

# Die Anregung von Eigenschwingungsformen bei Transformatorkernen

Autor(en): **Voss, E.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **65 (1974)**

Heft 13

PDF erstellt am: **12.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-915433>

## **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.

# Die Anregung von Eigenschwingungsformen bei Transformatorkernen

Von E. Voss

621.314.22 : 621.3.018.6

In der vorliegenden Arbeit wird gezeigt, unter welchen Bedingungen ein Transformatorkern bei bestimmten mechanischen Eigenfrequenzen zur Schwingung bei Ausbildung der dazugehörigen Eigenform angeregt werden kann. Aus der Flussverteilung in den Kernen von Fünfschenkeltransformatoren werden die magnetostruktiven Dehnungen für die einzelnen Teile des Kernes ermittelt; daraus sind Ersatzkräfte abzuleiten, die einige der bekannten Eigenformen anregen können.

Dans cet article, on montre dans quelles conditions un noyau de transformateur peut être mis en vibration par certaines fréquences propres mécaniques, au moyen de la forme intrinsèque correspondante. D'après la répartition du flux dans les noyaux de transformateurs à cinq colonnes, les élongations magnétostrictives sont déterminées pour les différentes parties du noyau; cela permet d'en dériver des efforts équivalents qui peuvent exciter quelques-unes des formes intrinsèques connues.

## 1. Einleitung

Die Bekämpfung des Transformatorengeräusches gewinnt im Rahmen der Aufgaben des Umweltschutzes immer mehr an Bedeutung. Garantieverpflichtungen der Hersteller bezüglich des Schallpegels von Transformatoren sind seit geraumer Zeit die Regel. Es ist daher eine Selbstverständlichkeit, Transformatoren so geräuscharm wie möglich auszuführen.

heutigen Grenzleistungstransformatoren in Fünfschenkelbauweise sind die Kerneigenfrequenzen und Eigenformen zwar bekannt [10], aber die Bedingungen für die mögliche Anregung wurden bisher nicht untersucht.

## 2. Bedingungen für die Anregung von Eigenformen

Fig. 1 zeigt die erste Eigenform eines frei schwingenden Stabes mit den beiden Schwingungsknoten A und B. Um einen derartigen Stab zur Schwingung anzuregen, wird man einen mechanischen Schwingungserreger niemals in diesen beiden Punkten anbringen. Vielmehr wird eine Stelle in der Nähe des Punktes C gewählt. Offensichtlich muss folgende Bedingung erfüllt sein: Das Produkt aus Erregerkraft  $F$  und Ausschlag  $Y$  muss verschieden von Null sein. Im allgemeinen Fall können mehrere Erregerkräfte vorhanden sein, so dass gilt:

Die bekannte Tatsache, dass leerlaufende Transformatoren nahezu die gleiche Lautstärke aufweisen wie belastete, deutet auf den entscheidenden Einfluss der Kernschwingungen bei der Lärmerzeugung hin. Infolge der magnetostruktiven Dehnungen des Eisens wird der gesamte Kern zu Längs- und Biegeschwingungen angeregt, die auf den Kessel übertragen und von dort neben dem Lüftergeräusch als Luftschall abgestrahlt werden [1; 2].

$$\sum_i F_i Y_i \neq 0 \quad (1)$$

Als Massnahmen zur Geräuschminderung sind hauptsächlich zu erwähnen:

Der physikalische Hintergrund wird klar, wenn man Gl. (1) mit  $\omega_0/2$  multipliziert und sich auf die Betrachtung der Scheitelwerte beschränkt. Dabei ist  $\omega_0$  die der Eigenform entsprechende Eigenkreisfrequenz. Die Schwinggeschwindigkeit ist mit  $v$  bezeichnet.

- Verwendung geräuscharmer Lüfter;
- Dämpfung und Dämmung des Schalls durch geeignete Ummantelung des Transformators;
- Begrenzung der magnetostruktiven Kräfte. Wegen des Wunsches nach wirtschaftlicher Ausnutzung des zur Verfügung stehenden Kernquerschnitts ist diese Massnahme in der Regel abzulehnen;
- Günstige Ausbildung der Überlappungsgebiete und Berücksichtigung des Einflusses der mechanischen Verspannung des Kernes [3]<sup>1)</sup>;
- Vermeidung von Resonanzen.

$$\frac{\omega_0}{2} \sum_i \hat{F}_i \hat{Y}_i = \frac{1}{2} \sum_i \hat{F}_i \hat{v}_i = \sum_i \hat{P}_i > 0 \quad (2)$$

Wird eine Kerneigenfrequenz angeregt, tritt eine deutliche Steigerung der entsprechenden Geräuschkomponente ein. Die Resonanzüberhöhung ist infolge der geringen Werkstoffdämpfung sehr gross – an fertigen Transformatoren wurden Lautstärkeerhöhungen durch Anregung einer Kerneigenfrequenz bis zu 12 dB gemessen. Auch die Anregung im Bereich der Flanke einer Resonanzüberhöhung genügt, um eine akustische Wirkung deutlich wahrzunehmen. Es lohnt sich also unbedingt, den Schwingungsmechanismus der Kerne zu untersuchen, zumal die üblicherweise zugestandene Geräushtoleranz nur 3 dB (A) beträgt. In einer Anzahl von Arbeiten wurden daher die Eigenfrequenzen der Kerne von Transformatoren vorausberechnet [4; 5; 6], so dass die Lage der kritischen Frequenzen durch konstruktive Massnahmen während der Projektierung des Kernes in einen unkritischen Bereich verlegt werden kann. Insbesondere die Verwendung von EDV-Anlagen erlaubt eine exakte Bestimmung der Eigenfrequenzen [6; 7].

