

<b>Zeitschrift:</b>	Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses
<b>Herausgeber:</b>	Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen
<b>Band:</b>	74 (1983)
<b>Heft:</b>	23
<b>Artikel:</b>	Die Flussverteilung im Kessel von Dreiphasen-Transformatoren bei starker Übererregung
<b>Autor:</b>	Kozlowska, A. / Stasiak, K.
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-904898">https://doi.org/10.5169/seals-904898</a>

### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### 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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### 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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 26.01.2026

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

# Die Flussverteilung im Kessel von Dreiphasen-Transformatoren bei starker Übererregung

A. Kozlowska und K. Stasiak

Kurzzeitige, starke Übererregung von Transformatoren grosser Leistung bringt die Gefahr einer örtlichen Überhitzung verschiedener Bauteile. Die Resultate der vorliegenden Arbeit erlauben die Bestimmung derjenigen Bereiche im Kessel, wo bei Übererregung grosse Verluste zu erwarten sind. Leerlaufversuche wurden an Modelltransformatoren mit drei und fünf Schenkeln durchgeführt bei gegenüber Nenninduktion 30% Übererregung.

Une forte surexcitation même brève de transformateurs de grande puissance risque de surchauffer localement certaines parties de leur construction. Les résultats de l'étude présentée permettent de déterminer les emplacements dans la cuve où une surexcitation peut provoquer de fortes pertes. Des essais à vide ont été exécutés à des transformateurs à trois et à cinq noyaux avec une surexcitation de 30 % par rapport à l'induction nominale.

## 1. Einleitung

Übererregung bedeutet eine Belastung des magnetischen Kreises von Transformatoren bis in die hohe Sättigung. Die ideell auf den Eisenquerschnitt bezogenen Induktionen übersteigen die etwa 2 T betragende Sättigungsinduktion der zurzeit verwendeten Elektrobleche erheblich. Als Übererregungsgrad  $k_p$  wird das Verhältnis der unverdrängt-ideell auf den Schenkelquerschnitt berechneten Induktion  $B_s$  zur Induktion  $B_n$  bei Nennbetrieb gebildet:

$$k_p = \frac{B_s}{B_n} = \frac{U \cdot f_n}{U_n \cdot f} \quad (1)$$

$U_n, f_n$  Nennspannung und Nennfrequenz  
 $U, f$  Spannung und Frequenz bei Übererregung

Grosse Transformatoren arbeiten mit Nenninduktionen zwischen 1,65 und 1,77 T.

Abhängig von Übererregungsgrad und Einwirkungsdauer kann ein Transformator thermisch beschädigt oder zumindest der Zustand von dessen Isolation verschlechtert werden. Häufen sich, eventuell kaum bemerkt, die Fälle von Übererregung, so können Teile der Isolation schliesslich bis zum Versagen geschädigt werden.

Nach allgemeiner Ansicht ist eine Übersättigung von Transformatoren im Netzbetrieb wenig wahrscheinlich. Die bei Abweichung der Spannung und der Frequenz von den Nennwerten auftretenden Induktionen errei-

chen die Sättigungsinduktion der Bleche kaum, schon weil eine relativ geringe Unterfrequenz und grössere Überspannungen einen geordneten Netzbetrieb verunmöglichen.

Anders Blocktransformatoren, welche mit Generatoren gleicher Leistung in Blockschaltung zur Einheit fest verbunden sind. Lastabwürfe sowie die beim Anfahren und Stillsetzen zu kleinen Frequenz verursachen Übererregungen, in deren Folge eine ganze Reihe von Transformatorbeschädigungen aufraten [1]. Die Generatoren mit ihren grossen Luftspalten erwiesen sich als unempfindlich. Auch für Trafos an Wasserkraftgeneratoren ist die Gefahr von Beschädigungen geringer dank den kürzeren Anfahrt- und Abstellzeiten.

