3. Ueber Ausstrahlung hochgespannter Wechselströme von hoher Frequenz aus Spitzen; von Arthur Möhlmann.

(Nach seiner Inaugural-Dissertation für die Annalen bearbeitet
vom Verfasser.)

Herr Himstedt hat bei seinen Versuchen über hochgespannte Wechselströme von hoher Frequenz, sogenannten „Teslaströmen“¹⁾, festgestellt, dass ein Elektroskop sich in Luft immer positiv ladet, wenn es in passender Entfernung einem mit einer Spitze versehenen Pole einer Teslapule gegenübersteht. (In anderen Gasen, z. B. in Wasserstoff, Leuchtgas, Stickstoff, Kohlensäure, Ammoniak, ist die Ladung negativ.) In einer weiteren Arbeit wurde sodann von demselben Verfasser gezeigt²⁾, dass eine Scheibe durch die Ausstrahlung aus der Spitze eines Teslapoles in Luft entweder „positiv, gar nicht, oder negativ geladen wird, je nach der Entfernung zwischen Spitze und Scheibe“. Ein Commutiren des primären Stromes oder ein Vertauschen der Pole ist auf das Vorzeichen der Ladung ohne Einfluss. Nun unterscheiden sich diese Hochfrequenzströme von den Inductionsströmen, wie sie ein gewöhnliches Inductorium liefert, nur durch ihre höhere Spannung und Frequenz, und deshalb entsteht die Frage, deren Lösung in dieser Arbeit versucht werden soll, ob auch beim Arbeiten mit einem Inductorium, vorausgesetzt, dass die Wechselzahl und Spannung genügend hoch gewählt wird, nicht ähnliche Erscheinungen auftreten, wie sie bei den Teslaströmen stattfinden, und, wenn dieses der Fall ist, welchen Einfluss hierbei die Wechselzahl, welchen die Spannung ausübt.

I. Experimenteller Teil.

A. Sinoïdaler Wechselstrom.

Um für die positiven und negativen Stromimpulse möglichst gleiche Verhältnisse zu schaffen, wurde das Inductorium

1) F. Himstedt, Wied. Ann. 52. p. 473. 1894.

2) F. Himstedt, l. c. 68. p. 298. 1899.

nicht mit unterbrochenem Gleichstrom gespeist, sondern mit Wechselstrom. Derselbe wurde erzeugt mittels einer Gleichstrom-Wechselstrommaschine des Ingenieurs Hummel, München, welche einen Strom von rein sinusförmalem Verlaufe lieferte. Es ist dieses eine gleiche Maschine, wie sie von Hrn. Ebert bei seinen Arbeiten über „elektrische Gasentladungen“ zuerst benutzt und dort auch genauer beschrieben wurde.¹⁾ Im übrigen war die Versuchsanordnung die folgende:

Wie aus der beifolgenden Schaltungsskizze (Fig. 1) ersichtlich, wurde die Gleichstrom-Wechselstrommaschine von einer

Fig. 1.

Accumulatorenbatterie *B* gespeist. Durch Variieren der Anzahl der Accumulatoren konnte die Touren- und demnach die Stromwechselzahl pro 1 Min. geändert werden. Der Wechselstrom dieser Maschine wurde dem Inductorium *J* zugeführt, jedoch konnte seine Spannung durch einen variablen, eingeschalteten Widerstand *R* ebenfalls nach Belieben geändert werden. Das Inductorium war ein solches von Dr. Levy, Berlin, und hatte 50 cm Schlagweite. Sein einer secundärer Pol war an Erde gelegt, während der andere zur Spitze *S* führte. Dieser stand die Auffangscheibe *T* in variablem Abstand gegenüber und war dieselbe einestheils mit der einen Belegung eines Glimmercondensators *C*, dann aber auch mit dem einen Quadrantenpaare eines empfindlichen Thomson'schen Elektrometers *E*

1) H. Ebert, Wied. Ann. 65. p. 766. 1898.

verbunden. Die andere Belegung des Condensators, sowie das zweite Quadrantenpaar des Elektrometers waren an Erde gelegt. Die Ladung der Elektrometernadel geschah durch eine Batterie von 100 Stück Cu-, MgSO_4 -, Zn-Elementen. Dieselbe konnte in fünf Unterabteilungen zu je 20 Elementen geschaltet werden, und liess sich somit die Ladung der Nadel nach Erfordernis variiren. Die benutzte Magnesiumsulfatlösung war eine 0,1 Normallösung und die Spannung jeder einzelnen Zelle betrug 1,08 Volt. Die Spitze *s* bestand aus einem feinen Platindraht (Wollastondraht) von 0,05 mm Durchmesser, welcher an seine Zuleitung, einen Kupferdraht von 0,08 mm Durchmesser, angelötet war. Dieser Platindraht mit der Zuleitung war in ein Glasrohr eingeschmolzen und sein hervorragendes Ende bis auf das Glasrohr abgefeilt. Man erhält hierdurch allerdings eigentlich eine strahlende kreisrunde Fläche; diese ist jedoch bei ihrem geringen Durchmesser von 0,05 mm praktisch als eine Spitze anzusehen und verhält sich bei den hohen Spannungen auch wie eine solche. Die Art dieser Herstellung bietet aber den grossen Vorteil, dass es dadurch möglich ist, zu jeder Zeit Spitzen von der gleichen Beschaffenheit zu erhalten, auch werden schädliche Seitenstrahlungen aus den Mantelflächen des Drahtes durch das Glasrohr völlig von der Scheibe ferngehalten. Um etwaige Beeinflussungen des Elektrometers oder directe Ausstrahlung auf die Scheibe zu verhüten, stand ersteres ca. 4 m, letztere ca. 2 m vom Inductorium und der Primärstromquelle entfernt, auch wurden Blechschirme, welche mit der Erde leitend verbunden waren, als Schutzwände zwischen ihnen aufgestellt. Als „Spannung“ wäre eigentlich das Potential der Spitze und nicht die Secundärspannung des Inductoriums zu setzen. Diese zwei Werte brauchen nicht notwendigerweise identisch zu sein, und sind es auch wohl in den seltensten Fällen. Bei der vorliegenden Versuchsanordnung z. B. betrug die Zuleitung vom Inductorium bis zur Spitze, wie oben angeführt, mehr als 2 m. Wenn nun auch als Leitung ein Messingrohr von ca. 10 mm Durchmesser genommen wurde, so waren Verluste bei den hohen Spannungen, um welche es sich hier handelt, dennoch nicht zu vermeiden, wie dadurch bewiesen wurde, dass bei Annäherung der Hand schon in grösserem Abstände von der Leitung eine Aus-

