Über einige Anwendungen des magnetischen Spannungsmessers.

Von

W. Rogowski.

(Mitteilung aus der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt).

1. Ziel der Arbeit. Der magnetischen Spannung kommt auf magnetischem Gebiete dieselbe Bedeutung zu, wie der elektrischen Spannung auf elektrischem Gebiete. Die Theorie hat dies bereits längst zum Ausdruck gebracht. Sie hat beide Größen mit gleich starker Betonung in den Vordergrund ihrer Betrachtungen gerückt. Dagegen hat die elektrische Spannung bisher in der Meßtechnik eine bevorzugte Stellung eingenommen. Der Grund liegt darin, daß reichlich Mittel und Wege zu ihrer Messung zur Verfügung stehen. Die Messung der magnetischen Spannung dagegen ist erst in jüngster Zeit durch den magnetischen Spannungsmesser geglückt.

Der magnetische Spannungsmesser besteht aus einer Spule von überall gleichem Querschnitt und überall gleichmäßig dichter Bewicklung (siehe Fig. 1.) Er kann eine feste Form und beliebigen Querschnitt haben. Für viele Zwecke empfiehlt es sich jedoch, ihn als biegsames Band oder als biegsame Röhre auszuführen, damit er sich dem Wege, auf dem man die magnetische Spannung messen will, anschmiegen kann. Bringt man den magnetischen Spannungsmesser in ein magnetisches Feld, so betragen, wie man leicht erkennt, seine Flußwindungen $d\Phi$ pro Längenelement ds :

Fig. 1.

$$d\Phi = N F \mathfrak{B}_s ds$$

(N = Windungszahl pro Längeneinheit, F = Querschnitt, $\mathfrak{B}_s$ = Komponente der Induktion in Richtung des Weges der Spulenachse s).

Hieraus folgt:

$$\Phi = N F \int_1^2 \mathfrak{B}_s ds = \text{konst.} \int_1^2 \mathfrak{H}_s ds$$

($\mathfrak{H}$ = magnetischer Feldstärke, 1 Anfang, 2 Ende des magnetischen Spannungsmessers).

Die Flußwindungen Φ sind somit proportional der magnetischen Spannung $\int_1^2 \mathfrak{H}_s ds$.

Die Theorie und Handhabung des Instrumentes findet der Leser ausführlich in einer früheren Arbeit auseinandergesetzt¹⁾. Bereits die ersten Versuche haben gezeigt, daß man ohne besondere Schwierigkeiten magnetische Spannungen bis auf etwa 2 % messen kann.

Die Vorschläge zur Benutzung des Instrumentes beschränkten sich bisher im wesentlichen auf das engere Gebiet der magnetischen Materialuntersuchung. Im folgenden soll auf weitere Anwendungsgebiete hingewiesen werden. Die zu dem Zwecke (s. unten) beschriebenen Versuche sollen lediglich einer ersten Orientierung dienen und machen auf große Genauigkeit keinen Anspruch²⁾.

¹⁾ Rogowski und Steinhaus, Archiv für Elektrotechnik, Band I, Seite 141.

²⁾ Die Firma Siemens und Halske, Wernerwerk Nonnendamm, hat die Herstellung von magnetischen Spannungsmessern übernommen.

2. Untersuchung von elektromagnetischen Apparaten und Maschinen mit dem magnetischen Spannungsmesser. Die Wirkungsweise sämtlicher elektromagnetischen Apparate verlangt an gewissen Stellen ein magnetisches Feld. Die Induktionslinien desselben durchsetzen dann nicht nur diese Stellen, sondern verlaufen im Apparat wegen der Quellenfreiheit der Induktion $\mathfrak{B}$ in geschlossenen Bahnen. Genau so wie man beim elektrischen Strome, wenn er Metallstücke durchströmt, zu jedem Wegabschnitt eine elektrische Spannung nachweisen kann, so gehört zu jedem vom Induktionsflusse durchsetzten Wege eine gewisse magnetische Spannung. Die Summe sämtlicher Teilspannungen für den geschlossenen Umlauf entscheidet über die Größe der elektrischen Durchflutung der Magnetisierungsspule, durch die wir das magnetische Feld erzeugen. Dem Konstrukteur fällt die Aufgabe zu, dem Flusse der Induktion ein zweckmäßiges Bett zu verschaffen. Im allgemeinen soll er dafür sorgen, daß die Durchflutung des Apparates möglichst klein ausfällt, ohne daß die Leistungsfähigkeit desselben nachläßt und die Kosten steigen. Ob er diese Forderung bei der getroffenen Wahl von Material und Querschnitten zufriedenstellend erfüllt hat, davon kann er sich durch Messung der magnetischen Spannung der einzelnen Konstruktionsteile seiner Ausführungsform überzeugen. Die Art und Weise der Untersuchung möge an einer elektromagnetischen Schienenbremse gezeigt werden.

Fig. 2. Elektromagnetische Schienenbremse.

Die elektromagnetische Schienenbremse besteht aus einem starken Elektromagnet, dessen Anker die Schiene bildet. Sie wird so in den Wagen eingebaut, daß sie im allgemeinen durch Federkraft gehalten, ein klein wenig über der Schiene schwebt. Bei Erregung wird der Elektromagnet auf die Schiene gezogen und bremst.

Das Untersuchungsobjekt war eine ältere Ausführungsform der Firma Westinghouse¹⁾ (s. Fig. 2). Es besteht aus den Kernen I, II, III, die gleichzeitig die Magnetisierungswicklung von je 825 Windungen tragen, den Seitenplatten A B, C D und den Schuhen E F, G H. Der magnetische Fluß muß die Stoßfugen zwischen Kern und Seitenplatte, zwischen Seitenplatte und Schuh, zwischen Schuh und Schiene überqueren. Kerne und Seitenplatten bestehen aus hartem, die Schuhe aus weichem Stahl.

Welche magnetische Spannung kommt den einzelnen Konstruktionsteilen und Stoßfugen zu?

