

Die Messung der magnetischen Spannung. (Messung des Linienintegrals der magnetischen Feldstärke.)

Von W. Rogowski und W. Steinhaus.

(Mitteilung aus der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt.)

1. **Kritik der bekannten magnetischen Meßmethoden.** Die magnetische Eigenschaft eines Stoffes wird durch zwei Größen: durch die Induktion \mathfrak{B} und die magnetische Feldstärke \mathfrak{H} charakterisiert. Die Messung der Induktion macht keine Schwierigkeit. Es führen ballistische und Wechselstrom-Methoden leicht und sicher zum Ziel. Dagegen gelingt die Messung der Feldstärke nur in seltenen Fällen.

Die Vorschläge für die unmittelbare Bestimmung dieser Größe beschränken sich auf die Ewingsche Isthmusmethode¹⁾ und das Gumlich - Rogowskische Verfahren zur Messung der Magnetisierung an Epsteinbündeln²⁾. In beiden Fällen besteht der Kunstgriff darin, daß man ganz dicht auf dem Eisen (also in der Luft) die Tangentialkomponente der magnetischen Feldstärke mißt. Diese Tangentialkomponente setzt sich stetig (ohne Sprung) in das Eiseninnere fort und gerade ihr ist die daselbst meßbare Induktion zuzuordnen.

Daß dieser Kunstgriff nur ein beschränktes Anwendungsgebiet hat, liegt daran, daß sich eine mathematische Parallelstellung der Feldstärkespule zur Eisenoberfläche nicht erreichen läßt. Bedeutet φ den Winkel der Abweichung, so ist der Messung nur der Wert $\mathfrak{H}_t \cos \varphi + \mathfrak{H}_n \sin \varphi$ zugänglich (Fig. 1). Dieser kann sich auch bei kleinen Werten φ nicht unwesentlich von der Komponente \mathfrak{H}_t unterscheiden, wenn diese von der Komponente \mathfrak{H}_n weit übertroffen wird. Diese Voraussetzung ist dort erfüllt, wo infolge einer merklichen Streuung die Induktionslinien fast senkrecht aus dem Eisen austreten. Nur in den seltenen Fällen, wo die Streuung klein genug ist, daß die Induktionslinien schief oder parallel zur Eisenoberfläche verlaufen (z. B. in den mittleren Partien der Schenkel des Epsteinapparates), ist auf diesen Kunstgriff Verlaß.

Bei sämtlichen übrigen Meßmethoden bestimmt man nicht den Einzelwert der Feldstärke an demselben Orte, an dem man die Induktion mißt; sondern man mißt zunächst die magnetische Umlaufspannung (Linienintegral der magnetischen Feldstärke auf einem geschlossenen Wege). Zu dem Zwecke mißt man den Magnetisierungsstrom i und stützt sich auf die Aussage der ersten Maxwell'schen Hauptgleichung, nach der die magnetische Umlaufspannung und die Durchflutung der Magnetisierungsspule (Amperedrähte oder Amperewindungen der Magnetisierungsspule)³⁾ einander gleich sind⁴⁾. Hiermit hat man aber

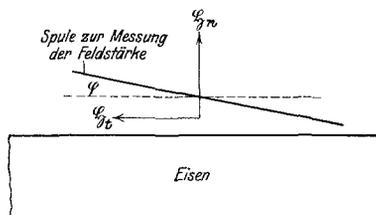


Fig. 1.

¹⁾ Ewing, Magnetische Induktion. 1892, S. 131.

²⁾ Gumlich und Rogowski, Absolute Messung der Magnetisierung an Epsteinbündeln ETZ. 1912 S. 262. s. auch Denso, Diss. Rostock.

³⁾ Wir schließen uns hier in der Ausdrucksweise den Vorschlägen des AEF an, s. ETZ 1911, S. 722.

⁴⁾ Hier und im folgenden denken wir uns die magnetische Feldstärke \mathfrak{H} in AW/cm gemessen. Vgl. Mie, Lehrbuch d. Elektr. und des Magnet. S. 371. Die so definierten Amperewindungen pro cm sind dieselben, von denen in den Normalien des Verbandes Deutscher Elektrotechniker über die Prüfung von Eisenblech, Absatz 3 die Rede ist. Mit dieser Festsetzung ist die magnetische Spannung (Linienintegral der magnetischen Feldstärke) in Amperewindungen anzugeben.

nur einen Teil der Meßaufgabe gelöst. Die vollständige Lösung erfordert noch einen Schluß von der magnetischen Umlaufspannung auf den Wert der magnetischen Feldstärke \mathfrak{H} an der Meßstelle der Induktion.

Am einfachsten gelingt dieser beim Ring. Hier kann man infolge der Symmetrie der Anordnung alle Werte der Feldstärke \mathfrak{H} auf einem Kreise um die Achse gleich setzen. Dies ist der Grund, daß der Ring seine Stellung als oberste Instanz bei allen magnetischen Messungen bis in die jüngste Zeit hinein behauptet hat.

Schon schwieriger, aber immerhin noch streng, kann man beim Ellipsoid aus seinem Magnetisierungsstande und aus dem Magnetisierungsstrom i die Feldstärke \mathfrak{H} im Innern des Eisens berechnen.

