

die Kurven der Temperaturzunahme immer mehr mit den Kurven für den Wechselstromwiderstand decken. Dabei rückt die obere Kurve Fig. 2 immer näher an die untere. Gestrichelte und strichpunktierte Kurven geben daher eine untere und obere Grenze für die Lage des zu erwartenden Temperaturminimums an. Beide Kurven nähern sich gegenseitig mit wachsendem Werte m und durchschneiden sich bei $m = 64$, von wo ab vernünftigerweise die strichpunktierte Kurve keine Bedeutung mehr hat. Der Schätzung nach wird man daher am besten aus der stark ausgezogenen Mittelkurve Fig. 2 die Werte von ξ abgreifen können, die mit Rücksicht auf die Abhängigkeit der Temperaturzunahme bei veränderlicher Stabhöhe nicht überschritten werden sollten. Man kann daher sagen, kleine Überschreitungen des kritischen Wertes der Kupferhöhe (bei mäßigen Werten von m bis zu etwa 10%) lassen sich noch durch Erreichung niedriger Temperaturen begründen. Größere Überschreitungen dagegen sind zwecklos und schädlich.

4. **Schlußbemerkung.** Auf S. 82 habe ich gesagt, daß die Fieldsche und Emdesche Arbeit bedauerlicherweise nicht Gemeingut der Ingenieure geworden sind. Herr Richter glaubt durch seine Überlegungen vom 22. I. 1908 gezeigt zu haben, daß die theoretischen Untersuchungen von Field und Emde in der Praxis auch schon früher die richtige Würdigung und Bestätigung gefunden haben. Aber grade die Arbeit des Herrn Richter zeigt, daß richtige Würdigung und Bestätigung sich doch nur auf den Einzelfall beschränken. Wie soll man sich andernfalls erklären, daß die Arbeiten von Field und Emde in den Verbandsnormalien nicht erwähnt und überhaupt in der Literatur nur spärlich zitiert werden? Auf dem Elektrikerkongreß in New York¹⁾ hat eine Reihe von Ingenieuren Versuche über zusätzliche Verluste mitgeteilt. Nur ein einziger verrät eine Kenntnis des Titels, aber keiner eine Kenntnis des Inhalts der Fieldschen Arbeit. Von den Untersuchungen des Herrn Richter ist bisher nichts in die Öffentlichkeit gedrungen. Ich finde keinen Hinweis auf dieselben in der später veröffentlichten Arbeit des Herrn Emde und keinen Hinweis in der Zugschrift des Herrn Rüdenberg (S. 207), die ebenso wie Herr Richter aus ihrer Erfahrung bei den Siemens-Schuckert-Werken schreiben.

Hätte ich die wertvollen Überlegungen des Herrn Richter gekannt, so würde ich ihn in der Fußnote über die Geschichte des Widerstandsminimums S. 104 mit Herrn M. Wien und A. B. Field zusammen genannt haben, im übrigen aber bei meiner obigen Aussage geblieben sein.

Experimentelle Bestimmung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wanderwellen.

Fortpflanzungsgeschwindigkeit der „Elektrizität“ in Freileitungen und Kabeln.

Von

Heinrich Faßbender.

1. **Einleitung.** Der Vorgang, der sich auf einer Leitung abspielt, auf der Wanderwellen hin- und herlaufen, läßt sich als Schwingungsvorgang auffassen, dessen Frequenz durch die Konstanten der Leitung gegeben ist. Hält man an der Vorstellung der elektrischen Schwingung fest, so ergibt sich ohne weiteres, daß man sich zur experimentellen Untersuchung der Wanderwellen die Methoden der Hochfrequenztechnik zunutze machen kann.

¹⁾ Am Inst. of. El. Ing. 1913, S. 137 und flgde.

