4. *Über den Wechselstrom-Gleichstromeffekt am Wismutdraht;* *von R. Seidler.*

(Auszug aus der Dissertation: Über die Leitung elektrischer Ströme im Wismutdraht. Leipzig, 26. Juni 1909.)

Nachdem Lenard¹⁾ 1888 die Wahrnehmung gemacht hatte, daß Wismut gegenüber Wechselstrom einen anderen Widerstand zeigte als gegenüber Gleichstrom, ist dies eigentümliche Verhalten des Wismuts Gegenstand vielfacher physikalischer Untersuchungen geworden. (Ein Referat über diese Nachforschungen ist in der Dissertation gegeben.)²⁾ Das Wichtigste aus den Ergebnissen dieser Arbeiten ist:

Außerhalb des Magnetfeldes ist für Wechselstrom der Widerstand des Wismuts kleiner als für Gleichstrom. Im starken Magnetfeld hingegen ist der Wechselstromwiderstand größer als der Gleichstromwiderstand. Die Widerstandsänderungen (außerhalb des Feldes) rühren davon her, daß Wismut bei Stromanstieg Energie aufnimmt, diese aber bei Stromabfall wieder von sich gibt. Wie aber diese Energieaufspeicherung des näheren vor sich geht, darüber lassen die ausgeführten Untersuchungen keinen zwingenden Schluß zu. Es stellte sich also für weitere Untersuchungen die Aufgabe, den in Rede stehenden Wismuteffekt noch genauer im einzelnen zu verfolgen, vorerst einmal den Effekt außerhalb des Magnetfeldes zu untersuchen, und erst, wenn über diesen letzteren etwas Klarheit gewonnen war, zu den verwickelteren Erscheinungen im Magnetfelde überzugehen.

Bei der Wiederholung der letzten Untersuchungen über den vorliegenden Gegenstand — der Versuche Pallme-Königs³⁾ mit einer nur wenig von der Pallme-Königschen Schaltung

1) P. Lenard, Wied. Ann. 39. p. 619. 1890.

2) Vgl. auch Paul Pallme-König, Ann. d. Phys. 25. p. 921. 1908.

3) Paul Pallme-König, l. c.

abweichenden Anordnung — wobei der Wismutdraht auf seine Widerstandsänderung hin in der Wheatstoneschen Brücke untersucht wurde — konnte beobachtet werden, daß das Nullinstrument der Brücke auch noch elektromotorische Kräfte in der Brücke anzeigte, wenn der in die Brücke geschickte Strom schon verschwunden war. Es mußte also in der Brücke eine elektromotorische Kraft noch nach dem Ausschalten des Stromes wirken. Sofort stellte sich also die Aufgabe, zu untersuchen, ob der Wismutdraht der Sitz dieser elektromotorischen Kraft ist.

Untersuchung des Wismuts auf eine elektrische Nachwirkung.

1. Beobachtungsmethode.

Es wurde die Anordnung gewählt, welche durch Fig. 1 wiedergegeben ist. I, II, III und IV stellen die Kontakte eines Helmholtzschen Pendelunterbrechers (aus der Fabrik von Prof. Edelmann, München) dar. Der Fallkontakt II schließt die Leitung, so daß der Strom der Akkumulatorenbatterie durch den Wismutdraht fließt. Nachdem der Strom konstant geworden ist, wird der Öffnungskontakt I aufgeschlagen und, da keine wesentliche Selbstinduktion im Kreise vorhanden ist, verschwindet der Strom sehr rasch. Das hierdurch hervorgerufene Abklingen der Spannung an den Enden des Wismutdrahtes wird mit Hilfe des als Spannungsmesser dienenden Kondensators verfolgt. (Ein direkt angeschlossenes Galvanometer konnte wegen seiner Trägheit nicht verwendet werden.) Den Kondensator von Anfang einer jeden Messung mit den Enden des Wismutdrahtes verbunden zu halten und ihn durch das Pendel nur abzuschalten, war unzweckmäßig. Es mußte nämlich verhindert werden, daß er sich erst auf die hohe Spannung auflud, welche an den Enden des Wismutdrahtes herrschte, während dieser vom Strom durchflossen war. Die so entstehende starke Kondensatorladung hätte sich erst nach und nach durch den Wismutdraht ausgeglichen und ihre Reste

Fig. 1. Schaltungsschema 1.

würden eindeutige Ergebnisse unmöglich gemacht haben. Es durfte also der Kondensator erst nach Beendigung des Stromabfalles angelegt werden. Dazu brauchte man einen rasch und gleichmäßig arbeitenden Schließungskontakt. Dieser wurde dadurch hergestellt, daß einer der mit Glimmer isolierten Stahlbolzen am fallenden Pendel, welcher beim Aufschlagen des zugehörigen Kontaktes an des letzteren Fallhebel anschlägt, mit dem Wismutdraht durch eine gut von der Umgebung isolierte Litze verbunden wurde. Es war dann im Moment des Aufschlagens Leitung hergestellt von dem einen Ende des Wismutdrahtes über den Stahlbolzen und den Fallhebel zu dem Kondensator (vgl. Fig. 2). Diese Leitung wurde einen Augenblick nach ihrer Schließung durch einen Kontakt III wieder unterbrochen, so daß der Kondensator nur ganz kurze Zeit eingeschaltet war, was aber zu seiner Aufladung genügte, so daß er anzeigen konnte, ob am Wismutdraht noch Spannung vorhanden war oder nicht; die Ladung wurde nachträglich mit dem Galvanometer ballistisch gemessen.

Fig. 2. Pendelkontakt.

Wenn nun bei der beschriebenen Versuchsanordnung eine Reihe von Versuchen so angestellt wurden, daß diese sich nur dadurch voneinander unterschieden, daß Kontakt I verschiedene Stellungen einnahm, so stellte man die Spannung am Wismutdraht zu verschiedenen Zeiten nach dem Stromabfall fest. Man konnte also eine Kurve aufnehmen, welche das Abklingen dieser Spannung zeigte. — Es war noch zu bedenken, daß durch die Verstellung des Kontaktes I die Dauer des Stromfließens geändert wurde. Diese erwies sich aber nach Versuchen als belanglos, sofern sie nur größer als $8 \cdot 10^{-5}$ Sek. war.

Bei dem oben beschriebenen Schließungskontakte war infolge des starken Anpralles Abklirren wahrscheinlich und deshalb Unsicherheit der Kondensatoraufladung zu befürchten.

Die gute Übereinstimmung der Versuche untereinander zeigt aber, daß sich die geschilderte Anordnung gut verwenden ließ.

Näheres über die Versuchsanordnung, über deren Eichung und über die verwendeten Apparate ist in der Dissertation zu finden.

2. Feststellung des Bestehens einer elektrischen Nachwirkung am Wismutdraht.

Um feststellen zu können, ob an den Enden des Wismutdrahtes nach dem Stromausschalten noch eine Spannung weiterbesteht, die bei anderen Drähten nicht vorhanden ist, mußte dafür gesorgt werden, daß man, ohne an der Meßanordnung im übrigen etwas zu ändern, den Wismutdraht durch einen beliebigen anderen Draht ersetzen konnte. Mit Hilfe von Quecksilbernäpfen war es nun leicht möglich, an Stelle des Wismutdrahtes einen Vergleichsdraht einzuschalten. Letzterer wurde meist durch einen Manganindraht von gleichem Widerstand wie der Wismutdraht gebildet.

Die zunächst zu beschreibenden Versuche wurden nun folgendermaßen ausgeführt: Die den Kondensatorzweig bedienenden Kontakte III und IV (Schema 1, vgl. Fig. 1) wurden bei allen Versuchen unverstellt gelassen; ihr gegenseitiger Abstand betrug 10 Trommelteile, was einem Zeitwert von $15 \cdot 10^{-6}$ Sek. entsprach (vgl. Dissert. p. 29). Der den eingepprägten Strom schließende Kontakt II, welcher so gestellt war, daß er vom Pendel so zeitig als möglich getroffen wurde, blieb ebenfalls bei allen Versuchen an seinem Ort. Nur Kontakt I wurde nach jedem Beobachtungspaar um eine Anzahl Trommelteile verschoben, so daß der Kondensator die am Versuchsdraht bestehende Spannungsdifferenz in verschiedenen Zeiten nach dem Stromabschalten messen konnte. Jedes Beobachtungspaar wurde gebildet von einer Beobachtung am Wismutdraht und einer anderen, bei welcher an Stelle des Wismutdrahtes ein Manganindraht von gleichem Widerstand eingeschaltet war.

Infolge der Änderung des Abstandes der Kontakte I und II floß der eingepprägte Strom bei den verschiedenen Versuchen verschieden lange Zeit. Beobachtungen bei verschiedenen Einstellungen des Kontaktes II zeigten aber, daß die Dauer

des Stromfließens ohne Belang für die Beobachtungsergebnisse war, sobald der Strom nur konstant geworden war.

Es fand sich nun an der Hartmann und Braunschen Spirale Nr. 499 (25 Ohm) in der Tat nach dem Abschalten des Stromes noch eine Spannungsdifferenz vor, wie sie am Vergleichsdraht nicht zu beobachten war. Sie klang in sehr kurzer Zeit ab, so daß sie nach $11 \cdot 10^{-5}$ Sek. bereits auf die Hälfte ihres Wertes herabgesunken war.

Es sei die Abklingungskurve wiedergegeben:

Tabelle 1. (Hierzu Fig. 3, Kurve II.)

Verschiebung des Kontaktes I in Trommelteilen	Galvanom.-Aus- schlag ¹⁾ für den Wismutdraht	Galvanom.- Ausschl. für den Vergleichs- manganin-Draht
0	Ausschalten des eingepprägten Stromes	
7	3300	3600
8	68	0
12	59	0
22	44	0
32	39	0
42	32	0
52	28	0
62	27	0
72	24	0
82	22	0
102	19	0
122	18	0
142	17	0
162	15	0
182	13	0
232	11	0
282	10	0
482	7	0

Zum Vergleich wurden auch andere von Hartmann und Braun bezogene Wismutdrähte auf demselben Wege untersucht. Diese Drähte waren gerade ausgespannt und, um sie vor Zerbrechen zu schützen, in Glasröhren an ihren Enden eingekittet; der Strom wurde durch angelötete Kupferdrähte zugeführt. Es zeigte sich hier derselbe Effekt, wie an der Spirale (vgl. Tab. 2 u. 3).

1) Die Galvanometerausschläge sind stets in $\frac{1}{10}$ mm angegeben. Die den Galvanometerausschlägen entsprechenden Spannungswerte hängen ab von den in der Anordnung befindlichen Widerständen (vgl. Dissert. p. 30). Im Mittel entspricht 1 mm Ausschlag $5 \cdot 10^{-2}$ Volt.

Tabelle 2. (Hierzu Fig. 3.)

Wismutdraht: 0,3 mm Durchmesser. 11,7 Ω .

