

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 29 (1938)
Heft: 15

Artikel: Blindleistung und Magnetisierungsarbeit
Autor: Rutgers, F.J.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1059391>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 28.04.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Kabelisolation für Gleichspannung ungefähr derjenigen für Stossbeanspruchungen entspricht, d. h. ca. 80 bis 100 kV/mm. Deswegen wird, mit gleicher Sicherheit wie bei normalen Wechselstromkabeln, eine Gleichspannungsbeanspruchung von zwei- bis dreifacher Höhe erlaubt werden können. Es darf aber nicht unterlassen werden, darauf hinzuweisen, dass die Spannungsverteilung bei Gleichspannung eine wesentlich andere ist. Die im Hinblick auf die Probleme der Höchstspannungs-Gleichstrom-Uebertragungen in Fluss gekommenen Versuche werden in nächster Zeit auch hier wertvolle Abklärung bringen.

Die Wachsbildung in Hochspannungs-Massekabeln ist tatsächlich, wie Herr Beldi richtig bemerkt hat, eine noch nicht abgeklärte Angelegenheit. Diese Erscheinung wurde in erster Linie in den Vereinigten Staaten konstatiert, wo aber die Kabel allgemein mit ganz wesentlich höheren Betriebstemperaturen betrieben werden. In der Schweiz sind diese Wachsbildungen sehr selten aufgetreten. Selbst an den 66-kV-Kabeln am Gotthard, die vor bald 20 Jahren verlegt wurden und die, an den heutigen Fabrikaten gemessen, sehr hohe dielektrische Verluste aufwiesen, waren Wachsbildungen kaum bemerkbar. Auf jeden Fall ist die Zusammensetzung der Tränkmassen und die Qualität der verwendeten Oele und Harze von Bedeutung. Bei den nach dem Pirellisystem fabrizierten Oelkabeln wurden bisher keine Wachsbildungen konstatiert. Die Kontrolle umfasst für diesen Kabeltyp ungefähr 2000 km bei Betriebsspannungen bis 220 kV.

Herr A. von Gastel befasst sich in seinen Ausführungen speziell mit dem Kabel als Ueberspannungsschutz. Seinen theoretischen Ueberlegungen möchte ich keineswegs entgegenstehen, aber ich glaube doch, dass meine Auffassung der schützenden Wirkung der Kabel richtig ist. Ich bin mir bewusst, dass die Entwicklung der Ableiter in letzter Zeit ganz wesentliche Fortschritte gemacht hat und es jetzt zuverlässige Typen gibt. Aber wesentlich ist doch eine Absenkung der Wanderwelle auf einen für die zu schützende Anlage unschädlichen Wert, ohne irgendwelches Risiko. Einer 11-kV-Anlage wird bei vorgeschalteter Kabelkapazität von nur 0,05 μ F sicher nichts mehr passieren. Auf jeden Fall haben wir bis heute keinen einzigen konstatierten Wanderwellen-Uerschlag an Anlagen, welche durch richtig angepasste Kabel geschützt waren. Es würde zu weit führen, hier noch eingehend auf die hohe Betriebssicherheit der Kabel gegen Ueberspannungen sowie die sonstigen Vorteile der Kabeleinführungen bei Werken und Unterstationen einzutreten.

M. J. Borel, Conférencier principal: Il m'est facile de répondre aux trois questions posées par M. Beldi aux fabricants de câbles, en me basant pour deux d'entre elles sur mon exposé dont je ferai même une citation textuelle:

1. «On peut considérer que l'isolant d'un câble à huile est constitué par deux éléments: le papier imprégné et l'huile contenue dans les dé joints du papier (voir fig. 5). Les propriétés électriques de ces deux éléments peuvent être caractérisées sommairement de la façon suivante:

	rigidité diélectrique	constante diélectrique
Papier imprégné	60 kV/mm	3,6
Huile	20 kV/mm	2,2

L'huile est donc l'élément le plus faible de l'isolant du câble et, par surcroît, celui qui, par sa plus faible constante diélectrique, est le plus contraint puisqu'il est placé en série avec du papier imprégné possédant une constante diélectrique plus élevée . . . »

Si donc, en vue d'améliorer la valeur de l'isolant d'un câble à huile (ou d'un câble à matière) on augmente la constante du papier, on diminue la contrainte électrique du papier imprégné pour augmenter celle de l'huile. Autrement dit, on soulage celui des deux éléments qui est le plus fort et l'on augmente la charge du plus faible, ce qui va à fin contraire du but envisagé.

2. La raison de l'amélioration de la tenue du papier imprégné d'huile soumis à une tension continue par rapport à sa tenue en courant alternatif est due surtout, si non uniquement, à la constitution même des molécules de l'huile et non à la présence de gaz résiduels, ceci du moins pour les câbles à huile confectionnés avec le soin voulu.

3. Dans un câble à huile fabriqué, posé et monté avec le soin voulu il ne se forme pas de cire. Qu'il me suffise d'en donner pour preuve les seuls résultats officiels que je puisse citer du concours d'Arnhem, à savoir les résultats relatifs au câble à huile imprégné après pose de Cortaillod. Ce câble a fonctionné pendant plus d'une année à une tension de 150 kV entre cuivre et plomb, ce qui correspond à un gradient maximum de 17,3 kV/mm. Après cet essai qui fut doublé d'un sévère essai d'échauffement, le câble, tant au point de vue de l'essai significatif de la mesure des pertes diélectriques qu'à celui de l'examen de l'état des papiers imprégnés, était pratiquement identique au câble vierge. Aucune altération de l'huile ne s'était produite.

Der Vorsitzende dankt allen Diskussionsrednern für ihre wertvollen Beiträge und schliesst die Versammlung um 17 Uhr 30.

Blindleistung und Magnetisierungsarbeit.

Von F. J. Rutgers, Kairo.

