Theoretische und praktische Untersuchungen

zur Konstruktion

Magnetischer Maschinen.

Theoretische und praktische Untersuchungen
zur Konstruktion
Magnetischer Maschinen.

Von

Dr. Max Corsepius.

Mit 13 Textfiguren und 2 lithographirten Tafeln.

Berlin.
Julius Springer.

1891.

München.
R. Oldenbourg.

V o r w o r t.

In dem vorliegenden Werk übergebe ich der Oeffentlichkeit eine Reihe von Untersuchungen über die Bedingungen für die Konstruktion magnetischer Maschinen und Apparate, welche mich seit dem Jahre 1886 beschäftigt haben. Ein Theil der hier vorgeführten Deduktionen ist rein theoretischer Natur und dürfte als Beitrag zu den mathematischen Theorien der Elektrizitätslehre betrachtet werden können; in der Hauptsache jedoch beschäftigt sich diese Arbeit mit der Prüfung und Benutzung jener theoretischen Grundsätze in der Praxis des Elektrotechnikers einerseits und mit der Erörterung von praktisch, d. h. durch Versuche und Messungen festgestellten Rechnungskonstanten und Gesetzen für den Magnetismus andererseits.

Jene sind bestimmt, die Frage zu beantworten, durch welche Wickelungsanordnung man die größte Induktionswirkung erreicht, diese dienen unmittelbar zur Berechnung der Eisentheile von magnetischen Vorrichtungen. In Bezug auf die Wickelungstheorie soll meine Aufgabe erfüllt sein, wenn der Konstrukteur an der Hand derselben zu erkennen im Stande ist, wieweit sich eine Konstruktion dem theoretisch Vollkommenen nähert, beziehungsweise welche Nachteile eine Abweichung von dem Gesetz mit sich bringt, während es immerhin eine Reihe von Fällen und von Ausführungsarten giebt, bei welchen ein enger Anschluß an die Theorie leicht durchführbar ist; in Bezug auf die Berechnung der magnetischen Theile soll dagegen als Endzweck betrachtet werden, dem Techniker die Möglichkeit zu geben, jeden beliebigen Apparat ohne irgend einen vorher anzustellenden Versuch im Voraus zu bestimmen, falls ihm nur die Güte des Materials annähernd bekannt ist; hierbei soll der Apparat, z. B. die Dynamomaschine, als genau berechnet gelten, wenn sich nur Abweichungen in einem technisch zulässigen Grade ergeben.

Die für die Untersuchungen nothwendigen Messungen sind, soweit sie sich auf die Induktion beziehen, größtentheils im physikalischen, und, soweit sie zur Be-

rechnung der magnetischen Theile gehören, im elektrotechnischen Laboratorium der Kgl. technischen Hochschule Berlin ausgeführt.

Es sei mir gestattet, an dieser Stelle den Herren Professoren Dr. Paalzow und Dr. Slaby für die Bereitwilligkeit, mit welcher dieselben ihre Laboratorien für diesen Zweck zur Verfügung gestellt und neue Apparate beschafft haben, meinen verbindlichsten Dank auszusprechen.

Ein hervorragendes Verdienst haben ferner um die im Jahre 1888 angestellten Versuche Herr Ernst Landmann und für diejenigen des Jahres 1890 Herrn Assistent Dr. Wilhelm Wedding als Mitbeobachter. Auch haben mich die Herren Bauch, Miehke, Kahlenberg, Martin zeitweise unterstützt, wofür ich allen Genannten besten Dank weifs.

Das entgegenkommende Anerbieten des Herrn Professor Dr. Slaby war Veranlassung dazu, daß ein Theil dieser Abhandlung bereits an anderer Stelle und zwar in den Verhandlungen des Vereins zur Beförderung des Gewerbfließes veröffentlicht worden ist. Der Verein hat jedoch in sehr anerkennenswerther Weise seine Genehmigung zur Herausgabe der ganzen Arbeit in der jetzigen Form ertheilt.

Es sollte mir zu großer Freude gereichen, wenn die gewonnenen Ergebnisse Benutzung und Prüfung in den Kreisen rechnender Techniker finden und denselben Dienste leisten sollten, gleichwie sie mir in meiner Thätigkeit als Ingenieur bei einer der bekanntesten Firmen mehrfach förderlich gewesen sind.

December 1890.

Dr. Max Corsepius.

Inhalt.

