

# Der Wechselstrom-Transformator in der elektrischen Traktion

Autor(en): **Kummer, W.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **69/70 (1917)**

Heft 10

PDF erstellt am: **12.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-33843>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

INHALT: Der Wechselstrom-Transformator in der elektrischen Traktion. — Berner Schulhausbau-Fragen. — Die Verwendung der elektrischen Energie für Kochzwecke. — Miscellanea Kunstmuseum Basel. Elektrisches Schweißen von Gusstücken. Direktion der Elektrizitätswerke und Wasserversorgung Bellinzona. Simplon-Tunnel II. Donau-Main-Kanal. Ein Vorschlag zu einem neuen Talsperren-System. Scheinwerfer von Sperry. Die Kosten für das Anhalten und Wiederauffahren von Eisenbahn-

zügen. Bewässerungsanlage im Okanogan-Tal. — Nekrologie: Fritz Frey. — Konkurrenzen: Primarschulhaus Ergaten in Frauenfeld. — Literatur: Handbuch der Holzkonservierung. Jahrbuch der Technischen Zeitschriften-Literatur. Literar. Neuigkeiten. — Vereinsnachrichten: Bernischer Ingenieur- und Architekten-Verein. Zürcher Ingenieur- und Architekten-Verein. Gesellschaft ehemaliger Studierender der Eidgen. Technischen Hochschule: Stellenvermittlung.

Band 69.

Nachdruck von Text oder Abbildungen ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit genauer Quellenangabe gestattet.

Nr. 10.

## Der Wechselstrom-Transformator in der elektrischen Traktion.

Von Professor Dr. W. Kummer, Ingenieur, Zürich.

Beim elektrischen Vollbahnbetrieb mittels Einphasen-Wechselstroms bildet die dreimalige Spannungstransformation zwischen den Kraftwerksgeneratoren und den Fahrzeugmotoren die Regel. Der Wechselstromtransformator hat damit für den elektrischen Bahnbetrieb eine Bedeutung erlangt, die er zuvor nicht besessen hatte. Denn bei Gleichstrombahnen und Drehstrombahnen findet eine Spannungstransformation im allgemeinen nur im Dienste der Arbeitsübertragung zwischen Kraftwerken und Unterwerken Anwendung, die sehr oft nur eine einmalige, gelegentlich auch eine zweimalige ist. Die Drehstrom-Anlage der Simplonbahn macht übrigens überhaupt keinen eigentlichen Gebrauch der Spannungstransformation, während anderseits die „Great Northern Railway“ in Nordamerika den Ausnahmefall der dreimaligen Spannungstransformation bei Drehstrombetrieb verwirklicht.

Jede dreimalige Spannungstransformation in einer elektrischen Bahn-Anlage sollte indessen im Hinblick auf den Leistungsfaktor der Anlage hinsichtlich des benötigten Magnetisierungsstroms (Leerlaufstroms) der Transformatoren ebenso streng geprüft werden, als es im Hinblick auf den Wirkungsgrad der Anlage hinsichtlich der Verluste in den Transformatoren gewöhnlich zu geschehen pflegt. Im weitern findet bei elektrischen Bahnen mit dreimaliger Spannungstransformation die letzte dieser Transformierungen auf den Fahrzeugen statt, wo die benutzten Transformatoren durch ihre Raum- und Gewichtsansprüche noch besonders in Betracht fallen. Für die elektrische Traktion mittels Einphasenwechselstroms sind deshalb neben den mit dem Wirkungsgrad zusammenhängenden Grössenverhältnissen besonders auch die Verhältnisse des Leerlaufstromes der Transformatoren von Wichtigkeit. Die vorliegende Studie, zu der wir namentlich durch die verschiedenen Arbeiten über Transformatoren von M. Vidmar, Budapest<sup>1)</sup>, angeregt worden sind, hat sich deshalb vor allem mit den Verhältnissen der Grösse und des Leerlaufstromes der Transformatoren zu beschäftigen und deren Bedeutung besonders für die Einphasentraktion zu erörtern.

### 1. Die Grösse der Transformatoren.

In früheren Arbeiten haben wir uns wiederholt mit der Grösse der Bahnmotoren beschäftigt<sup>2)</sup> und diese durch charakteristische Zahlenwerte für die drei Stromarten auf Grund von Ausführungsbeispielen<sup>3)</sup> zum Ausdruck gebracht. Auch für die Grösse der Transformatoren lassen sich derartige, allgemein gültige Kennziffern aufstellen. Indessen bestehen grundsätzliche und wichtige Unterschiede zwischen den Grössenverhältnissen der Motoren und denen der Transformatoren.

Bei den Motoren ist bekanntlich als festlegendes Grössenmass anzusehen das Volumen  $V$  (das aktive Motorvolumen) des aus dem Ankerdurchmesser als Durchmesser und der Ankereisenbreite als Höhe gebildeten Zylinders,

<sup>1)</sup> In den Jahrgängen 1913, 1914 und 1915 der Wiener Zeitschrift «Elektrotechnik und Maschinenbau» und in Heft 30 der «Sammlung Vieweg». Neben diesen Veröffentlichungen ist auch die Kritik zu beachten, die an ihnen durch Zelewsky («Elektrotechnik und Maschinenbau» 1916, S. 266) und durch Korndörfer («E. T. Z.» 1916, S. 224 und 691) geübt wurde.

<sup>2)</sup> Vergl. besonders «Schweiz. Bauzeitung», Bd. LII, S. 288 bis 294 (28. Nov. 1908) und Bd. LIII, S. 308 bis 312 (12. Juni 1901).