Die Leistung  $P_1$  wird durch die äusseren Erregerkräfte dem Schwingungssystem zugeführt; sie muss positiv sein, wenn die Schwingung aufrechterhalten werden soll.

Das Ziel der weiteren Untersuchungen muss also sein, eine «Ersatzverteilung» von Erregerkräften in Transformatorkernen zu finden, die an den Enden der Schenkel und Jochteile angreifen. Die Summe der Produkte aus Kräften und Ausschlägen entsprechender Eigenformen muss positiv sein, wenn die Eigenform angeregt werden kann.

In einer Reihe von Veröffentlichungen wurde untersucht, welche der den Eigenfrequenzen entsprechenden Eigenformen, die sich in Richtung der Kernebene ausbilden, durch das jeweils vorliegende Kräftesystem angeregt werden [8; 9]. Für die

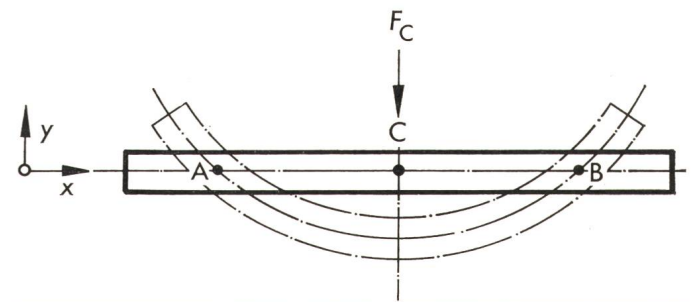


Fig. 1 Erste Eigenform eines frei-frei gelagerten schwingenden Stabes

- $F_C$  Erregerkraft
- A, B Schwingungsknotenpunkte
- C Kraft-Angriffspunkt

<sup>1)</sup> Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

### 3. Die magnetostruktiven Dehnungen und Kräfte

Aus dem Hookeschen Gesetz ist der Zusammenhang zwischen der auf die beiden Stirnflächen eines Transformator-schenkels oder -joches mit konstantem Querschnitt  $A$  wirkenden Kraft  $F_{(t)}$  und der magnetostruktiven Dehnung  $\varepsilon_{(t)}$  zu erkennen:

$$F_{(t)} = \varepsilon_{(t)} E A \quad (3)$$

Der Elastizitätsmodul  $E$  wird dabei als unabhängig von Ort und Zeit angenommen. Der Einfluss der Walzrichtung kornorientierter Bleche auf diesen Faktor wird nicht betrachtet.

Aus Fig. 2 ist die Abhängigkeit der relativen magnetostruktiven Dehnung von der Induktion  $\hat{B}$  zu entnehmen. Da nur der Betrag der Induktion von Bedeutung ist, kann die magnetostruktive Dehnung mathematisch als Summe von geraden Potenzen der Induktion dargestellt werden:

$$\varepsilon_{(t)} = \sum_{v=1}^n k_v b^{2v} \quad (4)$$

Die Koeffizienten  $k_v$  nehmen mit wachsender Ordnungszahl  $v$  ab; sie können, wie Fig. 2 zeigt, auch negative Werte annehmen.

Unter Berücksichtigung eines cosinusförmigen Verlaufs der Induktion  $b_{(t)} = \hat{B} \cos \omega t$  lassen sich die einzelnen Komponenten der Magnetostruktion wie folgt summieren [9]:

$$\varepsilon_{(t)} = \sum_{v=1}^n \frac{k_v \hat{B}^{2v}}{2^{2v-1}} \left[ \frac{1}{2} \binom{2v}{v} + \sum_{\mu=1}^v \binom{2v}{v-\mu} \cos 2\mu\omega t \right] \quad (5)$$

In Gl. (5) ist die bekannte Tatsache enthalten, dass die magnetostruktiven Dehnungen bzw. Kräfte mit ganzzahligen Vielfachen der doppelten Netzfrequenz pulsieren.

Die Zergliederung für  $v = 1$  und  $v = 2$  ergibt:

$$\begin{aligned} v = 1: \varepsilon_{(t)} &= \frac{k_1 \hat{B}^2}{2} [1 + \cos 2\omega t] \\ v = 2: \varepsilon_{(t)} &= \frac{k_2 \hat{B}^4}{2^3} [3 + 4 \cos 2\omega t + \cos 4\omega t] \end{aligned} \quad (6)$$

Jede  $\mu$ -te Harmonische trägt mit einem bestimmten Gewicht zur Gesamtmagnetostruktion bei. Um dieses zu ermitteln, ist eine Betrachtung der Induktionsverteilung im Transformator-kern notwendig.