Bei einer Reihe anderer Verfahren jedoch ist die entsprechende Rechnung exakt nicht mehr durchzuführen. Dies trifft zu beim Joch, beim Köpelschen Apparat, bei der Du Bois'schen Wage und verwandten Eisenprüfern. Die Angaben dieser Apparate sind prinzipiell mit einer gewissen Unsicherheit behaftet, die ihren Wert bisweilen nicht unerheblich drückt. Die Tendenz geht bei diesen Apparaten dahin, den Hauptteil der magnetischen Umlaufspannung (des magnetischen Widerstandes) in den zu prüfenden Stab und einen bescheidenen Rest in ein Schlußjoch zu verlegen. Es fehlen aber experimentelle Mittel, die entscheiden können, wie weit man das angestrebte Ziel erreicht hat. Die Reichsanstalt hat aus diesem Grunde ihre Jochmessungen immer mit einer Korrektur (Scherung) versehen, die man aus Vergleichsmessungen mit dem Ellipsoid erhalten hatte. Die Bestimmung dieser Korrektur ist aber leider nicht einfach, von Material zu Material verschieden und befriedigt daher nicht.

Etwas ganz ähnliches läßt sich auch von den jüngst vorgeschlagenen Meßmethoden von Epstein und Lonkhuijzen sagen, wenn auch nicht verkannt werden soll, daß die Korrekturen bei ihnen mit wachsender Magnetisierung immer kleiner werden und die Methoden gerade für hohe Magnetisierungen zur Verwendung vorgeschlagen worden sind.

Eben weil man im allgemeinen nicht aus dem Werte der magnetischen Umlaufspannung auf den Wert der Feldstärke an einer bestimmten Stelle oder auf den Wert der magnetischen Spannung für einen offenen Weg schließen kann, hat man bisher recht wichtige Aufgaben: die Messung der magnetischen Eigenschaften irgendeines Konstruktionsteiles einer Maschine (des Joches, oder der Magnetschenkel, oder der Zähne usw.) nicht in Angriff nehmen können.

Wir werden im folgenden einen Kunstgriff mitteilen, der alle vorhin hervorgehobenen Schwierigkeiten mit einem Schlage überwindet. Er besteht in der unmittelbaren Messung der magnetischen Spannung.

2. Theorie des neuen Verfahrens. Wir wollen annehmen, wir hätten eine Spule von überall gleichem Querschnitt F und einer gleichmäßig dichten Bewicklung. Um einen bestimmten Fall vor Augen zu haben, wollen wir sie uns als einen bewickelten, gleichmäßigen, biegsamen Streifen vorstellen. Wir bringen sie in ein magnetisches Feld und fragen uns nach ihrem Flusse Φ . Zu diesem trägt die einzelne Windung den Betrag $F \mathfrak{B}_x$ bei, wenn \mathfrak{B}_x die Komponente der Induktion in Richtung der Länge x des Streifens bedeutet. Weiter steckt in diesem Ansatz die Voraussetzung, daß die Induktion \mathfrak{B} auf der Fläche einer und derselben Windung konstant ist. Kommen n Windungen auf die Längeneinheit der Spule, so steuert ihr Längenelement dx zum Flusse den Beitrag bei

$$d\Phi = F n \mathfrak{B}_x dx.$$

Für den Gesamtfluß erhalten wir somit

$$\Phi = F n \int_1^2 \mathfrak{B}_x dx = c \int_1^2 \mathfrak{B}_x dx,$$

$$c = F n = \text{const.}$$

Unter 1 und 2 sind die Lagen von Anfang und Ende der Spule verstanden. Da die Größe \mathfrak{H}_x für Luft 0,4 π mal so groß ist als die Feldstärke \mathfrak{H}_x (gemessen in AW/cm, vgl. Anm. 4, S. 141) so können wir auch schreiben:

$$\Phi = k \cdot \int_1^2 \mathfrak{H}_x dx,$$

$$k = 0,4 \pi n F = \text{const.}$$

In Worten: Der Fluß einer gleichmäßig dicht bewickelten Spule von überall gleichem Querschnitt ist proportional der magnetischen Spannung zwischen Anfang und Ende dieser Spule. Der Weg, für den diese Spannung gilt, ist durch die Achse der Spule gegeben.

Eine Spule, die die oben angegebenen Eigenschaften besitzt, wollen wir einen magnetischen Spannungsmesser nennen.