Verstellung des Kontaktes I	Galvanometer- ausschlag für den Bi-Draht	Galvanometer- ausschlag für den Vergleichsdraht
0	Stromausschalten	
8	5800	5340
10	100	2
12	93	0
15	84	0
20	70	0
25	68	0
30	57	0
35	55	0
40	50	0
45	49	0
50	43	0
55	42	0
60	42	0
65	40	0
70	39	0
75	37	0
80	38	0
85	35	0
95	35	0
115	30	0
135	28	0

Stärke des eingepprägten Stromes:

$$i = \frac{8,0}{11,7} = 0,66 \text{ Amp.}$$

- I. Draht: 0,3 mm Durchm., 11,7 Ω ,
 II. Spirale (Draht: 0,3 mm Durchm.), 24,9 Ω ,
 III. Draht: 0,17 mm Durchm., 37 Ω ,
 1 mm Galv.-Aussschl. = $41 \cdot 10^{-3}$ Volt,
 1 „ „ = $46 \cdot 10^{-3}$ „
 1 „ „ = $53 \cdot 10^{-3}$ „

Fig. 3.

Tabelle 3. (Hierzu Fig. 3.)

Wismutdraht: 0,17 mm Durchmesser. 37,0 Ω .

Verstellung des Kontaktes I	Galvanometer- ausschlag für den Bi-Draht	Galvanometer- ausschlag für den Vergleichsdraht
0	Stromausschalten	
6	über die Skala	
8	25	2
12	19	0
15	15	0
20	13	0
25	11	0
30	9	0
35	8	0
40	6	0
45	4	0

Stärke des eingepprägten Stromes:

$$i = \frac{0,8}{37,0} = 0,22 \text{ Amp.}$$

Bevor irgend eine quantitative Deutung der Beobachtungsergebnisse vorgenommen wurde, mußte festgestellt werden, ob die am untersuchten Draht bestehende Spannungsdifferenz sich durch das Anlegen des Meßkondensators nicht verringerte. Man konnte dies dadurch prüfen, daß man die Meßkapazität veränderte. Wenn bei vergrößerter Meßkapazität die die Kondensatorladung messenden Galvanometerausschläge nicht proportional mit den Kapazitäten wuchsen, so reichten die vorhandenen Elektrizitätsmengen nicht aus, um den Kondensator auf die vor dem Kondensatoranschließen im Draht vorhandene Spannungsdifferenz aufzuladen.

Über einige Einzelheiten betreffs der Ausführung der diesbezüglichen Versuche vgl. Dissertation p. 38.

Die Galvanometerausschläge wuchsen den Meßkapazitäten proportional. Demnach können sich die Spannungen am Wismutdraht durch das Anlegen des Kondensators innerhalb der hier in Betracht kommenden Grenzen nicht ändern. Die Galvanometerausschläge zeigen also direkt die Spannungsdifferenzen an den Enden des Wismutdrahtes an.

3. Abhängigkeit der zurückbleibenden Spannungsdifferenz vom Strom.

a) Abhängigkeit von der Stromstärke.

Die Abhängigkeit der Nachwirkung von der Stärke des eingepprägten Stromes war leicht aufzufinden; man brauchte nur durch Erhöhung der elektromotorischen Kraft (Vergrößerung der Anzahl der Akkumulatoren) die Stromstärke bei sonst gleichen Versuchsbedingungen zu steigern und die Nachwirkung zu beobachten.

Die Versuche lehren, daß die Änderung der Stromstärke bei ein und demselben Draht nicht die Form, sondern nur den Maßstab der Abklingungskurve beeinflußt, und zwar erscheinen die Ordinaten in demselben Verhältnis vergrößert, in dem der Strom verstärkt worden ist.

b) Abhängigkeit der zurückbleibenden Spannungsdifferenz von der Geschwindigkeit des Stromabfalles.

Weniger einfach ließ sich die Abhängigkeit der Nachwirkung von Geschwindigkeit der Stromänderung feststellen. Es konnte die Geschwindigkeit des Stromabfalles nur dadurch geändert werden, daß man eine größere oder kleinere Selbstinduktion) bei den vorliegenden Versuchen gebildet durch das M. Wiensche Variometer) in den Kreis: Akkumulatoren-batterie-Wismutdraht einschaltete. Durch dieselbe wurde beim Stromunterbrechen ein dem ursprünglich fließenden Strome gleichgerichteter Extrastrom erzeugt, der infolge seiner, durch die Größe der eingeschalteten Selbstinduktion gegebenen hohen Spannung einen Öffnungsfunken hervorrief. Dieser lieferte nun dem Strome eine Brücke über die Öffnungsstelle, deren Widerstand rascher oder langsamer, je nach der Größe der eingefügten Selbstinduktion, praktisch unendliche Werte annahm.

Natürlich bietet ein solcher Öffnungsfunken wenig streng bestimmte Verhältnisse. Den Leitungskreis aber geschlossen zu halten und die elektromotorische Kraft des Stromes durch Entgegenschalten einer anderen zu vernichten, war hier nicht zweckmäßig, weil man eine so genaue Abgleichung der gegeneinanderzuschaltenden elektromotorischen Kräfte, wie sie hier

erforderlich gewesen wäre, nicht erreichen kann, ohne die Anordnung so zu komplizieren, daß bei dem raschen Stromabfall in ihr ein förmliches Gewirr von elektrischen Schwingungen hervorgerufen worden wäre.

Schwingungen traten nun allerdings auch bei der verwendeten Schaltung auf, aber infolge der Einfachheit der Anordnung war ihr Verlauf noch übersichtlich, und man konnte die Abklingungskurve als Achse, um welche die Schwingungen erfolgten, graphisch ermitteln. Es seien zunächst die Beobachtungsergebnisse an einem Wismutdraht von Hartmann und Braun vom Querschnitt 0,3 mm und vom Widerstand 11,7 Ohm angegeben. Die Stärke des eingepprägten Stromes betrug bei allen Beobachtungen 0,52 Amp.

a	Abklingung bei der Selbstinduktion	0	im Kreise.
b	" " " "	$5 \cdot 10^6$	" "
c	" " " "	$10 \cdot 10^6$	" "

Fig. 4 (Tab. 4).

Aus dem Kurvenbild ersieht man, daß es den Anschein hat, als ob die graphisch gefundene Abklingungskurve bei langsamerem Stromabfall gegen die bei rascherem Stromabfall nach rechts verschoben sei. Eine solche Verschiebung ließe sich dann erklären, wenn man annähme, daß die Nachwirkung nicht vom Stromabfall, sondern vom Fließen des Stromes hervorgerufen würde, denn dann wirkt bei langsamem Abfall die hervorgerufene Ursache länger auf den Draht ein als bei schnellem Stromverschwinden, wodurch eine solche Verschiebung der Kurve zustande kommen müßte. Ob man es wirklich nur mit einer zeitlichen Verschiebung zu tun hatte, konnte man prüfen, wenn man einen Draht mit anderer Abklingungskonstante

Tabelle 4.

Verschiebung des Kontaktes I in Trommelteilen	Galvanometeraussschläge bei einer zugeschalteten Selbstinduktion von		
	0 C.G.S.	$5 \cdot 10^6$ C.G.S.	$10 \cdot 10^6$ C.G.S.
0	Stromausschalten		
15	66	—	—
20	58	500	—
25	52	52	—
30	47	50	—
35	44	70	200
40	—	68	48
45	39	58	40
50	—	48	68
55	36	37	58
60	—	50	70
65	34	48	40
70	—	43	32
75	—	28	32
80	—	28	23
85	30	37	50
90	—	32	50
95	—	38	47
100	—	31	38
105	—	21	38
110	—	22	28
115	—	31	32
120	—	38	18
125	—	25	18
130	—	16	22
135	22	17	32

untersuchte. Wenn auch dort keine Veränderung der Kurvenform, sondern nur eine rechtsseitige Verschiebung auftrat, waren die obigen Schlüsse gerechtfertigt. Ein Wismutdraht, dessen Nachwirkung eine sehr geringe Abklingungsgeschwindigkeit zeigte, mußte sich für unseren Zweck besonders eignen. An einem solchen Draht, über dessen Herstellung später (p. 352) zu berichten sein wird, wurden die in Tab. 5 und Fig. 5 verzeichneten Werte gewonnen.

Der Widerstand des Wismutdrahtes betrug 8,7 Ohm, die Stromstärke bei allen drei Abklingungskurven 0,66 Amp.

Tabelle 5.

Verschiebung des Kontaktes I in Trommelteilen	Galvanometerausschläge bei einer zugeschalteten Selbstinduktion von		
	0 C.G.S.	$5 \cdot 10^6$ C.G.S.	$10 \cdot 10^6$ C.G.S.
0	Stromausschalten		
15	144	—	—
20	—	—	—
25	139	—	—
30	—	110	—
35	132	137	—
40	—	148	—
45	120	143	149
50	—	120	150
55	119	112	125
60	—	118	110
65	115	113	120
70	—	126	130
75	—	128	106
80	—	120	100
85	106	120	96
90	—	108	125
95	—	106	110
100	—	118	106
105	102	116	112
110	—	96	95
115	—	96	110
120	—	106	90
125	—	106	100
130	—	98	103
135	92	90	115

a Abklingung bei der Selbstinduktion 0 im Kreise.
 b „ „ „ „ „ $5 \cdot 10^6$ „ „
 c „ „ „ „ „ $10 \cdot 10^6$ „ „

Fig. 5.

Aus den Beobachtungsergebnissen geht hervor, daß der Nachwirkungseffekt von der Geschwindigkeit der Stromänderung im meßbaren Betrage (5 Proz.) nicht abhängig ist. Hingegen spricht die zeitliche Verschiebung der Kurven dafür, daß es das Fließen des eingepprägten Stromes und nicht seine Veränderung ist, was die Nachwirkung hervorbringt. Es müßte dann der Effekt, dessen Abklingung man beobachtet, bereits während des Stromfließens bestehen. Da er aber proportional der Stromstärke ist, kann er für konstante Ströme vom Ohmschen Widerstand nicht getrennt werden. Also ist seine Feststellung während des Fließens konstanter Ströme (bei den hier in Betracht gezogenen Stromstärken) unmöglich.

4. Verteilung des Effektes im Draht.

Es galt nun, etwas Näheres über den Sitz des Effektes im Drahte zu erfahren. Zunächst bot sich da die Frage dar, ob die elektromotorische Kraft an den Lötstellen zwischen Wismutdraht und Kupferzuleitung auftrat. Eine Vermehrung der Lötstellen mußte dann entweder die Nachwirkung erhöhen oder zum mindesten grobe Unregelmäßigkeiten hervorrufen. Es wurden daher abwechselnd Wismut- und Kupferdrahtstückchen zusammengelötet, so daß sich 20 Lötstellen ergaben. Der Wismutdraht hatte einen Widerstand von 27 Ohm und einen Querschnitt von 0,17 mm. An ihm wurde innerhalb der Beobachtungsfehler dieselbe Abklingungskurve gefunden, welche ein Wismutdraht von gleichem Widerstand und Querschnitt in einem Stück bei sonst gleichen Verhältnissen aufwies.

Es ist also erwiesen, daß die Lötstellen nicht Sitz des Effektes sind, sondern daß die Nachwirkung im Draht selbst vor sich geht.

