

SAMMLUNG GÖSCHEN BAND 952

TRANSFORMATOREN

von

PROF. DR.-ING. WILHELM SCHÄFER

Mit 73 Abbildungen

Vierte, überarbeitete und ergänzte Auflage



WALTER DE GRUYTER & CO.

vormals G. J. Göschen'sche Verlagsbuchhandlung · J. Guttentag,
Verlagsbuchhandlung · Georg Reimer · Karl J. Trübner · Veit & Comp.

BERLIN 1962



Copyright 1962 by Walter de Gruyter & Co., vormals G. J. Göschen'sche
Verlagshandlung — J. Guttentag Verlagsbuchhandlung — Georg Reimer —
Karl J. Trübner — Veit & Comp., Berlin W 30 — Alle Rechte, einschließlich
der Herstellung von Photokopien und Mikrofilmen, vom Verlag vorbehalten.
Archiv-Nr. 7941620 — Satz und Druck: Walter de Gruyter & Co., Berlin W 30

Printed in Germany

Inhaltsverzeichnis

	Seite
I. Theoretische Grundlagen	
1. Grundbegriffe und Wirkungsweise	5
2. Grundgesetze der Transformation	10
3. Magnetisierung des Eisenkernes und Eisenverluste	12
4. Streuung	19
5. Stromkräfte in der Wicklung	26
6. Kupferverluste	31
7. Wirkungsgrad	35
8. Transformatorendiagramm	38
9. Spannungsänderung	42
II. Gestaltung der Transformatoren	
10. Haupttypen der Transformatoren	44
11. Spartransformatoren	54
12. Regeltransformatoren	58
13. Kernaufbau	63
14. Wicklungsaufbau	68
15. Durchführungen	77
16. Kessel und Kühlung	81
17. Materialaufwand und Materialaufteilung	89
18. Rechnungsbeispiel	94
III. Der Transformator im Betrieb	
19. Schaltung und Parallelauf	99
20. Ein- und Ausschaltvorgänge	104
21. Überspannungsbeanspruchung	111
22. Schutzeinrichtungen	117
23. Prüfung	120
Sachverzeichnis	129

I. Theoretische Grundlagen

1. Grundbegriffe und Wirkungsweise

Transformatoren sind ruhende Apparate, die dazu dienen, die elektrische Energie einer bestimmten Spannung in solche einer anderen Spannung umzuwandeln. Die elektrische Energie wird meist mit einer Spannung erzeugt, die zwischen 6000 und 12000 Volt liegt; die Fortleitung über große Strecken erfolgt bei Spannungen von 60000, 110000, 220000 Volt, oder noch höheren Werten, die Mittelspannungs-Versorgungsnetze wiederum werden mit etwa 10000—30000 Volt betrieben und die Verbraucherspannung beträgt meist 400/231 Volt, 400 Volt zwischen den Leitern, 231 Volt zwischen Leiter und Nullleiter. Diese Netze verschiedener Spannungen sind durch Transformatoren gekuppelt. Aus der Tatsache, daß der elektrische Strom auf seinem Weg von der Erzeugung zum Verbrauch meist dreimal, oft sogar noch häufiger, transformiert werden muß, erklärt sich die Wichtigkeit der Transformatoren für die elektrische Energieversorgung. Von ihrer Betriebssicherheit und ihrem Wirkungsgrad wird die technische und wirtschaftliche Güte der Elektrizitätsversorgung maßgeblich beeinflußt. Kein Wunder, daß unter solchem Nachdruck die Entwicklung des Transformatorenbaues außergewöhnlich weit getrieben wurde, daß der Transformator nicht nur eins der betriebssichersten Glieder der Hochspannungs-Versorgungssysteme geworden ist, sondern auch sein Wirkungsgrad auf Werte gesteigert werden konnte, die von anderen Maschinen nicht erreicht werden. Bei Großtransformatoren lassen sich mit wirtschaftlichem Aufwand Wirkungsgrade erzielen, die zwischen 99 und 99,5% liegen.