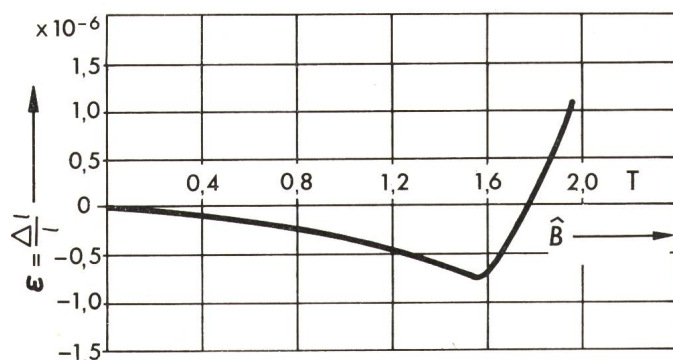


Fig. 2 Wechselfeldmagnetostruktion kornorientierter kaltgewalzter Bleche in Abhängigkeit von der Induktion (nach [3])

$\varepsilon$  relative magnetostruktive Dehnung  
 $l$  Schenkellänge  
 $\hat{B}$  Induktionsamplitude

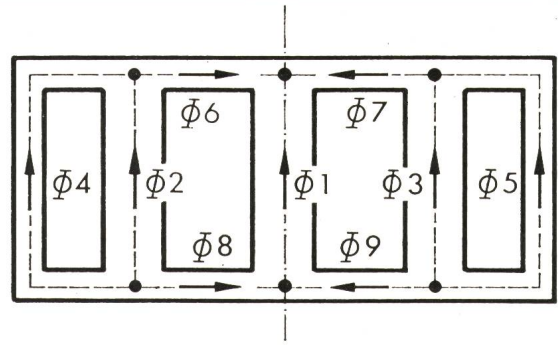


Fig. 3 Magnetische Flüsse  $\Phi$  im Fünfschenkeltransformator

### 4. Der Verlauf des magnetischen Flusses und der Induktion im fünfschenkligen Transformator

Es wird ein leerlaufender Transformator betrachtet, dessen Erregerwicklung im Stern mit festangeschlossenem Mittelpunkt-leiter (oder im Dreieck) geschaltet ist. Die verschiedenen Flüsse sind nach Fig. 3 bezeichnet. Bei symmetrischen Netzspannungen ist die Größe und Phasenlage der drei Schenkel-flüsse  $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3$  bekannt (Fig. 4). Zwischen den Flüssen gelten in Anlehnung an das Kirchhoffsche Gesetz die Gleichungen:

$$\begin{aligned} \Phi_6 - \Phi_4 &= \Phi_2 & -\Phi_8 - \Phi_4 &= \Phi_2 \\ -\Phi_6 - \Phi_7 &= \Phi_1 & \Phi_8 + \Phi_9 &= \Phi_1 \\ -\Phi_5 + \Phi_7 &= \Phi_3 & -\Phi_5 - \Phi_9 &= \Phi_3 \end{aligned} \quad (7)$$

Die Differenz benachbarter Gleichungen ergibt

$$\Phi_6 = -\Phi_8 \quad \Phi_7 = -\Phi_9 \quad (8)$$

Aus der Bedingung  $\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 = 0$  folgt unmittelbar:

$$\Phi_4 = -\Phi_5 \quad (9)$$

Das Gleichungssystem (7) zeigt die Unabhängigkeit zwischen  $\Phi_2$  und  $\Phi_4$  bzw.  $\Phi_5$ . Dies führt zu dem Schluss, dass die Zeiger  $\Phi_4$  und  $\Phi_5$  senkrecht auf dem Zeiger  $\Phi_2$  stehen – sich also auf der Verbindungslinie  $BC$  bewegen. Die Zeiger  $\Phi_6$  und  $\Phi_7$  müssen daher auf dieser Linie enden und sind demzufolge betragsmäßig gleich.

Aus fertigungstechnischen Gründen wird der Querschnitt des gesamten durchlaufenden Jochs in der Regel konstant gehalten. Es ist dann eine gleichmäßige Aufteilung der Flüsse aus den Mittelschenkeln anzustreben:

$$|\Phi_4| = |\Phi_6| \quad |\Phi_5| = |\Phi_7| \quad (10)$$

Aus Fig. 4 ist nun leicht abzulesen:

$$\frac{\Phi_2}{\Phi_4} = \frac{\sqrt{3}}{1} \quad \Phi_4 = \frac{\Phi_2}{\sqrt{3}} \quad (11)$$

Der Jochfluss wäre also um den Faktor  $\sqrt{3}$  kleiner als die Schenkel-flüsse. Daraus resultiert eine Verringerung des Joch-querschnitts gegenüber dem Schenkelquerschnitt um den gleichen Faktor. Dieser Wert wird in der Praxis ungefähr ein-gehalten.

