

**Zeitschrift:** Bulletin de l'Association suisse des électriciens  
**Herausgeber:** Association suisse des électriciens  
**Band:** 26 (1935)  
**Heft:** 16

**Artikel:** Zur Wahl der Induktion im Transformatorenbau  
**Autor:** Goldstein, I.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1058470>

### **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:** 25.12.2024

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

## Zur Wahl der Induktion im Transformatorenbau.

Von I. Goldstein, Zürich.

621.3.013.1: 621.314.21

*Es wird die Abhängigkeit des Kerngewichtes eines Transformators von der Verlustkurve des Kernmaterials dargestellt und die Vorteile, die ein niedrigwattiges Transformatorblech bietet, werden zahlenmässig erfasst. Anschliessend werden die Vorteile eines guten Füllfaktors für den Kernaufbau bewertet. Zum Schluss wird der Einfluss der Wechselstrom-Magnetisierungskurve auf die Höhe des Leerlaufstromes und seiner Harmonischen erläutert.*

*L'auteur expose la relation entre le poids du noyau d'un transformateur et la courbe de pertes des tôles du noyau; il exprime ensuite par des chiffres les avantages qu'offrent des tôles à faibles pertes, et fait ressortir les avantages d'un bon facteur de remplissage pour la construction du noyau. Pour terminer, l'auteur explique l'influence de la courbe de magnétisation en courant alternatif sur la hauteur du courant à vide et de ses harmoniques.*

### Fragestellung.

Man kann keinen festen Wert für die Induktion angeben, bis zu welchem man gehen darf, um die Wirtschaftlichkeit eines Transformators zu verbessern. Diese Frage kann nur in ganz begrenztem Masse einer allgemeinen Betrachtung unterzogen werden.

Schon ganz abgesehen von den Garantien, die zu erfüllen sind, ist die Höhe der Sättigung, bis zu welcher man sich heranwagen darf, von den magnetischen Eigenschaften des Kernmaterials, der Kernart, von dem Ausmass an zusätzlichen Verlusten, die zu erwarten sind, nicht zuletzt von der Schaltung des Transformators (ob  $\lambda$  oder  $\Delta$ ) abhängig. Jede Transformatoren-Berechnung und -Fabrikation kennt diese Schwächen und wird dem einen oder dem andern Punkt mehr Beachtung schenken. Wenn ich dennoch einige allgemeine Gesichtspunkte heraushebe und sie den Fachkreisen zur allgemeinen Verwertung empfehle, so geschieht dies unter folgender Voraussetzung.

Es ist ja in den meisten Fällen die Frage nicht so gestellt, dass man den «Grenzwert» von  $B$  sucht, sondern man wird nach einer Verbesserung des Bestehenden trachten und hierfür lassen sich wohl einige allgemeine Gesichtspunkte ableiten. Es sind folgende Fragen zu klären:

1. Wie verhält es sich mit den Verlusten?
2. Welche Aenderung erfährt der Leerlaufstrom?

### I. Verluste.

Es ist allgemein bekannt, dass man durch Verwendung hochlegierter Bleche geringer Verlustziffern einen erheblichen Teil vorwärts kommt. Es interessiert aber, zahlenmässig die Gewichtsreduktion des Kernes zu erfassen, wenn ein Material mit besserer Verlustkurve vorliegt. So seien in Figur 1 die Verlustkurven zweier Materialien dargestellt, die tatsächlich gemessenen Werten entsprechen. Die Kurve II entspricht der üblichen hochlegierten Blechsorte, die Kurve I dem einzu-führenden besseren 1,05-Watt-Blech.

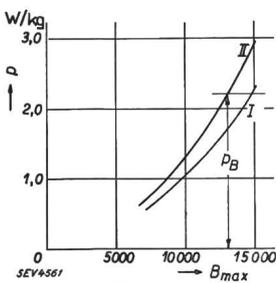


Fig. 1.  
Verlustkurven.  
I 1,05-Watt-Blech.  
II 1,3-Watt-Blech.

