

Grundwissen des Fernmeldedienstes

Band IIa

***Einführung
in die Grundlagen der Elektrotechnik***



Herausgeber: Deutsche Postgewerkschaft, Hauptvorstand

Frankfurt (Main)

Grundwissen des Fernmeldedienstes

Band IIa

Einführung in die Grundlagen der Elektrotechnik

Teil III

Deutsche Postgewerkschaft, Verlag GmbH.

Frankfurt (Main) · Savignystraße 43

Vorwort zur 3. Auflage

Die Neuauflage dieses Bandes (die dritte innerhalb von drei Jahren) beweist auch hier wieder, welcher Beliebtheit sich unsere Bändchen erfreuen und daß wir auf dem richtigen Wege sind. Wir haben daher an dem Inhalt nichts geändert. Möge auch diese 3. Auflage dem lern- und wißbegierigen Fernmeldetechniker, gleich, welcher Laufbahnrichtung, eine ebenso große Hilfe geben wie den Kollegen, die bereits die 1. und 2. Auflage verwendet haben.

Frankfurt (Main), im Juni 1956
Savignystraße 43

Inhaltsverzeichnis

Der Magnetismus

A. Ferro- oder Eisenmagnetismus

Was ist Magnetismus?	1	7
Form und Aufbau der Magnete	2	7
Magnetpole	2	8
Indifferenzzone	2	8
Magnetische Achse	2	8
Das magnetische Grundgesetz	3	8
Die magnetische Influenz	4	10
Molekularmagnete	4	10
Das magnetische Feld	5	11
Kraftlinien, Bedeutung und Darstellung	5	11, 12
Begriff „magnetisches Feld“	5	13
Richtung der Kraftlinien (des Kraftflusses)	5	13
Homogenes Feld	5	13
Streuungsfeld	5	13
Kraftlinien- (Kraftfluß-) dichte	5	14
Feldstärke	5	7, 14, 15
Eisen in einem Magnetfelde	6	7, 14, 16
Magnetischer Widerstand R_m	6	15
Magnetische Leitfähigkeit $\frac{1}{R_m}$	6	15
Magnetische Schirmwirkung	6	15
Kraftfluß	6	15, 17, 30
Feldstärke $\mathfrak{H}$, Kraftflußdichte $\mathfrak{B}$ und Permeabilität μ	7	15
Feldstärke $\mathfrak{H}$	7a	15
Kraftflußdichte $\mathfrak{B}$	7b	16
Permeabilität μ	7e	16, 29
Der Kraftfluß Φ	8	17, 30
Dia- und Paramagnetismus	9	17

B. Elektromagnetismus

Magnetische Wirkung eines stromdurchflossenen Leiters	10	18
Magnetnadel und stromdurchflossener Leiter	10	18
Richtung der Kraftlinien eines stromdurchflossenen Leiters	10	19
Magnetfeld einer stromdurchflossenen Spule	11	19
Polbestimmungsregel (Rechte-Hand-Regel)	12	21
Die Feldstärke $\mathfrak{H}$ einer stromdurchflossenen Spule	13	22
Magnetometer	13	23
Die Aw-Zahl	13	24
Feststellung der Feldstärke $\mathfrak{H}$ in Aw/cm bei einer stromdurchflossenen Spule	13	25
Eisen in einer stromdurchflossenen Spule	14	26
Restmagnetismus (Remanenz)	14	27
Koerzitivkraft	14	27
Magnetische Sättigung	14	27
Magnetisierungskurven	15	27
Die Permeabilität μ des Eisens	16	29
Absolute Permeabilitätskonstante μ_0	16	29
Relative Permeabilitätskonstante μ_r	16	29
Der Kraftfluß Φ	17	30
Entmagnetisierungskurve	18	30

Grundsätzliches über Wechselstrom	19	31
Positive und negative Halbwellen	19	32
Periode	19	32
Die Frequenz f	19	32
Verhalten von Eisen im magnetischen Wechselfeld	20	32
A. Die Hysteresis	20	32
B. Wirbelströme	20, 29	34, 44

Die Induktion

A. Magnetinduktion	21	34
B. Elektroinduktion	22	36
Zusammenfassung	23	38
Abhängigkeit der Induktionsspannungen		
a) von der Änderungsgeschwindigkeit des Kraftflusses	24	38
b) von der Windungszahl	24	38
c) von der Windungsfläche	24	39
d) von dem Eisenschluß	24	39
Richtung des Induktionsstromes	25	41
Die Lenzsche Regel	26	42
Richtung des Primär- und Sekundärstromes bei Wechselstrom	27	42
Wärmewirkung des Induktionsstromes	28	43
Wirbelströme	29	44
Induktion auf Fernmeldeleitungen	30	44
Kreuzung der a- und b-Adern	30	44
Erzeugung von Wechselspannungen in Maschinen	31	45
Kurbelinduktor	31	46

Der Transformator

Allgemeines	32	46
Aufbau des Transformators	33	46

Wirkungsweise des Transformators

Sekundärspannung im Verhältnis zur Primärspannung	34	47
EMK und Windungsverhältnis	34	48
Das Übersetzungsverhältnis $\bar{u}$	34	48
Übersetzungsverhältnis der Ströme	35	49
Primär- und Sekundärleistung	36	50
Nutzleistung und Leistungsverlust	37	50
Innerer Widerstand von Transformatoren	38	51

Anwendung des Transformators

a) Der Hochspannungstransformator	39	51
Energieverluste auf Leitungen	39	51
Verringerung der Energieverluste	39	52, 53
b) Der Hochstromtransformator	39	53
Wärmeentwicklung eines stromdurchflossenen Leiters	39	54
Ausnutzung der Stromwärme	39	54
Transformatoren in der Fernmeldetechnik	40	54
Die Induktionsspule	40	54
Der Übertrager	40	54
Die Viererschaltung	41	55
Begriff „Stammleitung“	41	56
Vierer oder Phantom	41	56
Platzwechsel bzw. Viererverseilung	41	57
Simultanschaltungen	42	57

Einführung in die Grundlagen der Elektrotechnik Teil III

Der Magnetismus

A) Ferro- oder Eisenmagnetismus

(1) Was ist Magnetismus?

Der Magnetismus ist — wie die Elektrizität — eine Erscheinung, die man auch nur an ihren Wirkungen erkennen kann.

Wir alle kennen einen Magneten und wissen, daß ein solcher Magnet kleine Eisenstücke anziehen und festzuhalten vermag*). Das ist beispielsweise eine Wirkung des Magnetismus, nämlich eine Kraftwirkung; weitere Wirkungen werden wir noch kennenlernen.

Wir wissen ferner, daß ein Magnet aus Eisen, richtiger gesagt, aus sehr hartem Eisen — also Stahl — besteht, und daß wir in der Lage sind, mittels eines Magneten ein anderes Stahlstück (etwa eine Stricknadel) durch Bestreichen mit dem Magneten auch magnetisch zu machen. **Die magnetische Eigenschaft ist also übertragbar.**

(2) Form und Aufbau der Magnete

Die gebräuchlichsten Formen der Magnete sind in Abb. 1 a—d dargestellt. Abbildung 1 a zeigt einen Stabmagneten, Abb. 1 b und c Hufeisenmagnete verschiedener Ausführung, Abb. 1 d eine Magnetenadel.



Abb. 1 a
Stabmagnet

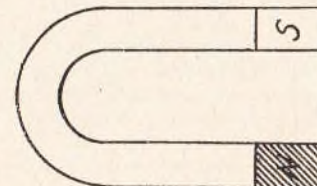


Abb. 1 b
Hufeisenmagnet

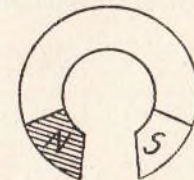


Abb. 1 c
Hufeisenmagnet



Abb. 1 d
Magnetenadel

*) Anm.: Diese Erscheinung wurde bereits vor etwa 2500 Jahren an bestimmtem Eisenerz in der Nähe der Stadt Magnesia in Kleinasien entdeckt, daher der Name „Magnet“. Man nennt diese Magnete „natürliche“ im Gegensatz zu den „künstlichen“, die in der Technik ausschließlich verwendet werden und mit denen wir uns in Zukunft nur beschäftigen wollen.

Die Selbstinduktion

	Ziffer	Seite
Allgemeines über Selbstinduktion	43	58
Die EMK der Selbstinduktion	43	59
Die Richtung des Selbstinduktionsstromes	44	59
Zusammenfassung	45	60
Die Induktivität L	46	60
Abhängigkeit der Induktivität	46	60, 61
Einheit der Induktivität	46	61
Einheit des Induktionsflusses	46	61
Verhalten eines induktiv belasteten Gleichstromkreises bei seiner Schließung	47	61
Desgleichen bei seiner Öffnung	48	62
Löschung des Öffnungsfunkens	49	63
Stromkurve eines induktiv belasteten Stromkreises	50	63
Schaltzeit	50	65
Bedeutung der Schaltzeiten in der FM-Technik	51	65
Induktionsfreie Widerstände	52	66
Wirkung von Induktivität bei zerhacktem Gleichstrom und Wechselstrom	53	66
Scheinwiderstand	53	67
Drosselspule	53	68

Unsere magnetische Stricknadel wäre demnach ein Stabmagnet. Einen solchen Magneten wollen wir nun näher betrachten (Abb. 2).

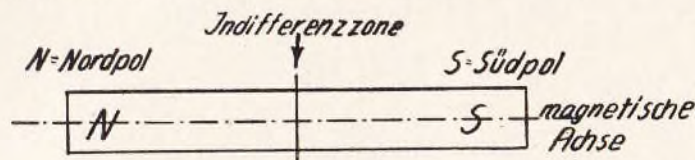


Abb. 2

Wir wissen aus Erfahrung, daß eine frei bewegliche Magnetnadel sich in eine bestimmte Richtung stellt, nämlich in die Nord-Süd-Richtung. Warum das so ist, werden wir später sehen. Eine Nadelspitze zeigt also zum magnetischen Nordpol der Erde, die andere in Richtung des Südpols. Das gleiche tut auch ein Stabmagnet, wenn wir ihn in der Mitte frei beweglich aufhängen. Wir wollen als gegeben hinnehmen, daß **jeder** Magnet **zwei** Pole hat, die an seinen Enden liegen. Man bezeichnet sie mit Nordpol (N) und Südpol (S) [vgl. Abb. 1 a—d].

Aus Erfahrung wissen wir ferner, daß ein Magnet Eisenstückchen anzieht und festhält, und zwar am stärksten an den **Enden**, den **Polen**. Es müssen also Kräfte vorhanden sein, die dieses Anziehen und Festhalten verursachen. In dem Raum um die Mitte des Magneten erscheinen diese Kräfte gleich stark, man spricht hierbei von einer **Indifferenzzone** (s. hierzu Ziffer 5, Abs. 7). Die Längsachse des Magneten bezeichnet man mit **magnetischer Achse** (Abb. 2).

(3) Die Bestimmung magnetischer Pole Das magnetische Grundgesetz

Wir haben bis jetzt Magnete betrachtet, die den ihnen einmal aufgedrückten Magnetismus dauernd behalten. Man nennt solche Magnete daher **Dauermagnete**. Der Stoff, aus dem sie bestehen, ist hochwertiger Stahl. Anders verhält sich weiches Eisen; es läßt sich schnell und stark magnetisieren, behält aber seinen Magnetismus nicht. Die Gründe für das verschiedenartige Verhalten werden wir im Abschnitt B „Elektromagnetismus“ näher beleuchten.

Hängen wir einen Dauermagneten (Stabmagnet) gem. Abb. 3 an einem Faden frei auf, so wird er, wie die Magnetnadel, die Nord-Süd-Richtung einnehmen. Den Pol, der zum magnetischen Südpol der Erde zeigt, nennen wir

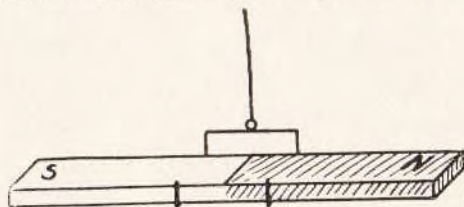


Abb. 3

Nordpol, sein entgegengesetztes Ende nennen wir **Südpol**. Den Nordpol wollen wir kenntlich machen, etwa durch ein aufgemaltes „N“ oder durch einen roten Farbanstrich.

Wir nehmen jetzt einen zweiten Stabmagneten B und machen folgenden Versuch: Wir nähern den **Nordpol** des Stabmagneten B dem **Nordpol** des aufgehängten Magneten A: der aufgehängte Magnet A weicht aus (Abb. 4).

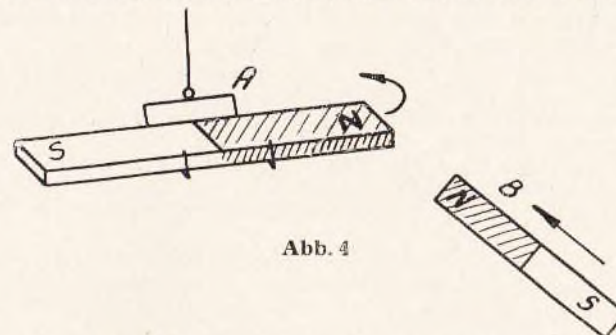


Abb. 4

Nun nähern wir den **Südpol** des Stabmagneten B dem **Nordpol** des aufgehängten A: der **Nordpol** des aufgehängten Magneten A nähert sich dem Südpol des Magneten B und bleibt an ihm haften (Abb. 5).

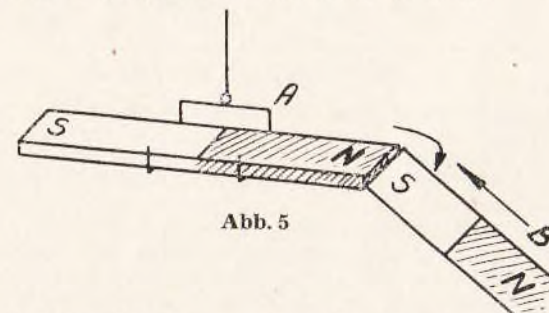


Abb. 5

Drehen wir den Magneten B um und machen den gleichen Versuch, so werden wir dasselbe Ergebnis haben: der Südpol des Magneten B zieht den Nordpol des Magneten A an, die beiden Südpole stoßen sich jedoch ab. Wir haben nun das magnetische Grundgesetz nachgewiesen:

Gleichnamige magnetische Pole stoßen sich ab, ungleichnamige ziehen sich an.

Die gleichen Versuche lassen sich selbstverständlich mittels zweier Magnetnadeln oder mit einem Stabmagneten und einer Magnetnadel durchführen*).

*) Anm.: Aus diesem Grunde stellt sich eine Magnetnadel oder ein beweglich aufgehängter Stabmagnet in die magnetische Nord-Süd-Richtung ein. Die Erde wirkt wie ein großer Magnet, dessen Südpol in seiner geographischen Lage etwas vom geographischen Nordpol abweicht. Man spricht zwar landläufig vom magnetischen Nordpol der Erde, um die geographische Lage zu kennzeichnen, physikalisch ist diese Bezeichnung jedoch nicht vertretbar.

(4) Die magnetische Influenz

Auf Grund der Versuche gem. Ziffer 3 können wir jetzt erklären, warum ein Magnet ein Stück unmagnetisches Eisen anzuziehen vermag. Zuvor wollen wir einen Versuch machen.

Wir nehmen eine magnetische Stricknadel und brechen sie in der Mitte durch. Mit Hilfe einer Magnetrudel stellen wir fest, daß **jedes** Ende der abgebrochenen Stricknadel wiederum einen Nord- und einen Südpol hat.

Wir brechen die Stricknadelenden nochmals durch: jedes Stück zeigt gleichermaßen nord- und südpolare Eigenschaften, d. h., daß jedes Stückchen der ehemaligen Stricknadel ein Magnet ist. Wir können uns nun vorstellen, daß wir das Zerkleinern der Stricknadel immer weiter fortsetzen und gelangen dabei zu den kleinsten Teilchen des magnetisierten Eisens, den Molekülen (s. Band I a, S. 55 und Band I b, Ziffer 13). Auch diese Moleküle zeigen die gleichen magnetischen Eigenschaften wie die ursprüngliche Stricknadel; sie besitzen je einen Nord- und einen Südpol. Man spricht daher von **Molekularmagneten**.

Bei unmagnetisiertem Eisen liegen diese Molekularmagnete ungeordnet durcheinander, so daß die magnetischen Wirkungen sich aufheben: das Eisen wirkt nach außen hin unmagnetisch. Abb. 6 zeigt eine solche ungeordnete Lage.



Abb. 6

Ungeordnete Lage der Molekularmagnete

Hier sind die Molekularmagnete sehr groß gezeichnet und haben die Form kleiner Stabmagnete, bei denen die schwarzen Enden die Nordpole darstellen sollen.

Nähern wir dieses unmagnetische Stück Eisen einem Magneten, so ordnen sich die Molekularmagnete nach dem magnetischen Grundgesetz, d. h., die Südpole der Molekularmagnete werden vom Nordpol des Dauermagneten angezogen bzw. umgekehrt, d. h., die Nordpole der Molekularmagnete von dem Südpol des Dauermagneten.

Das unmagnetische Stück Eisen ist unter dem Einfluß des Dauermagneten selbst zu einem Magneten geworden (Abb. 7). Diese Erscheinungen nennt man **magnetische Influenz** (magnetische Beeinflussung)*).

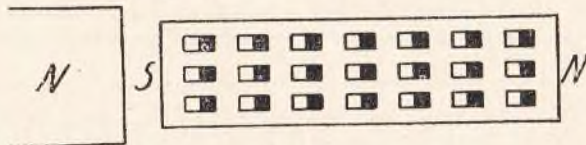


Abb. 7

Beeinflussung der Molekularmagnete eines Eisenstückes durch einen Dauermagneten

*) Anm.: Vgl. „Elektrische Influenz“, Bd. I b, Ziffer 29.

(5) Das magnetische Feld

Wir führen jetzt folgenden Versuch durch:

Ein Stabmagnet wird auf den Tisch gelegt. Darüber legen wir ein Stück Pappe, das den Magneten völlig bedeckt. Wir nehmen nun eine Streubüchse (die wir uns selbst anfertigen können), füllen sie mit Eisenfeilspänen und streuen einen Teil der Späne auf die Pappe. Wir sehen, daß die Eisenfeilspäne bereits eine bestimmte Lage einnehmen, die durch die **magnetische Influenz** bedingt ist. Jedes Feilspänchen ist jetzt zu einem kleinen Magneten geworden, das sich in eine bestimmte Richtung stellt. Man kann sich die Feilspänchen durch winzige Magnetrudeln ersetzt denken. Klopfen wir leicht gegen die Pappe, so wird das Bild noch deutlicher (Abb. 8).

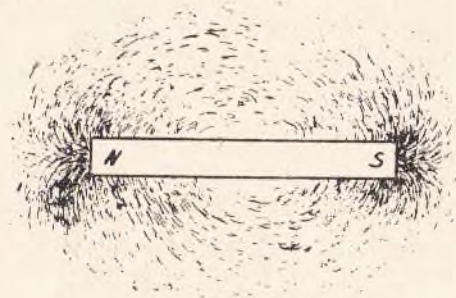


Abb. 8

Kraftlinienbild eines Stabmagneten

Wir erkennen, daß an den Polen eine Zusammenballung der Feilspäne stattgefunden hat und daß sie sich, von den Polen ausgehend, bogenförmig geordnet haben. Wenn wir die Eisenfeilspäne miteinander verbinden könnten, so würden wir eine Anzahl mehr oder weniger gekrümmter (bogenförmiger) Linien erhalten, die wir **Kraftlinien** nennen. Was diese Kraftlinien bedeuten, wird weiter unten erklärt werden.

Nun nehmen wir einen Hufeisenmagneten und legen ihn, wie in Abb. 9 gezeigt, hin, bedecken ihn ebenfalls mit der Pappe und streuen Eisenfeilspäne auf diese. Wir erkennen, daß die Kraftlinien viel dichter verlaufen als bei dem Stabmagneten in Abb. 8.

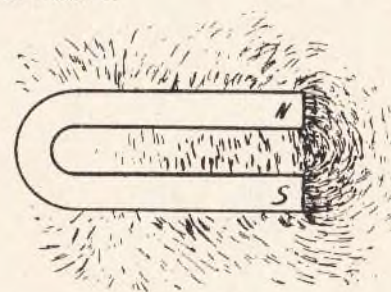


Abb. 9

Kraftlinienverlauf eines liegenden Hufeisenmagneten

Stellen wir den Hufeisenmagneten hoch (Abb. 10 a), so sehen wir, daß die Kraftlinien zwischen den Polen parallel verlaufen und nur am Rande etwas ausgebogen sind.

Abb. 10 b zeigt das Kraftlinienbild eines hochgestellten Stabmagneten kreisförmigen Querschnittes. Wir sehen hier, daß die Kraftlinien strahlenförmig (radial) vom Mittelpunkt des Pols aus verlaufen.

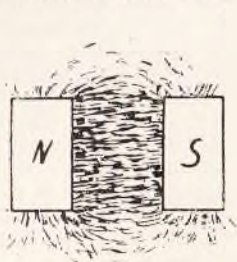


Abb. 10 a

Kraftlinienbild eines hochgestellten Hufeisenmagneten

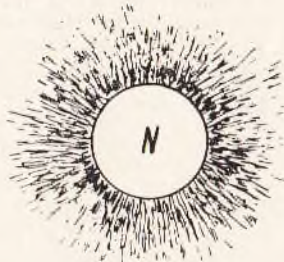


Abb. 10 b

Kraftlinienbild eines hochgestellten Stabmagneten (runder Querschnitt)

Stellen wir eine oder mehrere kleine Magnetnadeln in die Nähe des Dauermagneten, so stellen sie sich gleichfalls in Richtung der Kraftlinien; denn es besteht ja jetzt kein Unterschied mehr zwischen den Eisenfeilspänen, die durch die magnetische Influenz zu kleinen Magneten geworden sind, und den Magnetnadeln.

Das Ordnen der Feilspäne oder die Drehung der Magnetnadeln in Richtung der ungleichnamigen Pole (vgl. Ziffer 3) erfordert eine Kraft, und diese Kraft ist feststellbar im Raum um den Magneten, wenn hierin Magnetpole vorhanden sind (s. übernächsten Absatz). Auch die Indifferenzzone (Ziffer 2, letzter Absatz und Abb. 2) ist jetzt erklärbar. Eine Magnetnadel, die mit ihrem Drehpunkt **genau** in der Mitte zwischen den beiden Polen eines Stabmagneten aufgestellt ist, wird von beiden Polen mit der **gleichen** Kraft angezogen; sie stellt sich mit ihrer Längsachse parallel zum Magneten. Nicht zuletzt ist diese Kraft auch die Ursache für das Ausrichten der Molekularmagnete eines Eisenstückes, also der magnetischen Influenz, sowie auch für die abstoßende Wirkung gleichnamiger Pole.

Abb. 11 zeigt den Kraftlinienverlauf zwischen zwei Stabmagneten gleicher Polstärke, die mit ihren gleichnamigen Polen gegenüberstehen. Wir erkennen an den auseinanderlaufenden Kraftlinien, daß abstoßende Kräfte wirksam sind.

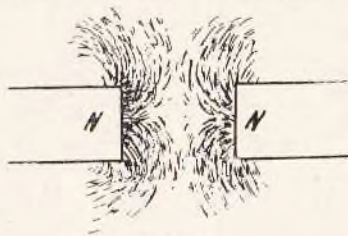


Abb. 11

Kraftlinienbild zweier gleichnamiger Pole

Der Raum zwischen den beiden Polen eines Magneten ist demnach in einen **Zustand versetzt worden**, in dem sowohl auf andere in diesem Raum befindliche Dauermagnete (Magnetnadeln) als auch auf ursprünglich unmagnetische Eisenstücke **eine Kraft** ausgeübt wird.

Diesen Zustand des Raumes nennen wir das magnetische Feld. Er erfüllt den Raum um die Magnetpole lückenlos.

Das magnetische Feld ist der Zustand des Raumes, in dem auf Magnetpole, die sich in diesem Raum befinden, eine Kraft wirkt*).

Die eingangs erwähnten **Kraftlinien** dienen der Sichtbarmachung des Feldes in bestimmten Ebenen und sind ein zeichnerisches und rechnerisches Hilfsmittel, um diesen Zustand des Raumes darzustellen.

Wir haben festgestellt (vgl. Abb. 8 und 9), daß die **Kraftliniendichte** um so größer ist, je näher die Pole eines Magneten einander gegenüberstehen und je stärker die magnetischen Kräfte zwischen den Polen sind. Die Kraftliniendichte kann also ein Maß für die **Stärke der Kraftwirkung** in einem magnetischen Feld angesehen werden.

Betrachten wir nun die Abb. 10 a in einer etwas anderen Darstellung, z. B. wie in Abb. 12.

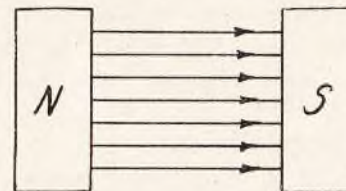


Abb. 12

Hier ist nur eine geringe Zahl von Kraftlinien gezeichnet, um die Übersichtlichkeit zu wahren. Die Pfeile geben den Kraftlinienverlauf an.

Man hat festgelegt, daß die Kraftlinien am **Nordpol** eines Magneten **austreten**, durch die Luft wandern, am **Südpol** wieder **eintreten** und durch das Eisen wieder zum Nordpol gelangen. Es handelt sich hierbei also um einen **geschlossenen** Kraftlinienverlauf.

Merke:

Die Kraftlinien treten am Nordpol eines Magneten aus und am Südpol wieder ein.

Die Linien in Abb. 12 laufen parallel. Man spricht hier von einem **homogenen** (gleichartigen) Feld. Bei den nicht parallel laufenden, bogenförmigen Linien spricht man von einem **Streufeld**. Wir beschäftigen uns in erster Linie in Zukunft mit dem **homogenen** Feld.