Es wurde die Schienenbremse mit einem Strome von 1 Ampere beschickt und der an ein ballistisches Galvanometer angeschlossene magnetische Spannungsmesser nach Fig. 3 an die Kernenden gedrückt und der Ausschlag beim Kommutieren des Magnetisierungsstromes beobachtet. Dasselbe geschah bei den anderen Kernen und bei den durch die Fig. 4 und 5 dargestellten Lagen des magnetischen Spannungsmessers.

¹⁾ Außer der gezeichneten Nebenschlußwicklung für normal 5 Ampere besitzt die Bremse noch eine nicht gezeichnete Hauptstromwicklung für 100 Ampere. Die Bremse hat ein Gewicht von rund 180 kg und entwickelt bei normaler Erregung eine Zugkraft von rund 4300 kg. Die Firma Westinghouse stellt jetzt eine neue Type her, die bei 120 kg Eigengewicht dieselbe Zugkraft ergeben soll.

Man hat zu beachten, daß man nach Fig. 3 die magnetische Spannung zwischen den Kernenden auf dem durch den magnetischen Spannungsmesser angezeigten Wege, also in Luft, erhält (Weg 1, Fig. 2). Von Wert ist aber die magnetische Spannung zwischen denselben Punkten auf dem Eisenwege (Weg 1'). Wir erhalten letztere aus der Überlegung, daß beide eben erwähnten Spannungen zusammen eine Zahl ergeben, die gleich der Größe der Durchflutung (gleich der Zahl der Amperedrähte) der Magnetisierungswicklung, also gleich $825 \times 1 = 825$ ist. Die „Eisenspannung“ ergibt sich somit gleich der Differenz zwischen 825 und der nach Fig. 3 gemessenen „Luftspannung“.

Fig. 3. Messung der magnetischen Spannung des Kernes der Bremse.

Fig. 4. Messung der magnetischen Spannung zwischen Kern und Schiene.

Fig. 5. Messung der Stoßfugenspannung.

Der magnetische Spannungsmesser war mit seinem ballistischen Galvanometer dadurch geeicht worden, daß man ihn zu einem geschlossenen Wege um eine bekannte Durchflutung herumlegte und den Ausschlag beim Kommutieren beobachtete (s. Archiv für Elektrotechnik I, Seite 147). Auf diese Weise war gefunden worden, daß zu einem Skalenteile Ausschlag ein Wert der magnetischen Spannung von 8,5 AW gehört. Die Untersuchung führte auf folgende Werte (Tabelle 1), die über die Verteilung der magnetischen Spannung der einzelnen Konstruktionsteile genügende Auskunft geben.

Die Wege 1, 2 und 3 (Fig. 2) ergeben, aneinandergesetzt, einen vollen Umlauf, der die Durchflutung Null umrandet. Infolgedessen muß die Summe der magnetischen Spannungen auf dem Wege 2 und 3 (gleich 493 AW, nach der obigen Tabelle) übereinstimmen mit der magnetischen Spannung auf dem Weg 1 (gleich 495 AW, s. oben). Diese Forderung ist bei der Messung gut erfüllt.

Tabelle.

Größe der Gesamtdurchflutung pro Kern: 825 AW.

Induktion an der Schienenstoßstelle: rund 12 500 CGS.

Weg Figur 2	Ausschlag am ballistischen Galvanometer	Magnetische Spannung in AW	Magnetische Spannung in Prozenten der Umlauf- spannung (825 AW)
I (Fig. 3) Kern I	58,5	495	60
I' Kern I		330	40
I Kern II	57,5	487	59
I' Kern II		338	41
I Kern III	60,5	512	62
I' Kern III		313	38
2 (Fig. 4)	30,5	259	31,5
3 (Fig. 4)	27,8	234	28,5
4 (Fig. 5)	11,1	94	11,5
5 (Fig. 2)	2,6	22	2,5

Ein Hauptgebiet für die Anwendung des magnetischen Spannungsmessers dürfte in der Prüfung von Stoßfugen liegen. Im vorliegenden Falle absorbieren beide Stoßfugen an der Schienenstoßstelle insgesamt rund 23 % der ganzen Durchflutung der Magnetisierungsspule. Da die Induktion daselbst zu 12 500 CGS. gemessen war, so folgt für die Größe des zugehörigen Luftschlitzes der Wert von $\frac{0,4 \cdot \pi \cdot 94}{12500} \sim 0,1$ mm. Dieser niedrige Wert er-

klärt sich dadurch, daß Schuh und Schiene (zum Zwecke einer anderen Untersuchung; Zugkraftmessung) sauber abgehobelt waren. Außerdem wurde der Schuh durch die mechanische Kraft magnetischen Ursprungs mit einer Kraft von rund 2,5 Tonnen auf die Schiene gepreßt.

Bei der Stoßstelle zwischen Schuh und Seitenplatten (Weg 5 Fig. 2) stand dem Induktionsfluß der doppelte Querschnitt wie an der Schiene zur Verfügung. Die Stoßflächen waren auch hier sauber abgehobelt und überdies durch kräftige Schraubenbolzen fest aneinandergepreßt. Wir erwarten daher hier eine magnetische Spannung, die kleiner als die Hälfte der an der Schienenstoßstelle gemessenen ist. Der Versuch ergab rund den 4. Teil (s. Tabelle).

Die Oberfläche der Schiene verhält sich praktisch wie eine Niveaufläche. Es mußte sich bei der Messung nach Fig. 4 der Ausschlag unabhängig von der Lage des magnetischen Spannungsmessers auf der Schienenoberfläche erweisen. Besondere Versuche zeigten, daß dies wirklich zutraf.