Wir machen uns nun von der Voraussetzung frei, daß die Induktion auf der Fläche einer Windung konstant sein müsse. Es sei nicht wie vorhin eine einzige, sondern eine Reihe gleichmäßig dicht bewickelter Spulen von gleicher Länge, aber von ganz (unendlich) kleinem Querschnitt gegeben und so gruppiert, daß sie in ihrer Gesamtheit mit dem Streifen endlichen Querschnitts übereinstimmen. Wenn nun die Querschnitte an den Stellen 1 und 2 je in Niveauflächen des magnetischen Feldes liegen¹⁾, so stimmen die Flüsse $d\Phi$ für irgend 2 kleine Elementarwindungen miteinander überein. In diesem Falle kann man dem magnetischen Spannungsmesser beliebig großen Querschnitt geben. Liegen die Querschnitte bei 1 und 2 aber nicht völlig in Niveauflächen, sondern durchdringen sie solche, so müssen die Flüsse der einzelnen Elementarstreifen etwas verschieden voneinander ausfallen. Sie schwanken aber höchstens um den Betrag, um den sich die Linienintegrale der Feldstärke zwischen irgend 2 Punkten der Querschnitte bei 1 und 2 unterscheiden. Da man im allgemeinen die Lage der Niveauflächen nicht kennt, so empfehlen sich kleine Abmessungen für den Querschnitt F des magnetischen Spannungsmessers.

Bei der mechanischen Herstellung einer solchen Spule kann man nicht auf einen überall gleichmäßigen Querschnitt und auf eine überall gleichmäßige Bewicklung rechnen. Welche Abweichungen wird man erwarten müssen?

Es sei \mathfrak{H}_x als Funktion der Länge x des magnetischen Spannungsmessers graphisch durch die stark ausgezogene Kurve Fig. 2 gegeben. Dann stellt die von ihr, von der Abszissenachse und von den Ordinaten in den Punkten 1 und 2 eingeschlossene Fläche den gesuchten Wert der magnetischen Spannung dar. Wir teilen die Abszissenachse in N gleiche Teile, ziehen in den Teilpunkten die Senkrechten und vollenden die Begrenzung durch Ziehen von Parallelen zur Abszissenachse im Abstände der mittleren Ordinaten der Kurve in dem eingeschlossenen Intervalle. Hierdurch erhalten wir ein bekanntes treppenförmiges Gebilde. Der Inhalt desselben ist bestenfalls der Messung zugänglich. Durch Verfeinerung der Teilung, d. h. durch immer dichtere Bewicklung des magnetischen Spannungsmessers kann man, wie die Integralrechnung zeigt, dem Werte der gesuchten

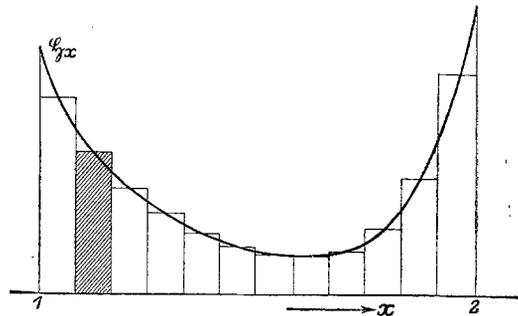


Fig. 2.

¹⁾ Hierbei ist vorausgesetzt, was praktisch immer zutreffen wird, daß der vom magnetischen Spannungsmesser eingenommene Raum von keiner elektrischen Strömung durchflossen wird. Bekanntlich kann man in stromdurchflossenen Gebieten die magnetische Feldstärke \mathfrak{H} nicht mehr von einem Potentiale ableiten und daher dort auch nicht mehr von Niveauflächen reden.

magnetischen Spannung beliebig nahe kommen. Wenn nun die Flächen der einzelnen Windungen nicht überall gleich und die Windungen nicht gleichmäßig verteilt sind, so kommen den einzelnen Flächenstreifen der Figur 2 bei der Messung verschieden große Gewichte zu. Es betrage die Summe der Querschnitte f , die Gesamtzahl der Windungen N und die Länge des magnetischen Spannungsmessers l . Bei völliger Gleichmäßigkeit sollte der Querschnitt F gleich f/N , der Abstand zweier auf einanderfolgenden Windungen l/N betragen. Es sei die Abweichung des Wertes F von f/N in Prozenten gleich a , und die Abweichung des Abstandes zweier benachbarter Windungen vom Werte l/N gleich b . Dann kann die größte Abweichung des gemessenen vom gesuchten Wert der magnetischen Spannung in Prozenten die Zahl $a + b$ nicht übersteigen.

Bei der Herstellung von magnetischen Spannungsmessern muß mit aller Sorgfalt völlige Gleichheit des Querschnitts und völlige Gleichmäßigkeit der Bewicklung angestrebt werden.

3. Prüfung des neuen Verfahrens. Es drängt sich nun die Frage auf, mit welcher Sicherheit kann man auf der im vorigen Abschnitte gegebenen Grundlage magnetische Spannungen messen, und in welcher Reinheit kommen die Eigenschaften derselben experi-

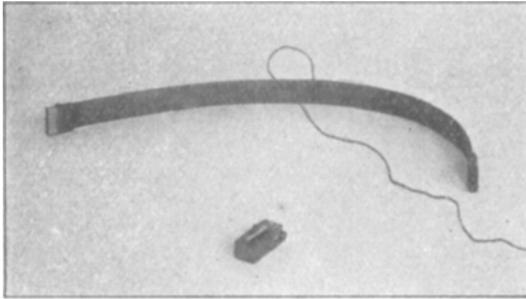


Fig. 3. Magnetischer Spannungsmesser.

