3. *Die Unipolarmaschine ohne Eisen; von O. Grotrian.*

Die Ersetzbarkeit eines Magneten durch eine Stromspule ist für fast alle Erscheinungen des Magnetismus, Elektromagnetismus und der Induktion nachgewiesen. Über die Frage, ob diese Ersetzbarkeit auch bei der Unipolarmaschine vorhanden ist, wurde eine tiefer gehende Untersuchung meines Wissens noch nicht durchgeführt. Es soll jedoch nicht verkannt werden, daß die Erscheinungen, welche manche der bisher konstruierten Rotationsapparate darbieten, die genannte Frage mehr oder weniger nahe berühren. Dieses gilt namentlich für die Apparate von Zöllner¹⁾, Forssman²⁾ und Jamin³⁾, von denen diejenigen der erstgenannten als Stromerzeuger funktionieren, während im Jaminschen Apparate durch zugeführten Strom ein Drahtbügel unter Wirkung einer Stromspule in Rotation versetzt wird.

In den folgenden Mitteilungen werde ich zwei auf meine Veranlassung konstruierte Unipolarmaschinen ohne Eisen beschreiben. Die eine rotiert bei zugeführtem Strome durch rein elektrodynamische Kräfte als Motor. Die zweite arbeitet, wenn man sie in Umdrehung versetzt, als Stromerzeuger. Der induzierte Strom entsteht dabei durch reine Voltainduktion. Da das induzierende Feld hier durch eine Stromspule erzeugt wird, so ist es möglich, die Kraftlinienzahl teils rechnerisch, teils experimentell für gewisse Stellen des Stromkreises zu ermitteln. Eine Vergleichung der erhaltenen Zahlen mit denjenigen für die gemessenen elektromotorischen Kräfte führt zu Ergebnissen, welche, wie ich glaube, für das Verständnis der sich in Unipolarmaschinen abspielenden Vorgänge nicht ohne Wert sind.

1) F. Zöllner, Pogg. Ann. **160**. p. 604. 1877.

2) L. A. Forssmann, Öfversigt af K. Wet. Akademiens Förhandlingar för 1877. Nr. 4. p. 15.

3) J. Jamin, Cours de physique **3**. p. 238. 1869.

Der Unipolarmotor. Die Konstruktion des Unipolarmotors ist aus Fig. 1 zu ersehen. Der Messingzylinder AB (Länge = 33 cm, Durchmesser = 0,5 cm) trägt in der Mitte eine zylindrische mit ihm metallisch verbundene Messingscheibe C . Auf jeder der ebenen Flächen von C ist eine kreisförmige Hartgummischeibe HH aufgeschraubt, sodaß ein Rahmen entsteht, welcher die flache Spule SS enthält. Das eine Ende der Bewickelung derselben ist mit C , das andere mit der Preß-

Fig. 1.

schraube P leitend verbunden. Die Spule enthält 80 Windungen, welche derart geführt sind, daß ein an der Drahtleitung von C nach P übergeführter Punkt sich von oben her betrachtet im Sinne des Uhrzeigers bewegt. Mit der Schraube P steht in leitender Verbindung ein Drahtbügel D . Dieser taucht ein in die Quecksilberrinne QQ , welche in eine Holzplatte eingedreht ist. Das obere und das untere Ende des Zylinders AB steht gleichfalls mit einem Quecksilberkontakte in Verbindung, und zwar ist oben, wie die Figur zeigt, die kreisförmige Quecksilberrinne Q_1 durch den Draht D_1 mit A , unten die Queck-

silberschale Q_2 durch den Draht D_2 mit B verbunden. Der ganze Apparat hängt an einem Fadenbündel F und ist somit leicht um die Vertikalachse drehbar.

Versuche. Verbindet man, wie die Figur andeutet, den einen Pol einer Stromquelle E mit der Quecksilberrinne Q , während vom anderen Pole je eine Leitung nach Q_1 und andererseits nach Q_2 führt, dann beginnt nach Stromschluß der Apparat dauernd um die Vertikalachse zu rotieren. Die zur Umdrehung nötige Stromstärke beträgt bei dem von mir benutzten Apparate etwa 20 Amp.