Wird ein Transformator über den Sättigungsfluss des Eisens hinaus belastet, so nimmt der von den grossen Magnetisierungsströmen erregte zusätzliche Fluss grossenteils Wege ausserhalb der Kerne und Joche, so zwischen dem Kern und der erregenden Wicklung, auch durch diese und die anderen Wicklungen, durch metallische Konstruktionsteile wie Jochpressbalken, Spanschrauben und Zugstangen sowie über den Kessel. Wirbelströme führen dann zur Erwärmung und zur Überhitzung dieser Teile und damit zur Gefährdung anliegender Isolationsmaterialien.

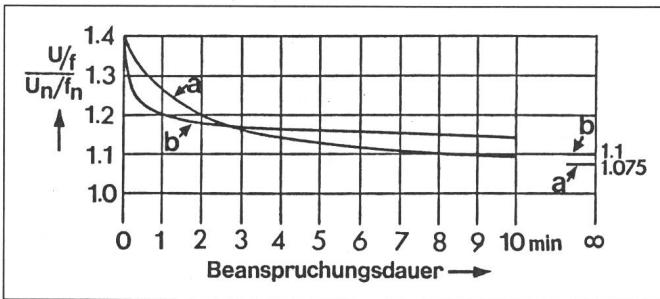
Bezüglich dem zulässigen Übererregungsgrad und der zeitlichen Einwirkung zeigt Figur 1 die Anforderungen nach VDE und nach IEEE; maximal

Der Aufsatz ist das Manuskript eines Vortrages des Rapperswil Herbst-Symposiums 1982, das von H. Weidmann AG am 30. September und 1. Oktober 1982 am ITR durchgeführt wurde.

## Adresse der Autoren

Dr. Ing. Alicja Kozlowska und  
Ing. Kazimierz Stasiak, Technical University of Lodz,  
Institute of Transformers, el. Machines and Apparatus,  
Gdanska 155, P-90924 Lodz.

Fig. 1  
Zulässiger Übererregungsgrad  
a nach VDE-Vorschriften  
b nach IEEE



1,4fache Übererregung darf einige Sekunden, eine 1,2fache 1 bis 2 min anhalten. Modelltransformatoren mit fünf und mit drei Schenkeln wurden im Leerlauf 1,3fach übererregt und ausgemessen, und anhand der Resultate die Bereiche des Kessels mit erhöhten Verlusten bestimmt.

## 2. Modelltransformatoren

Ausführliche Prüfungen wurden am Fünfschenkelmodell nach Figur 2 und etwas vereinfachte an einem Dreischinkelmodell durchgeführt. Die Figur zeigt auch die Anordnung der Messspulen mit je fünf Windungen zur Erfassung der vertikalen und der horizontalen Komponenten der Induktion in den je 3 mm starken Wänden von Kessel und Deckel. Beide Modelltransformatoren haben stählerne Jochpressbalken.

### Fünfschenkeltransformator

- Blechtyp ET5 (entspricht M5) von 0,3 mm Dicke
- Hauptschenkel zweirahmig, Querschnitt  $S_k = 44,8 \text{ cm}^2$
- alle Jochen mit dem Querschnitt  $S_j = 22,4 \text{ cm}^2$ , somit  $S_j/S_k = 0,5$
- Erregerwicklung mit 187 Windungen pro Phase in Dreieck
- Messwicklungen oben, in Mitte und unten an allen Säulen

### Dreischinkeltransformator

- Blechtyp M6 von 0,35 mm Dicke
- gleiche Kern- und Jochquerschnitte  $S_k = S_j = 88,14 \text{ cm}^2; S_j/S_k = 1$
- Erregerwicklung mit 112 Windungen pro Phase in Dreieck