Die reale Aufteilung der Flüsse richtet sich natürlich nach dem Verhältnis der magnetischen Widerstände in den einzelnen Kernteilen [11; 12].

Da die Beziehungen zwischen den Flussanteilen nun be-kannt sind, gewinnt man ohne weiteres die entsprechenden Induktionen:

$$b_{1(t)} = \hat{B}_1 \cos \omega t$$

$$b_{2(t)} = \hat{B}_1 \cos \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$b_{3(t)} = \hat{B}_1 \cos \left( \omega t - \frac{4\pi}{3} \right)$$

$$b_{4(t)} = \hat{B}_4 \cos \left( \omega t - \frac{3\pi}{2} \right) = -b_{5(t)}$$

$$b_{6(t)} = \hat{B}_6 \cos \left( \omega t - \frac{5\pi}{6} \right) = -b_{8(t)}$$

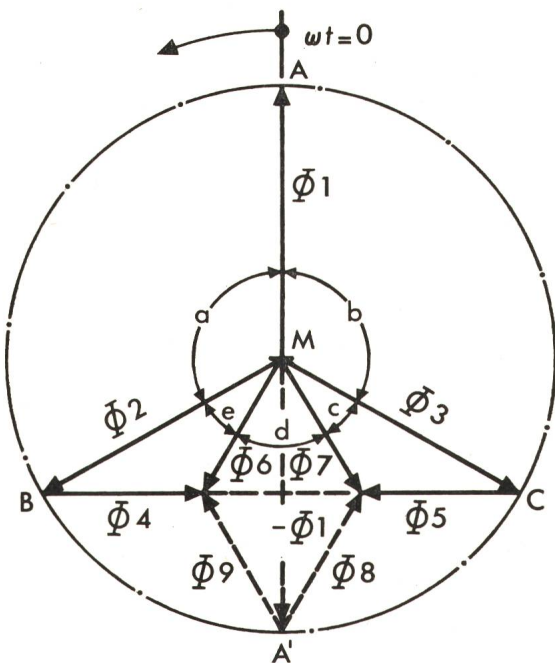
$$b_{7(t)} = \hat{B}_6 \cos \left( \omega t - \frac{7\pi}{6} \right) = -b_{9(t)}$$

Mit Hilfe von Gl. (5) können die durch die Induktionen hervorgerufenen magnetostruktiven Dehnungen gefunden werden. Wegen der quadratischen Abhängigkeit sind die Vorzeichen der Induktionsanteile ohne Belang. Daraus resultiert die Erkenntnis, dass sich das System der Dehnungen offensichtlich symmetrisch zur Jochrichtung ausbildet. Um weitere Eigenschaften des Dehnungs- und damit des Kraftsystems zu finden, soll eine Aufteilung ähnlich Gl. (6) vorgenommen werden. Die absoluten Amplituden sind schwierig zu finden, es genügt aber für jede  $\mu$ -te Komponente die Kenntnis der relativen Dehnungsamplituden  $\varepsilon_\mu$ :

$$\varepsilon_{1\mu(t)} = \hat{\varepsilon}_{1\mu} \cos 2\mu\omega t;$$

$$\varepsilon_{2\mu(t)} = \hat{\varepsilon}_{1\mu} \left[ -\frac{1}{2} \cos 2\mu\omega t + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin 2\mu\omega t \right]$$

$$\varepsilon_{3\mu(t)} = \hat{\varepsilon}_{1\mu} \left[ -\frac{1}{2} \cos 2\mu\omega t - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin 2\mu\omega t \right]$$



**Fig. 4** Zeigerdiagramm der magnetischen Flüsse  
 $\Phi$  magnetische Flüsse  
 $A, B, C, A'$  Hilfspunkte im Fluss-System  
 $M$  Mittelpunkt des Fluss-Systems  
 $\omega t$  Zeitphasenwinkel  
 $a = 120^\circ$   $d = 60^\circ$   
 $b = 120^\circ$   $e = 30^\circ$   
 $c = 30^\circ$

Relative Amplituden der ersten drei Harmonischen der magnetostruktiven Dehnung

Tabelle I

	$\omega t = 0$			$\omega t = \pi/4$			$\frac{A_{\text{Joch}}}{A_{\text{Schenkel}}}$
	$\mu = 1$	$\mu = 2$	$\mu = 3$	$\mu = 1$	$\mu = 2$	$\mu = 3$	
$\varepsilon_{\mu 1} / \hat{\varepsilon}_{\mu 1}$	1	1	1	0	0	0	1
$\varepsilon_{\mu 2} / \hat{\varepsilon}_{\mu 1}$	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	1	$-\frac{1}{2}\sqrt{3}$	$\frac{1}{2}\sqrt{3}$	0	1
$\varepsilon_{\mu 3} / \hat{\varepsilon}_{\mu 1}$	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	1	$\frac{1}{2}\sqrt{3}$	$-\frac{1}{2}\sqrt{3}$	0	1
$\varepsilon_{\mu 4} / \hat{\varepsilon}_{\mu 4}$	-1	1	-1	0	0	0	$\frac{1}{\sqrt{3}}$
$\varepsilon_{\mu 6} / \hat{\varepsilon}_{\mu 6}$	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	-1	$-\frac{1}{2}\sqrt{3}$	$-\frac{1}{2}\sqrt{3}$	0	$\frac{1}{\sqrt{3}}$
$\varepsilon_{\mu 7} / \hat{\varepsilon}_{\mu 6}$	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	-1	$\frac{1}{2}\sqrt{3}$	$\frac{1}{2}\sqrt{3}$	0	$\frac{1}{\sqrt{3}}$