Der Sinn der Rotation ist, wie sich voraussehen läßt, unabhängig von der Richtung des zugeführten Stromes. Bei dem Versuchsapparate erfolgt die Umdrehung von oben her betrachtet stets im Sinne gegen den Uhrzeiger, und das ist in vollständiger Übereinstimmung mit der Rotation eines entsprechenden Unipolarmotors mit Stahlmagnet. Denn denkt man sich die flache Spule durch zwei magnetische Belegungen auf den Endflächen ersetzt, so ist die obere Belegung nord-, die untere südmagnetisch, wenn Q , also das äußere Spulende, mit dem positiven Pole in Verbindung steht. Der Strom fließt alsdann in der Drehungsachse von der Mitte nach den beiden Enden. Bei der Stromrichtung von den Enden A und B nach Mitte C ist die obere magnetische Belegung süd-, die untere nordpolar. Dieselbe Rotation, von oben her gesehen gegen den Uhrzeiger, würde in beiden Fällen ein Unipolar-motor mit Stahlmagnet bei gleicher Polarität und gleicher Stromrichtung zeigen.

Es liegt nahe, hier eine Frage aufzuwerfen, die sich durch einen großen Teil der Literatur über unipolare Induktion hindurchzieht, nämlich ob zwischen den starr miteinander verbundenen rotierenden Teilen Kräfte auftreten können, welche ganz oder zum Teil die Rotation verursachen. Wollte man im vorliegenden Falle solche Kräfte annehmen, so würde man in direkten Widerspruch mit der Ampèreschen Elementarformel der Elektrodynamik geraten, während dagegen die Grassmannsche Formel die Möglichkeit des Auftretens eines Drehmomentes durch gegenseitige Einwirkung der Stromteile in den starr verbundenen Leitern erkennen läßt. Auf diesbezügliche Rechnungen verzichte ich einstweilen. Denn der-

artige Fragen können in erster Linie nur durch das Experiment entschieden werden.

Dagegen habe ich einige Versuche angestellt, welche geeignet erscheinen können, die genannte Frage zu beantworten.

Zu dem Zwecke wurde das drehbare System der Leitung, d. i. der Messingzylinder AB , mit der Spule S vollständig von den Quecksilberkontakten getrennt. Über und unter S standen die Polköpfe eines Elektromagneten, sodaß die Kraftlinien desselben die Windungsebenen senkrecht durchsetzten. Der Elektromagnet wurde nun durch den Strom einer Wechselstrommaschine kräftig erregt, sodaß das oszillierende Magnetfeld elektrische Schwingungen in der Spule und in dem damit leitend verbundenen Metallstabe AB erzeugen mußte.

Falls nun die Stromteile, die innerhalb des starren Systems verlaufen, ein Drehmoment erzeugen, dann muß dieses auch der Fall sein bei ungeschlossenen Strömen, wie sie durch das Wechselfeld induziert werden.

Die so angestellten Versuche haben ein negatives Resultat ergeben; denn die Tendenz zu einer Drehung war nicht zu konstatieren.

Das nämliche ergab sich, wenn man zur Felderregung pulsierenden Gleichstrom verwandte. Derselbe wurde bei Anwendung eines gewöhnlichen, sowie auch eines Wehneltunterbrechers erzeugt. Auch eine Vergrößerung der Kapazität der leitenden Teile, die man durch Anlegen von Metallstücken an das äußere Spulenende und an den Metallstab AB herbeiführte, hatte keinen nachweisbaren Bewegungsantrieb zur Folge.

Der Unipolargenerator. Die Stromerzeugung durch eine Unipolarmaschine mit reiner Voltainduktion läßt sich ebenfalls nachweisen. Die darauf bezüglichen Versuche sind an einer Maschine angestellt, deren Konstruktion aus Fig. 2, die den Grundriß darstellt, zu ersehen ist.

Die Messingachse bb von 1,48 cm Durchmesser läuft in Messinglagern LL , welche auf Hartgummiplatten befestigt sind. In der Mitte trägt die Achse eine aufgelötete Messingscheibe m von 5,47 cm Durchmesser. An diese grenzen links und rechts die Stromspulen s_1 und s_2 , welche auf Hartgummirahmen (kreuzschraffiert) aufgewunden sind. Das eine Ende a_1 der

Spule s_1 ist durch eine Schraube an einen Messingring r_1 angeklemmt, welcher auf der linken Spulenflansche von s_1 befestigt ist. Die Wickelung ist in drei Lagen bis e_1 geführt, setzt sich von hier aber kontinuierlich, ohne daß der Wickeldraht abgeschnitten wäre, zur Spule s_2 in dem Stücke $e_1 a_2$ fort. Zur Aufnahme desselben dienen drei radiale Kerben, welche nebeneinander in die beiden mittleren Flanschen sowie in die Scheibe m eingeschnitten sind. Für besonders sichere Isolierung des übrigens gut umsponnenen Drahtes gegen die Scheibe m war Sorge getragen. Da die Scheibe m als Kontaktring zu funktionieren hat, ist der in m angebrachte Einschnitt von außen wieder durch ein Messingstück zugedeckt, sodaß die

Fig. 2.