mentell zum Ausdruck? Um hierüber Klarheit zu gewinnen, haben wir uns durch dichte Bewicklung eines Preßspanstreifens von 60 cm Länge, 2,5 cm Breite und 1 mm Dicke mit einer doppelten Lage Draht von 0,2 mm Durchmesser einen magnetischen Spannungsmesser hergestellt. Die Bewicklung war von Hand aufgebracht. Es mußten zwei Lötstellen in Kauf genommen werden, die durch eine mangelhafte Stelle im Draht und durch Reißen des Drahtes beim Wickeln verschuldet waren. Der Quer-

schnitt des Preßspanstreifens schwankte über seine Länge um etwa $1\frac{1}{2}\%$. Der erhaltene magnetische Spannungsmesser kann somit keineswegs als besonders gut und technisch durchgebildet bezeichnet werden. Dies ist bei Beurteilung der bei den Versuchen (s. weiter unten) erzielten Genauigkeit zu berücksichtigen. Anfang und Ende der Wicklung lagen in der Mitte. Die Spule wurde durch eine Umhüllung von Paragummiband und an den Enden durch kleine Holzleisten geschützt. Ihr fertiges Aussehen zeigt die Figur 3.

Die Methode der Prüfung bestand in der Messung der magnetischen Umlaufspannung (des geschlossenen Linienintegrals). Die Umlaufspannung soll sich nach der Theorie für alle Wege, die dieselbe Durchflutung umschließen, von Null verschieden und konstant ergeben. Sie soll verschwinden, wenn der geschlossene Umlauf keine Strömung umrandet. Wird Eisen in das Feld gebracht, so kann dieses zwar das magnetische Feld verzerren; dagegen soll die magnetische Umlaufspannung hierdurch ganz unbeeinflusst bleiben.

Der gewickelte Spannungsmesser wurde zu einer geschlossenen Kurve zusammengebogen und durch eine Klammer zusammengehalten. Das magnetische Feld wurde von einer viereckigen, flachen Magnetisierungsspule von 458 Windungen erregt. Die Enden der Bewicklung des Spannungsmessers führten zu einem ballistischen Galvanometer, dessen Ausschlag beim Kommutieren des Magnetisierungsstromes gemessen wurde. Dabei wurde der magnetische Spannungsmesser nach und nach in die verschiedenartigsten Lagen gebracht, die teilweise aus den Fig. 4 bis 11 hervorgehen. Es wurden folgende Resultate erhalten.

A. Versuche ohne Eisen.

Nummer des Versuchs	Lage des Spannungsmessers wie in Figur	Stromstärke in Ampere	Ausschlag	Verdrehung des Spannungsmessers in 17 tel seines Umtanges
---------------------	--	-----------------------	-----------	---

1. Der magnetische Spannungsmesser umschlingt sämtliche Windungen der Magnetisierungsspule.

1	4	1,00	91,0	—
2	5	1,00	91,0	0
3	5	1,00	91,0	1
4	5	1,00	90,6	2
5	5	1,00	89,9	3
6	5	1,00	90,1	4
7	5	1,00	90,0	5
8	5	1,00	88,9	6
9	5	1,00	89,3	7
10	5	1,00	91,1	8
11	5	1,00	91,9	9
12	5	1,00	91,3	10
13	5	1,00	90,2	11
14	5	1,00	89,9	12
15	5	1,00	90,1	13
16	5	1,00	89,8	14
17	5	1,00	89,9	15
18	5	1,00	90,1	16
19	5	1,00	91,0	17

2. Der magnetische Spannungsmesser umschlingt keine Strömung.

20	6	1,00	—	—
21	7	1,00	— 0,2	0
22	7	1,00	— 0,9	1
23	7	1,00	+ 0,1	2
24	7	1,00	— 0,6	3
25	7	1,00	— 0,9	4
26	7	1,00	— 0,2	5
27	7	1,00	+ 0,8	6
28	7	1,00	+ 0,9	7
29	7	1,00	— 1,2	8
30	7	1,00	0	9
31	7	1,00	— 1,0	10
32	7	1,00	+ 0,9	11
33	7	1,00	+ 1,0	12
34	7	1,00	— 0,1	13
35	7	1,00	+ 0,1	14
36	7	1,00	— 0,5	15
37	7	1,00	+ 0,1	16
38	7	1,00	— 0,2	17

B. Versuche mit Eisen.

1. Der magnetische Spannungsmesser umschlingt sämtliche Windungen der Magnetisierungsspule.

39	8	1,00	93,4	—
40	9	1,00	94,2	—
41	10	1,00	93,8	—
42	—	1,00	89,1	—
43	—	1,00	91,2	—
44	—	1,00	90,1	—

2. Der magnetische Spannungsmesser umschlingt keine Windungen der Magnetisierungsspule.

45	11	1,00	+ 0,4	—
46	—	1,00	+ 0,8	—

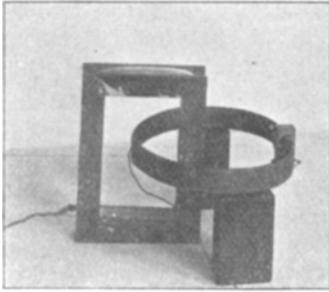


Fig. 4.