Wir stellen uns vor, daß wir die gesamte Fläche zwischen den Polen in einzelne Quadratcentimeter aufteilen und zählen nun die Anzahl der Kraftlinien, die durch einen Quadratcentimeter (cm²) Luft hindurchgehen (Abb. 13).

*) Anm.: Vgl. elektrisches Feld und Versuche hierzu (Bd. Ib, Ziffer 26).

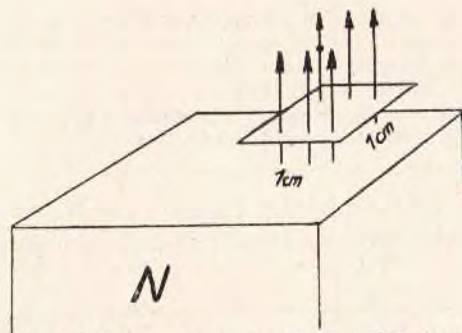


Abb. 13

Wir erhalten etwa ein Bild, das mit einem Papierstückchen von 1 cm² Fläche verglichen werden kann, durch das eine Anzahl Stecknadeln gesteckt wird. Die Anzahl dieser Kraftlinien je cm² Luft ist ein Maß für die **Kraftliniendichte**, d. h., je mehr Kraftlinien je cm² vorhanden sind, um so stärker ist die Kraftwirkung auf einen anderen Magneten bzw. auf ein Stück Eisen, das sich in diesem Feld befindet.

Diese Kraftliniendichte darf jedoch nicht mit dem Begriff der **Feldstärke** verwechselt werden.

Unter der **Feldstärke** (Formelzeichen $\mathfrak{H}$) versteht man die Kraft, die auf einen bestimmten Pol, den sogenannten „Einheitspol“, einwirkt. Die Einheit der Feldstärke, nämlich ein Oersted (Oe), ist dann vorhanden, wenn auf diesen Einheitspol eine Kraft von etwa $\frac{1}{1000}$ g = 1 mg wirkt. Wo diese Kraft ist, soll eine Feld- oder Kraftlinie je cm² gezeichnet werden.

(6) Eisen in einem Magnetfelde

In ein homogenes Magnetfeld, etwa zwischen die Pole eines Hufeisenmagneten, bringen wir ein Stück Eisen, legen wieder unser Papierstück oben auf und bestreuen die Anordnung mit Eisenfeilspänen (Abb. 14).

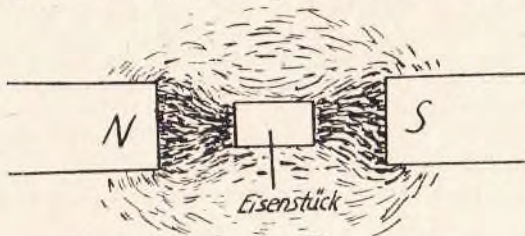


Abb. 14

Eisenstück in einem homogenen magnetischen Feld

Wir stellen fest, daß eine erheblich größere Anzahl von Kraftlinien durch das Eisen hindurchgeht als vorher durch die Luft, ja, daß ein großer Teil der Kraftlinien, die ursprünglich geradlinig vom Nord- zum Südpol verliefen, gewissermaßen von dem Eisen angesaugt werden und in verdichtetem Maße durch dieses hindurchgehen. Die Kraftlinienzahl, die durch einen cm² des Eisens geht, die **Kraftflußdichte** also, ist im Eisen eine größere als in Luft. Es ist so, als ob das Eisen die Kraftlinien besser leitet als die Luft, das Eisen demnach

den Kraftlinien weniger Widerstand entgegensetzt als die Luft. Man kann also — wie beim elektrischen Strom — von einem **magnetischen Widerstand** und damit auch von einer **magnetischen Leitfähigkeit** sprechen. Auch hier verhalten sich magnetischer Widerstand (R_m) und magnetische Leitfähigkeit ($\frac{1}{R_m}$) umgekehrt zueinander. Ist der magnetische Widerstand R_m klein (was insbesondere bei Eisen der Fall ist), so ist die magnetische Leitfähigkeit $\frac{1}{R_m}$ groß und umgekehrt.

Auf der guten magnetischen Leitfähigkeit des Eisens beruht auch die **magnetische Schirmwirkung**. Ein in einem Eisenzylinder befindlicher, magnetischen Kräften gegenüber empfindlicher Körper wird vom magnetischen Feld nicht beeinflusst. Die Kraftlinien fließen durch das Eisen und nicht durch den Hohlraum des Zylinders.

Abb. 15 zeigt einen Eisenring in einem homogenen magnetischen Felde. Das Innere des Ringes wird vom magnetischen Kraftfluß nicht durchsetzt.

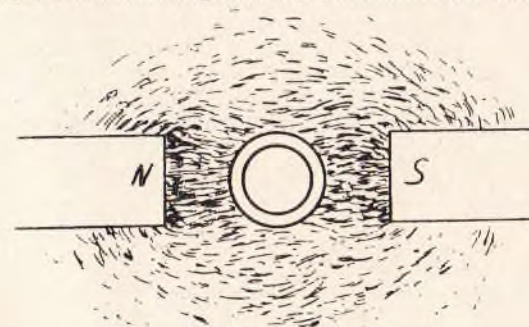


Abb. 15

Magnetische Schirmwirkung eines Eisenringes in einem Magnetfeld

Man kann nun die Zusammenfassung **aller** Kraftlinien in einem homogenen Felde, die man mit **Kraftfluß** bezeichnet, mit dem elektrischen Strom vergleichen, dessen Stärke ja bekanntlich wesentlich von der Leitfähigkeit bzw. dem Widerstand des von ihm durchflossenen Stoffes abhängt.

Wir wollen im folgenden auch nur von **Kraftfluß** sprechen und den Ausdruck „Kraftlinien“ möglichst meiden.

Der verstärkte Kraftfluß durch das Eisen kommt dadurch zustande, daß sich in und um das Eisenstück infolge der magnetischen Influenz ein Feld gebildet hat. Dieses sogenannte „innere magnetische Feld“ überlagert nun das äußere. Das Streufeld des magnetisch influenzierten Eisenstückes verläuft gegen das influenzierende Feld und schwächt dieses; im Innern verläuft es in gleicher Richtung, so daß die Gesamtkraftflußdichte im Eisen einen ungleich höheren Wert annimmt als ursprünglich in Luft allein.

(7) Feldstärke $\mathfrak{H}$, Kraftflußdichte $\mathfrak{B}$ und Permeabilität μ

Wir wollen das in den Ziffern 5 und 6 Behandelte kurz wiederholen und die ermittelten Beziehungen in einfache Formeln kleiden.

a) Ein magnetisches Feld ist vorhanden, wenn auf einen Magnetpol eine Kraft wirkt. Die Einheit der Feldstärke $\mathfrak{H}$ ist das Oersted (Oe). Sie ist dann

vorhanden, wenn auf einen sogenannten „Einheitspol“ eine Kraft von etwa $\frac{1}{1000} \text{ g} = 1 \text{ mg}^*$ wirkt.

- b) Die Anzahl der Kraftlinien pro cm^2 wird mit **Kraftflußdichte** (Formelzeichen $\mathfrak{B}$) bezeichnet. Die Einheit ist das **Gauß****. Ein Gauß bedeutet, daß eine Kraftlinie durch 1 cm^2 Luft, Eisen oder andere magnetisch leitende Stoffe hindurchgeht.
(Die Kraftflußdichte wird zuweilen auch mit „magnetischer Induktion“ bezeichnet.)
- c) Herrscht in einem magnetischen Feld die Feldstärke von 1 Oersted [s. a)], so entspricht dieses einer Kraftflußdichte von 1 Gauß; es geht also eine Kraftlinie durch 1 cm^2 Luft.
- d) Wird ein Stück Eisen in ein magnetisches Feld gebracht, so steigt die Kraftflußdichte im Eisen bedeutend. Sie kann — je nach Art des Eisens — mehrere hundert bis tausend Male größer sein als in Luft (vgl. Abb. 14).
- e) Zwischen der Kraftflußdichte in Luft und der Kraftflußdichte in Eisen bestehen bestimmte Zahlenverhältnisse, die durch Versuche festgelegt sind. Die Zahl, die uns angibt, um wievielfach die Kraftflußdichte in Eisen größer ist als die in Luft, nennt man die **Permeabilität μ ***** des Eisens.

Die Kraftflußdichte in Eisen ist gleich der Kraftflußdichte in Luft mal der Permeabilität μ , wobei man gem. c) die Beziehungen zwischen der Feldstärke $\mathfrak{H}$ und der Kraftflußdichte in Luft zu beachten hat.

$\mathfrak{B} = \mu \times \mathfrak{H}$	[Gauß]
$\mathfrak{H} = \frac{\mathfrak{B}}{\mu}$	[Oersted]
$\mu = \frac{\mathfrak{B}}{\mathfrak{H}}$	(ohne Einheit)

Die Permeabilität μ ist für Eisen keine feste Zahl, sie hängt von der Art des Eisens und seinem magnetischen Zustand ab. Sie ist nur durch Messungen zu ermitteln. Für alle anderen Stoffe ist μ jeweils eine Konstante, man spricht daher auch von der **Permeabilitätskonstanten**. Für Luft ist $\mu = 1$.

$\mu = 600$ bedeutet, daß die Kraftflußdichte in Eisen 600mal größer ist als in Luft. Beispiel: Ein homogenes magnetisches Feld habe 15 Kraftlinien je cm^2 , d. h., daß $\mathfrak{H}$ 15 Gauß entspricht. Bringt man in dieses Feld ein Stück Eisen, dessen Permeabilität $\mu = 350$ ist, so errechnet sich die Kraftflußdichte $\mathfrak{B}$ zu

$$\mathfrak{B} = \mu \times \mathfrak{H} = 350 \times 15 = 5250 \text{ Gauß.}$$

Die Permeabilität μ und die Kraftflußdichte $\mathfrak{B}$ sind wichtige Größen zur Bestimmung der Magnetisierbarkeit von Eisen. Dieser Abschnitt wird im Kapitel „Elektromagnetismus“ (Ziffern 14, 15) näher behandelt.

*) Genau: mit 1 Dyn = $\frac{1}{981} \text{ g}$ in unseren Breiten.

**) Anm.: Nach dem berühmten deutschen Physiker und Mathematiker Gauß.

***) Anm.: Sprich My, griechischer Buchstabe. Für Permeabilität sagt man wohl auch „magnetische Durchlässigkeit“.

(8) Der Kraftfluß Φ

Der Kraftfluß Φ (Phi, griechischer Buchstabe) ist ein weiterer wichtiger Begriff in der Lehre vom Magnetismus und ihren Anwendungen.

Unter dem Kraftfluß Φ versteht man die Gesamtzahl aller das Flächenstück durchsetzenden Kraftlinien.

Während man unter der Kraftflußdichte $\mathfrak{B}$ die Anzahl der Kraftlinien pro cm^2 versteht, gibt uns der Wert von Φ die Gesamtzahl aller Kraftlinien an, die von einem Magnetpol aus- bzw. durch ein Flächenstück hindurchgehen.

Hierbei kann der Wert von Φ kleiner als der von $\mathfrak{B}$ sein, nämlich dann, wenn die vom Kraftfluß durchsetzte Fläche kleiner als 1 cm^2 ist. Auf der anderen Seite kann Φ größer als $\mathfrak{B}$ sein, nämlich dann, wenn die durchsetzte Fläche größer als 1 cm^2 ist. Der Kraftfluß Φ ist demnach die Kraftflußdichte $\mathfrak{B}$ mal der Fläche F in cm^2 .

$$\Phi = \mathfrak{B} \times F, \text{ oder, da } \mathfrak{B} = \mu \times \mathfrak{H} \text{ ist, so ist}$$

$$\Phi = \mu \times \mathfrak{H} \times F \text{ [Maxwell]}$$

Die Einheit des Kraftflusses ist das Maxwell*). Ein Maxwell ist also gleich einer Kraftlinie durch das gesamte Flächenstück bzw. die durchsetzte Fläche.

(9) Dia- und Paramagnetismus

Die Permeabilitätskonstante μ beeinflusst nicht nur die Kraftflußdichte in Eisen, sondern auch die Lage jedes festen Körpers zu der Richtung eines magnetischen Feldes. Ist der Wert von μ nämlich größer als 1 ($\mu > 1$), so wird ein solcher Körper infolge seines gegenüber Luft geringeren Widerstandes in **Längsrichtung** zur Richtung des Kraftflusses stehen. Die Kraftlinien suchen sich den Weg des geringsten Widerstandes (vgl. Ziffer 26 und Abb. 14. Bei leicht beweglichen Körpern drehen sich diese in Richtung des Kraftflusses. Alle Körper, die diese Eigenschaft aufweisen, nennt man **paramagnetisch**.

Anders verhalten sich die sogenannten **diamagnetischen** Körper. Bei ihnen ist ihr magnetischer Widerstand **größer** als der der Luft ($\mu < 1$). Die Kraftlinien suchen sich hier auch den Weg des geringsten Widerstandes, und dieser Weg führt durch die Luft. Der im magnetischen Feld befindliche leicht bewegliche Körper wird daher eine Lage einnehmen, die **senkrecht** zum Kraftfluß steht (Abb. 16 a und b).

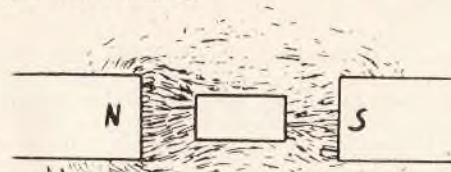


Abb. 16 a

Verhalten eines paramagnetischen (insbesondere ferromagnetischen) Körpers in einem homogenen Magnetfeld. ($\mu > 1$)

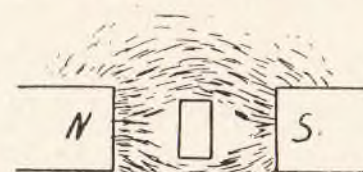


Abb. 16 b

Verhalten eines diamagnetischen Körpers in einem homogenen Magnetfeld. ($\mu < 1$)

*) Anm.: Maxwell, berühmter englischer Physiker.

Stoffe, die ausgesprochene, besonders deutliche paramagnetische Eigenschaften aufweisen, nennt man **ferromagnetische Stoffe** (von ferrum = Eisen). Hierzu gehören — außer Eisen — Nickel, Kobalt, manganhaltige Kupferlegierungen.

B) Elektromagnetismus

(10) Magnetische Wirkung eines stromdurchflossenen Leiters

Wir machen folgenden Versuch:

Ein Draht wird mit den Polen einer Gleichspannungsquelle über einen Reglerwiderstand verbunden und so gespannt, daß er oberhalb und parallel zu einer Magnetnadel verläuft (Abb. 17 a), die ihrerseits in Nord-Süd-Richtung zeigt.

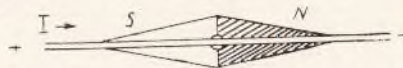


Abb. 17 a

Vorerst wird die Magnetnadel in der ursprünglichen Nord-Süd-Richtung verharren.

Wir verringern jetzt den Widerstand und verstärken damit den Strom. Die Magnetnadel wird aus ihrer ursprünglichen Richtung abgelenkt und stellt sich bei wachsender Stromstärke immer mehr und mehr senkrecht zum stromdurchflossenen Leiter (Abb. 17 b).

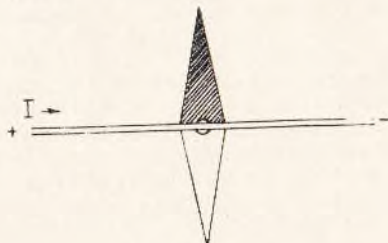


Abb. 17 b

Was schließen wir daraus? Zunächst erscheint uns die Ablenkung der Magnetnadel aus der Nord-Süd-Richtung seltsam, denn wir haben gesehen, daß eine Magnetnadel sich in Richtung eines Kraftflusses einzustellen versucht. Dieser Kraftfluß ist zunächst der, welcher vom magnetischen Nordpol der Erde zu ihrem magnetischen Südpol verläuft. Wenn also die Magnetnadel aus der Nord-Süd-Richtung abgelenkt wird, so muß ein anderer, stärkerer Kraftfluß vorhanden sein, der die Ablenkung verursacht. Dieser Kraftfluß rührt offensichtlich von dem elektrischen Strom her, der den Leiter durchfließt. Da die Magnetnadel sich (bei einer verhältnismäßig hohen Stromstärke) senkrecht zum Leiter stellt, muß man die Folgerung ziehen, daß der Strom um den Leiter ein Magnetfeld aufbaut, das **senkrecht** zum Leiter steht, andernfalls wäre die **senkrechte** Stellung der Magnetnadel zum stromdurchflossenen Leiter nicht erklärbar. *)

*) Anm.: Senkrecht zum magnetischen Feld steht das elektrische Feld (s. Bd. I b, Ziff. 26).

Man hat nun folgendes festgelegt:

Tritt der Strom (technische Stromrichtung von + nach —) in einen Leiter ein, so baut sich das Kraftfeld um den Leiter im **Uhrzeigersinne** auf (Abb. 18).

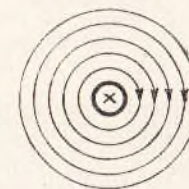


Abb. 18

Kraftlinienrichtung eines stromdurchflossenen Leiters bei Stromeintritt

Der Eintritt des Stromes wird durch ein liegendes Kreuz ($\otimes$) dargestellt, der Austritt durch einen Punkt ($\odot$). Der Kreis stellt den Querschnitt des Leiters dar. Wir erkennen aus Abb. 18, daß man die Kraftlinien als konzentrische Kreise zeichnet, obgleich der **gesamte** Raum um den Leiter von diesen magnetischen Kräften erfüllt wird.

Bei **Stromaustritt** verlaufen die Kraftlinien als konzentrische Kreise im **Gegensinne** des Uhrzeigers um die Leiter (Abb. 19).



Abb. 19

Kraftlinienrichtung eines stromdurchflossenen Leiters bei Stromaustritt

Die Stärke jedes Kraftfeldes nimmt mit wachsender Entfernung von den Polen bzw. von dem stromdurchflossenen Leiter ab. *)

Je weiter man sich also von einem Magnetpol bzw. von einem stromdurchflossenen Leiter entfernt, um so schwächer wirken sich die magnetischen Kräfte aus.

(11) Magnetfeld einer stromdurchflossenen Spule (Solenoid)

Um das Kraftfeld einer stromdurchflossenen Spule, die man **Solenoid** nennt, darzustellen, bedient man sich wiederum der Eisenfeilspäne (Abb. 20).

Wir schneiden zwei Stückchen Pappe so zurecht, daß sie sowohl eine Spule waagerecht umgeben als auch in den Hohlraum der Spule hineinragen. Die Spule schließen wir an eine Spannungsquelle an. Die Stückchen Pappe werden mit Eisenfeilspänen bestreut, der Strom eingeschaltet und die Pappe leicht beklopft. Die Eisenfeilspäne ordnen sich wie bei einem Stabmagneten (vgl. Abb. 8). Bringen wir eine Magnetnadel vor die Öffnung des Spulenkörpers,

*) Genau: Mit dem Quadrat der Entfernung.

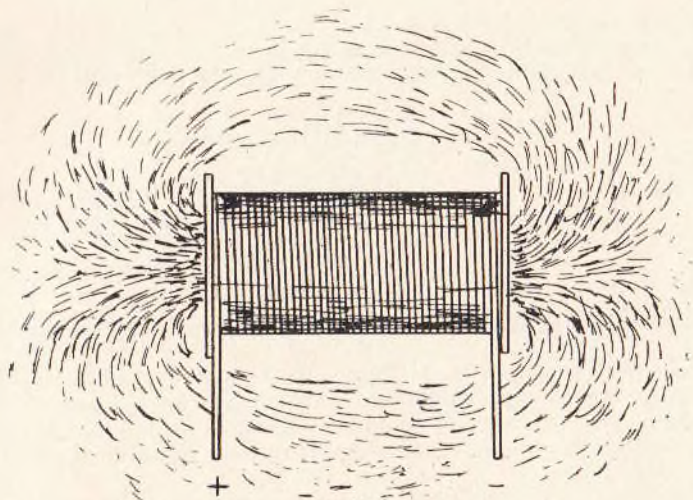


Abb. 20

Kraftfeld einer stromdurchflossenen Spule (Solenoid)

so wird sie auf der einen Seite einen Nordpol, auf der anderen Seite einen Südpol anzeigen.

Vertauschen wir die Stromrichtung, so wird die Magnetnadel die umgekehrte Polarität anzeigen. Vertauschen wir den Wicklungssinn, so wird sich die Polarität der Spule auch ändern.

Woher kommt das? Wir betrachten die Abb. 18 in einer anderen Darstellung und blicken von oben **auf** den Leiter (Abb. 21 a). Der Pfeil zeigt die Richtung des Stromes I an. Die Richtung des Magnetfeldes wäre dann so, wie in Abb. 21 a

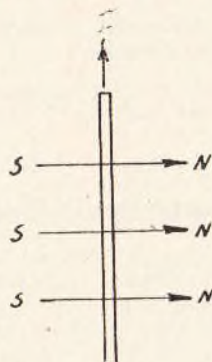


Abb. 21 a

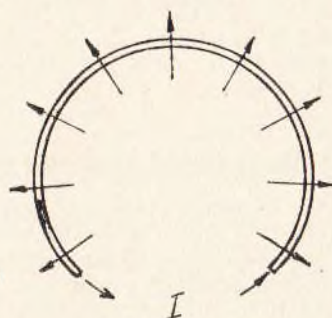


Abb. 21 b

durch Pfeile gekennzeichnet, nämlich senkrecht zum Leiter. Biegen wir den Leiter zu einer Schleife (Abb. 21 b), dann erkennen wir, daß die Feldrichtung

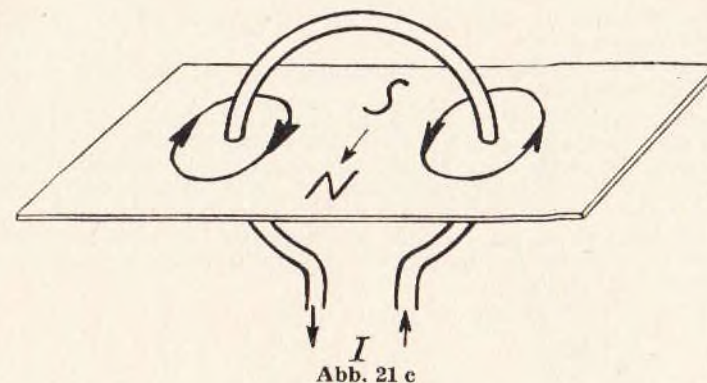


Abb. 21 c

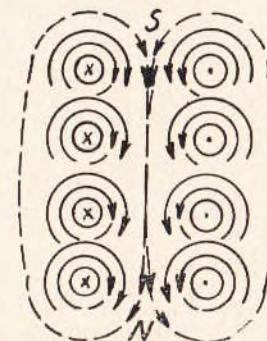


Abb. 21 d

zwar unverändert bleibt, die Kraftlinien aber aus dem Raum innerhalb der Schleife austreten, sich um den Leiter legen und wieder eintreten. Perspektivisch gesehen, erhalten wir ein Kraftlinienbild gem. Abb. 21 c. Die Kraftflußrichtung **innerhalb** der Schleife ist gleich; wir erkennen einen Eintritt und einen Austritt. Der Austritt kennzeichnet einen Nordpol, der Eintritt einen Südpol (vgl. Ziff. 5, S. 13). Die Drahtwindung zeigt demnach die gleichen magnetischen Eigenschaften wie ein Stabmagnet. Geben wir einem Leiter mehrere Windungen, so erhalten wir das Bild 21 d, das vier Windungen im Schnitt zeigt. Es addieren sich hier sowohl die einzelnen Windungsmagnetfelder der linken als auch der rechten Spulenhälfte. Als Gesamtmagnetfeld ergibt sich links eine Kraftflußrichtung im **Inneren** der Spule von oben nach unten und rechts in der gleichen Richtung (punktiert dargestellt). Im **Inneren** der Spule besteht demnach ein **homogener** Kraftfluß in einer Richtung, **außen** ein **Streufeld**. Wir haben in Abb. 21 d unten einen **Austritt** von Kraftlinien, also ein **Nordpol**, und oben einen **Eintritt**, demnach einen **Südpol**.

(12) Polbestimmungsregel

Wir fassen das in Ziffer 11 Gesagte zusammen: Die Richtung des Kraftflusses durch den Hohlraum einer stromdurchflossenen Spule (Solenoid) und damit die Polarität an den Enden der Spule ist abhängig:

1. von der **Richtung** des Stromes, der durch die Spule fließt, d. h., wo der Strom ein- oder austritt.
2. von dem **Wicklungssinn** der Spule (ob im Uhrzeigersinne oder im Gegen-sinne des Uhrzeigers).

Wir nehmen grundsätzlich die technische Stromrichtung (von $+$ nach $-$) an. Mit Hilfe einer Regel, die „**Rechtehandregel**“ genannt wird, sind wir schnell in der Lage, den Nord- oder Südpol eines Solenoiden zu bestimmen. Wir strecken die rechte Hand in **Stromrichtung** über der Spule aus und winkeln den Daumen ab. **Der Daumen zeigt stets in Richtung des Nordpols.**

Diese Regel hat den Vorteil, daß der Wicklungssinn gar nicht berücksichtigt zu werden braucht; er ist automatisch in der Stromrichtungsanzeige (ausgestreckte Finger) enthalten.

Abb. 22a bis c zeigen die Handhabung.



Abb. 22a

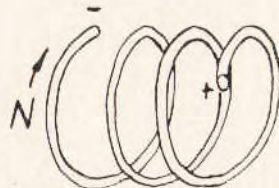


Abb. 22b

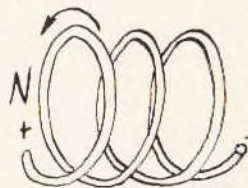


Abb. 22c

Abb. 22a zeigt, wie man die Hand über die Spule legt, Abb. 22b und c zwei Spulen verschiedenen Wicklungssinnes und verschiedener Stromrichtung. Die Fingerspitzen der Hand müssen in Pfeilrichtung, also in Richtung des Stromes zeigen. Der abgewinkelte Daumen zeigt nach links, also zum Nordpol der Spule.

