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: 10

Artikel: Norm- und Schaltstoßspannungsprüfung von Transformatoren und Kompensations-Drosselspulen : digitale Berechnung der Spannungswellenform und Diagramme zur Dimensionierung des Stosskreises

Autor: Papachristos, G. / Woschnagg, E.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915404

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: 09.08.2025

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

BULLETIN des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
de l'Association Suisse des Electriciens
des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke
de l'Union des Centrales Suisses d'électricité

Elektrotechnik – Electrotechnique

Norm- und Schaltstoßspannungsprüfung von Transformatoren und Kompensations-Drosselspulen. Digitale Berechnung der Spannungswellenform und Diagramme zur Dimensionierung des Stosskreises

Von G. Papachristos und E. Woschnagg

621.317.333.8: 621.314.21

Die Wellenformen der im Prüffeld mit dem Stossgenerator an induktiven Prüflingen erzeugten Norm- und Schaltstoßspannungen lassen sich mit Hilfe des Digitalrechners mit geringem Zeitaufwand bestimmen. Dabei wird die Differentialgleichung höherer Ordnung mittels numerischer Methoden gelöst. Die theoretischen Unterlagen für die Berechnung, sowie Beispiele von Stosskreisen mit bis zu fünf voneinander unabhängigen Energiespeichern werden angegeben. Abgeleitete Diagramme für Schaltstoss und Normstoss 1,2 | 50 – welche die VDE-Kurven als Sonderfall beinhalten – gestatten, die Dimensionierung des Stosskreises auch mit induktivem Prüfling auf einfache Art durchzuführen.

Les formes d'ondes des tensions normales et de choc de manœuvre, produites sur plate-forme d'essais à des transformateurs ou bobines d'inductance par un générateur de choc, peuvent être rapidement déterminées avec un calculateur électronique, l'équation différentielle d'ordre élevé étant résolue par des méthodes numériques. On indique les bases théoriques du calcul, ainsi que des exemples de circuits de choc comportant jusqu'à cinq accumulateurs d'énergie indépendants les uns des autres. Des diagrammes ainsi obtenus pour choc de manœuvre et choc normal 1,2 | 50 – les courbes selon le VDE étant un cas spécial – permettent de procéder avec simplicité au dimensionnement du circuit de choc, également dans le cas d'un élément inductif.

1. Einleitung

Transformatoren und Kompensationsdrosselspulen werden im Prüffeld Stoßspannungsprüfungen unterzogen. Grundsätzlich unterscheidet man zwei Arten von Stossprüfungen, welche sich in erster Linie in der Wellenform der Stoßspannung unterscheiden und jeweils der Beanspruchung im Betrieb mit atmosphärischen (äusseren) und Schalt- (inneren) Überspannungen Rechnung tragen (im folgenden Normstoss- und Schaltstossprüfung genannt). Die charakteristischen Werte dieser Wellenformen sind in den diesbezüglichen Vorschriften festgelegt oder werden zwischen Hersteller und Abnehmer besonders vereinbart.

Die üblicherweise verlangte Normstosswelle soll eine Stirnzeit von 1,2 µs ± 30 % und eine Rückenhalbwertszeit von 50 µs ± 20 % aufweisen. Die Stirndauer der Schaltstosswelle muss hingegen ≧ 100 µs sein. Bei Transformatoren soll weiter die Schaltstoßspannung während mindestens 200 µs mehr als 90 % des Scheitelwertes betragen und der erste Spannungsnulldurchgang frühestens nach 1000 µs erfolgen. Bei Kompensationsdrosselspulen werden die beiden letzteren Zeitwerte besonders vereinbart, und zwar bereits bei der Offertabgabe.

Zur Einstellung der verlangten zeitlichen Spannungsverläufe ist eine entsprechende Dimensionierung des Stosskreises notwendig, welche meistens nicht einfach durchgeführt werden kann. Die bis jetzt für Stoßspannungsprüfungen existierenden Dimensionierungsunterlagen beziehen sich nur auf den Normstoss bei kapazitivem oder Ohmschem Prüfling. Somit geschieht in der Praxis die Bestimmung der Elemente des Stosskreises mit induktivem Prüfling nur nach groben Schätzungen und ist vorwiegend den Erfahrungen des jeweiligen Prüffeldingenieurs mit ähnlichen, bereits geprüften Objekten überlassen. Die in der Mehrzahl der Fälle notwendigen Korrekturen erfolgen dann bei niedriger Spannung mit der Hochspannungsanlage und können oft sehr zeitraubend und kostspielig, zudem in Anwesenheit des wartenden Abnahmebeamten ziemlich unangenehm sein.