Ein weiterer Versuch sei noch angeführt: Es wurde die zurückbleibende elektromotorische Kraft an einem Wismutdraht von 0,3 mm Querschnitt und einem Widerstand von 11,7 Ohm beobachtet. Dann untersuchte man ein Drahtstück, welches von demselben Stück abgeschnitten war, wie die eben erwähnte Probe, das aber nur die halbe Länge besaß. Die sonstigen Versuchsbedingungen waren dieselben wie vorhin, vor allen Dingen war der Strom von gleicher Stärke. Man fand hierbei, daß bei letzterem Drahtstück der Effekt innerhalb der Fehler-

grenzen der Beobachtungen genau den halben Betrag aufwies, wie der Effekt am ersteren Drahtstück.

Ein Draht von der halben Länge zeigt also bei gleicher Stromstärke nur den halben Effekt. Die Nachwirkung verteilt sich demnach über die ganze Länge des Drahtes. Zu diesem Ergebnis war auf anderem Wege auch bereits Wolff gelangt.

Aus der Proportionalität des Effektes mit der Stromstärke und der Drahtlänge folgt, daß die an den Drahtenden zurückbleibende elektromotorische Kraft bei Drahtstücken von demselben Querschnitt (und derselben sonstigen Beschaffenheit) aber verschiedener Länge stets denselben Betrag erreicht, wenn die den eingepprägten Strom hervorrufende elektromotorische Kraft dieselbe ist und der Stromkreis keine Widerstände enthält außer dem des Wismutdrahtes. Dieser Umstand bot eine große Erleichterung bei den weiteren Versuchen, da die Drahtstücke nicht immer leicht in derselben Länge zu erhalten waren.

Einfluß des Querschnittes.

Nach den eben erwähnten Versuchen liefert jedes Längenelement des Drahtes einen Anteil zur Bildung der an den Drahtenden zurückbleibenden elektromotorischen Kraft, welche sich als arithmetische Summe der einzelnen Anteile darstellt. Wäre nun die Spannung der Wismutnachwirkung allein dadurch eindeutig festgelegt, daß ein Strom von bestimmter Dichte durch die beispielsweise würfelförmig angenommene mit Wismut erfüllte Volumeinheit hindurchgegangen ist, so würde bei gleicher Stromdichte nur die Anzahl der in der Stromrichtung aneinandergelegten Würfel maßgebend sein, während die Anzahl der senkrecht zu dieser Richtung nebeneinanderliegenden Würfel nur die Größe der entstehenden Elektrizitätsmengen bestimmen würde. Nun messen wir aber nach dem auf p. 343 Geschilderten Spannungsdifferenzen und nicht Elektrizitätsmengen. Also müßten Drähte von verschiedenem Querschnitt — der Einfluß der Länge fällt nach p. 349 oben heraus — bei gleicher elektromotorischer Kraft des eingepprägten Stromes dieselben Abklingungskurven ergeben. (Der Widerstand der Meßanordnung kommt, da er sehr gering ist, hier nicht in Betracht, wodurch die Länge des Wismutdrahtes für

die Abklingungskurve gleichgültig wird.) Es wurden nun Drähte von vier verschiedenen Querschnitten (0,17 mm, 0,3 mm, 0,5 mm und 1,0 mm) untersucht. Die eingeprägte elektromotorische Kraft betrug 8,0 Volt. Folgende Abklingungskurven ergaben sich:

Tabelle 6.

Verschiebung des Kontaktes I in Trommelteilen	Galvanometerausschläge			
	der Drahtquerschnitt betrug:			
	0,17 mm	0,3 mm	0,5 mm	1,0 mm
0	Stromausschalten			
10	18	88	32	—
15	13	77	28	49
20	11	66	22	47
30	9	57	19	40
40	8	49	17	38
50	7	45	14	33
60	6	40	12	30
80	4	32	10	28
100	2	28	10	23
130	—	21	7	20
180	—	16	4	18

Sowohl der Betrag der zurückbleibenden elektromotorischen Kraft als auch die Abklingungsgeschwindigkeit sind bei den verschiedenen Drähten verschieden, doch so, daß keine deutliche Beziehung zum Querschnitt zu erkennen ist. Das Wismut als solches ist demnach nicht allein maßgebend für die Entstehung der Nachwirkung, sondern es spielen hier auch irgend welche Unterschiede in der Beschaffenheit des Wismuts eine Rolle. Dieser Umstand zeigte einen neuen Weg für weitere Untersuchungen: Aus der Art der Herstellung und aus der Beschaffenheit der Wismutfäden und der hervorgerufenen Beeinflussung der Nachwirkung mußten sich Schlüsse auf die Natur der letzteren ziehen lassen.

5. Einfluß der Struktur des Wismuts.

Die Untersuchungen des vorigen Abschnittes weisen darauf hin, daß die Beschaffenheit des Wismuts, vielleicht Struktur oder ähnliche Umstände, das Zurückbleiben einer elektro-

motorischen Kraft stark beeinflußt. Befestigt wurde dieser Schluß noch dadurch, daß die letzten von Hartmann und Braun bezogenen Wismutdrähte vom Querschnitt 0,3 mm die Nachwirkung in weit geringerem Grade aufwiesen als die älteren vom selben Querschnitt, sie betrug ungefähr nur den achten Teil des Effektes, der an den früher bezogenen Drähten beobachtet wurde. Änderungen in der Herstellungsweise konnten Hartmann und Braun nicht angeben; es empfahl sich also, selbst Drähte aus Wismut zu pressen und zu beobachten, welchen Einfluß Verschiedenheiten im Preßverfahren auf die Nachwirkung haben.

a) Gepreßte Wismutdrähte.

Über die Herstellung von gepreßten Wismutdrähten vgl. Dissertation p. 49.

Zunächst wurde versucht, einen Einfluß der während des Pressens herrschenden Temperatur festzustellen. Es ergab sich:

Die bei den höheren Temperaturen 225 und 250° hergestellten Drähte zeigen den Nachwirkungseffekt in stärkerem Maße als die anderen Drähte mit niedrigeren Preßtemperaturen. Doch ist der aufgefundene Einfluß nicht so regelmäßig, daß man aus ihm weitere Schlüsse hätte ziehen können.

Da man jetzt verschiedene Drähte von gleichem Querschnitt und verschieden starker Nachwirkung hatte, war es geraten, die Beschaffenheit der Drähte unter dem Mikroskop zu prüfen. Es wiesen die Bruchflächen der Drähte sowohl bunt durcheinander gewürfelte Kristallbrocken auf als auch Stellen, an denen ein kristallisches Gefüge nicht mehr erkennbar war. In den Drähten nun, welche starke Nachwirkung zeigten — sowohl in den Hartmann und Braunschen als auch in den selbstgefertigten —, waren mehr Kristallbrocken zu erkennen, als in denen mit schwächerer Nachwirkung, so daß es schien, als ob der Betrag der letzteren von der Anzahl der größeren kristallisch einheitlichen Teile des Drahtes abhinge.

War dieser Schluß richtig, so durfte ein Draht, welcher aus nur verschwindend kleinen Kristallbrocken aufgebaut war, einen nur ganz geringen Effekt aufweisen. Es wurde nun derartige Wismutdraht aus demselben Metall wie der gepreßte

Draht hergestellt, und zwar auf folgende Weise: Das Wismut wurde in einem Porzellanmörser vor dem Pressen zu feinem Staub zerrieben, was natürlich erst unmittelbar vor dem Pressen geschehen durfte, um der Oxydation keine Zeit zu lassen. Dieser Wismutstaub wurde in die Preßvorrichtung eingeschüttet und darin erwärmt und gepreßt. Beim Pressen zeigte sich, daß die Kräfte, welche nötig waren, um das Wismut durch das Preßbloch hindurch zu drücken, erstaunlich größer waren, wenn man vom Pulver ausging, als wenn man Metallbrocken verarbeitete. Hiernach ist der Schluß wohl nicht von der Hand zu weisen, daß das kristallische Gefüge, vielleicht die ausgeprägten Spaltflächen, einen großen Anteil an der Duktilität des Wismuts haben.

Der aus Wismutpulver gewonnene Draht war äußerst spröde, es war beinahe unmöglich, ihn zu biegen. Seine Leitfähigkeit unterschied sich kaum von der des Drahtes, welcher aus Metallstückchen gepreßt war, sie betrug $7,6 \cdot 10^{-6}$ C.G.S., während sie beim letzteren $7,5 \cdot 10^{-6}$ bis $8,2 \cdot 10^{-6}$ C.G.S. war. Unter dem Mikroskop betrachtet, zeigte die Bruchfläche ein regelmäßiges feinkörniges Aussehen.

Wie erwartet, war an diesem Draht die Nachwirkung unmeßbar klein. — Man mußte sich hier beim Anlöten der Kupferzuleitungen sehr vorsehen, daß man den Wismutdraht nicht über seinen Schmelzpunkt erwärmte, denn sonst kristallisierte das Metall aus und es trat eine Nachwirkung auf. Darum empfahl es sich, die Woodsche Legierung als Lot zu wählen.

Bei später zu beschreibenden Versuchen über die Abhängigkeit des Nachwirkungseffektes von der Temperatur wurde die Erfahrung gemacht, daß durch längeres starkes Erwärmen über 220° der Wismutdraht sich sehr veränderte; an dem erhitzt gewesenen Drahte war eine besonders starke Nachwirkung zu beobachten. Die Veränderung war eine dauernde, und eine zweite oder dritte Erwärmung hatte keinen Einfluß mehr. Diese Einwirkung der starken Erhitzung machte sich bei verschiedenen Drähten verschieden stark geltend. Am stärksten trat sie bei den Hartmann und Braunschen Drähten auf, während sie bei dem aus Pulver hergestellten Draht gerade nur noch wahrnehmbar war. Es seien einige Abklingungskurven angegeben.

Tabelle 7.

Verschiebung des Kontaktes I in Trommelteilen	Galvanometerausschläge bei Hartmann und Braunschem Draht			
	alter		neuer	
	vor Erwärmen	nach Erwärmen	vor Erwärmen	nach Erwärmen
0	Stromausschalten			
10	87	220	10	—
20	70	198	10	82
30	58	188	9	72
40	53	172	8	66
50	49	170	6	62
60	46	164	4	58
80	39	152	3	52
100	34	146	—	48
130	29	131	—	41
180	21	119	—	34
280	15	105	—	27
380	12	93	—	19
580	10	63	—	13
780	8	49	—	12
980	8	38	—	9
1480	7	17	—	3
Widerstand	13,4	13,3	2,2	2,1 Ω

I. Abklingungskurve am alten H.- und B.-Draht vor dem Erwärmen.
 II. „ „ „ „ „ nach „ „

Fig. 6.

Wie aus den hinzugefügten Zahlen zu erkennen ist, hat sich durch die Erwärmung der Widerstand stets ein wenig verringert. Ein Vergleich der Bruchflächen der Drähte vor und nach dem Erwärmen zeigte, daß durch das letztere das

kristallische Gefüge einheitlicher geworden war, daß die einzelnen kristallischen Brocken sich zu gut ausgebildeten Kristallen umgewandelt hatten.

b) Wismutfäden in Glasröhren.