Der besseren Übersicht wegen sei den folgenden Kapiteln, die sich jeweils mit Einzelheiten befassen, eine kurze Zusammenfassung der wichtigsten Teile und Kenngrößen des Transformators und seiner Wirkungsweise vorangestellt.

In seinem aktiven Teil besteht der Transformator aus (im allgemeinen) zwei gegeneinander und gegen Erde isolierten

Wicklungen und dem Eisenkern, der die Wicklungen trägt (Abb. 1). Primärwicklung heißt — unabhängig davon, ob sie die höhere (Oberspannungswicklung) oder niedrigere (Unterspannungswicklung) Spannung besitzt — die Wicklung, der die elektrische Energie zugeleitet wird. Diese wird der Sekundärwicklung, vermindert um den Eigenverbrauch des Transformators, wieder entnommen. Primär- und Sekundärwicklung sind im allgemeinen konzentrisch angeordnete Zylinder von gleicher Länge. Die Unterspannungswicklung liegt meistens innen nächst dem Eisenkern, die Oberspannungswicklung außen.

Ausgleich- oder Tertiärwicklung heißt eine in sich geschlossene Wicklung, die im allgemeinen keine Leistung nach außen abzugeben hat.

Diejenigen Teile des Eisenkernes, die von den Wicklungen umschlossen sind, heißen Schenkel, die die Schenkel verbindenden Kernbalken Joche.

Die meisten Transformatoren sind in ölgefüllte Kessel eingebaut. Das Öl hat dabei eine doppelte Aufgabe zu erfüllen: es wirkt einmal als ausgezeichnetes Isoliermittel, ferner als Kühlmittel, das die Verlustwärme aus Kern und Wicklungen abführt. Die Wicklungsenden werden mittels Durchführungen isoliert durch den Deckel des Kessels nach außen geführt.

Bei Transformatoren versteht man unter Leistung stets die elektrische Scheinleistung (anzugeben in VA, kVA oder MVA), weil es für die Erwärmung, die der Belastung eine Grenze setzt, gleichgültig ist, in welcher Phasenlage der Strom den Transformator durchfließt. Ist J der Strom in der Wicklung eines Schenkels und U_p die Schenkelspannung, so ist JU_p die Leistung eines Schenkels. Für den Einphasen-Transformator mit 2 bewickelten und hintereinander geschalteten Schenkeln ist die Leistung $N = JU (U = 2 U_p)$, für den Drehstrom-Transformator ist $N = 3 U_p J = JU \sqrt{3}$ ($U = U_p \sqrt{3}$).

Bei Mehrwicklungs-Transformatoren errechnet man die dem Zwe Wicklungstransformator entsprechende Typenleistung (N_T) als halbe Summe der Leistungen der verschiedenen

