

Beiträge zur Kenntniss der Absorption und Verzweigung elektrischer Schwingungen in Drähten

Ignaz Klemenčič.

Aus dem physikalischen Institute der k. k. Universität in Graz.

(Mit 3 Textfiguren.)

(Vorgelegt in der Sitzung am 16. März 1893.)

Die theoretischen Untersuchungen lehren, dass die elektrische Strömung bei Schwingungen eine andere Vertheilung im Querschnitte des Leiters hat wie beim constanten Strom; sie ist an der Oberfläche dichter wie in der Mitte, ja bei sehr schnellen elektrischen Oscillationen findet sie überhaupt nur in den Oberflächenschichten statt; eine Thatsache, welche bekanntlich von Hertz auch durch Experimente bestätigt wurde. Lord Rayleigh und Stefan haben für den Widerstand bei Schwingungen Formeln berechnet, welche zeigen, dass der Widerstand mit der Schwingungszahl wächst und ausserdem vom Material und von der Magnetisirbarkeit desselben abhängt. Während man die Richtigkeit dieser Formeln bei Wechselströmen von der in der Praxis üblichen Häufigkeit nicht bezweifelt hat, schien es, als ob sie bei Hertz'schen Schwingungen nicht mehr zutreffend wären. Insbesondere glaubte man aus einigen Beobachtungen schliessen zu müssen, dass das Eisen dem magnetisirenden Einflusse sehr rascher Schwingungen nicht folgen könne, und dass die in der theoretischen Formel enthaltene Permeabilität keine Rolle spiele.

Trowbridge¹ und Emden² haben durch Versuche gezeigt, dass Oscillationen, wie sie bei Entladungen von Leydenerflaschen auftreten, durch Drähte aus verschiedenem Material ungleich stark gedämpft werden und dass insbesondere die Anwendung eines Leiterkreises aus Eisen die Schwingungen sehr rasch zum Verlöschen bringt. Später habe ich³ einige Beobachtungen mit Schwingungen von der geringsten bisher erreichten Dauer angestellt, und diese haben ergeben, dass die Absorption solcher Oscillationen im Eisen viel stärker ist als in irgend einem nichtmagnetisirbaren Metall von gleicher Form, dass also die Magnetisirung auch dem Einflusse so rasch verlaufender elektrischer Strömungen folgt. Zur selben Zeit gelangte V. Bjerknes⁴ durch Experimente, die er mit elektrischen Wellen von 4 m Länge machte, zu dem gleichen Resultate; überdies zeigte er, dass auch die nichtmagnetisirbaren Metalle eine verschiedene Absorptionsfähigkeit für elektrische Wellen zeigen.

Die vorliegende Arbeit betrifft ebenfalls diese Frage; durch dieselbe werden auf einem anderen Wege meine früheren Beobachtungen und die Untersuchungen von Bjerknes controlirt und bestätigt; überdies wurde ein erster Versuch unternommen, an den Beobachtungsdaten die theoretischen Formeln zu prüfen. Die Methode von Bjerknes und auch mein früheres Verfahren beruht darauf, dass man an irgend einer Stelle des von Schwingungen durchflossenen Leiters einen durch die Intensität der Schwingungen bedingten Effect misst und aus der Grösse dieses Effectes auf die grössere oder geringere Absorption, respective Dämpfung der Schwingungen im Leiterkreise schliesst. Das allmälige Verlöschen der Oscillationen ist bekanntlich auf zwei Ursachen zurückzuführen, auf die elektromagnetische Strahlung und die Absorption der Energie elektrischer Schwingungen durch den Widerstand des Drahtes. Von diesen dürfte die letzte Ursache weitaus das meiste zur Dämpfung beitragen, und ich habe mich in der vorliegenden Untersuchung auch nur mit ihr beschäftigt, indem ich direct

¹ Phil. Mag., N. 199, December 1891.

² Sitzungsber. der Münchener Akademie 1892.

³ Diese Sitzungsberichte, Bd. 101, Jahr 1892.

⁴ Wied. Ann., Bd. 47.

ein Mass für die in den Drähten entwickelte Wärmemenge zu gewinnen suchte. Zu diesem Zwecke diente ein Verfahren, welches darin besteht, dass man in nächster Nähe des zu erwärmenden Drahtes eine Löthstelle eines aus feinen Drähten (Constantan—Eisen) gebildeten Thermoelementes anbringt und die Höhe der Erwärmung des Drahtes durch dessen Ausstrahlung gegen die Löthstelle und den hiedurch verursachten Thermostrom misst.¹ Der Erreger der Primärschwingungen lieferte Wellen von $3 \cdot 3 \text{ m}$ Länge und bestand aus zwei Messingscheiben von 30 cm Durchmesser, welche durch einen in der Mitte mit Funkenstrecke versehenen Leiter verbunden waren. Ein genau gleicher Körper bildete den Secundärinductor; nur hatte er keine Funkenstrecke, und der mittlere Theil der linearen Leitung war aus den zu untersuchenden Drähten gebildet. Es waren immer zwei Versuchsdrähte eingeschaltet, und die Länge betrug in keinem Falle mehr als 6 cm bei jedem Drahte, während der ganze lineare Theil des Secundärinductors eine Länge von 39 cm hatte.

Die Versuche über die Wärmeentwicklung in den Drähten führten dann zur Frage über die Verzweigung der elektrischen Strömung bei Schwingungen. Bekanntlich lehrt in diesem Falle die Theorie, dass für die Verzweigung hauptsächlich der Coëfficient der Selbstinduction massgebend ist, nicht aber der Widerstand. Diese Frage konnte nun durch eine Messung der Wärmeentwicklung in verzweigten Leitern auch experimentell untersucht werden. Mit Rücksicht auf den Umstand, dass die Wärmeentwicklung bei diesen schnellen elektrischen Schwingungen hauptsächlich an der Oberfläche erfolgt, schien es mir ferner nicht unwichtig zu untersuchen, wie sich in diesem Falle die Grösse der Ausstrahlung zur Widerstandsänderung des erwärmten Drahtes verhält und dann weiters zu beobachten, welchen Werth dieses Verhältniss beim constanten Strom annimmt. Die Versuche haben ergeben, dass bei Drähten von der hier gebrauchten Dicke ($0 \cdot 037 \text{ cm}$) in dieser Beziehung kein nennenswerther Unterschied besteht. Die an der Oberfläche entwickelte Wärme wird also sehr rasch nach dem Inneren des Drahtes abgeleitet.

¹ Diese Sitzungsber., Bd. 101, 1892, S. 309

Die Versuchsanordnung.