Die Frequenz hängt von der Länge der Leitung ab, und zwar ist sie um so größer, je kleiner die Länge der Leitung ist. Da die nachfolgende Methode nur zur experimentellen Untersuchung der Wanderwellen im Laboratorium angewandt werden wird, so ist hier der Charakter der Wanderwellen als hochfrequente Schwingung um so mehr gewahrt. Aber auch die Wanderwellen der Praxis gehören ihrer Schwingungszahl nach in das Gebiet der Hochfrequenz. Es ergibt die Theorie für die Einschaltwelle einer Freileitung von 10 km eine Wellen-Länge von $4 \cdot 10^6$ cm oder eine Frequenz von 7500 Perioden pro Sekunde.

2. Vorlesungsexperiment zum Nachweis des Hochfrequenzcharakters der Wanderwellen. Für ein größeres Auditorium kann man den Charakter einer Wanderwelle als hochfrequente Schwingung durch folgenden recht instruktiven Versuch veranschaulichen. Ein etwa 30—50 m langes Hochspannungskabel wird über eine Funkenstrecke an einen Hochspannungstransformator angeschlossen. Der Hochspannungstransformator muß gegen Wanderwellen geschützt sein, und durch eine parallel zur Einschaltfunkenstrecke gelegte Kondensatorenbatterie muß dafür gesorgt sein, daß die Spannung des Transformators durch den enormen Einschaltstrom nicht abfällt. Schaltet man zwischen Einschaltfunkenstrecke und Kabel eine Spule mit nur ganz wenigen, etwa 6 Windungen und hängt über diese eine Sekundärspule mit nur 1—3 Windungen, die durch eine Glühlampe kurz geschlossen sind, so leuchtet die Lampe jedesmal beim Einschalten des Kabels hell auf. Ein prinzipiell gleicher Versuch wird in der Physik mit Teslaströmen gezeigt.

3. Bestimmung der Frequenz und der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wanderwellen mit dem Wellenmesser. Ich will im folgenden zeigen, wie die Frequenz und die Fortpflanzungsgeschwindigkeit von Wanderwellen mit einem Wellenmesser bestimmt werden kann. Ich halte mich an ein spezielles Beispiel und wähle hierfür die Wanderwellen, die beim Einschalten eines am anderen Ende offenen Kabels an eine Maschine oder an einen Hochspannungstransformators entstehen. Die Theorie dieses Einschaltvorganges ist hinreichend bekannt. Es ergibt sich (vgl. Wagner, Elektromagnetische Ausgleichsvorgänge in Freileitungen und Kabeln) für den gekennzeichneten Schwingungsvorgang der Wanderwelle eine Schwingungsdauer.

$$T = \frac{1}{n} = \frac{4l}{v} = 4 \cdot l \cdot \sqrt{L \cdot C}.$$

Dabei ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der einzelnen Schwingungs-Komponenten einer Wanderwelle als von der Frequenz unabhängig angenommen, wozu man nach Wagner berechtigt ist. Die experimentelle Bestimmung von T bzw. von n erfolgt nun in der Weise, daß man am Ende des Kabels die Isolation genügend weit entfernt, um eine der Adern des Kabels zu einem Kreis von etwa 15 cm Durchmesser umbiegen zu können. Diese eine Windung genügt bei einem empfindlichen Wellenmesser zur Kopplung. Diese zur Kopplung verwandte Wicklung kann natürlich nicht mehr als Kabel angesehen werden, sondern sie ist eine Luftleitung. Das hat zur Folge, daß die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wanderwelle hier größer als im Kabel, näherungsweise gleich der Lichtgeschwindigkeit wird. Der Vorgang spielt sich so ab, daß die Wanderwelle am Ende der Kabelisolation mit der doppelten Betriebsspannung reflektiert wird, und daß andererseits eine Ladewelle mit der doppelten Betriebsspannung in das Stückchen Freileitung einzieht und am freien Ende mit der vierfachen Betriebsspannung zurückkehrt. Diese rückläufige Wanderwelle kann aber nach ihrem Rücktritt ins Kabel wegen des etwa zehnfach größeren Wellenwiderstands der Freileitung gegenüber dem des Kabels vernachlässigt werden. Das Stück Freileitung wird erst wieder von der zurückkommenden Wanderwelle des Kabels aufgeladen, und das Spiel beginnt von neuem.