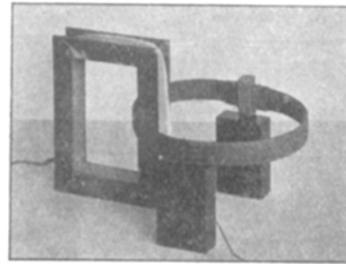


Fig. 5.

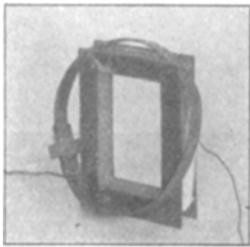


Fig. 6.

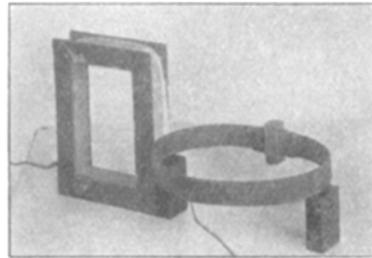


Fig. 7.

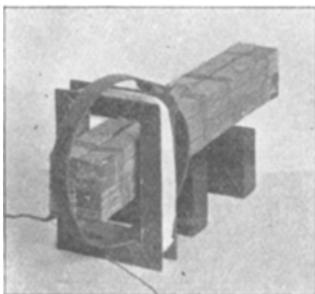


Fig. 8.

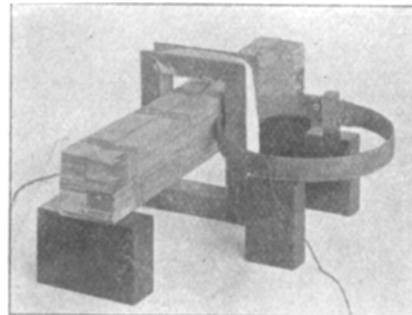


Fig. 9.

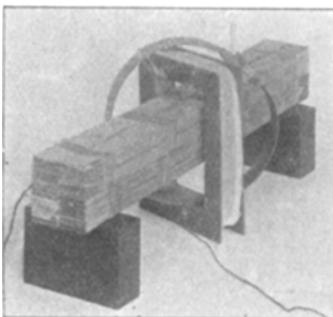


Fig. 10.

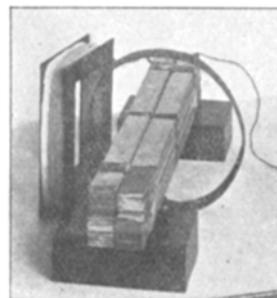


Fig. 11.

Die beobachteten Ausschläge entsprechen bis auf kleine Abweichungen, die in dem nicht ganz vollkommenen Bau des magnetischen Spannungsmessers ihren Grund haben, durchaus den Anforderungen der Theorie. Sie sind von Null verschieden und (bis auf einen durchschnittlichen Fehler von 2 %) konstant, wenn der Spannungsmesser

die Magnetisierungsspule umschlingt. Sie sind gleich Null (sehr klein und von wechselndem Vorzeichen), wenn dies nicht zutrifft, und ergeben sich als (praktisch) unabhängig vom Eisen im Felde.

Daß es in der Tat sich nur um kleine Abweichungen in der Gleichmäßigkeit des Spannungsmessers handelt, geht aus den Versuchen 2 bis 19 hervor. Hier hat er als Ganzes keine Lagenänderungen erhalten, sondern ist absatzweise in sich gedreht worden. Da die in der Nähe der Magnetisierungsspule befindlichen Partien desselben den Hauptteil zum gemessenen Werte beitragen, so lassen sich auf diesem Wege nicht ganz saubere Stellen des Spannungsmessers auffinden. So beobachteten wir in der Tat die geringsten Ausschläge, wenn sich die Stoßstelle desselben in der Nähe der Magnetisierungswicklung befand. Noch besser eignen sich für die Prüfung eines magnetischen Spannungsmessers kurze Magnetisierungsspulen, bei denen die Öffnung klein im Verhältnis zu ihrer Länge ist.

Bei sorgfältiger Herstellung von magnetischen Spannungsmessern wird man ohne Zweifel noch günstigere Resultate als die oben erreichten erzielen können.

4. Eichung eines magnetischen Spannungsmessers. Man kann einen magnetischen Spannungsmesser sofort in Amperewindungen eichen und braucht sich um Windungszahl und Querschnitt nicht zu kümmern. Ist α der beobachtete Ausschlag bei der Kommutierung des Stromes i , N die Zahl der Windungen der Magnetisierungsspule, so entsprechen bei der Kommutierung einem einzigen Skalenteile ein Wert der magnetischen Spannung von $\frac{N i}{\alpha}$ Amperewindungen. Bei den vorhin beschriebenen Versuchen haben wir im Durchschnitt bei der Kommutierung einer Durchflutung von $1,00 \times 458$ Amperedrähten der Magnetisierungsspule einen Ausschlag von 90,6 Skalenteilen erhalten. Somit entspricht bei der Kommutierung einem Skalenteile Ausschlag ein Wert der magnetischen Spannung von $458 : 90,6 = 5,06$ Amperewindungen.