Die Gewichtsreduktion, die sich durch die Verwendung des besseren Materials ergibt, lässt sich

folgendermassen ermitteln. Es sei  $B_{II}$  der Wert der Induktion (etwa 13 000), bei dem für das Material II ein Kerngewicht von  $G_{II}$  zur Einhaltung der vorgeschriebenen Eisenverluste  $P_{II}$  nötig ist. Ferner sei  $p_{BII}$  die Verlustzahl in W/kg des Materials II bei der Induktion  $B_{II}$ .  $p_{BI}$  die Verlustzahl in W/kg des Materials I bei der Induktion  $B_I$ .

$G_I, G_I', G_I'', \dots, G_I^{(n)}$  verminderte Kerngewichte in kg.  
 $Q_{II}, Q_I, Q_I', \dots$  Eisenquerschnitte.  
 $B_I, B_I', B_I'', \dots$  erhöhte Induktionen des Materials I. Man zieht die Horizontale durch  $p_{BII}$  (Fig. 1) und erhält in der Kurve I den entsprechenden Wert  $B_I$ , für welchen

$$p_{BII} = p_{BI} = p_B.$$

Vermindert man den Querschnitt des Kernes aus dem Material I im Verhältnis  $\frac{1}{a}$  ( $a$  ist die Erhöhung der Induktion)

$$\frac{B_I}{B_{II}} = \frac{Q_{II}}{Q_I} = \frac{G_{II}}{G_I} = a;$$

so erhält man folgende Verlustgleichungen

$$P_{II} = p_B G_{II}$$

$$P_I = p_B \frac{G_{II}}{a}$$

bzw.

$$\frac{P_I}{P_{II}} = \frac{1}{a}$$

Die Eisenverluste beim verminderten Kerngewicht sind kleiner und man kann eine nochmalige Induktionserhöhung vornehmen, wenn man die vorgeschriebenen Verluste nicht unterschreiten will. Um  $P_I$  zu erhöhen, kann man die Verluste quadratisch mit der Induktion umrechnen (genauer wird die Umrechnung, wenn vorhandene Verlustkurven zugrundegelegt werden). Es ist offensichtlich

$$\left| \frac{B_I'}{B_I} \right|^2 = a \quad \text{und} \quad \frac{B_I'}{B_I} = \sqrt{a}$$

wo  $B_I'$  den erneut erhöhten Induktionswert, der bei der Ausführung des Kernes aus Material I angenommen wird, bedeutet. Es hat dann der Kern tatsächlich geringere Eisenverluste als die vorgeschriebenen  $P_{II}$ .

Es ergibt sich aus den Beziehungen

$$\frac{B_I}{B_{II}} = a, \quad \frac{B_I'}{B_I} = \sqrt{a} \quad p_{B'} = p_B \cdot a$$

die Gleichung

$$\frac{B_I'}{B_{II}} = a \sqrt{a} = \frac{Q_{II}}{Q_I'}$$

Und schliesslich

$$P_I' = p_B a \frac{G_{II}}{a \sqrt{a}} = \frac{p_B G_{II}}{\sqrt{a}}$$

Die Gewichtsverminderung  $K$  des Kernes aus dem besseren Material I in % ergibt sich nach der zweiten Gewichtsreduktion zu

$$K = (a \sqrt{a} - 1) 100 \%$$

Nun sieht man leicht, dass die letzte Ueberlegung sich wiederholen lässt und dass man den Querschnitt weiter reduzieren, bzw. die Sättigung weiter erhöhen kann, wobei

$$\frac{B_I''}{B_I'} = \sqrt[4]{a} \quad \text{und} \quad \frac{B_{II}''}{B_{II}} = a \sqrt{a} \sqrt[4]{a}$$

Es wird schliesslich

$$P_I'' = p_B a \sqrt{a} \frac{G_{II}}{a \sqrt{a} \sqrt[4]{a}} = \frac{p_B G_{II}}{\sqrt[4]{a}}$$