Wir werden später die Rechtehandregel für weitere Zwecke kennenlernen.

(13) Die Feldstärke $\mathfrak{H}$ einer stromdurchflossenen Spule

In Ziffer 5 hatten wir die magnetische Feldstärke $\mathfrak{H}$ in Oersted gemessen und festgelegt, daß $\mathfrak{H} = 1$ Oersted dann vorhanden ist, wenn auf den Einheitspol eine Kraft von rund 1 mg wirkt. Es entsprach dann 1 Oersted der Kraftflußdichte von 1 Kraftlinie pro cm^2 .

Für die Technik ist dieses Maßsystem zu unhandlich, und man benutzt hier ein Maß, unter dem man sich mehr vorstellen kann: die **Amperewindungen je cm Spulenlänge** $\left(\frac{Aw}{\text{cm}}\right)$.

In Ziffer 10 haben wir gesehen, daß das Kraftfeld um einen stromdurchflossenen Leiter um so stärker ist, je stärker der den Leiter durchfließende Strom ist. In Ziffer 11 haben wir festgestellt, daß sich die Magnetfelder, die sich um jede Windung einer Spule aufbauen, zu einem Gesamtmagnetfeld summieren. Der Kraftfluß im Hohlraum eines Solenoiden wird demnach um so stärker

sein, je stärker der die Spule durchfließende Strom ist und je mehr Windungen die Spule hat.

Zum Beweis bauen wir uns ein Meßinstrument, das uns die magnetische Feldstärke anzuzeigen vermag, ein sogenanntes Magnetometer.

Wir nehmen das Magnetsystem eines Fernhörers und befestigen es auf einer Achse. Auf dieser Achse bringen wir einen Zeiger und ferner eine Spiralfeder an. Die Feder ist bestrebt, den sich nach rechts bewegendem Zeiger in die Ruhelage zurückzuführen. Das freie Ende der Feder befestigen wir auf einem Grundbrett, desgleichen die Lagerböcke zur Aufnahme der Achse. Die gesamte Anordnung zeigt Abb. 23.

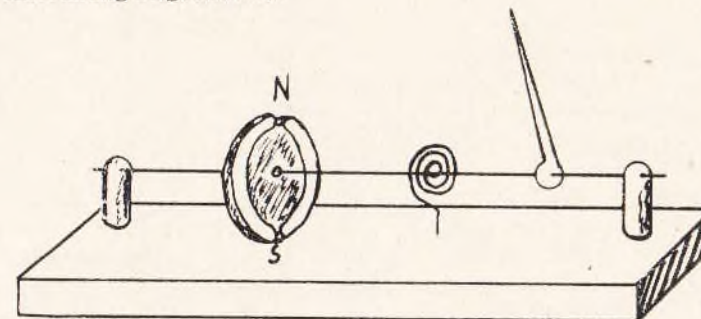


Abb. 23
Einfaches Magnetometer

Bringen wir den Nordpol eines Stabmagneten in die Nähe des Ringmagneten, so wird der Südpol des Ringmagneten angezogen. Der Zeiger schlägt nach rechts aus, und zwar um so mehr, je stärker der einwirkende Magnet ist und je mehr dieser sich dem Ringmagneten nähert (Abb. 24).

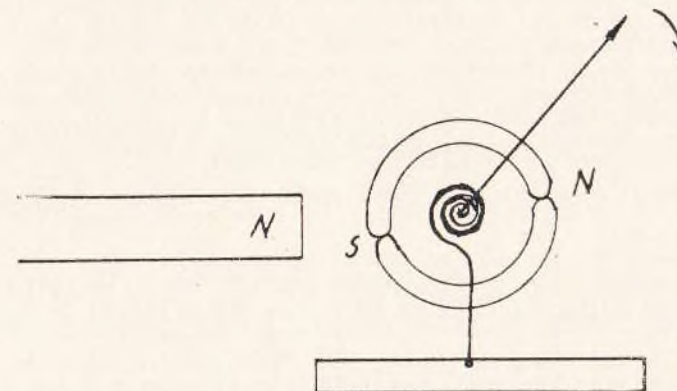


Abb. 24

Die Gegenkraft der Spiralfeder wird entsprechend der Stärke des beeinflussenden Magneten mehr oder weniger überwunden.

Versehen wir das Instrument mit einer Skala, so können wir sie nach Oersted oder nach $\frac{Aw}{cm}$ eichen.

Jetzt nehmen wir eine Spannungsquelle, einen Schiebewiderstand, drei Spulen gleicher Länge, von denen die erste 300, die zweite 600 und die dritte 1200 Windungen hat, sowie einen Strommesser.

Nun schalten wir die Einzelteile (vorerst mit Spule 300 Windungen) nach Abb. 25, regeln mittels des Schiebewiderstandes den Strom so, daß er 1 A

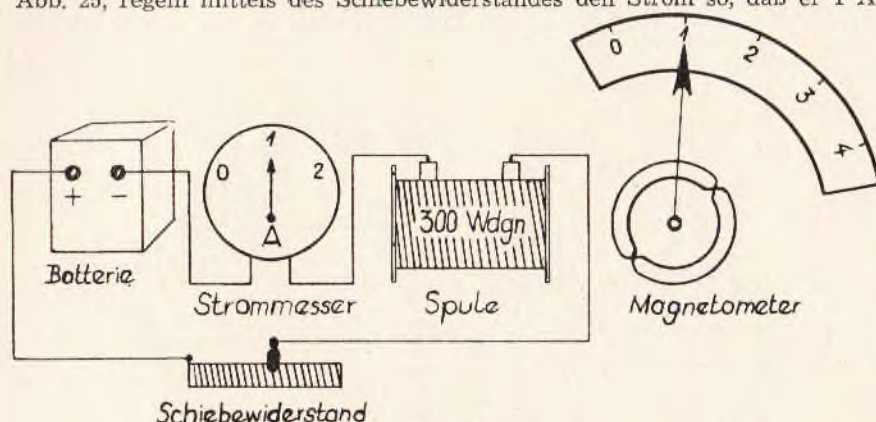


Abb. 25

beträgt, und beobachten den Ausschlag des Instrumentes. Dort, wo der Zeiger zur Ruhe kommt, machen wir einen Strich (1). Jetzt vertauschen wir die Spule 300 Windungen mit der zu 600 Windungen, regeln den Strom auf 1 A und stellen fest, daß der Zeiger den doppelten Ausschlag macht wie vorher. Hier machen wir an der Skala wieder einen Strich (2). Zuletzt nehmen wir die Spule zu 1200 Windungen und verfahren wie oben: der Zeiger schlägt wiederum um den doppelten Betrag aus. Auch hier machen wir einen Strich (4).

Was ersehen wir aus diesem Versuch? Bei **gleichbleibender** Stromstärke (hier 1 A) und **gleicher** Spulenlänge erhöht sich die magnetische Feldstärke mit der Anzahl der Windungen. Bei 600 Windungen ist sie doppelt so groß, bei 1200 Windungen viermal so groß wie bei 300 Windungen. Voraussetzung bei diesen Versuchen war, daß die Spulen **gleiche Länge** haben.

Verdoppeln wir jetzt die Stromstärke (hier 2 A), so schlägt der Zeiger bei einer Spule von 300 Windungen auf Strich 2, bei einer Spule von 600 Windungen auf Strich 4 aus.

Das Kraftfeld einer Spule ist proportional dem Strom I und der Windungszahl w . Das Produkt heißt Amperewindungszahl (Aw-Zahl).

Wir nehmen jetzt Spulen zu 600 und 1200 Windungen, die jedoch doppelt so lang sind wie die vorher benutzten, und führen die gleichen Versuche durch. Wir stellen fest, daß wir bei der Spule zu 600 Windungen nur einen Ausschlag von einem Strich und bei der zu 1200 Windungen nur einen von zwei Strichen haben. Wir folgern hieraus, daß auch die **Länge** einer Spule auf die Feldstärke einen Einfluß hat. **Größere Spulenlänge bewirkt ein schwächeres Feld**, so daß wir folgern können:

Die Feldstärke $\mathfrak{H}$ einer Spule ist gleich der Stromstärke I mal der Windungszahl w geteilt durch die Spulenlänge l in cm. Die Einheit ist die Amperewindung pro Zentimeter.

$$\mathfrak{H} = \frac{I \times w}{l} \left[\frac{Aw}{cm} \right]$$

Wir ersehen hieraus, daß wir die Feldstärke einer stromdurchflossenen Spule beliebig verändern können durch Veränderung der Stromstärke I , der Windungszahl w und der Länge l .

$\mathfrak{H} = 1 \frac{Aw}{cm}$ ist die praktische Einheit der magnetischen Feldstärke, mit der wir im weiteren Verlauf zu arbeiten haben.

Vergleichen wir die Feldstärke $\mathfrak{H}$ in Oersted mit der Feldstärke $\mathfrak{H}$ in $\frac{Aw}{cm}$, so ergeben sich folgende Beziehungen:

$$\mathfrak{H} \left[\frac{Aw}{cm} \right] = 1,256 \times \mathfrak{H} \text{ [Oersted]}$$

Setzen wir in diese Formel in beiden Fällen $\mathfrak{H} = 1$, so ergibt sich:

$$1 \frac{Aw}{cm} = 1,256 \times 1 = 1,256 \text{ Oe}$$

$$1 \text{ Oersted} = \text{rund } 0,8 \frac{Aw}{cm} \quad (1 : 1,256)$$

Im praktischen Gebrauch der DBP vereinfachen sich die Angaben dadurch, daß im allgemeinen, insbesondere bei den Rund- und Flachrelais, nur Spulen **gleicher Länge** benutzt werden. Es genügt dann zur Beurteilung ihrer magnetischen Wirkungen die Betrachtung des **Produktes $I \times w$, das Amperewindungszahl (Aw-Zahl)** genannt wird.*)

Will man die Feldstärke $\mathfrak{H}$ in $\frac{Aw}{cm}$ ausrechnen, müßte man jedesmal die Aw-Zahl durch die Länge der Spule teilen.

Die Aw-Zahl spielt in der Fernmeldetechnik, insbesondere bei den Relais, eine bedeutende Rolle. Für die Betätigung eines Arbeits-, Ruhe- und Wechselkontaktes bei normalen Relais sind etwa 75 Aw, für jeden weiteren Kontakt etwa 50 Aw erforderlich.

Ein Relais mit vier Kontakten würde z. B. eine Aw-Zahl von $75 + (3 \times 50) = 225$ Aw erfordern.

Was heißt z. B. 50 Aw? Bei einem Strom von 1 A müssen 50 Windungen vorhanden sein; denn $1 \times 50 = 50$. Bei einem Strom von 0,1 A müssen 500 Windungen vorhanden sein; denn $0,1 \times 500$ gibt wieder 50. Das Produkt kann also willkürlich aufgeteilt werden. Es gilt demnach für jede beliebige Aw-Zahl, die wir k nennen wollen, die Gleichung

$$k = I \times w \text{ [Aw]}$$

Rechenbeispiele:

Aus der Formel $k = I \times w$ [Aw] lassen sich sowohl I , w und k errechnen (vgl. Ohmsches Gesetz, Band I a, S. 18).

*) Anm.: Die Aw-Zahl wird in der Physik mit „magnetische Spannung“ oder „magnetische Durchflutung“ bezeichnet.

$$\text{Es ist } I = \frac{k}{w}; \quad w = \frac{k}{I}; \quad k = I \times w$$

1. Ein Relais hat folgende Aufschrift:
800—2400—0,12 CuL und wird von einem Strom $I = 0,03 \text{ A}$ durchflossen.
Wie groß ist die Aw-Zahl k ?

$$k = I \times w = 0,03 \times 2400 = \underline{72 \text{ Aw}}$$

Diese Aw-Zahl würde gerade noch genügen, um einen einfachen Kontakt zu betätigen.

2. Ein Relais hat eine Aw-Zahl $k = 300$ und wird von einem Strom von $0,04 \text{ A}$ durchflossen. Wie groß ist die Windungszahl?

$$k = I \times w; \quad w = \frac{k}{I}$$

$$w = \frac{300}{0,04} = 30\,000 : 4 = \underline{7500}$$

Das Relais hat 7500 Windungen.

3. Wie groß ist der ein Relais durchfließende Strom, wenn bei einer Aw-Zahl von $k = 240$ die Anzahl der Windungen $= 6000$ ist?

$$k = I \times w; \quad I = \frac{k}{w}$$

$$I = \frac{240}{6000} = \underline{0,04 \text{ A}}$$

In der Praxis wird es im allgemeinen jedoch nicht möglich sein, das magnetische Feld einer Spule durch Erhöhen der Stromstärke oder durch das Anbringen weiterer Wicklungen zu verstärken, d. h. die Aw-Zahl zu vergrößern.

Um bei einem gegebenen Widerstand die Stromstärke zu erhöhen, bedarf es laut dem Ohmschen Gesetz einer höheren Spannung. Da wir in der Fernmelde-technik mit festen Spannungen, im allgemeinen 60 V , arbeiten, ist dieser Weg nicht gangbar.

Auch eine Vergrößerung der Windungszahl ist kaum möglich, weil die Größe des Spulenkörpers dies nicht zuläßt. Darüber hinaus wird der Widerstand der Wicklung erhöht und somit die Stromstärke verringert, so daß unter Umständen die Aw-Zahl sogar geringer wird.

Trotzdem ist für uns der Begriff der Aw-Zahl sehr wichtig, um weitere mit dem Elektromagnetismus zusammenhängende Vorgänge zu verstehen.

(14) Eisen in einer stromdurchflossenen Spule

Bringen wir in eine stromdurchflossene Spule einen Eisenkern, so wird gemäß Ziffer 7e die Kraftflußdichte in dem Eisenkern bedeutend erhöht, und zwar um den Faktor μ , der die Permeabilität des Eisens angibt. Somit wird auch die Anzugskraft der Anordnung bedeutend erhöht.

Zum Beweise brauchen wir nur in die Spulen Abb. 25 einen Eisenkern einzuführen; wir werden feststellen, daß der Zeiger bis an die Grenze des Möglichen ausschlägt. Um einen Skalenwert ablesen zu können, müssen wir die Stromstärke ganz erheblich herabsetzen.

Nun verhält sich nicht jedes Eisen in einem Elektromagnetfeld gleich. Bei weichem Eisen werden wir bereits bei einer geringen Feldstärke $\mathfrak{H}$ (in $\frac{\text{Aw}}{\text{cm}}$) eine hohe Kraftflußdichte $\mathfrak{B}$ feststellen, bei Stahl müssen wir die magnetische Feldstärke bedeutend erhöhen.

Die Ursache ist in der Struktur der verschiedenen Eisensorten zu suchen. Bei weichem Eisen liegen die Molekularmagnete nicht so fest aneinander wie z. B. bei Stahl. Es ist nur eine verhältnismäßig geringe magnetische Kraft notwendig, um sie alle auszurichten. Nehmen wir aber weiches Eisen aus dem Magnetfeld heraus oder lassen wir das Magnetfeld durch Ausschalten des Stromes zusammenbrechen, so fallen fast alle Molekularmagnete in die ursprüngliche Lage zurück, und nur ein kleiner Teil bleibt ausgerichtet und verleiht dem Weicheisenstück eine geringe magnetische Wirkung. Man spricht hier von **Restmagnetismus** oder **Remanenz**.

Bei Stahl hingegen liegen die Molekularmagnete fest aufeinander; es ist eine große magnetische Kraft notwendig, um sie in die geordnete Lage zu bringen. Dafür verbleiben sie auch nach Ausschalten des Stromes in der neuen Lage. Die Remanenz ist groß; wir erhalten einen Dauermagneten.

Die Koerzitivkraft

Die Koerzitivkraft (o und e getrennt aussprechen) ist die Kraft, die den remanenten Magnetismus zurückhält und die auch der Magnetisierung entgegenwirkt. Sie muß erst durch die Kraft des Magnetfeldes der Spule überwunden werden. Bei weichem Eisen ist die Koerzitivkraft gering, bei Stahl ist sie groß. Näheres hierüber siehe Ziffer 20 (Hysteresis).

Die magnetische Sättigung

Wird die magnetische Feldstärke $\mathfrak{H}$ (in $\frac{\text{Aw}}{\text{cm}}$) so weit erhöht, daß **alle** Molekularmagnete des Eisens ausgerichtet sind, so nützt keine weitere Erhöhung der Aw-Zahl. Die Kraftflußdichte $\mathfrak{B}$ im Eisen erhöht sich nicht mehr; das Eisen ist **gesättigt**. Dieser Sättigungspunkt ist bei weichem Eisen ohne wesentlichen Arbeitsaufwand, d. h. bei schwachem magnetischen Feld der Spule, schnell erreicht, während bei Stahl der Arbeitsaufwand u. U. sehr groß sein kann.

Wir wollen uns nun das Verhalten von Eisen verschiedener Sorten, die durch eine stromdurchflossene Spule magnetisiert werden, ansehen. Hierzu bedienen wir uns am zweckmäßigsten der Magnetisierungskurven.

(15) Magnetisierungskurven

Um eine Magnetisierungskurve aufstellen zu können, benötigen wir eine Spule (zu B. 300 Windungen), eine hoch belastbare Gleichspannungsquelle, einen Strommesser und einen Schiebewiderstand. Zum Anzeigen der Kraftflußdichte könnten wir zwar unser Magnetometer gem. Abb. 23 verwenden, doch ist dieses

$\mathfrak{H} \left[\frac{\text{Aw}}{\text{cm}} \right]$	$\mathfrak{B} \left[\text{Gauß} \right]$
0	0
5	8 000
10	12 000
15	14 000
20	14 500
25	14 700
30	14 800

Abb. 26

Gerät für genaue Messungen nicht geeignet. Wir nehmen also an, daß wir über ein Gerät verfügen, das uns die Kraftflußdichte $\mathfrak{B}$ in Gauß genau anzeigt. Der Aufbau der Anordnung würde etwa dem der Abb. 25 entsprechen.

Wir stecken in den Hohlraum unserer Spule zunächst ganz weiches Eisen. Wir schalten den Strom ein und verändern die Größe des Widerstandes. Mittels des Strommessers, der bekannten Windungszahl und Länge der Spule läßt sich die Feldstärke $\mathfrak{H}$ in $\frac{\text{Aw}}{\text{cm}}$ leicht errechnen, und wir tragen die Werte in einer Tabelle gem. Abb. 26 in die Spalte $\mathfrak{H} \left[\frac{\text{Aw}}{\text{cm}} \right]$ ein, z. B. 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 $\frac{\text{Aw}}{\text{cm}}$. Für jeden Wert von $\mathfrak{H}$ lesen wir den zugehörigen Wert von $\mathfrak{B}$ ab und tragen ihn in die Spalte $\mathfrak{B}$ [Gauß] ein, z. B. bei $\mathfrak{H} = 0$, $\mathfrak{B} = 0$, bei $\mathfrak{H} = 5$, $\mathfrak{B} = 8000$ usw.

Nun nehmen wir einen Bogen Millimeterpapier zur Hand, ziehen einen waagerechten Strich und weiter einen senkrechten, der den waagerechten links schneidet. Dort, wo beide Linien zusammentreffen, ist der Punkt Null (Abb. 27 *).

$\mathfrak{B}$ [Gauß]

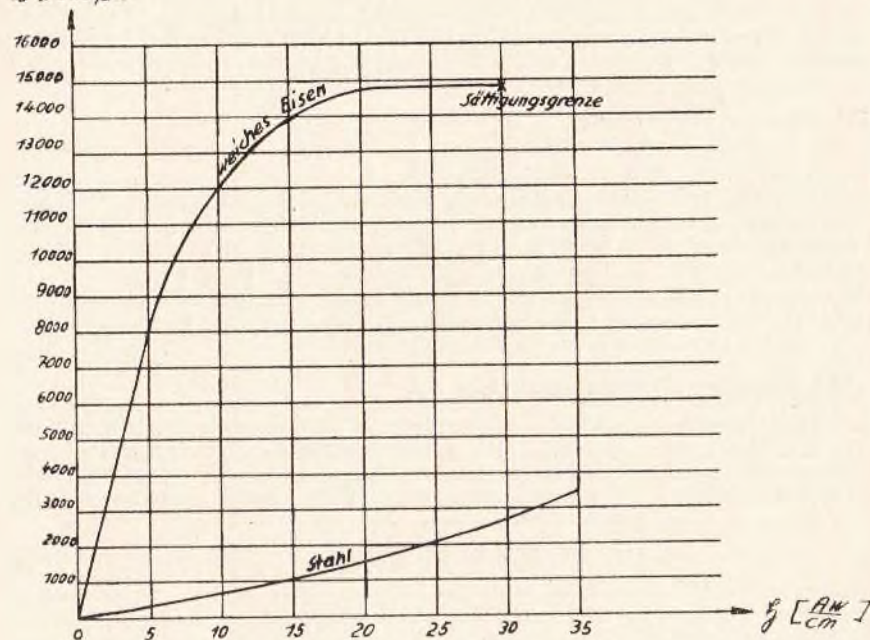


Abb. 27

Jetzt tragen wir in gleichmäßigen Abständen auf der waagerechten Linie die in der Tabelle Abb. 26 eingetragenen $\mathfrak{H}$ -Werte und auf der senkrechten die $\mathfrak{B}$ -Werte ein, z. B. immer von 1000 zu 1000 Gauß.

Bei 5 $\frac{\text{Aw}}{\text{cm}}$, entsprechend 8000 Gauß in der Tabelle, machen wir einen Punkt, desgleichen bei 10 $\frac{\text{Aw}}{\text{cm}}$, entsprechend 12 000 Gauß, usw. Verbinden wir alle Punkte miteinander, so erhalten wir die Magnetisierungskurve einer bestimmten Weicheisensorte.

*) Anm.: Vgl. Bd. II b, Ziffer 4 (Koordinatensystem, I. Quadrant)

Was ersehen wir aus dieser Kurve?

Wer erkennen, daß die Kraftflußdichte am Anfang sehr schnell zunimmt und daß bei größer werdendem $\mathfrak{H}$ die Kurve immer flacher, die Zunahme der Kraftflußdichte $\mathfrak{B}$ immer geringer wird, bis bei etwa 30 $\frac{\text{Aw}}{\text{cm}}$ die Sättigungsgrenze dieser Eisensorte bereits erreicht ist. Eine weitere Erhöhung der Feldstärke $\mathfrak{H}$ wäre in diesem Falle nutzlos.

Nun wechseln wir das Weicheisenstück gegen Stahl aus und wiederholen den Vorgang. Wir erkennen, daß die Kraftflußdichte nur gering zunimmt, daß wir also eine erheblich größere magnetische Kraft aufwenden müssen, bis hier die Sättigungsgrenze, die bei 12 000 Gauß liegen möge, erreicht ist. Wir müßten für diesen Fall ein $\mathfrak{H}$ von vielleicht 600 $\frac{\text{Aw}}{\text{cm}}$ haben, d. h. einen Strom von $600 : 300 = 2 \text{ A}$ ($\text{Aw} : w$).

(16) Die Permeabilität μ des Eisens

In Ziffer 7e wurde die Bedeutung der Permeabilität μ erläutert. μ gibt uns an, um wievielfach die Kraftflußdichte im Eisen wächst im Gegensatz zu Luft und war formelmäßig erläutert als der Quotient aus $\mathfrak{B}$ und $\mathfrak{H}$ (in Oersted).

$$\mu = \frac{\mathfrak{B}}{\mathfrak{H}}$$

Aus der Magnetisierungskurve Abb. 27 sehen wir, daß μ (bei Eisen) keine Konstante ist (im Gegensatz zu allen anderen Stoffen), sondern daß der Quotient $\frac{\mathfrak{B}}{\mathfrak{H}}$ einen immer kleineren Wert annimmt, je mehr die Kurve sich der Sättigungsgrenze nähert. Eine Permeabilitätskurve würde also etwa umgekehrt verlaufen wie die zugehörige Magnetisierungskurve. Wir müssen also für jeden Punkt der Magnetisierungskurve (die ja für jede Eisensorte unterschiedlich ist) zu jedem $\mathfrak{H}$ -Wert den $\mathfrak{B}$ -Wert ermitteln und den

$\mathfrak{B}$ -Wert durch den zugehörigen $\mathfrak{H}$ -Wert teilen. Wenn gem. Abb. 27 $\mathfrak{H} = 5 \frac{\text{Aw}}{\text{cm}}$ ist, so beträgt das dazugehörige $\mathfrak{B}$ 8000 Gauß. μ hat in diesem Falle einen Wert von

$$\mu = \frac{\mathfrak{B}}{\mathfrak{H}} = \frac{8000}{5} = 1600.$$

Bei 15 $\frac{\text{Aw}}{\text{cm}}$ beträgt $\mathfrak{B}$ 14000 Gauß, μ wäre demnach $\frac{14000}{15} = 933,3$. Bei 30 $\frac{\text{Aw}}{\text{cm}}$ beträgt $\mathfrak{B}$

14800 Gauß, μ ist dann gleich $\frac{14800}{30} = 493,3$.

Wir müssen uns nun merken, daß das auf diese Weise gefundene μ sich aus 2 Faktoren zusammensetzt, nämlich aus der Zahl 1,256 (vgl. Ziffer 13, S. 25), die man die absolute Permeabilitätskonstante μ_0 nennt, mal einer Zahl μ_r , die die Bezeichnung „relative Permeabilitätskonstante“ erhalten hat. μ ist also das Produkt $\mu_0 \times \mu_r$. *)

Um μ_r zu erhalten, muß man den Quotienten $\frac{\mathfrak{B}}{\mathfrak{H}}$ durch $\mu_0 = 1,256$ teilen.