Alle bisher erwähnten Versuche über den Zusammenhang der Beschaffenheit des Wismutdrahtes mit der Nachwirkungserscheinung weisen darauf hin, daß die kristallische Struktur eine wichtige Bedingung für das Zurückbleiben einer elektromotorischen Kraft im Wismutdraht ist. Stellte man nun Wismutfäden so her, daß bei ihnen die Kristalle nicht zertrümmert wurden, wie es beim Pressen des Drahtes geschah, sondern daß sie sich nach Möglichkeit ausbilden konnten, so mußte man dann eine besonders starke Nachwirkung beobachten können. Es wurde nun zunächst folgendes Verfahren angewandt:

Es wurde Wismut in einem kleinen tiefen Porzellantiegel geschmolzen und die auf dem Metall befindliche Oxydschicht sorgfältig entfernt, dann wurde ein mäßig angewärmtes (ungefähr 200°) Glaskapillarrohr, welches mit Äther und Alkohol gut gereinigt worden war, in das Wismut getaucht. Nun saugte man mit der Wasserluftpumpe rasch das weit über den Schmelzpunkt erwärmte Metall in das Kapillarrohr hinein und ließ es darin erstarren. Die auf diese Weise erhaltenen Wismutfäden hatten meist eine Länge von 20 cm. Die lichte Weite des Glasrohres betrug meist 0,7 mm, die Wandstärke 2 mm.

Als Beispiele für die Nachwirkung an so hergestellten Wismutfäden seien die Abklingungskurven in Tab. 8 angeführt. Zum Vergleich ist die Abklingung an einem Hartmann und Braunschen Draht mit angegeben.

Die Nachwirkung ist an diesen Fäden eine ganz bedeutende; es ist vor allem die Abklingungsgeschwindigkeit sehr gering. Mit der Brücke und dem Telephon gemessen ist hier der Wechselstromwiderstand über 1 Proz. kleiner als der Gleichstromwiderstand. Die mikroskopische Betrachtung der Bruchfläche eines solchen Wismutfadens zeigt eine scharf ausgeprägte Schichtung von einzelnen Kristallschuppen.

Tabelle 8.

Verschiebung des Kontaktes I in Trommel- teilen	Galvanometerausschläge				
	H. u. Br.- Draht	Wismutfäden in Kapillarrohr			
		Querschnitt:			
	0,3	0,7	0,7	0,7	0,3
0	Stromausschalten				
10	87	70	75	98	—
20	70	72	75	98	98
30	58	70	72	98	93
40	53	71	70	93	90
50	49	68	69	92	88
60	46	68	70	92	85
80	39	68	69	91	80
100	34	68	67	91	78
130	29	68	65	88	70
180	21	68	62	88	66
280	15	68	59	82	53
380	12	58	53	81	49
580	10	49	51	60	39
780	8	44	45	58	30
980	8	39	38	51	22
1480	7	29	29	35	15
1980		18	18	23	9
Widerstand:		0,81	0,98	0,71	5,18 Ω
Länge:		22,0	22,0	16,5	21,0 cm

Elektromotorische Kraft des eingep. Stromes 8 Volt.

Erwärmte man bei der eben geschilderten Herstellung der Wismutfäden das Glasrohr an einer Stelle stärker als an den übrigen, so blieb in solchen Teilen das Wismut länger flüssig als in der Umgebung, es befand sich als flüssiges Metall in einem allseitig abgeschlossenen Raume. Beim Erstarren dehnt sich nun aber das Wismut um 3 Proz. seines Volumens im flüssigen Zustande aus. Daher zersprang meist beim Erstarren des Metalles das Rohr an den stärker erwärmten Stellen. Blieb es aber unverletzt, so hatte man in diesem Rohrstück Wismut, welches unter sehr hohem Druck erstarrt war. Die zurückbleibende elektromotorische Kraft war an solchen Stücken sehr

klein. Um festzustellen, ob dem Druck die Verringerung der Nachwirkung zuzuschreiben war, wurden die betreffenden Kapillarrohre mit Wismut bis zur Hälfte am Schleifstein abgeschliffen, so daß das Metall bloß lag. Der Effekt wurde nun gemessen. Darauf erhitze man das Glas mit dem Wismut bis zum Schmelzen des letzteren. Nach dem Erstarren- und Erkaltenlassen wurde der Effekt wieder gemessen. Er zeigte sich dann bedeutend größer als vor dem Umschmelzen. Das Erwärmen und Abkühlen wurde im Luftbade bei langsamen Temperaturänderungen vorgenommen, um Störungen durch zu schnelle Abkühlung zu vermeiden. (Näheres vgl. Dissertation.)

c) In Glas ausgezogenes Wismut.

In einem Glasrohr schmolz man Wismut, entfernte die Luftblasen aus dem Metall und zog beides, Glasrohr und flüssiges Wismut, zu dünnen Fäden aus.¹⁾ Die Abklingungskurven, welche beobachtet wurden, waren ähnlich den unter b) erhaltenen.

d) Flüssiges Wismut.

Wenn die kristallische Struktur des Wismuts eine notwendige Bedingung für das Auftreten der Nachwirkung ist, so darf letztere beim flüssigen Wismut nicht vorhanden sein. Es war also von Interesse, auch das flüssige Wismut zu untersuchen.

Für die Versuche mit flüssigem Wismut wurde ein leicht handliches Luftbad (Fig. 7) konstruiert, welches ermöglichte, ohne großen Energieaufwand das Metall im flüssigen Zustand auf konstanter Temperatur zu erhalten. Dieses Luftbad bestand aus zwei ineinandergesteckten zylindrischen oben offenen Metallgefäßen *A* und *B*, von denen das äußere, *B*, von unten durch einen Bunsenbrenner geheizt wurde. Zur besseren Wärmeausnutzung und zum Schutz gegen abkühlende äußere Luftströmungen war es ininigem Abstand noch mit einem Schwarzblechmantel *C* umgeben, welcher mit seinem oberen, nach innen weit umgebogenen Rande auf dem Gefäße *B* ruhte. Der untere Rand von *C* reichte weit über das Ende des Ge-

1) Dies Verfahren ist ähnlich einem, welches Schnorr v. Karolsfeld anwandte. (Schnorr v. Karolsfeld, Diss. München 1904.)

fäßes *B* hinab, wodurch die vom Brenner herkommende heiße Luft gezwungen wurde, in dem Raume zwischen *B* und *C* hinaufzusteigen. Oben war die ganze Vorrichtung mit einem durch Bleigewichte aufgepreßten Asbestdeckel *D* abgeschlossen, und so mußte die zwischen *B* und *C* aufsteigende Luft durch Lücken im Rande von *B* nach *B* hindringen. Dort erwärmte sie gemeinsam mit der vom Boden von *B* aufsteigenden heißen Luft den oberen Teil von *A*. Dies letztere war oben ebenfalls durch einen Asbestdeckel *E* abgeschlossen.

Auf diese Weise war auch bei großer Erwärmung eine in allen Teilen von *A* gleiche Temperatur gewährleistet, was nötig war, um im Wismut nicht Temperaturverschiedenheiten und dadurch thermoelektrische Störungen zu bekommen.

Das Wismut befand sich im Gefäß *A* in einem U-förmig umgebogenen Kapillarrohre *K*, dessen lichte Weite 0,7 mm und dessen Länge insgesamt 15 cm betrug. An die beiden oberen Enden von *K* waren weitere Glasrohre angeschmolzen, welche durch die beiden Asbestdeckel *D* und *E* mittels Asbestwatte abgedichtet hindurchgeführt wurden. Diese beiden Glasröhren enthielten die Kupferdrahtzuleitungen zum flüssigen Wismut. Ein Quecksilberthermometer wurde ebenfalls abgedichtet durch die beiden Deckel nach *A* eingeführt.

Vor dem Gebrauch wurde das Glasrohr mit Äther und Alkohol gut gereinigt. Darauf wurde es in das Luftbad hineingesetzt und dann warf man das Wismut in kleinen Körnchen in eins der angeschmolzenen weiteren Rohre hinein und führte die beiden blank geputzten Kupferzuleitungen in beide Schenkel ein. Die obere Mündung der letzteren verstopfte man, um die Zufuhr kalter Luft zu verhindern, mit Asbestwolle und heizte den Apparat mit dem Bunsenbrenner an. Das Wismut schmolz nun und erfüllte die Kapillare und einen Teil der angeschmolzenen weiteren Glasrohre, wo die Kupferzuleitungen in das flüssige Metall hineintauchten.

Um zu sehen, ob das geschmolzene Metall und die ein-

Fig. 7. $\frac{1}{8}$ nat. Gr.

tauchenden Drähte einen zusammenhängenden Leitungsweg bildeten, waren zwischen diese beiden Drähte ein Element und ein Galvanoskop eingeschaltet, welches letzteres durch seinen Ausschlag anzeigte, ob das flüssige Wismut die Leitung zwischen den beiden Kupferzuführungen hergestellt hatte. War der Weg durch das flüssige Metall geschlossen, so wurden, nachdem natürlich Element und Galvanoskop entfernt waren, die in das Wismut führenden Kupferdrähte an Stelle des Versuchsdrahtes an die Meßanordnung angeschlossen.

Ehe man nun das flüssige Wismut untersuchen konnte, mußte man feststellen, ob die Übergangsstellen vom Wismut zum Kupfer nicht etwa Sitz von störenden thermoelektrischen Kräften waren. Man konnte dies ausführen, indem man eine Messung vornahm, genau wie zur Bestimmung der Nachwirkung, wobei man aber die Akkumulatorenbatterie abgeschaltet hatte. Es zeigte hierbei der Kondensator keine meßbare Ladung; demnach herrschten an den Übergangsstellen keine thermoelektrischen Kräfte, welche die Messungen hätten beeinflussen können.

Schaltete man nun die Akkumulatorenbatterie (8 Volt) wieder ein und prüfte, ob eine Nachwirkung vorhanden war, so zeigte abermals das Galvanometer keinen Ausschlag, ein Ergebnis, welches nach den früheren Versuchen zu erwarten war.

Unterbrach man die Heizung und ließ das Wismut in der Kapillare erstarren und untersuchte man dann das erstarrte Metall ohne an der Versuchsanordnung irgend etwas geändert zu haben, so zeigte dieses die Nachwirkung.

e) Einfluß der Richtung der Kristallachse.

Wenn nun die kristallische Struktur notwendig zum Entstehen der Nachwirkung ist, so bietet sich sofort die Frage dar, ob das Auftreten des Effektes daran gebunden ist, daß die Kristalle mit ihren Achsen verschieden gegeneinander gelagert sind, wie es in den Wismutdrähten tatsächlich der Fall ist. Es wurden daher aus einem Wismutstück mit ausgeprägter Struktur Säulchen herausgebrochen, deren Achsen parallel den ausgeprägtesten Spaltflächen im Metall waren.

1) Nach der durch Schema 1 p. 338 erläuterten Methode.