621.3.013 : 621.3.016.25

Es werden einige Ueberlegungen über das Wesen der Blindleistung gemacht und es wird gezeigt, dass die zur Erzeugung eines sinusförmigen Magnetfeldes erforderliche Blindleistung gleich ist dem Produkte aus der Magnetisierungsarbeit, welche zur einmaligen Erzeugung des Flusses von 0 auf $\Phi_{\max}$ erforderlich ist, und der Kreisfrequenz $2\pi f$. Diese einfache Beziehung wird auf folgende Beispiele angewendet: Ringspule ohne und mit Eisen und Transformator, wobei eine Kontrolle durch Messung die Brauchbarkeit der Rechnungsmethode ergibt.

I. Einleitung.

Oft wird die Frage gestellt: Was ist eigentlich Blindleistung?

Als Produkt eines Stromes und einer Spannung hat Blindleistung die physikalische «Dimension» einer wirklichen Leistung. Bei einer wirklichen Leistung sind aber Strom (Wirkkomponente) und Spannung, die miteinander multipliziert werden, in Phase. Bei der Blindleistung stehen Strom (Blindkomponente) und Spannung aufeinander senkrecht, und man fragt sich, ob man sich unter

L'auteur apporte quelques considérations sur la nature de la puissance réactive et montre que la puissance réactive nécessaire pour engendrer un champ magnétique sinusoïdal est égale au produit du travail de magnétisation nécessaire pour amener une fois le flux de 0 à $\Phi_{\max}$ par la pulsation $2\pi f$. Il applique ensuite, à titre d'exemple, cette relation simple à la bobine en tore avec et sans fer, ainsi qu'au transformateur. Les mesures effectuées confirment la justesse de cette méthode de calcul.

diesem Produkt etwas vorstellen kann. Zunächst wohl kaum. Wir haben aber immerhin etwas ähnliches in der Mechanik. Das Produkt einer Kraft mit der Länge des Weges in der Richtung der Kraft ist eine wirkliche Arbeit (Dimension: $lmt^{-2} \cdot l = l^2mt^{-2}$). Das Produkt einer Kraft mit einer Länge senkrecht zur Kraft ist ein Drehmoment und hat formal die gleiche Dimension wie eine Arbeit. Arbeit dividiert durch Zeit gibt Leistung ($l^2mt^{-2} \cdot t^{-1} = l^2mt^{-3}$) und Drehmoment multipliziert mit Winkelgeschwindigkeit (Dimension: t^{-1}) gibt ebenfalls Leistung!

Doch kehren wir zurück zur Blindleistung. Ihre grosse Bedeutung für die Magnetisierungsvorgänge und der Spannungshaltung in Wechselstromanlagen legt nahe, den Zusammenhang zwischen Blindleistung und Magnetisierungsarbeit näher zu untersuchen.

Man wird sehen, dass eine sehr einfache Beziehung besteht. Diese kann sogar dazu benützt werden, die zur Wechselstrommagnetisierung eines magnetischen Kreises erforderliche Blindleistung direkt auf einfache Weise zu berechnen, statt mittels der üblichen Ampèrewindungsmethode. Die Blindleistung hat eine sehr reelle Bedeutung.

II. Blindleistung und Magnetisierungsarbeit.

In einem Wechselstromkreise mit der Spannung $u = u_{\max} \sin(\omega t)$ und dem Strome $i = i_{\max} \sin(\omega t - \varphi)$ ist die Wirkleistung $P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$ und die Blindleistung $Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi$. Zerlegt man wie

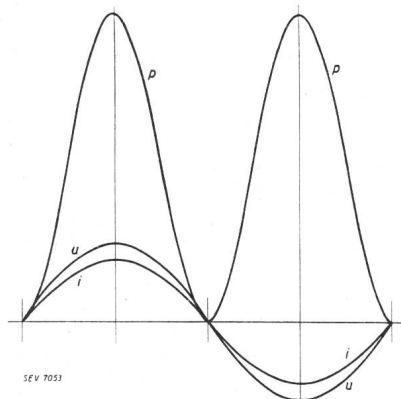


Fig. 1.

Kurve der Momentanwerte p der Wirkleistung f. rein ohmschen Kreis.

üblich den Strom in Wirkkomponente I und Blindkomponente I_q , so ist die Wirkleistung $P = U \cdot I$ und die Blindleistung $Q = UI_q$ ¹⁾.

Ist keine Blindleistung vorhanden (rein ohmscher Kreis), so ergibt sich, wie Fig. 1 zeigt, die bekannte Form der Kurve der Momentanwerte p der Wirkleistung, deren Mittelwert über eine Periode die Wirkleistung $P = UI$ ergibt ($\cos \varphi = 1$). Ist keine Wirkleistung vorhanden (rein induktiver

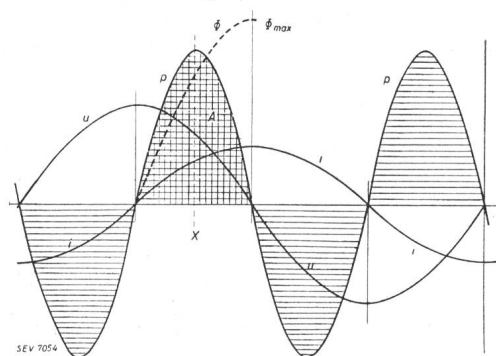


Fig. 2.

Kurve der Momentanwerte der Wirkleistung p beim rein induktiven Kreis. Die doppelt schraffierte Fläche A stellt die Arbeit dar, welche zum einmaligen Aufbau des magnetischen Flusses von Null bis zum Werte $\Phi_{\max}$ erforderlich ist.

¹⁾ Grosse Buchstaben bedeuten (international) stets Effektivwerte, die entsprechenden kleinen Buchstaben Momentanwerte; $u_{\max}$ und $i_{\max}$ sind Scheitelwerte. Auch im übrigen entsprechen die hier verwendeten Buchstabensymbole den neuesten Beschlüssen der C.E.I.

Kreis), so stellt die Randlinie der leicht schraffierten Fläche in Fig. 2 die Kurve der Momentanwerte p der Wirkleistung dar, deren Mittelwert über eine Periode gleich Null ist.

Die Wirkleistungskurve eines gemischten Kreises (mit R und L) kann man stets zerlegen in zwei Kurven nach Fig. 1 und Fig. 2, von denen die zweite sich nur auf die Blindkomponente des Stromes bezieht. Da Wirk- und Blindleistung unabhängig nebeneinander hergehen, genügt es für diese Betrachtungen, einen rein induktiven Kreis nach Fig. 2 zugrunde zu legen.