Eine Grenzwertbetrachtung führt zum Schlussresultat

$$\frac{B_I^{(n)}}{B_{II}} = \lim_{n \rightarrow \infty} a \cdot a^{\sum_{2^n}^1} = a^2.$$

$$G_I^{(n)} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{G_{II}}{a \cdot a^{\sum_{2^n}^1}} = \frac{G_{II}}{a^2}$$

$$P_I^{(n)} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{p_B \cdot G_{II}}{\sqrt[n]{a}} = p_B \cdot G_{II} = P_{II}$$

$$K = \lim_{n \rightarrow \infty} (a \cdot a^{\sum_{2^n}^1} - 1) \cdot 100 \% = (a^2 - 1) 100 \%$$

Es ist interessant, dass man für die Bemessung des Kernes gleicher Verluste  $P_{II}$  theoretisch einen quadratischen Gewinn der ursprünglich aus dem Vergleich beider Kurven gewonnenen Zahl  $a$  erhält.

Es liegt dem Verfasser fern, durch diese Darstellung zu einer draufgängerischen Erhöhung der Sättigung aufzumuntern. Praktisch wird man nicht bis auf den äussersten aus dieser Ueberlegung gewonnenen Wert gehen, da sonst dem Berechner die anwachsenden zusätzlichen Verluste einen Strich durch die Rechnung machen können. Man kann aber bei guter Verlustkurve, in welcher  $p_{15}$  gering ist, in vielen Fällen bis 15 000 Linien gehen.

Ich möchte in diesem Zusammenhang auf die Bedeutung des Füllfaktors noch einmal hinweisen.

Schon diese Betrachtung des verminderten Eisenquerschnittes bei gleichbleibenden Eisenverlusten ergibt, dass dabei auch für das Kupfergewicht der Wicklung eine Reduktion eintritt.

Alle hier durchgeführten Betrachtungen hatten gleiche Windungsspannung zum Ausgangspunkt. Daraus ergibt sich die prozentuale Verminderung des Kupfergewichtes als gleichbedeutend mit der prozentualen Verminderung der Windungslänge.

Bedeutet  $\frac{1}{a^2}$  die Eisenquerschnittsverminderung, so ist  $\frac{1}{a}$  die Umfangsverminderung und infolgedessen auch die Kupfergewichtsreduktion. In der gleichen Richtung wirkt die Verbesserung des Füllfaktors der verwendeten Bleche. Die Verminderung des Querschnittes infolge des besseren Materialfüllfaktors vermindert nochmals die Windungslänge, und es kommt die Wurzel aus dem Querschnittsgewinn für den Kern wieder als Reduktionsfaktor für das Kupfergewicht heraus. Ein Gewinn im Füllfaktor von 10 % erscheint also als 5 % Kupferersparnis für die Wicklung. In Deutschland hat man schon längst aufgehört, den Füllfaktor der Bleche gefühlsmässig zu beurteilen. Die für die Eisennormen vorgesehene Messmethode des Füllfaktors hat folgenden Inhalt und wird durch Fig. 2 erläutert.

Eine Anzahl kleiner Blechstreifen, die nur an den Rändern abgeschliffen werden, werden in eine Presse unter einen Druck von 5 bis 10 kg/cm<sup>2</sup> ge-

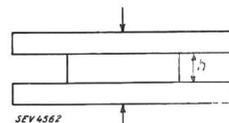


Fig. 2.  
Anordnung für die Füllfaktorbestimmung.

setzt. Dabei wird die Höhe der Blechprobe mit genauen Leeren ausgemessen. Ist diese  $h$  mm, so folgt nun der Vergleich dieser Grösse mit der sogenannten Gewichtshöhe  $h_g$ . Die Ermittlung der Gewichtshöhe erfolgt aus dem Gewicht der Probe und dem spezifischen Gewicht der Blechstreifen, welches durch das Verdrängungsverfahren an einigen Blechstreifen sehr sorgfältig und genau vorzunehmen ist.