Günstigste Induktionswirkung	3
Theorie einer vollkommenen Wickelung	3
These von München	3
Inhalt derselben	3
Zu lösende Gleichungen für das Maximum	8
Gleichung für das Maximum	9
Geometrische Darstellung der Wirkung	11
Allgemeine Gleichung für die Drahtdicke	12
Gleichungen für Magnetbewickelung	14
Praktische Ausführung der Wickelung	14
Messungsart	15
Versuchsmagnet	18
Erfolg bei Anwendung der neuen Wickelung. Prüfung der Theorie	19
Ausdruck des Güteverhältnisses	20
Werthe desselben für das Versuchsexemplar	22
Die Gesetze des Telephonbaues	22
Gleichung für die Güte eines Sprechtelephons	24
Einfluß der Sättigung	25
Gleichung für die Güte eines Hörtelephons	26
Zusammengefaßte Gesetze für Telephone	28
Messungen	29
Differentialtelephon	30
Prüfungsmethode	31
Ringförmige Stücke	33
Berechnung der magnetischen Theile	35
Versuch der Neubestimmung der Kapp'schen Konstanten	35
Meßmethode, Gleichung	36
Galvanometer	37
Normalelement von Raleigh	38
Stromlaufschema für die Telegraphie	40
Siderognost	45
Gleichungen zur Bestimmung	47
Beispiele für die Galvanometerkonstanten	48—51

Ergebnisse der Beobachtungen von 1888	52
Neue Festsetzungen	58
Großer Siderognost für das Maximum	60
Kleiner Siderognost für die Kurve	60
Prinzip der Rechnung	64
Ergebnisse der Beobachtungen von 1889	66
für Schmiedeeisen	66
für Gufseisen	67
für Stahl	69
Magnetisirungskurve für Schmiedeeisen	72—73
Ermittelte Werthe von c und q	74—75
Spezifische Gewichte der Eisensorten	77
Empirische Formeln für $Z_{\max}$	78—79
Der Luftwiderstand	79
Mittlerer Radius einer Spule	80
Beobachtete Zahlen	83
Die Streuungsmessungen	85
Versuche mit Magnetmodellen	89
Berechnung der Lahmeyer-Maschine	90

Für die Vorausbestimmung magnetischer Maschinen braucht der Konstrukteur eine Reihe von Daten, welche zum Theil den Gegenstand längerer Untersuchungen sowohl theoretischer als auch experimenteller Natur der bekanntesten Forscher in der Elektrizitätslehre gebildet haben.

Wie sich jede einzelne Versuchsreihe eines Beobachters nur mit einem ganz speziellen Punkt des Gesamtgebietes befassen kann, so bemerkt man auch in dem vorliegenden Fall, daß jede Untersuchung der in Betracht kommenden Forscher nur einzelne Fragen für die Berechnung beziehungsweise Beurtheilung von elektrischen Vorrichtungen beantwortet oder zu beantworten sucht.

Im Nachfolgenden soll eine Reihe von Untersuchungen der beiden oben genannten Arten besprochen und ihre Anwendung auf die Praxis des Technikers klargelegt werden, und wenn auch die hier zu besprechenden Gebiete nicht den Anspruch machen können oder sollen, Alles dasjenige in sich zu begreifen, dessen Kenntniß für die Ausführung von Konstruktionen nothwendig ist, so mag es doch gerade aus diesem Grunde gerechtfertigt erscheinen, die verschiedenartigen theoretischen und praktischen Festsetzungen, welche mich in Verfolgung des vorgenannten Zweckes in den letzten vier Jahren beschäftigt haben, an einer Stelle als gemeinschaftlichen Beitrag zur Erreichung jenes Zieles zu veröffentlichen, zumal es nicht angängig erachtet werden kann die einzelnen Betrachtungen von einander vollständig zu trennen, weil die Beurtheilung des Einen die Kenntniß des Anderen voraussetzt.

Es mag aus demselben Grunde angezeigt sein, die Gebiete, mit denen sich diese Arbeit befaßt, zu umgrenzen und anzugeben, welche anderen nothwendigen, jedoch für die Anwendung des zu Erörternden in gewissem Grade entbehrlichen Theile des Ganzen nicht berücksichtigt sind.

Da die Berechnung, beziehungsweise Vorausbestimmung magnetischer Maschinen sowohl die Konstruktion von Dynamomaschinen für Wechsel- und Gleichstrom, als diejenige von Telephonen, Transformatoren, Magneten und magnetischen Apparaten und Meßinstrumenten in sich schließt, so ist von vornherein zu übersehen, daß alles hier Gesagte allgemeingültig sein muß, daß also auf der Grundlage der exakten Forschung ohne Willkür Gesetze ausgebaut und zur unmittelbaren Anwendung brauchbar gemacht werden müssen.

Es sollen behandelt werden der Reihe nach:

- Eine Theorie der vollkommenen Wickelung,
- Die Gesetze des Telephonbaues,
- Die Kapp'sche Theorie,
- Neue Festsetzungen auf der Grundlage der Letzteren,
- Die Kraftlinienstreuung.