Beträgt im ersten Beispiel $\mu = \frac{\mathfrak{B}}{\mathfrak{H}} = \frac{8000}{5} = 1600$, so ist $\mu_r = 1600 : 1,256 = \text{rund } 1274$.

Die in Ziffer 7, S. 16, aufgeführte Formel $\mathfrak{B} = \mu \times \mathfrak{H}$, wobei hier μ die relative Permeabilitätskonstante bezogen auf Luft = 1 bedeutet, muß also, wenn man sich auf die Feldstärke $\mathfrak{H}$ in $\frac{\text{Aw}}{\text{cm}}$ bezieht, heißen

$$\mathfrak{B} = \frac{\mu_0 \times \mu_r \times \mathfrak{H}}{l} = \frac{1,256 \times \mu_r \times I \times w}{l} \text{ [Gauß]}$$

oder, wenn man den Wert $\mu_0 \times \mu_r = \mu$ aus der Magnetisierungskurve errechnet

$$(\mu = \frac{\mathfrak{B}}{\mathfrak{H}})$$

$$\mathfrak{B} = \frac{\mu \times I \times w}{l} \text{ [Gauß]}$$

*) Anm.: Vgl. absolute und relative Dielektrizitätskonstante (Bd. 1b, Ziffer 30).

Es ist zu beachten, daß der Wert von l hier nicht die **Spulenlänge** darstellt, sondern den mittleren Umfang eines **geschlossenen Eisenkernes**, z. B. eines Eisenringes oder eines Relais mit angezogenem Anker. Sobald ein Luftspalt vorhanden ist, ergeben sich zusätzliche Rechnungen, auf die hier nicht näher eingegangen werden soll.

(17) Der Kraftfluß Φ

In Ziffer 8 wurde der Kraftfluß Φ als die Anzahl der Kraftlinien, die durch das gesamte Flächenstück hindurchgehen, erläutert und die Formel

$$\Phi = \mathfrak{B} \times F, \text{ oder } \Phi = \mu \times \mathfrak{H} \times F \text{ [Maxwell]}$$

aufgestellt.

Bezogen auf den Elektromagnetismus und damit auf die **technische Einheit** der Feldstärke $\mathfrak{H}$ $\left[\frac{\text{Aw}}{\text{cm}} \right]$, muß Φ sein:

$$\Phi = \mathfrak{B} \times F = \frac{1,256 \times \mu_r \times I \times w \times F \text{ (in cm}^2\text{)}}{l \text{ (in cm)}} \text{ [Maxwell]}$$

(18) Die Entmagnetisierungskurve

In der Abb. 27 und in Ziffer 15 wurde gezeigt, wie die Kraftflußdichte $\mathfrak{B}$ mit steigender magnetischer Feldstärke $\mathfrak{H}$ $\left(\text{in } \frac{\text{Aw}}{\text{cm}} \right)$ zunimmt, bis zuletzt die Sättigungsgrenze erreicht ist. Aus der Magnetisierungskurve haben wir gesehen, daß weiches Eisen sich wesentlich anders verhält als Stahl.

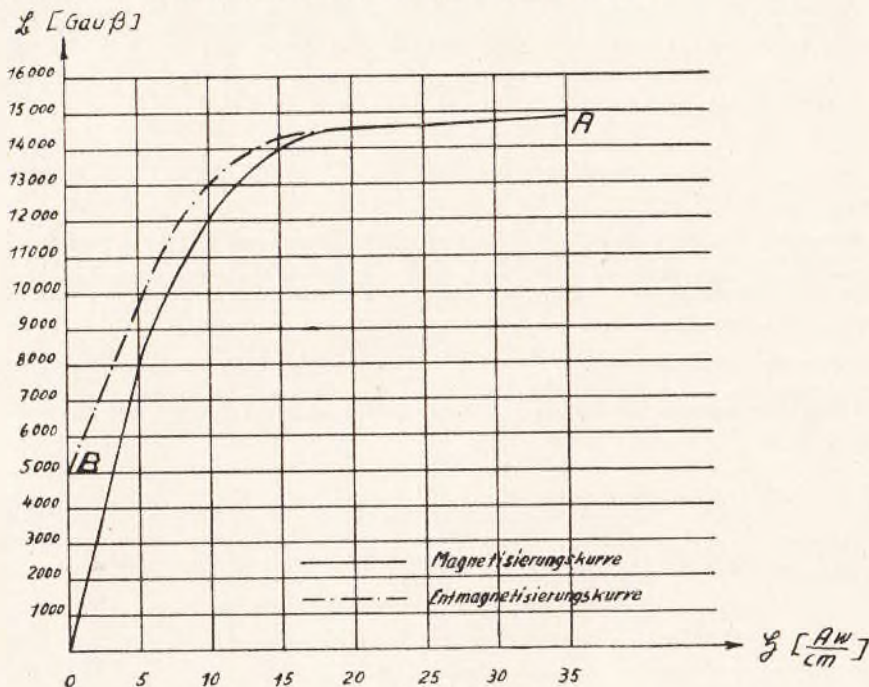


Abb. 28

Wir wollen jetzt untersuchen, wie weiches Eisen und Stahl sich verhalten, wenn wir die Feldstärke $\mathfrak{H}$ auf den Wert Null absinken lassen, d. h. den durch die Spule fließenden Strom I ebenfalls bis auf den Wert Null verringern. Wir stellen hierbei fest, daß die $\mathfrak{B}$ -Werte **langsamer** kleiner werden im Verhältnis zum Anstieg bei der Magnetisierung, d. h., die Kurve der Entmagnetisierung wird flacher und erreicht **nicht** den Wert Null, wenn das **Feld $\mathfrak{H}$ den Wert Null erreicht hat** (s. Abb. 28). Der Grund ist in der Remanenz zu suchen (s. Ziffer 14, Absatz 4), die bei jeder Eisensorte einen unterschiedlichen Wert hat.

Ganz allgemein wissen wir, daß die Remanenz bei weichem Eisen gering, bei Stahl jedoch sehr groß ist. Die Größe dieses Restmagnetismus drückt man auch durch die verbleibende Kraftflußdichte $\mathfrak{B}$ aus und wird mittels des Magnetometers gemessen. Verkleinern wir das magnetische Feld $\mathfrak{H}$ um je 5 $\frac{\text{Aw}}{\text{cm}}$, so möge

bei 15 $\frac{\text{Aw}}{\text{cm}}$ der $\mathfrak{B}$ -Wert 14 500 Gauß betragen, bei 10 $\frac{\text{Aw}}{\text{cm}}$ 13 000 Gauß, bei 5 $\frac{\text{Aw}}{\text{cm}}$ 9000 Gauß und bei $\mathfrak{H} = 0$ 5000 Gauß. Die Entmagnetisierungskurve verläuft also **flacher** als die Magnetisierungskurve. In Abb. 28 verläuft die Magnetisierungskurve von O bis Punkt A (Sättigungsgrenze) und die Entmagnetisierungskurve von A nach B. Die Strecke O bis B stellt also die Größe der Remanenz dar; sie beträgt in diesem Beispiel, wie oben erwähnt, 5000 Gauß.

Bei hochwertigem Stahl ist eine Abnahme der $\mathfrak{B}$ -Werte bei Ausschalten des Stromes kaum wahrzunehmen; die Kurve verläuft ganz flach, so daß die Remanenz (in Gauß ausgedrückt) nicht wesentlich geringer ist als die Kraftflußdichte im Sättigungspunkt.

(19) Grundsätzliches über Wechselstrom

Wir wissen aus Erfahrung, daß es nicht nur einen Strom gibt, der ständig in **einer Richtung** fließt (Gleichstrom), sondern auch einen solchen, der **laufend in gleichen Zeitabständen seine Richtung wechselt** (Wechselstrom). Ein solcher Wechselstrom steigt von dem Wert 0 in einer bestimmten, stets gleichbleibenden Zeit bis zu seinem Höchstwert kurvenförmig an, um dann in der gleichen Zeit bis auf den Wert 0 abzusinken. Dann ändert der Strom seine Richtung um wieder auf den Höchstwert anzusteigen und auf den Wert 0 abzufallen. Dieser Wechsel wiederholt sich, solange der Strom fließt (Abb. 29)*.

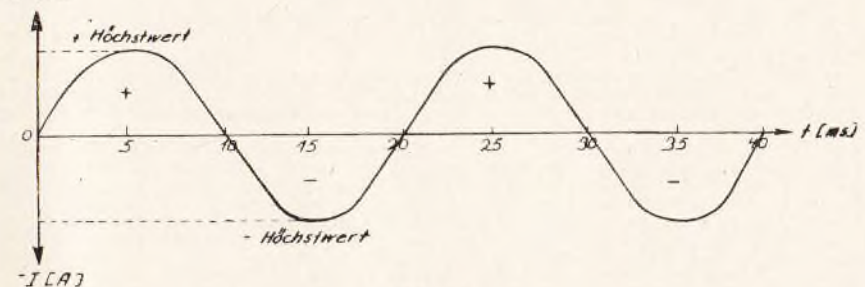


Abb. 29

In dieser Abb. erkennen wir, daß die Form der Kurven gleichmäßig ist, und daß zur gleichen Zeit (hier alle 10 Millisekunden [ms]) der Strom den Wert 0 hat. In 5 ms erreicht der Strom den positiven (+) Höchstwert, nach weiteren

*) Vgl. Bd. II b (Wechselstromlehre)

10 ms den negativen (—) Höchstwert usw. Die zeitlichen Abstände zwischen den Nullwerten betragen gleichfalls 10 ms.

Man sagt hierzu, daß der Wechselstrom **periodisch** verläuft; die Kurve in Abb. 29 ist eine sogenannte **Sinuskurve**. Die waagerechte Linie (Zeitlinie) geht durch den Strom-Nullpunkt. Man bezeichnet die Kurven **oberhalb** der Zeitlinie als **positive** Halbwellen oder Wechsel, die **unterhalb** der Zeitlinie als **negative** Halbwellen oder Wechsel. Eine positive und eine negative Halbwelle nennt man eine **Periode**. Die **Anzahl der Perioden pro Sekunde** bezeichnet man mit **Frequenz f** des Wechselstromes. In unserem Beispiel beträgt die Zeitdauer T einer Periode 20 ms, d. h. $1000 \text{ ms} : 20 = \frac{1}{50} \text{ sec}$. In einer Sekunde hätten wir demnach 50 Perioden oder eine **Frequenz f** von 50 Perioden pro Sekunde. Die Maßeinheit $1 \frac{\text{per}}{\text{sec}}$ heißt 1 Hertz*), abgekürzt Hz. Eine Frequenz $f = 50 \text{ Hz}$ bedeutet also, daß der Wechselstrom 50 Perioden je Sekunde hat. Da eine Periode eine Plus- und eine Minus-Halbwelle hat, entfällt auf eine Halbwelle die Zeit von $\frac{1}{100}$ Sekunde. $f = 800 \text{ Hz}$ bedeutet, daß der Wechselstrom 800 Perioden in einer Sekunde hat, demnach 800 Plus- und 800 Minus-Halbwellen usw.

Auf den Wechselstrom, seine Erzeugung und seine Bedeutung wird später näher eingegangen werden, insbesondere im Band II b.

(20) Verhalten von Eisen im magnetischen Wechselfeld

A) Hysteresis

Bislang haben wir das Verhalten von Eisen in einer von Gleichstrom durchflossenen Spule behandelt. In folgendem soll die Rede davon sein, wie sich Eisen verhält, wenn durch die Spule Wechselstrom fließt.

Betrachten wir noch einmal die Abb. 27 und 28. Beim Ansteigen des Stromes in der Spule wächst die Feldstärke $\mathfrak{H}$ und damit die Kraftfußdichte $\mathfrak{B}$ bis zum Punkt A. Dieser Vorgang könnte dem Anstieg der ersten Halbwelle des Wechselstromes Abb. 29 bis zu seinem Höchstwert entsprechen. Wir erhalten auch hier eine Kurve 0 bis A. Fällt jetzt der Wechselstrom von seinem Höchstwert auf 0 zurück, ergibt das die Entmagnetisierungskurve AB (s. Abb. 28). Nun verändert sich jedoch das Bild. Sobald der Wechselstrom den Wert 0 erreicht hat, verbleibt ein Restmagnetismus (in Abb. 28 die Strecke OB = 5000 Gauß). Dieser muß erst von dem in entgegengesetzter Richtung wie vordem fließenden Wechselstrom der 2. Halbwelle überwunden werden. Hierdurch wird das Eisen völlig unmagnetisch, und die Remanenz erreicht den Wert 0. Jetzt erst ist der Rest der noch geordnet verbliebenen Molekularmagnete, die die Remanenz verursachen, in den ungeordneten Zustand zurückgefallen. An Hand von Abb. 30 wollen wir diesen Vorgang verdeutlichen.

Wir nehmen an, daß der positive erste Halbwechsel an dem zu betrachtenden Ende der Spule einen Nordpol erzeugt. Somit entsteht in dem gleichen Ende des Eisenstückes ebenfalls ein Nordpol, der im Punkt A der Magnetisierungskurve seine größte Stärke hat (s. Abb. 31).

Nun fällt der Strom auf den Wert 0 zurück. Hierbei ergibt sich die Entmagnetisierungskurve AB; es verbleibt also eine Remanenz von der Größe 5000 Gauß mit der gleichen Polrichtung. Jetzt kehrt der Strom seine Richtung um und erzeugt mit steigender Stärke an dem gleichen Ende der Spule südpolaren Magnetismus (s. Polbestimmungsregel Ziffer 12, S. 22), der zunächst die nordpolare Remanenz zu beseitigen hat, damit das Eisen völlig unmagnetisch wird. Der Kraftfuß durch das Innere der Spule muß infolge des in entgegengesetzter Richtung fließenden Stromes auch entgegengesetzte Richtung haben wie vorher. Diese Richtung ist in Abb. 30 dargestellt durch die vom Nullpunkt nach links führende $\mathfrak{H}$ -Linie. Die völlige Beseitigung der Remanenz ist erst

bei $5 \frac{\text{Aw}}{\text{cm}}$ erreicht. Wir wollen diesen Punkt mit C bezeichnen. Nunmehr kann erst die Feldstärke $\mathfrak{H}$ der Spule auf das Eisen so einwirken, daß es an der betrachteten Stelle südpolaren Magnetismus annimmt. Im Punkt D ist die Sättigungsgrenze erreicht; die

*) Hertz, deutscher Physiker, der die praktischen Voraussetzungen für die drahtlose Telegraphie schuf.

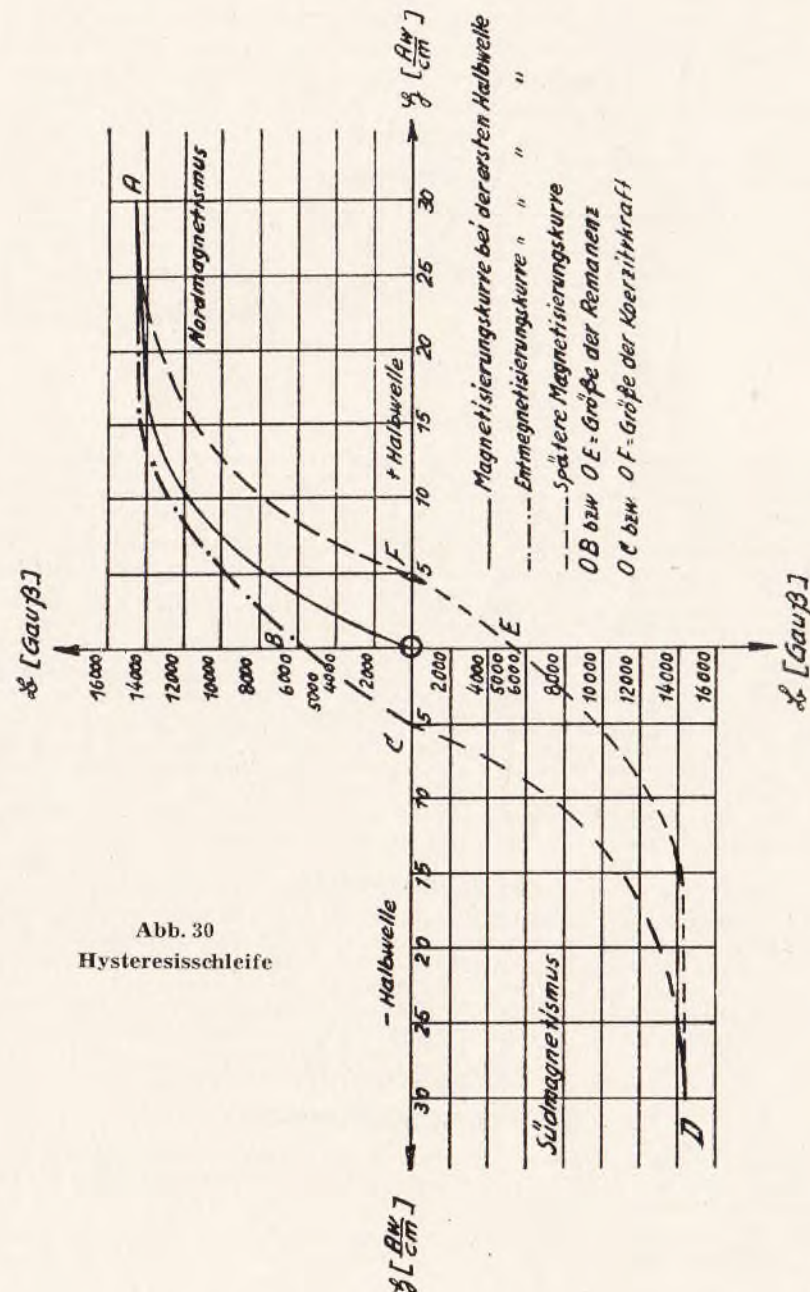


Abb. 30
Hysteresisschleife

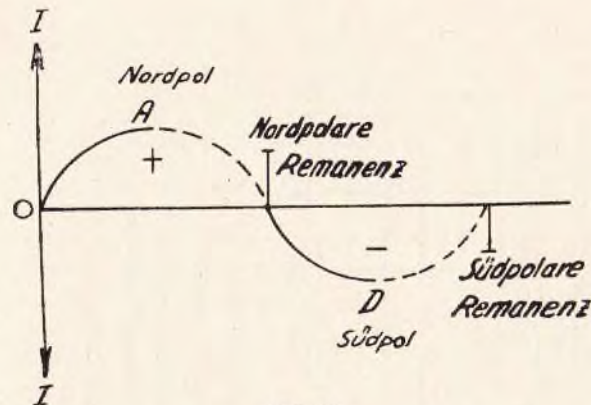


Abb. 31

Magnetisierungskurve, die durch den entgegengesetzt gerichteten Strom (Minus-Halbwelle) entsteht, verläuft also von C nach D. Sinkt nun der Strom von seinem negativen Höchstwert auf den Wert 0, so verbleibt diesmal im Eisen eine **südpolare Remanenz** von 5000 Gauß, die Kurve verläuft von D nach E. Nun muß der folgende positive Wechsel erst diese Remanenz überwinden (ebenfalls bei $5 \frac{Aw}{cm}$, Punkt F), damit die Magnetisierungskurve wieder bis A ansteigen kann und das Eisen in der betrachteten Richtung nordpolar gesättigt ist.

Wir erhalten nun, je nach Eisensorte, eine mehr oder weniger breite Fläche, die man Hysteresisschleife*) nennt. Je größer die Remanenz $0B$ bzw. $0E$ des Eisens ist, um so breiter wird die Hysteresisschleife, um so schlechter eignet sich das Eisen für die Verwendung in Wechselstromkreisen. Stahl mit seiner großen Remanenz wird also eine außerordentlich breite Hysteresisschleife haben, sich demnach für ständiges Ummagnetisieren überhaupt nicht eignen, während besonders weiches, besonders legiertes Eisen (Dynamoblech, Transformatorblech) eine sehr schmale Schleife zeigt.

Das ständige Ummagnetisieren des Eisens in einem magnetischen Wechselfeld erfordert eine Kraft, die **Koerzitivkraft** (vgl. Ziffer 14, S. 27), die um so größer ist, je größer die Remanenz (je härter das Eisen) ist. Die Größe dieser Kraft kann man auf der waagerechten (δ -) Linie zwischen 0 und C bzw. 0 und F ablesen, sie beträgt in diesem

Beispiel $5 \frac{Aw}{cm}$. Die zur Überwindung der Koerzitivkraft aufgewendete Arbeit setzt sich in dem Eisen in Wärme um und bringt Verluste.

B) Wirbelströme

Weitere Verluste an elektrischer Energie entstehen infolge des Auf- und Abbaues magnetischer Wechselfelder durch Erscheinungen, die man Wirbelströme nennt. Auf diese kann jedoch erst eingegangen werden, wenn die Gesetze der Induktion (Ziffern 21 bis 29) behandelt worden sind.

Über die praktische Anwendung der Elektromagnete in der Fernmeldetechnik (Relais, Wecker, Wähler usw.) s. Bände III, IV und V dieser Bandreihe.

Die Induktion

A) Magnetinduktion

(21) Das zweite Jahrzehnt des neunzehnten Jahrhunderts, also die Zeit zwischen 1820 und 1830, brachte grundlegende Erkenntnisse über die Wirkungen des elektrischen Stromes, nämlich

*) Hystéresis: griech. das Zurückbleiben, Zurückhinken, nämlich des inneren magnetischen Feldes im Eisen gegenüber dem äußeren Feld δ .

- a) die Entdeckung des Elektromagnetismus durch Oersted,
 - b) die Beziehungen zwischen Strom, Spannung und Widerstand durch Ohm,
 - c) die Induktion durch den englischen Physiker Faraday.
- In diesem Abschnitt wollen wir die Induktion behandeln und beginnen gleich mit einem Versuch.

Wir schalten gemäß Abb. 32 eine Spule und einen Strommesser in Reihe. Wir benutzen einen Strommesser, dessen Zeiger in der Ruhelage auf die Mitte der Skala zeigt und der — je nach Stromrichtung — nach rechts und nach links ausschlagen kann, also ein Galvanometer. Jetzt nehmen wir einen Stabmagneten und führen den Nordpol in die Spule. Wir bemerken, daß der Zeiger des Instrumentes um einen bestimmten Betrag nach einer Seite, z. B. nach rechts, ausschlägt und dann nach beendeter Bewegung des Stabmagneten in die Ruhelage zurückkehrt.

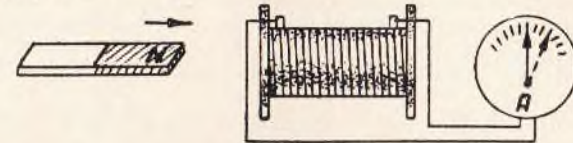


Abb. 32

Nun ziehen wir den Stabmagneten aus der Spule heraus und stellen fest, daß der Zeiger des Instrumentes für die Dauer der Bewegung des Magneten aus der Spule nach der entgegengesetzten Seite wie vorhin, also nach links, ausschlägt und dann in die Ruhelage zurückkehrt.

Wir wiederholen den gleichen Versuch, nur führen wir den Stabmagneten jetzt schneller als vorher in die Spule ein und ziehen ihn schneller heraus. Ergebnis: Der Ausschlag des Zeigers ist größer als vormals.

Nun drehen wir den Stabmagneten um und führen den Südpol in die Spule ein. Wir stellen wiederum einen Zeigerausschlag fest; diesmal aber in **umgekehrter** Richtung wie bei der Einführung des Nordpols, und beim Herausziehen wiederum umgekehrt.

Wir nehmen jetzt an Stelle des Stabmagneten einen stärkeren Magneten, etwa einen Schenkel eines kräftigen Hufeisenmagneten, und sehen, daß der Ausschlag, also der Stromstoß, wesentlich größer ist als bei der Einführung des Stabmagneten.

Nunmehr stellen wir den Hufeisenmagneten gemäß Abb. 33 auf und bewegen die **Spule** über einen Schenkel des Hufeisenmagneten. Wir stellen wiederum einen Stromstoß in einer bestimmten Richtung fest und beim Zurückführen der Spule einen gleich großen in entgegengesetzter Richtung.

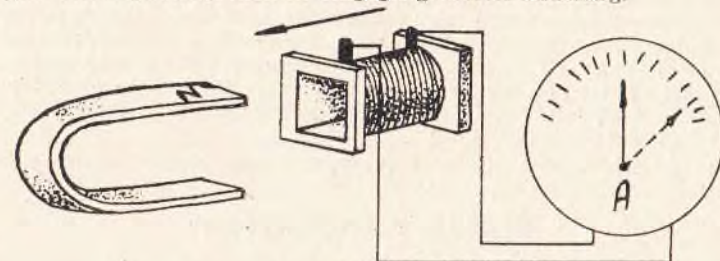


Abb. 33

Wir fassen die Ergebnisse dieser Versuche zusammen und erkennen eine Gesetzmäßigkeit:

1. Wird ein Magnet in den Hohlraum einer Spule geführt, so entsteht in dem geschlossenen Kreis Spule—Meßinstrument—Spule ein Stromstoß bestimmter Richtung. Da ein Strom nur dann fließen kann, wenn eine EMK vorhanden ist, so ist die Ursache dieses Stromstoßes eine EMK, die die gleiche Richtung haben muß wie die des Stromes.
2. Entfernt man den Magneten aus der Spule, so entsteht eine EMK in entgegengesetzter Richtung wie unter 1. Für die Richtung des Stromstoßes gilt dasselbe.
3. Die Höhe der EMK ist zunächst abhängig von der Stärke des Magneten, also von der Stärke des ihn umgebenden magnetischen Feldes.
4. Es ist gleichgültig, ob die Spule oder — allgemein ausgedrückt — der Leiter sich im Magnetfeld bewegt oder das **Magnetfeld** gegen den Leiter.
5. Die Höhe der induzierten EMK ist — neben der Stärke des Magnetfeldes — auch abhängig von der Geschwindigkeit, mit der das Magnetfeld sich dem Leiter nähert oder entfernt, d. h. von der **Geschwindigkeit der Kraftflußänderung**.