Am Anfangspunkt der Kopplungswicklung ist der zeitliche Verlauf der Welle, abgesehen von der Amplitudenänderung infolge des veränderten Wellenwiderstands, genau

gleich dem im Kabel. Ein Punkt, der um dl von dem Anfangspunkt der Kopplungswicklung entfernt ist, hat gegenüber jenem Punkt eine Phasenverschiebung von $\frac{dl}{v'}$ sec,

während sie $\frac{dl}{v}$ wäre, wenn wir im Kopplungsring genau die Verhältnisse des Kabels hätten.

Hierin bedeutet v die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Welle im Kabel, v' in dem Kopplungsring. Drückt man diese Phasenverschiebung, wie üblich, in Graden aus und wählt hierfür den 360. Teil der Kabelschwingung, so erhält man für die Phasenverschiebung, die man im Idealfall, d. h. in dem Fall, daß man im Kopplungsring die Verhältnisse des Kabels haben würde,

$$\frac{dl}{v} \cdot \frac{v \cdot 360}{4 \cdot 1}$$

Grad, während man in Wirklichkeit

$$\frac{dl}{v'} \cdot \frac{v \cdot 360}{4 \cdot 1}$$

Grad hat.

Nehmen wir nun an, daß die Luftleitung gleich dem $\frac{1}{200}$ Teil der Gesamtlänge des Kabels, und die Fortpflanzungsgeschwindigkeit im Kabel nur halb so groß wie in der Luftleitung wäre, also

$$\begin{aligned} dl &= \frac{1}{200} \cdot l \\ v' &= 2 \cdot v \end{aligned}$$

so beträgt die ideelle Phasenverschiebung

$$\frac{1 \cdot v \cdot 360}{200 \cdot v \cdot 4 \cdot 1}$$

Grade der Kabelschwingung, während die reelle Phasenverschiebung

$$\frac{1 \cdot v \cdot 360}{200 \cdot 2 \cdot v \cdot 4 \cdot 1}$$

Grade der Kabelschwingung ausmacht. Die Differenz beträgt 0,225 Grad der Kabelschwingung oder rund $\frac{1}{4}$ Grad. Dies ist der Phasenverschiebungsfehler am Endpunkt der Kopplungswindung. Er verdoppelt sich beim Zurückwandern der Welle bis zum Wiedereintritt in das Kabel, kann aber stets wegen der geringen Größe im Vergleich zu den übrigen Fehlerquellen vernachlässigt werden.

Diese Differenz in der Phasenverschiebung ist aber der einzige Punkt, in dem sich der Schwingungszustand in der Kopplungswindung von dem in dem Kabel unterscheidet, natürlich abgesehen von der oben erwähnten Amplitudenänderung infolge des veränderten Wellenwiderstands.

Man kann das Resultat auch so aussprechen: Der zeitliche Verlauf der reellen Schwingung ist für jeden Punkt des Kopplungsringes gleich dem der ideellen Schwingung, es besteht nur zwischen beiden eine Phasenverschiebung, die am Anfangspunkt Null ist und proportional mit dem Weg in der Luftwindung in unserm Fall bis zum Betrag $\frac{1}{2}$ Grad der ideellen Schwingung wächst. Sie ist um so kleiner, je kleiner die Luftwindung im Vergleich zum Kabel ist.

Jeder Punkt der Luftwindung hat also genau die gleiche Frequenz wie ein Punkt auf dem Kabel. Nur die Phasenverschiebung zwischen den einzelnen Punkten ist um ein geringes anders. Wenn es selbst praktisch möglich wäre, den Wellenmesser mit dem Kabel direkt hinreichend zu koppeln, so könnte man den hier eingeschlagenen Weg als den korrekteren halten, da wir in der kurzen Luftleitung genau die gleiche Frequenz haben und die einzelnen Punkte derselben in der Phase so auseinander sind wie die einzelnen Punkte des Eichkreises bei der Eichung und beim normalen Gebrauch des Wellenmessers.