Ich will hier noch mit einigen Worten auf die Untersuchung einer elektrischen Maschine mit dem magnetischen Spannungsmesser hinweisen. Sehr einfach gestaltet sich die Messung der magnetischen Spannung beim Joche. Hierfür dürfte ein gewisses Interesse vorliegen, da bei Jochen nicht immer magnetisch hochwertiges Material (bei kleineren Maschinen Grauguß, bei größeren Stahlguß) Verwendung findet und beträchtliche Längen vorkommen. Der an ein ballistisches Galvanometer angeschlossene magnetische Spannungsmesser wird auf zwei benachbarten Polmitten aufgelegt (Fig. 6)¹⁾. Man kann auch hier die Ausschläge bei Kommutierung des Erregerstromes beobachten. Indessen empfiehlt es sich namentlich bei größeren Maschinen, den Erregerstrom nicht zu kommutieren, sondern den magnetischen Spannungsmesser aus seiner Anfangslage (Fig. 6) in eine Endlage (Fig. 7) zu bringen. In letzterer Lage hat der magnetische Spannungsmesser den Fluß Null, da er zu einem geschlossenen Umlauf gebogen ist und keine Durchflutung umrandet. Man mißt somit nach letzterem Verfahren genau die Hälfte des Ausschlages wie beim Kommutieren. Bei den weiter unten beschriebenen Versuchen ist immer nach dieser Methode verfahren worden. Natürlich kann man auch den

¹⁾ Die ursprünglich als Gleichstromgenerator gebaute Maschine wird jetzt als Wechselstrom-generator benutzt.

magnetischen Spannungsmesser aus dem Felde herausschleudern. Im allgemeinen wird man aber diese rohe Behandlung des Instrumentes durch obigen Kunstgriff zu vermeiden suchen

Ein zweites Mittel, ohne Kommutieren des Erregerstromes auszukommen, besteht in folgendem: Es befinde sich in Fig. 6 das Ende 1 des magnetischen Spannungsmessers an

Fig. 6. Messung der Jochspannung.

Fig. 7.

der Stelle a der Eisenoberfläche, das Ende 2 an der Stelle b. Man bringt nun rasch das Ende 1 an die Stelle b, das Ende 2 an die Stelle a. Hierbei wechselt der Fluß im magnetischen Spannungsmesser sein Vorzeichen. Jetzt mißt man denselben Ausschlag wie beim Kommutieren des Erregerstromes.

Die Breite der Maschinenjoch gestattet mit breiten bandförmigen magnetischen Spannungsmessern zu arbeiten. Es besteht kein Zweifel, daß man eine genügend empfindliche Apparatur schaffen kann, bei der statt des ballistischen Galvanometers weniger empfindliche ballistische Zeigerinstrumente Verwendung finden. Im vorliegenden Falle

Fig. 8.

wurde für das Joch bei der Erregerstromstärke von 4,0 Ampere ein Wert der magnetischen Spannung von 470 AW gefunden. Bei der benachbarten Pollänge betrug bei derselben Erregung die magnetische Spannung 650 AW¹⁾.

Ich habe noch die magnetische Spannung an kleineren Strecken als eine Polteilung gemessen (Fig. 8). Dabei umfaßte der magnetische Spannungsmesser symmetrisch zur Polückenmitte gelegene Längen. Die Hälfte der gemessenen Beträge ist in ihrer Abhängigkeit von der Hälfte der umfaßten Strecken (gemessen auf dem Joch) aufgetragen worden.

Fig. 9.

Fig. 10.

Man erhält so die magnetische Spannung zwischen der Polückenmitte und irgend einem Punkt des Joches. Entsprechend dem Verlaufe der Induktionslinien (Fig. 9) erwartet man

¹⁾ Pro Schenkel waren 1050 Windungen vorhanden.

zuerst ein proportionales Ansteigen der magnetischen Spannung, das für Punkte nahe der Polmitte nachläßt. Für die Polmitte selbst muß die Kurve ein Maximum haben. Fig. 10 zeigt den durch den Versuch erhaltenen Verlauf, der die oben hervorgehobenen Eigenschaften in der Tat aufweist.

Umwickelt man das Joch mit einigen Sekundärwindungen, so kann man jetzt auch noch die Induktion im Joch messen. Man erkennt, daß auch die Aufnahme der Magnetisierungskurven (der magnetischen Eigenschaften) des für das Joch verwendeten Materials nach Erfindung des magnetischen Spannungsmessers keine prinzipiellen Schwierigkeiten mehr bietet.

Die Messung der magnetischen Spannung der Polschenkel wird bei einer zusammengebauten modernen Maschine im allgemeinen auf Schwierigkeiten stoßen, die sich nicht aus dem Prinzip der Messung, sondern der gedrängten Bauart ergeben, bei welcher sehr schwer geeignete Anlegestellen für den magnetischen Spannungsmesser zu finden sind. Bei der vorhin untersuchten Maschine konnte man zwar von der Kollektor- und Riemenscheibenseite her an den Polschenkel heran (Fig. 11). Aber gerade nach dieser Richtung hin war das Blechpaket des Polschenkels durch stärkere Endplatten von fremdem Material abgedeckt. Man hätte hier somit nicht die magnetische Eigenschaft des Blechpaketes, sondern nur der Deckplatten bestimmen können.

Fig. 11.

Natürlich kann man im besonderen Falle diese Schwierigkeit umgehen, wenn man für die magnetische Untersuchung Feldspulen aufbringt, die für den magnetischen Spannungsmesser den nötigen Platz lassen, oder indem man den Polschenkel ohne Wicklung in einer besonderen Magnetisierungsvorrichtung auf die gewünschte Induktion bringt und nun seine magnetische Spannung mißt.

Die Messung der magnetischen Spannung des Luftspaltes und der Zähne erfordert besonders gewinkelte magnetische Spannungsmesser. Sie wird sich auch hier weit schwieriger gestalten wie beim Joche wegen der geringen Ausdehnung der Meßobjekte. Hier dürfte der wesentliche Nutzen des magnetischen Spannungsmessers in der experimentellen Kontrolle der üblichen Methoden bestehen, nach denen man die für Luftspalt und Zähne aufzubringenden Amperewindungen berechnet¹⁾.