## 3. Messung der Induktionsverteilung

Zur Messung des magnetischen Flusses wurde ein AEG-Vektormesser an die einzelnen Messsonden angeschlossen. Der auf halbe Periodendauer  $T/2 \triangleq 180^\circ$  el. eingestellte Kontakt des Vektormessers führt dessen Drehspulmesswerk bei maximalem Ausschlag gerade die positive Halbwelle der in den  $N_M$  Windungen der Messwicklung induzierten Spannung  $U_{M\max}$  zu, linear gemittelt und der Flussänderung von  $-\Phi_{\max}$  bis  $+\Phi_{\max}$ , also  $2|\Phi_{\max}|$  proportional:

$$U_{M\max} = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0 + T/2} \left( N_M \frac{d\Phi}{dt} \right) dt = 2fN_M \cdot 2\Phi_{\max} \quad (2)$$

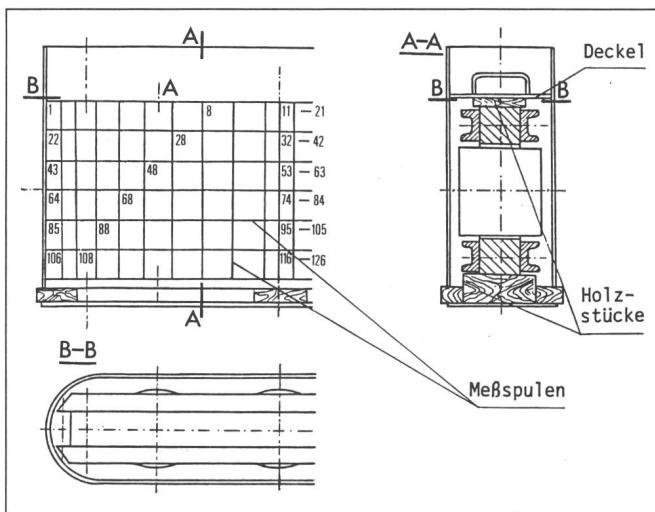


Fig.2  
Fünfschenkelmodell

Fig. 3  
Maximale Induktionswerte in verschiedenen Teilen des Kernes des Fünfschenkeltransformators

- .... gemessene Induktionswerte
- (...) berechnete Induktionswerte ohne Berücksichtigung der Verdrängung des Fluxes aus dem Kern
- [...] berechnete Induktionswerte mit Berücksichtigung der Verdrängung des Fluxes aus dem Kern

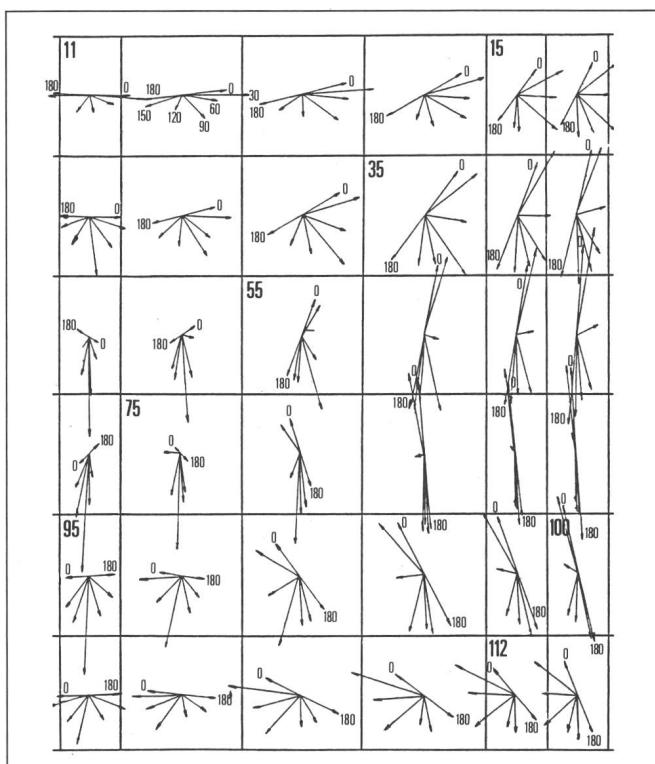
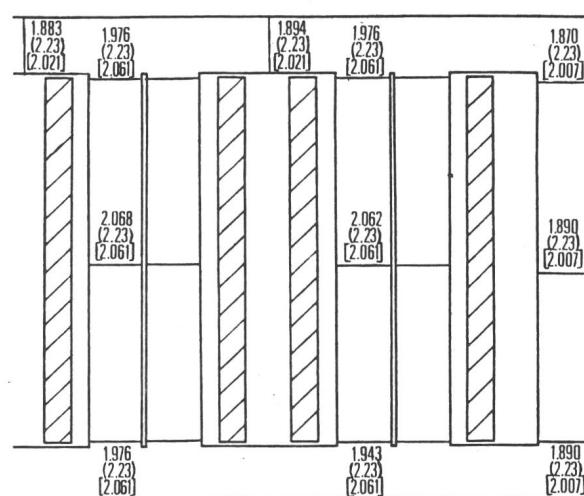