strahlung deutlich wahrzunehmen war. Bei weiterer Annäherung der Hand an die Leitung oder auch an den Hartgummimantel des Inductoriums schossen aus den Fingerspitzen sogar intensive Strahlenbüschel von 10 bis 15 cm Länge hervor, ohne ein unangenehmes Gefühl zu verursachen. Sind nun aber die Bedingungen innerhalb der einzelnen Versuchsreihen, wie in den folgenden, stets die gleichen, so stehen das Potential der Spitze und die secundäre Spannung des Inductoriums in einem constanten Verhältnis. Da es sich nun im Folgenden, zumal bei der Construction der Curven, nicht um die absoluten Werte, sondern nur um die relativen Grössen der Spannungen handelt, so kann, ohne einen Fehler zu begehen, statt des Potentials der strahlenden Spitze die Spannung am secundären Pole des Inductors gesetzt werden.

Diese Secundärspannungen wurden mit einem Elektrometer von Siemens & Halske bestimmt. Dieses Instrument, welches vorher auf die Richtigkeit seiner Angaben geprüft worden war, gestattete Spannungen bis zu 15000 Volt zu messen. Die höher gelegenen Werte wurden dann auf graphischem Wege festgestellt. Die Stromwechselzahlen betrugen bei der verwendeten Gleichstrom-Wechselstrommaschine das Vierfache ihrer Tourenzahlen, und letztere konnte man direct mit dem Tourenschlüssel bestimmen. Da das Inductorium, wie Versuche ergaben, völlig symmetrisch gebaut war, ferner der Primärstrom einer reinen Sinuscurve entsprach, so wurden also der Spitze in rascher Aufeinanderfolge abwechselnd gleich grosse positive und negative Stromimpulse zugeführt, denn die Unterschiede, welche ein Inductorium, das mit intermittirendem Gleichstrom gespeist wird, bezüglich der Stärke des Schliessungs- und Oeffnungsstromes zeigt, treten in diesem Falle nicht auf. Man sollte nun im allgemeinen annehmen, dass unter diesen Umständen die alternirenden positiven und negativen Ausstrahlungen der Spitze auf die Scheibe einander gegenseitig aufheben würden, und das Elektrometer keinen Ausschlag anzeigen könnte. Dieses ist jedoch, wie ein Versuch zeigt, nicht der Fall. Bei entsprechend grosser Nähe der Spitze zur Scheibe zeigt vielmehr das Elektrometer eine positive, bei grösserer Entfernung unter sonst gleichen Umständen eine negative Strahlung an. Dazwischen liegt ein Punkt, an dem

das Elektrometer gar keine Ladung anzeigt, nämlich der Umkehrpunkt im Vorzeichen der Strahlung. Eine Erklärung dieser Erscheinung soll später versucht werden. Ein Vertauschen der Secundärpole oder ein Commutiren des Primärstromes ist hier gerade, wie bei Teslaströmen, ohne Einfluss.¹⁾

„Es treten also hier thatsächlich genau die gleichen Erscheinungen auf, wie sie Herr Himstedt bei einem Teslapole beobachtete.“

Nach diesen Resultaten lag es nahe zu versuchen, ob es nicht auch möglich sei, mit einfacheren Hilfsmitteln, z. B. mit einem Elektroskop, eine Umkehr im Vorzeichen der Ausstrahlung festzustellen. In der That führten entsprechende Versuche zu denselben Ergebnissen.

Verbindet man nämlich die Scheibe mit einem Elektroskop und nähert dieselbe aus grösserer Entfernung der Spitze, so divergiren die Goldblättchen des Elektroskopes. Bei weiterer Annäherung der Scheibe an die Spitze nimmt die Divergenz der Goldblättchen zunächst zu, erreicht ein Maximum, um bei noch grösserer Annäherung der Scheibe wieder abzunehmen, sich einem Minimum zu nähern und dann wieder zu wachsen. Dass bei der ersten Annäherung der Scheibe zur Spitze eine Divergenz der Goldblättchen überhaupt stattfindet, deutet zunächst schon darauf hin, dass die alternirenden positiven und negativen Ladungen der Spitze sich in ihren Wirkungen auf die Scheibe nicht aufheben, dass vielmehr eine Ladung der Scheibe vorhanden bleibt. Eine genauere Untersuchung dieser Ladung am Elektroskop mit einer geriebenen Siegellackstange ergab dann, dass bei einer etwas grösseren Entfernung der Scheibe von der Spitze, wie sie dem Minimum des Ausschlages entsprach, die Strahlung der Spitze negativ, bei einer geringeren Entfernung aber positiv war. Hierzwischen und zwar beim Punkte des Minimums der Divergenz der Goldblättchen liegt der Umkehrpunkt im Vorzeichen der Strahlung.