Das obere Vorzeichen gilt für  $\mu = 1, 4, 7 \dots$ ; das untere für  $\mu = 2, 5, 8$ . Es sind hier unwillkürlich dreiphasige Mit- und Gegensysteme in jeweils um eine Viertelperiode verschobene Einphasensysteme zerlegt worden! Für  $\mu = 3$  erhält man das noch fehlende Nullsystem:

$$\varepsilon_{13(t)} = \varepsilon_{23(t)} = \varepsilon_{33(t)} = \hat{\varepsilon}_{13} \cos 6\omega t \quad (16)$$

Die Terminologie der symmetrischen Komponenten lässt sich hier nicht mehr weiter mit ersichtlichem Vorteil verwenden, da die in Fig. 4 dargestellte Flussverteilung eine schliesslich verwirrende Anzahl von Zeigern enthält, die nach den Regeln der symmetrischen Zerlegung eine entsprechende Vielzahl von Systemen ergibt.

In Tabelle I sind für die Ordnungszahlen  $\mu = 1, 2, 3$  die relativen Dehnungen aller Kernteile zusammengefasst. Diese Tabelle lässt sich leicht erweitern, man muss sich allerdings vor Augen führen, dass für  $\mu = 4$  die Erregerfrequenz bereits  $\omega_0 = 400$  Hz beträgt und die dazugehörigen geringeren Dehnungsamplituden bei weitem nicht so gefährlich sind wie die der tieferen Frequenzen.

### 5. Die Anregung der Eigenformen des Fünfschenkelkerns

Neben den relativen Dehnungsamplituden ist in Tabelle I das Verhältnis des Jochquerschnitts zum Schenkelquerschnitt angegeben, um aus den Dehnungen auf die entsprechenden Kräfte zu schliessen, die nun für jeden Eckpunkt des Kerns abgeleitet werden können. Damit ist es möglich, für jede Kombination aus Kräfteverteilung und Schwingungsamplituden der Eigenformen die Summe der interessierenden Produkte aus Kräften und Ausschlägen zu berechnen. Dieser erhebliche Aufwand an Rechenarbeit lässt sich reduzieren, wenn man die Symmetrieeigenschaften der Kräftesysteme mit denen der Eigenformen in Verbindung bringt.

Die in Fig. 5 zusammengefassten Kräftesysteme folgen unmittelbar aus Tabelle I, wenn man berücksichtigt, dass eine Zugkraft («positive» Kraft) auf einen Stab verlängernd und eine Druckkraft («negative» Kraft) verkürzend wirkt. Es fällt die Symmetrie zur Jochrichtung auf: die Kräfte am oberen Joch sind identisch mit denen am unteren Joch. Die in Gl. (6)

berechneten Eigenformen zeichnen sich dadurch aus, dass sie entweder symmetrisch oder antisymmetrisch zur Jochrichtung schwingen (Fig. 6).

Die Summe der Produkte aus Kräften nach Fig. 5 und Ausschlägen einer antisymmetrischen Eigenform wird immer Null ergeben. Diese Erkenntnis lässt wie beim Dreischenkeln Kern die ausschliessliche Anregung der zur Jochrichtung symmetrischen Eigenformen erkennen. Von den in Fig. 6 dargestellten vier Eigenformen kann also nur die Eigenform Nr. 4 magnetostruktiv angeregt werden.

Diese plausibel erscheinende Schlussfolgerung soll nicht darüber hinwegtäuschen, dass verschiedene der hier getroffenen Voraussetzungen einer eingehenden Untersuchung bedürfen. An erster Stelle sei die reale Aufteilung der magnetischen

Widerstände unter Beachtung verschiedener Sättigungszustände des Kerns genannt. Erfahrungsgemäss muss sich dadurch die in Fig. 4 angenommene Induktionsverteilung ändern. Da die Gleichungen (8) und (9) weiterhin gültig bleiben, ändert sich aber nichts an den Symmetrieeigenschaften der Kräftesysteme.

An zweiter Stelle sei darauf hingewiesen, dass der dem Fünfschenkeln Kern eigene Joch-Nullfluss bestimmte Eigenformen anregen kann, aber auch in diesem Fall bleiben die erwähnten Symmetriebedingungen erhalten.

Schliesslich gelten die beschriebenen Resultate auch für die Harmonischen mit Ordnungszahlen  $\mu > 3$ .