Fig. 1 zeigt die Anordnung der Apparate. PP sind die beiden Scheiben des Primärinductors, k_1k_2 die kleinen Kugeln, zwischen denen der Funke überspringt, J das Inductorium, welches von drei Accumulatoren betrieben wurde. Der Interruptor machte ungefähr 23 Unterbrechungen in der Secunde. Dem Primärinductor gegenüber steht der Secundärinductor mit den Scheiben SS und dem dieselben verbindenden linearen Theile, welcher in der Mitte die Versuchsdrähte eingeschaltet hat. In Fig. 2 ist dieser mittlere Theil noch einmal gezeichnet.

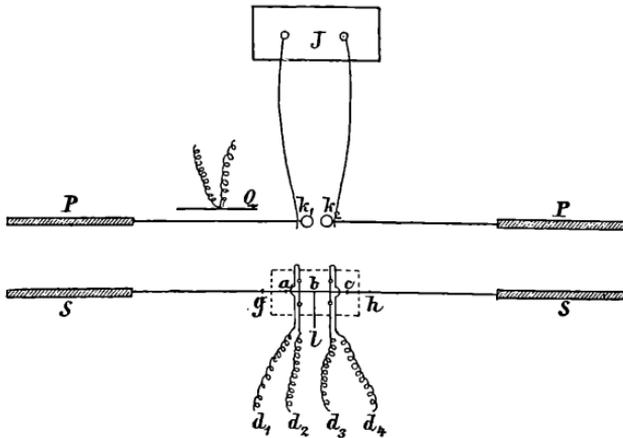


Fig. 1.

Die Versuchsdrähte ab und bc sind bei a , b und c an 5 mm dicke Kupferdrähte angelöthet.

Der Draht bl hatte den Zweck, die Widerstandsmessung für jeden Versuchsdraht extra zu ermöglichen und dann sollten die Wärmeableitungsverhältnisse in diesem Falle ungefähr ebenso sein wie bei den späteren Beobachtungen über die Verzweigung der Schwingungen. Die Drähte, welche das Thermoelement bildeten, waren zwischen dickeren Kupferdrähten bei kf und mn gespannt und hatten eine Löthstelle in der Nähe des Versuchsdrahtes. Als Thermoelement wurde die Combination Constantan—Eisen (0.09 mm dick) mit einer thermoelektrischen Kraft von 51 M. V pro 1° genommen. Die zum Galvanometer führenden Drähte sind mit d bezeichnet. Die

Enden bei g und h waren senkrecht gegen die Axe des Drahtes abgefeilt und amalgamirt; dasselbe war mit den Enden des

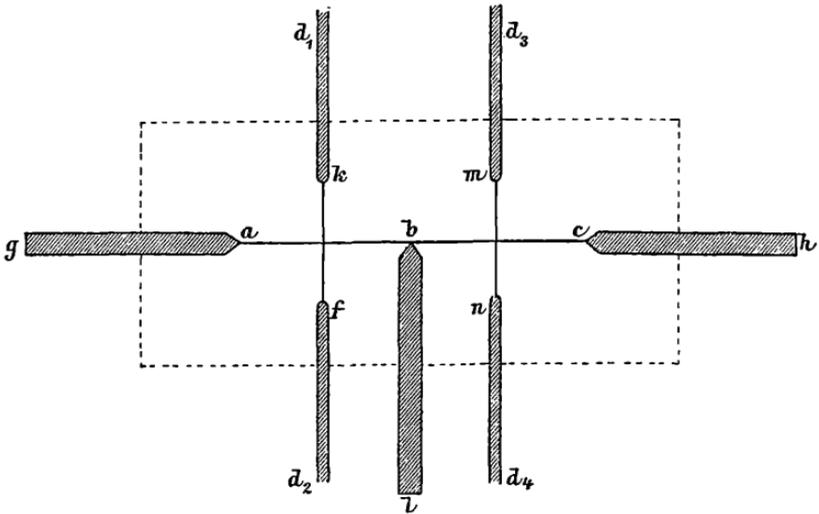


Fig. 2.

von den Scheiben S kommenden linearen Leiters der Fall Die Verbindung geschah durch blosses Zusammenstossen der Enden.

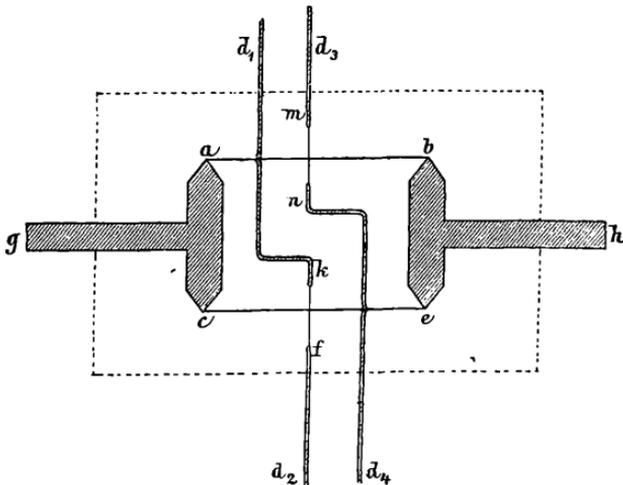


Fig. 3.

Fig. 3 gibt die Anordnung des mittleren Theiles, wie er zur Beobachtung der Verzweigung diente. Die Versuchsdrähte

ab und *ce* sind an den beiden Querstücken *ac* und *be* angelöthet. Der ganze mittlere Theil war in allen Fällen in ein Gehäuse aus Glas, welches durch die punktirte Linie angedeutet ist, luftdicht eingeschlossen.

Für die Versuche hatte ich Drähte aus verschiedenem Material von 0.37 mm Dicke gewählt. In gewisser Beziehung, was nämlich die Bedingungen anbelangt, unter welchen die theoretischen Formeln entwickelt sind, wäre es vortheilhaft gewesen, dickere Drähte zu nehmen; allein bei diesen wäre die Erwärmung viel kleiner ausgefallen, und dann wären die von der Wärmeableitung durch die Zuleitungsdrähte herrührenden Störungen noch stärker aufgetreten als in unserem Falle. Dünnere Drähte durften aber mit Rücksicht auf die theoretischen Voraussetzungen nicht genommen werden. Die Versuchsdrähte waren immer paarweise eingeschaltet und höchstens je 6 cm lang, bildeten daher nur einen kleinen Theil des linearen Leiters des Secundärinductors. Wie in früheren Fällen habe ich mich auch jetzt eines bei Q aufgestellten Standardinductors mit eingeschaltetem Thermoelement bedient, um die Primärfunken zu controliren.

Versuche über die Wärmeentwicklung.