Diese Umkehrpunkte liessen sich nun mit Hülfe des empfindlichen Elektrometers mit grosser Genauigkeit durch directe Ablesung leicht bestimmen. Dieselben wurden bei constanten Stromwechselzahlen beobachtet, und die gefundenen Werte

1) A. Möhlmann, Inaug.-Diss. p. 11 u. 12. 1901.

darauf derart in ein Coordinatensystem eingetragen, dass die secundären Spannungen auf der Ordinate, die Umkehrpunkte auf der Abscisse lagen. In der folgenden Tabelle sind die Ablesungen einer Versuchsreihe gegeben. Die Anzahl der Stromwechsel pro 1 Min. sei mit n bezeichnet, die Secundärspannung in Volt mit v , und der Abstand der Scheibe von der Spitze in Millimetern im Umkehrpunkt mit u .

Es wurde gefunden:

n	$v \cdot 10^{-3}$	u	n	$v \cdot 10^{-3}$	u
21 480	16,20	38,0	21 480	21,75	90,0
21 480	17,61	45,5	21 480	21,85	91,5
21 480	18,63	53,5	21 480	22,46	101,0
21 480	20,63	75,0	21 480	23,10	111,5
21,480	20,90	78,0			

Aus den Werten dieser Tabelle wurde nun die Curve Fig. 2, wie oben angegeben, construiert (Abscisse = u ; Ordinate = v).

Fig. 2.

Durch eine weitere Untersuchung der Curve wurde festgestellt, dass dieselbe vom 2. Grade, und zwar eine Parabel ist, deren Coordinatensystem in Bezug auf das ursprüngliche, zu ihrer Construction benutzte parallel verschoben ist, wie es die Y- und X-Linien angeben. Eine Erklärung für diese Parallelverschiebung kann erst später gegeben werden, da die in Betracht kommenden Umstände, wie der Einfluss der Secundär-

spannung und Stromwechselzahl, sowie die Form der Spitze noch vorher untersucht werden müssen.

Die Formel der Parabel in Bezug auf das ursprüngliche Coordinatensystem lautet:

$$(y - a)^2 = 2p(x - b).$$

p ist der Parameter der Parabel in Bezug auf das neue System, a und b entsprechen der Parallelverschiebung. In dem vorliegenden Beispiel ist nun einzusetzen: $a = 14,0$; $b = 33,4$; $p = 0,53125$. Uebrigens ist aus der beigegebenen Zeichnung ohne weiteres ersichtlich, dass es sich hier um eine Parabel handelt. Wählt man die Linie AB zur Leitlinie und den Punkt P zum Brennpunkt, so ist die bekannte Bedingung für eine Parabel erfüllt, dass der Abstand eines jeden Punktes der Curve von der Leitlinie gleich seinem Abstand vom Brennpunkt ist. Die Abstände der beobachteten Curvenpunkte sind in der Zeichnung angegeben. Eine grössere Anzahl weiterer Versuche bestätigte überdies, dass die auf die oben angegebene Weise erhaltenen Curven stets Parabeln sind¹⁾ und mögen in der folgenden Tabelle die in die Curvenformel einzusetzenden Werte für n , a , b und p gegeben sein.

Versuch	n	a	b	p
I	21 200	14,2	36,8	0,8375
II	20 200	13,6	32,6	1,075
III	19 200	13,3	35,4	1,0
IV	18 000	11,5	27,3	1,25
V	16 800	12,55	29,0	0,925
VI	15 400	10,95	22,45	0,975

Es wäre jetzt vielleicht noch von Interesse zu fragen, ob es nicht möglich ist, bei passend gewählter Frequenz und genügend hohen Spannungen in jeder Entfernung der Scheibe von der Spitze in Luft nur positive Ausstrahlung zu erhalten, bei welchen also der Umkehrpunkt im Unendlichen liegen würde. Giebt es nun für eine bestimmte Stromwechselzahl n eine solche Spannung, dass diese Forderung erfüllt ist, so muss sich die Curve asymptotisch einer zur Abscisse parallelen

1) A. Möhlmann, l. c. p. 17 u. 18.

Geraden nähern. Diese Gerade schneidet die Ordinate in einem bestimmten Punkte. Das heisst aber nichts anderes, als dass bei einem Umkehrpunkt in der Entfernung Unendlich diejenige Secundärspannung, welche durch den Schnittpunkt der Geraden mit der Ordinate gegeben ist, genügen würde, um eine positive Ausstrahlung bei der gegebenen Stromwechselzahl stets zu erhalten. Diese Secundärspannung würde also für die betreffende Stromwechselzahl die Minimalspannung darstellen, welche erforderlich ist, um in jedem Abstand der Scheibe von der Spitze von Null bis Unendlich nur positive Ausstrahlung zu erzielen. Auf dieselbe Weise könnten dann auch für andere Stromwechselzahlen die dazu gehörigen Minimalspannungen bestimmt werden. Da die Curven aber Parabeln sind, schneiden die Asymptoten die Ordinatenaxe erst im Unendlichen. Hieraus geht hervor, dass bei jeder praktisch erreichbaren Spannung stets eine Umkehr der positiven Ausstrahlung zur negativen vorhanden ist.