<sup>3)</sup> «Schweiz. Bauzeitung», Bd. LII, S. 293 (28. Nov. 1908); Bd. LXVI, S. 150 (25. Sept. 1915) und S. 240 bis 241 (20. Nov. 1915).

das dem vom Motor umgesetzten Drehmomente  $D$  gemäss der Beziehung:

$$V = C \cdot D$$

einfach proportional ist, insoweit als die sog. „Maschinenkonstante“  $C$  als wirklich konstant angesehen werden kann, was für eine gegebene Stromart und Bauart und von einer gewissen Motorgrösse an praktisch zulässig ist. Durch:

$$C = \frac{V}{D} = V_1$$

wird somit ein Motoren-Einheitsvolumen, das in  $\text{cm}^3/\text{mkg}$  ausgedrückt erscheint, festgelegt, und welches von der Motorgrösse selbst, bezw. vom normalen Drehmomente eines Motors, unabhängig ist.

Bei den Transformatoren liegen die Grössenverhältnisse wesentlich anders. Einmal ist das festlegende Volumen  $V$  (das aktive Transformatorvolumen) mit der rein elektrischen Grösse der umgesetzten Volt  $\times$  Ampère im Zusammenhang; im weitern ist dieser Zusammenhang keineswegs durch einfache Proportionalität gekennzeichnet, derart, dass die einzuführende „Transformatorkonstante“  $C$  ein wesentlich verschiedener Begriff neben dem Begriffe  $V_1$  des Transformatoren-Einheitsvolumens wird, das natürlich durch den Quotienten  $\text{cm}^3/\text{VA}$  zu definieren ist. Es sind diesbezüglich die folgenden Beziehungen zu berücksichtigen:

Die in einer Transformator-Wicklung induzierte elektromotorische Kraft  $E$ , in effektiven Volt gemessen, ergibt sich zu

$$E = 4,44 \cdot \nu \cdot N \cdot B \cdot F_{ei} \cdot 10^{-8}$$

wenn man mit  $\nu$  die Periodenzahl der Stromquelle, mit  $N$  die Windungszahl der betrachteten Wicklung und mit  $B$  den Maximalwert der sinusförmig veränderlichen magnetischen Induktion im massgebenden Eisenquerschnitt  $F_{ei}$  bezeichnet. Erlaubt die Wicklung die Aufnahme der normalen Stromstärke  $I$ , so wird die in Volt  $\times$  Ampère gemessene

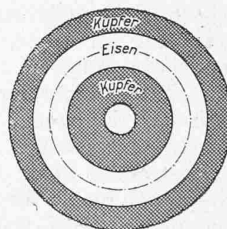


Abb. 1.

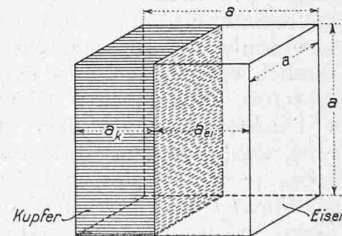


Abb. 2.

scheinbare Leistung (Scheinleistung) umgesetzt von:

$$E \cdot I = 4,44 \cdot \nu \cdot N \cdot B \cdot F_{ei} \cdot I \cdot 10^{-8}$$

die für Einphasen-Transformatoren die ganze Scheinleistung, für Mehrphasen-Transformatoren die Scheinleistung pro Phase darstellt. Indem man mit  $s$  die Stromdichte und mit  $q$  den Querschnitt einer Wicklung einführt, folgt:

$$I = s \cdot q$$

Die primäre und die sekundäre Wicklung zusammen ergeben den Gesamtquerschnitt:

$$F_k = 2 \cdot q \cdot N$$

Für eine Transformatoren-Typenreihe, für eine bestimmte Periodenzahl  $\nu$  und für gleichbleibende magnetische und elektrische Beanspruchungen  $B$  und  $s$  gilt dann für die umgesetzte Scheinleistung die Beziehung:

$$E \cdot I = K_1 \cdot F_{ei} \cdot F_k$$

wobei  $K_1$  eine Konstante bedeutet. Es ist  $F_{ei}$  die Querschnittsfläche eines Kreisringes, den wir uns, gemäss Abbildung 1, der Einfachheit halber vollständig mit zwei Wicklungen vom Gesamtquerschnitt  $F_k$  gleichmässig bewickelt denken können;  $F_{ei}$  und  $F_k$  liegen dann in Ebenen, die aufeinander senkrecht stehen, und von denen die zweite in der Bildebene der Abb. 1 liegt. Nun denken wir uns den

Eisenring geradegestreckt und in ein Prisma von rechteckigem Querschnitt  $a \cdot a_{ei}$  und von der Höhe  $a$  verwandelt und gleichzeitig den umhüllenden Kupfermantel ebenfalls auf ein Prisma gebracht, das mit dem vorherigen vereint den Würfel  $a^3$  ergibt, wie aus Abbildung 2 zu ersehen ist. Dieser Würfel vom Gesamtvolumen

$$V = a^3$$

setzt sich aus dem aktiven Eisenvolumen  $V_{ei}$  und dem aktiven Kupfervolumen  $V_k$  zusammen, wobei:

$$V_{ei} = a_{ei} \cdot a^2; \quad V_k = a_k \cdot a^2$$

Unsere Flächen  $F_{ei}$  und  $F_k$  sind bei dieser Umwandlung verändert worden zu:

$$F_{ei} = K_2 \cdot a \cdot a_{ei}; \quad F_k = K_3 \cdot a \cdot a_k$$

sodass geschrieben werden darf:

$$E \cdot I = K_4 \cdot a \cdot a_{ei} \cdot a \cdot a_k = K_4 \cdot a^4 \cdot \frac{a_{ei}}{a} \cdot \frac{a_k}{a}$$

wenn mit  $K_2, K_3$  und  $K_4$  neue Konstanten eingeführt werden.