In Fig. 2 ist auch die Kurve der Momentanwerte des Flusses Φ eingetragen. Wir betrachten nun zunächst einen rein induktiven Stromkreis ohne Eisen mit sinusförmigen Kurven.

Die Kurve der Momentanwerte der Wirkleistung zeigt 4 Halbwellen pro Periode, zwei positive und zwei negative. Die Leistungskurve ist eine Sinuskurve, denn für eine Phasenverschiebung zwischen

Strom und Spannung von $\varphi = \frac{\pi}{2}$ ist das Produkt

$$\sin(\omega t) \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = \sin(\omega t) \cdot \cos(\omega t) = \frac{\sin(2\omega t)}{2}$$

also wieder eine Sinusfunktion. Dies wird nachher erlauben, in einfacher Weise den Mittelwert der Leistungsordinaten der stark schraffierten Halbwellen der Fig. 2 zu bilden.

Was ist nun die Bedeutung einer solchen Halbwellen, z. B. der stark schraffierten Halbwellen der Wirkleistungskurve der Fig. 2? Die stark schraffierte Fläche stellt eine Arbeit dar (Produkt aus jeweiliger Wirkleistung und Zeit). Es ist klar, dass die stark schraffierte Arbeitsfläche gleich derjenigen Arbeit ist, die nötig ist, um das magnetische Feld *einmal* aufzubauen vom Werte Null auf den Wert $\Phi_{\max}$. Diese Arbeit kann z. B. für ein Feld in Luft leicht berechnet werden.

Es soll nun die mittlere Leistung während dieser stark schraffierten Halbwellen der Wirkleistungskurve bestimmt werden. Wir bestimmen zunächst den Scheitelwert dieser Halbwellen, der gleich ist dem Produkte $u \cdot i$ für den Zeitpunkt X (siehe Fig. 2). Man sieht, dass in diesem Zeitpunkte der Wert $u = 0,707 \cdot u_{\max}$ und der Wert $i = 0,707 \cdot i_{\max}$ ist, da $\sin 45^\circ = 0,707$. Da $0,707 \cdot 0,707$ den Wert $\frac{1}{2}$ ergibt, ist der Scheitelwert der p -Kurve, d. h. das

Produkt $u \cdot i$ gleich $\frac{u_{\max} \cdot i_{\max}}{2}$ oder, wenn man die Effektivwerte einführt, $p_{\max} = \frac{U \sqrt{2} \cdot I \sqrt{2}}{2} = U \cdot I$,

d. h. gleich der Blindleistung, da in unserm Fall I ein reiner Blindstrom ist.

Um nun die gesuchte mittlere Wirkleistung P_{med} der Halbwellen zu finden, beachten wir, dass die Kurve eine Sinuskurve ist und dass somit $P_{\text{med}} = p_{\max} \cdot 0,6369$ ist.

Die gesamte Arbeit A , dargestellt durch die Fläche dieser Halbwellen, ist P_{med} mal Zeit, d. h.

mal eine Viertelperiode. Die Zeit einer Viertelperiode ist $\frac{1}{4f}$ Sekunden; die Arbeit A ist somit gleich $\frac{0,6396 UI}{4f}$. Nun ist aber 0,6396 (wie aus der Berechnung dieses Mittelwertes bekannt ist) nichts anderes als $\frac{2}{\pi}$, und man erhält somit

$$A = \frac{2 UI}{4 \pi f} = \frac{UI}{\omega}$$

wo ω die Kreisfrequenz $2\pi f$ ist. Da hier UI nichts anderes ist als die Blindleistung Q (I ist reiner Blindstrom) und A nichts anderes ist als die einmalige Magnetisierungsarbeit zum Aufbau des Flusses von 0 auf Φ_{max} , erhält man das überaus interessante Resultat:

$$Q = \omega \cdot A$$

oder in Worten:

Blindleistung = ω mal einmalige Magnetisierungsarbeit A .

Es ergibt sich also folgender

Satz: Die zur Erzeugung eines sinusförmigen Magnetfeldes erforderliche Blindleistung (in Blindwatt, neuerdings Var genannt) ist gleich dem Produkte aus der Magnetisierungsarbeit (in Wattsekunden), welche zur einmaligen Erzeugung des Flusses von 0 auf Φ_{max} erforderlich ist, und der Winkelgeschwindigkeit $\omega = 2\pi f$.

Dieses Resultat erinnert an die in der Einleitung erwähnte mechanische Analogie. Vergleicht man die Wechselstrommagnetisierung mit einer rotierenden Bewegung von der Winkelgeschwindigkeit ω und dem Drehmomente M , so ist die Leistung ähnlich der Blindleistung $Q = \omega \cdot M$, wobei der numerische Wert des Drehmomentes M gleich der einmaligen Magnetisierungsarbeit A ist.

Der einfache Satz $Q = \omega \cdot A$ erlaubt u. a. eine sehr einfache Berechnung des Blindleistungsbedarfes bei Wechselstrommagnetisierung, wenn es gelingt, A in einfacher Weise zu bestimmen.

Dies ist für Luft ohne weiteres möglich, für Eisen sind nähere Ueberlegungen nötig.

III. Magnetisierungsarbeit A , für Felder in Luft und Eisen.

Es soll die Arbeit A , die zum einmaligen Aufbau des magnetischen Flusses von Null auf Φ_{max} nötig ist, bestimmt werden, und zwar zunächst für Luft.

Man kennt den Begriff der Energiedichte des magnetischen Feldes, d. h. die in einem cm^3 -Feldraum vorhandene Energie, die mit a bezeichnet werden soll, für die Feldstärke H_{max} (bzw. für die Induktion B_{max} für Eisen). Diese Energie ist nichts anderes als die zum einmaligen Aufbau des Feldes von der Feldstärke Null auf die Feldstärke H_{max} nötige Arbeit a pro cm^3 . Und diese Arbeit ist bekanntlich, z. B. für eine eisenlose Ringspule (Toroid), gleich

$$a = \frac{H_{max}^2 \cdot 10^{-7}}{8 \pi} \text{ Wattsekunden pro cm}^3.$$

Fig. 3 zeigt die Kurve a in Funktion von H_{max} für Luft.