Außenfläche von m auch dort, wo der Draht $e_1 a_2$ hindurchgeht, vollständig zylindrisch bleibt. Die Wickelung setzt sich von a_2 aus, in demselben Sinne wie s_1 gewunden, als Spule s_2 fort bis zum Ende e_2 , welches wie a_1 an einen zweiten Kontaktring r_2 angeklemmt ist. Beide Spulen sind soweit als möglich identisch hergestellt. Der Antrieb der Maschine erfolgt durch einen elektrischen Motor vermittelt einer Lederschnur und der messingenen Schnurscheibe k .

Bei der Herstellung der Maschine ist alles Eisen vermieden. Die Lager LL , Stellringe pp und die Schnurscheibe k sind aus käuflichem Messing hergestellt. Das Material der übrigen Teile ist ein Messing, welches zufolge analytischer Untersuchung nur Spuren von Eisen enthält.¹⁾

1) Bezogen von „Sächs. Kupfer- und Messingwerke F. A. Lange“, Kupferhammer-Grünthal (Erzgeb.).

Allgemeines über die Versuche. Den mit der Achse rotierenden Spulen s_1 und s_2 wurde durch Federn, welche auf den Ringen r_1 und r_2 schleifen, Strom zugeführt. Dieser, von mehreren Akkumulatoren erzeugt, wurde durch ein in Abzweigung liegendes Siemenssches Millivolt- und Ampèremeter gemessen. An die mittlere Scheibe m und die Scheibe g am Ende, oder an Stelle der letzteren an die Achse selbst, waren Schleiffedern angelegt, von denen eine Leitung zu einem empfindlichen Deprez-d'Arsonval-Galvanometer mit Spiegelablesung führte. In die Leitung war außerdem ein Rheostat und ein Kommutator eingeschaltet, welcher letzterer die Umkehr des Stromes im Galvanometer gestattete.

Das Galvanometer zeigt bei Felderregung und Rotation in der Tat einen induzierten Strom an, der in Beziehung zu den Kraftlinien dieselbe Richtung besitzt, wie der Strom der gewöhnlichen Magnetmaschine. Bei Rotation der Maschine im Sinne des die Spulen durchfließenden Stromes entsteht ein induzierter Strom, welcher in der Achse von g nach m fließt. Eine Umkehr der Rotation kehrt auch die Richtung des Stromes um.

Die Messungen und ihre Ergebnisse. Bei den Beobachtungen wurde das Ziel verfolgt, die Abhängigkeit der elektromotorischen Kraft von dem absoluten Werte des Induktionsflusses, von der Stärke des Feld erregenden Stromes und der Umlaufszahl zu ermitteln. Da die elektromotorische Kraft den beiden zuletzt genannten Größen proportional sein muß, so war es eigentlich die Proportionalitätskonstante, um deren Bestimmung es sich handelte.

Der von den Spulen erzeugte Induktionsfluß muß hiernach bekannt sein. Es wurden deshalb die Umfänge der Spulen bei ihrer Herstellung sorgfältig durch umgelegte Papierstreifen von der Form, wie sie Himstedt¹⁾ angibt, gemessen und die Windungen gezählt. Für die Umfänge u , bezogen auf die Mitte des Kupferdrahtes, sowie für die Windungszahlen n fand man folgende Werte:

1) F. Himstedt, Wied. Ann. 26. p. 555. 1885.

	Spule s_1		Spule s_2	
	u	n	u	n
1. Windungslage	9,56 cm	43	9,66 cm	42
2. „	11,21	42	11,30	42
3. „	12,77	41	12,85	41

Unter rechnerischer Berücksichtigung

der Länge der Spule s_1 = 12,02 cm

der Dicke des Drahtes einschließlich Isolation = 0,29 cm

findet sich, daß durch den in der Mitte befindlichen Querschnitt M der Spule s_1 ein von ihr selbst beim Strome 1 (C.G.S.) erzeugter Induktionsfluß von 1293 Kraftlinien hindurchgeht. Derselbe wird in Wirklichkeit noch etwas erhöht durch die von s_2 erzeugten Kraftlinien. Berücksichtigt man, daß die Längen (vgl. Fig. 2)

$$l_1 = 12,02 \text{ cm}$$

$$l_2 = 12,00 \text{ „}$$

$$l_m = 2,60 \text{ „}$$

sind, so berechnet sich der von s_2 beim Strome 1 (C.G.S.) erzeugte, eine äußere Windung von s_1 bei M durchsetzende Induktionsfluß gleich 52 Kraftlinien. Dieser Wert ist berechnet in der nicht zutreffenden Annahme, daß das von s_2 bei M erzeugte Feld ein homogenes sei. Die Zahl 52 ist also zu groß. Statt ihrer mag daher in Ermangelung eines sicheren Anhaltspunktes für die Berechnung das Mittel = 26 genommen werden. Der von beiden Spulen beim Strome 1 (C.G.S.) erzeugte, die Mitte von s_1 durchsetzende Induktionsfluß berechnet sich demnach zu