Es kommt jetzt noch in Betracht, welchen Einfluss auf die Polarität der Ausstrahlung die Stromwechselzahl hat. Man lässt also die secundäre Spannung constant, ändert nur die Stromwechselzahl und bestimmt die Umkehrpunkte der positiven Strahlung in die negative. Entsprechende Versuche ergaben die Werte der folgenden Tabelle.¹⁾

Secundäre Spannung $v = 16680$ Volt.

n	u
15 400	39,5
16 800	38,2
18 000	37,8
19 200	41,1
20 200	37,0
21 200	40,5

Im Mittel 39,0

Wie oben bedeutet hier wieder n die Stromwechselzahl pro 1 Min., u den Abstand des Umkehrpunktes in Millimetern.

1) A. Möhlmann, l. c. p. 20 u. 21.

Wenn man von kleinen Abweichungen, welche auf Beobachtungsfehlern beruhen können, absieht, wird man bemerken, dass bei constanter, secundärer Spannung der Umkehrpunkt auch ein constanter ist (in diesem Beispiel im Mittel ungefähr = 39 mm), wenn auch die Stromwechselzahl variirt. Hieraus folgt aber, dass sämtliche analoge Curven (vgl. Tabelle p. 774), welche für verschiedene Stromwechselzahlen auf der Ordinate die Secundärspannungen, auf der Abscisse die Lage des Umkehrpunktes tragen, und von welchen Curven (Parabeln) eine in Fig. 2 als Beispiel gegeben ist, miteinander identisch sind. Dass dieses der Fall ist, ergibt sich auch daraus, dass der Parameter p für alle Curvenformeln der gleiche ist, wie die Tabelle auf p. 774 annähernd zeigt. Es giebt also nur eine einzige derartige Curve, jedoch ist dieselbe nur für die gerade vorliegenden Versuchsbedingungen gültig.

Aus diesen Beobachtungen lässt sich mithin der Schluss ziehen:

1. Die Umkehrpunkte sind unabhängig von der Stromwechselzahl und ihre Lage hängt nur von der secundären Spannung bez. von dem Potential der Spitze ab.

2. Je höher die secundäre Spannung bez. das Potential der Spitze ist, desto weiter ist der Umkehrpunkt von der Spitze entfernt.

Aus dieser letzten Bemerkung unter 2. folgt aber umgekehrt wieder, dass: „je kleiner die secundäre Spannung bez. das Potential der Spitze ist, desto geringer die Entfernung des Umkehrpunktes von der Spitze wird“.

In dieser Beziehung ist also ein principieller Unterschied zwischen Teslaströmen und sinuoidalen Wechselströmen eines Inductoriums nicht vorhanden, einerlei, ob die letzteren Wechselströme hochgespannte sind oder nicht. Eine andere Frage ist es aber, ob für niedrig gespannte Wechselströme sich diese Verhältnisse durch das Experiment werden nachweisen lassen. Die richtige Einstellung der Scheibe wird immer schwierig sein, da für die Punkte, auf welche es ankommt, nämlich erstens derjenige, bei welchem ein Ueberspringen von Funken stattfindet, zweitens der Umkehrpunkt, und bei noch weiterem Abstände drittens derjenige Punkt, bei welchem überhaupt keine Strahlung mehr zu beobachten ist,

unter diesen Umständen sehr nahe bei einander liegen. Immerhin ist es aber gelungen, auch bei sehr niedriger, nicht besonders gemessener Secundärspannung und einem Abstand der Spitze von der Scheibe von weniger als 0,5 mm noch schwache negative Ausstrahlung und bei weiterer Annäherung, noch ehe ein Ueberspringen von Funken stattfand, positive Strahlung sicher festzustellen.

B. Intermittirender Gleichstrom.

Für die jetzt folgenden Versuche wurde intermittirender Gleichstrom als primärer Strom für das Inductorium angewendet. Statt des bisher benutzten grossen Inductoriums wurde ein kleines, ebenfalls von Dr. Levy, Berlin gebautes von 18 cm Schlagweite verwendet. Als Interruptor diente ein Turbinenunterbrecher mit Petroleumfüllung derselben Firma, dessen Anzahl Zähne, sowie Tourenzahlen variabel waren, um die Stromwechselzahl verändern zu können. Die Zähne wurden so bemessen, dass die Dauer eines Stromschlusses stets gleich derjenigen einer Stromöffnung war. Bei dieser Erzeugungsart des secundären Stromes ist nun der stärkere Oeffnungsstrom wohl vom schwächeren Schliessungsimpuls zu unterscheiden. Die Stromrichtung wurde zunächst derart gewählt, dass an der strahlenden Spitze der Oeffnungsstrom positiv war, der Schliessungsstrom also negativ. Trotzdem also die Intensität des positiven Stromimpulses überwog, war der Ausschlag des Elektrometers bei entsprechender Entfernung der Scheibe von der Spitze negativ, bei geringerem Abstand erst wurde er positiv. Hierzwischen ist ein Umkehrpunkt gut zu beobachten. In der folgenden Tabelle finden sich diese Umkehrpunkte für eine Stromwechselzahl von 7000 pro 1 Min. und für variable Spannungen zusammengestellt. Es sei jedoch bemerkt, dass statt der secundären Spannungen hier die Anzahl der Accumulatoren, welche den primären Gleichstrom lieferten, gesetzt ist. Da für constante Stromwechselzahlen die secundäre Spannung nur eine Function der primären ist, und diese von der Anzahl der Accumulatoren abhängt, so ist diese Vereinfachung gestattet. Da sich ferner nun nicht immer mit genau derselben Stromwechselzahl (in dem unten gegebenen Beispiel ist $n = 7000$ pro 1 Min.) beobachten liess, so sind die Umkehr-