Wenn der gesamte «magnetisierte» Luftraum der Ringspule das Volumen V in cm^3 hat, beträgt die

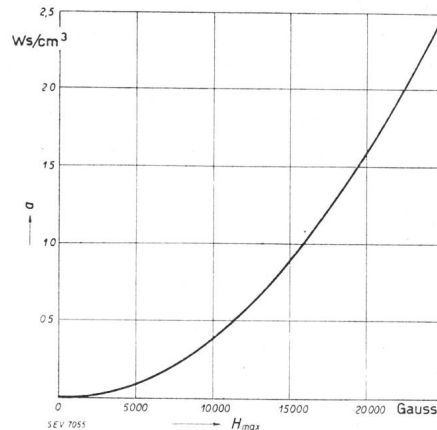


Fig. 3.

Kurve der einmaligen Magnetisierungsarbeit von 0 bis H_{max} pro cm^3 Luft, für verschiedene Werte von H_{max} , abgeleitet aus der Formel

$$a = \frac{H_{max}^2 \cdot 10^{-7}}{8 \pi} \text{ Wattsekunden.}$$

Gesamtarbeit A , die zum einmaligen Aufbau des Feldes von 0 auf die Stärke H_{max} nötig ist,

$$A = a \cdot V \text{ Wattsekunden.}$$

Somit erhält man die von der Ringspule aufgenommene Blindleistung bei Wechselstrommagnetisierung mit f Per./s ($\omega = 2\pi f$) für eine Feldstärke H_{max}

$$\text{Blindleistung } Q = \omega \cdot A = \omega \cdot a \cdot V \text{ in Var.}$$

Ist die Klemmenspannung U (unseres rein induktiven Kreises) gegeben, so berechnet man die von der Ringspule aufgenommene Blindleistung, bei einem gegebenen Flussquerschnitt S in cm^2 , einem Feldvolumen V in cm^3 und für eine gegebene Windungszahl N wie folgt:

Aus $U = 4,44 f \cdot \Phi_{max} \cdot N \cdot 10^{-8}$ erhält man Φ_{max} und aus $\frac{\Phi_{max}}{S}$ den Wert von H_{max} .

Aus der a -Kurve oder aus der für Luft gültigen Formel $a = \frac{H_{max}^2 \cdot 10^{-7}}{8 \pi}$ erhält man den Wert von a , und schliesslich ergibt sich die aufgenommene Blindleistung zu

$$Q = \omega \cdot a \cdot V.$$

Der reine Blindstrom beträgt dann $I = Q : U$. Soweit für Felder in Luft.

Und nun sei die Magnetisierung des Eisens betrachtet. Da bei der Ableitung über das Material keinerlei Voraussetzung gemacht wurde, sondern nur Sinusform des Magnetisierungsstromes angenommen wurde, so kann man (zunächst mit dieser Einschränkung) die erforderliche Blindleistung in gleicher Weise berechnen, wozu aber die Kenntnis

der einmaligen Magnetisierungsarbeit a pro cm^3 , für die betreffende Eisensorte, für den gewünschten Wert von $B_{\max}$, erforderlich ist.

An sich wäre es nicht schwer, diese Arbeit aus der Magnetisierungskurve des Eisens zu erhalten, jedoch treten hier einige Komplikationen auf. Einmal weil der wirkliche Magnetisierungsvorgang, u. a. infolge der Hysterisis, nicht genau nach den üblichen mittleren Magnetisierungskurven ($B_{\max}$ in Funktion der Durchflutung in Ampèrewindungen pro cm) verläuft und ausserdem weil die Kurvenform des Magnetisierungsstromes stark von der Sinusform abweicht. Diese beiden Punkte werden später betrachtet; zunächst seien sie nicht berücksichtigt. Dann lässt sich a für Eisen in bekannter Weise aus der Magnetisierungskurve bestimmen.

Fig. 4 zeigt eine Magnetisierungskurve z. B. für Dynamoblech, und zwar $B_{\max}$ in Funktion der Durchflutung pro cm^1 . Es sei daran erinnert, dass sich die Magnetisierungskurven im allgemeinen auf die Scheitelwerte des Stromes beziehen. In Fig. 3 sind also auf der Abszisse die Scheitelwerte der Ampèrewindungen pro cm aufgetragen.

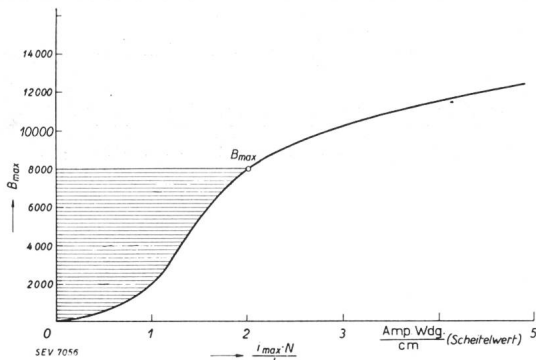


Fig. 4.

Magnetisierungskurve, z. B. von Dynamoblech. Die schraffierte Fläche stellt in einem gewissen Maßstab die Arbeit a dar, erforderlich zur einmaligen Magnetisierung von 0 bis $B_{\max}$, pro cm^3 Eisenvolumen.

Die schraffierte Fläche stellt, wie bekannt, in geeignetem Maßstab die gesuchte Magnetisierungsarbeit pro cm^3 Eisen dar für die einmalige Magnetisierung von Null auf den Wert $B_{\max}$. Misst man diese Fläche in cm^2 und ist der Maßstab der Zeichnung $1 \text{ cm} = x \text{ Gauss}$ und $1 \text{ cm} = y \frac{\text{Amp. Wdg.}}{\text{cm}}$.

so ist die Arbeit a in Wattsekunden gleich der schraffierten Fläche in cm^2 multipliziert mit $x \cdot y$ und 10^{-8} , d. h.

$$a = \text{Fläche mal } x \cdot y \cdot 10^{-8} \text{ Wattsekunden.}$$

Die Werte von a , bestimmt für verschiedene Werte von $B_{\max}$ aus der Magnetisierungskurve der Fig. 4, sind in Fig. 5 in Funktion von $B_{\max}$ aufgetragen.