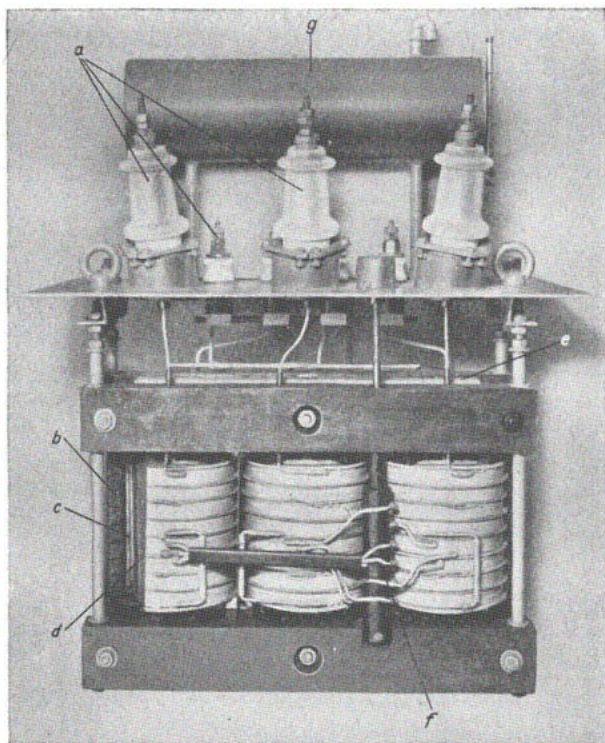


Abb. 1. Drehstrom-Transformator (Wicklung teilweise geschnitten).
a Durchführungen, *b* Oberspannungswicklung, *c* Unterspannungswicklung,
d Kern (Schenkel), *e* Kern (Joch), *f* Umschalter für Oberspannungsanzapfungen,
g Ausdehnungsgefäß.

Wicklungen: $N_T = \frac{1}{2} \sum N_w$, ein Dreiwicklungs-Transformator mit Leistungen von 20, 20 und 10 MVA Wicklungsleistung hat demnach eine Typenleistung von 25 MVA.

Legt man eine Wicklung eines Transformators an Spannung, ohne die andere Wicklung zu belasten, so nimmt der

Transformator den Leerlaufstrom auf, dessen Blind-Komponente der Magnetisierungsstrom ist, unter dessen Wirkung der Eisenkern den magnetischen Fluß ausbildet, der der angelegten Spannung eine gleichgroße elektromotorische Kraft (Gegen-EMK) entgegenstellt. Die durch die wechselnde Magnetisierung des Eisens entstehenden Verluste bilden zusammen mit den Verlusten des Magnetisierungsstromes in der Primärwicklung und den dielektrischen Verlusten die Leerlaufverluste. Da die zweite Wicklung den gleichen magnetischen Fluß umschließt, bildet sich auch in ihr eine EMK aus, die zwischen den Enden der Wicklung als Klemmenspannung erscheint. Das Verhältnis der angelegten Spannung (Primärspannung) zu der an der zweiten Wicklung bei Leerlauf auftretenden Spannung (Sekundärspannung) entspricht ziemlich genau dem Übersetzungsverhältnis des Transformators, das definiert ist als Verhältnis der Windungszahlen von Oberspannungs- und Unterspannungswicklung.

Die Übertragung der Spannung von einer Wicklung zur anderen geschieht also im Transformator mit Hilfe des magnetischen Flusses.

Beim belasteten Transformator muß von der Primär- zur Sekundärwicklung auch eine Stromübertragung stattfinden. Da eine leitende Verbindung zwischen der Primär- und Sekundärwicklung nicht besteht, muß die Stromübertragung induktiv vor sich gehen. Man kann sich die hierbei ablaufenden Vorgänge folgendermaßen klarmachen:

Der die Sekundärwicklung durchfließende Belastungsstrom erzeugt eine magnetomotorische Kraft (MMK), die sich in Amperewindungen (AW) gemessen aus dem Produkt von Sekundärstrom (J_2) mal Windungszahl (w_2) der Sekundärwicklung ergibt: $AW_2 = J_2 \cdot w_2$. Der Transformator setzt selbsttätig dieser sekundären MMK eine gleichgroße, entgegengesetzt gerichtete MMK durch Ausbildung entsprechender Primär-AW entgegen,

$$AW_1 = J_1 \cdot w_1 = AW_2 = J_2 \cdot w_2 \text{ oder } J_1 = J_2 \frac{w_2}{w_1}, \quad (\text{Gl. 1})$$

wobei J_1 den Magnetisierungsstrom nicht enthält.

Würde sich das AW-Gleichgewicht zwischen Primär- und Sekundärwicklung bei Belastung nicht einstellen, so

wäre ein dem Magnetisierungsfluß überlagerter Fluß die Folge der im einen oder anderen Sinn überwiegenden AW. Dieser Fluß wäre wieder die Ursache von elektromotorischen Kräften in den Wicklungen, die zur Ausbildung von Ausgleichströmen führten, bis das AW-Gleichgewicht wieder hergestellt wäre.