Der Füllfaktor in % ist dann durch das Verhältnis

$$f = \frac{h_g}{h} 100 \%$$

gegeben.

Diese Messungen, an verschiedenen Blechsarten durchgeführt, ergeben grosse Unterschiede, und zwar in den Grenzen 83 bis 98 %.

Die praktische Erfahrung hat gelehrt, dass die Forderung eines garantierten Füllfaktors unumgänglich ist.

## 2. Leerlaufstrom.

Die Betrachtung wäre unvollständig, würde sie nicht durch eine kritische Beleuchtung der Magnetisierungsverhältnisse ergänzt. Auch in diesem Gebiet verhält es sich anders, als man zunächst annimmt. Das Kriterium für einen geringen Leerlaufstrom ist die Magnetisierungskurve. Die VDE-Vorschriften für die Eisenprüfung sehen die Aufnahme der Gleichstrommagnetisierungskurve nach der ballistischen Methode vor und verlangen die Einhaltung bestimmter Kleinstwerte für die Induktion.

Die Aufnahme der Gleichstrommagnetisierungskurve ist als Vergleichsbasis für verschiedene Blechsarten von Bedeutung. Für die rechnerische Ermittlung des Leerlaufstromes eignet sich diese Kurve nicht, die Umrechnung auf Effektivwerte wird bei

hoher Sättigung wegen der Verzerrung der Kurvenform des Stromes ganz ungenau. Die Praxis rechnet tatsächlich mit Wechselstrom-Magnetisierungskurven, bzw. mit Voltampèreverbrauchs-Kurven. Der Verfasser hat auf die Eigenart dieser Kurven in Abhängigkeit von der Sättigung bereits hingewiesen<sup>1)</sup>. Die Wichtigkeit der verbesserten Magnetisierungskurve ist nicht aus dem Zuwachs der Induktion bei einer bestimmten AW-Zahl/cm zu ermessen, sondern aus der dabei eintretenden Verminderung des Voltampèreverbrauches.

Man kann dieses Verhalten auch aus der Gleichstrommagnetisierungskurve ableiten, indem aus dieser die Wechselstromkurve unter Zuhilfenahme eines sinusförmigen Flusses graphisch ermittelt wird.

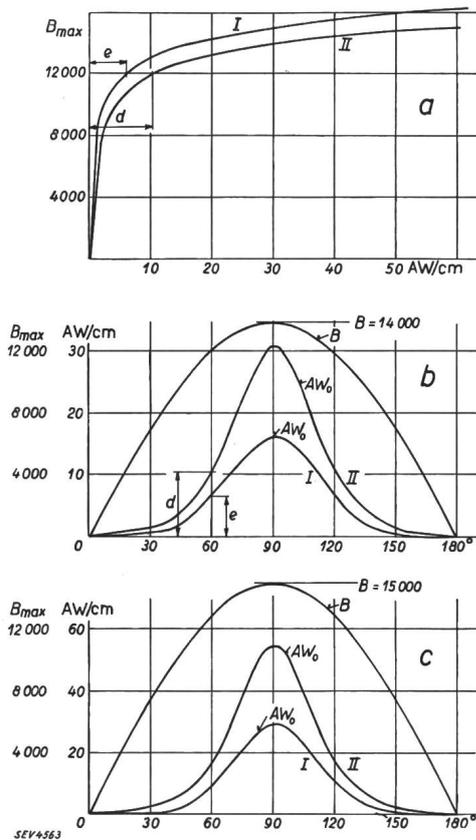


Fig. 3.

Magnetisierungs- und Stromkurven von zwei Materialien (I und II).

Fig. 3a: Gleichstrommagnetisierungskurven.

Fig. 3b: Stromkurven für 14 000 Linien.

Fig. 3c: Stromkurven für 15 000 Linien.