Schwieriger wird die Beurteilung örtlicher Induktionserhöhungen im Kern, die sich nicht irgendwie gearteten Sym-

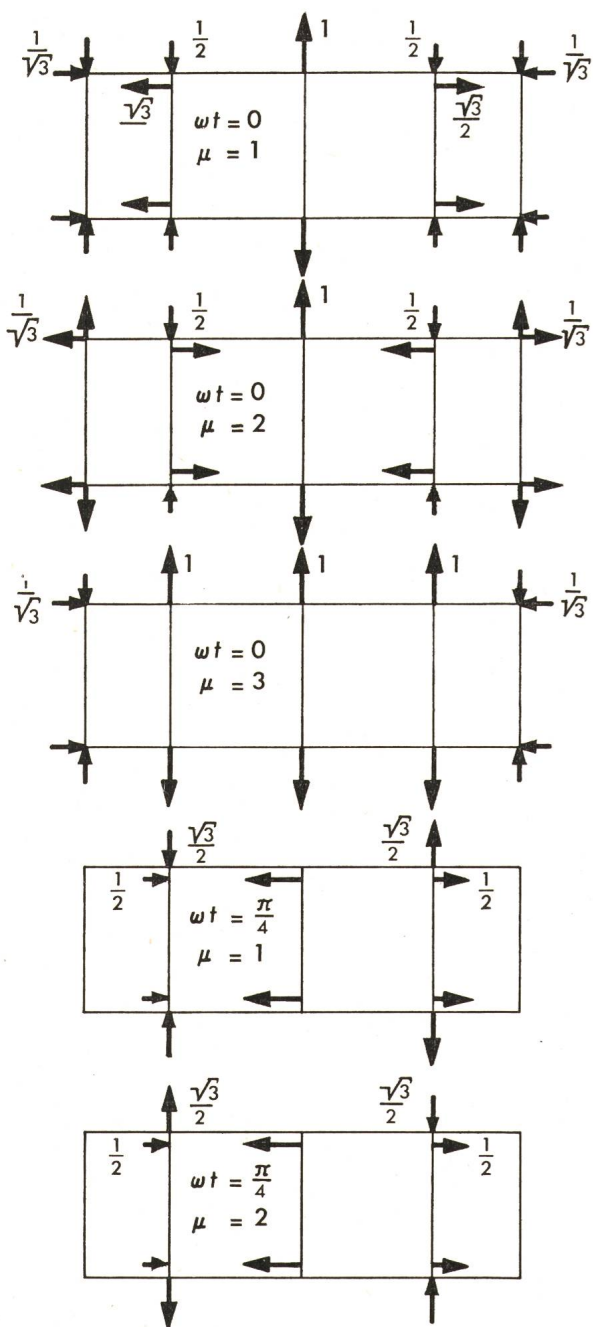
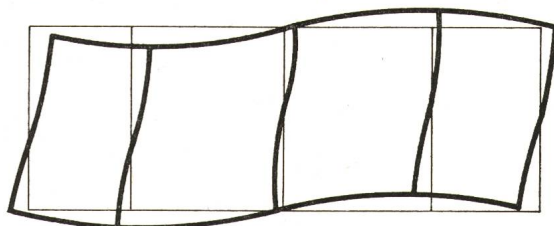
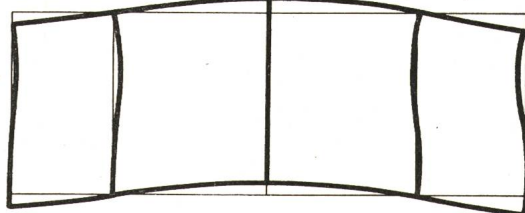


Fig. 5 Momentanwerte der magnetostruktiven Kräftesysteme  
 $\omega t$  Zeitphasenwinkel  
 $\mu$  Ordnungszahl der Harmonischen der magnetostruktiven Dehnung

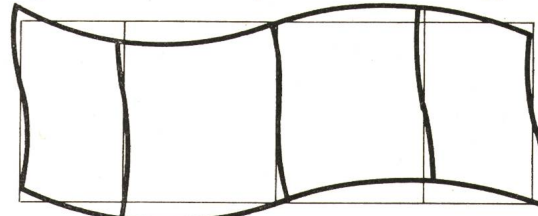
Eigenform Nr.1 Symmetrieklasse  $su/ju$



Eigenform Nr.2 Symmetrieklasse  $ss/ju$



Eigenform Nr.3 Symmetrieklasse  $su/ju$



Eigenform Nr.4 Symmetrieklasse  $ss/ju$

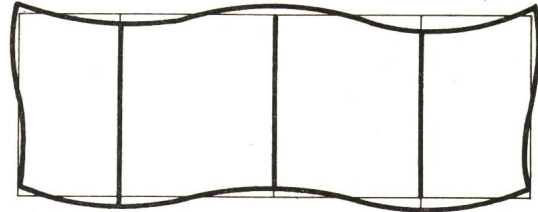


Fig. 6 Die ersten vier Eigenformen des fünfschenkeln Transformator Kerns

metrieforderungen unterwerfen müssen. Obwohl hier stillschweigend eine starre Ausbildung der Kernecken vorausgesetzt wurde und die Betrachtungen sich auf Schwingungen in der Kernebene bei freier Auflagerung beschränken, ist doch anzunehmen, dass das Ziel dieser Arbeit durchaus erreicht ist. Der unter vergleichbaren Voraussetzungen beschriebene Schwingungsmechanismus der Dreischenkeln Kerne wurde in der

Praxis bestätigt, so dass die hier für den Fünfschenkelkern gefundenen Verhältnisse gleichen Erwartungen genügen dürften.