In der vorliegenden Arbeit wurden Diagramme abgeleitet, welche bei Transformatoren und Drosselspulen die für eine Normstosswelle 1,2 | 50 notwendigen Werte der Stosskreisparameter abzulesen erlauben. Ein weiteres Diagramm liefert bei Drosselspulen für einen gewählten Stosskreis die charakteristischen Daten der erreichbaren Schaltstosswelle.

Die Anwendung ist äusserst einfach und ermöglicht auch weniger erfahrenen Prüffeldingenieuren, mit minimalem zeitlichen Aufwand die Dimensionierung genügend genau vornehmen zu können.

Die Genauigkeit wurde mittels des Repetitionsstossgenerators – wo eine genaue Einstellung der Stosskreiselemente möglich ist – an Modellschaltungen überprüft, wobei praktisch keine Abweichungen vom Sollwert gefunden wurden. Der Vergleich mit zahlreichen mittels der Hochspannungsanlage durchgeführten Prüfungen ergab, dass bei einer vom tatsächlichen Wert nicht zu stark abweichenden Schätzung der Prüflingseingangskapazität und der Streuinduktivität des Stosskreises, die erhaltenen Wellenformen weit innerhalb der nach den Vorschriften zulässigen Toleranzen liegen.

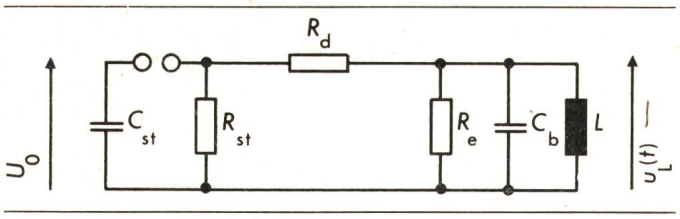


Fig. 1 Dreispeicherkreis bei der Stossprüfung von induktiven Prüflingen

C_{st} Stosskapazität
C_b gesamte Belastungskapazität
L Prüflingsinduktivität
R_d Dämpfungswiderstand
R_{st} Entladewiderstand des Stossgenerators
R_e Entladewiderstand des Stossgenerators bzw. externer Entladewiderstand
U_0 Summenladespannung des Stossgenerators
$u_L(t)$ zeitlicher Spannungsverlauf an der Eingangsklemme des Prüflings

2. Theoretische Grundlagen

Als erstes sollen folgende, für die numerische Berechnung der Stoßspannung an den Klemmen des Prüflings benötigten Angaben zusammengestellt werden:

- Annahme eines Ersatzschaltbildes für den Stosskreis;
- Aufstellen der Differentialgleichung für die Stoßspannung;
- Formulieren der Anfangsbedingungen bei Stossauslösung.

2.1 Dreispeicher-Stosskreis

Als einfachstes Ersatzschaltbild für die Stossprüfung von induktiven Objekten ist der in Fig. 1 dargestellte Dreispeicherkreis mit konzentrierten, konstanten Elementen abzunehmen. Es gilt sowohl für Normstoss- als auch für Schaltstossprüfungen, wobei im letzteren Fall der Entladewiderstand R_e meist überhaupt nicht vorhanden und R_{st} so hochohmig ist, dass beide als unendlich gross angesetzt werden können. Der Prüfling wird im Ersatzschaltbild durch die Parallelschaltung einer konstanten Induktivität L und deren Eingangskapazität dargestellt. Die Annahme der konstanten Elemente des Stosskreises trifft praktisch nur in einem Fall, nämlich bei der Schaltstossprüfung von Transformatoren, nicht genügend genau zu, wo infolge der nichtlinearen Magnetisierungskennlinie die Induktivität L sich zeitlich beträchtlich ändert.

Der Stoßspannungsverlauf $u_L(t)$ an den Klemmen des Prüflings L wird für den vorliegenden Kreis durch eine homogene Differentialgleichung 3. Ordnung beschrieben:

$$a_3 \dddot{u}_L + a_2 \ddot{u}_L + a_1 \dot{u}_L + a_0 u_L = 0 \tag{1}$$

Ihre Koeffizienten sind positiv reell und zeitunabhängig:

$$\left.\begin{aligned} a_3 &= R_d C_b \\ a_2 &= 1 + \frac{R_d}{R_e} + \left(1 + \frac{R_d}{R_{st}}\right)\frac{C_b}{C_{st}} \\ a_1 &= \frac{R_d}{L} + \left[1 + \left(1 + \frac{R_d}{R_{st}}\right)\frac{R_{st}}{R_e}\right]\frac{1}{R_{st} C_{st}} \\ a_0 &= \left(1 + \frac{R_d}{R_{st}}\right)\frac{1}{L C_{st}} \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

Der Lösungsansatz $u_L = Ae^{pt}$ führt Gl. (1) in ihre kubische Stammgleichung

$$a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0 = 0 \tag{3}$$

über, deren Wurzeln sich als strenge Lösung noch, wie folgt, relativ einfach angeben lassen.

