und es wäre — abgesehen davon, dass ich bei anderem Sinne wahrscheinlich eine andere Reihenfolge gewählt hätte — der Deutlichkeit wegen besser gewesen, zu sagen: „...welche manche Beobachtungen über das Verhalten der Electricität in Gasen und über die electricische Leitung der letzteren verständlich machen.“ Der Gedanke an die Möglichkeit eines Missverständnisses hat mir jedoch fern gelegen, zumal ich ja — wie Hr. Narr selbst bemerkt — Thatfachen anführe, „die ein Verschwinden von Electricität in den umgebenden Gasraum unzweifelhaft machen, ohne dass man hierbei dem Staube, der in demselben schwebt, eine besondere Rolle zuweisen könnte.“

Ich bin im Gegentheile von einer Leitung oder Fortführung von Electricität durch Gase, auch wenn Staubtheilchen ausgeschlossen sind, überzeugt und stimme Hrn. Narr durchaus zu, wenn derselbe sagt, dass meine Versuche ihm die Frage nach der Leitung der Electricität durch Gase „vollständig offen zu lassen“ schienen, und dieses Problem „nicht mit einem Anlaufe zu lösen“ sei.

Berlin, im Februar 1888.

XI. *Ueber die Erregung des dynamoelectrischen Stromes; von F. Auerbach.*

(Hierzu Taf. I Fig. 18.)

Die dynamoelectrische Maschine, welche eine der Grundlagen der heutigen Electrotechnik bildet, oder — um es gleich bestimmter zu bezeichnen — die von dieser Maschine gelieferten Ströme, welche dynamoelectrische Ströme genannt werden mögen, sind auch vom rein wissenschaftlichen Standpunkt von hohem Interesse. Von den Gründen, welche diese Behauptung rechtfertigen, genügt es hier, die beiden wesentlichsten anzuführen: einerseits ist die Art, wie diese Ströme zu Stande kommen, also ihre Erregung, eine ganz eigenartige, und andererseits bietet auch der stationäre Zustand, welcher sich schliesslich herstellt, besondere Merkmale und

charakteristische Beziehungen zu den für ihn bestimmenden Factoren dar. Auf den erstgenannten Punkt, also auf die Erregung des dynamo-electrischen Stromes, beziehen sich die nachfolgenden Versuche und Ergebnisse.

Der Definition des dynamo-electrischen Stromes schickt man zweckmässiger Weise diejenige des magnetelectrischen Stromes voraus. Letzterer ist bekanntlich ein Strom, welcher in einer geschlossenen, im magnetischen Felde rotirenden Drahtspule circulirt. Als ein dynamo-electrischer Strom soll nun ein magnetelectrischer Strom bezeichnet werden, welcher dadurch verstärkt worden ist, dass der Spulendraht, oder vielmehr eine ihm gegebene Fortsetzung, um die das Feld erzeugenden Magnete in geeigneter Richtung gewunden wurde, der Art, dass hier das Feld verstärkt wurde, infolge dessen der Spulenstrom u. s. w., eine Reihe von Wechselwirkungen, deren Gesammtheit „dynamo-electrischer Process“ heissen möge. Man könnte, und in sprachlicher Hinsicht vielleicht correcter, auch anders definiren, nämlich so, dass man als dynamo-electrischen Strom ausschliesslich die Verstärkung des magnetelectrischen bezeichnet, während nach obiger Definition der dynamo-electrische Strom den magnetelectrischen mit enthält. Letzteres hat indess den Vortheil, dass es den thatsächlichen Verhältnissen in einfacherer Weise entspricht, insofern nämlich ein dynamo-electrischer Strom ohne magnetelectrischen nicht erregt werden kann. In der Praxis wird freilich zwischen den magnetelectrischen und den dynamo-electrischen Maschinen der Gegensatz bestehen, dass erstere möglichst kräftige Stahlmagnete enthalten, letztere dagegen Eisenkörper von grosser Weichheit des Materials (um eine starke Magnetisirung durch den Strom zuzulassen) aber geringem ursprünglichen Magnetismus (weil dieser gegenüber dem dynamo-electrisch erzeugten schliesslich doch keine wesentliche Rolle spielt). Dieser Gegensatz ist aber nur ein quantitativer und ändert nichts an dem Umstande, dass der dynamo-electrische Process mit der Erregung eines magnetelectrischen Stromes beginnt.

Hiernach ist es klar, dass für die Erregung des dynamo-electrischen Stromes in erster Linie der ursprünglich vor-

handene sogenannte remanente Magnetismus der erzeugenden Maschine in Betracht kommt. Trotzdem liegt eine systematische Experimentaluntersuchung hierüber nicht vor, nur gelegentlich sind einige bezügliche Beobachtungen von Frölich, Stern u. a. angestellt worden. Zur Ausfüllung dieser Lücke dürften die vom Verf. theils schon vollendeten, theils noch beabsichtigten Beobachtungsreihen beitragen.