$$\Phi_0 = 1293 + 26 = 1319.$$

Die Bestimmung der elektromotorischen Kraft der Maschine erfolgt auf Grund des Ohmschen Gesetzes. Der Widerstand des induzierten Kreises muß daher bekannt sein. Derselbe setzt sich aus den Widerständen der Maschine, der Zuleitungen sowie des Galvanometers von zusammen 4,4 Ohm und dem jeweiligen Rheostatenwiderstande zusammen. Zu der Messung des induzierten Stromes sei bemerkt, daß bei den Ablesungen des Spiegelgalvanometers einem Skalenteil ein Strom von 0,00001572 Milliamp. entspricht. Die Eichung des Galvanometers erfolgte dadurch, daß dasselbe mit hohem Vorschalt-

widerstande versehen mit dem Milliampèremeter unter Stromzuführung in Parallelschaltung gelegt wurde.

Bei den Messungen des induzierten Stromes wurde derartig verfahren, daß bei jeder Beobachtungsreihe die Rotationsrichtung der Maschine sowie auch die Richtung des Feld erregenden Stromes umgekehrt wurde. Außerdem wurden die Enden des Spiegelgalvanometers gegen die übrige Leitung kommutiert, sodaß tatsächlich der jeweilige Wert der Stromstärke als Mittelwert aus 8 Beobachtungen abgeleitet wird. Das Umkehren der Drehrichtung und des Erregerstromes war durchaus erforderlich, um die durch Thermowirkung und Reibung hervorgerufenen elektromotorischen Kräfte zu eliminieren. Erregerstrom sowie Umlaufszahl wurden bei jeder Beobachtungsreihe mehrmals gemessen, letztere an der Maschine selbst mittels eines Tachometers, welches behufs Korrektur der Ablesungen später mit einem gewöhnlichen Tourenzähler verglichen wurde.

In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse der Beobachtungen zusammengestellt.

Tabelle I.

Nr.	J in Amp.	v (Min.)	r	i in Milliamp.	E in Millivolt	E_r in Millivolt	$\frac{E}{E_r}$	Schleif- kontakt am Ende
1	9,22	1880	200	0,000 873	0,1785	0,2827	0,631	auf der Achse
2	4,15	892	100	0,000 377	0,0393	0,0604	0,651	
3	13,59	888	70	0,001 659	0,1233	0,1969	0,627	auf Scheibe <i>g</i>
4	4,15	939	70	0,000 395	0,0294	0,0635	0,462	
5	4,19	947	70	0,000 399	0,0297	0,0647	0,459	
6	9,00	947	70	0,000 890	0,0662	0,1390	0,476	
7	9,03	1252	70	0,001 090	0,0811	0,1844	0,440	
8	4,08	1468	70	0,000 591	0,0440	0,0976	0,451	

Die zweite Kolumne der Tabelle gibt unter J die Werte des Erregerstromes an, unter v sind die Umlaufszahlen in der Minute, unter r die eingeschalteten Rheostatenwiderstände enthalten. Da der übrige Widerstand der Leitung gleich 4,4 Ohm gefunden wurde (vgl. p. 276), so berechnet sich aus den Beobachtungen die elektromotorische Kraft $E = i(r + 4,4)$ (vgl.

Kol. 6), wenn i (Kol. 5) die Stärke des induzierten Stromes bedeutet. Die Bemerkungen in der letzten Kolumne besagen, daß bei den drei ersten Beobachtungsreihen die Feder am Ende auf der Achse selbst auflag, während bei den übrigen der Schleifkontakt auf der Scheibe g (vgl. Fig. 2) stattfand.

Die für E gefundenen Zahlen sind mit denjenigen, welche aus dem magnetischen Felde berechnet werden können, zunächst nicht in Übereinstimmung. Bei der gewöhnlichen Unipolarmaschine ist die elektromotorische Kraft dargestellt durch

$$E = 4 \pi \mu \cdot v_s$$

wenn μ den freien in den Polen konzentriert gedachten freien Magnetismus, v_s die Umlaufszahl in der Sekunde bezeichnet.