2.1.1 Schwingende Stosswelle

Bei positiver Diskriminante $D = \left(\frac{b^2}{4} + \frac{a^3}{27}\right) > 0$ hat Gl. (3) eine reelle und eine konjugiert komplexe Wurzel, die mit Hilfe der bekannten Cardanischen Formel gefunden werden:

$$\left.\begin{aligned} p_0 &= -\delta_0 = -\frac{r}{3} + (\alpha + \beta) \\ \underset{(2)}{p_1} &= -\delta_1 \underset{(-)}{+} j\omega_1 = -\frac{r}{3} - \frac{(\alpha+\beta)}{2} \underset{(-)}{+} j\frac{\sqrt{3}}{2}(\alpha - \beta) \end{aligned}\right\} \tag{4}$$

Darin bedeuten (hier mit $n = 3$):

$$\left.\begin{aligned} r &= \frac{a_{n-1}}{a_n} \qquad s = \frac{a_{n-2}}{a_n} \qquad q = \frac{a_{n-3}}{a_n} \\ a &= s - \frac{r^2}{3} \qquad b = \frac{2r^3}{27} - \frac{rs}{3} + q \\ \alpha &= \sqrt[3]{-\frac{b}{2} + \sqrt{D}} \qquad \beta = \sqrt[3]{-\frac{b}{2} - \sqrt{D}} \end{aligned}\right\} \tag{5}$$

Die Realteile aller Wurzeln sind bei derartigen Stosskreisen immer negativ und stellen Dämpfungskoeffizienten dar, die Imaginärteile sind die Kreisfrequenzen der gedämpften Schwinganteile der Welle [1][1]).

Somit lautet die Zeitgleichung für die schwingende Stossspannungswelle des Dreispeicherkreises:

$$u_L(t) = A e^{-\delta_0 t} - A e^{-\delta_1 t} \cos \omega_1 t - B e^{-\delta_1 t} \sin \omega_1 t \tag{6}$$

Dabei wird vorausgesetzt, dass bei Auslösung des Stosses zur Zeit $t = 0$ der Prüfling spannungs- und stromlos ist. Es gelten dann folgende Anfangsbedingungen:

$$\left.\begin{aligned} u_L(0) &= 0 \\ \dot{u}_L(0) &= \frac{1}{a_n} \\ \ddot{u}_L(0) &= -\frac{r}{a_n} \end{aligned}\right\} \tag{7}$$

Die Spannungswerte und ihre zeitlichen Derivationen wurden auf die Summenladespannung U_0 des Stossgenerators bezogen (per unit). Hier kann bei Bedarf auch ein anderer Massstabfaktor gewählt werden, z. B. wenn es bei der digitalen Berechnung zu einem numerischen Überlauf kommt.

Mit Hilfe der Anfangsbedingungen lassen sich die noch unbekannten Integrationskonstanten von Gl. (6) ermitteln:

$$\left.\begin{aligned} A &= -\frac{1}{a_n} \cdot \frac{\delta_0}{[\omega_1^2 + (\delta_1 - \delta_0)^2]} \\ B &= \frac{(\delta_1 - \delta_0)}{\omega_1} A - \frac{1}{a_n \omega_1} \end{aligned}\right\} \tag{8}$$

2.1.2 Aperiodische Stosswelle

Bei negativer Diskriminante ($D < 0$) besitzt die Stammgleichung (3) nur reelle Wurzeln ($\omega_i = 0$), die wieder nach bekannter strenger Lösungsmethode angegeben werden:

$$\left.\begin{aligned} p_i &= -\delta_i = -\frac{r}{3} + 2\sqrt{-\frac{a}{3}} \cos \frac{[\varphi + (i-1)\,2\pi]}{3} \\ \varphi &= \operatorname{arc\,tg}\left(\frac{2}{b}\sqrt{-D}\right) \qquad i = 1, 2, 3 \end{aligned}\right\} \tag{9}$$

Die Stoßspannung enthält jetzt nur abklingende Verlagerungsglieder:

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

$$u_L(t) = A_1 e^{-\delta_1 t} + A_2 e^{-\delta_2 t} + A_3 e^{-\delta_3 t} \tag{10}$$