Diese kleinen Stäbchen hatten einen Querschnitt von ungefähr $\frac{1}{2}$ mm und meist eine Länge von 1 cm. Sie wurden mit Klebwachs auf eine Glasplatte aufgekittet und an ihren Enden zusammengelötet, so daß sie einen 10 cm langen Wismutstab bildeten. In allen Teilen hatten die Kristallachsen dieselbe Lage. Dazu genügte es natürlich nicht, daß man die einzelnen Säulchen der Länge nach aneinander lötete, denn dadurch war ja erst eine Richtung festgelegt. Um die Kristallstäbchen in der richtigen Lage aneinandersetzen zu können, wurde, bevor man die Stäbchen aus dem ganzen Stück herausbrach, auf diesem mit Farbe ein Streifen dort, wo das eine Ende aller herauszubrechenden Stäbchen lag, aufgezeichnet. Die Reste des Streifens fanden sich dann auf den einzelnen Säulchen wieder und bildeten Marken für deren richtige Lage. Das Zusammenlöten der Stäbchen mußte, um das Wismut nicht zu sehr zu erwärmen und dadurch zum Umschmelzen zu bringen, vorsichtig mit Woods Metall ausgeführt werden.

Auch an dem eben beschriebenen Wismutstabe zeigte sich die Nachwirkung; es wurde folgende Abklingungskurve gefunden:

Tabelle 9.

Verschiebung des Kontaktes I in Trommelteilen	Galvanometer- ausschläge	Verschiebung des Kontaktes I in Trommelteilen	Galvanometer- ausschläge
0	Stromausschalten	130	21
20	26	180	20
30	27	280	18
40	26	380	15
50	24	580	12
60	23	780	12
80	22	980	10
100	22	1480	6

Elektromotorische Kraft des eingepprägten Stromes 8 Volt.

Zweierlei lehrt uns diese Abklingungskurve. Der Umstand erstens, daß die Nachwirkung vorhanden ist, läßt erkennen, daß letztere nicht an verschiedene gegenseitige Richtung der Kristallachsen in verschiedenen Teilen des Wismutfadens gebunden

ist. Weiterhin muß aber auffallen, daß der Effekt recht gering ist, obgleich doch die Struktur so gut als möglich ausgebildet ist. Es hängt demnach die Nachwirkung von einer Eigenschaft des kristallischen Wismuts ab, welche nach verschiedenen Richtungen des Kristalles vorhanden ist, die man aber geringer ausgeprägt findet, wenn man parallel den Spaltflächen im Metall fortschreitet, stärker hingegen, wenn man ungefähr senkrecht zu dieser Richtung sich bewegt. Eine solche Eigenschaft ist nun die Spaltbarkeit selbst. Diese als bedeutungsvoll für unseren Effekt anzunehmen, legt dessen Abhängigkeit vom äußeren Druck nahe. Wir finden nämlich im Wismut in Richtung der Spaltflächen Schichten geringer Dichte eingelagert, und auf solche Schichten geringer Widerstandsfähigkeit muß der auf das Metall ausgeübte Druck besonders stark zusammenpressend einwirken, sofern nicht gerade die Richtung des Druckes in die Ebene der Schichten fällt. Dies ist aber bei den Drähten nicht der Fall, denn die Spaltflächen liegen fast immer schiefwinklig zur Drahtachse, während der Druck senkrecht zu dieser Richtung erfolgt.

Die eben erwähnte Schichtung ist nun am stärksten ausgeprägt parallel den Flächen, nach denen das Wismut am leichtesten spaltet. Wenn wir nun annehmen, diese Schichtung begünstige die Entstehung unserer Nachwirkung, so würde der Einfluß des Druckes und der Einfluß der Lage der Kristallachsen zur Stromrichtung erklärlich.

6. Einfluß der Temperatur.

Die Untersuchungsmethode blieb natürlich ganz wie bisher, nur mußte dafür Sorge getragen werden, daß das Wismut auf eine beliebig wählbare konstante Temperatur gebracht werden konnte.

Eine Veränderung der Temperatur des Wismutdrahtes bringt nun aber stets eine starke Widerstandsänderung in ihm hervor. Wegen der Notwendigkeit, möglichst viele Versuchsbedingungen konstant zu halten, vor allem auch wegen der Deutung der Galvanometeraussschläge (vgl. Dissertation p. 30), war es wünschenswert, daß für diese Widerstandsänderung ein Ausgleich geschaffen wurde. Das geschah, indem man direkt

hinter den Wismutdraht einen geradlinig ausgespannten Manganindraht schaltete. Auf diesem lief eine Klemmschraube, die es gestattete, eine beliebige Länge des Drahtes als Kompensationswiderstand zum Wismutdraht hinzuzuschalten.

Solange nun bei den Beobachtungen die Summe der Widerstände des Wismutdrahtes und des zugeschalteten Manganindrahtes dieselbe blieb, herrschte, wenn man in der Versuchsanordnung keine sonstigen Änderungen traf, im Versuchsdraht stets dieselbe Stromstärke. Dies war aber nötig, wenn man die Versuchsergebnisse bei verschiedenen Temperaturen miteinander vergleichen wollte.

Bei den Versuchen über den Einfluß der Temperaturen oberhalb Zimmertemperatur befand sich das Wismut in dem auf p. 357 beschriebenen Luftbade. Die tieferen Temperaturen wurden von einem Ätherbad¹⁾ geliefert, welches durch hineingeworfenen Kohlensäureschnee bis zu dem gewünschten Betrage abgekühlt wurde.

Es wurden auch Versuche bei der Temperatur der flüssigen Luft vorgenommen. Letztere befand sich hierbei in einem 5 cm weiten Dewarschen Gefäß und das zu untersuchende Metall wurde direkt in sie hineingetaucht.

Sowohl Wismutdraht als auch das im Glasmantel befindliche Metall wurden untersucht. Der Wismutdraht war bifilar auf ein Glimmerkreuz gewickelt, so daß ein leichter Wärmeaustausch mit der Umgebung stattfinden konnte. Die stromzuführenden Kupferdrähte, die zwecks Isolation durch Glasröhren geleitet waren, wurden an den Wismutdraht mit Wismut angeschmolzen; Zinnlot konnte hier nicht verwendet werden, da die Versuchstemperaturen teilweise über dessen Schmelzpunkt lagen. Besonderer Wert wurde darauf gelegt, die Lötstellen so nahe als möglich aneinander zu rücken, um keine Störung durch thermoelektrische Ströme zu erhalten.

Es wurden nun Beobachtungen bei verschiedenen Temperaturen vorgenommen, wobei auch nach der auf p. 358 beschriebenen Methode festgestellt wurde, daß keine thermoelektrischen Kräfte sich geltend machten. Es seien hier die

1) Alkohol verursachte infolge seiner durch das aufgenommene Wasser hervorgerufenen Leitfähigkeit Störungen, welche in scheinbarer Vergrößerung des Effektes bestanden.

Abklingungskurven, welche an einem Hartmann und Braunschenschen und an einem selbstgefertigten Draht beobachtet wurden, angegeben.

Tabelle 10.
Hartmann und Braunschenscher Draht.

Verschiebung des Kontaktes I in Trommelteilen	Galvanometerausschläge bei den Temperaturen					
	180°	140°	100°	20°	−13°	−69°
0	Stromausschalten					
10	89	89	88	87	77	47
20	79	75	76	71	63	39
30	74	68	65	62	54	33
40	67	62	58	54	49	29
90	49	44	40	38	31	18
140	36	32	28	26	20	12

Tabelle 11.
Selbstgefertigter Draht.

Verschiebung des Kontaktes I in Trommelteilen	Galvanometerausschläge bei den Temperaturen						
	205°	148°	20°	−5°	−40°	−75°	−192°
0	Stromausschalten						
20	67	65	62	59	49	37	0
30	59	58	53	54	44	31	0
40	52	52	48	47	40	28	0
50	48	48	43	41	35	25	0
60	46	45	40	41	33	21	0
70	42	41	37	35	30	19	0
80	42	40	36	34	28	19	0
90	39	38	33	31	25	18	0
100	38	36	30	29	24	18	0
110	35	33	28	29	22	17	0
120	33	32	27	24	22	15	0
130	32	30	26	22	20	14	0
150	30	28	23	21	19	14	0
180	28	25	21	19	17	12	0

Die an beiden Drähten gewonnenen Ergebnisse stehen in gutem Einklang miteinander. Die Größe der zurückbleibenden elektromotorischen Kraft sinkt mit der Temperatur, bei hohen Temperaturen sehr langsam, bei tieferen rascher.

Bei stärker ausgeprägter, kristallisch einheitlicher Struktur des Wismuts äußert sich der Temperatureinfluß in wenig anderer Weise als bei den angeführten Versuchen. So zeigten ein durch Erwärmen umgewandelter Hartmann und Braunscher Wismutdraht, ein ebenso behandelter selbstgefertigter Draht und schließlich ein aus Kristallstäbchen zusammengelöteter Wismutfaden Abklingungskurven, welche den angeführten ganz ähnlich sind.

Es wurden auch noch Versuche über den Temperatureinfluß vorgenommen, bei welchen sich das Metall in einem Glasmantel (vgl. p. 354 und 356) befand, und zwar wurde untersucht ein 10 cm langer Wismutfaden in einem Kapillarrohr Widerstand bei 20°C . 0,5 Ohm) und ein in Glas angezogener Wismutfaden (vom Widerstand 1,08 Ohm bei 20°C .).

Bei diesen Versuchen steigt die Nachwirkung, wenn die Temperatur von $+230^{\circ}$ abnimmt, bei der Temperatur der flüssigen Luft aber ist die zurückbleibende elektromotorische Kraft wieder kleiner als bei -68° . Offenbar hat man es hier mit der Übereinanderlagerung zweier Effekte zu tun. Über den bei den Wismutdrähten beobachteten Temperatureinfluß lagert sich noch die Wirkung der Veränderung des auf dem Metall lastenden Druckes des Glases. Da Glas als Ausdehnungskoeffizient $60 \cdot 10^{-7}$ und Wismut $128 \cdot 10^{-7}$ hat, so müssen bei den in Betracht kommenden Temperaturunterschieden erhebliche Änderungen des Druckes entstehen, wodurch sich die scheinbare Umkehr der Temperatureinwirkung erklärt; und so finden wir auch gleichzeitig eine Bestätigung der auf p. 355 gezogenen Schlüsse über die Einwirkung des Druckes auf die Nachwirkung.

7. Einfluß eines Kurzschlusses nach dem Stromausschalten.

Wollte man die elektrische Nachwirkung am Wismut auf bekannte Vorgänge zurückführen, so war die Beantwortung der Frage von großer Wichtigkeit, in welchem Maße die Spannungs-

differenz an den Enden des Wismutdrahtes von etwa im Draht angesammelter wahrer Elektrizität bedingt wird. Es legen ja bereits die Versuche über den Einfluß der Größe der Meßkapazität nahe, daß wir es nicht allein mit der Aufspeicherung eines beschränkten Elektrizitätsquantums zu tun haben. Aber die Wichtigkeit dieses Punktes erforderte es, daß genauere Untersuchungen angestellt wurden.