Da $4 \pi \mu$ die gesamte von Pol zu Pol ziehende Kraftlinienzahl darstellt, so wäre dafür hier der ganze Induktionsfluß einzusetzen, welcher zwischen den in der Mitte einander zugekehrten Spulenenden übergeht. Die direkte Berechnung desselben scheint mir wegen des gegen die Länge und den Durchmesser der Spulen nicht ganz zu vernachlässigenden Abstandes der Spulen voneinander gleich 2,60 cm weniger sicher zu sein als die Berechnung von Φ_0 (vgl. p. 276). Nun ist durch die weiter unten beschriebenen Messungen des ballistischen Ausschlages das Verhältnis Φ/Φ_0 bekannt, in welchem Φ den Induktionsfluß an dem der Mitte zugekehrten Ende der Spule s_2 bezeichnet. Hiernach ist

$$\Phi = 0,742 \cdot \Phi_0 = 0,742 \cdot 1319 = 978 \text{ Kraftlinien.}$$

Berechnet man nun die elektromotorische Kraft den einzelnen Beobachtungen der Tab. I entsprechend nach der Formel

$$E_r \text{ (Millivolt)} = 10^{-6} \cdot 978 \cdot J \cdot v_s$$

in der J in Ampère ausgedrückt ist, dann erhält man die Zahlen, welche in der Tabelle unter E_r angeführt sind.

Wie man sieht, weichen dieselben von den aus den Beobachtungen abgeleiteten Werten E erheblich ab. Die Größe der Abweichung ist deutlich aus der vorletzten Kolumne zu ersehen, in welcher das Verhältnis E/E_r angeführt ist. Die beobachteten Werte betragen, wie die Tabelle zeigt, etwa $\frac{2}{3}$ der berechneten, wenn die Feder am Ende auf der Achse

schleift, dagegen wird das Verhältnis ungefähr gleich $\frac{1}{2}$, wenn der Schleifkontakt am Umfange der Scheibe g liegt.¹⁾

Um den Grund, auf welchen diese Abweichungen zurückzuführen sind, zu erforschen, wurden Beobachtungen angestellt, die gestatteten, das Verhältnis der Kraftlinienzahlen für verschiedene Querschnitte der Maschine zu ermitteln.

Relativ gemessen wurde (vgl. Fig. 2)

der Induktionsfluß in der Mitte M = Φ_0 ,
 beiderseits von der Mitte in M_1 und M_2 = Φ_1, Φ_2 ,
 in M_3 unmittelbar an der Flansche = Φ ,
 auf dem mittleren Kontaktringe m = Φ_m ,
 am zweiten Schleifkontakte auf der Achse selbst = Φ_a ,
 sowie auch auf dem Schleifringe g = Φ_g .

Die Beobachtungen wurden nach dem ballistischen Verfahren angestellt. Als Galvanometer diente das vorhin bereits genannte Instrument nach Deprez-d'Arsonval, nachdem das Trägheitsmoment desselben mittels zweier kleiner zu dem Instrumente gehöriger Kugeln in geeigneter Weise vergrößert worden war.

Um die Querschnitte, für welche der sie durchsetzende Induktionsfluß gemessen werden sollte, wurden isolierte, 0,25 mm dicke Drähte in mehreren Windungen herumgelegt. Die Windungsenden wurden auf etwa 1 m eng zusammengedreht. Die Drähte, von denen ein kleiner Teil als Schleife die Maschine umfaßte, waren für die einzelnen Schleifen in gleichen Längen abgeschnitten, sodaß der Widerstand des Galvanometerkreises für die zu vergleichenden Stellen der nämliche war.

In jeder Beobachtungsreihe kamen je zwei Stellen miteinander zur Vergleichung. Dabei wurden die entsprechenden Schleifen durch einen Umschalter zweimal alternierend in den Galvanometerkreis eingeschaltet. Die ballistischen Ausschläge erzeugte man durch Umkehren des Feld erregenden Stromes, welch letzterer, wie früher beschrieben (vgl. p. 275) gemessen wurde. Jede Beobachtungsreihe enthält für jede Schleife vier

1) Anfänglich wurde von mir bei der Berechnung von E , der Induktionsfluß Φ_0 benutzt, wodurch natürlich die Abweichungen noch größer werden. Die Benutzung von Φ_0 ist indessen wegen der Streuung zwischen den Windungen hindurch, über welche die im folgenden zu besprechenden Versuche Aufschluß geben, nicht zulässig.