Um die für einen verlangten Wert von $B_{\max}$ erforderliche Blindleistung zu berechnen, braucht man nur a der Kurve zu entnehmen und mit dem Eisenvolumen sowie mit $\omega = 2\pi f$ zu multiplizieren!

$$Q = \omega \cdot a \cdot V \text{ in Var.}$$

¹⁾ Durchflutung, gemessen in Amp. Wdg.

Besteht der magnetische Kreis aus verschiedenen Teilen, z. B. Blech, Luftspalt usw., so berechnet man Q für jeden Teil und addiert die Werte algebraisch:

$$Q_{\text{total}} = \Sigma Q = \Sigma \omega \cdot a \cdot V.$$

Bis jetzt gilt dies nur für sinusförmigen Magnetisierungsstrom.

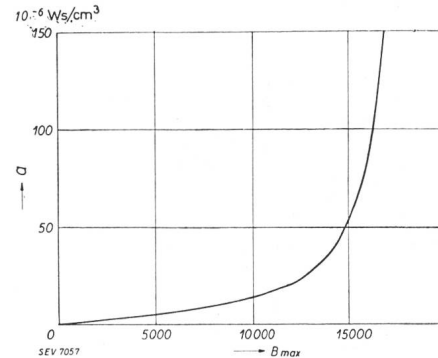


Fig. 5.

Kurve der zur einmaligen Magnetisierung von 0 bis $B_{\max}$ erforderlichen Arbeit a pro cm^3 Eisen, abgeleitet aus Fig. 4.

In Wirklichkeit sind aber, wie schon bemerkt, die Vorgänge bei der Magnetisierung nicht so einfach. Einmal bringen Hysterisis und Eisenverluste eine Wirkkomponente in den Magnetisierungsstrom, die jedoch die Blindleistung nicht beeinflusst. Wichtiger ist, dass die Hysterisis den zeitlichen Verlauf der Magnetisierung ändert und die Form der Kurve B als Funktion von Amp. Wdg./cm. Und zwar erhält man einen verschiedenen Verlauf für verschiedene Werte von $B_{\max}$ sowie für aufsteigende und absteigende Magnetisierung. Ausserdem geht die Magnetisierungskurve nicht durch den Nullpunkt. Damit ändert sich auch der Flächeninhalt der schraffierten Arbeitsfläche der Fig. 4. Rechnet man, wie üblich, mit einer «mittleren» Magnetisierungskurve, so erhält man als Wert der «erforderlichen Arbeit zur einmaligen Magnetisierung von 0 bis $B_{\max}$ » für kleine Sättigungen, aber ganz besonders für grosse Sättigungen ungenaue Werte. Aber auch die althergebrachte Berechnungsmethode magnetischer Kreise

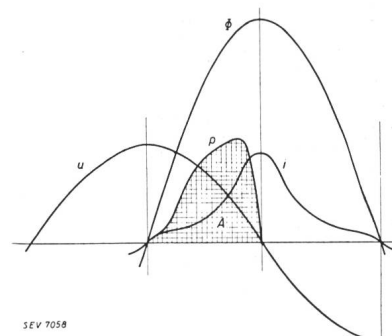


Fig. 6.

Kurve der Momentanwerte p der Wirkleistung bei einem von der Sinusform abweichenden Magnetisierungsstrom. Die doppelt schraffierte Fläche stellt wieder, wie in Fig. 2, die einmalige Magnetisierungsarbeit dar.

kann diese Abweichungen nicht genau berücksichtigen.

Von wesentlich grösserem Einfluss ist die starke Abweichung der Stromkurve von der Sinusform infolge der Sättigungserscheinungen, welche das Hinzutreten höherer Harmonischer und eine starke relative Vergrößerung der Maximalamplitude des

Magnetisierungsstromes bewirken, so dass das Verhältnis zwischen Scheitelwert und Effektivwert (Scheitelfaktor) stark von $\sqrt{2} = 1,41$ abweicht. Diese Erscheinung ist wieder abhängig von der Höhe von B_{max} . An eine genaue rechnerische Erfassung dieser Vorgänge ist kaum zu denken.

Man kann aber diesen Einfluss sehr wohl angenähert durch Einführung eines Korrekturfaktors k zum Scheitelfaktor berücksichtigen. Hat der Magnetisierungsstrom eine Form etwa nach Fig. 6, so kann der Scheitelfaktor $\frac{i_{max}}{I}$ statt durch $\sqrt{2}$ durch

einen Wert $k \cdot \sqrt{2}$ dargestellt werden, wobei k für verschiedene Werte von B_{max} und für verschiedene Eisensorten verschieden ist. Für mittlere Werte von B_{max} ist $k = 1$, bei grossem B_{max} kann k bis ca. 2 ansteigen. Fig. 7 zeigt den ungefähren Verlauf des

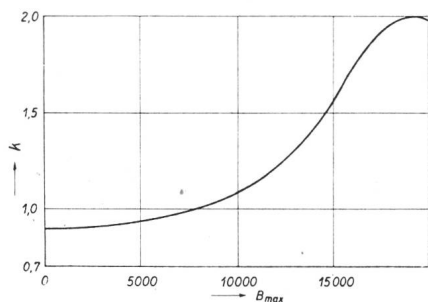


Fig. 7.

Grössenordnung des Koeffizienten k der Formel für den «Scheitelfaktor» $= k\sqrt{2}$ in Funktion von B_{max} .

Korrekturfaktors k in Funktion von B_{max} als angenäherten Mittelwert für verschiedene Magnetisierungskurven.