Gehört weiter zu einem Skalenteile Ausschlag eine Flußänderung der Induktion von β Einheiten, so entspricht der Einheit des Flusses im magnetischen Spannungsmesser ein Wert der magnetischen Spannung von $2 \cdot \frac{N i}{\alpha \cdot \beta}$ Amperewindungen.

5. Einige Messungen der magnetischen Spannung. 1. Es wurden durch die aus Abschnitt 3 bekannte Magnetisierungsspule mehrere Epsteinbündel gesteckt und nun die magnetische Spannung auf dem aus Fig. 12 ersichtlichen Wege gemessen. Infolge des schlechten magnetischen Schlusses dieser Anordnung ist der magnetische Widerstand des Eisens klein gegen den der Luft. Es sollte sich somit hier der gemessene Wert nur wenig von dem früher für die Umlaufspannung gefundenen Werte unterscheiden. Wir erhielten in der Tat bei einer Stromstärke von 1,00 Ampere in der Magnetisierungsspule einen Ausschlag von 84,2 Skalenteilen. Legt man den Spannungsmesser auf dem aus Fig. 13 ersichtlichen Wege an denselben Stellen an, so messen wir jetzt eine magnetische Spannung, die der im Eisen zwischen den Auflagepunkten entgegengesetzt gleich ist. Wir erwarten somit jetzt einen kleinen negativen Ausschlag. Gemessen wurden — 5,8 Skalenteile bei 1,00 Ampere. Die Summe der Absolutwerte beider Messungen ergibt 90,0 und stimmt gut mit dem im Durchschnitt für die Umlaufspannung gefundenen Werte von 90,6 Skalenteilen überein.

Bei beiden Versuchen sind die beiden Punkte, für die die magnetische Spannung bestimmt wurde, dieselben geblieben. Trotzdem weichen die erzielten Werte weit voneinander ab. Dies kommt daher, daß die magnetische Spannung im elektromagnetischen Felde im allgemeinen nicht allein durch Anfangs- und Endpunkt festgelegt wird (etwa wie die magnetische und die elektrische Spannung im statischen Felde), sondern das zu ihrer völligen Bestimmung auch noch die Angabe des Integrationsweges (Lage der Achse des magnetischen Spannungsmessers) gehört¹⁾. Nur in besonderen

¹⁾ Dies Verhalten teilt die magnetische Spannung mit der elektrischen Spannung im

Partien erweist sich auch im elektromagnetischen Felde die magnetische Spannung unabhängig vom Weg und somit allein durch Anfangs- und Endpunkt völlig charakterisiert. Dies sind diejenigen Gebiete, in denen keine Ströme fließen und in denen daher ein Integrationsweg in den anderen deformiert werden kann, ohne daß Stromlinien geschnitten werden. Im vorliegenden Falle (s. oben) läßt sich der Integrationsweg der Fig. 13 aus dem der Fig. 12 nur durch Überschreiten des von Strömung durchflossenen Querschnitts der Magnetisierungswicklung erhalten. Daher denn auch die Abhängigkeit der magnetischen Spannung vom Wege.

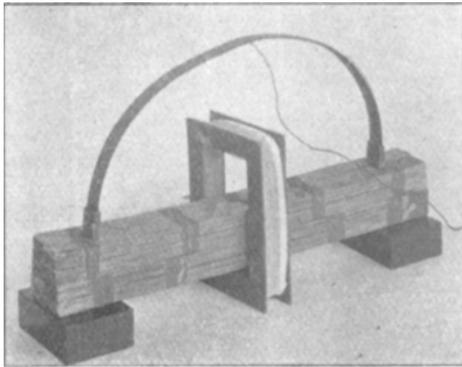


Fig. 12.

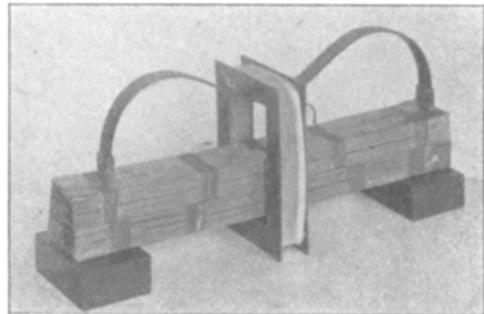


Fig. 13.

2. Ein zweites Objekt bildete der bekannte Epsteinsche Verlustapparat. Er ist neuerdings von Epstein¹⁾, Lonkhuyzen²⁾, Gumlich und Rogowski³⁾ auch zur Messung der Magnetisierbarkeit vorgeschlagen worden. Bei diesem Apparat interessiert uns die magnetische Spannung im Eisen, das ist die Zahl der nützlichen Amperewindungen, die den Induktionsfluß durch das Eisen der Schenkel treiben. Ihr Wert stimmt nicht ganz genau mit der aus Windungen und Stromstärke der Magnetisierungswicklung sich ergebenden Zahl überein. Der Grund liegt darin, daß dem Luftschlitz in der Stoßfuge und seiner nächsten Umgebung ebenfalls eine gewisse Zahl von Amperewindungen (eine magnetische Spannung) zuzuordnen ist. Wir haben nun an einem Schenkel die Differenz der Zahl der Gesamtamperewindungen und der nützlichen Amperewindungen gemessen. Dies geschah dadurch, daß wir den magnetischen Spannungsmesser nach Fig. 14 an den Schenkel drückten. Die umspannte Eisenlänge betrug hierbei 43 cm, die Windungszahl der Magnetisierungsspule pro Schenkel 400. Die Bündel waren ohne Preßspanzwischenlage so fest als möglich aneinander gepresst. In den Figuren 14, 15 und 16 sind die Klemmbacken weggelassen, damit die Lage des Spannungsmessers besser hervortritt. Es wurde wieder der ballistische Ausschlag bei der Kommutierung beobachtet. Wir fanden:

Durchschnittliche Zahl der Amperewindungen pro cm (durchschnittlicher Wert der Feldstärke in AW/cm) rund	Durchflutung (Gesamtzahl der Ampereindrähte) pro Schenkel	Ausschlag des ballistischen Galvanometers	Differenz der Zahl der gesamt. und der nützlichen Amperewindungen (Skalenteile $\times 5,06$)	Prozentual. Wert dieser Differenz bezogen auf die Zahl der nützlichen Amperewindungen
25	$3,14 \times 400 = 1255$	56,5	286	29,5
100	$10,5 \times 400 = 4200$	85,8	435	11,5
200	$20,3 \times 400 = 8120$	122,5	622	8,3

im Wechselfelde s. hierzu die Diskussion zwischen Emde, La Cour, Rüdénberg, Menges und Benischke, Elektrotechnik und Maschinenbau, 1912 Heft 6 u. 12.

¹⁾ J. Epstein, Die magnetische Prüfung von Eisenblech ETZ 1911, S. 334, s. hierzu auch S. 613 und 1314.

²⁾ Lonkhuyzen, ETZ 1911, S. 1131.

³⁾ Gumlich und Rogowski, ETZ 1912 S. 262

Die eben direkt gemessene Differenz ist nichts anderes (vgl. oben) als die Zahl der Amperewindungen für die Stoßfuge und ihre unmittelbare Umgebung. Es lag daher der Gedanke nahe, sie auf der durch die Fig. 15 angegebenen Weise zu messen. Die Stromstärke im Apparat betrug wieder 3,14 Ampere, die durchschnittliche Zahl der Amperewindungen pro cm wieder rund 25. Wir fanden für die Stoßfuge links (Fig. 14) 40,1 Skalenteile; für die Stoßfuge rechts 68,3 Skalenteile. Legt man den letzten Wert zu Grunde, so folgt daß bisweilen für eine Stoßfuge und ihre unmittelbare Umgebung trotz guten Zusammenpressens der ohne Preßspannzwischenlage aneinanderstoßenden Bündel 38 % der nützlichen Amperewindungen aufgebraucht werden müssen, wenn im Eisen eine Feldstärke von rund 25 AW/cm herrscht.

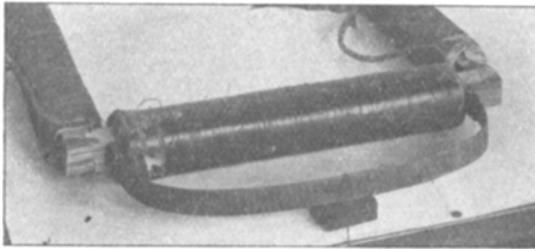


Fig. 14.

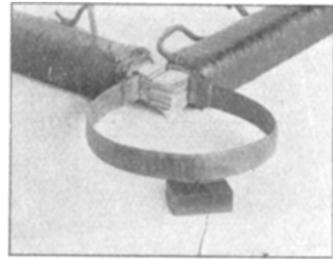


Fig. 15.

Man sieht ferner, die Stoßfugen verhalten sich magnetisch nicht ganz gleich. Zu derselben Ansicht ist man in jüngster Zeit bereits durch Streuungsmessungen gekommen. Durchschnittlich erhalten wir für eine Stoßfuge den Ausschlag von 54,2 Skalenteilen. Dieser stimmt mit dem an erster Stelle in der vorigen Tabelle stehenden Ausschlag von 56,5 gut überein.

Wir haben noch der weiteren Kontrolle wegen dieselbe magnetische Spannung — sie bildet die Scherung des Epsteinschen Apparates — nach Fig. 16 gemessen. Für die Stoßfuge links ergaben sich + 25,2, für die Stoßfuge rechts + 31,4 Skalenteile. Für einen Weg parallel dem Epsteinbündel in der Entfernung gleich der Länge des magnetischen Spannungsmessers beobachteten wir + 0,4 Skalenteile. Insgesamt ergibt sich somit ein Ausschlag von 57,0 Skalenteilen, der sich nur sehr wenig von dem Werte 56,5 der Tabelle unterscheidet.