In Fig. 3 a sind nach der ballistischen Methode aufgenommene Magnetisierungskurven zweier Materialien dargestellt. In Fig. 3 b und c sind für  $B_{max} = 14\,000$  Linien und für  $B_{max} = 15\,000$  Linien die den beiden Magnetisierungskurven I und II entsprechenden Stromkurven durch das «Punktverfahren» ermittelt. So entsprechen dem Induktionswert 12 000 aus den Kurven I und II (Fig. 3 a) die AW-Werte d und e, die in Fig. 3 b als Ordinaten der Stromkurven I und II eingetragen sind. Es können auf diese Weise die den verschiedenen Induktions-

werten entsprechenden Werte der AW- (bzw. Strom-) Kurven gefunden werden. Das Absinken der Stromwerte bei der verbesserten Magnetisierungskurve I ist durch obige Darstellung deutlich zum Ausdruck gebracht. Man erkennt auch, dass die höheren Stromharmonischen in der Kurve I einen geringeren Anteil bilden, als dies bei der Kurve II der Fall ist. So beträgt die fünfte Harmonische für die Stromkurve I 15 % der Grundharmonischen, während sie für die Stromkurve II 22 % ergibt. Eine zahlenmäßige Abschätzung der beiden Fälle zeigt, dass eine ca. 10 %ige Verbesserung der Induktionswerte eine ca. 50 %ige Verbesserung des Magnetisierungsstromes zur Folge haben kann. Die Vernachlässigung der Hysterisisverluste, die in der Kurvenbetrachtung stillschweigend gemacht wurde, indem die statische Magnetisierungskurve mit der jungfräulichen Kurve identifiziert wurde, ist für unsere Betrachtung unwesentlich.

Die Abhängigkeit der zulässigen Sättigung von den magnetischen Charakteristiken des Kernmaterials ist vom Standpunkt des Leerlaufstromes noch mehr zu betonen, als dies bei der Betrachtung der Verluste geschehen ist. Auch hier ist zu sagen, dass für die Wahl einer Blechsorte die Verbesserung des Bestehenden massgebend sein muss.

Irrtümlich ist die Auffassung, die in Verbraucherkreisen noch anzutreffen ist, man entgehe jeder Gefahr in bezug auf hohe Leerlaufströme und beträchtliche höhere Harmonische, wenn man den Wert B dem Hersteller des Transformators vorschreibe. Dass dies praktisch keinen Sinn hat, folgt ohne weiteres aus der Vergleichsbetrachtung der beiden Magnetisierungskurven in Fig. 3.

Zum Schluss noch einige Bemerkungen zur Aufnahme der Wechselstrommagnetisierungskurven. Es muss zugegeben werden, dass ihre Aufnahme im Gebiet hoher Sättigung Schwierigkeiten verursacht, besonders wenn die Stromquelle nicht genügend gross ist. Die Kurve ist nur dann eindeutig, wenn bei ihrer Aufnahme der Fluss, bzw. die Spannungskurve sinusförmig bleibt. Nur unter dieser Voraussetzung sind auch die höheren Harmonischen eindeutig bestimmt. Eine einwandfreie Aufnahme der Wechselstrommagnetisierungskurve setzt also die Benutzung eines Generators, dessen Spannungskurve auch bei einphasiger Belastung sinusförmig bleibt, voraus.

Die Magnetisierungsblindleistung in Voltampère errechnet man sich aus dieser Wechselstrommagnetisierungskurve bei 50 Per./s. nach der bekannten Beziehung

$$VA/kg = 222 \cdot B \cdot H \cdot \frac{1}{\gamma} \cdot 10^{-5}$$

wobei  $\alpha$  das spezifische Gewicht der Bleche,

B den Maximalwert der Induktion,

H die Feldstärke in AW/cm effektiv

bedeuten.

Zu diesem Wert ist je nach der Kernart ein Zuschlag zu machen, der allein auf Grund praktischer Erfahrungen ermittelt werden kann.

<sup>1)</sup> Bull. SEV 1934, Nr. 22, S. 583.