Die Längenverhältnisse  $\frac{a_{ei}}{a}$  und  $\frac{a_k}{a}$  sind nun durch Volumen-Verhältnisse ersetzbar, gemäss:

$$\frac{a_{ei}}{a} = \frac{V_{ei}}{V} = v'; \quad \frac{a_k}{a} = \frac{V_k}{V} = v''$$

Infolge noch zu erörternder Beziehungen kann gesetzt werden:

$$v' \cdot v'' = K_5$$

wobei  $K_5$  ebenfalls eine Konstante bedeutet. Es folgt:

$$E \cdot I = K_4 \cdot K_5 \cdot a^4 = K_4 \cdot K_5 \cdot V^{4/3}$$

wofür auch gesetzt werden darf:

$$V = C \cdot (E \cdot I)^{3/4} \quad (1)$$

indem nun die Transformatorkonstante  $C$  zur Einführung gelangt. Durch Bezugnahme auf die Einheit der Scheinleistung erhalten wir das Transformator-Einheitsvolumen  $V_1$  gemäss:

$$V_1 = \frac{V}{E \cdot I} = C \cdot \frac{(E \cdot I)^{3/4}}{(E \cdot I)}$$

was auch in der Form:

$$V_1 = \frac{C}{\sqrt{E \cdot I}} \quad (2)$$

geschrieben werden darf. Damit haben wir die bemerkenswerte Tatsache abgeleitet, dass das aktive Transformator-Volumen pro Einheit der Scheinleistung mit wachsender Transformatorleistung, d. h. mit wachsender Transformatorgrösse abnimmt. Diese Grössenbeziehung ist in der Tat wesentlich verschieden von derjenigen der Motoren. Sie führt sofort auch zu einer wichtigen Schlussfolgerung für den Transformator auf dem elektrischen Fahrzeug, der nämlich das Fahrzeug verhältnismässig umso weniger beschwert, je grösser dessen Leistung bemessen wird. Der Transformator auf Lokomotiven erscheint damit als geringerer Ballast, als der Transformator auf Motorwagen, angesichts der üblichen Leistungsverhältnisse bei Lokomotiven und Motorwagen. Man kann auch sagen, dass eben damit die Vorzüge der Spannungstransformation auf den Fahrzeugen des Einphasensystems erst beim Lokomotivbetrieb voll zur Geltung kommen.

Das Transformator-Einheitsvolumen  $V_1$  ist in  $cm^3/kVA$  oder auch in  $dm^3/kVA$  anzugeben. Wir wählen die zweite Form, die für die Transformatorkonstante  $C$  die angenehmeren Zahlenwerte ergibt. Die Grösse  $C$ , welcher die bestimmenden Beanspruchungs-Werte  $B$  und  $s$  umgekehrt proportional sind, richtet sich vornehmlich nach der Methode, mittels welcher der belastete Transformator gekühlt wird. Auf Fahrzeugen kommen nur mehr Trocken-Transformatoren mit Gebläse-Kühlung und Oel-Transformatoren mit natürlicher Kühlung in Betracht. Die ausserordentlich spärlichen Angaben über benutzte Transformatoren, die sich in den Beschreibungen ausgeführter elektrischer Bahnanlagen vorfinden, scheinen zu ergeben, dass  $C$  für Trocken-Transformatoren mit Gebläse-Kühlung und für Oeltransformatoren mit natürlicher Kühlung ungefähr denselben Wert haben dürfte. Für Einphasen-Bahnen mit 15 bis 16 Perioden scheint uns auf Grund der Stundenleistung der Wert:  $C = 3,5$

bei Benutzung der Einheiten  $dm^3$  und  $kVA$  zutreffend.

Mit Hilfe dieses Wertes erhalten wir den in Abbildung 3 dargestellten Verlauf von  $V_1$  über der Transformator-Scheinleistung; die Abbildung bedarf nach dem oben Gesagten keines weiteren Kommentars.

In Unterwerken und Kraftwerken wird auch der Oel-Transformator mit Wasserkühlung oder mit Kühlung durch Oelzirkulation angewendet, wobei die Konstante  $C$  etwa 20 bis 30% günstiger, d. h. kleiner, ausfallen kann, als für natürliche Oelkühlung.

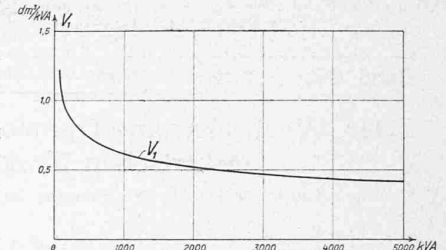


Abb. 3.

Verschiedene Typenreihen von Transformatoren ergeben über der  $kVA$ -Leistung ihrer einzelnen Typen ähnlich verlaufende Kurven  $V_1$ , im Sinne unserer Abbildung 3. Je tiefer diese Kurven liegen, umso günstiger, d. h. kleiner fallen die einzelnen Typen aus, bzw. umso günstiger ist die gemeinsame Konstante  $C$  der Typenreihe. Dazu bedarf es aber grösserer Beanspruchungen  $B$  und  $s$ , d. h. grösserer Arbeitsverluste in den Transformatoren. In unserer Formel:

$$E \cdot I = K_4 \cdot K_5 \cdot V^{4/3}$$

sind diese Beanspruchungen in der Konstante  $K_4$  enthalten. Betrachten wir nicht mehr die ganze Typenreihe, sondern nur noch einen bestimmten Transformator-Typ, dann kann man sagen, sein Einheitsvolumen  $V_1$  falle umso kleiner aus, je grösser die auf die umgesetzte Scheinleistung bezogenen und in Prozenten dieser Scheinleistung ausgedrückten Arbeitsverluste  $w$  bemessen werden können. Die Verlustvergrösserung  $dw$  bewirkt dann eine ihr proportionale Volumenverkleinerung  $dV_1$ , sodass bei Einführung der Konstanten  $k$  geschrieben werden darf:

$$-dV_1 = k \cdot dw$$

In graphischer Darstellung, wie sie in Abbildung 4 veranschaulicht ist, führt dies auf die von Vidmar eingeführte „Fortschrittgerade“<sup>1)</sup>, die durch den Neigungswinkel  $\alpha$  gegenüber dem positiven Teil der Abszissenaxe gekennzeichnet ist, für den:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{dV_1}{dw} = -k$$

gilt. Das obere, auf der Ordinatenaxe liegende Ende dieser „Fortschrittgeraden“ führt auf den idealen und verlustlosen Transformator, während ihr unteres, auf der Abszissenaxe liegendes Ende auf den idealen und volumenlosen Transformator der zu Grunde gelegten Scheinleistung führt. Dem volumenlosen Transformator entspricht der höchstmögliche prozentuale Verlust  $w_{\max}$ , den man aus einem bekannten Wertepaar:

$$V_1 = V_1'; \quad w = w'$$

durch die Beziehung:

$$w_{\max} = \frac{V_1' + k \cdot w'}{k}$$

erhalten kann.