Die gesamte Stromwärmeleistung, die vom Belastungsstrom in den Wicklungen, in den Zuleitungen und Kontakten von Umstellern oder Stufenschaltwerken des Transformators verbraucht wird sowie die von dem nachstehend erwähnten Streufeld in den Wicklungen selbst und in Konstruktionsteilen und im Kessel erzeugten Wirbelstromverluste, stellen die Wicklungsverluste oder Kurzschlußverluste dar.

Hätten Primär- und Sekundärwicklung in radialer Richtung keine Ausdehnung und könnten die Wicklungen abstandslos aufeinander gewickelt werden, so könnte sich, wie bis jetzt angenommen, infolge der entgegengesetzt gleichen AW der beiden Wicklungen kein vom Belastungsstrom herrührender Fluß ausbilden. In Wirklichkeit müssen die beiden Wicklungen eine endliche Breite und aus Isolationsgründen einen endlichen Abstand voneinander haben. Sie schließen einen ringförmigen Spalt zwischen sich ein, in dem sich die Wirkung der AW beider Wicklungen nicht mehr aufhebt, sondern im gleichen Sinn wirkt. Im Spalt zwischen den Wicklungen bildet sich daher ein dem Betriebsstrom proportionaler Fluß aus, der teilweise auch die Wicklungen axial durchsetzt und außerhalb des Spaltes seinen Rückschluß teils durch Öl bzw. Luft, teils durch Kern, Konstruktionsteile und Kessel findet. Dieser Fluß heißt Streufluß. Er verursacht einen dem Belastungsstrom proportionalen inneren Spannungsfall, der die bei Leerlauf auftretende sekundäre Klemmenspannung bei Belastung entsprechend verringert. Dieser Spannungsfall wird Streuspannung genannt. Die geometrische Summe von Streuspannung und Ohmschem Spannungsfall des Nennstromes in den Wicklungen heißt Kurzschlußspannung, weil es die Spannung ist, die man bei kurzgeschlossener Sekundärwicklung an die Primärwicklung legen muß, wenn der Transformator seinen Nennstrom aufnehmen soll.

2. Grundgesetze der Transformation

Wird eine Spule mit w Windungen von einem magnetischen Fluß Φ durchsetzt, der zeitlich veränderlich ist, so wird in der Spule eine EMK e erzeugt, die sich nach den Gesetzen der Induktion errechnet zu

$$e = - w \frac{d\Phi}{dt} \cdot 10^{-8} \text{ [Volt]}. \quad (\text{Gl. 2})$$

Folgt die Änderung von Φ einem sin-Gesetz ($\Phi = \Phi_{sch} \cdot \sin \omega t$, wobei ω die Kreisfrequenz $2\pi f$ der harmonischen Schwingung, f die Frequenz, Φ_{sch} der Scheitelwert des magnetischen Flusses ist), so wird

$$e = - w \cdot \omega \cdot \Phi_{sch} \cdot \cos \omega t \cdot 10^{-8} \text{ [Volt]}$$

oder

$$e = w \cdot \omega \cdot \Phi_{sch} \cdot \sin (\omega t - 90) \cdot 10^{-8} \text{ [Volt]}.$$

Die EMK folgt dem gleichen sin-Gesetz wie der Fluß, eilt diesem jedoch um 90° nach.

