Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 65 (1974)

Heft: 13

Artikel: Die Anregung von Eigenschwingungsformen bei Transformatorkernen

Autor: Voss, E.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915433

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: 16.01.2026

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

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 magnetostriktiven 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.

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 magnetostriktiven 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].

Als Massnahmen zur Geräuschminderung sind hauptsächlich zu erwähnen:

a) Verwendung geräuscharmer Lüfter;
b) Dämpfung und Dämmung des Schalls durch geeignete Ummantelung des Transformators;
c) Begrenzung der magnetostriktiven Kräfte. Wegen des Wunsches nach wirtschaftlicher Ausnutzung des zur Verfügung stehenden Kernquerschnitts ist diese Massnahme in der Regel abzulehnen;
d) Günstige Ausbildung der Überlappungsgebiete und Berücksichtigen des Einflusses der mechanischen Verspannung des Kerns [3] [1]);
e) Vermeidung von Resonanzen.

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 Geräuschtoleranz 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 Kerns in einen unkritischen Bereich verlegt werden kann. Insbesondere die Verwendung von EDV-Anlagen erlaubt eine exakte Bestimmung der Eigenfrequenzen [6; 7].

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

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

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:

$$\sum_i F_i \, Y_i \neq 0 \tag{1}$$

Der physikalische Hintergrund wird klar, wenn man Gl. (1) mit $\omega_0/2$ multipliziert und sich auf die Betrachtung der Scheitelwerte beschränkt. Dabei ist ω_0 die der Eigenform entsprechende Eigenkreisfrequenz. Die Schwinggeschwindigkeit ist mit v bezeichnet.

$$\frac{\omega_0}{2} \sum_i \hat{F}_i \, \hat{Y}_i = \frac{1}{2} \sum_i \hat{F}_i \, \hat{v}_i = \sum_i \hat{P}_i > 0 \tag{2}$$

Die Leistung P_i 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.

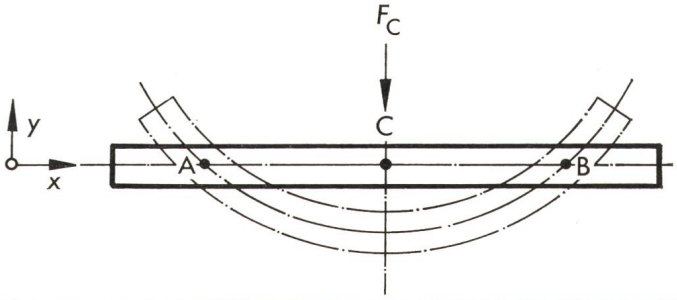

Fig. 1 Erste Eigenform eines frei-frei gelagerten schwingenden Stabes

F_C Erregerkraft
A, B Schwingungsknotenpunkte
C Kraft-Angriffspunkt

3. Die magnetostriktiven Dehnungen und Kräfte

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

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

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 magnetostriktiven Dehnung von der Induktion $\hat{B}$ zu entnehmen. Da nur der Betrag der Induktion von Bedeutung ist, kann die magnetostriktive Dehnung mathematisch als Summe von geraden Potenzen der Induktion dargestellt werden:

$$\varepsilon_{(t)} = \sum_{\nu=1}^{n} k_\nu b_{(t)}^{2\nu} \tag{4}$$

Die Koeffizienten k_ν nehmen mit wachsender Ordnungszahl ν 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 Magnetostriktion wie folgt summieren [9]:

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

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

Die Zergliederung für $\nu = 1$ und $\nu = 2$ ergibt:

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

Jede μ-te Harmonische trägt mit einem bestimmten Gewicht zur Gesamtmagnetostriktion bei. Um dieses zu ermitteln, ist eine Betrachtung der Induktionsverteilung im Transformatorenkern notwendig.

