Drahtes gestört, indem die Ausstrahlung eine Zeit lang mit der gesteigerten Erwärmung nicht Schritt hält. In dem einen Zweige der Brücke, welcher ausschliesslich aus Neusilber besteht, hat aber die Erwärmung einen sehr geringen, in dem andern dagegen, in welchem der Eisendraht sich befindet, einen bedeutenden Einfluss. Ich habe versucht, aus den Zahlenangaben von Weber, Favre und Bosscha diesen Einfluss angenähert zu bestimmen. In den Einheiten Bosscha's ist die electromotorische Kraft eines Daniells rund 10^{11} , also in Volta'scher Stromeinheit und Siemens'scher Widerstandseinheit rund 10. Nun operirte ich stets so, dass ich nur ein einziges Element zufügte, nie gleichzeitig mehrere. Eine obere Grenze für die Erwärmung werden wir also erhalten, wenn wir die Erwärmung durch $2D$ berechnen; (diejenige durch $1D$ genügt nicht, weil die Erwärmung quadratisch wächst, wenn die electromotorische Kraft bei constantem Widerstande linear zunimmt). Wir haben also die electromotorische Kraft $E = 20$. Gerade so gross war im Mittel der Gesamtwiderstand derjenigen beiden Vierecksseiten, durch welche der betrachtete Strom floss, nämlich 10 im Vergleichszweige (w_2 , vgl. §. 3) und durchschnittlich 10 im

Eisendraht. Die Stromstärke ist also gleich 1. Dabei werden nach Favre in der Minute 1,6 Wärmeeinheiten erzeugt, also im Eisendrahte 0,8. Das Gewicht des letzteren betrug mindestens $10 \times 0,1 \times 10000 = 10000$ mg oder 10 g. Diese 10 g Eisen werden etwa ebenso stark erwärmt, wie 1 g Wasser durch eine gleiche Wärmemenge. Die Temperaturerhöhung beträgt also $0,8^\circ \text{ R.}$ oder 1° C. — 6 Secunden waren zur Widerstandsbestimmung erforderlich. Da nun eine Temperaturerhöhung um $0,1^\circ \text{ C.}$ den Widerstand 1 um 0,0005 erhöht, so erscheint ein thermischer Einfluss in der That nicht ausgeschlossen.

Diese Betrachtungen habe ich erst angestellt, nachdem ich durch zahlreiche Versuchsreihen ohne Berücksichtigung dieses Umstandes die Abhängigkeit des Widerstandes von der Stromstärke bereits nachgewiesen zu haben glaubte. Ich will die Mittelwerthe aus den Ergebnissen einiger dieser Versuchsreihen anführen, einmal weil man aus ihnen wenigstens so viel schliessen kann, dass auch nach Abzug der thermischen Widerstandsänderungen solche übrig bleiben und dann, weil der Vergleich mit späteren, von thermischen Einflüssen freien Versuchen in der That eine Bestätigung der eben durchgeführten Rechnung liefert.

1. Ungeglühter Eisendraht. $l = 2120$, $d = 0,28$. Im Mittel aus je 5 symmetrisch vertheilten Versuchen:

$$(1D) \ w_1 = 7,7570 \quad (2D) \ w_2 = 7,7600 \quad (3D) \ w_3 = 7,7636$$

$$w_2 - w_1 = 0,0030 \quad w_3 - w_2 = 0,0036.$$

Es ist also $w_{n+1} - w_n$ nahezu constant und:

$$\frac{w_{n+1} - w_n}{w_n} = \delta = + 0,00043.$$

Diese Zahl liegt zwar unter dem gefundenen Grenzwerthe für den Einfluss der Erwärmung; der in diesem Falle dem Grenzwerthe entsprechende wahrscheinliche Werth des Einflusses beträgt jedoch keinesfalls mehr als die Hälfte des ersteren, also nicht über 0,00025. Es ist also mit grosser Wahrscheinlichkeit constatirt, dass der Widerstand mit der Stromstärke zunimmt.

2. Wiederholt.

$$w_1 = 7,7482 \quad w_2 = 7,7526 \quad w_3 = 7,7574, \text{ also im Mittel:} \\ \delta = 0,00059.$$

3. Wie der Versuch 2 ein grösseres δ ergeben hatte als Versuch 1. so ergab eine dritte Versuchsreihe einen noch grösseren Werth. Es war nämlich:

$$w_1 = 7,7469 \quad w_2 = 7,7528 \quad w_3 = 7,7587 \\ \delta = 0,00076.$$

Dieses allmähliche Wachsen von δ liefert eine Bestätigung der p. 332 gemachten Annahme, dass die grossen Werthe von δ bei dem dort untersuchten Drahte eine Folge seines vielfachen galvanischen Gebrauchs sein möchten.