Schon die erste derselben, bei welcher Hr. stud. Köbner als zweiter Beobachter freundlichst mitwirkte, hat zu einem überraschenden Ergebnisse geführt. Die vielfach gehegte Anschauung nämlich, dass zur Einleitung des dynamoelectrischen Processes, also zur Erregung des dynamoelectrischen Stromes, das Vorhandensein eines noch so kleinen remanenten Magnetismus, und zwar bei jeder beliebigen Drehgeschwindigkeit der Maschine, genüge, hat sich (und zwar sowohl bei einer Ringmaschine von Gramme, als bei einer Trommelmaschine von Siemens und Halske) als irrig erwiesen; es ist hierzu vielmehr erforderlich, dass die Tourenzahl einen gewissen Werth übersteige, und dieser Werth hängt seinerseits (von Aenderungen des Widerstandes zunächst abgesehen) von der Grösse des remanenten Magnetismus ab. Es existirt also bei dynamoelectrischen Maschinen eine kritische Tourenzahl, und zwar für eine und dieselbe Maschine je nach der Grösse des remanenten Magnetismus eine andere. Lässt man die Maschine mit einer Tourenzahl, welche kleiner ist, als die, dem vorhandenen remanenten Magnetismus entsprechende kritische, laufen, so findet die Erregung eines dynamoelectrischen Stromes so gut wie gar nicht statt.

Der Gang der Beobachtungen ist im grossen und ganzen¹⁾ folgender. Zunächst wird die Maschine mittelst einer Batterie oder einer anderen Maschine mit dem gewünschten remanenten Magnetismus r versehen; alsdann wird die Maschine mit der Tourenzahl n in Gang gesetzt. Es tritt dann einer der beiden folgenden Fälle ein: die strommessende Tangentenbussole gibt im Beobachtungsfernrohr einen Scalenausschlag

1) Die Einzelheiten werden an anderer Stelle mitgetheilt werden.

von einigen Centimetern, was bei der Empfindlichkeit des Instrumentes bedeutet, dass der Strom sehr schwach ist, oder aber die Scala (von 1 m Länge) geht mit Vehemenz aus dem Gesichtsfelde, was auf einen mehr oder weniger, aber jedenfalls starken Strom schliessen lässt. Im ersten Falle ist zu schliessen, dass, wenn N die kritische Tourenzahl ist, $n < N$ ist, im zweiten Falle, dass $n > N$ ist. Im ersten Falle ist der dynamoelectrische Strom nicht erregt worden, der beobachtete Strom ist ein rein oder nahezu rein magnetelectrischer; im zweiten Falle ist der dynamoelectrische Strom zu Stande gekommen, und zwar in einer den magnetelectrischen weit übertreffenden Stärke.

Man wird sich die Frage vorlegen, wie es kommt, dass eine so merkwürdige und auffallende Erscheinung nicht längst beobachtet worden ist. Diese Frage ist nicht schwer zu beantworten. Um nämlich das Bild der Erscheinung in der oben geschilderten Schärfe und Deutlichkeit zu erhalten, muss man mit sehr kleinen remanenten Magnetismen arbeiten; hier stehen die beiden unterschiedenen Fälle einander am schroffsten gegenüber. Je grösser der remanente Magnetismus ist, desto weniger schroff wird der Uebergang. Er bleibt zwar für den, welcher schon mit kleinen Werthen von r beobachtet hat, immer noch deutlich genug, um den Grenzwert N festzustellen; einem unvorbereiteten Beobachter aber würde die Discontinuität vermuthlich entgehen. Beobachtungen bei sehr kleinem r sind aber, wie gesagt, in der That noch nicht systematisch angestellt worden. Es ist auch klar, weshalb die Erscheinung, je grösser r ist, desto mehr an Schärfe verlieren muss; einfach deshalb, weil der magnetelectrische Strom selbst um so stärker wird.