Zunächst wurden Versuche vorgenommen, bei denen der Gedankengang der folgende war: Nach dem Abschalten des eingepprägten Stromes wurden sofort beide Enden des Wismutdrahtes durch einen Draht von geringem Widerstand verbunden und, nachdem dieser Kurzschluß wieder aufgehoben war, wurde die Abklingungskurve, welche sich nach dem Kurzschluß ergab, aufgenommen.

Um den Kurzschluß mit der erforderlichen Schnelligkeit herstellen zu können, brauchte man einen Schließungskontakt, welcher mit der gleichen Sicherheit arbeitete, wie die Öffnungskontakte. Es wurde, da bei Benutzung der am Pendel befindlichen Fallschließungskontakte Unregelmäßigkeiten zu befürchten waren, ein ähnlicher Kontakt, wie einer auf p. 339 beschrieben ist, hergestellt. Nur mußte hier dafür gesorgt werden, daß der Kontakt auch bei längerem Schluß nicht abklirrte. Man erreichte das dadurch, daß man auf den am fallenden Pendel befindlichen Stahlbolzen ein 1 mm starkes Gummiplättchen kittete und auf dieses ein $\frac{1}{8}$ mm starkes Stahlplättchen, welches letzteres die eine Kontaktfläche vorstellte, während die andere von der Nase des Fallhebels, wie bei dem auf p. 339 beschriebenen Kontakt, geliefert wurde. Die Gummiunterlage verhinderte, daß bei kleinen elastischen Deformationen starke elastische Kräfte auftraten, welche dem Fallhebel so große Geschwindigkeit erteilt haben würden, daß er sich vom Stahlplättchen sehr rasch wieder gelöst haben würde. Außerdem wurde der Fallhebel durch die Stellschrauben in seinen Spitzenlagern so festgeklemmt, daß er mit mäßiger Reibung sich bewegte, wodurch eine allzu leichte Beweglichkeit aufgehoben war.

Da der Pendelunterbrecher nur vier Kontakte hatte, von denen zwei für den Kondensatorzweig, einer für das Einschalten und einer für das Ausschalten des eingepprägten Stromes nötig waren, so wurde zunächst versucht, einem Kontakte das Aus-

schalten des eingepprägten Stromes und die Herstellung der Kurzschlußverbindung zu übertragen. Aber infolge von elastischen Durchbiegungen stellte sich der Kurzschluß einen Augenblick eher her, als der Hauptstrom ausgeschaltet war, und es erfolgte durch den Kurzschlußzweig ein starker Stromstoß, welcher seinerseits nach dem Unterbrechen der Leitung für den eingepprägten Strom sich durch den Wismutdraht ausglich, wodurch in diesem störende Ladungen auftraten. Man mußte also die Unterbrechung des Stromes und die Herstellung des Kurzschlusses zwei getrennten Kontakten übertragen, und darum machte es sich nötig, noch einen weiteren, fünften Kontakt am Pendelunterbrecher anzubringen. In der Werkstatt des Institutes wurden nun zwei Pendelkontakte hergestellt, welche den bereits vorhandenen bis auf einige, durch den Raum-mangel am Apparat bedingte Konstruktionsabänderungen glichen. Sie wurden noch neben den alten vier Kontakten eingefügt.

Ehe man an die eigentlichen Versuche gehen konnte, mußte festgestellt werden, ob der Schließungskontakt, den wir oben beschrieben haben, nicht abklirrte (vgl. über diesen Punkt die Dissert. p. 75).

Für die Untersuchungen über den Einfluß eines Kurzschlusses ergab sich nun das Schaltungsschema 2. Die Pendel-

Schaltungsschema 2. Schaltungsschema 2a.

Fig. 8.

kontakte I—V wurden in der Reihenfolge, in welcher sie von links aufeinanderfolgen, ausgelöst. I schließt den eingepprägten Strom, II unterbricht ihn und III stellt darauf den Kurzschluß her. Dieser löst sich von selbst durch das stets zur selben Zeit nach dem Kontaktschluß stattfindende Abschnellen des

Fallhebels. IV und V bedienen wie sonst den Kondensatorzweig.

Bei der Aufnahme einer Abklingungskurve blieben, wie früher, I, IV und V an ihrem Platz, während II und III gemeinsam um gleiche Beträge verschoben wurden.

Es seien einige Beobachtungsreihen angegeben. *A* wurde an einem gewöhnlichen Hartmann und Braunschen Draht gewonnen, *B* an einem durch Erwärmen umgewandelten Hartmann und Braunschen Draht, *C* an einem Wismutfaden in Glaskapillare und endlich *D* an einem in Glas ausgezogenen Wismutfaden.

Tabelle 12.

Verschiebung des Kontaktes I in Trommelteilen	Galvanometerausschläge							
	A		B		C		D	
	mit Kurzschluß	ohne Kurzschluß	mit Kurzschluß	ohne Kurzschluß	mit Kurzschluß	ohne Kurzschluß	mit Kurzschluß	ohne Kurzschluß
Stromausschalten								
0	0	73	10	208	—	—	14	54
20	0	61	10	196	18	82	8	52
30	0	51	10	185	15	82	8	51
40	0	48	— 3	170	10	82	3	49
60	0	41	— 10	160	11	79	1	49
80	35	35	0	150	10	78	8	48
100	30	30	142	142	62	76	52	45
120	27	26	134	133	70	71	45	43
140	20	20	118	118	68	68	42	42
190			107	105	67	65	39	40
240			95	94	62	62	38	39
290			88	87	60	60	37	38
340			72	72	53	53	33	35
440			51	52	50	50	29	30
640			41	40	48	42	23	23
840			32	32	40	39	21	22
1040								

Gegenseitige Verschiebung der Kontakte II und III: 20 Trommelteile.

Elektromotorische Kraft des eingepprägten Stromes: 8 Volt.

Innerhalb der Beobachtungsgenauigkeit ist nicht der geringste Einfluß des zwischen Stromausschaltung und Messung

liegenden Kurzschlusses auf den nachfolgenden Teil der Abklingungskurve zu bemerken; die nach dem Kurzschluß erhaltene Abklingungskurve ist identisch mit der ohne Kurzschluß gewonnenen.

Von großem Interesse mußte nun die Feststellung der Geschwindigkeit sein, mit welcher die Spannungsdifferenz an den Drahtenden nach dem Kurzschluß auf die Werte ansteigt, welche sie ohne Kurzschluß hat. Eine direkte Messung dieser Geschwindigkeit war natürlich nicht möglich, da die Trägheit der ganzen Meßanordnung, bedingt vor allem durch die Aufladezeit des Kondensators, es unmöglich macht, Vorgänge, die in derartig kurzen Zeiten (10^{-5} Sek.) sich abspielen, eingehend zu verfolgen. Es konnten hier nur Vergleiche unternommen werden. Dies geschah folgendermaßen:

Man griff eine bestimmte Stelle der Abklingungskurve heraus, ließ den Kurzschluß bis zu dem dadurch festgelegten Zeitpunkte andauern und nahm nun den Spannungsanstieg im Kondensator nach der Lösung des Kurzschlusses auf. Diesen Anstieg mußte man vergleichen mit demjenigen, welchen man erhielt, wenn man in die Versuchsanordnung an Stelle des Wismutdrahtes einen Draht von demselben Widerstand einschaltete, an dessen Enden aber nach dem Öffnen des Kurzschlusses die Spannung so rasch ihren Endwert annahm, daß dieser Anstieg für die vorliegenden Beobachtungen als augenblicklich angesehen werden konnte. Der Endwert der Spannungsdifferenz am Versuchsdrahte mußte denselben Betrag haben wie die zurückbleibende elektromotorische Kraft an der in Betracht gezogenen Stelle der Abklingungskurve.

Der Vergleichsdraht wurde dargestellt durch einen Manganindraht. Die elektromotorische Kraft an seinen Enden lieferte ein Akkumulator, in dessen Stromkreis der Manganindraht und ein selbstinduktionsloser Widerstand hintereinander geschaltet waren. Der letztere wurde so gewählt, daß die Spannungsdifferenz zwischen den Enden des Vergleichsdrahtes die erforderliche Größe hatte. Da der gerade ausgespannte Manganindraht äußerst geringe Selbstinduktion hatte und durch Kurzschließen dieses Drahtes die Stromstärke im Stromkreis um nur 1 Proz. geändert wurde, so war Verzögerung des Spannungsanstieges durch Selbstinduktion oder Kapazität aus-

geschlossen und die Spannung mußte im Vergleich zu den bei unseren Messungen in Betracht kommenden Zeiten im Manganindraht augenblicklich ihren Endwert annehmen.

Die Versuche wurden nun so vorgenommen, daß das Schaltungsschema 2 bis auf eine kleine Änderung beibehalten wurde. Diese bestand darin, daß man dem Kontakt V, wie es in Schaltungsschema 2a gezeigt ist, den Kurzschluß aufheben und gleichzeitig den Meßkondensator anlegen ließ. Durch Verstellen des Kontaktes V, während alle anderen an ihrem Platze blieben, konnten verschiedene Punkte des Spannungsanstieges im Kondensator geprüft werden. Es wurden die Beobachtungen auch an verschiedenen Stellen der Abklingungskurve vorgenommen, damit man einen etwa in dieser Hinsicht bestehenden Unterschied feststellen konnte. Es seien einige Beobachtungsergebnisse angegeben:

Tabelle 13.

Hartmann und Braunschwer Draht (Durchmesser = 0,3 mm).

Verschiebung des Kontaktes V in Trommelteilen	Galvanometerausschläge für den Spannungsanstieg im Kondensator bei			
	Manganin	Wismut	Manganin	Wismut
0	0	— 4	0	0
3	0	— 3	0	0
5	15	+ 20	22	18
6	45	42	30	30
7	54	42	30	30
8	60	60	32	31
9	65	62	32	33
10	60	60	33	33
	30 . 19 . 10 ⁻⁷ Sek.		80 . 19 . 10 ⁻⁷ Sek.	
	nach dem Stromausschalten			

Tabelle 14.

Durch Erwärmen umgewandelter Hartmann und Braunscher Draht
(Durchmesser = 0,3 mm).

Verschiebung des Kontaktes V in Trommelteilen	Galvanometerausschläge für den Spannungsanstieg im Kondensator bei			
	Manganin	Wismut	Manganin	Wismut
0	0	0	7	—
3	5	10	10	0
5	13	10	8	18
6	70	40	75	80
7	100	110	100	103
8	168	170	135	140
9	168	185	132	149
10	185	176	130	150
	30. 19. 10 ⁻⁷ Sek.		80. 19. 10 ⁻⁷ Sek.	
	nach dem Stromausschalten			

Tabelle 15.

Wismut in Glaskapillare.