4. Bei einem dünnen Eisendrahte fanden sich als Mittel aus vielen Versuchen, von denen stets nur zwei benachbarte zur Bildung der Widerstandsdifferenzen benutzt wurden, bei Anwendung Bunsen'scher Elemente:

$$w_2 - w_1 = 0,0037 \quad w_3 - w_2 = 0,0049 \quad \frac{w_3 - w_1}{2} = 0,0041, \\ \text{Mittel } 0,0042.$$

$$(w \text{ im Mittel} = 6,83); \text{ also: } \delta = 0,00061.$$

Wäre dies δ allein Folge der Erwärmung, so müsste es hier, im Vergleich zu dem δ der Versuchsreihe 1 viel grösser sein.

Die Ergebnisse einer andern Versuchsreihe, bei welcher die thermischen Einflüsse mindestens sehr gering waren, sind in Taf. III Fig. 7 graphisch dargestellt.

5. Der Antheil der Temperatureinflüsse an dem Werthe von δ musste sich an einem Kupferdrahte isolirt darstellen; das Kupfer war rein. $l = 18000$, $d = 0,41$ und w im Mittel = 4,164. Ich fand bei Anwendung derselben Bunsen'schen Elemente wie in 4:

$$w_3 - w_1 = 0,00090. \text{ also } \frac{w_3 - w_1}{2} = \delta = 0,00011.$$

Dieser Werth stimmt mit dem wahrscheinlichen Werthe des thermischen Einflusses für diesen speciellen

Fall überein, soweit bei derartig rohen Rechnungen Uebereinstimmung möglich ist.

Von verschiedenen Kunstgriffen, welche ich anwandte, um den Einfluss der Erwärmung auszuschliessen, hat sich schliesslich, wenigstens bei dünnen Drähten, der folgende am meisten bewährt. Der Widerstand des Eisendrahtes wurde angenähert bestimmt, etwa bis auf eine oder bis auf zwei Decimalstellen; beim Schliessen der Brücke erfolgte dann immer noch ein kleiner Ausschlag nach der einen Seite, etwa nach derjenigen, welcher ein zu kleiner Maasswiderstand entspricht. Es wurde dann die letzte Ziffer dieses Maasswiderstandes durch Einschaltung im Widerstandskasten um die Einheit erhöht, so dass jetzt beim Schluss der Brücke ein Ausschlag nach der entgegengesetzten Seite erfolgte; seien diese beiden Ausschläge für den Fall, dass n -Elemente benutzt werden, gleich a_n und b_n ; falls diese Grössen klein sind (bei den Versuchen überschritten die zugehörigen Winkel nie den Werth von 15 Minuten) und falls Inductionerscheinungen jeder Art ausgeschlossen sind, wird man einen beliebigen beobachteten Ausschlag s_n durch Division mit $a_n + b_n$ auf einen Zusatz-, resp. Abzugswiderstand reduciren können, je nachdem man diesen Ausschlag bei ausgeschalteter oder eingeschalteter Einheit in der letzten Decimalstelle des Maasswiderstandes beobachtet. Auf diese Weise kann man sich noch zwei weitere Decimalstellen mit grosser Genauigkeit verschaffen; ich habe daher die Versuche folgendermaassen angestellt:

- 1) w angenähert bestimmt,
- 2) $s_1 s_2 \dots s_{n-1} s_n s_{n-1} \dots s_2 s_1$ beobachtet und daraus ein System gleichzeitiger Werthe von $s_1 \dots s_n$ abgeleitet,
- 3) $a_1 + b_1, a_2 + b_2 \dots a_n + b_n$ beobachtet,
- 4) Versuch 2 umgekehrt wiederholt:

$$s_n s_{n-1} \dots s_2 s_1 s_2 \dots s_{n-1} s_n.$$

Dies gibt wieder ein System gleichzeitiger Ausschlagswerthe. Aus diesen beiden endlich wurde wiederum das

Mittel genommen; dasselbe stellt dann ein mit den Bestimmungen 3 gleichzeitiges System dar und lässt sich durch diese exact auf ein System von Zusatz- resp. Abzugswiderständen zurückführen.