Ich habe noch die magnetische Spannung auf den Wegen (s. Fig. 9) 1, 2, 3, 4 gemessen. Sie geben aneinandergesetzt einen vollen Umlauf mit der Durchflutung Null. Die Summen der gemessenen Beträge auf dem Wege (2—3) (s. Fig. 11) und (1, 4) müssen einander gleich sein. Diese Forderung der Theorie bietet eine gute Kontrolle für die Einzelmessungen. Ich erhielt folgende Werte:

Weg	1		magnetische Spannung	470 AW
„	4		„	5730 „
„	2		„	3190 „
„	3		„	3110 „

¹⁾ Vgl. Arnold, Die Gleichstrommaschine. 2. Aufl., I. Band, S. 267—281. — F. Blanc, ETZ. 1909, S. 5.

Weg 1, 4	magnetische Spannung 6200 AW
„ 2—3	„ „ 6300 „

Wie aus den beiden letzten Zeilen der Tabelle hervorgeht, ist die Forderung der Theorie befriedigend erfüllt¹⁾.

3. Der magnetische Spannungsmesser in Verbindung mit dem Oszillographen. Der an einen Oszillographen angeschlossene magnetische Spannungsmesser werde in ein magnetisches Wechselfeld gebracht. Welche Beziehung besteht zwischen der beobachteten Kurvenform und der Kurvenform der magnetischen Spannung?

Der mathematische Ausdruck der magnetischen Spannung laute:

$$M = a_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + a_2 \sin(2\omega t + \varphi_2) + \dots a_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \dots 1)$$

Übertrifft nun der Ohmsche Widerstand weit den Induktionswiderstand, so hat man für den induzierten Strom zu schreiben:

$$i = c \omega \{ a_1 \cos(\omega t + \varphi_1) + 2 a_2 \cos(2\omega t + \varphi_2) + \dots n a_n \cos(n\omega t + \varphi_n) \} \dots 2)$$

Diese Reihe hat bei den einzelnen Gliedern andere Koeffizienten als die vorige. Der magnetische Spannungsmesser gibt somit bei überwiegendem Ohmschen Widerstand die Kurvenform der magnetischen Spannung verzerrt wieder und hebt, wie der Vergleich der Ausdrücke 1) und 2) lehrt, wie eine Kapazität, die n-te Oberwelle mit einem n mal so großen Gewichte heraus wie die Grundwelle. Die Phasenverschiebung zwischen Strom i und magnetischer Spannung M beträgt 90°.

Übertrifft umgekehrt der Induktionswiderstand $L\omega$ den Ohmschen Widerstand, so erhält man für i den Ausdruck:

$$i = d \cdot \{ a_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + a_2 \sin(2\omega t + \varphi_2) + \dots a_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \}$$

Es folgt jetzt: Bei sehr großem Induktionswiderstande gibt der Strom im magnetischen Spannungsmesser ein getreues Abbild der magnetischen Spannung. Beide Größen haben (ungefähr) Phasengleichheit.

4. Messung der Stromstärke und der elektrischen Durchflutung mit dem magnetischen Spannungsmesser. Im allgemeinen macht die Messung von Wechselströmen keine Schwierigkeiten. Nur in gewissen Ausnahmefällen können die üblichen Methoden versagen oder sich doch als unbequem erweisen. Dies trifft zu bei Strömen in Kurzschlußstäben und bei außerordentlich hohen Stromstärken. Es kann auch vorkommen, daß der Einbau von

Strommessern wegen des notwendigen Ausschaltens des Betriebsstromes lästig empfunden wird oder eine wesentliche Änderung der Konstanten des elektrischen Stromkreises hervorruft, so daß die zu messende Größe und die am Instrument gemessene Größe nicht mit der gewünschten Zuverlässigkeit miteinander übereinstimmen. In diesen Fällen kann der magnetische Spannungsmesser zur Anwendung gelangen.

Man legt ihn auf einem irgendwie geschlossenen Wege um den stromführenden Leiter herum (Fig. 12). Seine Klemmen verbindet man mit einem Hilfsinstrument, das ein

Fig. 12. Messung des elektrischen Stromes mit dem magnetischen Spannungsmesser.

Wechselstromamperemeter für kleine Ströme, ein Thermoelement, ein Quadranten-elektrometer, ein Vibrationsgalvanometer oder ein Oszillograph sein kann.

Zwischen der magnetischen Spannung $M_{1,2}$ auf dem Wege 1—2 und den Flußwindungen Φ des magnetischen Spannungsmessers besteht allgemein die Beziehung:

¹⁾ Gesamtzahl der AW pro Schenkel 4200.

$$\Phi = k M_{12}$$

$$k = \text{const.}$$

(s. Archiv für Elektrotechnik I, Seite 142).

Die im magnetischen Spannungsmesser induzierte EMK hat daher die Größe:

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} = - k \frac{dM_{12}}{dt}.$$

Setzen wir nun bei allen Größen rein sinusförmige Veränderlichkeit voraus, so erhalten wir bei der eben vorgeschlagenen Meßmethode:

$$e = - k \omega M_{\circ}$$

(ω = Kreisfrequenz).

Das Zeichen $\circ$ soll anzeigen, daß die magnetische Spannung über einen geschlossenen Umlauf zu nehmen ist. Diese Umlaufspannung (in AW gemessen) stimmt nun nach der ersten Maxwellschen Hauptgleichung zahlenmäßig überein mit der Stromstärke J. Besitzt weiter der Stromkreis des magnetischen Spannungsmessers den Widerstand W und die Eigeninduktivität L, so erhalten wir für den Strom im Hilfsinstrument den Wert:

$$i = \frac{k \omega}{\sqrt{W^2 + L^2 \omega^2}} \cdot J.$$

Solange der Widerstand W im Stromkreise des magnetischen Spannungsmessers den Induktionswiderstand $L \omega$ weit übertrifft, kann man angenähert schreiben:

$$i = C \cdot \omega J$$

$$C = \frac{k}{\omega} = \text{const.}$$

Der magnetische Spannungsmesser eignet sich somit zur Messung des Stromes J. Die Auswertung des Meßergebnisses verlangt aber noch die Kenntnis der Frequenz. Hierin liegt ein Nachteil. In gewissen Fällen kann er dadurch umgangen werden, daß man umgekehrt den Induktionswiderstand groß gegen den Ohmschen Widerstand macht. Dies wird im allgemeinen allerdings nur auf Kosten der ohnehin nicht großen Empfindlichkeit geschehen können. Alsdann kann man angenähert setzen:

$$i = c \cdot J$$

$$c = \frac{k}{L} = \text{const.}$$

Jetzt erhält man durch die vorgeschlagene Methode Werte, die (innerhalb eines gewissen Frequenzintervalles) praktisch nur noch vom Strome J und nicht mehr von der Frequenz abhängen.