Nehmen wir beispielsweise an, es könnte für einen kleineren, für 15 Perioden bestimmten Einphasen-Transformator durch einen Verlustzuwachs von  $dw = 1,0\%$  eine Volumenverkleinerung von  $-dV_1 = 0,4 \text{ dm}^3/kVA$  bewirkt werden, derart, dass:

$$k = \frac{-dV_1}{dw} = \frac{0,4}{1,0} = 0,4$$

wird, während andererseits der betreffende Transformator-Typ normal für das Wertepaar:

$$V_1' = 1,05 \text{ dm}^3/kVA; \quad w' = 3\%$$

vorhanden sei. Es ergibt sich dann:

$$w_{\max} = \frac{1,05 + 0,4 \cdot 3}{0,4} = 5,625\%$$

<sup>1)</sup> Die in abweichender Form gegebene Darstellung von Vidmar findet sich Seite 13 bis 16 von Heft 30 der «Sammlung Vieweg».

Da der betreffende Transformator bei einem solchen Verlust bereits volumenlos sein würde, so muss er also in Wirklichkeit einen Wirkungsgrad von mindestens 94,4% aufweisen. Es ergibt sich ohne weiteres, dass die Möglichkeit der Volumenverkleinerung eines Transformatortyps auf Grund der Verlustvergrößerung in recht enge Grenzen eingezwängt ist. Man kann daraus auch schliessen, dass für einen Transformator, der im Hinblick auf geringste Raum- und Gewichtsansprüche gebaut werden soll, die prozentualen Gesamtverluste als gegeben betrachtet werden müssen. Dabei scheint die Aufteilung der Gesamtverluste in Verluste, die im Eisen auftreten, und in solche, die im Kupfer entstehen, zunächst noch der freien Verfügung des Konstrukteurs anheimgestellt zu sein. Wie wir gleich sehen werden, muss aber besonders bei Bahn-Transformatoren, im Hinblick auf den Magnetisierungsstrom, bzw. den Leistungsfaktor, dieses Verfügungsrecht wesentlich eingeschränkt werden.

2. Der Magnetisierungsstrom der Transformatoren.

Der magnetische Kraftfluss  $B \cdot F_{ei}$ , den wir bereits in der Beziehung für die in einer Transformatorwicklung mit  $N$  Windung induzierte EMK kennen lernten, lässt sich auf Grund des magnetischen Analogiegesetzes zum bekannten Gesetze von Ohm durch den Magnetisierungsstrom  $I_m$  und den sogen. magnetischen Widerstand:

$$\Sigma \left( l \cdot \frac{1}{\mu \cdot F} \right)$$

ausdrücken, wobei mit  $l$  die Längen, mit  $F$  die Querschnitte und mit  $\mu$  die magnetischen Permeabilitäten der verschiedenen Teilstücke des in Betracht fallenden magnetischen Kreises bezeichnet sind. Damit  $B$  wiederum als Maximalwert der magnetischen Induktion,  $I_m$  dagegen in effektiven Ampère eingesetzt werden könne, lautet die Beziehung zahlenmässig:

$$B \cdot F_{ei} = \frac{0,4 \cdot \pi \cdot N \cdot I_m \cdot \sqrt{2}}{\Sigma \left( l \cdot \frac{1}{\mu \cdot F} \right)}$$

Durch Einführung eines Längenkoeffizienten  $\lambda$  und eines Querschnittskoeffizienten  $a$  formen wir den magnetischen Widerstand um, wie folgt:

$$\Sigma \left( l \cdot \frac{1}{\mu \cdot F} \right) = \frac{l_{ei}}{F_{ei}} \cdot \Sigma \left( \lambda \cdot \frac{1}{\mu \cdot a} \right)$$

indem wir die Länge  $l_{ei}$  und die Fläche  $F_{ei}$  des Eisenkörpers vom Volumen  $V_{ei} = F_{ei} \cdot l_{ei}$  aus der Summengrösse herausnehmen. Durch:

$$i_m = \frac{I_m}{I} \cdot 100$$

werde der verhältnismässige Magnetisierungsstrom, ausgedrückt in Prozenten des normalen Belastungsstromes  $I$ , eingeführt. Es folgt dann:

$$\frac{i_m}{100} = \frac{I_m}{I} = \frac{B \cdot l_{ei} \cdot \Sigma \left( \lambda \cdot \frac{1}{\mu \cdot a} \right)}{0,4 \cdot \pi \cdot N \cdot I \cdot \sqrt{2}}$$

und hieraus:

$$\frac{B \cdot l_{ei}}{I \cdot N} = i_m \cdot \frac{0,4 \cdot \pi \cdot \sqrt{2}}{100 \cdot \Sigma \left( \lambda \cdot \frac{1}{\mu \cdot a} \right)}$$

Andererseits schreiben wir für die Scheinaufnahme bei normaler Belastung wiederum den Ausdruck:

$$E \cdot I = 4,44 \cdot \nu \cdot N \cdot B \cdot F_{ei} \cdot I \cdot 10^{-8}$$