Bei gleichlautenden Anfangsbedingungen [Gl. (7)] werden die Koeffizienten:

$$\left.\begin{aligned} A_1 &= \frac{(\delta_2 + \delta_3) - r}{a_n (\delta_1 - \delta_2)(\delta_1 - \delta_3)} \\ A_2 &= \frac{(\delta_1 + \delta_3) - r}{a_n (\delta_1 - \delta_2)(\delta_3 - \delta_2)} \\ A_3 &= -A_1 - A_2 \end{aligned}\right\} \tag{11}$$

In der bisherigen Berechnung wurden die Streuinduktivitäten des Stosskreises vernachlässigt (Stossgenerator, externe Dämpfungswiderstände, Zuleitung zum Spannungsteiler, Zuleitung Spannungsteiler-Prüfling, Entladewiderstände u. a.). Sie sind in Wirklichkeit jedoch immer vorhanden und machen sich bei der Normstossprüfung in den Spannungsoszillogrammen meistens durch unerwünschte, überlagerte hochfrequente Schwingungen in der Nähe des Scheitels bemerkbar, wobei auch die Stirndauer der Welle merklich beeinflusst werden kann. Die Berücksichtigung aller dieser Streuinduktivitäten würde die Rechnung erheblich aufwendiger gestalten, ausserdem musste in den weiter unten abgeleiteten Diagrammen zur Dimensionierung des Stosskreises zwecks Übersichtlichkeit und einfacher Handhabung ohnehin auf detaillierte Darstellung verzichtet werden. Aus diesem Grunde werden nur die Streuinduktivitäten von Stossgenerator, externem Dämpfungswiderstand und Zuleitung zum Spannungsteiler berücksichtigt, wobei der einfache Stosskreis durch eine zusätzliche Induktivität L_s erweitert wird.

2.2 *Vierspeicherkreis*

Als Ersatzschaltbild wird der Kreis nach Fig. 2 zugrundegelegt. Er ist noch mit einem auf der Erdseite in Serie mit der Prüflingsinduktivität geschalteten Ohmschen Widerstand R_s erweitert, welcher bei Wicklungen mit kleiner Induktivität L (US-Wicklungen[1]) grosser Leistung und niedriger Spannung) zur Einhaltung der sonst nicht erreichbaren Rückenhalbwertszeit von 50 µs gemäss Vorschlag der USAS-Vorschriften[2]) vielfach verwendet wird. Dieser Serienwiderstand bleibt unberücksichtigt, wenn man in Gl. (12) und (13) $R_s = 0$ setzt.

Die Stoßspannung gehorcht nun einer Differentialgleichung der Ordnung $n = 4$ mit den Koeffizienten:

$$\left.\begin{aligned} a_4 &= L_\sigma C_b \\ a_3 &= R_d C_b + \frac{L_s}{R_e} + L_s C_b \left(\frac{1}{R_{st} C_{st}} + \frac{R_s}{L}\right) \\ a_2 &= \left[1 + \frac{R_d}{R_e} + \frac{C_b}{C_{st}}\left(1 + \frac{R_d}{R_{st}}\right) + \frac{L_s}{R_e} \cdot \frac{1}{R_{st} C_{st}}\right] + \\ &\quad + \frac{L_s}{L} + \frac{R_s}{L}\left(R_d C_b + \frac{L_s}{R_e} + \frac{L_s}{R_{st}} \cdot \frac{C_b}{C_{st}}\right) \\ a_1 &= \frac{R_d}{L} + \frac{1}{R_{st} C_{st}}\left[1 + \frac{L_s}{L} + \frac{R_{st}}{R_e}\left(1 + \frac{R_d}{R_{st}}\right)\right] + \\ &\quad + \frac{R_s}{L}\left[1 + \frac{R_d}{R_e} + \frac{C_b}{C_{st}}\left(1 + \frac{R_d}{R_{st}}\right) + \frac{L_s}{R_e} \cdot \frac{1}{R_{st} C_{st}}\right] \\ A_0 &= \frac{1}{L C_{st}}\left[\left(1 + \frac{R_d}{R_{st}}\right)\left(1 + \frac{R_s}{R_e}\right) + \frac{R_s}{R_{st}}\right] \end{aligned}\right\} \tag{12}$$

(Die Benennung der Buchstabensymbole ist z. T. in den Legenden zu Fig. 2 und 1 angegeben.)