In der Figur 12 ist der magnetische Spannungsmesser als Kreis um den Stromleiter herumgelegt. Es sei hervorgehoben, daß bei Ausführung der Messung — einen gut hergestellten magnetischen Spannungsmesser vorausgesetzt — diese Form durchaus nicht erreicht zu werden braucht. Es führt jede irgendwie geschlossene Form zu demselben Ergebnis, wenn sie nur den stromführenden Leiter einschließt. Es scheint allerdings auf den ersten Blick, als könnten in der Nähe des magnetischen Spannungsmessers befindliche aber von ihm nicht umrandete Ströme das Meßergebnis beeinflussen. Bei einem idealen magnetischen Spannungsmesser ist jedoch jede solche Nebenwirkung ausgeschlossen, weil nach der ersten (durch Erfahrung gewonnenen) Maxwellschen Hauptgleichung die magnetische Umlaufspannung sich ganz unabhängig von den durch die Randkurve ausgeschlossenen Strömen erweist.

Die Messung von Gleichstrom hat ganz ähnlich zu erfolgen. Man muß hier aber ballistische Hilfsinstrumente wählen. Der Hauptstrom wird entweder kommutiert oder

ausgeschaltet oder es wird, wie im Abschnitt 2 beschrieben, der magnetische Spannungsmesser aus der Meßlage Figur 12 in die Endlage Figur 13 gebracht.

Man eicht den magnetischen Spannungsmesser am besten zusammen mit seinem Hilfsinstrument empirisch, indem man einmal den Ausschlag bei bekannten Werten des Stromes abliest.

Die Messung des Stromes ist ein spezieller Fall der Messung der Durchflutung. Unter der Durchflutung D versteht man den Gesamtstrom durch eine vorgegebene Fläche F . In Zeichen:

$$D = \int i_n \, df$$

(df = Flächenelement; i_n = normaler Komponente der Strömung i). Man mißt die Durchflutung ebenso wie den elektrischen Strom in Ampere¹⁾.

Fig. 13.

Eine gewöhnliche Magnetisierungsspule n werde von einer Fläche F mit dem stark gezeichneten Rande (Fig. 14) geschnitten. Man hat dann wohl zu unterscheiden zwischen dem Strome J im Drahte und der Durchflutung $D = nJ$ (n = Windungszahl), die den Gesamtstrom durch die Fläche F angibt.

Würden wir die Fläche F so weit vergrößern, daß sie die Wicklung der Spule ein zweites Mal schneidet (gestrichelter Rand, Fig. 14), so ergibt sich jetzt für die Gesamtdurchflutung der Wert Null. Denn zu dem vorigen Betrage kommt jetzt ein gleich

Fig. 14.

großer mit entgegengesetzten Vorzeichen hinzu.

Man muß somit bei der Durchflutung, genau so wie beim Induktionsflusse, wenn man Irrtümer vermeiden will, immer die Fläche angeben, auf die sie sich beziehen soll. Dieselbe Größe, die hier Durchflutung genannt ist, hat man früher als MMK der Spule bezeichnet.

Fig. 15.

Fig. 16. Messung der elektrischen Durchflutung mit dem magnetischen Spannungsmesser.

Das Wort kommt jetzt glücklicherweise aus der Mode. Denn zweifellos hat man das Integral für D (s. oben) als eine elektrische Größe aufzufassen. Niemand wird es aber für zweckmäßig finden, einer elektrischen Größe einen Namen zu geben, der auf etwas Magnetisches hinweist. In der Tat hat die frühere Benennungsweise hier und da in der Literatur zu Mißverständnissen verleitet. Es ist zu wünschen, daß das vom

¹⁾ Siehe hierzu die Vorschläge und Begründungen des AEF., ETZ. 1911, S. 722.

AEF als Ersatz vorgeschlagene Wort „Durchflutung“ sich schnell einbürgert, da es sich nicht nur durch seine treffende Wahl, sondern auch durch seinen Wohlklang empfiehlt.

Nicht immer braucht sich die Durchflutung so einfach wie im obigen Beispiel zu ergeben. So ist ihre Berechnung schon komplizierter bei dem belasteten Transformator. Legt man hier (s. Fig. 15) die Fläche F einmal nur durch den primären, sodann nur durch den sekundären Wickelquerschnitt und schließlich durch beide Wicklungen hindurch, so erhält man zuerst die primäre, dann die sekundäre und schließlich die gemeinsame Durchflutung (die resultierenden Amperewindungen). Von der letzteren hängt bekanntlich die magnetische Beanspruchung des Transformator Eisens ab. Man findet die resultierende Durchflutung durch geometrische Zusammensetzung der primären und sekundären Durchflutung.

Wir erhalten den allgemeinsten Fall einer Durchflutung, indem wir bei einer Fläche F in willkürlicher Weise gewisse Partien durch Schraffur hervorheben und dieselben als den Querschnitt eines stromführenden Leiters betrachten (Fig. 16).

Wie kann man nun die Durchflutung messen? Dies geschieht genau nach der für den Strom gegebenen Vorschrift. Es muß nur hier der magnetische Spannungsmesser diejenige Fläche umranden, für die man die Durchflutung bestimmen will. Unser Vorschlag stützt sich auch jetzt auf die erste Maxwellsche Hauptgleichung, nach deren allgemeineren Fassung die magnetische Umlaufspannung proportional der Durchflutung durch die umrandete Fläche ist.