Zur Bestimmung der in einem Drahte durch elektrische Strömungen entwickelten Wärme kann man verschiedene Wege einschlagen. Es ist zunächst das calorimetrische Verfahren, welches ja bei constanten Strömen sehr gute Resultate liefert; auch bei Schwingungen ist dieses nicht ganz ausgeschlossen, doch müsste man bei demselben schon ein länger dauerndes Funkenspiel anwenden, was wieder verschiedene Unannehmlichkeiten mit sich bringt. Ein anderes Mittel würde die durch die entwickelte Wärme bewirkte Widerstandsänderung des Drahtes bieten. Bei Schwingungen würden in diesem Falle durch die Zuleitungsdrähte Störungen verursacht, so dass man nie sicher wäre, dass die beiden Drähte von gleich starken Schwingungen durchflossen werden. Ich habe daher den hier beschriebenen Weg gewählt, bei welchem der lineare Theil des secundären Leiters von allen Zuleitungsdrähten frei

bleibt, denn die Thermoelemente berühren ja die Versuchsdrähte nicht.¹

Die entwickelte Wärmemenge wird durch die Stärke des Thermostromes gemessen, welcher durch die Ausstrahlung des Versuchsdrahtes gegen die in der Nähe befindliche Löthstelle erzeugt wird. Zur Messung der Thermostrome diente ein Thomson-Carpentier-Galvanometer (Schwingungsdauer der Galvanometernadel = 11 Secunden).² Die Primärfunken wurden vom Beobachtungsstuhle aus erregt, stets 10 Secunden lang unterhalten und die Ausschläge so wie in früheren Fällen notirt.

Die Erwärmung der Löthstelle hängt nicht nur von der Ausstrahlung des Drahtes, sondern auch von der Lage der Löthstelle gegen den Draht selbst ab, obwohl die Abhängigkeit von der letzten Bedingung innerhalb gewisser Entfernungen nicht gross ist. Bestimme ich das Verhältniss der Erwärmung zweier Drähte durch elektrische Schwingungen, so ist in dem Werthe dieses Verhältnisses auch die ungleiche Wirksamkeit der Löthstellen enthalten. Ich habe daher in allen Fällen auch das Verhältniss der Wärmeentwicklung durch den constanten Strom gemessen. Beim constanten Strom muss ja dieses Ver-

¹ Bei Versuchen, wie die hier beschriebenen, ist es von wesentlicher Wichtigkeit, dass die beiden Drähte von Schwingungen gleicher Intensität durchflossen werden. Das konnte man bei dieser Anordnung voraussetzen, da nicht nur die beiden Versuchsdrähte gleich dick waren, sondern auch alle anderen Umstände bei beiden gleich gehalten wurden. Für Drähte verschiedener Dicke wäre diese Annahme vielleicht nicht mehr zutreffend, da beim Übergang der Schwingungen von dickeren auf dünnere Drähte und umgekehrt immer Reflexionen auftreten, wie dies ganz neulich J. Ritter v. Geitler-Armingen (Inaug.-Diss., Bonn 1893) gezeigt hat. Es scheinen überall Reflexionen vorzukommen, wo Änderungen des Coëfficienten der Selbstinduction oder des gegenseitigen Inductioncoëfficienten oder ähnlich wirkende Ursachen vorhanden sind.

² Hier wird wegen der Einfachheit stets von einer Ausstrahlung des erwärmten Drahtes gegen das Thermoelement gesprochen; es ist aber selbstverständlich, dass neben der Bestrahlung jedenfalls auch die Convection und Leitung durch die Luft zur Erwärmung der Löthstelle beiträgt. Man spricht ja wohl auch von einer Ausstrahlungsconstante oder von einer äusseren Wärmeleitungsfähigkeit in Fällen, wo es einzig richtig wäre Abkühlungsconstante zu sagen.

hältniss, falls alle sonstigen Umstände bei beiden Drähten die gleichen sind, übereinstimmen mit dem Quotienten der specifischen Widerstände.

Die vom Primärinductor ausgehenden Wellen treffen bei ihrer Ausbreitung im Raume auch auf die zum Thermoelement und zum Galvanometer führenden Drähte, laufen längs derselben weiter und erwärmen ebenfalls die Lötstelle, was Beobachtungsfehler mit sich bringen kann. Obwohl ich nun bemüht war, alle Zuleitungsdrähte möglichst senkrecht zur Richtung der Schwingungen zu führen, so war es doch nicht möglich diese Störungen ganz zu beseitigen. Es konnte zwar die Grösse der Störung für sich bestimmt werden, indem man ganz einfach die beiden Endtheile des Secundärinductors auseinanderzog, so dass bei g und h eine Luftstrecke von 1—2 *cm* eingeschaltet war. Dann wirkte beinahe nur die Störungsursache auf das Thermoelement, da in dem kurzen Mittelstück keine kräftigen Schwingungen möglich waren. Auf diese Weise konnte der fremde Einfluss, welcher insbesondere bei Kupfer mehr als die Hälfte des Gesamteffectes ausmachte, in Rechnung gebracht werden. Noch besser schien es mir, die ganze Störung zunächst durch ein (in der Nähe des Secundärinductors), in die Galvanometerleitung entgegengeschaltetes Thermoelement möglichst zu reduciren, den Rest des Einflusses auf obige Weise zu bestimmen und dann in Rechnung zu ziehen. So wurde dann auch gemacht; es ergab sich in einigen Fällen auch eine Übercompensation, welche natürlich im richtigen Sinne in die Correction gesetzt werden musste.

Um jedoch eine besondere Controle für die Richtigkeit der erhaltenen Werthe zu bekommen, habe ich noch bei zwei verschiedenen Entfernungen des Secundärinductors vom Primärinductor beobachtet. Es hat sich nämlich herausgestellt, dass die Intensität der durch die Schwingungen bewirkten Erwärmung nahezu proportional mit dieser Entfernung abnimmt, während sich der störende Einfluss nur wenig ändert. Ergab daher die Beobachtung bei zwei verschiedenen Entfernungen gleiche Werthe für das Verhältniss der Erwärmung der Drähte, so war das ein Zeichen, dass die störende Ursache richtig in Rechnung gezogen wurde.

Tabelle I gibt einige Daten über die untersuchten Drähte. Obwohl die meisten durch dasselbe Loch gezogen wurden, so ergab die Dickenbestimmung doch etwas verschiedene Werthe, was zum Theil auf einem wirklichen Unterschiede, zum Theil aber auch auf Fehlern in der Auswerthung des Durchmessers beruht.

Tabelle I.