Verschiebung des Kontaktes V in Trommelteilen	Galvanometerausschläge für den Spannungsanstieg im Kondensator bei			
	Manganin	Wismut	Manganin	Wismut
0	0	10	8	—
3	2	10	3	6
5	30	18	0	10
6	120	100	30	48
7	111	115	72	63
8	98	115	92	98
9	98	108	98	99
10	98	98	96	95
	30. 19. 10 ⁻⁷ Sek.		80. 19. 10 ⁻⁷ Sek.	
	nach dem Stromausschalten			

Innerhalb der Beobachtungsgenauigkeit verläuft der Spannungsanstieg im Meßkondensator bei Messungen am Wismut-

draht ebenso schnell wie bei Messungen am Manganindraht. Demnach darf man wohl annehmen, daß am Wismutdraht die elektromotorische Kraft nicht auf bloße Ansammlung eines beschränkten Quantums wahrer Elektrizitätsmengen zurückzuführen ist, welche durch irgend einen Vorgang erzeugt werden, sondern daß es sich eben um eine Spannungsdifferenz handelt, wie wir sie z. B. an einer thermoelektrischen Kette beobachten, wo die thermoelektrische Kraft immer neue wahre Elektrizitätsmengen nachliefert.

8. Der Einfluß des Magnetfeldes.

Der das Feld liefernde Magnet bestand aus einem Teile des zerlegbaren Elektromagneten des Institutes. Die Weite des Luftspaltes betrug, wenn die Kraftlinien senkrecht zur Stromrichtung verliefen, 6 mm. Die Versuche, bei denen die Kraftlinien parallel zur Stromrichtung waren, verlangten natürlich einen weiteren Spalt, er wurde 12 mm gewählt. (Näheres vgl. Dissertation p. 83.)

a) Kraftlinien parallel der Stromrichtung.

Wie schon oben erwähnt, war der Luftspalt bei den Untersuchungen über die Einwirkung eines magnetischen Feldes, dessen Kraftlinien in der Richtung des Wismutdrahtes verliefen, 12 mm weit. Es konnten also nur 10 mm lange Drahtstückchen in Richtung der Kraftlinien liegen. Hätte man nun den Draht zickzackartig biegen wollen, so wäre das nur bei starkem Erwärmen des Drahtes möglich gewesen, wodurch sich Strukturänderungen eingestellt hätten, die ihrerseits wiederum den Effekt beeinflußt haben würden. Es wurde darum folgendes Verfahren angewandt:

1 cm lange Stückchen von Wismutdraht wurden dicht nebeneinander auf ein Glimmerblättchen aufgekittet und an ihren Enden so zusammengelötet, wie Fig. 9 es zeigt. Die äußersten Enden wurden an Kupferdrähte angelötet. Das Löten geschah mit Woods Metall, wobei der Kolben nur so heiß gemacht wurde, daß das Lötmetall gerade schmolz. So blieb die Struktur des Drahtes so weit als möglich erhalten. Vor

Fig. 9.

allem hatte man bei dieser Anordnung des Wismutdrahtes noch den Vorteil, daß hier alle im Wismut verlaufenden Stromfäden, so weit man es erreichen konnte, parallel liefen, also in Richtung der Kraftlinien eingestellt werden konnten. Es war dies erforderlich, da, wie spätere Versuche zeigen werden, die Einwirkung auf die senkrecht zu den Kraftlinien verlaufenden Drahtteile so groß ist, daß sie eine genauere Beurteilung der eigentlich zu beobachtenden Wirkung vereitelt haben würde.

Hartmann und Braunscher Draht (Durchmesser 0,3 mm) zeigte nun die folgenden Abklingungskurven. Es sei noch erwähnt, daß die durch das Feld hervorgerufenen Widerstandsänderungen in derselben Weise kompensiert wurden wie bei den Temperaturversuchen die dort auftretenden Widerstandsverschiedenheiten.

Tabelle 16.

Verschiebung des Kontaktes I in Trommelteilen	Galvanometerausschläge bei den Feldstärken				
	0 Gauss	4000 Gauss	6000 Gauss	8000 Gauss	10000 Gauss
0	Stromausschalten				
20	129	160	178	192	203
30	110	134	150	170	182
40	102	120	139	152	162
50	95	110	128	142	149
60	84	100	118	133	138
80	78	90	103	116	120
100	68	82	95	100	108
130	60	72	83	92	92
180	51	59	67	72	75
280	39	47	50	56	53
480	28	28	35	36	33
680	22	26	30	30	26
880	18	22	27	28	18
Widerstand des Bi-Drahtes	2,74 Ohm	2,92 Ohm	3,11 Ohm	3,29 Ohm	3,44 Ohm

Stärke des eingeprägten Stromes: $\frac{12 \text{ Volt}}{3,63 \text{ Ohm}}$.

Der Einfluß des Magnetfeldes geht dahin, daß er, ohne die Abklingungsgeschwindigkeit zu ändern¹⁾, die Stärke der

1) Die Abklingungskurve bei 10000 Gauss fällt rascher ab als die anderen, doch darf man dies als eine Störung ansehen, die dadurch

zurückbleibenden elektromotorischen Kraft erhöht, und zwar erfolgt diese Vergrößerung der Nachwirkung in erster Annäherung proportional der Stärke des Magnetfeldes.

Es ergab sich nun sofort die Aufgabe, zu untersuchen, ob diese Erhöhung der zurückbleibenden elektromotorischen Kraft eine bloße Vergrößerung des bisher beobachteten Effektes oder eine für sich bestehende Erscheinung ist. Zunächst mußte etwas Aufschluß in dieser Hinsicht die Abhängigkeit von der Stärke des eingepprägten Stromes geben. Es wurde darum das im starken Magnetfelde (10000 Gauss) befindliche Wismut mit verschieden starkem Strome beschickt. Die Änderung der Stromstärke wurde durch Vermehrung oder Verminderung der Akkumulatorenanzahl bewirkt. Man gewann folgende Ergebnisse:

Tabelle 17.

Verschiebung des Kontaktes I in Trommelteilen	Galvanometerausläge, wenn die elektromotorische Kraft für den eingepprägten Strom betrug						
	12 Volt	6 Volt	4 Volt	2 Volt	12 Volt	4 Volt	2 Volt
0	Stromausschalten						
20	215	102	63	28	123	41	20
30	190	88	58	25	114	38	18
40	173	82	52	22	108	36	16
50	160	73	48	21	100	33	16
60	148	68	43	19	94	31	15
80	132	58	38	18	86	28	13
100	118	52	33	16	80	25	12
130	98	44	29	12	71	22	10
180	83	37	22	11	60	19	9
230	70	30	18	9	53	18	8
280	61	22	15	7	48	12	6
380	48	14	10	4	42	11	—
580	32	8	6	—	33	9	—
780	24	4	—	—	30	8	—
980	21	—	—	—	26	—	—
Magnetfeld	10000 Gauss				0 Gauss		

hervorgehoben wurde, daß nicht alle Teile des Wismutdrahtes den Kraftlinien parallel gelegen haben, so daß sich hier der später zu betrachtende Effekt im transversalen Magnetfeld geltend machte.

Zum Vergleich sind noch die Abklingungskurven im Felde 0 hinzugefügt.

Bei allen im Magnetfeld gewonnenen Kurven ist die Abklingungsgeschwindigkeit dieselbe. Die durch den Einfluß des Magnetfeldes verstärkte am Wismut zurückbleibende elektromotorische Kraft wächst proportional mit der Stromstärke. Dies würde dafür sprechen, daß die Vergrößerung der Nachwirkung kein selbständiger Effekt ist. Wenn diese Annahme richtig war, durfte ein Draht, welcher außerhalb des Feldes nur einen kleinen Effekt zeigte, auch im Magnetfeld, dessen Kraftlinien parallel der Stromrichtung waren, keine große Nachwirkung aufweisen. Versuche mit dem aus Pulver gepreßten Draht ergaben wirklich im Magnetfeld keinen starken Effekt und erweisen so die obige Annahme als berechtigt.

Eine weitere Bestätigung dafür, daß die im Magnetfeld gefundene Erscheinung nur eine Verstärkung des außerhalb des Feldes bestehenden Effektes ist, lieferte ein Draht, welcher durch Erwärmen ausgeprägte kristallische Struktur erhalten hatte und infolgedessen auch eine starke Nachwirkung aufwies. Im Felde (mit Kraftlinien parallel der Drahtrichtung) verstärkte sich die zurückbleibende elektromotorische Kraft ungefähr im gleichen Verhältnis wie bei dem früher untersuchten Hartmann und Braunschen Draht.

Es darf also nach den Ergebnissen der ausgeführten Versuche die Behauptung aufgestellt werden, daß im Felde, dessen Kraftlinien der Stromrichtung parallel laufen, die am Wismutdraht zurückbleibende elektromotorische Kraft sich vergrößert, und daß diese Vergrößerung nur eine Verstärkung des außerhalb des Feldes bestehenden Effektes ist.

b) Kraftlinien senkrecht zur Drahtrichtung.

Wegen einiger Vorsichtsmaßregeln zur Verhütung von Störungen durch Induktion im Magnetfelde vgl. Dissertation p. 89.

Die Versuche über den Einfluß des Magnetfeldes mit Kraftlinien senkrecht zur Stromrichtung ergaben an allen Proben qualitativ das gleiche. Es seien einige Abklingungskurven als Beispiele angegeben:

Tabelle 18. (Hierzu Fig. 10.)

Draht von Hartmann und Braun (Durchmesser 0,3 mm).

Verschiebung des Kontaktes I in Trommelteilen	Galvanometerausschläge bei den Feldstärken				
	0 Gauss	4000 Gauss	6000 Gauss	8000 Gauss	10 000 Gauss
0	Stromausschalten				
20	81	78	+26	-60	-185
30	68	58	+ 2	88	204
40	59	50	-13	90	208
50	53	42	-20	110	215
60	50	36	-28	110	220
80	43	28	32	114	218
100	38	20	35	118	219
130	32	13	42	122	217
180	28	8	42	118	209
280	18	0	42	105	187
380	15	-2	38	95	160
480	12	-3	35	83	146
680	10	-2	25	63	110
880	8	0	22	41	82
1080	8	0	13	34	60
1580	7	0	4	12	30
Widerstand des Bi-Drahtes	2,5 Ohm	2,8 Ohm	3,1 Ohm	3,4 Ohm	3,7 Ohm

Stärke des eingepprägten Stromes: $\frac{12 \text{ Volt}}{3,7 \text{ Ohm}}$.

I: Feldstärke 0
 II: „ $4 \cdot 10^3$
 III: „ $6 \cdot 10^3$

IV: Feldstärke $8 \cdot 10^3$
 V: „ $10 \cdot 10^3$

Fig. 10.

Es hatte ganz den Anschein, als ob über den außerhalb des Feldes bestehenden Effekt sich ein neuer von entgegengesetztem Vorzeichen übergelagert hätte, der mit der Stärke des Magnetfeldes zunimmt und der sich an verschiedenen Wismutdrähten verschieden stark äußert. War diese neue Erscheinung von dem Effekt außerhalb des Feldes unabhängig, so konnte sie auch auftreten, wenn der letztere nicht zu beobachten war. Darum wurde der aus Pulver gepreßte Draht untersucht:

Tabelle 19. (Hierzu Fig. 11.)