punkte aus den beobachteten für die erforderliche Stromwechselzahl auf graphischem Wege bestimmt worden. Es bedeutet wieder analog, wie bisher: n die Stromwechselzahl pro 1 Min., v die Anzahl der Accumulatoren, u den Abstand der Scheibe von der Spitze in Millimetern beim Umkehrpunkt. Es fand sich:

$$n = 7000.$$

v	u
1	16,0
2	28,0
3	50,0
4	82,5
5	124,0

Trägt man nun, wie bisher, die gefundenen Werte in ein Coordinatensystem ein, v als Ordinate, u als Abscisse, so erhält man die Curve Fig. 3. Diese Curve erweist sich gleich-

Fig. 3.

falls als eine Parabel mit parallel verschobenem Coordinatensystem. Hier lauten die Werte der Formel:

$$(y - a)^2 = 2p(x - b)$$

in Bezug auf das ursprüngliche Coordinatensystem

$$a = 0,28; \quad b = 13,2; \quad p = 0,1.$$

Auch mit diesem intermittirenden Gleichstrom wurden noch mehrere Versuche, bei welchen die Anzahl der Stromunterbrechungen variierte, angestellt.¹⁾ Die Curven, welche aus den gewonnenen Resultaten erhalten wurden, waren auch hier stets Parabeln.

Es erübrigt noch zu untersuchen, ob nicht auch bei negativem Oeffnungsfunken ein positiver Ausschlag des Elektrometers, welcher natürlich vom positiven Schliessungsstrom herrühren müsste, zu erreichen sei. Mit dem bisher verwendeten Turbinenunterbrecher liess sich bei negativem Oeffnungsstromstoss kein positiver Ausschlag des Elektrometers erzielen²⁾, wohl gelang dieses aber mit einem Stimmgabelunterbrecher. Ueber das Verhältnis der Dauer des Stromschlusses zur Stromöffnung lässt sich hier natürlich nichts Bestimmtes aussagen, doch war die Zeit der Strahlung bei den unten folgenden Beobachtungen stets die gleiche, ebenso die Anzahl der zur Erzeugung des Primärstromes benutzten Accumulatoren.

Abstand der Scheibe von der Spitze in mm	Ausschlag in Scalenteilen		Abstand der Scheibe von der Spitze in mm	Ausschlag in Scalenteilen	
	bei negativem Oeffnungs- strom	bei positivem Oeffnungs- strom		bei negativem Oeffnungs- strom	bei positivem Oeffnungs- strom
100	— 1,2	nichts	20	— 17,0	+ 67,5
70	— 3,1	— 0,2	19	— 3,0	Funken
45	— 13,0	— 3,0	18	+ 7,0	„
40	— 19,0	— 3,5	17	+ 17,5	„
35	— 26,0	— 3,0	16	+ 54,0	„
25	— 31,5	+ 7,0	15	+ 98,0	„

Diese Versuchsreihe ist deshalb besonders interessant, weil sie zeigt, dass auch, wenn der Primärstrom intermittirender Gleichstrom ist, die Unterschiede zwischen Oeffnungs- und Schliessungsstromimpuls also voll zur Geltung kommen, es erreicht werden kann, dass innerhalb eines gewissen Ab-

1) A. Möhlmann, l. c. p. 24—27.

2) A. Möhlmann, l. c. p. 28.

standes der Scheibe von der Spitze die Ausstrahlung stets positiv ist, selbst wenn die Pole des Inductors vertauscht werden. Nur positive Ausstrahlung für jeden Abstand ist aber hier auch nicht zu erreichen, ebensowenig wie dieses der Fall ist, wenn der Primärstrom rein sinusödal Wechselstrom ist, denn, wie oben gezeigt, ist auch hier stets eine Umkehr zur negativen Seite vorhanden.

II. Erklärung der Erscheinungen.

Zur Erklärung dieser Erscheinungen mögen jetzt die folgenden Beobachtungen dienen.

Bei den zuerst beschriebenen Versuchen mit der Gleichstrom-Wechselstrommaschine bestanden, wie schon betont, völlig symmetrische Verhältnisse. Wie gleichfalls erwähnt, müssten sich daher die Impulse der negativen und der positiven Stromstösse eigentlich aufheben, und das Elektrometer dürfte keinen Ausschlag anzeigen. Dieses ist aber, wie gezeigt, nicht der Fall. Der Ausschlag des Elektrometers ist bei grösserer Nähe der Scheibe zur Spitze anfänglich positiv, bei entsprechend grösserer Entfernung wird er aber negativ.

Die Gründe hierfür können nun mannigfacher Art sein.

Zuerst kann auch hier ein Minimumpotential, wie bei statischer Elektrizität, eine Rolle spielen, indem dasselbe für die positive und negative Elektrizität verschieden ist. Ferner wird das Streuungsverhältnis beider Elektrizitäten in Betracht kommen und weiter die Geschwindigkeit, mit der die positiv bez. negativ geladenen Ionen von der Spitze aus in den Raum hinauswandern. Eine nicht unbedeutende Rolle spielt auch, wie unten gezeigt werden soll, die Form der Spitze selbst.