Drahtsorte	Widerstand (18°) pro 1 <i>cm</i> Länge in S. E.	Dicke in Centimetern	Querschnitt in Quadrat- centimetern	Leitfähigkeit bezogen auf Hg
Eisen	0·0109	0·0372	0·00109	8·5
Neusilber.	0·0224	0·0369	0·00107	4·2
Kupfer	0·00191	0·0365	0·00104	50·4
Messing	0·00654	0·0374	0·00110	14·3
Eisen	0·158	0·0094	0·0000694	9·1

Im Nachfolgenden bezeichnet V_0 das Verhältniss der Wärmeentwicklung durch die Schwingungen, V jenes der Wärmeentwicklung durch den constanten Strom. m bedeutet das Verhältniss der specifischen Widerstände der Versuchsdrähte und D die Entfernung des Secundärinductors vom Primärinductor. Die Bezeichnung der Metalle, auf welche sich die Daten beziehen, gibt zugleich den Sinn an, wie das Verhältniss aufzufassen ist.

Tabelle II. $\left. \begin{array}{l} \text{Eisen} \\ \text{Neusilber} \end{array} \right\}$ je 3 *cm* lang.

	$V = 0·46$	$m = 0·49$	
$D = 20 \text{ cm}$	$V_0 = 7·8, 7·0, 7·3, 5·6$	Mittel = 6·9	
40	7·5, 7·8	6·2	7·2

Die beiden Mittelwerthe 6·9 und 7·2 besagen, dass das Eisen durch die elektrischen Schwingungen ungefähr siebenmal so stark erwärmt wird wie ein gleich dicker Neusilberdraht, während es beim constanten Strom nur halb soviel Wärme entwickelt wie das Neusilber. Wären die beiden Thermoelemente

gleich wirksam, so sollte $V = m$ sein; das ist in diesem Falle auch angenähert erfüllt.

Tabelle III. $\left. \begin{array}{c} \text{Eisen} \\ \text{Neusilber} \end{array} \right\}$ je 6 cm lang.

	$V = 0.41$	$m = 0.49$	
$D = 20$ cm	$V_0 = 5.1, 5.3, 4.7$		Mittel = 5.0
40	$4.9, 4.8, 5.1, 5.0$		5.0

Tabelle IV. $\left. \begin{array}{c} \text{Neusilber} \\ \text{Messing} \end{array} \right\}$ je 6 cm lang.

	$V = 3.5$	$m = 3.4$	
$D = 20$ cm	$V_0 = 1.73, 1.88, 1.73, 1.86$		Mittel = 1.80
40	$1.75, 1.80, 1.88, 1.97$		1.85

Tabelle V. $\left. \begin{array}{c} \text{Neusilber} \\ \text{Kupfer} \end{array} \right\}$ je 3 cm lang.

	$V = 50.3$	$m = 12.0$	
$D = 20$ cm	$V_0 = 4.1, 4.1, 4.1$		Mittel = 4.1
40	$4.3, 4.3, 4.5$		4.3

Der für V erhaltene Werth ist bedeutend grösser als m ; dies liegt jedoch nicht an einer so weit verschiedenen Wirksamkeit der Thermoelemente, sondern an der ausserordentlich ungleichen Wärmeleitungsfähigkeit der Metalle. Der Einfluss der dicken Zuleitungsdrähte macht sich beim Kupfer viel mehr bemerkbar als beim Neusilber.¹

¹ Herr Dr. Paul Czermak hat mit einem 6 cm langen Kupferdraht von der hier gebrauchten Sorte und mit einem ebensolchen Neusilberdraht Versuche gemacht über die Intensität der Ausstrahlung an verschiedenen Stellen des durch einen constanten Strom erwärmten, mit dicken Zuleitungen versehenen Drahtes. Die Intensität steigt natürlich von den Zuleitungen gegen die Mitte rasch an. Beim Neusilber gibt es in der Mitte eine 1.5 cm lange Strecke, wo die Ausstrahlung constant ist. Beim Kupfer ist eine Strecke mit durchaus gleicher Ausstrahlung nicht vorhanden; es müssten also noch längere Kupferdrähte genommen werden, damit sich der Einfluss der Zuleitungen in der Mitte nicht bemerkbar machen würde.

Tabelle VI. $\left. \begin{array}{l} \text{Neusilber} \\ \text{Kupfer} \end{array} \right\}$ je 6 *cm* lang.

	$V = 19 \cdot 5$	$m = 12$	
$D = 20 \text{ cm}$	$V_0 = 3 \cdot 03, 2 \cdot 68, 2 \cdot 76$		Mittel = $2 \cdot 82$
40	$2 \cdot 80, 2 \cdot 70, 2 \cdot 77$		$2 \cdot 76$

Bei dieser Combination stimmt V mit m schon besser überein, obwohl sich auch da noch der Einfluss der ungleichen Wärmeleitungsfähigkeit bemerkbar macht.

Schliesslich habe ich noch zwei ungleich lange Kupferdrähte untersucht und folgendes Resultat erhalten:

Tabelle VII. $\frac{\text{Kupfer 6 cm lang.}}{\text{Kupfer 3 cm lang.}}$

	$V = 2 \cdot 82$	$m = 1$	
$D = 20 \text{ cm}$	$V_0 = 1 \cdot 63, 1 \cdot 70, 1 \cdot 68$		Mittel = $1 \cdot 67$
40	$1 \cdot 63, 1 \cdot 58, 1 \cdot 57$		$1 \cdot 59$

Es sei bemerkt, dass man ungefähr die Zahlen der letzten Tabelle erhält, wenn man aus den Daten der Tabellen V und VI das Neusilber eliminirt.

Versuche über die Verzweigung.

Wie schon früher erwähnt, war bei diesen Versuchen der mittlere Theil des Secundärinductors nicht mehr linear, sondern rechteckig, wobei die beiden Versuchsdrähte die langen und die dicken kupfernen Querdrähte die kurzen Seiten bildeten. Hier wurden alle Bestimmungen nur aus einer Entfernung $D = 20 \text{ cm}$ gemacht und jeder Werth aus vier Beobachtungen abgeleitet, die folgenden Stellungen des mittleren Theiles entsprachen: *a*) Rechteck horizontal, erster Draht näher am Primärinductor; *b*) Rechteck horizontal, zweiter Draht näher am Primärinductor; *c*) Rechteck vertical, erster Draht oben; *d*) Rechteck vertical, zweiter Draht oben.

Die Bestimmung der Erwärmung durch den constanten Strom geschah ebenfalls so, dass der Strom beiden gemeinsam zugeführt wurde und sich dann verzweigen musste.