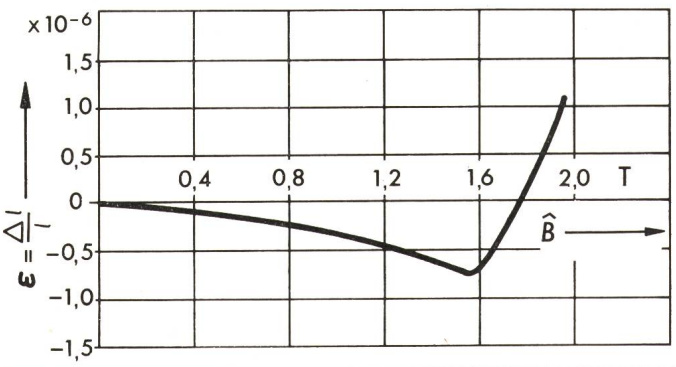

Fig. 2 Wechselfeldmagnetostriktion kornorientierter kaltgewalzter Bleche in Abhängigkeit von der Induktion (nach [3])

ε relative magnetostriktive Dehnung
l Schenkellänge
$\hat{B}$ Induktionsamplitude

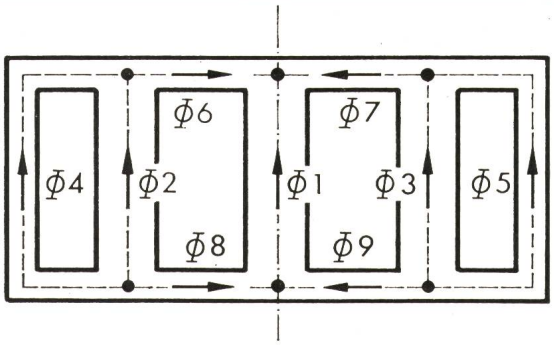

Fig. 3 Magnetische Flüsse Φ im Fünfschenkeltransformator

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

Es wird ein leerlaufender Transformator betrachtet, dessen Erregerwicklung im Stern mit festangeschlossenem Mittelpunktleiter (oder im Dreieck) geschaltet ist. Die verschiedenen Flüsse sind nach Fig. 3 bezeichnet. Bei symmetrischen Netzspannungen ist die Grösse und Phasenlage der drei Schenkelflüsse Φ_1, Φ_2, Φ_3 bekannt (Fig. 4). Zwischen den Flüssen gelten in Anlehnung an das Kirchhoffsche Gesetz die Gleichungen:

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

Die Differenz benachbarter Gleichungen ergibt

$$\Phi_6 = -\Phi_8 \qquad \Phi_7 = -\Phi_9 \tag{8}$$

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

$$\Phi_4 = -\Phi_5 \tag{9}$$

Das Gleichungssystem (7) zeigt die Unabhängigkeit zwischen Φ_2 und Φ_4 bzw. Φ_5. Dies führt zu dem Schluss, dass die Zeiger Φ_4 und Φ_5 senkrecht auf dem Zeiger Φ_2 stehen – sich also auf der Verbindungslinie BC bewegen. Die Zeiger Φ_6 und Φ_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:

$$|\Phi_4| = |\Phi_6| \qquad |\Phi_5| = |\Phi_7| \tag{10}$$

Aus Fig. 4 ist nun leicht abzulesen:

$$\frac{\Phi_2}{\Phi_4} = \frac{\sqrt{3}}{1} \qquad \Phi_4 = \frac{\Phi_2}{\sqrt{3}} \tag{11}$$

Der Jochfluss wäre also um den Faktor $\sqrt{3}$ kleiner als die Schenkelflüsse. Daraus resultiert eine Verringerung des Jochquerschnitts gegenüber dem Schenkelquerschnitt um den gleichen Faktor. Dieser Wert wird in der Praxis ungefähr eingehalten.

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 bekannt sind, gewinnt man ohne weiteres die entsprechenden Induktionen:

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

$$b_{2(t)} = \hat{B}_1 \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \tag{12}$$

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

$$b_{4(t)} = \hat{B}_4 \cos\left(\omega t - \frac{3\pi}{2}\right) = -\, b_{5(t)} \tag{13}$$

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

$$b_{7(t)} = \hat{B}_6 \cos\left(\omega t - \frac{7\pi}{6}\right) = -\, b_{9(t)} \tag{14}$$

Mit Hilfe von Gl. (5) können die durch die Induktionen hervorgerufenen magnetostriktiven 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 μ-te Komponente die Kenntnis der relativen Dehnungsamplituden ε_μ:

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

$$\varepsilon_{2\mu(t)} = \hat{\varepsilon}_{1\mu}\left[-\frac{1}{2}\cos 2\mu\omega t \mp \frac{\sqrt{3}}{2}\sin 2\mu\omega t\right] \tag{15}$$