Endlich gilt für die im Eisen auftretenden, in Watt anzugehenden Eisenverluste:

$$W_{ei} = K_6 \cdot \left( \frac{B}{10^4} \right)^2 \cdot \nu^{1,3} \cdot F_{ei} \cdot l_{ei}$$

wobei die Grösse  $K_6$  für die bei praktischen Ausführungen in Betracht fallenden Induktionen  $B$  als konstant gelten darf. Durch:

$$w_{ei} = \frac{W_{ei}}{E \cdot I} \cdot 100$$

sollen die verhältnismässigen Eisenverluste, ausgedrückt in Prozenten der normal umgesetzten Scheinleistung, eingeführt werden. Dann folgt:

$$\frac{w_{ei}}{100} = \frac{W_{ei}}{E \cdot I} = \frac{K_6 \cdot B^2 \cdot \nu^{1,3} \cdot F_{ei} \cdot l_{ei} \cdot 10^{-8}}{4,44 \cdot \nu \cdot N \cdot B \cdot F_{ei} \cdot I \cdot 10^{-8}}$$

Hieraus bilden wir:

$$\frac{B \cdot l_{ei}}{I \cdot N} = w_{ei} \cdot \frac{4,44}{100 \cdot K_6 \cdot \nu^{0,3}}$$

Die Gleichsetzung der rechten Seite dieses Ausdrucks mit dem früher für dessen linke Seite gefundenen Werte liefert:

$$i_m \cdot \frac{0,4 \cdot \pi \cdot \sqrt{2}}{100 \cdot \Sigma \left( \lambda \cdot \frac{1}{\mu \cdot a} \right)} = w_{ei} \cdot \frac{4,44}{100 \cdot K_6 \cdot \nu^{0,3}}$$

Oder also:

$$i_m = \frac{4,44 \cdot \Sigma \left( \lambda \cdot \frac{1}{\mu \cdot a} \right)}{0,4 \cdot \pi \cdot \sqrt{2} \cdot \nu^{0,3} \cdot K_6} \cdot w_{ei}$$

Für eine gegebene, und zu einer bestimmten Periodenzahl gehörige Typenreihe kann geschrieben werden:

$$i_m = c_m \cdot w_{ei} \quad (3)$$

wo  $c_m$  einen näherungsweise konstanten Koeffizienten des Magnetisierungsstromes bedeutet. Damit haben wir die bemerkenswerte, zuerst von Vidmar<sup>1)</sup> nachgewiesene Eigenschaft des Magnetisierungsstromes festgestellt, dass dessen prozentualer Wert für eine bestimmte Typenreihe den prozentualen Eisenverlusten proportional ist und weiter von der Transformatorengrösse als praktisch unabhängig erscheint.

Die genauere Betrachtung der im Ausdrucke für  $c_m$  enthaltenen Grössen zeigt jedoch, dass  $c_m$  nicht genau konstant und insbesondere nicht völlig unabhängig von der Transformatorgrösse ist. Vielmehr macht sich in der Summe  $\Sigma \left( \lambda \cdot \frac{1}{\mu \cdot a} \right)$  der Einfluss der kleinen Luftstrecke im magnetischen Kreis derart geltend, dass  $c_m$  mit wachsender normaler Scheinleistung eines Transformators den in Abbildung 5 dargestellten Verlauf aufweist. Damit erscheint aber der Magnetisierungsstrom kleinerer Transformatoren gegenüber demjenigen grösserer Transformatoren auch nach Massgabe von  $c_m$  prozentual noch erhöht. Offenbar muss damit in Anlagen mit kleinen Transformatoren die dreimalige Transformation besonders ungünstig auf den Leistungsfaktor einwirken. Die kleinsten Transformatoren wird man bei elektrischen Bahnen auf den Fahrzeugen vorfinden und zwar auf Motorwagen wiederum kleinere Transformatoren als auf Lokomotiven. Der Motorwagen-Transformator erscheint damit von neuem in einer ungünstigeren Stellung, als der Lokomotiv-Transformator; die Rücksicht auf den Magnetisierungsstrom wirkt hier somit im selben Sinne, wie die Rücksicht auf die Raum- und Gewicht-Inanspruchnahme.

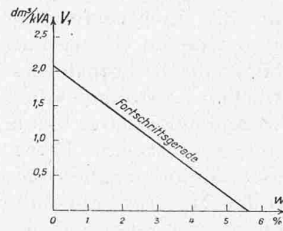


Abb. 4.

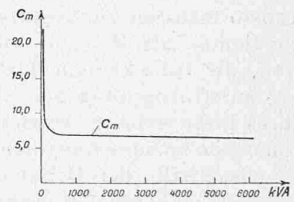


Abb. 5.

Die Rücksicht auf die Forderung kleiner Magnetisierungsströme führt mit der Beziehung

$$i_m = c_m \cdot w_{ei}$$

zur Wahl der prozentualen Eisenverluste. Für eine gegebene Scheinleistung, bzw. einen in Aussicht genommenen Transformatortyp ist  $c_m$  einerseits bereits gegeben, z. B. zu 8,0, während  $i_m$  andererseits unter einem bestimmten Mass, z. B. 10%/, bleiben soll. Damit folgt:

$$w_{ei} = \frac{i_m}{c_m} \leq \frac{10\%}{8,0} \leq 1,25\%$$

Andererseits sind die prozentualen Gesamtverluste  $w$  bestimmend für das Einheitsvolumen  $V_1$  des in Aussicht genommenen Transformatortyps. Ebenso wie man definieren konnte:

$$w_{ei} = \frac{W_{ei}}{E \cdot I} \cdot 100$$

1) Elektrotechnik und Maschinenbau 1913, Seite 913 bis 917.