5. Beispiele der Messung des Stromes und der Durchflutung mit dem magnetischen Spannungsmesser. Um einen Kern eines Transformators waren als Sekundärwicklung 3 konzentrische schmiedeeiserne Ringe von 40×40 mm Querschnitt herumgelegt. Bei der

Fig. 17.

Figur 17 mißt man mit dem zu einem geschlossenen Umlauf gebogenen magnetischen Spannungsmesser den Strom in einem einzigen Ringe, nach Figur 18 den Gesamtstrom der drei Ringe, ihre Durchflutung. Das Hilfsinstrument war ein Oszillograph. Es überwog bei der Frequenz 50 im Kreise des magnetischen Spannungsmessers weit der Ohmsche Widerstand. Das Oszillogramm 19 gibt daher nicht unmittelbar die Stromkurve. Man erhält diese erst durch Integration der photographierten Kurven. Letztere haben, von gewissen Feinheiten abgesehen, Rechteckform. Wir erwarten daher eine Dreieckform bei den Strömen (s. Fig. 20, bei der für die Gesamtdurchflutung die Integration graphisch durchgeführt worden ist)¹⁾.

¹⁾ Diese Integration läßt sich bequem durch besondere Apparate, „Integraphen“ genannt, ausführen.

In ähnlicher Weise wie hier läßt sich auch die Untersuchung von Strömen in Kurzschlußstäben und Kurzschlußankern vornehmen.

Fig. 18.

Fig. 19.

Kurve 1: Strom im innersten Ring
Kurve 2: Strom im mittleren Ring
Kurve 3: Strom im äußeren Ring
Kurve 4: Gesamtstrom in allen 3 Ringen

Fig. 20. Kurvenform des Gesamtstromes, s. auch Fig. 19, Kurve 4.

Fig. 21.

Fig. 22.

Fig. 23.

Vergleich der Windungszahlen zweier Spulen mit dem magnetischen Spannungsmesser.

Es wurden bei derselben Anordnung noch weitere Aufnahmen angefertigt, wobei jedesmal der magnetische Spannungsmesser in eine andere Lage gebracht wurde. Es sollte hierdurch ein Urteil gewonnen werden, wieweit die Unabhängigkeit der Angaben des magnetischen Spannungsmessers von der Lage erfüllt ist. Ich habe Änderungen im Charakter der Kurven hierbei nicht bemerken können.

Die primäre Durchflutung betrug 2850 Ampere, die sekundäre insgesamt rund 2200 Ampere.

Der letztere Wert ist durch den Vergleich der Höhe der stark ausgezogenen Kurve Fig. 19 mit der Kurve Fig. 21 erhalten worden, die bei einer Magnetisierungsspule von 458 Windungen und 5,1 Ampere effektiver Stromstärke mit demselben Spannungsmesser erhalten wurde. Wie hier, so lassen sich allgemein bei Benutzung eines magnetischen Spannungsmessers sehr starke Ströme in Vergleich setzen mit sehr viel schwächeren, wenn nur das Produkt aus Stromstärke und Windungszahl von derselben Größenordnung ist. Z. B. läßt sich die Messung eines Stromes von 20 000 Ampere in einem einzigen Leiter bequem zurückführen auf die Messung eines Stromes von 1 Ampere, bei einer Spule von 20 000 Windungen.

Die Fig. 22 gibt die Eichkurve für einen magnetischen Spannungsmesser wieder, der an ein Thermoelement angeschlossen und um eine Magnetisierungsspule von bekannter Durchflutung herumgelegt war. Der durch den Thermostrom hervorgerufene Ausschlag eines Galvanometers soll sich proportional dem Quadrate der Gesamtdurchflutung D erweisen und sich bei überwiegendem Ohmschen Widerstand im Kreise des magnetischen Spannungsmessers proportional der Frequenz ergeben (s. Abschnitt 4). Beide Forderungen treffen zu.

Der magnetische Spannungsmesser wurde in Verbindung mit demselben Hilfsinstrument zur Bestimmung der Windungszahl einer Spule benutzt. Von der rechteckigen Spule Fig. 23 wußte man bestimmt, daß sie 458 Windungen besaß. Dagegen waren Zweifel vorhanden, ob die runde Spule genau 400 Windungen hatte. Beide Spulen wurden in ein und denselben Stromkreis geschaltet und so gelegt, daß ihre magnetischen Felder gegeneinander arbeiteten. Die Stromstärke betrug 3,0 Ampere. Umgab der magnetische Spannungsmesser beide Spulen, so erhielt man bei dem am Thermoelement angeschlossenen Galvanometer 3,8 Skalenteile Ausschlag. Legte man ihn allein um die rechteckige Spule herum, so stellte sich der Ausschlag auf 232 Skalenteilen ein. Die Differenz der Windungszahlen beider Spulen beträgt daher

$$458 \cdot \sqrt{\frac{3,8}{232}} = 58 \text{ bis } 59.$$

Hierdurch war die Übereinstimmung der Windungszahl der runden Spule mit ihrem Sollwert bis auf eine einzige Windung nachgewiesen.

6. Messungen mit dem magnetischen Spannungsmesser an einem Transformator.

a) Leerlauf. Legt man den magnetischen Spannungsmesser zu einem geschlossenen Umlauf um die Primärspule herum, so erhält man die dem Leerlaufstrom proportional magnetische Umlaufspannung. Bei eisengeschlossenem magnetischen Kreise (Fig. 24) weicht nun der Leerlaufstrom im allgemeinen von der Sinusform ab. Dies gilt erst recht von der im Oszillographen beobachteten magnetischen Umlaufspannung, wenn wie im vorliegenden Falle der Ohmsche Widerstand beim magnetischen Spannungsmesser weit überwiegt (s. Oszillogramm 25 und 26).