Der Strom blieb hier durchschnittlich nur eine einzige Secunde geschlossen; ein thermischer Einfluss konnte sich also kaum geltend machen (vergl. unten); dagegen machten die Extraströme bei dicken Drähten das Verfahren unmöglich; ich musste mich daher auf dünne beschränken.

6. Harter Eisendraht f_{10} . $l = 24300$, $d = 0,21$. 1 bis 3 Daniell'sche Elemente. (Vorversuch.)

$w = 103,9$ Ausschläge (nach links¹⁾):

$$s_1 = 0,0 \quad s_2 = 2,3 \quad s_3 = 4,7 \quad s_2 = 2,9 \quad s_1 = 1,2.$$

Also sind die gleichzeitigen Werthe:

$$s_1 = 0,6 \quad s_2 = 2,6 \quad s_3 = 4,7.$$

Nun fand sich:

$$a_1 + b_1 = 4,7 \quad a_2 + b_2 = 8,6 \quad a_3 + b_3 = 12,2.$$

Es ist also:

$$w_1 = 103,913 \quad w_2 = 103,930 \quad w_3 = 103,939,$$

also im Mittel $\frac{w_2 - w_1}{w_1} = \delta_{12} = 0,00017$, also in der That viel kleiner als auf p. 334 f.

In den folgenden Tabellen der Resultate der exacten Versuche gibt der in der ersten Columnne stehende Index die Anzahl der Daniell'schen Elemente an, die zweite Columnne gibt die Summe $a + b$ der nach rechts und links gerichteten Ausschläge für eine Einheit mehr oder weniger in der letzten bei dem angenäherten w angegebenen Decimale; s und s' sind die vor und nach der Bestimmung von $a + b$ gefundenen Mittelwerthe der Ausschläge; w und w' die entsprechenden wahren Widerstände; r bedeutet rechts, l links.

1) Nach links bedeutet stets nach derjenigen Seite, welcher ein zu geringer Maasswiderstand entspricht.

7. Draht f_{10} . 1 bis 6 Daniell's. $w = 103,9$.

n	$a + b$	s	s'	w	w'	Mittel.
1	4,6	0,5 r	0,5 r	103,889	103,889	103,889
2	8,5	0,1	0,1	899	899	899
3	12,2	1,0 l	1,0 l	908	908	908
4	15,2	2,3	2,9	915	919	917
5	17,6	6,0	6,1	934	935	934
6	20,0	9,8	10,1	949	950	950

$$\frac{w_2 - w_1}{w_1} = \delta_{12} = 0,00010.$$

Von den Differenzen $w_n - w_{n-1}$ sind die ersten constant, nämlich resp. 10, 9 und 9; die beiden letzten dagegen sind grösser, nämlich 17 und 16; diese letzteren deuten auf thermische Einflüsse. Ueberhaupt sind diese leicht daran kenntlich, dass sie mit n wachsen, während der Einfluss, um den es sich hier handelt (wegen der allmählichen Sättigung des Drahtes) mit n abnehmen muss.

8. Geglühter Eisendraht f_{11} . $l = 43200$. $d = 0,205$. $w = 182,6$.

n	$a + b$	s	s'	w	w'	Mittel.	Differenz.
1	1,6	0,6 l	0,8 l	182,638	182,650	182,644	26
2	2,9	1,9	2,2	665	676	670	5
3	4,4	3,1	3,6	668	682	675	3
4	5,8	4,0	5,1	669	687	678	9
5	7,1	5,6	6,7	679	694	687	15
6	8,3	8,2	8,7	699	705	702	

Hier ist der Erwärmungseinfluss noch deutlicher vom Einfluss der Stromstärke zu unterscheiden. Was nun den letzteren betrifft, so ergibt derselbe:

$$\frac{w_4 - w_1}{w_1} = \delta_{14} = 0,00019.$$

Davon kommt auf: $\delta_{12} = 0,00014$. Bei dem harten Drahte f_{10} war die Abnahme der Grössen $w_2 - w_1$, $w_3 - w_2$ etc. eine viel langsamere. Jedenfalls geht dort der Einfluss der Stromstärke weit über $n = 4$ hinaus. Nun ist aber schon δ_{14} dort gleich 0,00028, dagegen $\delta_{12} = 0,00010$. Die Abhängigkeit des Widerstandes von der