Den geschilderten Vorgang nennt man allgemein **Induktion** und in diesen Fällen **Magnetinduktion**, weil es sich hierbei um das Magnetfeld eines **Dauermagneten** handelt, der diese Erscheinungen hervorruft.

Das Magnetfeld, das in dem Leiter die EMK induziert, wird das **induzierende Feld** genannt.

Die **Richtung** der induzierten EMK (und damit die Richtung des Induktionsstromstoßes) hängt von der **Richtung des Kraftflusses** des induzierenden Feldes ab. Hierüber wird in Ziffer 25 Näheres gesagt.

Die Höhe der EMK und die Geschwindigkeit der Kraftflußänderung sind einander proportional.

Je größer die Änderungsgeschwindigkeit des Kraftflusses ist (in unseren Versuchen also die Geschwindigkeit, mit der wir den Dauermagneten in die Spule tauchen bzw. entfernen), um so höher ist die induzierte EMK.

Zum Nachweis von Induktionserscheinungen sind demnach notwendig:

- a) Ein Magnetfeld
- b) Ein Leiter
- c) Eine Bewegung,

d. h. eine Änderung des Kraftflusses, der den Leiter durchsetzt. Hierbei ist es gleichgültig, ob die Kraftflußänderung und damit die Änderung der magnetischen Feldstärke durch Bewegungen des Leiters **gegen den Magneten** (stärker werdendes Feld!) oder **umgekehrt**, d. h. Bewegungen des **Magneten gegen den Leiter**, hervorgerufen wird. Schwächung des Kraftflusses (und damit des Feldes) ist gegeben durch Entfernen des **Magneten** von der Spule oder durch Entfernen der **Spule** vom Magneten. Die Stärke des Feldes (und damit die Kraftflußdichte) nimmt bekanntlich mit wachsender Entfernung schnell ab (vgl. Ziffer 10, S. 19).

Wir werden im Abschnitt „Elektroinduktion“ auf das bisher Gesagte nochmals ausführlich zurückkommen.

B) Elektroinduktion

(22) Wir führen auch hier vorerst wieder einen Versuch durch. Mittels zweier Spulen A und B mit Eisenkernen, einer Spannungsquelle und einem Wider-

stand stellen wir einen Elektromagneten her (Abb. 34). Mittels des Schiebers am Widerstand können wir den Spulenstrom und damit die Stärke des homo-

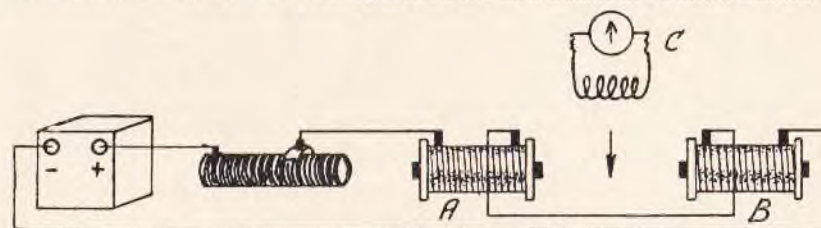


Abb. 34

genen Feldes zwischen den Spulen A und B verändern. Nun nehmen wir eine dritte Spule C, die mit einem Galvanometer verbunden ist, und führen sie in das homogene Feld ein. Auch hier schlägt das Galvanometer nach einer Seite aus und beim Herausführen nach der entgegengesetzten Seite; ein Zeichen dafür, daß auch in einem elektromagnetischen Feld die gleichen Erscheinungen auftreten, wie in Ziffer 21 behandelt. Es war auch nicht anders zu erwarten, weil das magnetische Feld eines Dauermagneten und das einer stromdurchflossenen Spule wesensgleich sind.

Man nennt die Induktionserscheinungen, die durch Elektromagnetismus hervorgerufen werden, im Gegensatz zur Magnetinduktion **Elektroinduktion**.

Wir wollen die Elektroinduktion noch weiter untersuchen. Hierzu bauen wir einen Schalter in die induzierende Leitung ein, öffnen ihn und stellen die zu induzierende Spule C in den Raum zwischen den Spulen A und B. Jetzt schließen wir den Stromkreis und bemerken auch hier einen Ausschlag am Galvanometer, der nur ganz kurze Zeit andauert. Sobald wir den Stromkreis öffnen, erhalten wir einen kurzen Zeigerausschlag in entgegengesetzter Richtung. Wie ist dieser Vorgang zu erklären?

Bei geöffnetem Schalter konnte kein Strom durch die Spulen A und B fließen, demnach kein magnetisches Feld aufgebaut werden, dessen Kraftfluß die Spule C durchsetzt und damit eine EMK erzeugt. Schließe ich aber den Stromkreis durch Betätigen des Schalters, so baut sich um die Spulen ein Magnetfeld auf, bis es den Wert erreicht hat, der durch die Stärke des Stromes, die Windungszahl und Länge der Spule bestimmt ist. Es hat also eine Kraftflußänderung von dem Wert 0 (bei ausgeschaltetem Stromkreis) bis zum Höchstwert stattgefunden. Diese Kraftflußänderung verursacht die EMK in der Spule C. Wenn der Strom seinen durch den Ohmschen Widerstand bedingten Höchstwert erreicht hat, ist der Kraftfluß Φ zwischen A und B auch am größten. Er bleibt in dieser Höhe bestehen, weil ein gleichmäßiger, in unveränderter Stärke fließender Strom keine Kraftflußänderung (und damit keine Induktionserscheinungen) hervorzurufen vermag.

Wird der Stromkreis geöffnet, so tritt der umgekehrte Vorgang ein: das Magnetfeld bricht zusammen, der Kraftfluß verändert sich in umgekehrter Richtung, das heißt, er fällt von seinem Höchstwert auf den Wert 0 zurück. Hierdurch entsteht in der Spule C eine EMK und damit ein Stromstoß in entgegengesetzter Richtung wie beim Einschalten.

Wir führen nun einen dritten Versuch durch, indem wir den Stromkreis schließen und mittels des Schiebewiderstandes die Stromstärke verändern. Verringern wir den Widerstand, so wird die Stromstärke und damit die Stärke des Magnetfeldes der Spulen A und B größer. Damit verändert sich

auch der Kraftfluß, der die Spule C durchsetzt. Er wird stärker, und wir bemerken einen Stromstoß, der den Zeiger des Instrumentes in der gleichen Richtung ausschlagen läßt wie beim Einschalten des induzierenden Stromkreises und beim Nähern der Spule C.

Vergrößern wir den Widerstand durch Betätigen des Schiebers, so wird der Strom durch die Spulen A und B schwächer und damit auch das Magnetfeld; die Kraftflußdichte wird geringer. Dieser geringer werdende Kraftfluß verursacht einen Induktionsstromstoß in der Spule C, der die gleiche Richtung hat wie beim Ausschalten des Stromkreises oder bei Entfernen der Spule C.

(23) Wir fassen jetzt die Versuche gemäß Ziffer 21 und 22 zusammen.

Ein Induktionsstromstoß in jeweils **gleicher** Richtung entsteht

a) **bei Verstärken des Magnetfeldes und damit des Kraftflusses.**

Dieses entspricht dem **Eintauchen** eines Dauermagneten in eine Spule, der **Annäherung** des zu induzierenden Leiters an ein bestehendes Magnetfeld, dem **Einschalten** des Stromes, der durch den induzierenden Leiter fließt, und dem **Verstärken** dieses Stromes.

b) **bei Schwächen des Magnetfeldes und damit des Kraftflusses.**

Dieses entspricht dem **Herausziehen** eines Dauermagneten aus einer Spule, dem **Entfernen** des zu induzierenden Leiters von einem bestehenden Magnetfeld, dem **Ausschalten** des Stromes, der durch den induzierenden Leiter fließt, und dem **Schwächen** dieses Stromes. **Die hierbei entstehenden Induktionsströme haben stets die entgegengesetzte Richtung zu den Induktionsströmen gemäß a).**

(24) Abhängigkeit der Induktionsspannungen

Die Höhe der induzierten Spannungen ist von 4 Faktoren abhängig:

1. Von der sogenannten „**Änderungsgeschwindigkeit des Kraftflusses**“, das heißt von der Geschwindigkeit, mit der das Kraftfeld auf- oder abgebaut bzw. der Kraftfluß verstärkt oder geschwächt wird (vgl. Ziffer 21, S. 36, Nr. 5). Je schneller die Kraftflußänderung vor sich geht, um so höher ist die induzierte EMK.

Man hat erkannt, daß bei einer Kraftflußänderung von $10^8 = 100\,000\,000$ Kraftlinien je Sekunde in einem Einzeleiter eine EMK von 1 V erzeugt wird.

Wenn z. B. eine Kraftflußänderung von 10^8 Kraftlinien in $\frac{1}{10}$ sec gleichmäßig stattfindet, dann haben wir eine EMK von 10 V, allerdings nur für diese kurze Zeit.

2. Von der **Windungszahl der von dem Kraftfluß durchsetzten Spule.**

In jeder Windung wird gemäß der Änderungsgeschwindigkeit des Kraftflusses nach 1. eine bestimmte EMK erzeugt. Wir wollen diese EMK als die eines kleinen Elementes auffassen, das wir an Stelle einer Windung setzen. Haben wir z. B. eine Spule mit 5 Windungen, so wird infolge der Kraftflußänderung in **jeder** Windung die **gleiche EMK** erzeugt. Da die Windungen hintereinandergeschaltet sind und wir die EMK jeder Windung als die eines kleinen Elementes betrachtet haben, liegen auch die 5 Elemente in Hintereinanderschaltung. Wir erhalten die 5fache EMK.

Eine Spule von 1000 Windungen wird demnach die tausendfache EMK einer einzelnen Windung der gleichen Spule haben usw.

Dieses bedeutet in der Praxis, daß wir die sehr große Kraftflußänderung von 10^8 Kraftlinien je Sekunde gar nicht brauchen, um hohe Spannungen zu

erzielen. Wir vergrößern gemäß 1. die Änderungsgeschwindigkeit des Kraftflusses sowie gemäß 2. die Windungszahl der Spulen und erzielen das gleiche, wenn nicht sogar ein günstigeres Ergebnis.

3. Von der **Windungsfläche**, die die induzierende Spule mit der induzierenden gemeinsam hat (Abb. 35 a—c).

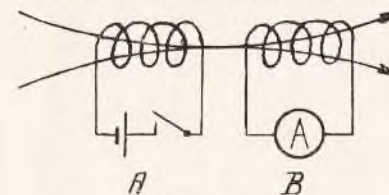


Abb. 35 a

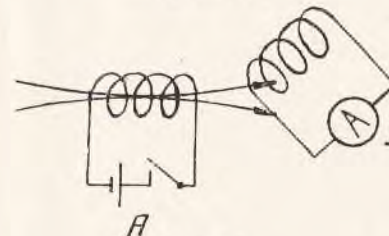


Abb. 35 b

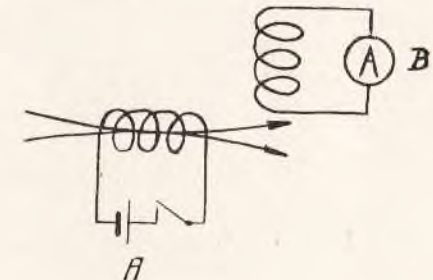


Abb. 35 c

Kraftflußrichtung
in Spule A

In Abb. 35 a steht die induzierte Spule B in Verlängerung der magnetischen Achse der induzierenden Spule A. Der Kraftfluß durchsetzt hier die Spule B fast vollständig; die Induktionswirkung ist am größten.

In Abb. 35 b steht die induzierte Spule B mit ihrer Stirnfläche in einem bestimmten Winkel zur Spule A. Der Kraftfluß durchsetzt hier die Spule B nur unvollständig; die Induktionswirkung ist gering.

In Abb. 35 c steht die induzierte Spule B im rechten Winkel zur induzierenden Spule A: die Induktionswirkung ist hier verschwindend klein.

4. Von dem **Eisenschluß.**

Diesen Fall haben wir bislang noch nicht betrachtet.

Aus dem Vorhergehenden wissen wir, daß der Kraftfluß in erheblichem Maße gesteigert werden kann, indem wir einen Eisenkern in den Hohlraum der Spule einführen (vgl. Ziffer 7 d und Ziffer 14). Infolge der Permeabilität des Eisens wird die Kraftflußdichte $\mathfrak{B}$ bedeutend erhöht (vgl. Ziffern 7 e und 16). Da die Induktionswirkung auf einen benachbarten Leiter in erheblichem Maße von der Kraftflußdichte und deren Veränderung abhängt, ist anzunehmen, daß bei der Einwirkung eines Elektromagneten auf den zu induzierenden Leiter die Induktionserscheinungen in bedeutend verstärktem Maße auftreten.

Nachfolgende Versuche sollen diese Überlegungen bestätigen.

a) Wir nehmen eine Spannungsquelle, einen Schalter, eine induzierende Spule, die wir in Zukunft **Erst-** oder **Primärspule** nennen wollen, und schalten die Teile hintereinander. Die induzierte Spule, die wir in Zukunft **Zweit-** oder **Sekundärspule** nennen wollen, schalten wir mit einem Gal-

vanometer zusammen und stellen sie dicht an die Primärspule (Abb. 36). Schalten wir den Primärstromkreis P ein, so wird das Galvanometer G im Sekundärstromkreis S nur einen kleinen Ausschlag anzeigen, z. B. 1 mA.

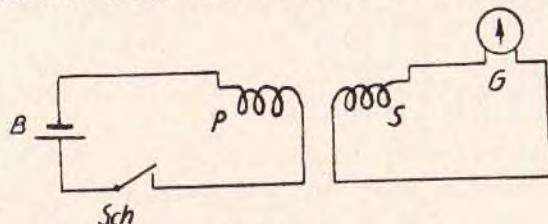


Abb. 36

Schieben wir jetzt nach Abb. 37 einen kurzen Weicheisenkern E in den Hohlraum der Primärspule und schalten den Strom ein, so wird der Ausschlag des Galvanometers stärker, z. B. 4 mA.

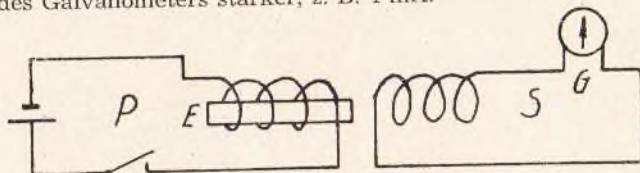


Abb. 37

Wir nehmen nun einen Eisenkern, der so lang ist, daß er durch beide Spulen reicht (Abb. 38). Beim Einschalten des Primärstromkreises schlägt der Zeiger des Galvanometers weit aus, z. B. auf 100 mA.

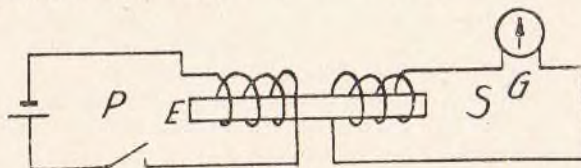


Abb. 38

Zuletzt nehmen wir einen sogenannten U-Kern, schieben die Primär- und Sekundärspule auf je einen Schenkel des Kernes und verbinden die freien Enden des Kernes durch ein sogenanntes „Joch“ aus gleichfalls weichem Eisen (s. Abb. 39). Wir müssen jetzt den sogenannten „Meßbereich“ des

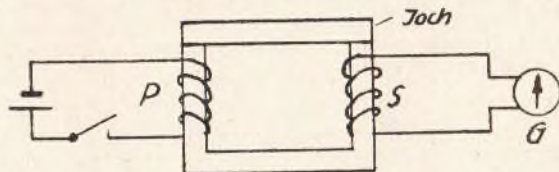


Abb. 39

Galvanometers erweitern, so daß es Ströme von 1—2 A anzeigen kann*). Wenn wir jetzt den Primärstromkreis schließen, so schlägt der Zeiger des Instrumentes auf z. B. 1.5 A aus. Wir haben jetzt kein Streufeld mehr; der magnetische Widerstand hat nun den geringsten Wert, und der Kraftfluß, richtiger die Stärke der Kraftflußänderung, ist sehr groß.

Bei allen Versuchen haben wir selbstverständlich beim Ausschalten die gleichen Ausschläge in entgegengesetzter Richtung.

Da der Ohmsche Widerstand des Sekundärkreises bei diesen Versuchen stets der gleiche geblieben ist, müssen wir die Folgerung ziehen, daß die verschiedenen starken Ströme ihre Ursache in den verschiedenen hohen induzierten elektromotorischen Kräften haben.

Die größte Induktions-EMK erhalten wir, wenn Primär- und Sekundärspule auf einem geschlossenen Weicheisenkreis sitzen.

(25) Richtung des Induktionsstromes

Bislang haben wir davon gesprochen, daß bei Vergrößerung der Kraftflußdichte (d. h. beim Einschalten des Primärstromkreises, bei Vergrößerung der Primärstromstärke und bei Annäherung der Leiter) ein Induktionsstromstoß in gleicher Richtung und bei dem umgekehrten Vorgang (Ausschalten des Primärstromkreises, Verringerung der Primärstromstärke und Entfernen der Leiter voneinander) ein solcher in entgegengesetzter Richtung auftritt. Wir haben jedoch hierbei noch nicht die Stromstoßrichtungen mit der Richtung des Primärstromes verglichen.

Wir wollen jetzt an Hand eines Versuches diese Stromstoßrichtungen bestimmen. Hierzu bauen wir eine Anordnung auf, wie sie in Abb. 40 dargestellt ist.

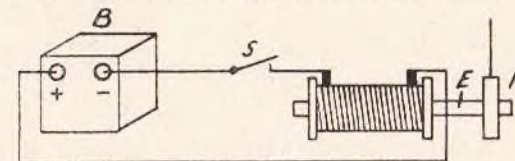


Abb. 40

In eine Spule schieben wir einen Eisenkern E, der an einer Seite um ein gutes Stück aus der Spule herausragt, und verbinden die Spule über einen Schalter S mit einer Gleichspannungsquelle B. Über das freie Ende des Eisenkerns E hängen wir einen Aluminium- oder Kupferring R so auf, daß er sich frei über dem Eisenkern E bewegen kann. Nun schließen wir den Stromkreis mittels des Schalters S und bemerken, daß der Aluminiumring sich von der Spule fortbewegt. Öffnen wir den Stromkreis, so bewegt sich der Ring auf die Spule zu.

Was ist die Ursache dieser Erscheinung? Hierzu betrachten wir Abb. 41.

Wir nehmen an, daß bei Stromfluß durch die Spule Abb. 40 sich dort ein Nordpol bildet, wo der Eisenkern aus der Spule herausragt. Der Aufbau des Spulenmagnetfeldes bewirkt, daß der aus dem Eisenkern am Nordpol austretende Kraftfluß den Aluminiumring durchsetzt. Der Ring seinerseits wirkt als Sekundärspule mit nur einer Windung: es wird demnach in ihm ein Induktionsstromstoß erzeugt. Die Richtung dieses Stromstoßes läßt sich auf Grund der Abstoßung des Ringes ermitteln. Der in dem Ring induzierte Strom erzeugt für die (sehr kurze) Dauer seines Fließens ein Magnetfeld, das dem der Spule entgegengerichtet sein muß; es stehen demnach zwei

*) Anm.: Über Erweiterung von Meßbereichen s. Bd. XIV.

Nordpole gegenüber (vgl. hierzu Abb. 11, S. 12), andernfalls könnte der Ring nach dem magnetischen Grundgesetz nicht abgestoßen werden. Wir

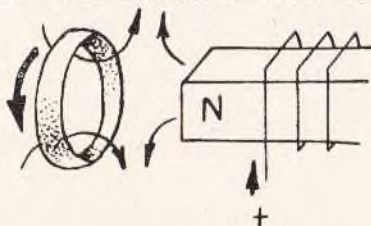


Abb. 41

wenden nun die Polbestimmungsregel an (Ziffer 12, S. 22) und stellen fest, daß der induzierte Strom in Richtung des dicken Pfeiles in Abb. 41, also entgegengesetzt dem Primärstrom, fließen muß.

Beim Ausschalten des Primärstromkreises bricht der Kraftfluß durch den Kern zusammen. Hiernach muß der jetzt induzierte Strom in dem Ring entgegengesetzte Richtung wie beim Einschalten, d. h. die Richtung des ursprünglichen Spulenstromes haben.

Wir erkennen:

Bei Verstärkung des Kraftflusses (s. Ziffer 23, S. 38) hat der induzierte Strom entgegengesetzte Richtung zum Primärstrom, bei Schwächung gleiche Richtung.

(26) Die Lenzsche Regel

Aus dem Versuch in Ziffer 25 leiten wir eine wichtige Regel ab, die nach ihrem Entdecker Lenz die **Lenzsche Regel** genannt wird.

Sie lautet:

Der Induktionsstrom hat stets eine solche Richtung, daß er den Vorgang, durch den er entsteht, zu hemmen sucht.

Im Falle 1 (Verstärken des Kraftflusses) versucht das um den Ring sich aufbauende Magnetfeld das Magnetfeld der Primärspule zu schwächen, indem es sich diesem gewissermaßen entgegenstemmt.

Im Falle 2 (Schwächen des Kraftflusses) versucht das Magnetfeld des Ringes (das dem der Spule gleichgerichtet ist, weil die Stromrichtung im Ring umgekehrt wie im Falle 1 ist), den schwächer werdenden Kraftfluß durch den Eisenkern aufzuhalten, also den **Abbau** des Kraftfeldes zu verhindern.

(27) Primär- und Sekundärstromrichtung bei Wechselstrom

Ohne auf die verhältnismäßig verwickelten Vorgänge einzugehen, sollen hier nur die Tatsachen gesagt werden:

Fließt durch den Primärstromkreis ein Wechselstrom, so haben wir sekundärseitig gleichfalls einen Wechselstrom, dessen Richtung die umgekehrte ist wie die des Primärstromes*).

Durch einen Versuch können wir dieses beweisen.

Wir stellen eine Spule auf die Stirnfläche, stecken einen langen Eisenkern E in den Hohlraum und schieben auf den Eisenkern einen Aluminiumring R (Abb. 42).

Schalten wir die Spule an eine Wechselspannungsquelle (etwa 50—60 V), so wird der Ring hochgehoben und bleibt in dieser Lage stehen. Wir schließen aus dem Ringversuch Abb. 40 und 41, daß jetzt in dem Ring ein Induktionsstrom fließt, der stets eine entgegengesetzte Richtung haben muß wie der Spulenstrom. Infolge der periodisch wechselnden Richtung des durch die

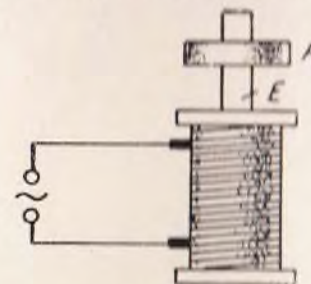


Abb. 42

Spule fließenden Stromes (s. Ziffer 19) wechselt auch der Kraftfluß periodisch seine Richtung und seine Stärke, so daß auch in dem Ring (Sekundärspule) ein Wechselstrom entsteht. Weil der Ring ständig abgestoßen bleibt, muß der Sekundärstrom die entgegengesetzte Richtung haben wie der Primärstrom.

(28) Wärmewirkung des Induktionsstromes

Berühren wir den Ring R in Abb. 42, so bemerken wir, daß er sich stark erhitzt hat. Infolge des geringen Widerstandes des Ringes fließt durch ihn ein starker Induktionsstrom, der eine erhebliche Wärmewirkung verursacht*). Bewegen wir den Ring in Richtung der Spulenfläche, so bemerken wir, daß sich die Wärmeentwicklung vergrößert hat. Infolge des geringer gewordenen Abstandes ist die Einwirkung der Kraftflußänderung auf den Ring größer und der induzierte Strom stärker geworden.

Wir nehmen jetzt eine Spule und führen in den Hohlraum einen Eisenkern ein, der aus **einem** Stück besteht, also massiv ist. Schalten wir die Spule an eine Wechselspannungsquelle, so stellen wir bald fest, daß der Eisenkern gleichfalls sehr warm wird. Der Kern wirkt auch — wie der Ring — als eine Sekundärspule mit nur einer Windung, so daß eine starke Wärmeentwicklung auftritt.

Diese Wärmeentwicklung kann man weitestgehend dadurch unterbinden, daß man den Kern in der Längsrichtung lamelliert. Man nimmt dünne Weicheisenplättchen, überzieht sie mit Lack und verbindet sie fest miteinander. Hierdurch wird den Induktionsströmen der Weg versperrt und der Kern nicht wesentlich erhitzt. Abb. 43 und 44 sollen diese Vorgänge veranschaulichen. Aus Abb. 43 ist erkennbar, daß der durch die Spule fließende Wechselstrom in dem Eisenkern E einen Induktionsstrom zur Folge hat, dessen eine Richtung durch den kreisförmigen Pfeil gekennzeichnet ist und der die Erwärmung des Kernes verursacht. In Abb. 44 ist der Eisenkern unterteilt (durch die senkrechten Linien an der Stirnfläche dargestellt). Ein Induktionsstrom kann also nicht fließen, weil er durch die isolierenden Lackschichten nicht hindurch kann. Der **Kraftfluß** hingegen verläuft ungehindert in der Längsrichtung.

*) Anm.: Näheres s. Bd. II b.

*) Anm.: Über Elektrowärme s. Bd. I b, Ziff. 11.

Neben der unzulässig hohen Erwärmung der Spule verursacht ein ungeblätterter Eisenkern in magnetischen Wechselfeldern erhebliche Energieverluste.

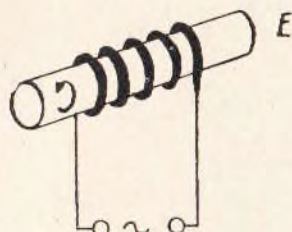


Abb. 43

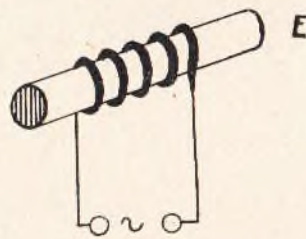


Abb. 44

(29) Wirbelströme

Wirbelströme treten in Metallstücken auf, die sich in einem magnetischen Wechselfeld befinden. Sie entstehen gleichfalls durch Induktion, haben unkontrollierbare Richtungen und verursachen wie ungeblätterte Eisenkerne Wärmeverluste.