Wir können nun noch den Scheitelwert E_{sch} der EMK ermitteln zu

$$E_{sch} = w \cdot \omega \cdot \Phi_{sch} \cdot 10^{-8} \text{ [Volt]}$$

oder

$$E_{sch} = w \cdot 2\pi f \cdot \Phi_{sch} \cdot 10^{-8} \text{ [Volt]}.$$

Der interessierende Wert ist der Effektivwert der EMK E , der sich — sin-Form vorausgesetzt — nach den allgemeinen Wechselstromgesetzen aus dem Scheitelwert E_{sch} durch Division durch $\sqrt{2}$ errechnet. Es wird also:

$$E = 4,44 \cdot f \cdot w \cdot \Phi_{sch} \cdot 10^{-8} \text{ [Volt]}.$$

Führt man schließlich statt des Flusses Φ_{sch} noch den geläufigeren Begriff der magnetischen Induktion B ein, wobei $\Phi_{sch} = B \cdot F$ ist (F = Querschnitt des vom Fluß durchsetzten Raumes in cm^2), so erhält man die Transformatorengleichung:

$$E = 4,44 \cdot f \cdot w \cdot F \cdot B \cdot 10^{-8} \text{ [Volt]}. \quad (\text{Gl. 2a})$$

Da wir fast nur mit 50periodigen Netzen zu rechnen haben, kann man endlich noch schreiben:

$$E_{50} = 2,22 w \cdot F \cdot B \cdot 10^{-6} \text{ [Volt]}. \quad (\text{Gl. 2b})$$

(B ist in Gauß einzusetzen.)

Der magnetische Wechselfluß Φ , über dessen Herkunft bisher noch keine Annahmen getroffen sind, bildet sich, wenn man an die Klemmen der betrachteten Spule eine Wechselspannung legt. Hat die Spule die Induktivität L_0 , so nimmt sie unter dem Einfluß der Spannung U den Strom $J_\mu = \frac{U}{\omega L_0}$ auf, der als induktiver Strom der angelegten Spannung um 90° nacheilt. J_μ , der Magnetisierungsstrom, erregt in den w -Windungen der Spule die magnetomotorische Kraft (MMK) $J_\mu \cdot w$ Amperewindungen (AW), die den Fluß Φ erzeugen. Φ wird so groß, daß die von ihm erzeugte EMK E der angelegten Spannung U das Gleichgewicht hält.

Den Zusammenhang von U , E , J_μ und Φ zeigt Abb. 2. Die an die Spule gelegte Spannung U treibt den ihr um 90° nacheilenden Strom J_μ . In Phase mit J_μ liegt der Fluß Φ . Φ erzeugt die — wie oben gezeigt — wiederum ihm um 90° nacheilende EMK E . Die Summe von U und E ist Null, es herrscht also Gleichgewicht.

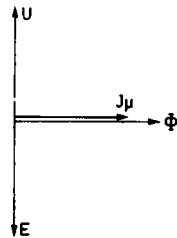


Abb. 2. Leerlauf-Diagramm des verlustlosen Transformators (Windungsverhältnis 1 : 1).

Ordnet man eine zweite Spule so an, daß sie ebenfalls mit dem Fluß Φ verkettet ist, so wird, gleiche Windungszahlen vorausgesetzt, in der zweiten Spule ebenfalls die EMK E erzeugt. Bei verschiedenen Windungszahlen ergibt sich folgendes: Spule 1 habe w_1 Windungen, Spule 2 w_2 Windungen, Spule 1 werde an die Spannung U gelegt. Es ist nach (2b): — $U = E_1 = w_1 \cdot 2,22 \cdot F \cdot B \cdot 10^{-6}$ [Volt], während

$$E_2 = w_2 \cdot 2,22 \cdot F \cdot B \cdot 10^{-6} \text{ [Volt] ist.}$$

Hiernach:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}. \quad (\text{Gl. 3})$$

Die in den beiden Spulen induzierten EMKe verhalten sich wie die Windungszahlen der Spulen. Hiermit ist die zweite Transformatorgleichung gefunden.

Das Verhältnis der Windungszahlen ist das Übersetzungsverhältnis des Transformators.