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

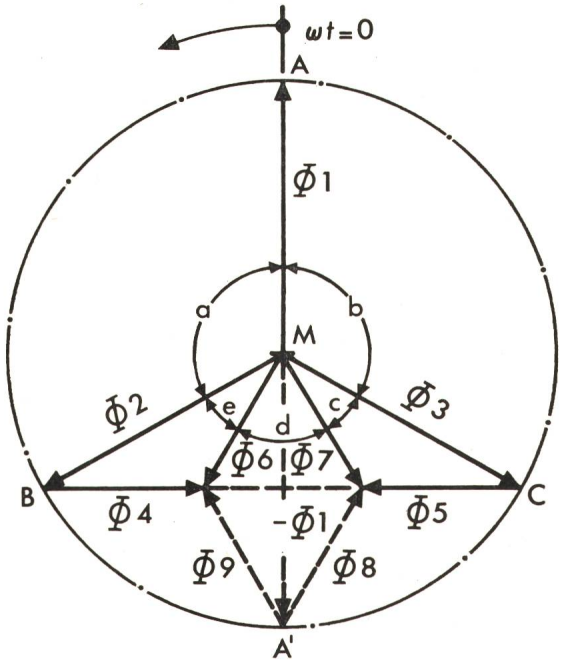

Fig. 4 Zeigerdiagramm der magnetischen Flüsse

Φ	magnetische Flüsse
A, B, C, A'	Hilfspunkte im Fluss-System
M	Mittelpunkt des Fluss-Systems
ωt	Zeitphasenwinkel
$a = 120^0$	$d = 60^0$
$b = 120^0$	$e = 30^0$
$c = 30^0$	

Relative Amplituden der ersten drei Harmonischen der magnetostriktiven Dehnung **Tabelle I**

	$\omega t = 0$			$\omega t = \pi/4$			$\frac{A_{Joch}}{A_{Schenkel}}$
	$\mu = 1$	$\mu = 2$	$\mu = 3$	$\mu = 1$	$\mu = 2$	$\mu = 3$	
$\varepsilon_{\mu 1}/\hat{\varepsilon}_{\mu 1}$	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 $\mu = 1, 4, 7 \ldots$; 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:

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

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 antimetrisch zur Jochrichtung schwingen (Fig. 6).

Die Summe der Produkte aus Kräften nach Fig. 5 und Ausschlägen einer antimetrischen Eigenform wird immer Null ergeben. Diese Erkenntnis lässt wie beim Dreischenkelkern die ausschliessliche Anregung der zur Jochrichtung symmetrischen Eigenformen erkennen. Von den in Fig. 6 dargestellten vier Eigenformen kann also nur die Eigenform Nr. 4 magnetostriktiv 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 Fünfschenkelkern 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 Symmetrieforderungen 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 Dreischenkelkerne wurde in der