Soweit angängig, sind alle theoretischen Folgerungen durch sorgfältige Versuche, welche theils im physikalischen, theils im elektrotechnischen Laboratorium der Kgl. technischen Hochschule Berlin ausgeführt sind, gestützt und mit Beispielen belegt, doch mußte auf näheres Eingehen auf alle Gebiete der Anwendung verzichtet werden. Es bleibt also dem Leser überlassen, in den speziellen Fällen das Erörterte zu prüfen und zu ergänzen, da hier nur nackte Thatsachen mitgeteilt werden können.

Bei der Wickelungstheorie ist nicht berücksichtigt die Aenderung der zu Grunde liegenden Induktionen durch Selbstinduktion oder geänderte Transformation, bei der Festsetzung der magnetischen Verhältnisse ist der Einfluß der Temperatur außer Acht gelassen. Im Rahmen der richtigen Anwendung für spezielle Induktionsverhältnisse und gewöhnliche Temperatur dürften jedoch die Folgerungen als streng gelten. Inwieweit bei den Beispielen besondere Verhältnisse zu Grunde gelegt sind, dürfte leicht erkannt werden.

Wir kommen zur Betrachtung der Wickelung magnetischer Vorrichtungen.

Bei den in der Praxis gebräuchlichen Maschinen und Apparaten, welche auf der Wechselwirkung von elektrischen Strömen und Magneten in irgend einer Form beruhen, findet man fast durchgängig die Anwendung von cylindrischen Drahtspulen mit an allen Stellen gleicher Anzahl von Drahtlagen und gleichbleibender Drahtstärke. Es sind nun zwar schon öfters Versuche gemacht, die Wirkungsweise von derartigen Vorrichtungen dadurch zu verbessern, daß man den Draht nicht gleichmäßig aufwickelt, sondern mit gewissen Abweichungen von der allgemein cylindrischen Wickelungsform, und es bestehen z. T. noch einzelne Patente auf solche „Verbesserungen“, docht liegt allen diesbezüglichen Anordnungen kein mathematisches Prinzip oder irgend welche numerische Dimensionirung zu Grunde, vielmehr war es rein Sache des Probirens gewesen, durch gewisse Abänderungen der Wickelungsmaße eine größere Leistung erzielen zu wollen, an eine Anwendung verschiedener Drahtstärken in einer und derselben Spule in einer den später zu veröffentlichenden Anordnungen entsprechenden Weise hat aber meines Wissens bisher überhaupt Niemand gemacht.

Aufgabe der vorliegenden Arbeit soll es sein, die Frage zu beantworten, ob es zweckmäßig ist, die gewöhnliche Art der Wickelung durch eine andere zu ersetzen und durch welche. Die Antwort soll in der Weise ertheilt werden, daß nicht nur eine zweckmäßigere Wickelungsart angegeben, sondern mathematisch, d. h. durch Rechnung nachgewiesen wird, welche unter allen Wickelungsarten die vollkommene ist. Der hierfür aufgestellte Rechnungsausdruck soll dann an Beispielen geprüft, klargestellt und die sich so ergebenden Thatsachen, erläutert durch über diesen Gegenstand ausgeführte Versuchsreihen, auf die Praxis und zwar im Besonderen auf den Telephonbau angewandt werden.

Der erste und als der rein theoretische das Hauptgewicht besitzende Theil meiner Arbeit wird sich daher mit der Theorie der vollkommenen Wickelung beschäftigen; zum Verständniß der weiteren Ausführungen ist dann, streng genommen, die Kenntniß der im späteren Theil dieser Abhandlung besprochenen Messungen und Untersuchungen über die Kapp'sche Theorie der Rechnung mit Kraftlinien, sowie über die Kraftlinienstreuung erforderlich oder doch die Kenntniß der Arbeiten der bekannten Forscher wie Hopkinson und Ewing über Magnetismus in ihren grundlegenden Zügen vorausgesetzt.

Die Theorie einer vollkommenen Wickelung.

Bei meiner Promotion in München 1886 stellte ich die Behauptung auf:

„Bei einem vollkommenen Telephon müßten die Magnete derartig von Drahtwindungen umgeben sein, daß alle Kraftlinien von diesen geschnitten werden und daß der Widerstand jedes Raumelementes eine Funktion der Intensitätsänderung des magnetischen Feldes an seinem Ort ist.“

Diese These, welche zu vertheidigen mich die Einwürfe des Herrn Prof. Dr. Lommel veranlaßten, bedarf einer näheren Erklärung zum vollen Verständniß.

Zunächst spricht der obige Satz nur von einem Telephon, ich muß jedoch gleich hervorheben, daß derselbe auf jeden Magneten anwendbar ist, welcher Schwankungen in der Intensität seines Feldes erfährt.