Beim belasteten Transformator muß — vom Eigenverbrauch abgesehen — die eingespeiste (Schein-)Leistung gleich der entnommenen (Schein-)Leistung sein, also $J_1 \cdot E_1 = J_2 \cdot E_2$. Durch Einsetzen von Gl. 3 findet man

$$\frac{J_1}{J_2} = \frac{w_2}{w_1} \quad (\text{Gl. 1 Abschn. 1}),$$

die dritte Transformatorengleichung, die aus der Energiebilanz ebenso folgt, wie sie in Abschn. 1 aus der Notwendigkeit des AW-Gleichgewichts hergeleitet werden konnte. Man kann nun die Grundgesetze der Transformation folgendermaßen zusammenfassen:

Legt man eine Wicklung eines Transformators an Spannung, so wird diese von einem der Spannung nacheilenden Magnetisierungsstrom durchflossen. Dieser erzeugt einen mit dem Magnetisierungsstrom gleichphasigen magnetischen Fluß. Die in der zweiten Wicklung erzeugte EMK verhält sich zur angelegten Spannung wie die Windungszahlen. Die die Wicklungen durchfließenden Belastungsströme verhalten sich umgekehrt wie die Windungszahlen.

3. Magnetisierung des Eisenkernes und Eisenverluste

Der Eisenkern erfüllt im Transformator mehrere Aufgaben. Mechanisch ist er der Träger der Wicklungen, die sich gegen ihn abstützen. Elektrisch ist er — und das ist seine wichtigste Eigenschaft — der Träger des magnetischen Flusses, der die Übertragung der Spannung von der Primär- zur Sekundärwicklung bewirkt. Schließlich leitet er in den Jochteilen den Magnetfluß in einer vorgeschriebenen Bahn von Schenkel zu Schenkel.

Zur Magnetisierung des Eisenkernes muß elektrische Energie aufgewandt werden, die Magnetisierungsleistung. Diese besteht aus einer Blindleistungskomponente, die für die Größe des magnetischen Flusses bestimmend ist, und einer Wirkkomponente, die hauptsächlich daher rührt, daß im Eisen die Erzeugung eines Wechselflusses nur unter Aufwand von Verlustarbeit möglich ist. Ein verschwindend kleiner

Teil der bei Leerlauf vom Transformator angeforderten und an den Klemmen zu messenden Wirkleistung ist schließlich bedingt durch die Verlustwärme, die der Magnetisierungsstrom in der Primärwicklung des Transformators erzeugt, und durch die ebenfalls geringen dielektrischen Verluste.

Eine genauere physikalische Betrachtung der bei Magnetisierung des Eisenkernes auftretenden Verhältnisse ergibt folgendes Bild:

Der Eisenkern setzt dem Durchtritt des magnetischen Flusses Φ einen Widerstand entgegen, der der Länge des Kraftlinienweges (l) proportional und dem Querschnitt des Eisenkernes (F) umgekehrt proportional ist. Der magnetische Widerstand als Materialeigenschaft ist ferner von der Induktion des Eisens $B = \frac{\Phi}{F}$ abhängig. Die magnetomotorische Kraft (MMK), die den Magnetfluß durch den Eisenkreis treibt, ist der Magnetisierungsstrom J_μ , multipliziert mit der Windungszahl w der an Spannung gelegten Wicklung; sie wird in Amperewindungen (AW) ausgedrückt.