Tabelle VIII. $\left. \begin{array}{l} \text{Eisen} \\ \text{Neusilber} \end{array} \right\}$ je 6 *cm* lang.

$$V = 1.78 \quad m = 0.49$$

$$V_0 = 5.0, 5.4, 5.4, 5.9 \quad \text{Mittel} = 5.4$$

Bei dieser Bestimmung war in der Leitung des Thomson-Carpentier-Galvanometers kein Ballastwiderstand eingeschaltet. Bei einer Einschaltung von 15.4 S. E. ergab eine nochmalige Beobachtung folgende Werthe:

$$V = 1.68 \quad m = 0.49$$

$$V_0 = 5.0, 6.1, 4.4, 4.9 \quad \text{Mittel} = 5.1$$

Um zu sehen, wie weit die beiden Thermoelemente gleich wirksam waren, muss man V auf gleiche Stromstärken reduciren, d. h. man muss jenen Werth von V suchen, welcher sich ergeben hätte, wenn die beiden Drähte vom gleichen Strom durchflossen worden wären. Man erhält diesen Werth, wenn man das beobachtete V mit m^2 multiplicirt. Das gibt

$$V = 0.43 \text{ und } 0.41,$$

also sehr nahe die Zahlen der Tabellen II und III.

Tabelle IX. $\left. \begin{array}{l} \text{Neusilber} \\ \text{Kupfer} \end{array} \right\}$ je 6 *cm* lang.

$$V = 0.117 \quad m = 12$$

$$V_0 = 2.6, 2.7, 2.5, 2.2 \quad \text{Mittel} = 2.5$$

Reducirt man den beobachteten Werth von V auf gleiche Stromstärken, so bekommt man

$$V = 16.9,$$

welcher mit dem entsprechenden Werthe der Tabelle VI ziemlich gut übereinstimmt.

Versuche über das Verhältniss der Ausstrahlung zur Erwärmung des Drahtes.

Die Entwicklung Joule'scher Wärme findet beim constanten Strom im ganzen Querschnitte gleichmässig statt, während sie bei Schwingungen nur in den oberflächlichen Schichten auftritt. Es schien mir daher eine Untersuchung über das in beiden Fällen herrschende Verhältniss der Ausstrahlung zur Erwärmung, respective Widerstandsänderung des Drahtes nicht uninteressant zu sein, zumal damit gewisse Fragen bezüglich der Zulässigkeit der hier angewendeten Methode in Zusammenhang stehen. Im Allgemeinen sollte das Verhältniss der Ausstrahlung zur Widerstandsänderung bei den Schwingungen etwas grösser ausfallen als beim constanten Strom, wie aus einer Betrachtung der Wärmeentwicklung in diesem Falle hervorgeht. Die Dauer der Wärmeentwicklung bei den Schwingungen ist ebenso gross wie die Dauer der Schwingungen selbst; also wenn wir eine Wellenlänge von $3 \cdot 3 m$ und bei jedem Erregerfunken 10 Oscillationen annehmen, ungefähr 11×10^{-6} Secunden. Während dieser Zeit wird die entwickelte Wärme zum Theile durch die Oberfläche nach aussen abgegeben, zum Theile aber nach dem Inneren des Drahtes abgeleitet. Der letzte Theil ist, wie dies ein Vergleich der Wärmeleitungsfähigkeit und der Abkühlungsconstante lehrt, wohl vielmals grösser als der erste. Sehr schnell nach Aufhören der Schwingungen stellt sich jedoch ein Zustand her, wie er beim constanten Strom ebenfalls vorhanden ist; der Draht gibt nur noch Wärme nach aussen ab, und zwar proportional seiner jeweiligen Temperatur. Die Dauer dieser Periode ist gleich der Zeit, welche zwischen zwei Erregerfunken vergeht, also ungefähr $\frac{1}{23}$ Secunde. Die Zeit also, während welcher der Draht mit einer grösseren Intensität strahlt als dies seiner mittleren Temperatur entspricht, ist sehr klein gegenüber der zweiten Periode.

Der Draht bildet für die durch Schwingungen entwickelte Wärme sozusagen ein Reservoir, in welchem sie gesammelt und in der Zwischenzeit, die zwischen zwei Erregerfunken vergeht, wieder abgegeben wird.

Im Nachfolgenden wurde die Strahlung so wie früher, die Erwärmung aber durch die Widerstandsänderung gemessen. Diesmal waren an dem linearen Theil des Secundärinductors zu beiden Seiten des Mittelstückes, worin sich die Versuchsdrähte befanden, Klemmen angelegt¹ und dieser Theil mit der einen Rolle eines Differentialgalvanometers (im Nebenschluss) verbunden. Die zweite Rolle enthielt einen Compensationswiderstand mit grossem Querschnitt. Durch die beiden gegeneinander geschalteten Widerstände wurde ein Strom von passender Stärke geschickt, der den Versuchsdraht zunächst nur wenig erwärmte. Bei dieser Stromintensität wurden die beiden Widerstände mittelst eines Nebenschlussrheostaten möglichst genau compensirt. Eine Verstärkung des Stromes oder die Erregung der Schwingungen bewirkte dann sofort einen Ausschlag am Galvanometer infolge der Erwärmung des Versuchsdrahtes.²

Es schien mir am passendsten, zu diesem Theil der Versuche Drähte zu nehmen, bei denen die elektrische Strömung möglichst stark in der Oberflächenschichte concentrirt ist, also Eisendrähte; ich habe daher zwei solche von verschiedener Dicke zu den Beobachtungen herangezogen.

Im Nachfolgenden beziehen sich die Buchstaben mit dem Index 0 auf Oscillationen, die Buchstaben ohne Index auf den constanten Strom. α gibt die Galvanometerausschläge, welche

¹ Das Anlegen der Klemmen brachte eine sehr beträchtliche Störung in den Verlauf der elektrischen Schwingungen im Secundärinductor. Die Erwärmung der Drähte war bedeutend geringer wie ohne angelegte Klemmen.

² Sind die beiden Widerstände nicht vollkommen abgeglichen, so ist bei der Verstärkung des Stromes ein Theil des Ausschlages auch auf Rechnung dieses Umstandes zu setzen. Dieser Theil kann bald positiv, bald negativ sein, überdies wächst er proportional der Verstärkung des Stromes, während die infolge Erwärmung des Drahtes auftretende Ablenkung mit dem Quadrat der Verstärkung geht. Der Fehler der nicht vollkommenen Abgleichung kann durch viele Beobachtungen ziemlich reducirt werden. Ein grösserer Fehler, der nur in einem Sinne wirkt, rührt von der Selbstinduction her. Überwiegt diese in einem Zweige, so macht sich das bei der hier angewendeten Beobachtungsmethode, bei welcher die Stromverstärkung immer nur 10 Secunden lang unterhalten wurde und man die Ausschläge so wie früher notirte, sehr bemerkbar. Durch passende Formen des Compensationswiderstandes war es möglich, den von der Induction herrührenden Ausschlag ganz zum Verschwinden zu bringen.

die Strahlung der Oberfläche messen, β jene, welche der Widerstandsänderung entsprechen.