Ueber das Minimumpotential konnten keine genauen Versuche angestellt werden, da die Strahlungen beider Elektrizitäten sich nicht getrennt auffangen liessen. Weil sich nun aber die Ausstrahlung beider im Dunkeln sehr in ihrer Form unterscheiden — die positive giebt ein deutliches, verästeltes Strahlenbüschel, die negative ist durch das bekannte Glimmlicht ausgezeichnet —, so lässt sich ihr jeweiliges Vorhandensein, wenn auch gerade nicht das Ueberwiegen der einen oder anderen Elektrizität, stets mit Sicherheit feststellen. Es zeigte sich nun, dass, wenn eine Scheibe einer strahlenden Spitze

aus grosser Entfernung allmählich genähert wurde, zuerst das negative Glimmlicht auftrat. Der Ausschlag des Elektrometers war, wenn auch nur sehr gering, ebenfalls ein negativer. Bei weiterer Annäherung wuchs der negative Ausschlag, bis sich zuerst nur hin und wieder, gleichzeitig mit dem negativen Glimmlicht, vereinzelte positive Strahlen an der Spitze zeigten. Der negative Ausschlag des Elektrometers nahm dann anfänglich zwar noch zu, wenn auch in einem etwas langsameren Verhältnis als vorher, bei weiterer Annäherung der Scheibe zur Spitze, wobei sich die positiven Strahlen mehrten, wurde jedoch der negative Ausschlag nach Erreichung eines Maximums geringer, und sank schliesslich bis auf Null herab. Es war jetzt diejenige Entfernung der Scheibe von der Spitze erreicht, welche in den obigen Ausführungen als Umkehrpunkt bezeichnet wurde. Von jetzt ab wurde der Ausschlag des Elektrometers ein rasch wachsend positiver. Inzwischen hatten sich neben dem noch stets vorhandenen Glimmlicht die bisher nur vereinzelt auftretenden positiven Strahlen zum vollkommenen Büschel ausgebildet, das bei weiterer Annäherung immer intensiver wurde, bis schliesslich ein Punkt erreicht wurde, an dem ein Ueberspringen von Funken stattfand. Aus diesen Beobachtungen scheint also mit grosser Sicherheit hervorzugehen, dass die negative Elektrizität bei gleichem Potential eine grössere Luftstrecke durch Strahlung zu überbrücken vermag als die positive, oder man wird auch sagen können, dass sie ein geringeres Minimumpotential besitzt, als die positive. Es stimmt dieses vollkommen mit den Beobachtungen überein, welche Hr. Sieveking und Hr. Tamm in Bezug auf statische Elektrizität im hiesigen Institut gemacht haben.^{1) 2)}

Diese Thatsache des verschieden grossen Minimumpotentials der zwei Elektrizitäten lässt es begreiflich erscheinen, warum bei grossem Abstand der Spitze von der Scheibe die Ausstrahlung negativ ist. Dagegen genügt sie nicht, die Umkehr im Vorzeichen der ausgestrahlten Elektrizität zu erklären, vielmehr sollte man erwarten, dass in jedem Abstand der

1) H. Sieveking, Inaug.-Diss. p. 20 u. 39. 1899; F. Tamm, Inaug.-Diss. p. 10. 1901.

2) Einen weiteren Beweis vgl. A. Möhlmann, l. c. p. 33 u. 34.

Scheibe von der Spitze erstere mehr negative als positive Elektrizität erhielt. Dieses ist aber, wie die Versuche lehren, nicht der Fall. Ein Grund ist bei den Arbeiten mit Wechselstrom in der Versuchsanordnung, in welcher völlige Symmetrie herrscht, nicht zu finden, es bleibt nur übrig, denselben in den Verhältnissen der zu überbrückenden Luft sowie möglichenfalls in der strahlenden Spitze zu suchen. Nun hat Hr. Himstedt schon früher nachgewiesen¹⁾, dass Luft, vorausgesetzt, dass das Minimumpotential überschritten ist, die positive Ausstrahlung aus einem Teslapole im Gegensatz zur negativen begünstigt, und würde diese Thatsache die beobachtete positive Strahlung bei grosser Annäherung erklären können.

Ferner ist das Streuungsverhältnis beider Elektrizitäten in Luft in Betracht zu ziehen. Es ist schon früher gezeigt, dass der Streuungskegel der positiven Elektrizität kleiner ist, als derjenige der negativen. Bei grösserer Annäherung der Scheibe zur Spitze könnte nun leicht der Fall eintreten, dass wohl die ganze positive Ausstrahlung der Spitze die Scheibe trifft, während von der negativen Ausstrahlung nur ein Teil auf dieselbe gelangt, da der andere Teil infolge des grösseren Oeffnungswinkels des Streuungskegels an der Scheibe vorbei in den Raum wandert. Daher muss bei grösserer Nähe der Scheibe zur Spitze die Menge der positiven Elektrizität überwiegen.