lässt sich  $w$  aus den in Watt anzugebenden Gesamtverlusten  $W$  definieren, gemäss:

$$w = \frac{W}{E \cdot I} \cdot 100$$

Neben den Eisenverlusten  $W_{ei}$  enthält  $W$  auch noch die im Kupfer auftretenden Verluste  $W_k$ , für die

$$W_k = K_7 \cdot s^2 \cdot V_k$$

gesetzt werden darf, wenn ausser der Konstanten  $K_7$  die Stromdichte  $s$  und das Kupfervolumen  $V_k$  zum Ausdruck gebracht werden. Es kann natürlich auch gesetzt werden:

$$w_k = \frac{W_k}{E \cdot I} \cdot 100$$

Weil:  $W = W_{ei} + W_k$

folgt auch:  $w = w_{ei} + w_k$

Da alle diese Verlustgrössen für einen bestimmten Transformatortyp einerseits durch die Rücksicht auf den Magnetisierungsstrom und andererseits durch die Rücksicht auf das Einheitsvolumen  $V_1$  als gegeben zu betrachten sind, so gilt dies auch für die früher eingeführten Volumengrössen:

$$V = V_{ei} + V_k$$

sowie für:

$$\frac{V_{ei}}{V} = v'; \quad \frac{V_k}{V} = v''$$

weil für eine bestimmte Periodenzahl und bei gleichbleibenden Beanspruchungen  $B$  und  $s$  die durch die Konstante  $K_8$  gegebene Beziehung:

$$\frac{W_{ei}}{W_k} = K_8 \cdot \frac{V_{ei}}{V_k}$$

als zutreffend und zwar nicht nur für einen bestimmten Transformatortyp, sondern für eine vollständige Typenreihe, angesehen werden darf. Damit wird dann auch die eingangs benützte Beziehung:

$$v' \cdot v = K_5$$

als zutreffend hingestellt und wird auch erst damit die Grundgleichung (1) als richtig bewiesen.

Wir erkennen damit auch, dass diese Grundgleichung betr. die Grössenverhältnisse einer vollständigen Typenreihe tatsächlich nur beim Vorhandensein einer festen Verlusteinteilung für die ganze Typenreihe richtig bleibt, wozu weiter noch die Voraussetzung konstanter Beanspruchungen  $B$  und  $s$  kommt; nur so lange, als diese zwei Bedingungen eingehalten werden, ist die „Transformatorkonstante“  $C$  wirklich eine Konstante.

Eine feste Verlusteinteilung wurde für Transformatoren im Dienste der allgemeinen Licht- und Kraftversorgung seit langem empfohlen, wobei für die Lichtversorgung Transformatoren zu benützen seien, bei denen  $W_{ei}$  wesentlich kleiner als  $W_k$  sein müsse, damit diese Transformatoren, die trotz kleinen durchschnittlichen Leistungen einen konstanten Anschluss ans Netz aufweisen, möglichst kleine Jahres-Eisenverluste bewirken. Andererseits seien Transformatoren im ausschliesslichen Dienste des Motorenbetriebs, die ausserhalb der Benutzungszeit der Motoren ebenfalls vom Netz abgeschaltet werden können, mit einer solchen Verlusteinteilung auszuführen, dass  $W_{ei}$  und  $W_k$  ungefähr gleich grosse Beträge aufweisen; damit werde erreicht, dass das Maximum des Transformatorwirkungsgrades gerade bei Normalbelastung eintrete.

Die Anwendung dieser Grundsätze der Verlusteinteilung auf Vollbahnen mit 24-stündigem Betrieb der Kraftwerke und Unterwerke musste dazu führen, den Transformatoren der Kraftwerke und Unterwerke die Verlusteinteilung der empfohlenen „Lichttransformatoren“ zuzuweisen, die Transformatoren der Lokomotiven und allfälligen Motorwagen dagegen für ungefähre Gleichheit der Verluste  $W_{ei}$  und  $W_k$  auszubilden. Die Verlusteinteilung der „Lichttransformatoren“ ist nun geeignet, ebenfalls auf einen kleinen Magnetisierungsstrom zu führen, während die völlige oder annähernde Gleichheit der Verluste  $W_{ei}$  und  $W_k$  grössere und meistens geradezu unzulässige Werte des Magnetisierungsstroms bewirkt. Verschlimmernd wirkt dabei, dass auf den Fahrzeugen, für welche diese ungünstigen Verhältnisse eintreten würden, zudem meist kleinere Trans-

formatortypen in Frage kommen, als für Kraftwerke und Unterwerke. Es ist deshalb für elektrische Bahnen einheitlich die Verlusteinteilung der Lichttransformatoren zu bevorzugen, da sie geeignet ist, allseitig die wichtigsten Anforderungen zu befriedigen.

Die Verlusteinteilung ist übrigens auch vom Standpunkt der besten Abfuhr der im Eisen und im Kupfer durch die Verluste entstehenden Wärmemengen in Beurteilung zu ziehen. Eine derartige Prüfung ergibt ebenfalls den Vorzug für die Wahl des kleineren Anteils der Eisenverluste  $W_{ei}$  in den Gesamtverlusten  $W$ , d. h. wiederum die Verlusteinteilung der Lichttransformatoren, die damit von neuem als besonders günstig erscheint. Für besonders intensiv gekühlte Einphasen-Transformatoren grösserer Leistungen mit Eisenkörpern aus bestem legiertem Blech gibt die folgende Zusammenstellung einen zahlenmässigen Aufschluss über die heute schon vorkommende bezügliche Verlusteinteilung:

| Transformator-Leistung in kVA | Verluste $w_{ei}$ in % | Verluste $w_k$ in % | Verlustverhältnis $\frac{w_{ei}}{w_k}$ |
|-------------------------------|------------------------|---------------------|--|
| 1000                          | 0,60                   | 1,5                 | 0,40                                   |
| 2000                          | 0,56                   | 1,4                 | 0,40                                   |
| 3000                          | 0,52                   | 1,3                 | 0,40                                   |
| 4000                          | 0,48                   | 1,2                 | 0,40                                   |
| 5000                          | 0,44                   | 1,1                 | 0,40                                   |

Damit diese vorteilhafte, bislang vorwiegend aus Rücksichten der Wärmeabfuhr getroffene Verlusteinteilung vollends günstig auf den Magnetisierungsstrom einwirke, darf nicht etwa aus dem kleineren Werte  $w_{ei}$  ein grösserer Wert  $c_m$  resultieren, was bei etwelcher Aufmerksamkeit des Konstrukteurs ohne grössere Schwierigkeit vermieden werden kann. Besonders unter dieser Voraussetzung ist eben die Verlusteinteilung der Lichttransformatoren für Traktionszwecke zu begrüssen.