(30) Induktion auf Fernmeldeleitungen

So, wie eine Induktionswirkung von einer von Wechselstrom durchflossenen Spule auf eine benachbarte Spule ausgeübt wird, tritt eine solche auch bei unseren Fernmeldeleitungen auf, wenn sie über längere Strecken nebeneinander laufen.

In Abb. 45 laufen drei Doppelleitungen (Freileitungen) nebeneinander, die mit I, II und III bezeichnet sind. Fließen über Leitung II Sprechwechsel-

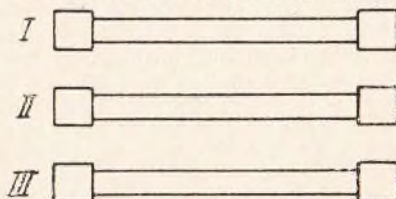


Abb. 45

ströme, so induzieren sie auf den Leitungen I und III Wechselspannungen gleicher Form und damit Wechselströme, so daß das auf der Leitung II Gesprochene auf den Leitungen I und III gehört werden kann.

Durch entsprechende Anordnung der Isolatoren auf den Masten (gerade und U-Stützen für jede Doppelleitung) lassen sich die Induktionswirkungen bis zu einer gewissen Grenze so gering halten, daß die Teilnehmer, die über die Leitungen I und II sprechen, nichts oder kaum etwas wahrnehmen können. Bei längeren Freileitungen (über 5 km) müssen jedoch besondere Schutzmaßnahmen ergriffen werden, die darin bestehen, daß man die a- und b-Zweige jeder Doppelleitung in Abständen von 5 km nach einem bestimmten Plan kreuzt. Hierdurch werden die Induktionserscheinungen völlig beseitigt.

Bei Kabeln sind die Induktionswirkungen infolge des geringen Abstandes der einzelnen Doppeladern wesentlich größer als bei Freileitungen. Man kreuzt die a- und b-Adern daher laufend, d. h. die Adern sind verdreht.

(31) Grundsätzliche Darstellung der Erzeugung von Wechselspannungen durch Maschinen

In Ziffer 21, S. 35 wurde dargelegt, daß an den Enden eines Leiters eine EMK auch induziert wird, wenn sich der **Leiter** gegen das magnetische Feld bewegt. Diese Tatsache wird für die Erzeugung von Wechselspannungen mittels Maschinen ausgenutzt.

In der einfachsten Form können wir uns die Erzeugung einer Wechselspannung wie in Abb. 46 dargestellt vorstellen.

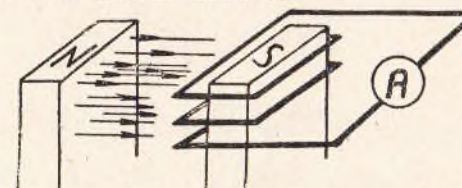


Abb. 46

Wir bewegen eine Spule über einen Pol (hier den Südpol) eines Dauermagneten auf und ab. Die Enden der Spule verbinden wir mit einem Strommesser. Nach den Induktionsgesetzen entsteht demnach in dem geschlossenen Stromkreis Spule — Strommesser ein Induktionsstrom wechselnder Richtung. Die jeweilige Richtung des Stromes können wir an Hand der **Rechtehandregel** feststellen, die wir zur Bestimmung der Kraftflußrichtung angewandt haben (vgl. Ziffer 12, S. 22).

Wir halten die rechte Hand mit abgespreiztem Daumen so, daß der **Kraftfluß** zwischen den Magnetpolen in die **Handfläche eintritt**. Der abgespreizte Daumen zeigt die **Bewegungsrichtung** der Spule an. Die Finger zeigen dann in Richtung des **Stromes** (positive Stromrichtung!).*)

Die Stromrichtung in Abb. 46 würde sich wie in Abb. 47 ergeben. Der Kraftfluß K tritt in die Handfläche ein, die Bewegung B des Leiters verläuft in

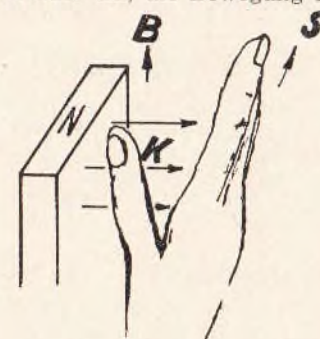


Abb. 47

*) Anm.: BKS-(Schlüssel): B = Bewegung, K = Kraftflußrichtung, S = Stromrichtung.

Richtung des Daumens (in diesem Falle von unten nach oben), der Strom S fließt in Richtung der Fingerspitzen. Bei der Bewegung der Spule in entgegengesetzter Richtung, also nach unten, hat (s. Induktionsgesetz!) der Strom die umgekehrte Richtung wie vorhin.

Die praktische Ausführung eines maschinellen Spannungserzeugers, z. B. eines Kurbelinduktors, zeigt Abb. 48. Hier sind die Enden eines kräftigen Hufeisenmagneten mit Polschuhen ausgerüstet. In dem Hohlraum zwischen den



Abb. 48

Polschuhen ist ein sogenannter „Anker“, der aus lamelliertem Weicheisen besteht, drehbar gelagert. Wegen der Form dieses Ankers führt er die Bezeichnung „Doppel-T-Anker“. Infolge der Polschuhe und der Form des Ankers verläuft ein kräftiger sog. „Dauerfuß“ durch den Anker. Auf dem Anker selbst sind eine größere Zahl von Windungen dünnen, isolierten Drahtes gewickelt. Wird der Anker gedreht, so tritt in ihm eine Kraftflußänderung auf, die in der Wicklung eine Wechsel-EMK erzeugt (Näheres über den Kurbelinduktor s. Band III, Abschnitt V).

Größere Spannungserzeuger (Dynamomaschinen) verwenden an Stelle von Dauermagneten Elektromagnete, auch sind die Formen des Ankers unterschiedlich. In diesen Maschinen wird — im Gegensatz zum Kurbelinduktor — eine sinusförmige Wechselspannung erzeugt (vgl. Ziffer 19, S. 31). Die Leistungsabgabe kann außerordentlich groß sein, u. U. viele Tausende Kilowatt betragen.

Der Transformator

(32) Die Induktionsvorgänge haben nicht nur besondere technische Bedeutung erlangt durch die Entwicklung der Dynamomaschine, sondern auch durch ein Hilfsmittel, das es gestattet, elektrische Energie mit sehr geringen Verlusten über große Entfernungen zu befördern: den Transformator. Auch in der Fernmeldetechnik spielt der Transformator, der hier meist Übertrager genannt wird, eine große Rolle.

(33) Aufbau des Transformators

Der Transformator besteht in der Hauptsache aus einem fest geschlossenem Eisenkreis aus lamelliertem, bestem Weicheisen (Dynamoblech), dessen Verluste infolge Hysteresis und Wirbelstrombildung sehr gering sind. Der Kern, der meist viereckig ist, trägt eine Primär- und eine Sekundärwicklung (Abb. 49).

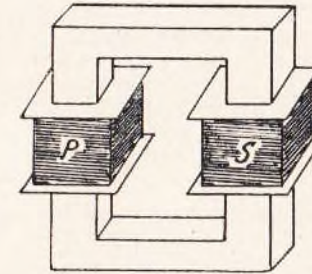


Abb. 49

Je nach Verwendungszweck haben die Spulen wenige Windungen dicken oder viele Windungen dünnen Drahtes.

Wirkungsweise des Transformators

(34) Sekundärspannungen im Verhältnis zur Primärspannung

Wird an die Klemmen der Primärwicklung eine Wechsel-EMK gelegt, so entsteht an den Klemmen der Sekundärwicklung eine Wechsel-EMK entgegengesetzter Richtung (vgl. Ziffer 27, S. 42).

Wir wollen nun die Abhängigkeit dieser Sekundär-EMK untersuchen. Wir nehmen hierzu einen Eisenkern mit aufschiebbarem Joch, eine Primärspule mit 300 und eine Sekundärspule mit gleichfalls 300 Windungen (vgl. Abb. 49). An die Klemmen der Primärspule legen wir eine Wechselspannung von 10 V an, an die Klemmen der Sekundärwicklung einen Spannungsmesser. Nun fertigen wir eine Tabelle nach Abb. 50 an und tragen die entsprechenden

Primärspule		Sekundärspule	
Windungen	Spannung	Windungen	Spannung
300	10 V	300	10 V
300	10 V	600	20 V
300	10 V	1200	40 V
300	10 V	300	10 V
600	10 V	300	5 V
1200	10 V	300	2,5 V

Abb. 50

Werte ein. Bei einer Sekundärspule von 300 Windungen messen wir an den Sekundärklemmen eine Spannung von gleichfalls 10 V, also die gleiche Span-

nung, die an den Primärklemmen anliegt. Die Windungszahl und die gemessene Spannung tragen wir unter der Spalte „Sekundärspule“ ein. Wir tauschen jetzt die Sekundärspule gegen eine solche mit 600 Windungen aus und stellen fest, daß die Sekundärspannung jetzt 20 V beträgt. Diese Werte tragen wir gleichfalls in die Tabelle ein.

Zuletzt nehmen wir eine Spule von 1200 Windungen und lesen eine Spannung von 40 V ab. Diese Werte tragen wir ebenfalls ein.

Was ersehen wir hieraus?

Wir betrachten das Verhältnis der Primärwindungszahl zur Sekundärwindungszahl und das Verhältnis der Primär-EMK zur Sekundär-EMK.

Im Falle 1 verhalten sich die Windungen wie 300 : 300 oder wie 1 : 1; die Spannungen verhalten sich wie 10 : 10, d.h. auch wie 1 : 1.

Wir können also schreiben, wenn wir die Windungszahlen mit w_p und w_s , die EMK mit E_p und E_s bezeichnen:

$$w_p : w_s = 300 : 300 = 1 : 1 \text{ und} \\ E_p : E_s = 10 : 10 = 1 : 1$$

Im Falle 2 verhalten sich

$$w_p : w_s = 300 : 600 = 1 : 2 \text{ und} \\ E_p : E_s = 10 : 20 = 1 : 2$$

und im Falle 3

$$w_p : w_s = 300 : 1200 = 1 : 4 \text{ und} \\ E_p : E_s = 10 : 40 = 1 : 4$$

Wir stellen hierbei eine Gesetzmäßigkeit fest, nämlich, daß sich die **elektromotorischen Kräfte wie die Windungszahlen verhalten**.

Diese Gesetzmäßigkeit kleiden wir in eine Verhältnisgleichung (Proportion)*).

$$w_p : w_s = E_p : E_s = \ddot{u}$$

wobei $\ddot{u}$ das **Übersetzungsverhältnis des Transformators** bedeutet.

Wird die sekundäre Windungszahl eines Transformators erhöht, so erhöht sich die sekundäre EMK entsprechend dem Verhältnis der Windungszahlen.

Das ist nichts Neues; denn wir haben bereits in Ziffer 24., S. 38 gesehen, daß die Induktionsspannung bei gleichbleibender Kraftflußänderung um so höher wird, je mehr Windungen die induzierte Spule besitzt.

Wir lassen nun die Windungszahl der Sekundärspule konstant, z. B. 300 Windungen, und vergrößern die Windungszahl der Primärspule bei gleichbleibender Primärspannung (10 V).

Nehmen wir eine Primärspule mit 600 Windungen, so messen wir sekundärseitig 5 V. (In Tabelle Abb. 50 eintragen.)

Jetzt tauschen wir die Primärspule gegen eine solche mit 1200 Windungen aus und stellen fest, daß die Sekundär-EMK nur 2,5 V beträgt.

Es gilt demnach das gleiche Gesetz.

$$w_p : w_s = 600 : 300 = 2 : 1 \\ E_p : E_s = 10 : 5 = 2 : 1 \text{ und} \\ w_p : w_s = 1200 : 300 = 4 : 1 \\ E_p : E_s = 10 : 2,5 = 4 : 1$$

*) Anm. Ausführliche Behandlung von Verhältnisgleichungen (Proportionen) s. Bd. XIV.

Wird die primäre Windungszahl eines Transformators erhöht, so ermäßigt sich die Sekundär-EMK entsprechend dem Verhältnis der Windungszahlen.

Das gleiche trifft natürlich auch zu, wenn die Primärwindungszahl **konstant** bleibt und die sekundäre Windungszahl verringert wird.

Aus dem Übersetzungsverhältnis $\ddot{u}$ können wir sofort erkennen, um welchen Betrag die Sekundär-EMK sich gegenüber der Primärspannung erhöht oder verringert.

$\ddot{u} = 1 : 10$ bedeutet, daß die Sekundär-EMK das Zehnfache der primären,

$\ddot{u} = 5 : 1$ bedeutet, daß die Sekundär-EMK $\frac{1}{5}$ der primären ist.

(35) Übersetzungsverhältnis der Ströme

So, wie es ein Übersetzungsverhältnis der **Spannungen** gibt, gibt es auch ein Übersetzungsverhältnis der **Ströme**.

Wir verwenden zunächst einen Transformator mit einem $\ddot{u} = 1 : 1$ (primär- und sekundärseitig je 300 Windungen mit gleichem Widerstand) und schalten sowohl in den Primär- als auch in den Sekundärstromkreis zwei Taschenlampenbirnen parallel (Abb. 51). Um die Primärspannung regeln zu können,

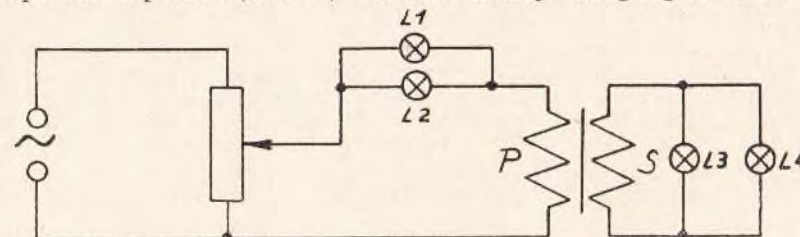


Abb. 51

benutzen wir einen Spannungsteiler. Wir stellen an dem Spannungsteiler die Spannung so ein, daß die Lampen L1 und L2 hell aufleuchten und stellen fest, daß L3 und L4 gleichfalls hell aufleuchten. Wir ziehen daraus den Schluß, daß Primär- und Sekundärstrom (I_p und I_s) gleich stark sind. Infolge des Übersetzungsverhältnisses von 1 : 1 ist $E_p = E_s$; I_p und I_s müssen daher gleich stark sein, weil wir gleiche Widerstandswerte haben.

Bei einem Übersetzungsverhältnis von 1 : 1 ist (abgesehen von den verhältnismäßig geringen Verlusten im Transformator) $I_p = I_s$.

Wir wählen jetzt ein $\ddot{u}$ von 1 : 2 (300 : 600) und bemerken, daß wohl beide Lampen im Primärstromkreis (L1 und L2) hell aufleuchten, daß aber die Lampen L3 und L4 im Sekundärkreis nur noch glimmen. Der Sekundärstrom I_s muß demnach schwächer geworden sein als im ersten Versuch. Entfernen wir eine der beiden Lampen (L3 oder L4), so brennt die andere gleich hell wie jede der Lampen im Primärstromkreis (L1 und L2). Wir schließen daraus, daß der Sekundärstrom nur halb so stark ist wie der Primärstrom (vgl. hierzu Parallelschaltung gleicher Widerstände, Band Ia, S. 23, Beispiel c).

$$E_s = 2 \times E_p, I_s \text{ jedoch } \frac{1}{2} I_p.$$

Nun nehmen wir primärseitig eine Spule mit 600 Windungen und sekundärseitig eine mit 300 Windungen ($\ddot{u} = 2 : 1$), entfernen die Lampe L2 und regeln die Primärspannung so ein, daß L1 hell aufglüht. Im Sekundärkreis liegen

L3 und L4 wieder parallel. Wir bemerken, daß beide Lampen genau so hell aufleuchten wie die Lampe L1, ein Beweis dafür, daß der Sekundärstrom doppelt so stark ist wie der Primärstrom.

$$E_s = \frac{1}{2} E_p; I_s \text{ jedoch } 2 \times I_p$$

Wir folgern hieraus:

Bei einem Transformator verhalten sich die Stromstärken **umgekehrt** wie die Windungszahlen.

Mit einem Transformator kann man die Spannung auf Kosten der Stromstärke oder die Stromstärke auf Kosten der Spannung erhöhen, jedoch nie beides zugleich.

(36) Primär- und Sekundärleistung

Aus den Ziffern 34 und 35 können wir den Schluß ziehen, daß die Primärleistung N_p gleich der Sekundärleistung N_s ist, allerdings ohne Berücksichtigung des Leistungsverlustes im Transformator selbst.

$$\text{Primärleistung } N_p = \text{Sekundärleistung } N_s \\ E_p \times I_p = E_s \times I_s$$

Erhöht sich die Sekundär-EMK infolge des Übersetzungsverhältnisses auf das Doppelte, so sinkt der Strom auf die Hälfte. Wird die Sekundär-EMK um die Hälfte kleiner als die primäre, so ist der Sekundärstrom doppelt so groß wie der Primärstrom.

(37) Nutzleistung, Leistungsverlust

In die Formel $E_p \times I_p = E_s \times I_s$ haben wir bewußt die EMK E eingesetzt. In Band Ia, Ziffer 37, wurde die Leistungsformel $N = U \times I$ behandelt, ohne auf die Begriffe Nutz- und Verlustleistung einzugehen. Wir müssen daher an dieser Stelle die Leistungsformel näher betrachten.

Auf S. 48 des Bandes Ia ist dargelegt, daß man unter U stets die **Klemmenspannung** einer Spannungsquelle zu verstehen hat und daß man darüber hinaus mit dem inneren Spannungsverlust U_v sehr häufig zu rechnen hat. $U + U_v$ ergaben bekanntlich die EMK E .

Der Strom I eines Stromkreises errechnete sich dann zu $I = \frac{E}{R_i + R_a} = \frac{E}{R_{ges}}$.

Da die Leistung N sich errechnet aus der Nutz- oder Klemmenspannung U und dem Strom I , spricht man von einer **Nutzleistung**, also einer Leistung, die Nutzen schafft und die an den Verbraucher abgegeben wird. Nun hat ja jede Spannungsquelle einen mehr oder weniger großen inneren Widerstand, über dem der Spannungsverlust U_v entsteht. Über diesem inneren Widerstand muß demzufolge auch ein Leistungsverlust N_v entstehen, der sich aus dem Produkt $U_v \times I$ errechnet. Es ergeben sich demnach, ähnlich wie beim erweiterten Ohmschen Gesetz, folgende Beziehungen:

$$\begin{aligned} N &= U \times I \\ N_v &= U_v \times I \end{aligned}$$

$U + U_v$ ergibt die EMK E ; demnach ergibt $N + N_v$ die im **gesamten** Stromkreis (inneren und äußeren) verbrauchte Leistung N_{ges} .

$$N_{ges} = E \times I$$

Je größer also der innere Widerstand einer Spannungsquelle ist, um so größer wird U_v und damit auch N_v .

Wir wollen die Formel $N = U \times I$ weiter betrachten. Nach dem Ohmschen Gesetz ist $U = I \times R$. Wir können demnach an Stelle von U in die Leistungsformel $I \times R$ setzen, so daß man die Leistung N auch errechnen kann zu

$$N = U \times I = I \times R \times I = I^2 \times R = I^2 \times R^*)$$

*) Anm.: Vgl. Bd. Ib, Ziffer 11 (Joulesches Gesetz).

Für den Leistungsverlust N_v gilt das gleiche:

$$N_v = U_v \times I = I \times R_i \times I = I^2 \times R_i$$

so daß wir jetzt schreiben können:

$$\begin{aligned} N &= U \times I = I^2 \times R_a \\ N_v &= U_v \times I = I^2 \times R_i \end{aligned}$$

Die Aufstellung einer weiteren Leistungsformel ist auch möglich. I ist nach dem Ohmschen Gesetz $= \frac{U}{R}$. Setzen wir diesen Quotienten in die Leistungsformel ein, so erhalten wir

$$N = U \times I = U \times \frac{U}{R} = \frac{U^2}{R}$$

Von dieser Leistungsformel wird in der Fernmeldetechnik jedoch wenig Gebrauch gemacht.

(38) Innerer Widerstand von Transformatoren

Nach dem bisher über den Transformator Gesagten, können wir die Sekundärspule eines Transformators als eine Wechsellspannungsquelle auffassen, deren EMK E von der Höhe der Primärspannung und dem Übersetzungsverhältnis $\ddot{u}$ abhängt.

Nun besitzt jede Sekundärwicklung einen inneren Widerstand R_i , der von der Anzahl der Windungen und dem Querschnitt des Drahtes abhängig ist. Wir haben also hier das erweiterte Ohmsche Gesetz anzuwenden, wenn wir die Klemmenspannung errechnen wollen. Wie bei einer Gleichspannungsquelle ist die Klemmenspannung U abhängig von der EMK E und von dem inneren und äußeren Widerstand. Wird der Transformator stark belastet, d. h., daß der an den Sekundärklemmen angeschlossene Verbraucher einen geringen Widerstand hat, so wird U gegenüber E im Verhältnis klein sein. Das in Ziffer 34, S. 48 festgelegte Gesetz

$$W_p : W_s = E_p : E_s = \ddot{u}$$

hat jedoch nur Gültigkeit, wenn wir einen **vollkommen geschlossenen lamellierten Eisenkreis haben***).

(39) Anwendung des Transformators

a) Der Hochspannungstransformator

Der Hochspannungstransformator findet hauptsächlich Anwendung bei der Übertragung elektrischer Energie über große Entfernungen. Erst durch ihn konnte die elektrische Energiewirtschaft einen derartigen Aufschwung erleben, daß der elektrische Strom bis in die entlegensten Dörfer getragen werden kann.

Wie bei jeder Energieübertragung, bilden die Energieverluste auf den Leitungen das größte Problem, gleich, ob es sich um Stark- oder Schwachstrom handelt. Wir wollen dieses Problem durch eine kleine Rechnung beleuchten. Über jedem Widerstand treten Leistungsverluste (Leistungsabfälle) auf, die wir gemäß Ziffer 37 errechnen können zu

$$N = U \times I \text{ oder } N = I^2 \times R.$$

Bei der Übertragung von elektrischer Energie kommt es darauf an, die Verluste, die über dem Widerstand der Leitung entstehen, so gering wie möglich zu halten, damit der höchstmögliche Prozentsatz an Energie am fernen Ende der Leitung, also bei den Verbrauchern (Städte, Fabrikanlagen usw.), ankommt.

Wir wollen die obenerwähnte Rechnung mit ganz einfachen Zahlen durchführen.

*) Anm.: Vgl. Bd. Iib: „Verhalten eines Transformators bei Leerlauf und Belastung.“

Eine Wechselspannungsquelle liefert eine Spannung von 100 V; ein Verbraucher soll eine Leistung von 1000 W aufnehmen. Zwischen der Spannungsquelle und dem Verbraucher besteht eine Doppelleitung von 10 Ohm Widerstand.

Bei $U = 100 \text{ V}$ und $N = 1000 \text{ W}$ fließt ein Strom $I = \frac{N}{U} = \frac{1000}{100} = 10 \text{ A}$.

Da der Widerstand der Leitung 10 Ohm beträgt, entsteht über der Leitung ein Leistungsverlust $N_v = I^2 \times R = 10 \times 10 \times 10 = 1000 \text{ W}$. Die gesamte, an den Verbraucher abzugebende Leistung wird also über dem Widerstand der Leitung (10 Ohm) verbraucht, in Wärme umgesetzt. Der Verbraucher selbst erhält keine Leistung.

Wie können wir diesen Leistungsverlust verkleinern? Hierzu eine kurze Überlegung. Die Hauptursache für diesen Leistungsverlust ist in dem hohen Strom zu suchen; denn $I \times I = I^2$ ist gleich $10 \times 10 = 100$. Wir könnten zwar den Widerstand verringern, indem wir eine Leitung mit bedeutend höheren Querschnitt nehmen, aber diese Maßnahme ist praktisch nicht durchführbar, allein schon infolge der dadurch entstehenden hohen Kosten, die besonders bei langen Leitungen übermäßig ins Gewicht fallen. Wir müssen also einen anderen Weg einschlagen, und zwar durch Erhöhung der Spannung und dadurch Verkleinerung der Stromstärke. Hierzu dient der Transformator. Wir schließen an die Primärwicklung die Wechselspannungsquelle an, an die Sekundärwicklung die Leitung und sind damit in der Lage, die Spannung durch Wahl eines bestimmten Übersetzungsverhältnisses $\bar{u}$ auf fast jeden beliebigen Wert zu erhöhen. Am Ort des Verbrauchers stellen wir gleichfalls einen Transformator auf, dessen Primärseite mit der Leitung und dessen Sekundärseite mit dem Verbraucher verbunden wird. Hierbei ist jedoch zu beachten, daß das Übersetzungsverhältnis umgekehrt sein muß wie das des ersten Transformators, damit an dem Verbraucher die normale Spannung (hier 100 V) anliegt (Abb. 52). Transformator I transformiert die Spannung hoch; der über die Leitung fließende Strom ist gering, Transformator II transformiert die Spannung herunter, dafür wird der über den Verbraucher fließende Strom stark. Die Primärwicklung des Transformators I muß (wegen des hohen Primär-

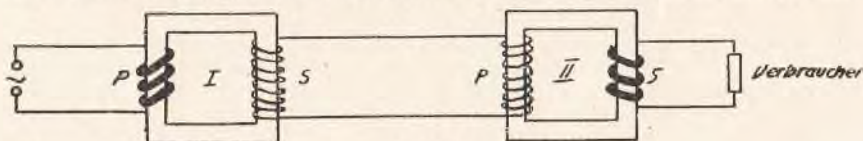


Abb. 52

stromes) aus wenigen Windungen dicken Drahtes, die Sekundärwicklung aus vielen Windungen dünnen Drahtes bestehen. Beim Transformator II müssen die Verhältnisse umgekehrt liegen.