Tabelle X. Eisendraht (Dicke $0\cdot0372\text{ cm}$).

Leitfähigkeit des Drahtes bezogen auf Hg = $8\cdot5$; $D = 20$;
Differentialgalvanometerstrom = $0\cdot043$ Ampère.

Erwärmung durch elektrische Schwingungen.

		Mittel		$\frac{\alpha_0}{\beta_0}$
67	116			
192	353	145	260	1·79
175	312			
148	260			

Erwärmung durch den constanten Strom — Steigerung der Intensität des Differentialgalvanometerstromes auf das $4\cdot2$ -fache.

		Mittel		$\frac{\alpha}{\beta}$
		β		
215	94			
207	91	214	91	0·425
227	91			
208	89			

Die Ausschläge β_0 und β beziehen sich auf eine verschiedene Galvanometerempfindlichkeit. Damit also die Verhältnisse unter sich vergleichbar werden, muss das letzte mit $4\cdot2$ multiplicirt werden.¹ Ferner ist Rücksicht zu nehmen auf den Einfluss der Induction in den Zuleitungsdrähten, welcher sich auch jetzt, sowie in früheren Fällen bemerkbar machte. Es war auch hier ein Gegenthermoelement eingeschaltet; die beiden Thermoelemente compensirten sich nicht ganz, es war das Hilfselement etwas stärker, und der Einfluss der Zuleitung

¹ Um die Verstärkung des Stromes im Differentialgalvanometer herbeizuführen, wurde neben den schon eingeschalteten Widerstand (in diesem Falle 50 S. E.) ein anderer von passender Grösse als Nebenschluss gelegt. Das Verhältniss der Stromstärken konnte leicht durch den Ausschlag bestimmt werden, welchen eine kleine Änderung in der Grösse der compensirten Widerstände hervorbrachte.

betrug ungefähr 3% des ganzen Effectes, und zwar wie gesagt im Sinne des compensirenden Elementes; daher sind die Werthe von α_0 um soviel zu erhöhen. Berücksichtigt man alle diese Umstände, so bekommt man

$$\left. \begin{array}{l} \text{Ausstrahlung} \\ \text{Widerstandsänderung} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{für Schwingungen} \\ \text{für constanten Strom} \end{array} = \begin{array}{l} 1.84 \\ 1.78 \end{array}$$

Eine andere Bestimmung ergab die Werthe 2.05 und 1.90. In beiden Fällen zeigt sich bei Schwingungen ein grösserer Werth als beim constanten Strom; doch reicht der Unterschied kaum oder nicht weit über die Beobachtungsfehler hinaus.

Tabelle XI. Eisendraht (Dicke = 0.0094 cm).

Leitfähigkeit bezogen auf Hg = 9.1; $D = 40$ cm; Differentialgalvanometerstrom = 0.0039 Ampère.

Erwärmung durch Schwingungen.

		Mittel		$\frac{\alpha_0}{\beta_0}$
		β_0	α_0	
269	136			
146	66	221	103	0.466
157	71			
294	138			

Erwärmung durch constanten Strom. Steigerung der Intensität auf das 6.4fache.

		Mittel		$\frac{\alpha}{\beta}$
		β	α	
303	21.8			
287	21.0			
330	21.5	311	2.8	0.070
332	22.2			
307	22.1			
309	22.0			

Die Correction wegen der Induction in den Zuleitungsdrähten macht hier nichts aus. Bringt man die Verhältnisse auf die gleiche Galvanometerempfindlichkeit, so bekommt man

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\text{Ausstrahlung}}{\text{Widerstandsänderung}} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{für Schwingungen} = 0.466 \\ \text{für constanten Strom} = 0.446 \end{array}$$

Eine andere Bestimmung ergab die Werthe 0.488 und 0.463.

Auch hier ist ein schwaches Überwiegen des bei Schwingungen erhaltenen Verhältnisses zu constatiren. Bei nicht magnetisirbaren Metallen wird der Unterschied noch kleiner sein, und man begeht sicher keinen beträchtlichen Fehler, wenn man die bei Schwingungen entwickelte Wärmemenge durch einen Vergleich mit dem constanten Strom, im absoluten Werthe angibt, wie ich das in einem früheren Falle gethan habe.

Discussion der Resultate.

Tabelle XII.

Drahtsorte	Verhältniss der Wärmeentwicklung		Verhältniss der spezifischen Widerstände
	für Schwingungen	für constanten Strom	
$\left. \begin{array}{l} \text{Eisen} \\ \text{Neusilber} \end{array} \right\} \text{ je } 3 \text{ cm lang}$	7.0	0.46	0.49
$\left. \begin{array}{l} \text{Eisen} \\ \text{Neusilber} \end{array} \right\} \text{ je } 6 \text{ cm lang}$	5.0	0.41	0.49
$\left. \begin{array}{l} \text{Neusilber} \\ \text{Messing} \end{array} \right\} \text{ je } 6 \text{ cm lang}$	1.82	3.5	3.4
$\left. \begin{array}{l} \text{Neusilber} \\ \text{Kupfer} \end{array} \right\} \text{ je } 3 \text{ cm lang}$	4.1	50.3	12.0
$\left. \begin{array}{l} \text{Neusilber} \\ \text{Kupfer} \end{array} \right\} \text{ je } 6 \text{ cm lang}$	2.8	19.5	12.0
$\frac{\text{Kupfer, } 6 \text{ cm lang}}{\text{Kupfer, } 3 \text{ cm lang}}$	1.6	2.82	1.0

Tabelle XII gibt eine übersichtliche Zusammenstellung der Resultate, welche sich auf die Wärmeentwicklung beziehen. Man ersieht aus derselben, dass die Wärmeentwicklung bei Schwingungen in ganz anderen Verhältnissen vor sich geht wie beim constanten Strom. Neben der Magnetisirbarkeit des Drahtes ist allerdings auch der spezifische Widerstand des