Ferner aber ist „Widerstand jedes Raumelementes“ so zu verstehen. Wir denken uns den geometrischen Raum, welcher die Magnete umgiebt, in kleine Theile zerlegt, z. B. zunächst 1 ccm; dann enthält jedes Kubikcentimeter eine Anzahl Drahtstückchen von bestimmter Dicke, und zwar ist diese Drahtdicke konstant, falls die Intensitätsänderung des Feldes in diesem Kubikcentimeter bei der in Frage kommenden Beeinflussung des Telephonmagneten an allen Stellen dieselbe ist.

Reihen wir die Drahtstückchen an einander zu einem Draht, so besitzt dieser Draht einen bestimmten Widerstand.

Lassen wir nun — was aus dem Grunde nothwendig ist, weil im Allgemeinen die Feldstärke überall verschieden ist — zur Infinitesimaldimension übergehend, den erörterten Raumtheil sich der Null nähern, so erhalten wir das Raumelement und müssen, um die frühere Betrachtung gelten zu lassen, die Drahtdicke ebenfalls zu Null machen; hierbei wird der Gesamtwiderstand unendlich werden, doch wird, wie bei ähnlichen Infinitesimalbetrachtungen der Widerstand jedes Raumelementes mit verschiedener Schnelligkeit zu Unendlich werden, so daß die Verschiedenheit der Widerstände damit gewahrt bleibt.

Wir erkennen, daß die Behauptung mehrere in sich faßt, nämlich:

1. Bei den gewöhnlichen Telephonen werden die Kraftlinien (das magnetische Feld) nicht vollkommen ausgenutzt.
2. Wenn man ein bisher unbenutztes Raumstück in der Nähe des Magneten zur Wickelung hinzunimmt, so vergrößert man die Wirkung, falls die übrigen Voraussetzungen erfüllt werden.

3. Bei einem Telephonmagneten ist nicht nur die Feldstärkenänderung, sondern auch die Größe des Feldes von Werth.
4. Die höchste Wirkung erfordert einen unendlich großen Raum für die Wirkung.
5. Da man die Wirkung eines Telephons nur daran ermessen kann, welche elektrometrische Kraft es entwickelt, falls der Gesamtwiderstand der Wickelung ein ganz bestimmter ist, so wird behauptet, falls man zu den vorhandenen Spulen noch mehr hinzunimmt und dabei für die früheren Spulen entsprechend dickeren Draht wählt, so daß der nunmehrige Gesamtwiderstand wieder der frühere ist, so wird die Wirkung vergrößert, obgleich die Windungszahl der alten Spulen verringert ist, selbst wenn die Intensitätsänderung — d. h. die Induktion in einer Windung — am neuen Orte bedeutend geringer ist.
6. Mehr erhält man nach diesem Verfahren nur, wenn die genannte Widerstandsbedingung genügend, und das Maximum nur, wenn sie genau gewahrt ist.

Man sieht, daß eine Fülle von Behauptungen sich aus jenem Satz herleitet, deren schwieriges Aussehen uns aber nicht von der Klarheit des Hauptinhaltes ablenken darf, und dieser ist eben:

Die Telephone (d. h. alle auf Induktion beruhenden Anordnungen) sind allein durch Aenderung der Wickelung verbesserungsfähig, und zur Erreichung der höchsten Wirksamkeit ist es nothwendig, daß die Drahtdicke variabel und nach einem bestimmten Gesetz gewählt wird, so daß die bestimmende Variable nur die Intensitätsänderung ist.

So weit reichte meine Erkenntniß in dieser Sache in München, ich war nur im Stande zu beweisen, daß der erste Theil der These ohne den zweiten nicht bestehen kann, welches aber die „Funktion“ sei, mußte erst durch eingehende Rechnung gefunden werden.

Da es weit übersichtlicher ist, meinem eigenen Entwicklungsgange hierin zu folgen, anstatt, wie ich es jetzt könnte, sofort in rein mathematische Betrachtungen einzutreten, so ziehe ich es vor, meinen damaligen Beweis zu wiederholen.

Gegeben ist ein Magnet, der entweder durch Aenderung des permanenten Magnetismus oder durch Magnetisirung von außen her in den um ihn zu legenden Drahtwindungen Ströme induziren soll. Jenes gilt z. B. für Telephone, dies für die Armatur der Dynamomaschinen.

Wir betrachten also einen Telephonmagneten; ob derselbe Polschuhe hat oder nicht, ist gleichgültig; sind solche vorhanden, so gehören sie selbstverständlich zum Magneten hinzu und sind prinzipiell von den übrigen Theilen des Magneten nicht verschieden.

Warum dies besonders hervorzuheben ist, ergibt sich, wie folgt. Der Anblick des gebräuchlichen Telephons, in seiner Allgemeinheit, lehrt uns sofort die Grundidee kennen, auf welche die Konstruktion gestützt ist. Man nimmt offenbar an, daß es sich bei einem Telephone darum handle, ein Stück weiches Eisen durch einen Stahlmagneten