Es würde sehr zeitraubend sein, wollte man für jedes r das zugehörige N bestimmen; denn wenn sich z. B. das zuerst gewählte n als zu klein erwiesen hat, müsste man, ehe man es mit einem grösseren n versucht, erst das ursprüngliche, durch den ersten Versuch modificirte r wieder herstellen, und dies jedesmal wiederholen, bis N gefunden ist. Es möge bemerkt werden, dass dieses N sich alsdann durch eine sehr eigenthümliche Erscheinung zu erkennen gibt: der

Ausschlag ist anfangs klein, gerade als ob n noch zu klein wäre, aber nach einigen Secunden wächst er, und zwar immer schneller, bis schliesslich die Scala verschwindet. Aber, wie gesagt, es würde zu zeitraubend sein, lauter solche Beobachtungsreihen anzustellen. Es hat sich auch gezeigt, dass dies nicht nothwendig ist, dass man sich vielmehr nur eine grössere Anzahl, auf verschiedene r bezügliche obere und untere Grenzen für N zu verschaffen braucht, um die Curve für N selbst mit grosser Genauigkeit zwischen ihnen hindurch legen zu können. So sind die beiden Curven für die Gramme'sche und für die Siemens'sche Maschine entstanden; die erstere ist in der Fig. 13 dargestellt; die Grenzwerte, die beobachtet wurden, sind durch Pfeilspitzen angedeutet.

Wie man sieht, nimmt die kritische Tourenzahl mit wachsendem remanentem Magnetismus ab; es geschieht dies bei beiden Maschinen in ganz entsprechender Weise (die absoluten Verhältnisse sind natürlich nicht vergleichbar, da die Maschine S kleiner und anders geschaltet als G ist). Die Abnahme erfolgt im ersten Theile nach einem hyperbolischen Gesetz, im zweiten Theil dagegen geradlinig. In einem bestimmten Punkte trifft also die Curve die Abscissenaxe; bei grösseren remanenten Magnetismen ist demgemäss die kritische Tourenzahl gleich Null, d. h. der dynamoelectrische Strom wird unter allen Umständen erregt.

Durch Einschaltung von Widerständen in den Stromkreis wird der Charakter der Curve nicht geändert, nur rückt dieselbe höher hinauf.

Die hier behandelte Erscheinung liefert die experimentelle Bestätigung für ein Ergebniss der von Clausius aufgestellten Theorie der dynamoelectrischen Maschine.¹⁾ Diese Theorie führt nämlich zu einer Endgleichung von der Form:

$$E = if(i, n),$$

wo E die electromotorische Kraft, i die Stromstärke und f eine bestimmte Function von i und n ist. Ersetzt man nun E nach dem Ohm'schen Gesetze durch wi , wo w der Widerstand ist, so erhält man:

$$wi = if(i, n).$$

1) Clausius, Wied. Ann. 20. p. 353. 1883.

Diese Gleichung hat zwei Wurzeln, nämlich $i = 0$ und $i = \varphi(n, w)$, wo φ eine von Clausius ausgerechnete Function von n und w ist. Für solche Werthe von n und w , welche brauchbare Werthe von φ ergeben, wird man selbstverständlich die letztere Wurzel zu wählen haben; brauchbar sind aber offenbar nur reelle und positive Werthe; da nun φ für Werthe von n , welche kleiner als ein gewisser sind, negativ wird, hat man für diese Fälle, d. h. für kleine Tourenzahlen, die Wurzel $i = 0$ zu wählen. Das theoretische Ergebniss lautet also mit Clausius' eigenen Worten: „Für kleine Drehungsgeschwindigkeiten gibt die Maschine keinen (d. h. keinen dynamoelectrischen) Strom, sondern erst von einer gewissen Drehungsgeschwindigkeit an beginnt ihre Wirksamkeit.“ Die mitgetheilten Beobachtungen zeigen, dass dies thatsächlich der Fall ist.

Es darf nicht unerwähnt bleiben, dass Clausius selbst das von ihm aus der Theorie abgeleitete Ergebniss auf den Fall anwendet, dass eine Dynamomaschine mit anfangs kleiner, aber rasch wachsender Tourenzahl in Gang gesetzt wird; es werden dann einige Touren stromlos gemacht werden, und diese Touren kann man die todtten Touren nennen.¹⁾ Ganz anderer Art ist die hier behandelte Erscheinung. Die Tourenzahl ist in jedem einzelnen Falle von vornherein constant; ist sie kleiner als die kritische, so bleibt der dynamoelectrische Strom fast gänzlich aus, die Maschine mag in Gang erhalten werden, solange sie wolle; die Stromlosigkeit ist also hier eine dauernde Erscheinung. Diese Erscheinung muss als die allgemeine und wahre Bestätigung des von Clausius gewonnenen theoretischen Resultates bezeichnet werden.

Am Schlusse seiner Abhandlung leitet Clausius für den von ihm herangezogenen Fall der todtten Touren eine

1) Die obige Erläuterung verdanke ich einer gütigen brieflichen Mittheilung von Hrn. Geheimrath Clausius; die betreffende Stelle in seiner Abhandlung kann deshalb zu Missverständnissen Anlass geben, weil auch bei einer gleich mit der definitiven Tourenzahl in Gang gesetzten Maschine die ersten Touren häufig todtte Touren genannt werden, weil sie, wenn auch nicht stromlos sind, so doch noch nicht den vollen Strom geben — eine Erscheinung, welche auf die Zeitdauer des dynamoelectrischen Processes zurückzuführen ist.