Man sieht, wie schön

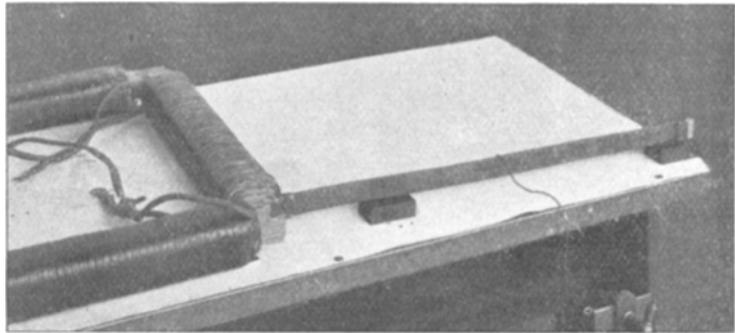


Fig. 16.

die Methode die in stromlosen Gebieten vorhandene Unabhängigkeit des magnetischen Linienintegrals vom Wege zum Ausdruck bringt.

Auf weitere Untersuchungen am Epsteinschen Apparat kommen wir später zurück.

6. Ausblick. Mit dem magnetischen Spannungsmesser wird man am Epsteinschen Apparat, am Joch, ja sogar in der freien Spule absolute und genaue magnetische Messungen ausführen können. Wir sind augenblicklich mit der Ausarbeitung passender Apparaturen beschäftigt und werden über unsere Ergebnisse in dieser Zeitschrift berichten. Das Streben wird sich zweckmäßig dahin richten, nicht unmittelbar die magnetische Spannung im Eisen

nach Art der Fig. 13, sondern ihre Abweichung von einer Umlaufspannung nach Art der Fig. 14 zu messen.

Der magnetische Spannungsmesser ermöglicht aber auch die Bestimmung der magnetischen Spannung (aufgewandten Amperewindungen) für irgend einen Teil des magnetischen Kreises einer elektrischen Maschine. Mag es sich nun um das Joch, die Magnet-schenkel, den Luftspalt, die Zähne oder den Anker handeln. Auch nach dieser Richtung hin sollen in der Reichsanstalt Versuche angestellt werden.

Bei Verwendung von Wechselstrom dürfte sich der magnetische Spannungsmesser in Verbindung mit dem Oszillographen, Vibrationsgalvanometer und dem Quadranten-elektrometer ein weites Anwendungsgebiet erobern. Schließlich eignet er sich auch für den Unterricht zur Demonstration der Eigenschaften des Linienintegrals eines Vektors.

Sicherheits- und Empfindlichkeitsfaktor des Leitungsschutzsystems von Merz und Price.

Von

Karl Kuhlmann, Berlin-Pankow.

(Fortsetzung aus Heft 3, S. 124.)

5. **Untersuchung der Schaltung II.** Fig. 2, 9, 10, 11, 12, 13. Wir behandeln nunmehr die Schaltung II und hierbei besonders den Einfluß des Parallelwiderstandes zu den primären Stromwandlerklemmen. Herr Price, der Erfinder des Differential-schutzsystems, hatte, wie erwähnt, dies Mittel ursprünglich vorgesehen, um den Verlauf der sekundären Klemmenspannung als Funktion der Primärstromstärke geradlinig zu gestalten. Wie wir aber oben gesehen haben, ist eine Sättigung der Strom-wandler in geringen Grenzen wohl zulässig. Der Parallelwiderstand hat aber andere, ganz wesentliche günstige Veränderungen in dem Verhalten des Schutzsystems zur Folge. Diese sind:

1. Ein sehr großer Teil des Hauptstromes geht bei fehlerfreier Hauptleitung durch den Widerstand, da die resultierende Impedanz des Stromwandlers wegen der Gegenschaltung der sekundären Wicklungen sehr groß ist. Höhere Harmonische gehen daher nur zum Teil in den Stromwandler bzw. den Relais- oder Hilfskreis. Der Parallelwiderstand wirkt gewissermaßen reinigend auf die Stromkurve ein, die in den Hilfskreis transformiert wird.

2. Im Falle eines Fehlers am Hauptkabel und einseitiger Speisung des Fehlers bietet der zweite Stromwandler ein und derselben Phasenleitung dem Relaisstrom eine sehr geringe Impedanz dar, da der Stromwandler an den Gegen- oder Hochspannungsklemmen kurz geschlossen ist. Es reicht somit auch ein kleiner Fehlerstrom im treibenden Strom-wandler aus. Im Falle eines Fehlers geht wegen des kleiner gewordenen Hilfskreiswiderstandes mehr Strom durch den Stromwandler als im normalen Betriebe, so daß der Strom-verlust durch den Widerstand ausgeglichen wird; der Widerstand drückt also die Empfind-lichkeit kaum herab.

3. Der Widerstand hält den Stromwandler selbst bei kleinen Eisenquerschnitten im normalen Betriebe auf geringer Sättigung, so daß die Kurve der Spannung an den Sekundärklemmen nicht oder kaum verzerrt wird.

4. Die sekundäre Stromwandlerspannung ist in erster Linie abhängig von dem Win-dungsverhältnis und dem Spannungsabfall im Widerstande und fast unabhängig von der Höherer Frequenz des das Hauptkabel durchfließenden Stromes. Denken wir uns in der Haupt-leitung einen sinusförmigen Strom von konstanter Intensität fließen und die Frequenz immer mehr erhöht, so bleibt die Sekundärspannung fast konstant. Diese sinkt ferner mit wachsendem s_1 .