#### Literatur

- [1] H. Jordan: Über den magnetischen Lärm von Drehstrom-Kerntransformatoren. ETZ-A 81(1960)3, S. 97...101.
- [2] W. Baxmann: Zur Theorie des Transformatorlärms magnetischen Ursprungs. Dissertation der Technischen Hochschule Hannover, 1961.
- [3] E. Reiplinger: Beitrag zur Berechnung der Lautstärke von Transformatoren. Dissertation der Technischen Universität Hannover, 1972.
- [4] H. Wienholt: Über mechanische Schwingungen des Eisenkerns von Einphasen-Kerntransformatoren. Dissertation der Technischen Hochschule Hannover, 1960.
- [5] J. Draeger: Ein Beitrag zur Berechnung der Eigenfrequenzen der Kerne von Drehstrom-Kerntransformatoren. Dissertation der Technischen Hochschule Hannover, 1965.
- [6] E. Voss: Über die Berechnung der Eigenfrequenzen der Kerne von Fünfschenkeltransformatoren. Dissertation der Technischen Universität Hannover, 1971.
- [7] P. Matthieu: Über die Berechnung der Eigenschwingungen von Eisenkörpern von Transformatoren. Bull. Oerlikon -(1965)361, S. 1...14.
- [8] H. Jordan, H. Reinke und F. Taegen: Mechanische Eigenfrequenzen von Transformatoren. AEG-Mitt. 52(1962)9/10, S. 445...449.
- [9] M. Kronndl und E. Kronauer: Einige Beiträge zum Problem des Transformatorgeräusches. Bull. Oerlikon -(1963)356, S. 1...15.
- [10] E. Voss: Mechanische Eigenfrequenzen der Kerne von Fünfschenkeltransformatoren. Bull. SEV 63(1972)19, S. 1100...1103.
- [11] R. Richter: Elektrische Maschinen. Bd. 3: Die Transformatoren. 3. Auflage. Basel/Stuttgart, Birkhäuser Verlag, 1963.
- [12] M. Vidmar: Der fünfschenkelige Eisenkern des dreiphasigen Grosstransformators. Arch. Elektrotechn. 25(1931)5, S. 359...382.

#### Adresse des Autors:

Dr.-Ing. Erich Voss, Hedwig-Fichtel-Strasse 18, D-8740 Bad Neustadt/Saale. Der Autor ist Mitarbeiter der Siemens AG, Bad Neustadt. Die Grundlagen dieser Arbeit entstanden während seiner Tätigkeit am Institut für Elektrische Maschinen der TU Hannover.

## Zuverlässigkeit von elektronischen Bauelementen und Systemen

### Bericht über die Informationstagung des SEV am 27. März 1974 in Fribourg

Die Zuverlässigkeit technischer Einrichtungen, in der Publikation 271 der Internationalen Elektrotechnischen Kommission als die Wahrscheinlichkeit definiert, dass die Einrichtung eine verlangte Funktion unter gegebenen Bedingungen während einer gegebenen Zeit erfüllt, hat naturgemäss seit eh und je eine wichtige Rolle gespielt. Sie ist eines der Attribute der Qualität von Erzeugnissen. Ein Mindestmass von Zuverlässigkeit ist nicht nur manchmal die unabdingbare Voraussetzung, dass gewisse technische Projekte überhaupt Aussicht auf Erfolg haben, sondern sie spielt auch im Wettstreit um den Absatz von Produkten eine hervorragende Rolle, indem sie in die Wirtschaftlichkeit eingeht.

Früher war die Zuverlässigkeit meist eine Angelegenheit des Praktikers, der auf Grund der Erfahrung und eventueller Versuche eine Prognose wagen konnte. Man kalkulierte auch schon Ruhezeiten für die Wartung und allfällige Reparaturen ein und sorgte, wo nötig und möglich, durch Mehrfachausrüstung, also Redundanz, für möglichst unterbrechungsfreien Dienst. Bei komplexeren Einrichtungen, nicht zuletzt auf dem Gebiet der Elektronik, und unter dem Druck technischer wie wirtschaftlicher Anforderungen wurde es aber mehr und mehr nötig, den Problemen der Zuverlässigkeit systematisch und daher auch mit theoretischen Methoden zu Leibe zu rücken. Besonders im Laufe der letzten etwa zwei Dezennien hat eine stürmische Entwicklung stattgefunden, die auch heute noch keineswegs abgeschlossen ist. Die an der Informationstagung des SEV gehaltenen Vorträge geben einen Einblick in die theoretischen Grundlagen und eine Reihe von praktischen Anwendungen.