Ablesungen des ballistischen Ausschlages. Die Schwankungen des Erregerstromes wurden in der späteren Rechnung durch Mittelnehmen eliminiert. Im folgenden sind die erhaltenen Verhältnisse der Kraftlinienzahlen zusammengestellt. Jede Zahl ist Mittel aus zwei Beobachtungsreihen, sodaß jeder acht Ablesungen des Ausschlages für je eine Schleife zu Grunde liegen.

$$\begin{aligned}\frac{\Phi_a}{\Phi} &= 0,0187, & \frac{\Phi_2}{\Phi} &= 1,29, \\ \frac{\Phi_1}{\Phi} &= 1,32, & \frac{\Phi_m}{\Phi} &= 0,699, \\ \frac{\Phi_0}{\Phi} &= 1,35, & \frac{\Phi_g}{\Phi} &= 0,180.\end{aligned}$$

Die Zahlen sind auf den Induktionsfluß Φ in M_3 bezogen. Eigentlich hätte Φ als von Spule zu Spule übertretender Induktionsfluß in der Mitte zwischen beiden Spulen gemessen werden sollen. Dieses wäre indessen mit genügender Genauigkeit kaum möglich gewesen, da die in der Mitte von Spule zu Spule übertretenden Kraftlinien sich über den Umfang von g hinaus ausbreiten. Diese Tatsache ergab sich aufs deutlichste aus dem Kraftlinienbilde, welches man mittels Eisenpulvers erhielt.

Die oben mitgeteilten Zahlen lassen erkennen, daß in M ein Maximum des Induktionsflusses von der Spule s_1 umschlossen wird; denn die beiderseits für Φ_1 und Φ_2 erhaltenen Zahlen sind kleiner als diejenige für Φ_0 . Es findet demnach zwischen der Mitte und den Enden ein Durchtreten der Kraftlinien zwischen den Windungen in den Außenraum, eine sogenannte Streuung, statt. Es ist das eine Schlußfolgerung, welche auch durch das Kraftlinienbild vollkommen bestätigt wird.

Von diesen gestreuten Kraftlinien geht ein Teil für die Induktion verloren. Zu diesem Teile gehören diejenigen Kraftlinien, welche die Leitung überhaupt nicht schneiden, wie etwa K (vgl. Fig. 3a). Zu diesen können auch solche kommen, welche die Leitung derartig durchsetzen, daß sich die Induktionswirkungen für die geschnittenen Leiterteile aufheben.

Die für die Induktion in Frage kommenden Kraftlinien ergeben sich durch folgende Überlegung.

Es werde zunächst angenommen, daß die Induktion in der feststehenden Leitung durch die rotierenden Kraftlinien erfolge. Außerdem werde vorausgesetzt, wie das bei den Ver-

suchen der Fall war, daß der die mittlere Scheibe m durchsetzende Induktionsfluß Φ_m größer sei als Φ_g .

Die durch die Scheibe g nebst Achse hindurchtretenden Kraftlinien schneiden bei einer Umdrehung die feste Leitung entweder gar nicht, wie z. B. K_1 (vgl. Fig. 3a), oder eine gerade Anzahl von Malen, wie K_2, K_3 , sodaß die gesamte durch den

Fig. 3a.

Fig. 3b.

Induktionsfluß Φ_g induzierte elektromotorische Kraft gleich Null ist. Von den Φ_m Kraftlinien, welche die mittlere Scheibe durchsetzen, geht der Teil Φ_g durch die Scheibe g , kommt folglich für die Induktion nicht in Betracht. Der übrige Teil von Φ_m schneidet dagegen, wie z. B. K_4 , die feste Leitung bei einer Umdrehung einmal oder eine ungerade Anzahl von Malen. Die tatsächlich induzierende Kraftlinienzahl beim Erregerstrom Eins ist somit durch $\Phi_m - \Phi_g$ dargestellt.

Der ebenfalls denkbare Fall, daß $\Phi_m < \Phi_g$ ist, läßt sich bei genügend kleinem Durchmesser der Mittelscheibe verwirklichen. Die Φ_m Kraftlinien, welche durch diese hindurchgehen, durchsetzen auch die Endscheibe, kommen folglich für die Induktion nicht in Betracht, da sie die feste Leitung, wie etwa K_1 und K_2 (vgl. Fig. 3b) gar nicht, oder eine gerade Anzahl von Malen schneiden. Der aus g austretende Überschuß $\Phi_g - \Phi_m$ schneidet dagegen, wie z. B. K_3 , die feste Leitung bei einer Umdrehung einmal oder eine ungerade Anzahl von Malen, ist folglich induzierend wirksam. Die Stromrichtung muß aber in diesem Falle derjenigen, welche dem Falle $\Phi_m > \Phi_g$ entspricht, entgegengesetzt gerichtet sein. Hieraus folgt weiter, daß für den Fall $\Phi_m = \Phi_g$ ein induzierter Strom nicht entsteht. Ein Spezialfall dafür ist durch eine nicht streng realisierbare Anordnung gegeben, bei welcher die Durchmesser der Kontaktscheiben verschwindend klein sind.