Nicht ohne Einfluss dürfte auch die verschiedene Geschwindigkeit sein, mit welcher die positiven und negativen Ionen von der Spitze aus fortgeschleudert werden. Diese Geschwindigkeit ist in Luft für die negativen Ionen eine grössere, als für die positiven.²⁾ Daher wäre der Fall leicht denkbar, dass bei grösseren Abständen der Scheibe von der Spitze eine Neutralisation der positiven Elektrizität mit der umgebenden Luft eintritt, während die mit weit grösserer Geschwindigkeit fortgeschleuderten negativen Ionen, noch ehe eine völlige Neutralisation stattfinden kann, zur Scheibe gelangen. Aus diesem Grunde muss also bei grösserer Entfernung der Scheibe von der Spitze negative Elektrizität überwiegen.

1) F. Himstedt, Wied. Ann. 52. p. 473. 1894; 68. p. 301. 1899.

2) A. P. Chattock, W. E. Walker u. E. H. Dixon, Phil. Mag. (1) 1. p. 82. 1901.

Ein anderer Umstand, welcher von grösstem Einfluss auf die Polarität der Ausstrahlung ist, ist die Form der Spitze selbst. Um diesen letzteren Einfluss genauer zu studiren, wurden die folgenden Versuche angestellt. Als strahlende Spitze wurden Drähte von Platin, Messing und Kupfer von einem Durchmesser von 0,1—4,0 mm benutzt. Die Enden der Drähte wurden möglichst halbkugelförmig gefeilt, geschliffen und sorgfältig polirt. Die Strahlung war stets, wie sowohl der Ausschlag des Elektrometers, als auch das Glimmlicht zeigte, eine negative. Eine positive Ausstrahlung konnte nicht beobachtet werden, da bei grösserer Annäherung der Scheibe an die Spitze sofort ein Ueberspringen von Funken stattfand. Hierauf wurde ein Kupferdraht von 0,8 mm Durchmesser, welcher abgebogen war und deshalb eine raue Oberfläche zeigte, als strahlende Spitze benutzt. Die Endfläche des Drahtes wurde nicht gefeilt und polirt, sondern blieb rau. Bei der Strahlung zeigte sich in geeignetem Abstand der Scheibe von der Spitze ein sehr starkes positives Büschel. Das Elektrometer bestätigte dann ebenfalls den positiven Charakter der Strahlung. Der einzige Unterschied dieses Drahtes mit dem vorher benutzten war nur die Form der Spitze. Die Dicke des Drahtes kann hier keine entscheidende Rolle spielen, da bei den ersten Versuchen, bei welchen nur negative Ausstrahlung erhalten wurde, Drähte von kleinerem und auch von grösserem Durchmesser als 0,8 mm benutzt wurden; ja selbst der gleiche Kupferdraht von 0,8 mm Durchmesser, aber mit polirtem Ende, wurde als Spitze verwendet. Es wurden nun die zuerst benutzten, verschiedenen Drähte, welche bei glattgefeilter, polirter Kuppe negative Ausstrahlung zeigten, mit einer Feile aufgeraut. Die Strahlung bestand darnach aus einem mehr oder minder starken, positiven Büschel. Hieraus ergibt sich, dass die raue Oberfläche die positive Strahlung, entgegengesetzt zur glatten Oberfläche, begünstigt und zwar bei allen verwendeten Metallen. Eine solche raue Oberfläche stellt aber nur eine Menge feiner Spitzen dar, und demnach sind diese es, welche für die positive Ausstrahlung günstig sind. Man sieht also, dass die Form der Spitze von grösstem Einfluss auf das Vorzeichen der Strahlung ist.

Ein weiterer Versuch, welcher gleichzeitig erklärt, warum

es erforderlich ist, die ausstrahlenden Drähte in ein Glasrohr einzuschmelzen und bis auf das Glas abzufeilen, war der folgende. Es wurden zwei Untersuchungen mit dem dünnsten Platindraht (Wollastondraht) angestellt. Beidemale waren die Drähte zum Schutz gegen äussere Beschädigungen in eine zu einer Spitze ausgezogene Glasröhre gelegt. Das erste Mal war jedoch die Spitze der Glasröhre offen und der Platindraht stand ca. 2 mm aus der Röhre hervor. Das zweite Mal aber war die Röhre, wie oben beschrieben, abgeschmolzen und abgefeilt. Den Primärstrom lieferte die Hummel'sche Gleichstrom-Wechselstrommaschine. Die Ergebnisse der Untersuchungen waren die folgenden, unter sonst gleichen Bedingungen.

Abstand der Scheibe von der Spitze in mm beim Umkehrpunkt	
offene Glasröhre 18,0 mm	geschlossene Glasröhre 29,5 mm

Hiernach scheint die geschlossene Glasröhre für die positive Ausstrahlung günstiger zu sein.

Für diese Erscheinung kann man sich die folgende Erklärung machen. Der strahlende Teil des Drahtes ist eben nicht nur die äusserste Spitze allein, sondern seine ganze Oberfläche (mit dem in Betracht kommenden Teile des Kupferdrahtes, an welchen bei diesen Versuchen der Wollaston-Platindraht angelötet war). Abgesehen von der Spitze sind nun die übrigen Oberflächenteile als glatte, abgerundete anzusehen. Diese strahlen aber, wie oben gezeigt, vorzugsweise negative Elektrizität aus. Wird aber den negativ geladenen Ionen, welche ihre Ladung an den Mantelflächen des Drahtes erhalten haben, nun der freie Weg zur Scheibe durch Zuschmelzen des Glasrohres abgeschnitten, so muss der Einfluss der hauptsächlich positiv ausstrahlenden Spitze, von welcher die positiv geladenen Ionen ungehindert zur Scheibe gelangen können, natürlich bedeutend zunehmen, und demzufolge wird der Umkehrpunkt von der positiven zur negativen Strahlung in einen weiteren Abstand gerückt.