An den Anfang gestellt war ein Doppelreferat von A. Biro lini, Institut für Technische Physik, ETHZ, über *Aufgaben und Methoden der Zuverlässigkeitstheorie*, mit den Teilreferaten *Notations de base, fiabilité d'un dispositif und Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit einfacher Systeme*. Es werden die grundlegenden Probleme der Zuverlässigkeitstheorie eingeführt und deren Lösung erläutert. Für einige dieser Probleme werden die Wahl und die Gültigkeitsgrenzen der verwendeten mathematischen Modelle untersucht. Nach der Definition der Begriffe Zuverlässigkeit und Ausfall folgt die eingehende Untersuchung der Probleme der Bestimmung der Vertrauensgrenzen und der Nachprüfung einer unbekanntenen Zuverlässigkeit. Im weiteren werden die Begriffe ausfallsfreie Arbeitszeit und Ausfallrate eingeführt und die Probleme der empirischen Bestimmung von Verteilungsfunktionen behandelt. Ferner wird das Zeitverhalten einer reparierbaren Baueinheit, im Hinblick auf die Berechnung der Zuverlässigkeit und der Verfügbarkeit, untersucht. Diese Berechnungen werden dann verallgemeinert, um den Fall eines Systems ohne Redundanz einzuschliessen. Die Zuverlässigkeit und die punktweise Verfügbarkeit einer k- aus n-Redundanz werden unter der Annahme untersucht, dass die ausfallsfreien Arbeitszeiten und die Reparaturzeiten exponentiell verteilt sind. Der Fall der 1- aus 2-Redundanz wird dann für allgemeine Verteilungsfunktionen be-

handelt, und schliesslich werden einige Methoden zur Untersuchung komplexer Systeme kurz beschrieben.

Im zweiten Teil des Vortrages wird das Zeitverhalten einiger Systeme einfacher Struktur untersucht. Bei der Behandlung des Falles einer reparierbaren Baueinheit wird der Begriff der Verfügbarkeit eingeführt. Es werden dann ein System ohne Redundanz und redundante Baugruppen behandelt. Für die reparierbare Baueinheit und die reparierbare Doublierung wird auf einige wichtige neue Resultate hingewiesen.

F. Winiger, Faselec AG, Zürich, orientierte über *Fehlerursachen bei schadhafte Transistoren und integrierten Schaltungen*. Nach einigen Bemerkungen über die üblichen, zwischen Lieferant und Kunde vereinbarten AQL-(Acceptance Quality Level-) Werte und die für die Komponentenzuverlässigkeit massgebende MTBF (Mean Time Between Failures) ging der Referent hauptsächlich auf die sehr vielfältigen möglichen Ursachen des Versagens von Transistoren und integrierten Schaltungen ein, das teils in einem Totalausfall, teils in einem Abwandern bestimmter charakteristischer Grössen über zulässige Grössen hinaus bestehen kann. Für die ersteren liegt der Fehler oft in Montagemethoden, bei den letzteren spielen insbesondere Verunreinigungen, Fremdstoffe, eine eminente Rolle. Es werden Verfahren geschildert, wie die auf die Lebensdauer sich nachteilig auswirkenden Einflüsse vermindert werden können. Die Ermittlung der MTBF ist wegen der hohen erreichbaren Werte aufwendig; beschleunigte Prüfungen mit Überbeanspruchung zur Zeitraffung müssen vorsichtig bewertet werden.

In seinem Vortrag über die *Methodes de l'évaluation de la fiabilité des condensateurs* berichtete P. L. Boyer, Condensateurs Fribourg S.A., Fribourg, über die Probleme, die sich im Zusammenhang mit der Herstellung und der Verwendung von Kondensatoren gewünschter Zuverlässigkeit stellen. Ausgehend von den projektierten Daten hat der Fabrikant unter Beachtung der Wirtschaftlichkeit die richtige Materialauswahl zu treffen und für einen geeigneten Fabrikationsprozess mit dauernder Überwachung vom eingehenden Rohstoff bis zum Fertigprodukt zu sorgen. Anhand der erhaltenen Prüfungsergebnisse muss wiederum auf einzelne Operationen korrigierend eingewirkt werden. Die Bedeutung der Sorgfalt, die zur Erzielung einer bestimmten Zuverlässigkeit auf den ganzen Fabrikationsprozess angewendet werden muss, zeigt deutlich, dass in einem Zertifizierungssystem für die Güte der Produkte nicht nur vom fertigen Produkt ausgegangen werden kann, sondern die Vertrauenswürdigkeit des Herstellers miteinbezogen werden muss.

J. Mattli, SEV, berichtete kurz über Ziel und Organisation des *Cenelec Electronic Components Committee (CECC)*, das im europäischen Rahmen ein Gütebestätigungssystem für Bauelemente der Elektronik aufgezogen hat. Durch entsprechende nationale Organisationen können Hersteller solcher Komponenten eine Bestätigung der Güte bzw. der Zuverlässigkeitsklasse ihrer