Ist also eine Magnetisierungskurve für Wechselstrom mit Instrumenten aufgenommen worden, die auch bei nicht sinusförmigem Strom angenähert Effektivwerte angeben, so können die Scheitelwerte des Magnetisierungsstromes für das Aufzeichnen der B_{max} -Kurve als Funktion der «Durchflutung pro cm (Scheitelwerte!)» erhalten werden durch Multiplikation der Effektivstromstärken mit $k \cdot \sqrt{2}$ (siehe die Kurven der Fig. 8 und 9). Es möge hier bemerkt werden, dass die Unsicherheit betreffend die genauen Werte von k wegfällt, wenn die a -Kurve direkt experimentell bestimmt wird.

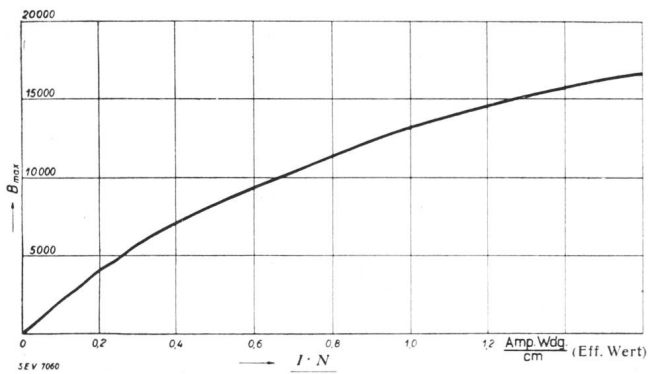


Fig. 8.

Magnetisierungskurve B_{max} in Funktion des Effektivwertes der Ampèrewindungen pro cm. aus Messung (verwendet für die Beispiele).

Die Abweichung des Stromes von der Sinusform hat natürlich auch einen Einfluss auf die p -Kurve (Kurve der Momentanwerte der Leistung) und auf den Faktor 0,6396, der für die Berechnung des Leistungsmittelwertes benützt wurde. Fig. 6 zeigt die Deformation der p -Kurve bei nicht sinusförmigem Magnetisierungsstrom. Glücklicherweise ist der Einfluss auf den Mittelwertsfaktor 0,6396 sehr viel geringer als beim oben betrachteten «Scheitelfaktor», so dass von einer Korrektur abgesehen werden kann.

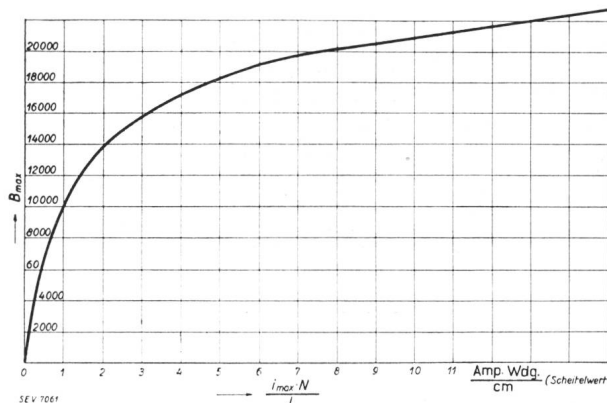


Fig. 9.

Magnetisierungskurve B_{max} in Funktion des Scheitelwertes der Ampèrewindungen pro cm, bestimmt aus Fig. 8 und 7.

Sehr wichtig ist, dass unter allen Umständen trotz höherer Harmonischer, Hysteresis und Eisenverluste usw., das Maximum der Magnetisierungsstromkurve immer zeitlich mit dem Maximum der Fluss- oder B -Kurve zusammenfällt.

Zusammenfassend ist also zu sagen, dass die dargestellte Berechnungsweise der für die Magnetisierung des Eisens erforderlichen Blindleistung ebenso wenig wie die bisherige Methode ganz genau sein kann. Diese Ungenauigkeit wird am kleinsten sein für mittlere Sättigungen und prozentual noch kleiner, falls ein, wenn auch nur sehr kleiner, Luftspalt vorhanden ist. Denn der Wert von a für Luft ist etwa 5000 ... 10 000mal grösser als für Eisen.

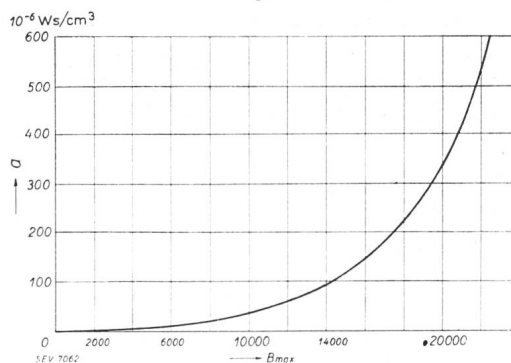


Fig. 10.

Kurve der einmaligen Magnetisierungsarbeit a pro cm³ Eisen, in Funktion B_{max} , bestimmt aus Fig. 9, und für die Beispiele verwendet.

Wie aber schon gesagt, verwendet die bisher übliche Berechnungsweise mit Ampèrewindungen einen konstanten Scheitelfaktor vom Werte $\sqrt{2}$ und eine «mittlere» Magnetisierungskurve und kann daher auch keine genauen Resultate geben.

Die hier beschriebene Blindleistungsmethode dürfte sogar genauere Resultate geben, wenn die a -Kurve (siehe Fig. 10) direkt durch Messung für die betreffende Eisensorte bestimmt wird.

Es sollen nun einige Beispiele behandelt werden, aus denen hervorgeht, dass die Ergebnisse der Blindleistungsmethode für Felder in Luft streng richtig sind und für Felder in Eisen ungefähr übereinstimmen mit den (auch nicht streng gültigen) Resultaten der üblichen Rechnung mit Ampèrewindungen. Es wird besonders interessant sein, die Ergebnisse der Blindleistungsrechnung für einen Transformator zu vergleichen mit den wirklichen Versuchsergebnissen bei 50 und 40 Per./s. Auch hier ist die Uebereinstimmung trotz der Ungenauigkeit in der Schätzung der «Scheitelfaktoren» für verschiedene Werte von B recht gut. Eine direkte Messung der a -Kurve liegt leider nicht vor.