Drahtes für die Absorption der elektrischen Energie massgebend, doch in anderer Weise wie beim constanten Strom. Diese Versuche bestätigen vollkommen meine früheren am Eisen gemachten Beobachtungen und ebenso die Untersuchungen von Bjerknæs (l. c.). Wenn man die Metalle nach der Stärke der Wärmeentwicklung bei elektrischen Schwingungen ordnet, so bekommt man nachstehende Reihenfolge: Eisen, Neusilber, Messing, Kupfer. Will man auch Masszahlen für die Metalle dieser Reihe haben, so muss man berücksichtigen, dass sich die Drähte einer Combination nicht immer unter den gleichen, die Strahlung beeinflussenden Umständen befanden und dass auch die angewendeten Thermolemente nicht immer gleich wirksam waren; darum sind auch die beobachteten Verhältnisse der Wärmeentwicklung beim constanten Strom nicht immer gleich dem Verhältnisse der specifischen Widerstände. Nimmt man darauf Rücksicht, so ergeben sich aus den Combinationen, bei welchen nur 6 *cm* lange Drähte verwendet wurden, folgende relative Werthe: Eisen Neusilber Messing

Kupfer = 10·5 1·75 1 1. Es sei jedoch dabei erwähnt, dass die Ermittlung der auf Kupfer bezüglichen Masszahl mit Hilfe des für constante Ströme gefundenen Verhältnisses vielleicht nicht ganz correct und die Zahl selbst daher nur ange nähert richtig ist.

Lord Rayleigh¹ und Stefan² haben für den Widerstand, welchen Drähte dem Verlaufe elektrischer Schwingungen entgegensetzen, Formeln berechnet, die bei sehr schnellen Schwingungen eine recht einfache Gestalt annehmen. Bezeichnet nach Stefan *w* den Widerstand eines Drahtes für constanten Strom, *w'* den für elektrische Oscillationen, so ist

$$w' = w \left(\pi a \sqrt{\frac{n\mu}{\sigma}} + \frac{1}{4} \right).$$

In dieser Formel bedeutet *n* die Schwingungszahl, *a* den Halbmesser des Drahtes, μ die magnetische Permeabilität und σ

¹ Phil. Mag., Vol. 21, Jahrg. 1886.

² Diese Sitzungsber., Bd. 99, Jahrg. 1890.

den specifischen Widerstand, ausgedrückt in absoluten Einheiten. Für sehr grosse n geht die Formel über in

$$w' = w \pi a \sqrt{\frac{n\mu}{\sigma}},$$

welche mit der von Lord Rayleigh angegebenen identisch ist. Die Schwingungszahl betrug bei diesen Versuchen 9×10^7 , und man kann, ohne einen beträchtlichen Fehler, den letzten Ausdruck für w' nehmen. Die Rechnung wurde von Stefan unter der Voraussetzung durchgeführt, dass die elektrische Strömung nur in einer Schichte stattfindet, welche gegen den Radius des Drahtes klein ist. Die neuesten Versuche von Bjerknæs¹ lehren, dass Schwingungen von der hier verwendeten Häufigkeit im Kupfer ungefähr 0.01 mm tief eindringen. Bei Neusilber, welches viel schlechter leitet als Kupfer, kommen sie aber jedenfalls tiefer. Der Halbmesser der hier benützten Drähte war 0.18 mm ; die theoretische Voraussetzung ist also nur angenähert erfüllt; eine exacte Übereinstimmung zwischen den berechneten und beobachteten Werthen ist daher nicht zu erwarten. Hier handelt es sich jedoch nur um Verhältnisse zwischen zwei Drähten, und da kann man wenigstens in solchen Fällen, wo die Bedingungen bei beiden Drähten nicht gar zu verschieden abweichen, annehmen, dass die Beobachtung und Rechnung nahe zum gleichen Resultate führen, falls die Theorie richtig ist. Dies trifft bei der Combination Neusilber—Messing zu.

Die in der Zeit dt entwickelte Joule'sche Wärme ist gegeben durch den Ausdruck $w i^2 dt$ beim constanten Strom und durch $w' i^2 dt$ bei den Schwingungen. Habe ich daher zwei gleich dicke Drähte mit den specifischen Widerständen σ und σ_1 , den Permeabilitätscoefficienten μ und μ_1 , so wird das Verhältniss der entwickelten Wärmemengen

$$V_0 = \frac{w}{w_1} \sqrt{\frac{\mu \sigma_1}{\mu_1 \sigma}}$$

¹ Comptes rendus, 1892, t. 115.

sein, vorausgesetzt, dass die beiden Drähte von Schwingungen gleicher Intensität und Dauer durchflossen werden.

Betrachten wir also die Combination Neusilber—Messing. Hier ist $\mu = \mu_1 = 1$ und $\sigma_1/\sigma = 0\cdot293$ zu setzen; daher

$$V_0 = \frac{w}{w_1} \times 0\cdot541.$$

Will man den so berechneten Werth von V_0 mit dem beobachteten vergleichen, so muss man auf eine eventuelle ungleiche Wirksamkeit der Thermoelemente Rücksicht nehmen; auch muss man beachten, dass vielleicht andere die Strahlung beeinflussende Umstände nicht in beiden Metallen gleich sind.

Statt des Verhältnisses $\frac{w}{w_1}$ führe ich daher das beim constanten Strom beobachtete Verhältniss der Wärmeentwicklung ein und bekomme

$$V_{0\text{ ber.}} = 3\cdot52 \times 0\cdot541 = 1\cdot90.$$

Die Beobachtung ergab für V_0 die Werthe 1·80 und 1·85; beide in guter Übereinstimmung mit dem berechneten.

Die Combination Neusilber—Kupfer lieferte Resultate, welche mit den aus den Formeln abgeleiteten nicht harmoniren. Man muss aber da zunächst an den grossen Unterschied in der Leitfähigkeit der beiden Metalle denken; den theoretischen Voraussetzungen wird in sehr ungleicher Weise genügt. Für Neusilber—Kupfer (je 3 *cm* lang) ergibt sich $V_{0\text{ ber.}} = 14\cdot5$, während die Beobachtung 4·2 lieferte.