Bekanntlich stellt sich beim Transformator die Induktion im Eisen nach der Klemmenspannung ein. Besteht letztere aus einem Gemisch von Wellen mit den Amplituden $E_1, E_2, \dots, E_n$, so erweisen sich die entsprechenden Wellen der Induktion proportional $E_1, \frac{E_2}{2}, \dots, \frac{E_n}{n}$. In derselben Folge müssen nun auch die Oberwellen der zu einer Stoßfuge gehörigen magnetischen Spannung abnehmen. Der magnetische Spannungsmesser hebt nun die n -te Oberwelle mit dem Gewichte n heraus. Die in einem Oszillographen beobachtete Kurve für die magnetische Stoßfugen-Spannung muß infolgedessen wieder Oberwellen proportional $E_1, E_2, \dots, E_n$ haben und daher mit der Kurve der Klemmenspannung übereinstimmen. Diese Aussage wird durch das Oszillogramm 27 bestätigt.

Fig. 24.

Fig. 25.

Kurve a elektrische Klemmenspannung
Kurve b magnetische Umlaufspannung.

Fig. 26. Kurve des Leerlaufstromes, abgeleitet aus Kurve b des Oszillogrammes 25 durch Integration.

Fig. 27.

Kurve a Klemmenspannung
Kurve c magnetische Stoßfugenspannung.

Fig. 28.

Fig. 29.

a Klemmenspannung
b Stromstärke
c magnetische Umlaufspannung.

Fig. 30.

m Kurve der magnetischen Spannung, gemessen nach Fig. 28
n Kurve der magnetischen Spannung, gemessen nach Fig. 32
p Kurve der magnetischen Spannung, gemessen nach Fig. 31.

Fig 31

Fig. 32.

Beim Transformator mit offenem magnetischen Kreise (Fig. 28) tritt der Einfluß des Eisens zurück. Der Leerlaufstrom ist trotz trapezförmiger Klemmenspannung gut sinusförmig. Die magnetische Umlaufspannung teilt zwar diese Eigenschaft. Trotzdem stimmt auch hier ihr Bild im Oszillographen, bis auf Feinheiten, die ihren Grund in dem Einfluß des Widerstandes der Primärwicklung haben, mit der Klemmenspannung überein (vgl. Fig. 29).

Fig. 30 soll weiter zeigen, welcher kleiner Bruchteil der gesamten Umlaufspannung auf das Eisen (s. Fig. 31) entfällt und daß die magnetische Spannung wesentlich dem Luftwege der Induktionslinien (s. Fig. 32) angehört.

b) Belastung. Ein Hauptergebnis der technischen Theorie des Transformators besteht in der Aussage, daß bei konstanter Klemmenspannung die Summe der primären und sekundären Durchflutung praktisch gleich der Durchflutung bei Leerlauf ist. Wird daher der magnetische Spannungsmesser durch die Primär- und Sekundärspule hindurchgesteckt (Fig. 24 und 33), so erwarten wir auch dann keine Änderung des Bildes im Oszillographen, wenn infolge Belastung die Ströme in den Wicklungen wachsen. Die Konstanz muß um so besser erfüllt sein, je niedrigere Werte der Streuung und dem Widerstande zukommen. Trotzdem bei den benutzten Versuchs-Transformatoren diese Bedingungen nicht so weitgehend erfüllt sind wie bei marktgängigen Typen, kann man doch aus Oszillogramm 34 und 35 eine Be-

Fig. 33.

Fig. 34.

Kurve f Oszillographenbild für die magnetische Umlaufspannung

a Kurve des primären Stromes für 0,6 Ampere
b „ „ „ „ „ 1,4 „
c „ „ „ „ „ 2,3 „
d „ „ „ „ „ 3,2 „
e „ „ „ „ „ 4,3 „

Fig. 35.

a Klemmenspannung
b sekundärer Belastungsstrom
c Kurve des Oszillographen für die magnetische Umlaufspannung (vgl. Fig. 29).

Fig. 36.

1 primäre Durchflutung
2 sekundäre „
3 resultierende „

Fig. 37.

Dreieck der Durchflutungen.

stätigung obiger Aussage entnehmen. Während der Primärstrom z. B. in Fig. 34 von 0,6—4,3 Ampere zunimmt, hat sich die Kurve der magnetischen Umlaufspannung nur bis zu einem dicken Striche verändert.

Beim Transformator mit offenem magnetischen Kreis ist die Änderung naturgemäß etwas größer (s. Fig. 35). In Fig. 36 findet man schließlich noch die Durchflutung der Primär und Sekundärspule mit dem magnetischen Spannungsmesser aufgenommen (Kurve 1

und 2). Man überzeugt sich leicht, daß die Summe der Ordinaten beider die dort ebenfalls aufgenommene resultierende Durchflutung (Kurve 3) ergibt.

Wie wir vorhin gesehen haben, kann man die primäre und resultierende Durchflutung messen. Bestimmen wir auch noch mit bekannten Mitteln ihre Phasenverschiebung, so haben wir die Endpunkte des Dreiecks der Durchflutungen (AW) festgelegt (Fig. 37).

Die Zahl der sekundären Amperewindungen greifen wir als dritte Seite ab. Für ihre Differenz gegenüber den primären Amperewindungen erhält man leicht den (angenäherten) Ausdruck:

$$n_1 J_1 - n_2 J_2 = n_1 J_0 \sin \alpha$$

Für das Übersetzungsverhältnis der Ströme folgt:

$$\frac{J_2}{J_1} = \frac{n_1}{n_2} \left(1 - \frac{J_0}{J_1} \sin \alpha \right).$$

Für die Phasenverschiebung φ (s. Fig. 37) zwischen Primär- und Sekundärstrom ergibt sich:

$$\varphi = \frac{J_0}{J_1} \cos \alpha.$$

Das Übersetzungsverhältnis $\frac{J_2}{J_1}$ und der Winkel φ interessieren bei Stromwandlern, zu deren Untersuchung somit der magnetische Spannungsmesser vielleicht verwendet werden kann, wenn genügend empfindliche Meßinstrumente genommen werden.