Zu dem nämlichen Ergebnisse gelangt man bei der Annahme feststehender Kraftlinien, die auf die rotierenden Teile wirken. Durch m gehen Φ_m , durch g dagegen Φ_g Kraftlinien, die wie in zwei Faradayschen Scheiben in Bezug auf die Leitung entgegengesetzte elektromotorische Kräfte induzieren. Folglich ist die Differenz $\pm (\Phi_m - \Phi_g)$ für die wirklich induzierte elektromotorische Kraft maßgebend.

Hiernach ist für die beschriebene Maschine die elektromotorische Kraft nicht durch den Ausdruck

$$E_r \text{ (Millivolt)} = 10^{-6} \cdot \Phi \cdot J \cdot v,$$

sondern durch

$$E_r = 10^{-6} (\Phi_m - \Phi_g) \cdot J \cdot v,$$

dargestellt, und letzterer Wert muß mit dem beobachteten E der Tab. I übereinstimmen. Setzt man demnach (v auf die Minute bezogen)

$$E = \frac{(\Phi_m - \Phi_g) \cdot J \cdot v}{60 \cdot 10^6},$$

somit

$$\Phi_m - \Phi_g = 60 \cdot 10^6 \cdot \frac{E}{J \cdot v},$$

so ersieht man ohne weiteres, daß man aus den in Tab. I zusammengestellten Beobachtungswerten, wie sie durch Strom- und Geschwindigkeitsmessungen erhalten sind, den wirksamen Induktionsfluß beim Strome Eins (C.G.S.) berechnen kann.

Die Durchführung dieser Rechnung führt zu folgenden Ergebnissen für die Beobachtungen Nr. 1—8 der Tabelle I.

Nr.	$\Phi_m - \Phi_a$	
1	618	} Endfeder auf Achse Mittel = 623.
2	637	
3	613	
	$\Phi_m - \Phi_g$	
4	452	} Endfeder auf Scheibe g Mittel = 448.
5	449	
6	466	
7	430	
8	441	

Unabhängig von dieser Berechnung läßt sich nun andererseits der wirksame Induktionsfluß beim Strome 1 bestimmen aus den Umfängen und Windungszahlen der Spulen (vgl. p. 276) und den relativ gemessenen Kraftlinienzahlen. Nach p. 280 ist

$$\Phi_m = 0,699 \cdot \Phi,$$

$$\Phi_a = 0,0187 \cdot \Phi,$$

$$\Phi_g = 0,180 \cdot \Phi,$$

folglich

$$\Phi_m - \Phi_a = 0,680 \cdot \Phi,$$

$$\Phi_m - \Phi_g = 0,519 \cdot \Phi.$$

Beim Einsetzen von $\Phi = 978$ (vgl. p. 278) erhält man

$$\Phi_m - \Phi_a = 665,$$

$$\Phi_m - \Phi_g = 507.$$

Aus den beobachteten elektromotorischen Kräften wurden (vgl. oben) für den wirksamen Induktionsfluß die Mittelwerte

$$\Phi_m - \Phi_a = 623,$$

$$\Phi_m - \Phi_g = 448$$

abgeleitet. Diese sind allerdings um Beträge von 6—12 Proz. kleiner als die aus den Spulenwerten berechneten, aber ich

glaube nicht, daß durch die vorhandenen Abweichungen die Richtigkeit der Gleichung

$$E = \frac{\Phi_w \cdot J \cdot v}{60 \cdot 10^6} \quad \left(\Phi_w = \left\{ \begin{array}{l} \Phi_m - \Phi_a \\ \Phi_m - \Phi_g \end{array} \right. \right)$$

in Frage gestellt wird. Denn die Abweichungen lassen sich zunächst zum Teil durch gewöhnliche Beobachtungsfehler erklären. Wie mir scheint, liegt aber ein Hauptgrund in einer Unsicherheit, mit welcher der Wert von Φ_0 für die Mitte behaftet ist. Wie früher ausgeführt wurde, findet zwischen den Spulenwindungen selbst ein Austreten der Kraftlinien statt, welche sich im äußeren Raume rückläufig schließen. Es muß daraus aber gefolgert werden, daß in der Nähe der Spulenmitte die innerste Windungsschicht, für sich betrachtet, Kraftlinien erzeugt, welche zu einem, wenn auch kleinem Teile sich rückläufig durch den Zylinderring hinziehen, der von der mittleren und äußeren Windungslage eingenommen wird. Das Gleiche gilt von den Kraftlinien, welche von der mittleren Windungsschicht erzeugt werden, indem von diesen ein kleiner Teil rückläufig durch die äußere Windungslage hindurchgeht. Auf diese innerhalb des Wickelraumes der Spule sich rückwärts schließenden Kraftlinien ist bei der Berechnung von Φ_0 keine Rücksicht genommen. Durch dieselben muß aber der Wert von Φ_0 tatsächlich verkleinert werden. Das führt naturgemäß zu kleineren Werten von $\Phi_m - \Phi_a$ bez. $\Phi_m - \Phi_g$, wodurch die für diese Größen auf ganz verschiedenen Wegen gefundenen Werte einander genähert werden müssen.