Verschiebung des Kontaktes I in Trommelteilen	Galvanometerausschläge bei den Feldstärken				
	$0 \cdot 10^3$ Gauss	$4 \cdot 10^3$ Gauss	$6 \cdot 10^3$ Gauss	$8 \cdot 10^3$ Gauss	$10 \cdot 10^3$ Gauss
0	Stromausschalten				
30	+8	-16	-52	-98	-160
40	8	16	52	94	158
50	8	13	52	95	153
60	5	14	52	92	153
80	8	13	49	93	149
100	8	13	48	89	145
130	8	14	48	87	142
180	6	15	47	83	135
230	7	12	45	81	132
280	5	12	43	78	122
380	5	12	40	73	113
480	3	11	38	67	105
680	2	10	32	55	88
880	2	8	27	47	72
1080	2	5	22	38	58
1580	2	0	14	23	38
Widerstand des Bi-Drahtes {	1,5 Ohm	1,7 Ohm	1,8 Ohm	1,9 Ohm	2,0 Ohm

Stärke des eingepprägten Stromes: $\frac{12 \text{ Volt}}{2,2 \text{ Ohm}}$.

Es zeigt sich an dem aus Pulver gepreßten Drahte der Effekt im Magnetfelde, obgleich außerhalb des Feldes keine Nachwirkung besteht, wodurch die Unabhängigkeit beider Effekte (im Feld und außerhalb desselben) voneinander erwiesen ist.

Weitere Bestätigungen für dies Ergebnis konnten noch erbracht werden. Durch Erwärmen des gepreßten Wismutdrahtes

Fig. 11.

läßt sich dessen Nachwirkung außerhalb des Feldes erhöhen (p. 352), dabei verstärkt sich aber der Effekt im transversalen Magnetfelde nicht:

Tabelle 20.

Hartmann und Braunsche Drähte (Durchmesser 0,3 mm).

Verschiebung des Kontaktes I in Trommel- teilen	Galvanometerausschläge							
	Probe I				Probe II			
	vor		nach		vor		nach	
	Erhitzung auf 230°				Erhitzung auf 225°			
	Magnetfeld				Magnetfeld			
	0	8000	0	8000	0	8000	0	8000
0	Stromausschalten							
20	+67	-51	+142	+70	+13	-190	+80	-45
30	57	58	138	68	9	191	70	50
40	50	60	132	70	8	191	68	53
50	46	62	128	68	5	189	60	56
70	38	65	120	68	—	182	53	58
100	30	68	110	60	—	171	48	58
150	20	68	98	57	—	159	38	58
200	17	62	88	51	—	145	31	53
250	10	60	87	49	—	132	28	52
300	8	58	83	47	—	119	23	50
350	6	53	75	43	—	110	20	49

Wollte man etwas Näheres über den Effekt im transversalen Felde erfahren, so mußte man für die Untersuchung eine Wismutprobe wählen, die außerhalb des Feldes keine Nachwirkung zeigte, damit die Störung durch diese ausgeschaltet blieb. Zunächst ließ sich die Abhängigkeit von der Stärke des Magnetfeldes leicht feststellen. Sie ist zu ersehen aus Tab. 19. Während der Betrag der zurückbleibenden

Fig. 12.

elektromotorischen Kraft mit dem Felde wächst, bleibt die Abklingungsgeschwindigkeit dieselbe. Dabei wirken aber schwache Felder verhältnismäßig weniger ein als starke. Graphisch ist die Abhängigkeit der an den Drahtenden verbleibenden Spannungsdifferenz vom Magnetfeld durch Fig. 12 veranschaulicht.

Um den Einfluß der Stärke des eingepprägten Stromes auf den Effekt im transversalen Feld kennen zu lernen, wurde ein aus Pulver gepreßtes Wismutdrahtstück mit verschieden starkem Strome beschickt, was durch Veränderung der Anzahl der stromliefernden Akkumulatoren leicht ausgeführt werden konnte. Man fand hier die Abklingungskurven der Tab. 21.

Fig. 13.

Tabelle 21.

Verschiebung des Kontaktes I in Trommelteilen	Galvanometerausläge bei einer elektro- motorischen Kraft für den eingepprägten Strom von			
	12 Volt	6 Volt	4 Volt	2 Volt
0	Stromausschalten			
20	—138	—110	—78	—39
30	132	110	77	38
40	132	113	76	38
50	130	108	75	37
60	128	107	74	36
80	127	103	72	36
100	124	101	71	35
130	122	98	68	34
180	117	92	67	32
230	110	88	62	31
280	107	84	60	30
380	98	77	52	28
480	84	65	43	22
680	74	54	38	19
880	60	43	30	16
1080	40	28	21	12
1580	30	18	13	—

Widerstand des Wismutdrahtes 2,1 Ohm. Feldstärke 10000 Gauss.

Hier fand sich bei überall gleich rascher Abklingung die zurückbleibende Spannungsdifferenz bei niederen Stromstärken proportional der Stromstärke, bei stärkeren Strömen wuchs sie langsamer als die Stromstärke (vgl. Fig. 13).

Ein Umstand verdient noch besondere Beachtung. Die Abklingungskurven für den Effekt im transversalen Magnetfelde sind bei den Drähten, wo außerhalb des Feldes keine Nachwirkung auftritt, einfach abfallende Kurven ohne ein Maximum. Man muß also das Entstehen des Maximums der Übereinanderlagerung der beiden Effekte, des außerhalb des Feldes und des im transversalen Felde bestehenden, zuschreiben. Das Auftreten des Maximums bietet also den Beweis dafür, daß auch im transversalen Magnetfeld der außerhalb des Feldes gefundene Effekt weiterbesteht. Zieht man nun diesen letzten

Effekt von der im Magnetfeld beobachteten Kurve ab, so muß der Effekt im transversalen Feld allein übrig bleiben, man müßte also nach den obigen Erfahrungen eine einfache Abklingungskurve erhalten.

Versucht man nun aber, diese Trennung der beiden Effekte an einigen der aufgenommenen Kurven auszuführen, so ergibt sich, daß das Maximum noch nicht verschwindet, wenn man den außerhalb des Feldes gefundenen Betrag der zurückbleibenden elektromotorischen Kraft abzieht. Man erhält erst eine nur abfallende Kurve, wenn man die in Anrechnung zu bringende Abklingungskurve für den Effekt im Feld 0 in einem bestimmten Verhältnis vergrößert. Der Maßstab dieser Vergrößerung wächst mit der Feldstärke, so daß bei 10000 Gauss ungefähr $\frac{2}{2}$ von der im Feld 0 zurückbleibenden elektromotorischen Kraft abzuziehen sind. Demnach wird auch im transversalen Feld der außerhalb des Feldes bestehende Effekt verstärkt und zwar ungefähr im selben Maße, wie im Felde, dessen Kraftlinien parallel der Stromrichtung laufen.

Das Verhalten des Wismutdrahtes im Magnetfeld läßt sich kurz so beschreiben: Der außerhalb des Magnetfeldes bestehende Effekt wird im Felde verstärkt. Außerdem tritt im transversalen Felde ein Effekt von entgegengesetztem Vorzeichen und kleinerer Abklingungsgeschwindigkeit hinzu.

9. Zusammenfassung der Ergebnisse.

Die Versuche haben uns gezeigt, daß wir am Wismutdraht zwei voneinander verschiedene vom Strom hervorbrachte Effekte beobachten können, einen ersten, welcher sowohl außerhalb wie innerhalb des Feldes besteht, und einen zweiten, welcher sich über den eben genannten im transversalen Magnetfeld lagert. Auf den letzteren wollen wir nicht näher eingehen; nur der erstgenannte Effekt soll hier ins Auge gefaßt werden.

Dieser äußert sich nun darin, daß er bei Stromanstieg eine scheinbare Widerstandsverkleinerung im Wismutdraht hervorruft, beim Verschwinden des Stromes aber eine elektromotorische Kraft im Draht zurückbleiben läßt. Für diese elektrische Nachwirkung ergaben sich nun die Gesetze, die in einer Übersicht noch einmal zusammengestellt sein mögen:

Nach dem Stromdurchgang bleibt am Wismutdraht eine rasch abklingende elektromotorische Kraft zurück. Sie hat dasselbe Vorzeichen wie der während des Stromfließens im Draht bestehende Spannungsabfall.

Die Geschwindigkeit des Stromabfalles hat keinen Einfluß auf die elektrische Nachwirkung.

Ein zwischen Stromausschalten und Messung liegender Kurzschluß ist ohne Einfluß auf die beobachtete Nachwirkung.

Nach dem Kurzschluß steigt die Spannung augenblicklich auf ihren Endwert an.

Die *Stärke* der zurückbleibenden elektromotorischen Kraft ist an demselben Drahtstück proportional der Stärke des eingepprägten Stromes und beträgt bis 1 Proz. der angelegten Spannung.

An Drähten mit stärker ausgeprägt kristallischer Struktur ist der Effekt größer. Aus feinem Wismutpulver hergestellter Draht und flüssiges Wismut zeigen den Effekt nicht.

Auch wenn im Draht die Kristallachsen überall in derselben Richtung verlaufen, tritt der Effekt auf, doch wurde bei Stromdurchgang parallel den Hauptspaltflächen der Effekt verhältnismäßig klein gefunden.

Pressung des Metalles vermindert die zurückbleibende elektromotorische Kraft.

Die zurückbleibende Spannungsdifferenz nimmt mit sinkender Temperatur ab, bei hohen Temperaturen langsamer, bei tieferen rascher.

Das magnetische Feld verstärkt die zurückbleibende elektromotorische Kraft in allen Lagen des Drahtes zur Kraftlinienrichtung.

Die *Abklingungskurve* hat nicht die Gestalt einer e^{-Kx} -Kurve, denn die Abklingungsgeschwindigkeit, gemessen durch das Verhältnis zweier in bestimmten Zeitintervallen aufeinanderfolgender Ordinaten, nimmt bei derselben Abklingungskurve mit der Zeit ab.

Durch verschiedene Stromstärke wird nur der Maßstab der Ordinaten der Kurve, nicht ihre Form geändert.

Bei stärker kristallisch ausgebildetem Wismut klingt der Effekt weit langsamer ab als bei Draht aus kleinen Kristalltrümmern.

Durch den Einfluß der Temperatur wird fast nur der Maßstab, die Form der Kurve nur sehr wenig verändert. Bei höheren Temperaturen klingt der Effekt ein wenig langsamer ab als bei tieferen.

In der Dissertation ist versucht worden, ein Bild der Entstehung des Effektes aufzubauen. Hier kann aber nicht näher darauf eingegangen werden. Es sei nur erwähnt, daß manches darauf hinzuweisen scheint, daß der beobachtete Effekt seinen Sitz in Schichten geringer Dichte und Leitfähigkeit hat, welche in Richtung der Spaltflächen in das Metall eingesprengt sind.

Die Versuche zu vorliegender Arbeit sind im theoretisch-physikalischen Institut der Universität Leipzig ausgeführt worden. Es ist mir eine gern erfüllte Pflicht, dem Direktor des Institutes, Hrn. Prof. Dr. Th. Des Coudres, von welchem ich auch die Anregung zu dieser Arbeit erhielt, für das rege Interesse zu danken, mit dem er die Arbeit gefördert hat, insbesondere auch für die Liebenswürdigkeit, mit der er die erforderlichen Apparate und sonstigen Hilfsmittel mir zur Verfügung gestellt hat.

(Eingegangen 16. Februar 1910.)