Fig. 4  
Momentane Induktionsverteilung in einem Ausschnitt der Wand des Kessels des Fünfschenkeltransformators  
Für  $\omega t = 0,30, 60, 90, 120, 150, 180^\circ$

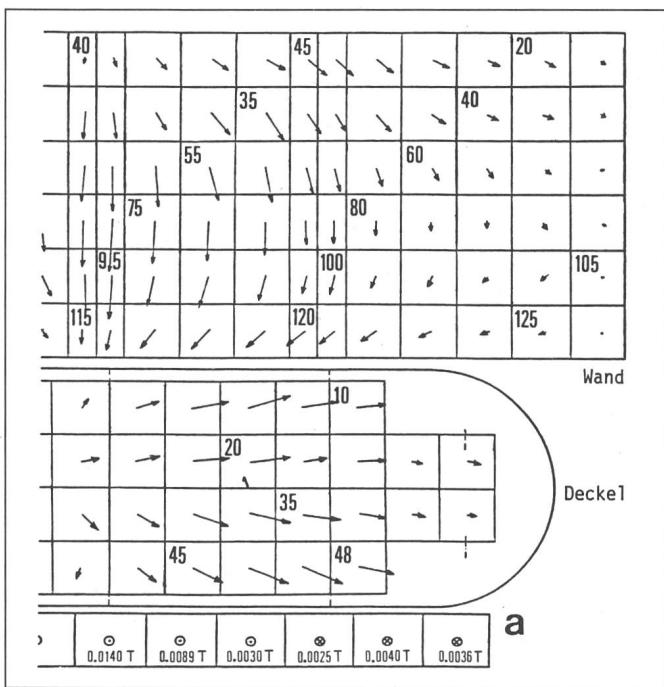


Fig. 5  
Induktionsverteilung  
des Fünfschenkeltrans-  
formators bei  $\omega t = 90^\circ$

a Vertikale Komponen-  
te zwischen dem Deckel  
und dem Joch des Ker-  
nes

der mittleren Säule wurde dabei der Nulldurchgang zur Zeit  $t = 0$  mit dem Phasenwinkel  $\omega t = 0^\circ$  zugeordnet.

Der *Fünfschenkeltransformator* wurde auf die ideell auf die Schenkel- und Jochquerschnitte berechnete Induktion  $B_s = 2,23 \text{ T}$  erregt, was bei einer Nenninduktion von  $1,7 \text{ T}$  den Überer-  
regungsgrad  $k_p = 1,31$  ergibt. Figur 3 zeigt die im Magnetgestell an verschie-  
denen Stellen auftretenden Induk-  
tionsmaxima.

Figur 4 stellt die Induktionen in der Kesselwand dar für die Phasenwinkel von  $0...180^\circ$  in  $30^\circ$ -Schritten. Bedingt durch die partielle Sättigung des Magnetgestells lassen sich die nichtlineare und stark oberwellenbehafteten Verläufe der Induktionen in Wand und Deckel erkennen. In Figur 5 ist die Induktionsverteilung für  $\omega t = 90^\circ$  allein dargestellt. Aus dieser Art der Darstellung der Induktionsvektoren der Wand- und Deckel-Felder ergeben sich anschauliche Bilder der jeweiligen Feldzustände. Die Figur enthält auch die vertikalen Komponenten der Induktion zwischen oberem Joch und Deckel.