Jetzt wollen wir ermitteln, wie hoch die Sekundärspannung des Transformators I in unserem Beispiel sein muß, damit wir die Leistungsverluste ($I^2 \times R$) auf der Leitung auf ein Mindestmaß verringern. Hierzu stellen wir eine Tabelle auf (Abb. 53).

Von links nach rechts gelesen, bedeuten U = Spannung an den Sekundärklemmen des Transformators I, I = Sekundärstrom, N_1 die abgegebene Leistung, $\bar{u}$ I das Übersetzungsverhältnis des Transformators I, R den Widerstand der Leitung, $N_v = I^2 \times R$ den Leistungsverlust über der Leitung, $\bar{u}$ II das Übersetzungsverhältnis des Transformators II, N_2 die an den Verbraucher abgegebene Leistung.

U	I	N_1	$\bar{u}$ I	R	$N_v = I^2 \times R$	$\bar{u}$ II	N_2
100V	10 A	1000W	1:1	10 Ω	$10 \cdot 10 \cdot 10 = 1000 \text{ W}$	1:1	0W
1000V	1 A	1000W	1:10	10 Ω	$1 \cdot 1 \cdot 10 = 10 \text{ W}$	10:1	990W
10000V	0,1 A	1000W	1:100	10 Ω	$0,1 \cdot 0,1 \cdot 10 = 0,1 \text{ W}$	100:1	999,9W

Abb. 53

Die Leistungsverluste in den Transformatoren sind hierbei nicht berücksichtigt.

Wir sehen, daß bei einer Spannung von 100 V und einem Strom von 10 A die gesamte Leistung von 1000 Watt über dem Widerstand R der Leitung verlorengeht. Erhöhen wir die Spannung U auf das Zehnfache, so wird der Strom I auf den zehnten Teil des ursprünglichen Wertes herabgesetzt (vgl. Ziffer 35). Demzufolge beträgt der Leistungsverlust über der Leitung ($N_v = I^2 \times R$) nur 10 Watt, und für den Verbraucher verbleiben 990 Watt. Erhöhen wir die Spannung nochmals um das Zehnfache, so hat der Strom nur eine Stärke von 0,1 A. Die abgegebene Leistung beträgt aber immer 1000 W ($10000 \times 0,1 = 1000 \text{ W}$), wohingegen der Leistungsverlust auf der Leitung nur 0,1 W ausmacht, so daß der Verbraucher praktisch die volle Leistung erhält.

Durch Herauftransformieren der Spannung auf der einen Seite und Heruntertransformieren auf der anderen Seite können die sonst hohen Energieverluste auf den Leitungen so weit gemindert werden, daß sie praktisch kaum ins Gewicht fallen.

Jetzt können wir auch verstehen, warum die Überlandleitungen Spannungen bis zu 220 kV, in Zukunft sogar bis zu 380 kV führen.

In Gegenden, in denen Wasserkraft oder Braunkohle in reichlichem Maße verfügbar sind, sind und werden große Kraftwerke errichtet. Hier wird die elektrische Energie erzeugt, die über Hunderte von Kilometern weitergeleitet wird und die Industrie, die Wirtschaft usw. versorgt. Nur hierdurch ist es möglich, daß die elektrische Energie so billig an den Verbraucher abgegeben werden kann, wie es heute der Fall ist.

b) Der Hochstromtransformator

Das Gegenteil des Hochspannungstransformators stellt der **Hochstromtransformator** dar. Hierbei wird eine verhältnismäßig hohe Primärspannung auf einen sehr niedrigen Wert (einige wenige Volt) heruntertransformiert, wobei außerordentlich hohe Stromstärken (z. T. Tausende von Ampere) auftreten.

Wir müssen zum Verständnis des Zweckes eines Hochstromtransformators näher auf die Wärmewirkung des elektrischen Stromes eingehen und das im Heft I a, Ziffer 35 Gesagte erweitern.

In den vorhergehenden Abschnitten wurde des öfteren von Verlusten, insbesondere von Wärmeverlusten, gesprochen. Diese Verluste verbrauchen elektrische Energie, es sind also **Leistungsverluste** (vgl. Ziffer 37), die sich errechnen zu $N_v = I^2 \times R$. Je höher der Widerstand und je stärker der Strom ist, der den Widerstand durchfließt, um so größer sind die Leistungsverluste, die sich in Wärme umsetzen.

Die Wärmeentwicklung in einem stromdurchflossenen Leiter ist abhängig von dem Quadrat der Stromstärke I mal dem Widerstand R *).

In vielen Fällen nutzen wir die Wärmeentwicklung aus und bemühen uns, sie möglichst groß zu machen, z. B. bei einer elektrischen Kochplatte, einem elektrischen Bügeleisen usw. In verstärktem Maße wird die Stromwärme ausgenutzt beim Elektroschweißen oder bei dem elektrischen Schmelzofen.

Für diese Zwecke benötigen wir außerordentlich hohe Stromstärken, die wir nur gewinnen können, indem wir in besonders hierfür gebauten Transformatoren die Spannung auf einen geringen Wert herab- und den Strom hinauftransformieren. Sie müssen daher primärseitig viele Windungen und sekundärseitig ganz wenige Windungen haben, deren Leiterquerschnitt entsprechend den hohen Stromstärken sehr groß sein muß.

Nehmen wir an, daß die Primärspule aus 2000 Windungen und die Sekundärspule aus 5 Windungen besteht. Das Übersetzungsverhältnis $\ddot{u}$ beträgt demnach $2000 : 5 = 400 : 1$. Nimmt der Transformator z. B. primärseitig 6 A auf, so erhalten wir einen Sekundärstrom bei Kurzschluß von $400 \times 6 = 2400$ A. Mit dieser Stromstärke sind wir schon in der Lage, eine so starke Wärmeentwicklung hervorzurufen, daß mittels einer Schweißzange eine einwandfreie Schweißung durchgeführt werden kann.

(40) Transformatoren in der Fernmeldetechnik

In Ziffer 32 wurde bereits kurz erwähnt, daß der Transformator auch in der Fernmeldetechnik eine sehr große Rolle spielt, wobei allerdings — je nach Aufbau und Verwendungszweck — verschiedene Bezeichnungen gewählt worden sind.

Ein im Aufbau und Wirkungsweise dem Transformator ähnliches Gebilde ist die **Induktionsspule**, die in jedem Fernsprechapparat vorhanden ist. Hierüber wäre im Heft III, Abschnitt IV, nachzulesen. Die Induktionsspule hat weniger die Aufgabe, Spannungen und Ströme zu transformieren, als in der Hauptsache den Fernhörer vom gleichstromdurchflossenen Mikrophonstromkreis zu trennen (vgl. Band IV, Abschnitt IV).

Eine weitere bedeutende Rolle in der Fernmeldetechnik spielen die **Übertrager**. Sie sind ähnlich aufgebaut wie Transformatoren der Starkstromtechnik. Der wesentliche Unterschied gegenüber einem Transformator besteht darin, daß sowohl die Primär- als auch die Sekundärspulen in der Mitte aufgetrennt und die Wicklungshälften an Klemmen geführt sind, die folgende Bezeichnungen tragen:

AP 1	= Anfang	Primärwicklung 1
EP 1	= Ende	Primärwicklung 1
AP 2	= Anfang	Primärwicklung 2
EP 2	= Ende	Primärwicklung 2
AS 1	= Anfang	Sekundärwicklung 1
ES 1	= Ende	Sekundärwicklung 1
AS 2	= Anfang	Sekundärwicklung 2
ES 2	= Ende	Sekundärwicklung 2

Die Schaltung eines solchen Übertragers zeigt Abb. 54.

Übertrager werden überall dort verwendet, wo es in den VStn darauf ankommt, Gleich- und Wechselstromkreise voneinander zu trennen (vgl. Übertrager im Schnurpaar einer VSt (ZB) in Westernschaltung [Band IV, Abb. 48], Übertrager in VStn (W) [vgl. Band V, Abb. 23 zwischen I. und II. GW])!

*) Anm.: S. Bd. I b, Ziffer 11 „Stromwärme“.

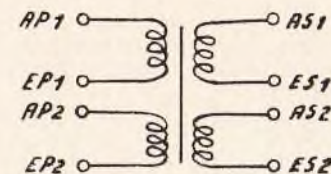


Abb. 54

ferner in Verstärkerämtern und Fernämtern, wo sie besondere Aufgaben zu erfüllen haben (Leitungsanpassung u. dgl.). Zu erwähnen ist, daß das Übersetzungsverhältnis bei Übertragern sich **nicht** auf die Windungszahlen bezieht. Zwischen EP 1 und AP 2 sowie zwischen ES 1 und AS 2 kann man z. B. einen Kondensator schalten (I. GW) oder beide Klemmen miteinander verbinden. Dann sind beide Wicklungen hintereinandergeschaltet, und die Mitte kann für besondere Zwecke herausgeführt werden, z. B. für die in der nächsten Ziffer zu behandelnden Vierschaltung.

(41) Die Vierschaltung

Der höchste Anteil an Kosten für Fernmeldeanlagen entfällt auf die Leitungen. Um den Fernsprech- und Telegraphenbetrieb so wirtschaftlich wie möglich zu gestalten, hat man schon frühzeitig nach Möglichkeiten gesucht, eine

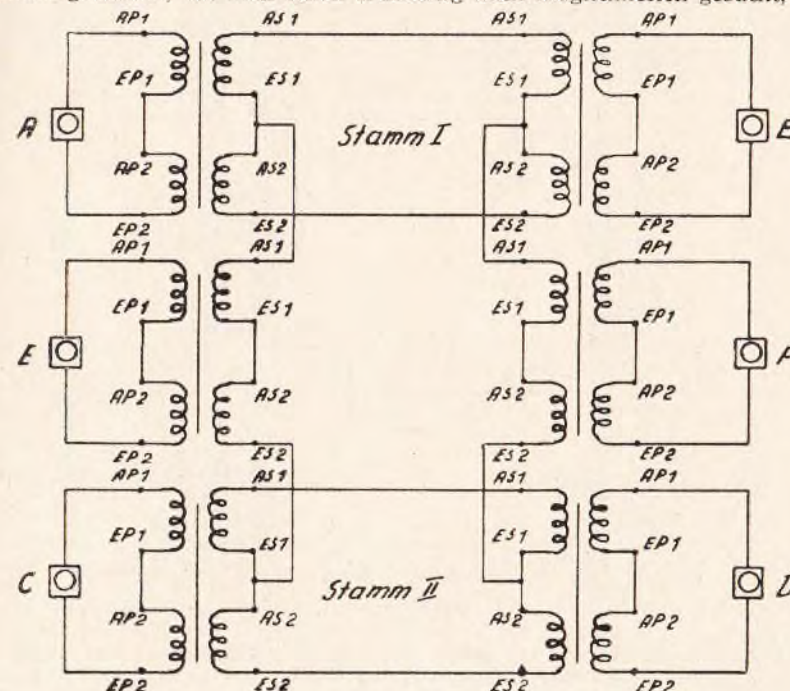


Abb. 55

bessere Ausnutzung des Fernleitungsnetzes zu erreichen. Neben der heutigen Vielfachausnutzung mittels Trägerfrequenztelefonie und der Wechselstromtelegraphie hat die **Viererschaltung** immer noch — besonders bei kürzeren Entfernungen — eine Bedeutung.

Zur Erläuterung der Viererschaltung betrachten wir Abb. 55. Wir sehen hier zwei Doppelleitungen I und II, die die Bezeichnung „Stammleitungen“ oder „**Stämme**“ erhalten. Jeder Stamm ist am Anfang und am Ende durch einen Übertrager abgeschlossen. Die Primärseiten der Übertrager sind (über Vermittlungsstellen) mit den Teilnehmern A, B, C und D verbunden. An den Klemmen AS 1 und ES 2 liegen die Fernleitungen. Tln A und B sowie Tln C und D und können miteinander sprechen, weil die Sprechwechselströme durch die Induktionswirkung der Übertrager übertragen werden.

Wir können jetzt einen dritten Sprechkreis schalten, ohne daß der Sprechverkehr auf den Stämmen I und II gestört wird. Hierzu nehmen wir zwei weitere Übertrager, deren Primäranschlüsse AP 1 und EP 2 mit zwei weiteren Tln E und F (auch über Vermittlungsstellen) verbunden sind. Die Sekundärklemmen AS 1 und ES 2 dieser Übertrager werden mit den **Mitten** der Sekundärwicklungen der Übertrager verbunden, die die Stämme I und II abschließen. Abb. 56 zeigt eine vereinfachte Darstellung.

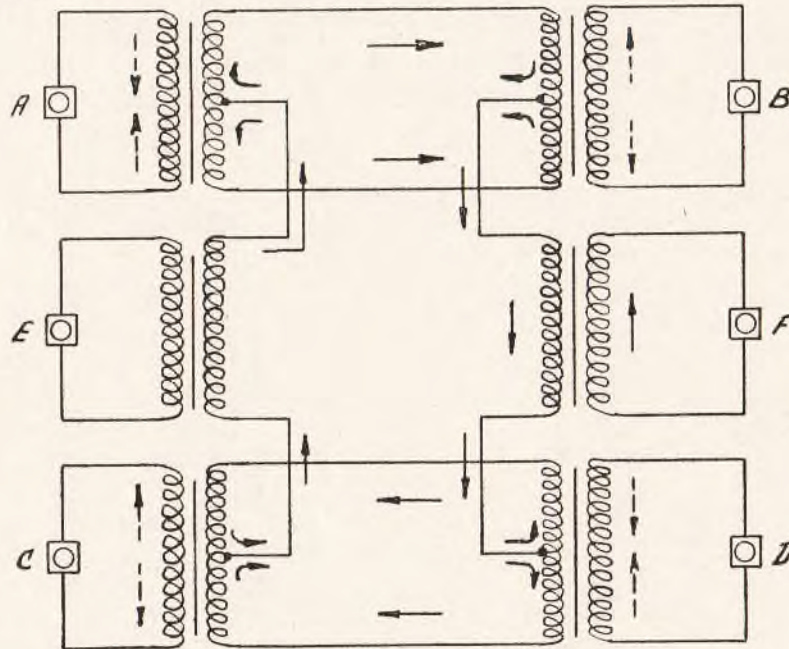


Abb. 56

Durch diese Maßnahme ist ein **dritter** Sprechkreis geschaffen worden, bei dem der a- und b-Zweig des Stammes als Hinleitung, der a- und b-Zweig des Stammes II als Rückleitung dienen. Dieser dritte Sprechkreis wird **Vierer** oder **Phantom** genannt.

Die Wirkungsweise ist aus Abb. 56 ersichtlich. Eine Halbwelle des Sprechwechselstromes, der durch Sprechen des Tln E auf die Sekundärwicklung des Übertragers übertragen wird, möge die Richtung des Pfeiles haben. Der Strom fließt demnach von der Klemme AS 1 des Übertragers (vgl. Abb. 55) zur Mitte des Übertragers, der den Stamm I in Richtung zum Tln A abschließt. Hier verzweigt er sich zu **gleichen** Teilen (beide Wicklungshälften der Übertrager haben gleiche Werte), fließt über den a- und den b-Zweig des Stammes I und vereinigt sich wieder an der Mitte des Übertragers, der den Stamm I in Richtung zum Tln B abschließt. Er fließt nun in einer Richtung über den zum Tln F gehörigen Übertrager, verzweigt sich über den a- und b-Zweig des Stammes II, vereinigt sich wieder am Übertrager, über den der Tln C angeschlossen ist, und kehrt zum Ausgangspunkt zurück. Tln F kann also das vom Tln E Gesprochene hören, weil der Sprechwechselstrom auf die Primärwicklung des Übertragers F in voller Stärke induziert. Die Tln A, B, C und D können von dem Gespräch jedoch nichts wahrnehmen, weil die Zweigströme durch die Wicklungshälften ihrer Übertrager gleich stark sind und entgegengesetzte Richtung haben, so daß sich die Induktionswirkung in den Primärspulen aufheben (gestrichelt dargestellt).

Auch können die Sprechwechselströme, die durch den Sprechverkehr der Tln A und B sowie C und D entstehen, die benachbarten Stämme I bzw. II und den Vierer nicht beeinflussen, weil sich kein geschlossener Stromkreis bilden kann. Geringes Übersprechen zwischen Stamm und Vierer (Mitsprechen genannt), das durch Unsymmetrie der Leitungen (vgl. Band V, S. 40) entsteht, wird durch den sogenannten **Platzwechsel** bei Freileitungen bzw. durch die **Verseilung** bei Kabeln aufgehoben. Der Platzwechsel ist für den Vierer das, was die Schleifenkreuzung für den Stamm bedeutet (s. Ziffer 30). a und b des Stammes I als Hinleitung für den Vierer kreuzen sich mit a und b des Stammes II als Rückleitung (Abb. 57).

Abb. 57
Platzwechsel

Der Induktionsschutz einer Freileitung setzt sich demnach zusammen aus den Schleifenkreuzungen (Platzvertauschung der a- und b-Zweige eines Stammes) und den Platzwechseln (Platzvertauschung der zu einem Vierer gehörigen Stammleitungen).

(42) Simultanschaltungen

Unter Simultanschaltung versteht man die Mehrfachausnutzung von Leitungen für Telefonie und Telegraphie. Simultan heißt gleichzeitig, in diesem Falle also gleichzeitige Ausnutzung der Leitungen für zwei verschiedene Betriebsarten. Die Schaltung ähnelt der des Vierers. An Stelle der zum Vierer gehörigen Übertrager treten Telegraphenapparate (T in Abb. 58). In der Praxis werden jedoch zwei Vierer zu einem „**Achter**“ geschaltet und der Telegraphenbetrieb über diesen abgewickelt. Man spricht daher von **Achterelegraphie** (AT). Sie hat heutzutage jedoch nur noch geringe Bedeutung und ist durch die Wechselstromtelegraphie (WT, vgl. Ziffer 41, 1. Absatz) fast völlig verdrängt worden.

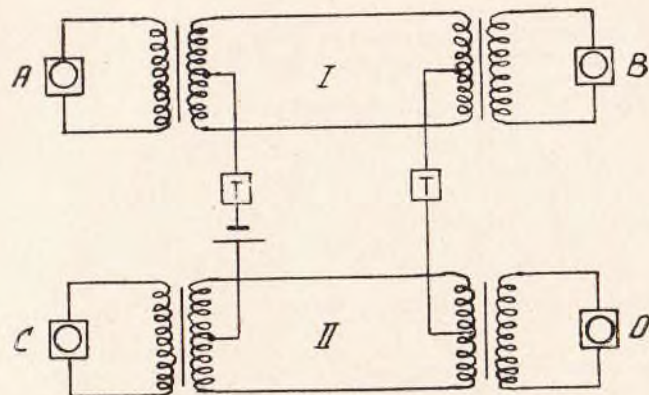


Abb. 58

Die Selbstinduktion

(43) Kraftflußänderungen, die durch Ein- und Ausschalten eines von Gleichstrom durchflossenen Stromkreises sowie durch pulsierenden Gleichstrom oder Wechselstrom hervorgerufen werden, verursachen Induktionserscheinungen nicht nur in benachbarten Leitern, sondern auch in dem eigenen Leiter. Man nennt diesen Vorgang **Selbstinduktion**.

Wir machen folgende Versuche. Wir nehmen eine Gleichspannungsquelle höherer Spannung (etwa 100 bis 200 V), zwei Spulen hoher Windungszahl, einen geschlossenen Eisenkern, einen Hochohmwiderstand und eine Glimmlampe. Eine Glimmlampe ist eine Lampe, die aus zwei Elektroden besteht, die in einem stark luftverdünnten Glaskolben eingeschmolzen sind. Ein solche Glimmlampe hat die Eigenschaft, bei einer bestimmten Spannung (im allgemeinen bei 100 V) zu „zündet“ und strahlt dabei ein schwaches violettes Licht aus, das um so intensiver wird, je höher die angelegte Spannung ist. Der Strom, der über die Glimmlampe fließt, ist außerordentlich gering, so daß man eine Glimmlampe als Spannungsanzeiger verwenden kann.

Die Teile bauen wir gem. Abb. 59 auf. G1 bedeutet hier die Glimmlampe. Schließen wir den Schalter Sch, so wird nach den Induktionsgesetzen in der

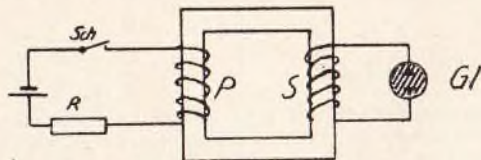


Abb. 59

Sekundärspule S eine EMK induziert, die die Glimmlampe G1 für einen kurzen Augenblick zum Aufleuchten bringt. Beim Öffnen des primären Stromkreises bemerken wir den gleichen Vorgang. Das ist uns nichts Neues; denn wir haben zwei getrennte Stromkreise: den induzierenden Primärstromkreis und den induzierten Sekundärstromkreis.

Jetzt aber entfernen wir die Sekundärspule und schalten die Glimmlampe an die Primärspule gem. Abb. 60. Beim Öffnen und Schließen des Stromkreises

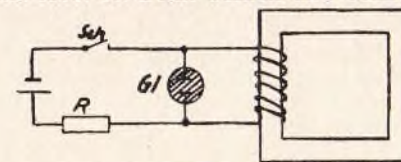


Abb. 60

bemerken wir das gleiche wie vorhin: beim Ein- und Ausschalten leuchtet die Glimmlampe kurz auf. Die Ursache für diesen Vorgang muß demnach die gleiche sein wie im Versuch Abb. 59: die Kraftflußänderung im Eisenkreis, die durch das Ein- und Ausschalten des Stromkreises hervorgerufen wird, induziert auf den eigenen Leiter und ruft an den Enden der Spule eine EMK hervor, die nach den Induktionsgesetzen in ihrer Höhe abhängig ist von der Anzahl der Windungen der Spule und von der Güte des Eisenkreises.

(44) Richtung des Selbstinduktionsstromes

Um ganz sicher zu gehen, daß es sich bei den in Ziffer 43 geschilderten Vorgängen um Induktionserscheinungen handelt, machen wir einen weiteren Versuch. Wir nehmen einen U-förmigen Eisenkern, zwei Spulen (z. B. mit je 1200 Windungen), die wir auf die Schenkel des Eisenkernes schieben und hintereinanderschalten, eine Gleichspannungsquelle mit 4 V Spannung, einen Strommesser mit einem Meßbereich von 0–100 mA und einen Schiebewiderstand. Diese Teile schalten wir nach Abb. 61 zusammen. Mittels des Schiebe-

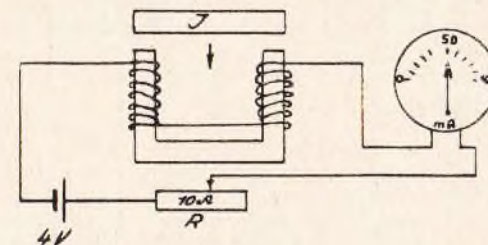


Abb. 61

widerstandes R regeln wir die Stromstärke so ein, daß der Strommesser 50 mA anzeigt. Bringen wir jetzt ein Eisenjoch J auf die Enden des U-Kernes, so bemerken wir, daß der Zeiger des Strommessers stoßartig in Richtung der Nullstellung (in Abb. 61 nach links) zurückgeht und dann wieder auf den ursprünglichen Wert von 50 mA zurückkehrt. Entfernen wir das Joch ruckartig, so schlägt der Zeiger stoßartig nach der entgegengesetzten Richtung wie vorhin aus, d. h. über 50 mA hinaus, um dann auch wieder auf den ursprünglichen Wert von 50 mA zurückzukehren.

Wie ist dieser Versuch zu erklären?

Durch das Aufbringen des Eisenjoches J hat sich der Kraftfluß im Eisenkern infolge des nun sehr gering gewordenen magnetischen Widerstandes stoßartig bedeutend erhöht. Da nach den Induktionsgesetzen jede Verstärkung des

Kraftflusses eine EMK und damit einen Induktionsstrom in entgegengesetzter Richtung zum Erregerstrom nach sich zieht, wirkt der in den Wicklungen der Spulen induzierte Stromstoß dem Erregerstrom entgegen und schwächt ihn (Lenzsche Regel!) Der Zeiger des Meßinstrumentes geht also zurück. Bei Entfernen des Joches wird der Kraftfluß geschwächt, in den Windungen der Spule demnach eine EMK und damit ein Strom induziert, der die gleiche Richtung hat wie der Erregerstrom, diesen also verstärkt: der Zeiger des Strommessers schlägt weiter aus.

(45) Wir fassen zusammen und bringen die festgestellten Tatsachen in Verbindung mit den Induktionsgesetzen:

- Bei Verstärken des magnetischen Feldes um einen stromdurchflossenen Leiter wird eine EMK induziert, die der angelegten EMK entgegenwirkt (Gegen-EMK, vgl. Ziffer 23 a).
- Bei Schwächen des magnetischen Feldes um einen stromdurchflossenen Leiter wird eine EMK induziert, die den gleichen Richtungssinn wie die angelegte EMK hat, sie demnach zu erhöhen sucht (vgl. Ziffer 23 b).
- Die durch Selbstinduktion hervorgerufene Gegen-EMK in einer Spule ist um so höher, je größer die Anzahl der Windungen der Spule ist (vgl. Ziffer 24, a).
- Die durch Selbstinduktion in einer Spule hervorgerufene Gegen-EMK ist um so höher, je besser der Eisenschluß des Kernes ist (vgl. Ziffer 24, a).
- Die durch Selbstinduktion in einer Spule hervorgerufene Gegen-EMK ist um so höher, je größer die Änderungsgeschwindigkeit des Kraftflusses ist (vgl. Ziffer 24, a).
- Für die Richtung des Selbstinduktionsstromes gilt das unter a) und b) Aufgeführte sinngemäß.