7. Über die Verwendung von Zusatzwindungen und Eisen beim magnetischen Spannungsmesser. Es kann aus mechanischen Gründen vorkommen, daß man mit dem Ende eines magnetischen Spannungsmessers nicht genau an den Anfang oder das Ende des Meß-

Fig. 38.

weges heran kann (Fig. 38). Im allgemeinen trifft dies immer zu; denn es bildet sich zwischen Ende des magnetischen Spannungsmessers und der gewünschten Anlegestelle eine mehr oder minder breite Stoßfuge aus. In sehr vielen Fällen kann man den Einfluß dieser Stoßfuge von vornherein in bescheidenen Grenzen halten. Trifft letzteres aber nicht zu, so kann man trotzdem eine brauchbare Messung erhalten, wenn man an den Enden des magnetischen Spannungsmessers eine passend gewählte Zahl von Zusatzwindungen vorsieht (s. Fig. 38).

Bedeutet l die Länge der Stoßfuge, und ist $\mathfrak{H}_1$ daselbst die mittlere Feldstärke, so mißt man die Flußwindungen um den Betrag $N \cdot F \cdot \mathfrak{H}_1 \cdot l$ zu niedrig. Bedeutet n die Zahl der Zusatzwindungen, so beträgt bei ihnen die Größe der zugehörigen Flußwindungen $n \mathfrak{H}_z \cdot f$. ($\mathfrak{H}_z$ = Feldstärke; f = Windungsfläche der Zusatzwindungen). Somit muß die Zahl n die Forderung erfüllen:

$$N F \mathfrak{H}_1 \cdot l = n \cdot \mathfrak{H}_z \cdot f$$

$$n = N \cdot l \cdot \frac{\mathfrak{H}_1}{\mathfrak{H}_z} \cdot \frac{F}{f}.$$

Ist die Strecke l so klein, daß man auf ihr das Feld $\mathfrak{H}$ praktisch als homogen ansehen kann, so genügt die für einen Einzelfall gefundene Zahl der Zusatzwindungen für alle übrigen Fälle.

Es liegt der Gedanke nahe, die Empfindlichkeit des magnetischen Spannungsmessers dadurch zu erhöhen, daß man das Spulennere mit magnetisierbarem Material (Eisen) ausfüllt. Darf die Permeabilität (praktisch) als konstant angenommen werden, so würde auch jetzt noch zwischen den Flußwindungen des Instrumentes und zwischen der magnetischen Spannung zwischen Anfang (1) und Ende (2) Proportionalität bestehen.

Man überzeugt sich aber leicht auf dem auf S. 142 dieses Jahrgangs angegebenen Gedankengange, daß diese beiden Punkte unmittelbar in der Eisenbegrenzung liegen. Die magnetische Spannung, die zu einer sich etwa beim Anlegen des Instrumentes bildenden Stoßfuge gehört (vgl. den vorigen Absatz), würde man nicht mitmessen. Diese Stoßfugenspannung ist bei Verwendung von Eisen zweifellos sehr viel größer, als wenn der magnetische Spannungsmesser mit unmagnetisierbarem Material hergestellt wird. Es ist zwar möglich, daß der Einfluß der Stoßfuge in Ausnahmefällen auch hier vernachlässigbar klein gehalten werden kann. Im allgemeinen wird man aber hierauf nicht rechnen können.

Die Schwierigkeit fällt weg, wenn die Stoßfuge in feldschwache Gebiete verlegt werden kann oder wenn der magnetische Spannungsmesser als geschlossene ringförmige Wicklung ausgeführt wird. Diese Form war (s. oben) bei Messung der Durchflutung geboten. Die Verwendung von magnetisierbarem Material von konstanter Permeabilität führt im letzteren Falle zu einem exakten Ergebnis.

Natürlich bringt eine veränderliche Permeabilität eine weitere Fehlerquelle herein, die aber wahrscheinlich für manche technische Messung in Kauf genommen werden kann.

Die Rückwirkung des Einschaltstromes von Transformatoren auf das Netz.

Von

Karl Kuhlmann, Zürich.

1. Allgemeine Orientierung über die physikalischen Vorgänge beim Einschalten mehrerer Transformatoren. Bisher ist meines Wissens in der Literatur nur der Fall untersucht worden, daß ein einzelner Transformator auf ein sehr großes Wechselstromnetz geschaltet wird. Es bilden sich dann Stromstöße aus, die, wie die einschlägige Literatur¹⁾ zur Genüge dargetan hat, bei stark gesättigten Transformatoren oft sogar den normalen Belastungsstrom um ein Vielfaches überschreiten. Wenn nun mehrere Transformatoren an ein und dasselbe Netz angeschlossen sind, so fragt es sich, in welcher Weise jene Einschaltströme auf das Netz bzw. auf die übrigen Transformatoren zurückwirken. Eine solche Rückwirkung wird stets in mehr oder minder großem Maße zu bemerken sein. Denn infolge des unvermeidlichen Spannungsabfalles in den Zuleitungen und im Generator wird im Augenblicke des Einschaltens sowohl die Größe wie der zeitliche Verlauf der Netzspannung Änderungen erfahren. Die magnetische Trägheit der bereits eingeschalteten Transformatoren und Motoren sucht solche plötzlichen Änderungen natürlich hintanzuhalten, und es bedarf zur Herbeiführung des neuen Gleichgewichtszustandes im Netz zunächst mal eines Ausgleichsvorganges zwischen dem neu hinzugeschalteten Transformator und dem Generator einerseits und, was uns hier besonders interessiert, zwischen dem neu eingeschalteten Transformator und den übrigen bereits eingeschalteten Transformatoren andererseits.

Diese Betrachtungen gelten nicht nur für Transformatoren, sondern für jeden Stromverbraucher, der die dem Netze entnommene Energie in magnetische Energie umwandelt, diese zeitweilig in sich aufspeichert und zeitweilig dem Netze wieder zurückgibt. Die Ähnlichkeit dieser Vorgänge mit denen bei Verwendung von Kondensatoren, Kabeln usw.

1) Alfred Hay, The electrician Revue 1898, S. 326.

Kuhlmann, E. T. J. 1908, S. 1096.

Schwaiger, E. u. M. Wien 1909, S. 633.

Linke, Archiv f. Elektr. Bd. 1, S. 16.

Rogowski, Archiv f. Elektr. Bd. 1, Heft 8.