Der *Dreischenkeltransformator* wurde bei  $B_s = 2,2 \text{ T}$  mit dem Überer-  
regungsgrad  $k_p = 1,30$  gemessen. Analog zu Figur 4 zeigt Figur 6 die Induktionen in den Kesselwandfeldern in  $30^\circ$ -Schritten.

Ergänzend zeigt Figur 7 für den Fünfschenkeltyp die ideellen Flusswerte im Magnetgestell für die Phasenwinkel  $0...150^\circ$  el. Aus den Figuren 3...5 und 7 lässt sich schliessen, dass sich im Bereich hoher Sättigung der Hauptschenkel ( $0,87...1...0,87 B_s$ ) der magnetische Fluss weitgehend im axialen Kanal zwischen Kern und Erreger-  
wicklung längs dem ganzen Hauptschenkel bildet [2] und sich zwischen den Knotenbereichen der Schenkelen-  
den grossenteils über die Kesselwände schliesst, da die anstossenden Jochab-  
schnitte gleichzeitig ebenfalls übersättigt werden. Dabei bilden sich zu den vertikalen Außenjochen parallele Flüsse in den Kesselwänden und zum oberen und unteren Joch parallele Flüsse in den Jochbalken und im Dek-  
kel bzw. Boden.

Wesentlich anders verteilt sich der vom Dreischenkeltyp austretende Fluss, da die mittlere Säule auch im übersättigten Zustand den Fluss durch die den Schenkeln entsprechenden Jochquerschnitte den schwach belaste-  
ten Außenäulen zuleiten kann. Im Bereich der Flussmaxima der Außen-  
säulen samt anstossenden Jochab-

Durch Veränderung der Startzeit  $t$  gegenüber  $t_0$  für  $\Phi_{\max}$  (bei  $f = 50 \text{ Hz}$  entspricht die Periodendauer  $T = 20 \text{ ms}$  dem elektrischen Winkel  $\omega T = 360^\circ$  el.) lassen sich auch die Momentanwerte der Flüsse  $\Phi$  zur Zeit  $t$  bzw. im Zeitwinkel  $\omega t$  messen. Die Induktion  $B_t$  ergibt spezifisch gemittelt für den von der Messwicklung umfassten Querschnitt  $S_M$

$$B_t = \frac{U_{Mt}}{4fN_M S_M} \quad (3)$$

Die zur Zeit  $t$  bzw. Phase  $\omega t$  in den Mitten der quadratisch eingeteilten

Wandelemente von Kessel und Deckel nach Betrag und Richtung resultierenden Induktionen ergeben sich durch vektorielle Addition der aus den Messwerten von je zwei gegenüberliegenden Messspulen gemittelten horizontalen und vertikalen Induktionskomponenten.

#### 4. Messergebnisse und Folgerungen

In den beschriebenen Modelltransformatoren wurden symmetrische, um  $120^\circ$  el. zeitlich phasenverschobene Wechselströme erregt. Der Induktion in