IV. Beispiele.

Es sollen folgende Beispiele behandelt werden:

- Ringspule ohne Eisen.
- Die gleiche Ringspule mit Eisen, für eine grosse Zahl verschiedener Werte von $B_{\max}$ zwischen 2000 und 22 000 Gauss.
- Ein Einphasen-Transformator, für welchen die Effektivwerte des Magnetisierungsblindstromes für verschiedene Leerlaufspannungen (entsprechend Werte von $B_{\max}$ zwischen 6000 und 21 000 Gauss) und für verschiedene Frequenzen (40 und 50 pro Sekunde) durch Versuch bestimmt wurde (aus Strom- und Wirkleistungsmessung).

Als Magnetisierungskurve des Eisens wird für sämtliche Beispiele die für den Transformator aus Versuch bestimmte Kurve $B_{\max}$ in Funktion der Effektivwerte der Durchflutung in Ampèrewindungen pro cm benützt (siehe Fig. 8), aus welcher unter Berücksichtigung der vorhin erwähnten Scheitelfaktoren $k\sqrt{2}$ eine neue Kurve: $B_{\max}$ in Funktion der Scheitelwerte der Durchflutung in Ampèrewindungen pro cm abgeleitet wird (siehe Fig. 9). Aus Fig. 9 wurde dann die Kurve der einmaligen Magnetisierungsarbeit a pro cm³ Eisen in Funktion von $B_{\max}$ abgeleitet (a Kurve der Fig. 10). Leider konnte ich die geplanten wirklichen Blindleistungsmessungen in Egypten nicht mehr durchführen.

Um Platz zu sparen, gebe ich nur die Resultate der Rechnungen.

Es bedeuten:

S Luft- oder Eisenquerschnitt in cm²;

l Länge des Luft- oder Eisenweges in cm;

V Volumen der Luft oder des Eisens in cm³;

N Zahl der Windungen.

«D-Methode» bedeutet die übliche Berechnungsweise mittels Durchflutung pro cm (Amp. Wdg. pro cm),

«B-Methode» die direkte Berechnung der Blindleistung nach der hier beschriebenen Methode.

Beispiel a.

Ringspule (Toroid) ohne Eisen. $S = 78,5$ cm²; $l = 314$ cm; $V = 24\,600$ cm³ und $N = 628$, $f = 50$ Per./s.

Für die D-Methode gilt

$$I = \frac{H_{\max} \cdot 10 \cdot l}{4 \pi N \cdot \sqrt{2}} \text{ und } Q = IU$$

(wo $U = 4,44 \cdot f \cdot H_{\max} \cdot S \cdot N \cdot 10^{-8}$).

Für die B-Methode gilt $Q = a \cdot V \cdot \omega$ (für a siehe Kurve Fig. 3 oder die Formel $a = \frac{H_{\max}^2 \cdot 10^{-7}}{8 \pi}$).

Ergebnis der Rechnung:

D-Methode					B-Methode	
$H_{\max}$ Gauss	Fluss	U Volt	I Ampère	Q Var	a 10 ⁻⁶ Ws	Q Var
25	1960	2,73	7,06	19,3	2,49	19,2
50	3920	5,45	14,14	77,0	9,96	77,0
75	5880	8,17	21,21	173	22,38	172,5
100	7850	10,9	28,28	307	39,8	306,6

Die Uebereinstimmung ist vollständig. Da sowohl U der D-Methode und Q der B-Methode proportional der Frequenz sind, gilt die Uebereinstimmung auch für alle anderen Frequenzen.

Beispiel b.

Gleiche Ringspule mit Eisen für verschiedene Werte von $B_{\max}$ zwischen 2000 und 20 000, 50 Per./s.

Die Magnetisierungskurven und die a -Kurve sind diejenigen der Fig. 8, 9 und 10.

Ergebnis der Rechnung.

D-Methode					B-Methode	
$B_{\max}$	$\frac{I \cdot N}{l}$ Amp. Wdg. cm	I Ampère	U Volt	Q Var	a 10 ⁻⁶ Ws	Q Var
2 000	0,09	0,045	218	9,9	1,5	11,6
4 000	0,195	0,098	436	42,7	6,0	46,5
6 000	0,32	0,16	653	104	13,5	104,5
8 000	0,48	0,24	872	210	24,8	192
10 000	0,66	0,33	1090	360	41,1	316
12 000	0,86	0,43	1310	560	65	504
14 000	1,1	0,55	1525	840	100	775
16 000	1,44	0,72	1740	1250	152	1180
18 000	2,0	1,0	1960	1960	230	1780
20 000	2,7	1,35	2180	2940	348	2700

Die Uebereinstimmung ist genügend, wenn man bedenkt, dass beide Methoden nur angenähert gelten können. Die neue Blindleistungsmethode würde genauere Resultate geben, wenn die a -Kurve experimentell aufgenommen wäre, statt abgeleitet über den Umweg der Magnetisierungskurve und der geschätzten «Scheitelfaktoren».

Beispiel c.

Einphasentransformator (5 kVA; 200/100 Volt). Vergleich zwischen Versuch und Blindleistungsmethode für 50 und 40 Per./s.

$S = 69$ cm²; $l = 95$ cm; $V = 6550$ cm³; $N = 80$.

Aus Leerlaufversuchen bei verschiedenen Spannungen und Frequenzen wurde durch Messung der Wirkleistung und der Stromstärke in bekannter Weise der Effektivwert des reinen Magnetisierungsstromes für die verschiedenen Spannungen bestimmt und aus Spannung multipliziert mit Magnetisierungsstrom die aufgenommene Blindleistung. Für die den verschiedenen Spannungen und Frequenzen entsprechenden Werte von B_{max} wurde dann die Kurve (Fig. 8) B_{max} in Funktion der Effektivwerte der Durchflutung pro cm in Amp. Wdg./cm bestimmt. Mit Hilfe der geschätzten Werte des Scheitelfaktors ($k \cdot \sqrt{2}$) wurde nachher die Kurve B_{max} in Funktion der Scheitelwerte der Durchflutung pro cm in Amp. Wdg./cm gezeichnet (Fig. 9) und durch Ausmessen der Arbeitsflächen für verschiedene Werte von B_{max} die Kurve der einmaligen Magnetisierungsarbeit pro cm³ Eisen von 0 bis B_{max} bestimmt, also a in Funktion von B_{max} (siehe Fig. 10).