Die Bedeutung strenger Anforderungen an den Leistungsfaktor der Bahnmotoren ist wohl schon allgemein anerkannt; dagegen dürfte bis dahin der Einfluss des Magnetisierungsstroms der Transformatoren meist unterschätzt worden sein, obschon er ebenfalls zum Entstehen der massgebenden Phasenverschiebung am Speisepunkt einer Bahnanlage beiträgt. In seiner Arbeit: „Die massgebenden Gesichtspunkte bei der Systemwahl der elektr. Zugförderung“<sup>1)</sup> hat der Verfasser den Einfluss dieser Phasenverschiebung auf die den Abstand der Fahrleistungs-Speisepunkte festlegende Systemkonstante dargelegt; an dem Ergebnis, dass für gleiche Fahrspannung sich Gleichstrom gegenüber Wechselstrom 1,6 mal günstiger verhält, hat die Phasenverschiebung bei Wechselstrom (sowohl bei Einphasen- als auch bei Drehstrom) einen Hauptanteil. Den Bestrebungen von Vidmar, die „Leerlaufstromfrage“ der Transformatoren gründlicher als bisher in Würdigung zu ziehen, pflichten wir gerade deshalb vom Standpunkt der elektrischen Traktion aus auf das Nachdrücklichste bei.

### 3. Schlussbetrachtungen und Bemerkungen.

Wir empfinden das Fehlen genauerer Angaben über die Erwärmungsverhältnisse von Bahn-Transformatoren, mittels welcher an Hand von genügend zahlreichen Angaben über verschiedene ausgeführte Typen und Typenreihen allein sicher zutreffende Angaben über die „Transformator-Konstante“  $C$  gemacht werden können. In den bisher in der Literatur erschienenen Beschreibungen von Fahrzeugen, Unterwerken und Kraftwerken von Bahnanlagen sind nämlich sozusagen gar keine technischen Zahlenwerte über die benutzten Transformatoren zu finden. Sogar die Mitteilung der Transformatorgewichte ist eine wahre Seltenheit. Im Interesse der Förderung der Ausbildung der Bahntransformatoren ist dringend zu wünschen, dass sowohl die Bahnverwaltungen, als auch die Konstruktionsfirmen

<sup>1)</sup> Schweizerische Bauzeitung, Seite 281 bis 285 von Band LXVI (11. Dezember 1915).

in Zukunft über die verwendeten Transformatoren zweckdienliche Zahlenangaben machen, wie es zum grossen Nutzen der Entwicklung der elektrischen Traktion seit Jahren bei den Bahnmotoren geschieht. Als wünschenswerte Angaben über Bahntransformatoren nennen wir besonders die Eisen- und Kupfergewichte, das Verhältnis der Stundenleistung zur Dauerleistung, den Magnetisierungsstrom und die Eisen- und Kupferverluste.

Die Bedeutung dieser Angaben dürfte aus dem oben Gesagten ohne weiteres hervorgehen, wobei übrigens durch diese Angaben noch keinerlei eigentliche Konstruktionsgeheimnisse preisgegeben werden, sodass die Konstrukteure keine triftigen Gründe vorbringen können, um diese Angaben zu verweigern. Uns interessiert im Besonderen auch, ob unsere oben gemachte Voraussetzung einer identischen Transformator konstanten  $C$  für Trocken-Transformatoren mit Gebläsekühlung und für Öltransformatoren mit natürlicher Kühlung in genügend weitem Umfange richtig ist. Sollte das der Fall sein, dann würde der Mehrpreis und das Oelgewicht der Öltransformatoren sich nur durch erhöhte Spannungssicherheit bezahlt zu machen haben, wobei die Anwendung auf Fahrzeuge natürlich in erster Linie in Betracht fällt.

Wenn unser Aufsatz bewirken könnte, dass in Zukunft bei Beschreibung von Bahnanlagen über die verwendeten Transformatoren mit zweckdienlichen Zahlenangaben nicht mehr die bisherige Zurückhaltung beobachtet wird, so würden wir dies gerne als einen grossen Erfolg unserer Arbeit ansehen. Die bisherige Zurückhaltung scheint uns übrigens eher in einer Unterschätzung der Bedeutung der Bahntransformatoren, als in einer Furcht der Preisgabe von Konstruktionsgeheimnissen zu liegen, wie wir aus dem Verhalten der amerikanischen Fachgenossen schliessen. Auch diese lassen nämlich in den Beschreibungen ausgeführter Bahnanlagen nützliche Angaben über Transformatoren vermissen, obwohl sie sonst allgemein nicht nur von überängstlicher Zurückhaltung frei sind, sondern geradezu jegliche literarische Abklärung provozieren, die geeignet ist, der Erkenntnis und dem technischen Fortschritt von Nutzen zu sein.