Beziehung ab, von der es nahe liegt, sie auch auf unseren Fall anzuwenden. Man müsste zu diesem Zwecke statt der in jener Gleichung vorkommenden Stromstärke i , welche dem remanenten Magnetismus r entspricht, diesen selbst einführen, und zwar nach der von Clausius benutzten Frölich'schen Formel $r = Ai_1 / (1 + \alpha i_1)$. Thut man dies, so findet man, dass der Coëfficient von r^2 im Zähler fortfällt, die Gleichung also die Form annimmt:

$$N = \frac{ar + b}{cr^2 + dr + e};$$

ferner muss für $r = 9$ $N = \infty$ werden, woraus $e = 0$ folgt; die Gleichung nimmt also die Form an:

$$N = \frac{1}{r} \cdot \frac{ar + b}{cr + d},$$

in welcher sie zur Darstellung der beschriebenen Erscheinung in der That geeignet ist, wenigstens in qualitativer Hinsicht; zur quantitativen Vergleichung müsste man die Werthe der Coëfficienten $abcd$ näher verfolgen.

Noch auf eine ganz andere Weise lässt sich ein, zunächst wenigstens qualitatives Verständniss der Erscheinung gewinnen, nämlich durch Betrachtung der einzelnen Phasen des dynamoelectrischen Processes. Die erste Phase desselben besteht darin, dass der remanente Magnetismus r einen Strom erzeugt, dessen Stärke man, da er mit r und der Tourenzahl n proportional ist, gleich prn setzen kann. Die zweite Phase besteht darin, dass dieser Strom neuen Magnetismus erzeugt, und zwar, wenn vorläufig auch hier Proportionalität angenommen wird, den Magnetismus $prn \cdot q$. Die dritte Phase ist wieder eine stromerzeugende, und der erzeugte Strom hat die Stärke $prn \cdot q \cdot pn$. So geht das fort, und der gesammte dynamoelectrische Strom lässt sich durch die unendliche Reihe:

$$i = prn(1 + pqn + (pqn)^2 + \dots)$$

darstellen. Diese Reihe ist convergent oder divergent, je nachdem $n < 1/pq$ oder $n > 1/pq$ ist, d. h. je nachdem n einen bestimmten, für eine und dieselbe Maschine constanten Werth nicht erreicht oder übersteigt. Eine dynamoelectrische Maschine, deren Eisenmassen unbegrenzt dem proportionalen

Magnetisirungsgesetze gehorchen, würde sich also höchst eigenthümlich verhalten: für Tourenzahlen unterhalb einer gewissen Zahl (und zwar stets derselben, wie gross auch r sein möge) würde sie nur einen schwachen Strom von der Grössenordnung des magnetelectrischen Stromes liefern (z. B. für $n = 1/2pq$ einen doppelt so starken), für grössere n dagegen einen Strom, der gegenüber dem magnetelectrischen als unendlich stark zu bezeichnen wäre. Thatsächlich ist das Verhalten in zweifacher Hinsicht ein anderes; eine kritische Tourenzahl existirt zwar wirklich, aber sie wird nicht durch eine Constante, sondern durch eine Function des remanenten Magnetismus dargestellt; und zweitens ist oberhalb der kritischen Tourenzahl die Stromstärke zwar sehr gross, aber nicht unendlich. Beide können in einer Abweichung des Magnetisirungsgesetzes von der Proportionalität, welche oben vorläufig angenommen wurde, ihren Grund haben, und in der That ist bekanntlich diese Abweichung eine doppelte: für kleine, magnetisirende Kräfte ist die Magnetisirung stärker, für grosse schwächer, als sie bei Proportionalität sein müsste, und nur für mittlere Kräfte entspricht sie dieser letzteren. In der obigen Reihe ist demnach q keine Constante, sondern eine Grösse, welche r enthält und zunächst zunimmt, woraus zu folgern ist, dass N mit wachsendem r abnimmt — übereinstimmend mit der beobachteten Erscheinung. Andererseits geht q für starke Ströme in eine abnehmende Grösse über und bewirkt dadurch, dass die in diesem Falle sonst divergente Reihe sich in eine convergente, wenn auch von beträchtlichem Summenwerthe, verwandelt.

Eine weitere Untersuchung soll dem Einflusse des remanenten Magnetismus auf den definitiven Gleichgewichtszustand des dynamoelectrischen Stromes gewidmet sein.

Breslau, Januar 1888.