Wegen des etwa zehnfach höheren Wellenwiderstands der Freileitung ist, wie erwähnt, die Stromstärke in der Endwicklung sehr viel kleiner als im Kabel. Absolut genommen, hat allerdings die Stromstärke auch in der Freileitung noch enorme Werte, aber man muß bedenken, daß die Dauer der großen Stromstärke nur sehr gering ist. Das Anzeiginstrument am Wellenmesser, sei es ein Hitzdrahtinstrument oder ein Thermolement oder ein anderes Instrument, wird gewissermaßen ballistisch verwandt. In der Tat zeigte sich bei dem von mir angestellten Versuch, daß der Wellenmesser nicht ansprach. Außer dem höheren Wellenwiderstand des Kopplungskreises liegt der Hauptgrund hierfür darin, daß je weiter man vom Anfang des Kabels nach dem Ende fortschreitet, das Kabel einen stets abnehmenden Bruchteil einer Periode überhaupt nur Strom führt. Man vergleiche hierzu die von Wagner in der ETZ. 1911, S. 902 veröffentlichten theoretisch und experimentell ermittelten Stromkurven. Für die Mitte des Kabels ist jener Bruchteil $\frac{1}{2}$. In der Tat zeigte sich ein guter Ausschlag am Wellenmesser, als ich die Kopplungsspule in die Mitte des Kabels oder vielmehr zwischen zwei in Reihe geschaltete Enden des gleichen Kabels einschaltete. Offenbar hätte man einen noch größeren Ausschlag bekommen, wenn man die Kopplungswindung am Anfang des Kabels eingeschaltet hätte, da dort die Leitung während der vollen Periode Strom führt.

4. Versuchsdaten und Resultat. Bei dem von mir angestellten Versuch waren die Versuchsdaten und die Resultate folgende:

Betriebsspannung etwa 15000 Volt Einphasenstrom, Gesamtlänge des Kabels etwa 86 m; es wurde ein Drehstromkabel von 50 qmm Kupferquerschnitt pro Leiter verwandt, von dem 2 Phasen miteinander verbunden waren.

Frequenz der Wanderwelle, gemessen mit dem Wellenmesser, $4,96 \cdot 10^5$ pro sec.
Hieraus ergibt sich eine Schwingungszeit

$$T = 2,02 \cdot 10^{-4} \text{ sec.}$$

Nach der obigen Formel läßt sich aus dem experimentell gefundenen Wert für die Frequenz bzw. für die Schwingungsdauer die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Welle im Kabel bestimmen. Es ergibt sich

$$v = 4 \cdot 1 \cdot n = 1,7 \cdot 10^{10}.$$

Diese für die Wanderwelle gemessene Fortpflanzungsgeschwindigkeit gilt ganz allgemein für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Störungen in dem betreffenden Kabel, also auch für die Enden der elektrischen Kraftlinien, die elektrischen Ladungen. Dies ist die präzise Fassung des in der Überschrift gewählten kurzen Ausdrucks: Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Elektrizität.

Ich werde gelegentlich solche Versuche an verschiedenartigen Kabeln und Freileitungen wiederholen.

K. W. Wagner hat die Fortpflanzungsgeschwindigkeit (vgl. Handwörterbuch der Naturwissenschaften, Band V, Kabelerscheinungen) für ein Starkstromkabel mit Kupferleitern von 50 qmm Querschnitt mit $1,12 \cdot 10^{10}$ angegeben. Der Wert ist berechnet aus von Wagner experimentell bestimmten Werten von Selbstinduktion und Kapazität des betreffenden Kabels. Wenn man bedenkt, daß die Dielektrizitätskonstante der Kabelisolation stark schwankt, dürfte die Übereinstimmung befriedigend sein. Herr Wagner hat mich auf eine Fehlerquelle aufmerksam gemacht, die darin beruht, daß die Kapazität der Kabelenden das Resultat fälschen kann. Dieser Fehler wird sich natürlich um so mehr bemerkbar machen, je kürzer das Kabel ist. Bei genauen Messungen dürfte es sich also empfehlen, den Versuch mit einem längeren Kabel auszuführen.