### Berner Schulhausbau-Fragen.

Vom 12. bis 17. Februar d. J. waren in Bern eine Reihe von Entwürfen bernischer Architekten zu einem *Knaben-Sekundarschulhaus auf dem Hopfgut* öffentlich ausgestellt. Es handelte sich um das Ergebnis einer Plan-Konkurrenz, die unter ganz eigentümlichen Verhältnissen zustande gekommen war. In Wirklichkeit war die von der „Gesellschaft selbständig praktizierender Architekten Berns“ veranstaltete Ausstellung eine *Flucht in die Öffentlichkeit*. Ueber die Gründe, die dazu führten, wurden die Ausstellungs-Besucher in einer von der G. A. B. unterzeichneten Druckschrift belehrt. Von der Gesellschaft zur Besichtigung der Pläne eingeladen, und über die Zusammenhänge noch näher unterrichtet, zögern wir nicht, die Sache wegen ihrer *grundsätzlichen Bedeutung* hier auch dem Urteil der Fachkollegen zu unterbreiten. Wir folgen dabei im Wesentlichen der eben genannten Druckschrift, zu deren Verständnis wir die Entwürfe „Moritzle“ I. und „Simplex“, sowie von „Erziehung A“ eine Ansicht wiedergeben. Um jeden Anschein persönlicher Begünstigung zu vermeiden, lassen wir die Namen der Verfasser weg; es handelt sich für die G. A. B. wie für uns nur um die Sache. Naturgemäss wandten wir uns auch an die Städtische Baudirektion in Bern um Ueberlassung der Wettbewerbs-Unterlagen, damit, wie wir dies jüngst beim Bieler Bahnhof- und Post-Wettbewerb getan hatten, ein Vergleich und damit ein objektives Urteil über das Mass der durch die Konkurrenz-Entwürfe erzielten Verbesserungen an Grundrissen und Architektur ermöglicht werde. Zu unserem Erstaunen versagte uns aber die Baudirektion nicht nur die erbetenen Pläne, sondern sie legte, für den Fall, dass wir sie von

anderer Seite erhalten sollten, von vorherin Verwahrung ein gegen eine Veröffentlichung ihres Projektes und wahrte sich alle „Urheberrechte“ (!) daran.

Wir können uns einen Kommentar zu diesem Verhalten sparen und hoffen, die Fachkollegen werden es auch verstehen, dass wir zur Vermeidung von Weiterungen mit der Baudirektion Bern unter diesen Umständen auf die Wiedergabe ihres Projektes verzichten. Wer sich dafür interessiert, kann die uns seither von anderer Seite gelieferten Grundrisse auf unserer Redaktion einsehen;

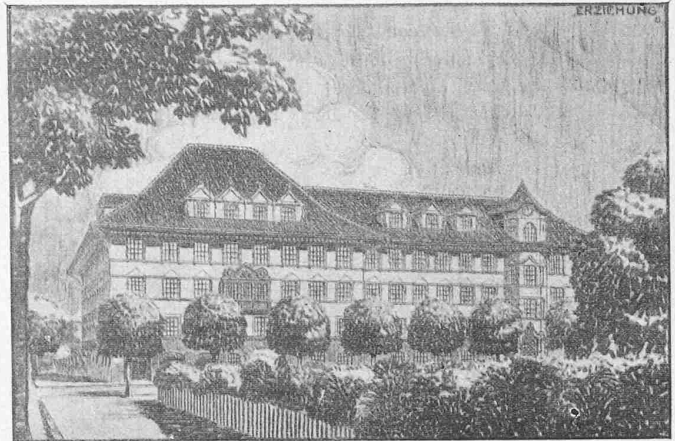


Abb. 1. Entwurf „Erziehung A“; Ansicht der Ostfront.

übrigens wird ja der Bau ausgeführt, sodass er dann in natura begutachtet werden kann. Die Experten zur Beurteilung der (gratis und franco) eingereichten „Abänderungsvorschläge“ der Privatarchitekten waren die Kollegen H. B. v. Fischer, M. Hofmann und Alb. Gerster, Architekten in Bern. Damit gehen wir über zum Bericht der G. A. B., dessen wörtliche Ausführungen in kleinerer Schrift gekennzeichnet sind.

#### Die Vorgeschichte der Ausstellung.

Jedem Kunstsinnigen muss es auffallen, dass die städtischen Bauten nicht immer den künstlerischen Anforderungen entsprechen, die nach ihrer Bedeutung und nach der Bedeutung der Bundesstadt gestellt werden müssen. Nicht nur aus beruflichen, sondern auch aus künstlerischem Interesse wenden daher die bernischen Architekten schon seit längerer Zeit der Baupolitik der städtischen Behörden ihre volle Aufmerksamkeit zu. Sie lassen sich dabei von dem Bestreben leiten, die städtischen Bauten, bei aller Rücksichtnahme auf die zur Verfügung stehenden öffentlichen Mittel, auf ein höheres künstlerisches Niveau zu bringen.

Nun ist gegen Mitte des letzten Jahres von der Einwohnerschaft wiederum die Ausführung von Schulhausbauten beschlossen worden, welche der Stadt Kosten von rund 2 Millionen Franken verursachen werden, eine Summe, die bekanntlich auf dem Wege der Steuererhöhung eingebracht werden soll. Angesichts eines so bedeutenden Werkes haben sich die bernischen Architekten um die Ausführung dieser Bauten beworben, und der Stadtrat hat ihrem Gesuch, wie man weiss, in letzter Stunde in dem Sinne entsprochen, dass er dem Gemeinderat<sup>1)</sup> die Frage zur Prüfung vorlegte, ob nicht die architektonische Bearbeitung eines der geplanten Schulhäuser einem hiesigen Privatarchitekten übertragen werden solle. Darauf anboten sich verschiedene stadtbernerische Firmen, für das Sekundarschulhaus auf dem Hopfgut kostenlos Abänderungsvorschläge auszuarbeiten. *Der Gemeinderat nahm das Angebot an und stellte die Ueberweisung des Bauauftrages an einen der Planverfasser in Aussicht.* Bei der Beurteilung der Pläne sollte er sich auf ein unabhängiges Gutachten von drei Fachmännern stützen, die ihre Arbeit den Behörden ebenfalls kostenlos liefern wollten.

Nachdem die Privatarchitekten ihre Projekte eingereicht hatten — wofür ihnen wegen der „Dringlichkeit“ der Bauten die sehr knappe Frist von dreieinhalb Wochen eingeräumt wurde — liessen die städtischen Behörden bis zu ihrer Rückäusserung mehr als zwei Monate verstreichen. Und dann fassten sie den überraschenden

<sup>1)</sup> Exekutiv-Behörde. Red.