Für die recht wahrscheinliche Annahme, daß Φ_0 zu groß in die Rechnung eingeführt ist, spricht außerdem der Umstand, daß eine bessere Übereinstimmung der auf beiden Wegen erhaltenen Werte entsteht, wenn man das von Φ_0 unabhängige Verhältnis

$$\frac{\Phi_m - \Phi_a}{\Phi_m - \Phi_g}$$

aus den gemessenen elektromotorischen Kräften und aus den ballistischen Versuchen berechnet. Man findet nämlich dafür:

$$\text{Aus den elektromotorischen Kräften } \frac{623}{448} = 1,39$$

$$\text{Aus den ballistischen Ausschlägen } \frac{665}{507} = 1,31$$

Für die Unipolarmaschine mit Stahlmagnet gilt zur Berechnung der elektromotorischen Kraft die Formel

$$E = 4 \pi \mu \cdot v_s = \frac{4 \pi \mu \cdot v}{60 \cdot 10^5} \text{ (Millivolt)}$$

als richtig. Die von mir benutzte Formel

$$E = \frac{\Phi_w \cdot J \cdot v}{60 \cdot 10^6}$$

halte ich für die allgemeinere. In dieser tritt der wirksame Induktionsfluß $\Phi_w \cdot J/10$, d. i. die Differenz der Kraftlinienzahlen für den in der Mitte und den am Ende befindlichen Schleifring, an die Stelle der gesamten Kraftlinienzahl $4 \pi \mu$. Wenn die bei Magnetmaschinen gemessenen elektromotorischen Kräfte mit der ersten Formel im ganzen in Übereinstimmung sind, so erklärt sich das durch den Umstand, daß bei Magnetmaschinen der gewöhnlichen Konstruktion nur ein kleiner Teil der Kraftlinien durch den am Ende befindlichen Kontaktzylinder hindurchgeht. Es hängt das offenbar mit der Art der Ausbreitung der Kraftlinien zusammen, die bei einem Magnete in relativ größerer Zahl als bei einer Spule durch die Seitenflächen austreten.

Die Fälle $\Phi_m \leq \Phi_g$ sind auch hier denkbar. Zur Herstellung einer ihnen entsprechenden Maschine müßte der Magnet in der Mitte mit einer tiefen Eindrehung versehen werden, auf deren Boden die mittlere Schleiffeder aufzuliegen käme, oder man müßte zwei gleich starke Magnete miteinander zugekehrten entgegengesetzten Polen unter Belassung eines kleinen Zwischenraumes auf einer Axe von geringem Durchmesser befestigen. Zwischen den Polflächen wäre die mittlere Kontaktfeder auf der Achse aufzulegen. Die Scheibe für den Endkontakt wäre groß zu nehmen und der einen Polfläche möglichst nahe anzubringen.

Für den Grenzfall, daß die beiden Schleifkontakte in der geometrischen Achse liegen, also $\Phi_m = \Phi_g = 0$ ist, wird meistens angenommen, daß hier $E = 4 \mu \pi v_s$ sei. Nach meinen Darlegungen muß dagegen in diesem Falle $E = 0$ sein. In der Tat scheint mir der Weg, durch welchen man zu dem Werte $E = 4 \mu \pi v_s$ gelangt, nicht der richtige zu sein. Denn bei den betreffenden Schlußfolgerungen werden nur diejenigen Induktions-

linien ins Auge gefaßt, welche außerhalb des Magnetes in positivem Sinne vom *N*- zum *S*-Pole übertreten. Dagegen pflegt man dem Umstande, daß die Induktionslinien als geschlossene Kurven im Inneren des Magneten mit positivem Sinne von *S* nach *N* verlaufen, keine Rechnung zu tragen. Die räumliche Verteilung der innerhalb des Magneten vorhandenen Induktion $\mathfrak{B}$ läßt sich zudem nicht, auch nicht genähert, auf zwei in den Polen konzentriert gedachte Mengen freien Magnetismus zurückführen.

Zum Schlusse habe ich noch in Erfüllung einer mir angenehmen Pflicht den Herren Bauwens, Maffia und Sturm meinen Dank auszusprechen. Die genannten Herren haben mich bei den Beobachtungen in wirksamer Weise unterstützt.

Aachen, Oktober 1902.

(Eingegangen 21. Oktober 1902.)