Stromstärke ist also dort grösser als hier; dagegen ist hier δ_{12} grösser, d. h. die Abhängigkeit ist auf ein kleineres Gebiet concentrirt. Denkt man sich für beide Fälle Curven construirt, deren Abscissen die Stromstärken x , deren Ordinaten die Widerstände y darstellen, so werden zwar beide für wachsende x der horizontalen, geradlinigen Gestalt sich nähern, aber diese gerade Linie wird für den Fall harter Drähte eine grössere Ordinate besitzen und bei einer grösseren Abscisse beginnen. Vgl. Taf. III Fig. 8.

9. Wiederholung von 7. $n=102,4$.

n	$a + b$	s	s'	w	w'	Mittel.	Differenz.
1	3,4	2,0 <i>r</i>	2,9 <i>r</i>	102,341	102,315	102,328	
2	7,8	3,2	5,5	359	329	344	16
3	12,0	3,6	7,0	370	342	356	12
4	15,9	2,5	6,9	384	357	370	14
5	18,9	0,2	5,3	399	373	386	16
6	22,0	3,3 <i>l</i>	1 2	415	394	404	18

In allen qualitativen Verhältnissen stimmt diese Versuchsreihe mit 7 überein: die Differenzen nehmen sehr langsam ab, von $n = 4$ ab infolge thermischer Einflüsse zu; nur die absoluten Werthe der Differenzen sind etwas grösser; es wird nämlich:

$$\delta_{12} = 0,00016.$$

Um die für hartes und weiches Eisen gezeichneten Curven auch für Stahl festzustellen, habe ich auch Versuche mit Drähten von federhartem Stahl angestellt. Dieselben haben jedoch im allgemeinen nicht Resultate von entsprechender Zuverlässigkeit ergeben. Nur soviel liess sich aus ihnen schliessen, dass die Ordinate der geraden horizontalen Linie, in welche die Widerstandcurve mit wachsender Stromstärke ausläuft, hier noch grösser ist als beim harten Eisen, und dass diese bei einer noch grösseren Abscisse ihren Anfang nimmt. Ich will wenigstens eine solche Versuchsreihe mittheilen.

10. Stahldraht F_s . $l = 3500$, $d = 0,43$. Annähernd $w = 3,53$, resp. $w = 3,54$ (für s und s').

n	$a + b$	s	s'	w	w'	Mittel.	Differenz.
1	8	3,7 <i>l</i>	5,8 <i>r</i>	3,5346	3,5328	3,5337	10
2	14	8,3	9,3	59	35	47	11
3	19	11,6	8,6	61	55	58	4
4	24	13,5	7,6	56	68	62	10
5	28	19,9	7,6	71	73	72	8
6	31	25,8	7,0	83	77	80	

Es ist also: $\delta_{12} = 0,00033$.

Die Gesamtänderung ist aber selbst bei $n = 6$ noch nicht abgeschlossen.

Die beiden letzten hier folgenden Tabellen beziehen sich auf Controlversuche mit Kupferdrähten; bei beiden stellte sich für δ_{12} ein sehr kleiner negativer Werth heraus; bei grösseren n machte sich dann der Einfluss der Erwärmung geltend.

11. Reiner Kupferdraht. $l = 18000$, $d = 0,41$. w (angenähert) = 4,32, resp. 4,31.

n	$a + b$	s	s'	w	w'	Mittel.	Differenz.
1	6,8	2,0 <i>r</i>	0,4 <i>l</i>	4,3171	4,3106	4,3138	-2
2	11,2	3,6	0,6	68	05	36	+2
3	15,0	4,7	1,0	69	07	38	0
4	19,7	6,1	1,3	69	07	38	1
5	24,0	7,0	1,6	71	07	39	1
6	27,8	7,7	2,1	72	08	40	

$\delta_{12} = -0,00005$.

12. Plattirter Kupferdraht. $l = 15000$, $d = 0,12$. $w = 30,15$.

n	$a + b$	s	s'	w	w'	Mittel.	Differenz.
1	1,3	0,0	0,2 <i>l</i>	30,1500	30,1515	30,1507	-16
2	2,2	0,2 <i>r</i>	0,2 <i>r</i>	1491	1491	1491	+3
3	2,7	0,2	0,1	1493	1496	1494	+12
4	3,0	0,1 <i>l</i>	0,3 <i>l</i>	1503	1510	1506	26
5	3,2	0,9	1,1	1529	1534	1532	40
6	3,3	2,3	2,5	1569	1576	1572	

$\delta_{12} = -0,00005$.