Die Induktionsgesetze gelten für die Selbstinduktion sinngemäß in vollem Umfange.

(46) Die Induktivität L

Die in Ziffer 45 c) und d) aufgeführten Punkte, nämlich Windungszahl der Spule, Permeabilität und Länge des Eisenkernes (bei geschlossenem Eisenkreis) hat man zu einer Größe zusammengefaßt, die die Eignung der Spule für das Auftreten der Selbstinduktion bestimmt. Man nennt sie **Induktivität** (Formelzeichen L). Sie hat für jede eisenfreie Spule einen bestimmten Zahlenwert. Für **eisenhaltige** Spulen ändert sich dieser Wert mit der Stromstärke, weil die Permeabilität μ des Eisens vom Magnetisierungszustand abhängt (s. Magnetisierungskurven, Ziffer 15).

Die Einheit der Induktivität L ist das H e n r y (abgekürzt H).

Die Größe der Induktivität L einer Spule mit geschlossenem Eisenkreis wird u. a. bestimmt durch die Formel

$$L = w^2 \times \frac{1}{R_m} = w^2 \times \frac{\mu \times F}{l} \quad *)$$

d. h.

Die Induktivität einer Spule ist abhängig von dem Quadrat der Windungszahl mal der magnetischen Leitfähigkeit.

*) Anm.: Genau $L = \frac{\mu_0 \times \mu_r \times w^2 \times F}{l} \times 10^{-9} [\text{H}]$

In dieser Formel finden wir das bestätigt, was in Ziffer 45 c) und d) und in den vorhergehenden Versuchen festgestellt worden ist.

Die Einheit 1 Henry (H) hat man wie folgt festgelegt:

Eine Spule hat die Induktivität von einem Henry (1 H), wenn bei einer Stromstärkeänderung von 1 A in 1 sec eine Gegen-EMK von 1 V erzeugt wird.

Da eine Änderung der Stromstärke in einem Leiter gleichzeitig eine Kraftflußänderung zur Folge hat, kann man sich auch auf diese beziehen.

In Ziffer 24,1 wurde gesagt, daß bei einer Kraftflußänderung von 10^9 Kraftlinien pro Sekunde eine Induktionsspannung von 1 V entsteht, wenn es sich um einen Einzeileiter (also keine Spule) handelt. Wir können also auch sagen, daß ein Leiter die Induktivität von 1 H hat, wenn eine Kraftflußänderung von 10^9 Kraftlinien pro Sekunde eine Gegen-EMK von 1 V erzeugt.

In einer Formel ausgedrückt, heißt das oben Gesagte:

$$\frac{10^9 \text{ Maxwell}}{\text{sec}} \text{ entsprechen } 1 \text{ V}$$

$$10^9 \text{ Maxwell sind dann } 1 \text{ V} \times 1 \text{ sec} = 1 \text{ Voltsekunde (Vs).}$$

Die Voltsekunde (Vs) ist die Einheit des Induktionsflusses. (Hierzu vgl. 1 A = $\frac{1 \text{ Cb}}{1 \text{ sec}}$
1 As = 1 Cb, Heft 1 a, S. 9).

(47) Verhalten eines mit einer Induktivität (induktiv) belasteten Gleichstromkreises bei seiner Schließung

Wir beginnen gleich mit einem Versuch. Eine Induktivität*), bestehend aus einer Spule mit 1200 Windungen mit geschlossenem Eisenkern und eine mit der Induktivität in Reihe geschaltete Taschenlampenbirne werden parallel zu einem Ohmschen Widerstand geschaltet. Die Hervorhebung des Wortes „Ohmschen“ soll klarstellen, daß dieser Widerstand über keinerlei Induktivität verfügt, also selbstinduktionsfrei ist. Wir werden den Unterschied zwischen induktivem Widerstand und Ohmschem Widerstand später kennenlernen. Der Ohmsche Widerstand ist bei dem Versuch veränderlich, also ein Schiebewiderstand. Dieser Ohmsche Widerstand ist gleichfalls mit einer Taschenlampenbirne in Reihe geschaltet. Zu dem Versuch benötigen wir eine Gleichspannungsquelle von etwa 6–8 V und einen Schalter. Die Anordnung ist aus Abb. 62 ersichtlich. Hierin bedeuten L 1 und L Lampe und Induktivität (Spule mit Eisenkern), L 2 und R Lampe und veränderlicher Wider-

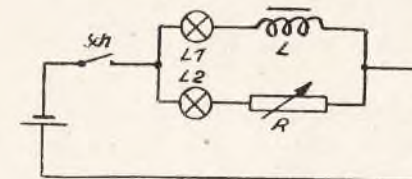


Abb. 62

stand. Der Schalter Sch wird geschlossen und der veränderliche Widerstand R so verändert, daß L 1 und L 2 gleich hell aufleuchten. Dann ist der Ohmsche Widerstand der Induktivität L , d. h. der Widerstand des Spulendrahtes, gleich dem Widerstand von R . Der Schalter wird wieder geöffnet;

*) Anm.: Man gebraucht den Ausdruck „Induktivität“ — trotzdem sie eine elektrische Größe darstellt — auch für eine Spule mit Eisenkern, ohne dabei die Größe der Induktivität zu meinen.

die Lampen erlöschen. Jetzt beobachten wir die Lampen während der Schalter Sch geschlossen wird, und wir machen die überraschende Feststellung, daß die Lampe L 1 merklich später aufleuchtet als die Lampe L 2. Wer die vorhergehenden Abschnitte, insbesondere die Ziffer 44 aufmerksam durchgelesen hat, wird vielleicht schon eine Erklärung gefunden haben. Beim Einschalten des Stromkreises verursacht der im Eisenkreis sich aufbauende Kraftfluß eine Selbstinduktion der Spule, die eine Gegen-EMK zur Folge hat. Diese Gegen-EMK stemmt sich dem Erregerstrom gewissermaßen entgegen und hindert ihn, sofort seine volle Stärke nach dem Ohmschen Gesetz ($I = \frac{U}{R}$) zu erreichen. Der Erregerstrom muß diese Gegen-EMK erst

überwinden; er braucht hierzu eine gewisse Zeit. Erst wenn die Gegen-EMK überwunden ist, kann der Strom in voller Stärke fließen, die Lampe L 1 demnach aufleuchten. Der Strom hat für diese Zeitdauer eine Arbeit verrichtet, und diese Arbeit finden wir als Energie wieder, die im Magnetfeld der Spule enthalten ist. Der nun durch die Spule fließende Strom verändert sich nicht mehr in seiner Stärke. Das die Spule umgebende Magnetfeld bzw. der Kraftfluß bleibt unverändert; eine weitere Induktionswirkung ist nicht mehr möglich.

Im Stromkreis mit der Lampe L 2 und dem Widerstand R treten Selbstinduktionsvorgänge nicht auf. Der Strom steigt sofort zu seiner vollen Stärke an, demzufolge leuchtet die Lampe L 2 auch sofort auf.

In einem mit Induktivität belasteten Stromkreis erreicht ein Gleichstrom erst nach einer gewissen Zeit, die Schaltzeit genannt wird, seinen Höchstwert. Die Schaltzeit ist abhängig von der Größe der Induktivität L. Große Induktivität verursacht infolge der hohen Gegen-EMK eine lange Schaltzeit, kleine Induktivität eine kleine. In einem mit einem reinen Ohmschen Widerstand belasteten Stromkreis steigt der Strom sofort auf seine volle Stärke an (s. a. Ziff. 50).

(48) Verhalten eines induktiv belasteten Gleichstromkreises bei seiner Öffnung

Wir beginnen auch hier erst mit einem Versuch. Wir nehmen die gleiche Spule mit Eisenkern und die gleiche Spannungsquelle wie im Versuch Ziffer 47 und schalten die Teile wie in Abb. 63 dargestellt. Nachdem der

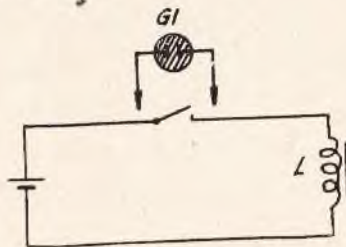


Abb. 63

Schalter geschlossen worden ist, öffnen wir ihn und bemerken, daß sich an den Schalterkontakten während des Öffnens ein kräftiger Funke bildet. Jetzt schalten wir parallel zum Schalter eine Glühlampe Gl und stellen fest, daß sie im Augenblick des Öffnens des Schalters hell aufleuchtet (vgl. Ziffer 43

und Abb. 60). Die Glühlampe zeigt uns an, daß beim Öffnen eines induktiv belasteten Stromkreises an den Schalterkontakten eine hohe Spannung auftritt.

Wie ist dieser Vorgang zu erklären?

Aus dem Vorhergehenden wissen wir, daß bei einer Schwächung des Kraftflusses eine EMK der Selbstinduktion entsteht, die die gleiche Richtung zur angelegten EMK hat. Bei Öffnen des Schalters bricht das Magnetfeld der Spule zusammen, d. h. der Kraftfluß geht von seinem Höchstwert plötzlich auf den Wert Null zurück. Diese sehr schnelle Kraftflußänderung verursacht eine hohe EMK. Sie hat zur Folge, daß Elektronen bewegt werden, daß also ein kurzfristiger Strom in Richtung der EMK fließt. Die Elektronen stauen sich an einem der beiden Kontakte des bereits ein wenig geöffneten Schalters. Wir wissen, daß eine Elektronenanhäufung sich dorthin auszugleichen sucht, wo Elektronenmangel herrscht.

Je größer die Elektronenanhäufung auf kleinem Raum ist, um so höher wird die Spannung, die sich in unserem Falle durch einen kräftigen Funken ausgleicht. Wenn wir wissen, daß ein Funke von 1 mm Länge bei einer Spannung von etwa 2500 V entsteht, können wir ermesen, wie hoch die Spannung an den Kontaktstellen sein muß. Sie kann, je nach Größe der Induktivität, mehrere hundert bis tausend Volt erreichen.

(49) Löschung des Öffnungsfunkens

Die Funken, die bei Öffnen eines induktiv belasteten Stromkreises auftreten, verursachen Kontaktverschmorungen und Rundfunkstörungen, so daß sie unterbunden werden müssen. Schalten wir an Stelle der Glühlampe Abb. 63 einen Kondensator parallel zu den Schaltkontakten (Abb. 64), so

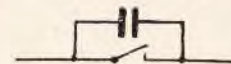


Abb. 64

fließen die Elektronen auf den einen Belag des Kondensators und werden dort gebunden. Die Funkenbildung beim Öffnen des Stromkreises wird hierdurch wesentlich verringert. Beim Schließen des Kontaktes entladet sich der Kondensator (vgl. hierzu Band IV, „Funkenlöschkreis“). Die Lade- und Entladevorgänge sind verwickelt und können hier nicht besprochen werden. Eine eingehende Behandlung des Kondensators ist im Band Ib vorgenommen.

(50) Stromkurve eines induktiv belasteten Stromkreises

Um die Stromkurve eines induktiv belasteten Stromkreises genau aufnehmen zu können, bedarf man eines Gerätes, das trägheitslos arbeitet. Ein solches Gerät ist der Kathodenstrahloszillograph. Verfügen wir jedoch über eine sehr große Spule mit großer Induktivität, so können wir mit Hilfe eines Strommessers den Stromverlauf angenähert bestimmen, die Werte tabellenmäßig festlegen und hieraus — ähnlich wie bei der Magnetisierungskurve Abb. 27 — eine Kurve zeichnen. Abb. 65 zeigt die Schaltung.

Schließen wir den Schalter S1, so wird der Zeiger des Strommessers langsam bis auf einen gewissen Wert, z. B. 50 mA, ausschlagen und dann auf diesem Wert stehenbleiben. Der langsame Ausschlag erklärt sich aus der Ziffer 47 (Überwindung der durch die Selbstinduktion in der Spule erzeugten Gegen-

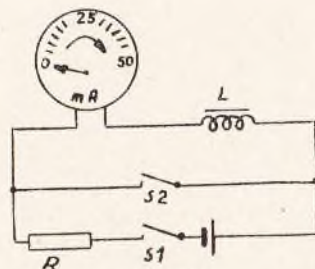


Abb. 65

EMK). Schließen wir den Schalter S 2 und überbrücken somit die Batterie, so wird der Zeiger des Strommessers nicht etwa **sofort** auf den Nullpunkt zurückkehren, sondern er wird etwa die gleiche Zeit brauchen wie beim Anstieg. Der Erregerstrom aus der Batterie fließt nicht mehr durch die Spule L, das Magnetfeld bricht zusammen, und die hierbei entstehende EMK treibt den Strom über den Schalter S 2, Strommesser zur Spule zurück. Je größer die Energie des Magnetfeldes ist, d. h., je mehr Arbeit der Strom zu dessen Aufbau verrichtet hat, um so größer ist die beim Zusammenbrechen des Magnetfeldes freiwerdende Energie, die in elektrischen Strom umgewandelt wird. Der Strom über den Schalter S 2 fließt demnach so lange, bis die Energie des Magnetfeldes völlig umgesetzt ist.

Wir wollen nun die Stromkurve eines Stromkreises ohne und mit Induktivität betrachten (Abb. 66 a und b). Abb. 66 a zeigt uns die Schaltung und die Stromkurve eines Stromkreises, in dem sich nur ein Ohmscher Widerstand von 100 Ohm befindet, Abb. 66 b die Schaltung und die Stromkurve eines Stromkreises, in dem eine Induktivität mit einem Ohmschen Widerstand von gleichfalls 100 Ohm vorhanden ist. Der Ohmsche Widerstand einer Induktivität, also einer Spule, ist nur abhängig von der Länge des Drahtes, seinem Querschnitt und seinem spezifischen Widerstand. Nehmen wir in beiden Fällen eine Spannung von 5 V an, so wird nach dem Ohmschen Gesetz ein Strom

$$I = \frac{U}{R} = \frac{5}{100} = 0,05 \text{ A fließen.}$$

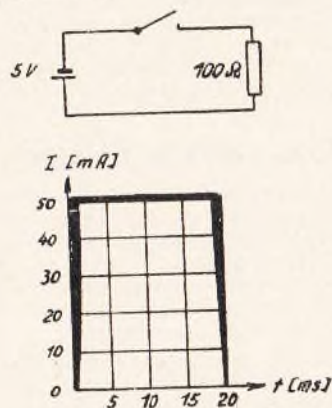


Abb. 66 a

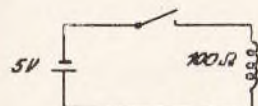


Abb. 66 b

In dem Stromkreis Abb. 66 a steigt der Strom sofort auf den Wert 50 mA an und fließt in dieser Stärke weiter, bis er nach 20 ms abgeschaltet wird. Im gleichen Augenblick erreicht der Strom den Wert Null. In dem induktiv belasteten Stromkreis Abb. 66 b steigt der Strom langsam an, und erst nach 15 ms erreicht er den Höchstwert von 50 mA*). Wird der Strom nach 25 ms abgeschaltet, so fällt er langsam ab, um erst nach 40 ms den Wert Null zu erreichen. Die Zeit von 15 ms nennt man die **Schaltzeit**. Sie wird verringert, wenn die induktive Belastung gering ist; sie wird vergrößert, wenn die induktive Belastung vergrößert wird. Die Schaltzeit kann sogar mehrere Zehntel Sekunden betragen (vgl. Versuche Abb. 62 und 65 und Band V, Abschnitt V, Verzögerungsrelais).

(51) Bedeutung der Schaltzeiten in der Fernmeldetechnik

Wir können uns vorstellen, daß die Schaltzeiten in der Fernmeldetechnik eine große Rolle spielen. Bei der Gleichstromtelegraphie, bei der Steuerung der Wähler durch den Nummernschalter und bei den Relais ohne Verzögerung benötigen wir möglichst kurze Schaltzeiten. Die Induktivitäten in diesen Stromkreisen müssen so gering wie möglich sein (daher die Überbrückung der Induktionsspule durch den nsa-Kontakt in den Fernsprechapparaten). Die Kurven für die Strom- und Keinstromimpulse bei Betätigung des Nummernschalters und bei der Gleichstromtelegraphie sollen möglichst rechteckig sein und der Abb. 66 a entsprechen. Bei den Verzögerungsrelais (siehe Band V, Abschnitt V, Verzögerungsrelais) sollen die Schaltzeiten — je nach Verwendungszweck — groß sein. Das bedingt, je nach Bauart, unter Umständen hohe Induktivität der Wicklungen. Eine gewisse Induktivität läßt sich nie vermeiden; denn auch eine Fernsprech- oder Telegraphenleitung besitzt eine Induktivität, die von der Art des Materials, vom Querschnitt des Leiters und von dem Aufbau der Leitung (Kabel oder Freileitung) abhängt. Diese Induktivitäten sind allerdings sehr gering und betragen meist nur wenige Millihenry (mH) pro km ($1 \text{ mH} = \frac{1}{1000} \text{ H}$).

* Anm.: Bei den Versuchen Abb. 62 und 65 sind die Zeiten wesentlich länger, entsprechend der Größe der Induktivität.

Nachstehende Tabelle gibt die Induktivität der wichtigsten Fernsprechleitungen in Millihenry pro km ($\frac{\text{mH}}{\text{km}}$) an.

Freileitungen aus Bronze oder Kupfer		Orts- und Fernleitungskabel	
Leiter-Durchmesser	Induktivität im mH pro km DL	Leiter-Durchmesser	Induktivität im mH pro km DL
1,5 mm	2,3	0,6 mm	0,7
2,0 mm	2,2	0,8 mm	0,7
3,0 mm	2,0	1,2 mm	0,7
		1,4 mm	0,7

(52) Induktionsfreie Widerstände

In der Fernmeldetechnik gebraucht man sehr häufig induktionsfreie Widerstände, die aus Widerstandsdraht bestehen. Der Draht wird aus Gründen der Raumersparnis auf vorhandene Spulenkörper (Relais, Induktionsspulen) gewickelt. Um hierbei jegliche Selbstinduktion zu vermeiden, wickelt man den Draht **bifilar**. Er wird in der Mitte umgebogen. Die hierdurch entstehenden zwei Drahtenden werden als **ein** Draht behandelt und gewickelt (Abb. 67).

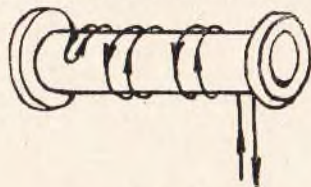


Abb. 67

Das durch den Strom in einem Draht aufgebaute Magnetfeld wird durch das entgegengesetzte Magnetfeld, das der Strom in dem zweiten Draht aufbaut, aufgehoben (vgl. Pfeilrichtung).

(53) Wirkung der Induktivität bei zerhacktem Gleichstrom und Wechselstrom (Scheinwiderstand)

Wir zeichnen uns die Stromkurve Abb. 66b noch einmal auf (Abb. 68). Die Schaltzeit beträgt 15 ms. Das bedeutet — um es zu wiederholen —, daß der Strom I erst nach 15 ms seinen Höchstwert erreicht, daß er aber auch 15 ms braucht, um nach dem Ausschalten den Wert Null zu erreichen. Schalten wir nun den Gleichstrom in schnellerer Folge als 15 ms ein und aus, etwa alle 10 ms, so kann der Strom einen Spitzenwert von nur 40 mA erreichen und fällt dann innerhalb der nächsten 10 ms auf den Wert Null ab (gestrichelt dargestellt). Für die Praxis ist der Spitzenwert ohne Bedeutung, denn er wird ja nur auf die Dauer von vielleicht einmillionstel Sekunde erreicht. Wir müssen daher einen Mittelwert nehmen, der bei 25 mA liegen möge. Das bedeutet, daß bei diesem Mittelwert von 25 mA bei einer Spannung von 5 V gemäß

$$R = \frac{U}{I} = \frac{5}{0,025} = 200 \Omega$$

Abb. 66b der Widerstand im Stromkreis von 100Ω auf 200Ω gestiegen ist. Verringern wir die Zeit für das Ein- und Ausschalten

$I [\text{mA}]$

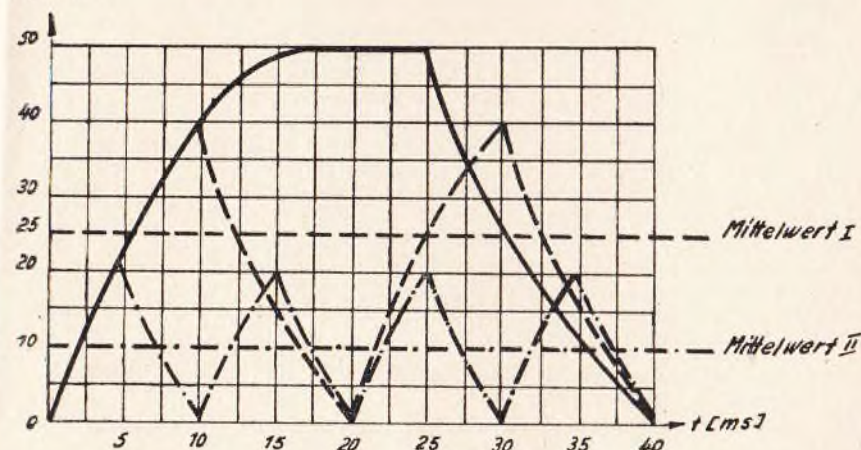


Abb. 68

auf 5 ms, so kann der Strom I nur einen Höchstwert von 20 mA erreichen, und wir erhalten eine Kurve, die mit Strichen und Punkten dargestellt ist. Der Mittelwert dieses Stromes möge bei etwa 10 mA liegen. Der Widerstand ist

$$R = \frac{U}{I} = \frac{5}{0,010} = 500 \Omega$$

gestiegen. Vergrößern wir die Ein- und Ausschaltgeschwindigkeit noch mehr, so wird der mittlere Stromwert immer geringer, der Widerstand immer höher. Da dieser Widerstand nur von der **Ein- und Ausschaltgeschwindigkeit** abhängt und nicht wirklich, oder richtiger gesagt, greifbar ist, spricht man von einem **scheinbaren** oder **Scheinwiderstand**.

Wir wollen jetzt einen Wechselstromkreis betrachten, in dem eine Induktivität liegt. Das Ansteigen und Absinken des Wechselstromes können wir mit dem Ein- und Ausschalten des Gleichstromes vergleichen, nur daß der Vorgang weicher, d. h., nicht mit ausgeprägten Spitzen, vor sich geht.

Hierzu machen wir einen Versuch. Wir nehmen eine Spule mit 1200 Windungen, einen Strommesser für Wechselstrom mit einem Meßbereich von 1 A und schalten die Spule mit dem Strommesser über einen Spannungsteiler an das Wechselstromnetz, das im allgemeinen eine Spannung von 220 V bei 50 Hz (50 Perioden je Sekunde, vgl. Ziffer 19) hat (Abb. 69a). Mittels des Span-

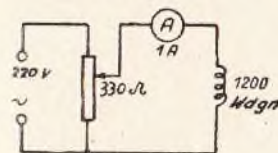


Abb. 69 a



Abb. 69 b

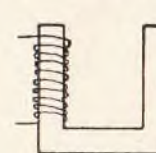


Abb. 69 c

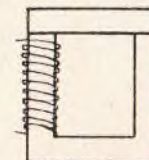


Abb. 69 d

nungsteilers regeln wir die Stromstärke so, daß sie 1 A beträgt. Nun führen wir in die Spule einen kurzen Eisenkern (Abb. 69b) und stellen fest, daß

die Stromstärke auf 0,85 A gesunken ist. Jetzt nehmen wir einen U-Kern (Abb. 69 c) und lesen am Strommesser nur 0,7 A ab. Zuletzt bringen wir auf den U-Kern ein Joch (Abb. 69 d); am Strommesser lesen wir 0,04 A ab.

In diesen Versuchen haben wir bei gleichbleibender Wechselspannung und Frequenz die Induktivität laufend erhöht und festgestellt, daß die Stärke des die Spule durchfließenden Stromes mit zunehmender Induktivität L **geringer** wird, der **Scheinwiderstand** der Spule also wächst. Wenn wir die Induktivität noch weiter erhöhen, etwa durch Verwendung einer Spule größerer Windungszahl, so stellen wir fest, daß zuletzt praktisch kein Wechselstrom mehr durch die Spule fließt: er wird abgedrosselt. Eine solche Spule nennt man **Drosselspule**. Sie wird in der Fernmeldetechnik viel verwendet, um Wechselstrom zu sperren, Gleichstrom dagegen durchzulassen*).

Haben wir eine konstante Induktivität und sind wir in der Lage, Wechselstrom verschiedener Frequenzen zu erzeugen (etwa mittels eines Tonfrequenzgenerators), so stellen wir fest, daß der Scheinwiderstand einer Induktivität mit steigender Frequenz steigt.

Der Scheinwiderstand einer Induktivität (induktiver Scheinwiderstand R_{SL}) ist abhängig:

- a) von der Größe der Induktivität L einer Spule, gemessen in Henry (II),
- b) von der Frequenz des Wechselstromes.

(Vgl. hierzu auch Band IV, Abschnitt III.) Nähere Ausführungen über das Verhalten von Induktivitäten (als auch Kapazitäten) in Wechsel- und Gleichstromkreisen sind im Band II b (Wechselstromlehre) zu finden.

Zum Schluß soll noch erwähnt werden, daß man Induktivitäten (also Selbstinduktionsspulen) sowohl hintereinander als auch parallel schalten kann. Bei der Hintereinanderschaltung wächst die Gesamtinduktivität, bei der Parallelschaltung wird sie kleiner als die einer der Teilinduktivitäten.

*) Anm.: Das Gegenteil einer Drosselspule bezüglich des Verhaltens gegenüber Wechsel- und Gleichstrom bildet der Kondensator, auf den in Band I b näher eingegangen ist. Ein Kondensator sperrt Gleichstrom; gegenüber Wechselstrom ist sein Scheinwiderstand verhältnismäßig gering.