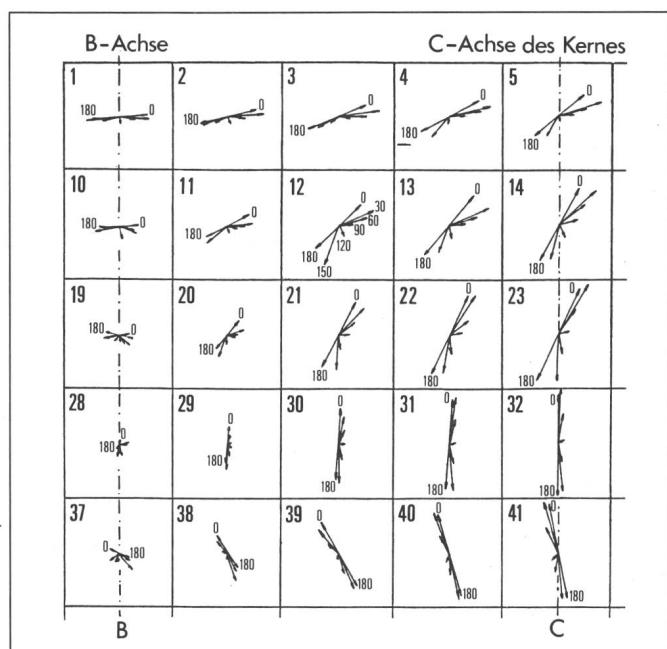
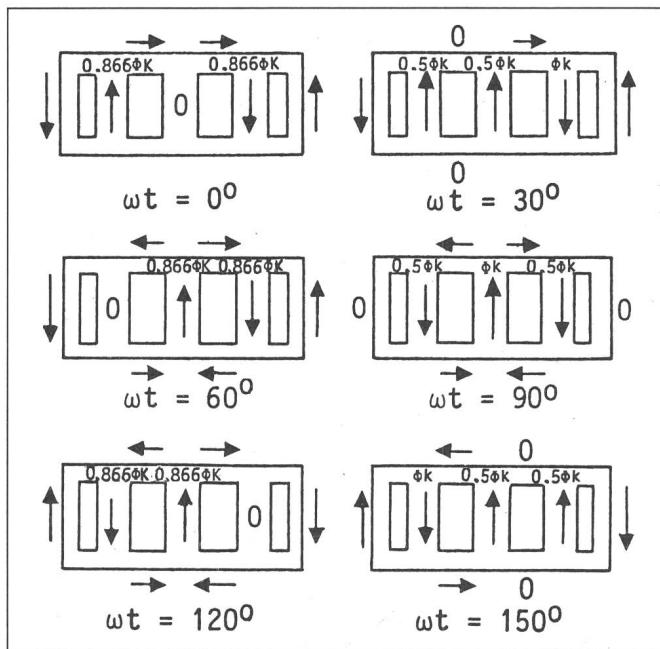


Fig. 6  
Momentane Induk-  
tionsverteilung in der Wand  
des Kessels des  
Dreischenkeltransfor-  
mators (Ausschnitt)

Fig. 7  
Richtung und Betrag des magnetischen Flusses im Fünfschenkeltransformator



schnitten ergeben sich jedoch ebenfalls starke Belastungen der benachbarten Kesselwände (vgl. Fig. 4 und 6).

Die Figuren 8 und 9 stellen die Maximalwerte der Induktionen in den Kesselwandfeldern der Fünfschenkel- bzw. Dreischenkeltypen grafisch dar. Als grösste Induktionen wurden beim Übererregungsgrad 1,3 in der Kesselwand ermittelt:

- am Fünfschenkeltyp:  $B_{max} = 0,3 \text{ T}$
- am Dreischenkeltyp:  $B_{max} = 0,53 \text{ T}$

Die in Figur 3 für den Fünfschenkeltyp eingetragenen Induktionen wurden nach [2; 3] errechnet. Tabelle I enthält einige prozentuale Werte von bei Übererregung parallel zum Magnetgestell entstehenden Flüssen.

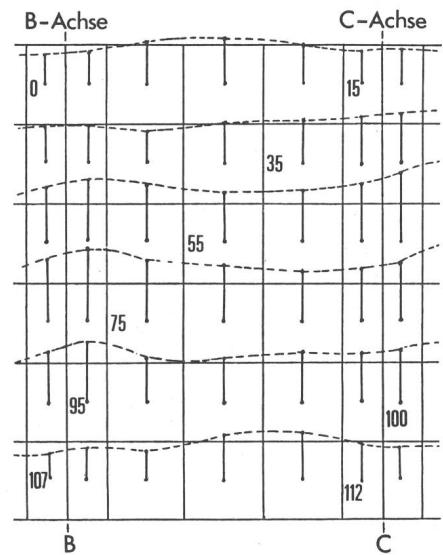


Fig. 8 Verteilung der maximalen Induktion in der Wand des Kessels beim Fünfschenkeltransformator