Ergebnis für 50 Per./s.

Aus Messung				B-Methode	
U Volt	B_{max}	I Ampère	Q Var	a 10 ⁻⁶ Ws	Q Var
80	6 530	0,363	29,1	16,5	33,8
120	9 700	0,65	78	38	78
160	13 100	1,01	162	80	160
200	16 350	1,70	340	160	330
240	19 600	2,52	606	310	637
260	21 200	3,37	877	445	913

Ergebnis für 40 Per./s.

Aus Messung				B-Methode	
U Volt	B_{max}	I Ampère	Q Var	a 10 ⁻⁶ Ws	Q Var
80	8 150	0,52	41,5	24	39,4
120	12 200	0,94	113	65	110
160	16 300	1,59	254	152	250
200	20 400	3,07	615	370	607

Das Resultat zeigt eine bemerkenswerte Uebereinstimmung zwischen den aus Messung erhaltenen Werten der Blindleistung und den nach der Blindleistungsmethode berechneten Werte.

Wir wollen uns heute auf die Anwendung der Formel

$$\text{Blindleistung} = a \cdot V \cdot \omega$$

für die Berechnung des magnetischen Kreises beschränken. Die Formel erlaubt aber weitere interessante Anwendungen, z. B. auf die Spannungshaltung und Blindleistungsverschiebung in elektrischen Anlagen. Die Kurve $a = \text{Funktion von } B_{max}$ kann für eine gegebene Eisensorte experimentell aufgenommen werden. Und ausser a benötigt man nur noch das Eisenvolumen in cm³ und die Frequenz!

In früheren Veröffentlichungen habe ich wiederholt darauf hingewiesen, dass viele Probleme durch direkte Rechnung mit Wirk- und Blindleistungen an Einfachheit und Anschaulichkeit gewinnen. Ich glaube, dass die vorliegende Arbeit ein weiterer Beitrag in dieser Richtung ist.

Hochfrequenztechnik und Radiowesen — Haute fréquence et radiocommunications

Elektrolytkondensatoren.

621.319.45

Verschiedene Metalle, wie Aluminium, Tantal, Niobium, Zirkon, Titan, lassen sich leicht auf elektrolytischem Wege mit einer Oxydhaut überziehen. Bringt man Aluminium in eine Natriumphosphatlösung als Elektrolyt, so bildet sich auf ihm eine dünne Oxydhaut, wenn es mit dem positiven Pol der Stromquelle verbunden wird. Die aus Al₂O₃ bestehende Oxydhaut hat einen grossen Widerstand für die angegebene Stromrichtung, einen kleinen in der entgegengesetzten Richtung. Eine solche Zelle kann demnach auch als Gleichrichter dienen, was schon lange bekannt ist. Die allgemeine Verwendung in der Radiotechnik hat sich erst um 1930 eingebürgert, nachdem es gelungen war, den Verluststrom auf ein erträgliches Mass zu beschränken. Infolge der geringen Dicke der Oxydschicht und der hohen Dielektrizitätskonstanten ($\epsilon = 10$) des Al₂O₃ sind die erreichbaren Kapazitäten beträchtlich. Bei einer Schichtdicke von 10⁻⁵ cm und einer Fläche von 100 cm² beträgt die Kapazität schon etwa 9 μ F. Da der Elektrolyt einen beträchtlichen Widerstand hat, muss man ins Ersatzschaltbild des Kondensators neben dem parallel liegenden Verlustwiderstand r einen in Reihe zum Kondensator liegenden Widerstand R einzeichnen. Eine angenehme Eigenschaft des Elektrolytkondensators ist seine Unempfindlichkeit gegen Durchschläge. Tritt ein Durchschlag (Funkenbildung) zwischen Elektrolyt und Aluminium infolge Spannungsüberlastung ein, so wird die Al₂O₃-Schicht zwar an den betreffenden Stellen zerstört, aber durch den einsetzenden starken Verluststrom und die entsprechende Sauerstoffbildung sofort wieder regeneriert.

Die Gleichrichter-Wirkung erklärt sich durch die Tatsache, dass bei den äusserst dünnen Oxydschichten sehr grosse Feld-

stärken entstehen. Bei gebräuchlichen Betriebsbedingungen liegen diese in der Grössenordnung von 10⁷ V/cm. Bei solch hohen Feldstärken tritt die Erscheinung der kalten Elektronen-Emission auf, d. h. die Feldstärke genügt, um die Austrittsarbeit zu überwinden, wobei die negative Elektrode Elektronen aussendet. Der Elektronenstrom wird dabei bei der Feldstärke E

$$I = A \cdot E^2 \cdot e^{-\frac{B}{E}} \quad (A \text{ und } B \text{ Materialkonstanten})$$

Wird ein elektrisches Wechselfeld zwischen zwei durch ein Dielektrikum oder einen Halbleiter getrennte Elektrodenplatten gelegt, so fliesst der Elektronenstrom leichter von der Platte mit kleinerer Austrittsarbeit B nach der mit grösserer Austrittsarbeit als umgekehrt. Da im allgemeinen Metalle eine kleinere Austrittsarbeit zeigen als Elektrolyte, so ist es klar, dass der Verluststrom nur gering ist, wenn das Metall positiv ist. Will man den Verluststrom noch weiter verkleinern, so muss man Elektrolyte mit geringer spezifischer Leitfähigkeit verwenden, was wiederum einen hohen Reihenwiderstand bedingt. Man ist deshalb zu einem Kompromiss gezwungen. Immerhin ist es gelungen, den Verluststrom bei 450 V auf 1 mA herunterzudrücken.

Ein Vorteil des Elektrolytkondensators ist die Fähigkeit, die Dicke seiner Isolierschicht der angelegten Spannung anzupassen. Beim Formieren des Kondensators mit einer bestimmten Spannung nimmt die Schichtdicke nur äusserst langsam zu, wenn eine minimale Feldstärke erreicht wird. Erhöht man die Spannung beim Formieren auf das Doppelte, so wird auch die Schichtdicke auf das Doppelte wachsen, da bei Verdoppelung der Schicht wieder dieselbe Feldstärke entsteht.