Um allgemein gültige Beziehungen zu bekommen, wird im folgenden statt mit der MMK und dem Fluß mit spezifischen Werten gerechnet, nämlich mit der MMK pro cm Länge des Kraftlinienweges (AW/cm) = Feldstärke H und der Induktion (B), d. h. dem Fluß pro cm² Kernquerschnitt $\frac{\Phi}{F}$. Zwischen diesen beiden Größen besteht ein durch die physikalischen Eigenschaften des Eisens gegebener Zusammenhang, der in Abb. 3 als $B = f(\text{AW/cm})$ dargestellt ist. Mit Hilfe dieser Kurve, in der die Scheitelwerte der Induktion [$\hat{B}$] in Abhängigkeit vom Effektivwert der magnetisierenden AW/cm dargestellt sind, lassen sich nun für jeden Eisenkern die Magnetisierungsströme ermitteln, wenn Windungszahl und Spannung der magnetisierenden Wicklung gegeben sind. Man errechnet nach Gleichung 2a aus Spannung, Windungszahl und Kernquerschnitt die Induktion B , ermittelt aus der Kurve (Abb. 3) die zugehörigen A/cm gleichbedeutend AW/cm, aus denen man dann den Magnetisierungsstrom errechnet nach

$$J_{\mu} = \frac{AW/cm \cdot l_{cm}}{w} [A], \quad (\text{Gl. 4})$$

wobei l_{cm} die mittlere Länge des Kraftlinienpfades im Eisenkern ist (J_{μ} als Effektivwert).

Wird ein Transformator von einer sin-förmigen Spannung erregt, so muß der die Gegen-EMK liefernde Fluß ebenfalls sin-förmig verlaufen, d. h. auch die Induktion verändert sich sin-förmig. Man ermittelt nach Abb. 4a Punkt für Punkt für die verschiedenen Zeitwerte der Induktion die jeweils

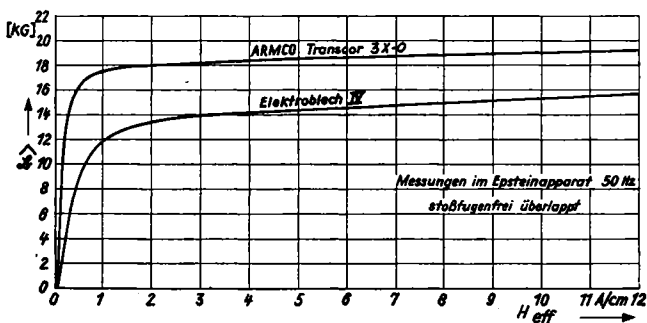


Abb. 3. Magnetisierungskurve für Transformatoren-Blech.

zugehörigen Werte der AW/cm und damit die dieser Größe proportionalen Werte des Magnetisierungsstromes. In Abb. 4a links sind auf der Abszisse Augenblickswerte und nicht wie in Abb. 3 Effektivwerte des Stromes aufgetragen. Man verfährt dabei wie folgt: Von irgendeinem Punkt (A) der sin-förmigen Spannungs-, Fluß- oder Induktionslinie geht man in Pfeilrichtung zur Magnetisierungslinie hinüber (B). Dadurch findet man den zu B gehörigen Augenblickswert des Magnetisierungsstromes (C), den man über C' in das Ausgangsdiagramm überträgt (D). Man findet so für jeden Zeitwert der Spannung den zugehörigen Zeitwert des Magnetisierungsstromes. Hierbei stellt man fest, daß der Magnetisierungsstrom eine von der sin-Linie abweichende Gestalt hat.

Er enthält Oberwellen, und zwar, wie die Analyse zeigt (Abb. 4b), alle ungeradzahigen Vielfache der Grundwelle. Die Amplituden dieser Oberwellen fallen stark mit steigender Ordnungszahl der Oberwellen.

Mit wachsender Induktion nimmt entsprechend der Form der Magnetisierungscharakteristik (Abb. 3) die zur Magnetisierung notwendige AW-Zahl und damit der Magnetisierungs-