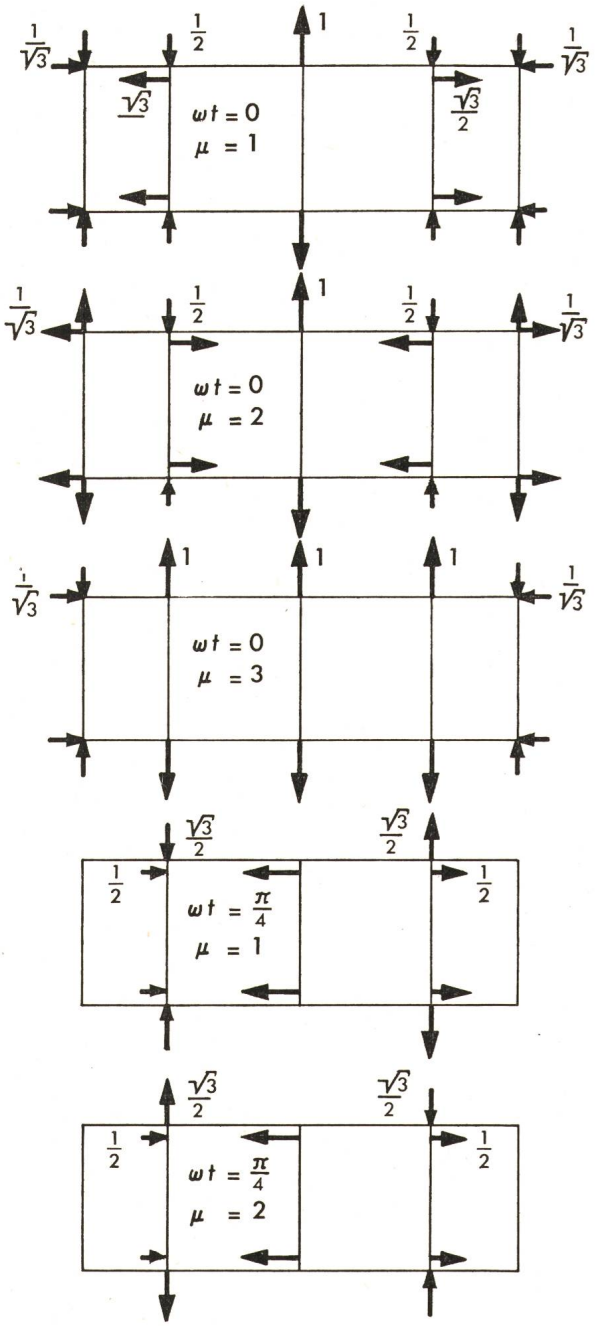

Fig. 5 Momentanwerte der magnetostriktiven Kräftesysteme
ωt Zeitphasenwinkel
μ Ordnungszahl der Harmonischen der magnetostriktiven Dehnung

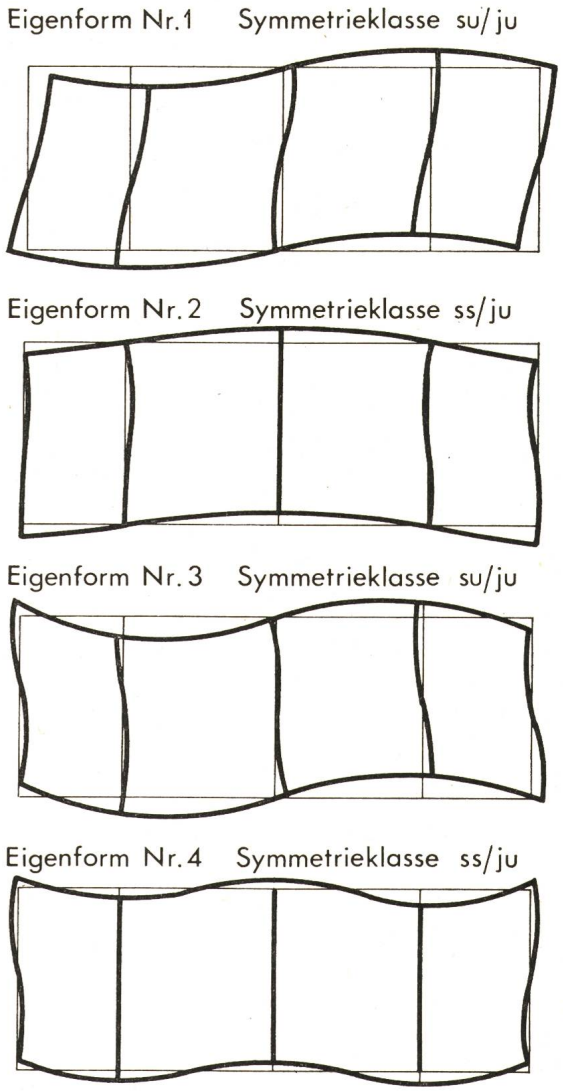

Fig. 6 Die ersten vier Eigenformen des fünfschenkeligen Transformatorkerns

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

Literatur

[1] *H. Jordan:* Über den magnetschen Lärm von Drehstrom-Kerntransformatoren. ETZ-A 81(1960)3, S. 97...101.

[2] *W. Baxmann:* Zur Theorie des Transformatorenlärms 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. Krondl* und *E. Kronauer:* Einige Beiträge zum Problem des Transformatorengeräusches. 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 Machinen 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. Birolini, 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 unbekannten 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 ausfallfreien Arbeitszeiten und die Reparaturzeiten exponentiell verteilt sind. Der Fall der 1- aus 2-Redundanz wird dann für allgemeine Verteilungsfunktionen behandelt, 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 schadhaften 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 Prüfungsresultate 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 Zertifikationssystem 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