Ich habe gezeigt, dass, wenn die Stromstärke von $1D$ an steigt, auch der Widerstand steigt, und bei weichen Eisendrähten konnten wir diese Steigung bis zu ihrer Grenze verfolgen. Wie ändert sich nun aber der Widerstand, wenn wir die Stromstärke, von $1D$ ausgehend, fallen lassen? Dass dann auch w fällt, ist zweifellos, es sprechen aber ferner zwei Umstände dafür, dass es schnell fällt, wenigstens bei weichen Eisendrähten. Einmal nämlich sahen wir, dass die Grösse $w_{n+1} - w_n$ mit zunehmendem n abnimmt, also mit fallendem n wächst, und es ist kein Grund anzunehmen, dass die Curve bei dem willkürlichen Werthe $x = 1D$ ihr Gesetz verändere; sodann aber geben die Magnetisierungsversuche uns directen Aufschluss über die totale Widerstandsänderung mit der Circularmagnetisirung, also auch mit der Stromstärke; die negativen Werthe von δ waren aber dort ungleich grösser, als die positiven Werthe, welche sich hier für δ_1 ergaben; der Rest muss also auf die Grösse δ_{01} kommen. Ich habe verschiedene Methoden versucht, diese Grösse zu bestimmen, d. h. den Widerstand eines Eisendrahtes bei unendlich kleinem Strome mit dem bei endlicher Stromstärke zu vergleichen. Sie scheiterten vorläufig sämmtlich, theils an der Empfindlichkeitsgrenze der Galvanometer, theils an der nicht durchführbaren Vergleichung, selbst wenn die absolute Bestimmung von w_0 gelungen war. Ich beabsichtige jedoch diese Versuche fortzusetzen.

Die durchgeführten Betrachtungen eröffnen einen Einblick in eine interessante Analogie mit Betrachtungen der Dynamik und der Thermodynamik, welche ich kurz aussprechen will:

1) Der Elasticitätscoefficient ist das Verhältniss eines Druckzuwachses zur erzeugten Volumenverminderung. Gleichzeitig mit der letzteren erfolgt aber eine Temperaturerhöhung. Je nachdem die letztere durch irgendeine Kraft, z. B. durch Strahlung oder Leitung ausgeglichen

wird oder nicht, erhält man für den Elasticitätscoëfficienten einen kleineren oder einen grösseren Werth.

2) Die specifische Wärme ist das Verhältniss einer Wärmemenge zur erzeugten Temperaturerhöhung. Gleichzeitig mit der letzteren erfolgt aber eine Ausdehnung. Je nachdem diese durch einen äusseren Druck ausgeglichen wird oder nicht, erhält man für die specifische Wärme einen kleineren oder einen grösseren Werth.

3) Der Widerstand eines Electricitätsleiters ist das Verhältniss einer electromotorischen Kraft zum erzeugten Strom. Aber, falls der Leiter magnetisch polarisierbar ist, erfolgt gleichzeitig eine Circularmagnetisirung. Je nachdem man dieselbe durch irgendeine äussere Kraft, z. B. durch Längsmagnetisirung, ausgleicht oder nicht, erhält man für den Widerstand einen kleineren oder einen grösseren Werth.

Wie der zweite Satz dem ersten reciprok ist, so lässt sich dem dritten ein vierter gegenüberstellen; doch gehört derselbe nicht hierher.

Auch das Gesetz von Joule, betreffend die Erwärmung des Schliessungskreises, kann für das Eisen nicht streng gültig sein, oder, exacter ausgedrückt, wenn man in die Joule'sche Formel:

$$W = \text{const. } i^2 w$$

für die entwickelte Wärme W und für den Widerstand w Werthe einsetzt, welche die Beobachtung direct geliefert hat, so muss man für die Constante einen je nach dem Werthe von i verschiedenen, im Vergleich mit anderen Metallen aber stets zu grossen Werth erhalten. Lenz hat die zu gleichen Wärmeentwickelungen bei verschiedenen Stromstärken, Widerständen und Metallen erforderlichen Zeiten beobachtet; in der That fand er für das Product ti^2w nahezu constante Zahlen. Ganz constant dürfen aber diese Zahlen nicht sein. Die theoretische Ableitung des Gesetzes setzt nämlich die absolute Constanz