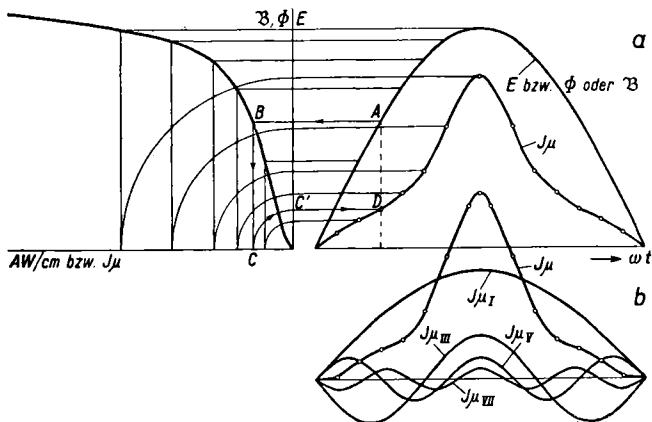


Abb. 4. Form des Magnetisierungsstromes. a Konstruktion des Magnetisierungsstromes aus Spannungskurve und Magnetisierungskennlinie. b Zerlegung des Magnetisierungsstromes in Grundwelle und Oberwellen.

strom stark zu, und die Kurvenform des Magnetisierungsstromes verzerrt sich ebenfalls immer stärker.

Kleiner Kernquerschnitt und geringe Windungszahl bedeuten wenig Materialverbrauch, aber hohen Leerlaufstrom und große Verzerrung durch höhere Harmonische. Großer Kernquerschnitt und große Windungszahl machen den Transformator schwer und teuer, bringen aber kleinen Leerlaufstrom und annähernd sin-förmige Kurvenform des Leerlaufstromes mit sich. Man muß also Kernabmessungen und Windungszahlen so wählen, daß die Induktion nur Werte erreicht, bei denen der Magnetisierungsstrom, der klein sein soll im

Verhältnis zum Nennstrom des Transformators, in erträglichen Grenzen bleibt, desgleichen die Oberwellen im Magnetisierungsstrom, trotzdem aber der Materialaufwand für Kern und Wicklung noch wirtschaftlich tragbar ist. Die meisten ausgeführten Transformatoren arbeiten mit Induktionen zwischen 13000 und 17000 Gauß.

Die wechselnde Magnetisierung des Eisens ist von Verlusten begleitet, die im folgenden näher untersucht werden sollen. Die Magnetisierungslinie hat bei steigender und sinkender Magnetisierung einen verschiedenartigen Verlauf, so

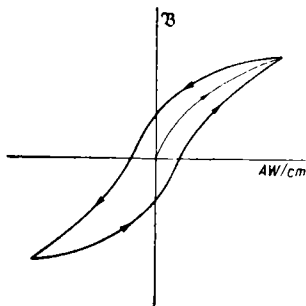


Abb. 5. Hysteresis-Schleife.

daß z.B. in dem Augenblick, in dem der fallende Magnetisierungsstrom durch Null geht, noch ein Restmagnetismus vorhanden ist, die Remanenz. Erst durch Aufwand von Gegen-AW kann die Induktion wieder auf den Wert Null gebracht werden und darüber hinaus negative Werte annehmen. Abb. 5 zeigt den Verlauf der Induktion (B) als Funktion der Feldstärke oder

der MMK (AW/cm). Für eine volle Periode des Magnetisierungsstromes ergibt sich ein schleifenförmiger Linienzug, die Hysteresisschleife. Der Flächeninhalt der Hysteresisschleife stellt den Energieverlust dar, der für die Ummagnetisierung in jeder Periode aufgebracht werden muß.

Wir vergewissern uns von der Dimension der Hysteresisfläche durch folgende Überlegung: Jedes Flächenelement hat die Dimension $dB \cdot AW/cm$; da das Differential der Induktion (dB) proportional ist $e \cdot dt/cm^2$ (s. Gleichung 2, $d\Phi = dB \cdot F$), die Feldstärke (AW/cm) dem Magnetisierungsstrom pro cm (i/cm) proportional ist, hat die Hysteresisfläche die Dimension $e \cdot i \cdot dt/cm^3$, d. h. die Dimension einer Arbeit pro Volumeneinheit. Diese Arbeit tritt in Gestalt von Wärme in Erscheinung.