Am Anfang dieser Abhandlung ist bemerkt, dass die Erklärung der Parallelverschiebung des Coordinatensystems der Curven (Parabeln), von denen Figg. 2 und 3 je ein Beispiel giebt,

für später vorbehalten bleiben müsse, bis die hierzu notwendigen Unterlagen, nämlich der Einfluss, welchen die Stromwechselzahl, die Secundärspannung sowie die Form der Spitze auf die Polarität der Ausstrahlung ausüben, besprochen sei. Es möge deshalb jetzt, nachdem diese Verhältnisse klargelegt sind, jene Erklärung hier nachgeholt werden.

Diese Parallelverschiebung des Coordinatensystems ist nicht nur bei den gerade angeführten Beispielen, sondern bei allen ähnlichen Curven der Fall. Es wäre ja eigentlich zu erwarten, dass der Scheitel der Parabel mit dem Anfangspunkt des ursprünglichen Coordinatensystems zusammenfallen müsste, weil anzunehmen ist, dass erst dann, wenn die secundäre Spannung Null ist, der Umkehrpunkt ebenfalls im Abstand Null der Scheibe von der Spitze liegt. Dass die Parabel von ihrem Scheitelpunkte ab im Sinne des unteren Zweiges fortschreiten würde, ist widersinnig, weil dann mit abnehmender secundärer Spannung der Abstand des Umkehrpunktes wieder grösser werden und, wie aus der Zeichnung hervorgeht, sogar bei der secundären Spannung Null einen endlichen, positiven Wert annehmen müsste. Es bleibt deshalb nichts anderes übrig, als die Curve wirklich erst beim Scheitelpunkte der Parabel anfangen zu lassen. Wenn dieses aber der Fall ist, so fragt es sich, was eintreten würde — natürlich immer bei constanter Stromwechselzahl —, wenn die secundäre Spannung noch weiter herabgehen und sich schliesslich Null nähern würde. Gestattet das Potential für den negativen und für den positiven Stromimpuls überhaupt noch eine alternirende Ausstrahlung aus der Spitze, so geht aus der Curve hervor, dass dennoch kein Umkehrpunkt zu beobachten sein wird. Die negative Ausstrahlung überwiegt also von diesem Punkte ab stets die positive. Es hat dieses wahrscheinlich darin seinen Grund, dass für diese niedrigen Spannungen, um welche es sich hier handelt, die sonst der positiven Ausstrahlung günstige Spitze nicht mehr genügend als eine solche zu wirken vermag, sondern sich schon mehr wie eine Fläche, die es ja thatsächlich auch ist, verhält. Abgesehen von dem Teil, der innerhalb der Windungen des Inductoriums seinen Ausgleich findet, sind an den Versuchsapparaten, Zuleitungen etc. genügend feinere Spitzen vorhanden, durch welche die positive Elektrizität,

welche, wie gezeigt, gerade die Spitzen bevorzugt, ausstrahlen kann. Der geringere Teil wird nur auf die Scheibe ausstrahlen, sodass die negative Ausstrahlung überwiegen muss, und daher eine Umkehr ins Positive nicht mehr erfolgt. Bei steigender Spannung aber wächst auch die auf die Scheibe ausgestrahlte Menge positiver Elektrizität und von einem bestimmten Punkte, dem Umkehrpunkte im Scheitelpunkte der Parabel, ab überwiegt sie die negative Strahlung. Auf diese Weise würde sich also eine Verschiebung des Anfangspunktes in der Richtung der Abscissenaxe erklären. Bedenkt man aber, dass das Ueberwiegen der positiven Elektrizität und damit das Einsetzen des Umkehrpunktes bei constanten Stromwechselzahlen in engem Zusammenhange mit der secundären Spannung steht, wie oben dargelegt, so erklärt sich auch die Verschiebung des Anfangspunktes der Curve in der Richtung der Ordinate und somit die Parallelverschiebung überhaupt.

Die Untersuchungen haben demnach ergeben:

1. Zwischen den Ausstrahlungen einer mit einem Teslapole verbundenen Spitze und einer solchen, welche mit dem Secundärpole eines Inductoriums, das mit sinoidalem Wechselstrom oder intermittirendem Gleichstrom gespeist wird, besteht principiell kein Unterschied. Bei entsprechend grosser Nähe der Scheibe zur strahlenden Spitze wird erstere in Luft immer positiv geladen, bei weiterer Entfernung negativ. Dazwischen liegt der Umkehrpunkt im Vorzeichen der Ladung, bei welchem die Scheibe überhaupt nicht geladen wird.

2. Die Lage des Umkehrpunktes ist nur abhängig von dem Potential der Spitze und nicht von der Anzahl der Stromwechsel in der Zeiteinheit. Je höher das Spitzenpotential ist, desto weiter liegt der Umkehrpunkt von der Scheibe entfernt.

Der Grund, weshalb bei Inductionsströmen früher niemals Umkehrpunkte im Vorzeichen der Strahlung beobachtet worden sind, mag einestheils darin liegen, dass man dieselben nicht gesucht oder auch nicht in den Entfernungen der Scheibe von der Spitze, in welchen sie unter den jeweils vorhandenen Versuchsbedingungen lagen, vermutet hat.

Freiburg i/B., April 1901.

(Eingegangen 16. April 1902.)