der Grösse w während des betrachteten Vorgangs voraus; thatsächlich findet dieselbe nie statt, weil der Widerstand von der Temperatur abhängig ist. Constant bleibt nur die electromotorische Kraft E . Da nun jene Constante von Lenz in der Form:

$$\frac{t E^2}{w}$$

geschrieben werden kann, so folgt, dass jede Zunahme von w durch den Vorgang des Stromdurchganges selbst jene Constante verkleinern muss. In der That hat dies Robinson¹⁾ bestätigt, indem er zeigte, dass t mit wachsendem i abnimmt. Beim Eisen findet nun aber eine Zunahme von w , abgesehen von der Erwärmung, noch besonders durch die Magnetisirung statt. Bei gleichen Werthen von i muss daher die Constante beim Eisen kleiner ausfallen, und zwar, da der wahre, in Betracht zu ziehende Werth nicht:

$$\frac{t E^2}{w}, \quad \text{sondern} \quad \frac{t E^2}{w_0}$$

ist, und da nach den Versuchen des §. 4 $\frac{w}{w_0}$ bis zu 1,03 ansteigt, kleiner bis zu 3 Proc. Ich habe im Eingange der Abhandlung die Durchschnittszahlen angegeben (p. 291), welche sich aus den Lenz'schen Versuchen ergeben. Die Differenzen derselben mögen am wahrscheinlichsten den Beobachtungsfehlern und der Ungenauigkeit der Methode zuzuschreiben sein. Versucht man jedoch die oben angestellten Betrachtungen mit der Lenz'schen Zahl für das Eisen in Einklang zu bringen, so gelingt dies vollständig. Denn in der That ist die Zahl für das Eisen die kleinste und zwar ist sie um etwa 3 Proc. kleiner als der Mittelwerth aus den drei andern Zahlen.

Die frühere Ansicht, dass der Temperaturcoefficient α des Widerstandes metallischer Leiter für alle reinen Metalle derselbe sein möchte, hat die Erfahrung nicht bestätigt. Die Abweichungen von dem mittleren Werthe 0,0037 sind

1) Trans. Irish. Acad. Vol. 22. (1) p. 3.

mitunter sehr beträchtliche. Auch müssen verschiedene Grössen einen Einfluss auf den Werth von α haben, z. B. die specifische Wärme, und ebenso auch der specifische Magnetismus. Da nach G. Wiedemann¹⁾ die Magnetisirbarkeit mit der Temperatur zunimmt, und da, wie gezeigt wurde, der Widerstand mit der Magnetisirung durch den Strom zunimmt, so muss der Widerstand des Eisens mit der Temperatur schneller zunehmen als bei andern Metallen. Der Werth von α ist nach meinen Angaben im Mittel etwa:

$$\alpha = 0,0045.$$

Dieser Werth ist in der That grösser als der Mittelwerth für die übrigen Metalle, für welche (mit wenigen Ausnahmen) α zwischen 0,0036 und 0,0038 liegt. In der Vermuthung, dass ein Theil dieser Differenz durch den starken Magnetismus des Eisens zu erklären sei, wird man bestärkt, wenn man beachtet, dass (mit Ausnahme des Platins) dem Wismuth, dem stärksten diamagnetischen Metalle, der kleinste Werth von α zukommt, nämlich:

$$\alpha = 0,0035$$

Ich habe hier nur einige Punkte herausgegriffen, welche eine Beziehung zu der behandelten Frage am unmittelbarsten hervortreten lassen. Der mit den betreffenden Theorien vertraute Leser wird auch auf andern Gebieten, z. B. bei den schönen Untersuchungen von G. Wiedemann über den Zusammenhang zwischen galvanischen Strömen, Torsion und Magnetismus, vielfach Punkte finden, welche einen Zusammenhang mit den obigen Auseinandersetzungen erkennen lassen.

Bei der Ausführung meiner Versuche im Laboratorium hiesiger Universität wurde ich durch die entgegenkommende Unterstützung des Hrn. Prof. Meyer sehr gefördert, wofür ich ihm auch an dieser Stelle meinen Dank ausspreche.

Breslau, 25. Juni 1878.

1) Pogg. Ann. CXXII. p. 346. Galvanismus (2.) II. (1). p. 604.