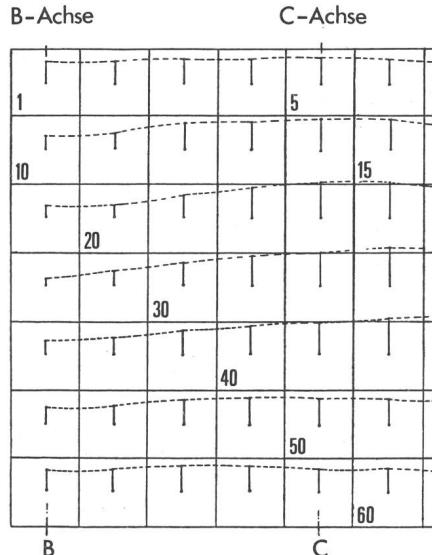


Fig. 9 Verteilung der maximalen Induktion in der Wand des Kessels beim Dreischenkeltyp

Prozentuale Werte des aus den 5-Schenkel-Kernen bzw. 3-Schenkel-Kernen verdrängten Flusses. Übererregungsgrad  $k_p = 1,30$  (vgl. Fig. 3)

Tabelle I

	5-Schenkel-Kern $S_j/S_k = 0,5$	5-Schenkel-Kern nach [2] $S_j/S_k = 0,578$ geprüft ohne Kessel	3-Schenkel-Kern $S_j/S_k = 1,0$
Hauptschenkel - Mitte	7,4	5,2	2,7
Hauptschenkel - oben und unten	11,4	-	6,8
Joch - Mitte zwischen den Hauptschenkeln	15,3	1,2	7,7
Rückschlussjoch - Mitte	14,6	9,0	-
Rückschlussjoch - oben und unten	17,0	-	-

## 5. Schlussfolgerungen

Aus den Induktionsverteilungen in den Kesseln von im Leerlauf übererregten Drehstromtransformatoren können folgende Schlüsse gezogen werden:

1. Die Ummagnetisierung des Kessels durch bei Übersättigung des Kerns ausstreuende magnetische Flüsse hat elliptischen Charakter.

2. Die Induktionsverteilung im Kessel ist von der Bauweise des Kerns abhängig:

- Beim Dreischenkeltyp sind die im Mittel erreichten maximalen Induktionen im Kessel grösser als beim Fünfschenkelkern; die grössten Werte treten in den die Aussenschenkeln umfassenden abgerundeten Kesselteilen auf, die kleinsten in den Bereichen des Kessels gegenüber dem mittleren Schenkel.

- Beim Fünfschenkelkern ist die Verteilung der im Kessel maximal erreichten Induktionen gleichmässiger als beim Dreischenkeltyp; die grössten Werte treten in den Bereichen des Kessels gegenüber den Hauptschenkeln auf.

3. Die in Deckel- und Bodennähe des Kessels beobachteten Induktionen sind kleiner als diejenigen im Bereich der Kesselwände gegenüber den Wicklungen.

### Literatur

- [1] J. Gantner et F. H. Birch: Protection contre la sursaturation des transformateurs. Electra -(1973)31, p. 65...73.
- [2] A. Kozłowska i H. Pabis: Rozkład strumienia magnetycznego w transformatorach duzych mocy przy ich krótkowzajemnych przewzbudzeniach. Rozprawy Elektrotechniczne 23(1977), s. 131...146.
- [3] A. Kozłowska: Rozkład strumienia w trójfazowych wieloramiennych rdzeniach pieciokolumnowych. Rozprawy Elektrotechniczne 16(1970)1, s. 127...146.
- [4] P. L. Bellaschi: Overexcitation of large generator transformers. Transmission and Distribution 20(1968)8, p. 72...73.
- [5] W. C. Sealey: Overexcitation of power transformers. Allis-Chalmers Engineering Review 30(1965)4, p. 18...19.