5. Oberschwingungen der Wanderwellen. Ebenso einfach wie die Frequenz der Wanderwelle, d. h. wie die Frequenz ihrer Grundschwingung, kann man auch die Ober-

schwingungen bestimmen. Kennt man aber die relative Größe der Amplitude von Grund- und Oberschwingungen, so kann man die Kurvenform der Wanderwelle konstruieren. Die relative Größe der Amplituden der Oberschwingungen zur Grundschiwingung läßt sich aus den Aufnahmen mit dem Wellenmesser ermitteln; dies Verfahren ist aber sehr umständlich und scheint mir wenig praktischen Wert zu haben. Andererseits ist es von großem wissenschaftlichen und praktischen Interesse, die Kurvenform der Wanderwelle experimentell zu bestimmen.

Hierzu eignet sich die Braunsche Röhre. Ich hoffe demnächst mit dieser aufgenommene Kurven von Wanderwellen veröffentlichen zu können.

6. Zusammenfassung. Es wird gezeigt, daß man mit dem Wellenmesser die Frequenz von Wanderwellen experimentell bestimmen kann. Aus der experimentell bestimmten Frequenz und der Länge der Leitung ergibt sich die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Welle in der Leitung. Dieser so gefundene Wert für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wanderwellen gilt ganz allgemein für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Störungen in dem betreffenden Kabel.

Elektrotechnisches Institut der Technischen Hochschule zu Berlin, im März 1914.

Energieschwingungen in Elektromaschinen.

Von

Hans Grünholz, Berlin.

1. Einleitung. Im folgenden sollen die Erscheinungen der Phasenverschiebung und -kompensation bei Elektromaschinen im Sinne des Energieprinzips beschrieben werden. Eine solche physikalische Betrachtungsweise kann als Ergänzung der üblichen Methode, die Wechselstromerscheinungen durch Vektordiagramme zu erläutern, mit Vorteil durchgeführt werden. Wohl gehen auch die Vektordiagramme auf physikalische Überlegungen, nämlich auf die Grundbeziehungen der Elektrodynamik zurück, in welchen ebenfalls das Energieprinzip enthalten ist. Die Ausdrucksmittel des Diagrammes sind jedoch durchaus geometrischer Natur. Durch ihre beständige Anwendung kann es leicht dahin kommen, daß die Überlegungen aus dem Gebiete der Physik in das der Geometrie verschoben werden. Die Vorstellungsweise wird dadurch schließlich so beeinflusst, daß man mit der Analyse der Wechselstromerscheinungen oft nicht weiter geht, als bis ihre geometrischen Symbole erkannt sind. Daher sind vielfach die Erklärungen derartiger Probleme nichts anderes als in Worte übersetzte Diagramme.

Die Diagramm-Methode hat wohl den großen Vorteil, daß sie gewissermaßen zwangsläufig, mit der Folgerichtigkeit der Mathematik zu richtigen Ergebnissen führen muß, wenn nur die Voraussetzungen stimmen. In dieser Zwangsläufigkeit ist jedoch auch der Nachteil der Methode begründet: Es ist keine allgemeine Beurteilung der Probleme möglich, da alle Ergebnisse wesentlich von dem Größenverhältnis der Vektoren beeinflusst werden, so daß das ganze Diagramm erst durchkonstruiert werden muß, ehe man bestimmte Folgerungen ziehen kann. In allen jenen Fällen, die sich ihrem Wesen nach als Energieübergänge darstellen, führt die unmittelbare Anwendung des Energieprinzips rascher zum Ziel, die Resultate werden anschaulicher und im gewissen Sinn unabhängig vom numerischen Verhältnis der dabei auftretenden Größen, wodurch von vornherein eine qualitativ richtige Beurteilung des Problems ermöglicht wird. Wie in vorliegender Arbeit gezeigt werden soll, läßt sich die Frage, ob und in welcher Art eine Beeinflussung des Leistungsfaktors durch eine gegebene Schaltung möglich ist, lediglich auf Grund gewisser physikalischer Kriterien und ohne Entwicklung des Diagramms beantworten. Die größere Allgemeinheit einer direkt auf das Energieprinzip zurückgreifenden Methode