Die zweite Combination (je 6 *cm* lang) liefert die Werthe 5·6 berechnet und 2·8 beobachtet. Neben dem vorher erwähnten Umstände spielt aber auch die ungleiche Wärmeleitfähigkeit der beiden Metalle eine Rolle. Es scheint, als ob die durch Schwingungen erzeugte Wärme langsamer abgeleitet werden würde als die vom constanten Strom herrührende. Mit Rücksicht auf die nur oberflächliche Wärmeentwicklung bei Schwingungen wäre dies ja erklärlich, obwohl die Versuche über das Verhältniss der Ausstrahlung zur Erwärmung, respective Widerstandsänderung des Drahtes einen geringeren Einfluss erwarten liessen. Dass aber ein solcher Einfluss sicher

vorhanden ist, lehrt ganz deutlich der Versuch mit der Combination Kupfer 6 *cm* Kupfer 3 *cm*. In Zukunft wird es sich empfehlen, für solche Versuche, die auf eine Prüfung der Theorie hinausgehen, dickere und längere Drähte zu verwenden. Zur Berechnung des Werthes V_0 für die Combination Eisen—Neusilber muss man in die Formel die Grösse μ einführen; sie lautet jetzt

$$V_0 = \frac{w}{w_1} \sqrt{\frac{\mu \sigma_1}{\sigma}}$$

Bekanntlich kann μ sehr verschiedene Werthe annehmen, und bei unseren geringen Erfahrungen über die in solchen Fällen auftretende Magnetisirung ist es ganz unmöglich, irgend eine bestimmte Zahl für μ einzuführen. Wir wollen aber, gestützt auf den Versuch mit Neusilber—Messing, die Formel als richtig annehmen und daraus μ berechnen; wir bekommen dabei allerdings nur einen angenäherten Werth, da, wie gesagt, für unseren Neusilberdraht die theoretischen Voraussetzungen auch nur angenähert erfüllt sind. Man erhält aus den Beobachtungen mit den 3 *cm* langen Drähten $\mu = 111$, während die zweite Combination $\mu = 73$ liefert.¹ Es wäre vielleicht eine, auch vom praktischen Standpunkt aus, dankbare Aufgabe, zu untersuchen, welche Werthe μ bei verschiedenen Intensitäten und bei verschiedener Dauer der Schwingungen annehmen kann. Man hätte da ziemlich weite Grenzen, von den in der Praxis üblichen Wechselströmen an bis zu den Oscillationen, welche den Strahlen elektrischer Kraft entsprechen.

Bezüglich der Verzweigung sehr schneller elektrischer Schwingungen lehrt die Theorie, dass für diese nur der Coëfficient der Selbstinduction, nicht aber der Widerstand massgebend ist. Der Coëfficient der Selbstinduction S ist nach Stefan (l. c.) gegeben durch die Formel

$$S = 2l \left(\log \frac{2l}{ac} + \frac{1}{4\pi a} \sqrt{\frac{\mu \sigma}{n}} \right).$$

¹ Dabei ist vorausgesetzt, dass von der entwickelten Wärmemenge nichts auf Rechnung der Hysteresis zu setzen ist.

Darin bedeutet l die Länge des Drahtes; die übrigen Bezeichnungen sind dieselben wie vorher. c ist eine Constante, welche nach den verschiedenen Theorien der Induction verschiedene Werthe annimmt. Wir nehmen $c = e^{3/2}$, wie das der sogenannten elektromagnetischen Theorie der Induction entspricht. Für unsere 6 cm langen Drähte wird das erste Glied der Formel innerhalb der Klammer $= 4 \cdot 97$; das zweite gibt für Eisen, wenn man $\mu = 73$, $n = 9 \times 10^7$ und $\sigma = 11200$ annimmt, die Zahl 0·41; für alle anderen ist es zu vernachlässigen. Sind die Drähte gleich lang und gleich dick, so haben alle denselben Coëfficienten der Selbstinduction, nur der von Eisen ist ungefähr 10⁰/₀ grösser. Der Theorie gemäss müssen sich also die Schwingungen, selbst das Eisen inbegriffen, nahezu in zwei gleiche Theile verzweigen, wenn die beiden Zweige gleich lang und gleich dick sind. Wir müssen daher in diesem Falle für das Verhältniss der Wärmeentwicklung durch die Schwingungen sehr nahe denselben Werth erhalten wie früher, wo die Drähte hintereinander geschaltet waren.

Die Beobachtung ergab für die Combination Eisen—Neusilber die Zahl 5·2 für das Wärmeentwicklungsverhältniss bei Verzweigung der Schwingungen und 5·0, als die Drähte hintereinander geschaltet waren. Der constante Strom theilte sich bei der Verzweigung so, dass er das Eisen 1·73mal so stark erwärmte wie das Neusilber, während früher bei gleichem Strom $V = 0 \cdot 41$ erhalten wurde.

Die Verzweigung Neusilber—Kupfer lieferte $V_0 = 2 \cdot 5$, gut übereinstimmend mit dem bei der Hintereinanderschaltung erhaltenen Werthe, während die Theilung des constanten Stromes $V = 0 \cdot 117$ und die Erwärmung bei gleicher Intensität $V = 19 \cdot 5$ ergab.

Hier liefert die Beobachtung in der That überall Resultate, wie sie nach den theoretischen Überlegungen zu erwarten waren.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung lassen sich also wie folgt zusammenfassen:

Der Widerstand, durch welchen die Wärmeentwicklung beim Durchgange elektrischer Schwingungen von sehr kurzer Dauer bedingt ist, hängt von der Magnetisirbarkeit des betreffenden Drahtes und von der Drahtsorte selbst ab; von dieser

jedoch in anderer Weise wie beim constanten Strom. Für Drähte aus Eisen, Neusilber, Messing und Kupfer von 6 *cm* Länge und 0·018 *cm* Halbmesser ergibt sich bei Schwingungen eine Wärmeentwicklung, welche ungefähr durch die Relationen $10\cdot5 \quad 1\cdot75 \quad 1 \quad 1$ gegeben ist; doch dürfte die auf Kupfer bezügliche Zahl etwas zu gross sein.

Wendet man auf diese Beobachtungen die von Stefan berechneten Formeln an, so zeigt sich bei der Combination Neusilber—Messing eine gute Übereinstimmung zwischen Theorie und Erfahrung. Die Combination Neusilber—Kupfer liefert nicht harmonirende Werthe, was zum Theile darauf zurückzuführen ist, dass bei diesen Versuchen nicht alle jene Bedingungen erfüllt waren, welche die Theorie voraussetzt.

Für die magnetische Permeabilität des Eisens wurde unter Zugrundelegung der Stefan'schen Formel in einem Falle die Zahl 111, im anderen 73 gefunden.

Die Beobachtungen haben gezeigt, dass bei der Verzweigung elektrischer Schwingungen von sehr kurzer Dauer nur der Coëfficient der Selbstinduction, nicht aber der Widerstand massgebend ist.

Schliesslich sei es mir gestattet, meinen Freunden Dr. Paul Czermak und Dr. Michael Radakovič, welche mich bei dieser Arbeit vielfach unterstützten, meinen verbindlichsten Dank auszusprechen.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse](#)

Jahr/Year: 1893

Band/Volume: [102_2a](#)

Autor(en)/Author(s): Klemencic Ignaz

Artikel/Article: [Beiträge zur Kenntniss der Absorption und Verzweigung elektrischer Schwingungen in Drähten. 298-320](#)