[1]) US-Wicklungen = Unterspannungs-Wicklungen
[2]) USAS-Vorschriften = United States of America Standards

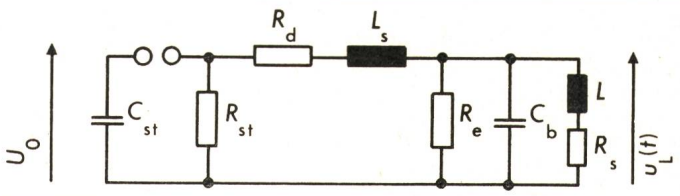


Fig. 2 Vierspeicherkreis bei der Stossprüfung von Induktivitäten unter Berücksichtigung der Streuinduktivität L_s des Stosskreises und eines Seriewiderstandes R_s
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 1

Die Anfangsbedingungen in $t = 0$ bei strom- und spannungslosem Prüfling lauten:

$$\left.\begin{aligned} u_L(0) &= \dot{u}_L(0) = 0 \\ \ddot{u}_L(0) &= 1/a_n \\ \dddot{u}_L(0) &= \frac{R_s/L - r}{a_n} \end{aligned}\right\} \tag{13}$$

Mit dem Digitalrechner lassen sich auch noch viel kompliziertere Verhältnisse ziemlich genau erfassen. Um dies zu veranschaulichen, wird noch der Fall der Schaltstossprüfung bei Transformatoren unter Berücksichtigung ihrer Streuinduktivität und der sekundärseitigen Wicklungseingangskapazität angegeben. Dabei kann auch dem Einfluss der Eisenkernsättigung Rechnung getragen werden (siehe Beispiel in Abschnitt 3.3).

2.3 *Fünfspeicherkreis*

Um bei der Schaltstossprüfung den verlangten langen Rükken erreichen zu können, bleiben die nichtgestossenen Wicklungen bzw. Phasen des Prüflings zwar einseitig an Erde, jedoch offen. Bei Transformatoren befindet sich die Prüflingsstreuinduktivität L_σ in Serieschaltung mit der Eingangskapazität C_s der nichtgestossenen Wicklung und es können gedämpfte Schwingungen angeregt werden, welche im Spannungsoszillogramm erkennbar sind und eine mehr oder weniger ausgeprägte Beeinflussung der Stirndauer bewirken können. In Fig. 3 wird das in diesem Sinne modifizierte Ersatzschaltbild dargestellt, wobei der Stosskreis jetzt fünf unabhängige Energiespeicher erhält. Zur Vereinfachung der Rechnung wurde die gesamte Streuinduktivität des Prüflings als auf der Sekundärseite konzentriert angenommen, wodurch die Nachbildung der Vorgänge nur unwesentlich beeinflusst wird.

Die Koeffizienten der Differentialgleichung für $u_L(t)$ von $n\,(= 5)$-ter Ordnung lauten nun:

$$\left.\begin{aligned} a_5 &= R_d C_b L_\sigma C_s \\ a_4 &= L_\sigma C_s \left[1 + \frac{R_d}{R_e} + \frac{C_b}{C_{st}}\left(1 + \frac{R_d}{R_{st}}\right)\right] \\ a_3 &= R_d C_s \left(1 + \frac{L_\sigma}{L} + \frac{C_b}{C_s}\right) + \frac{L_\sigma C_s}{R_{st} C_{st}}\left[1 + \right. \\ &\quad \left. + \frac{R_{st}}{R_e}\left(1 + \frac{R_d}{R_{st}}\right)\right] \\ a_2 &= 1 + \frac{R_d}{R_e} + \frac{C_s}{C_{st}}\left(1 + \frac{L_\sigma}{L} + \frac{C_b}{C_s}\right)\left(1 + \frac{R_d}{R_{st}}\right) \\ a_1 &= \frac{R_d}{L} + \frac{1}{R_{st} C_{st}}\left[1 + \frac{R_{st}}{R_e}\left(1 + \frac{R_d}{R_{st}}\right)\right] \\ a_0 &= \frac{1}{L C_{st}}\left(1 + \frac{R_d}{R_{st}}\right) \end{aligned}\right\} \tag{14}$$

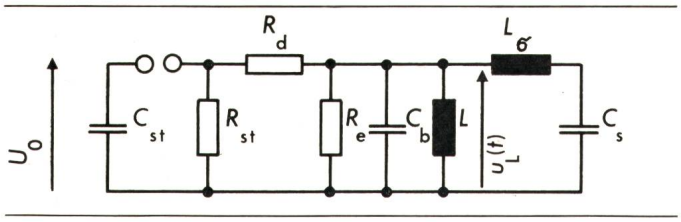


Fig. 3 Fünfspeicherkreis bei der Schaltstossprüfung von Transformatoren unter Berücksichtigung der Streuinduktivität L_σ und der sekundären Eingangskapazität C_s des Prüflings
Bezeichnungen siehe Fig. 1

Im Zeitpunkt $t = 0$ gilt:

$$\left.\begin{aligned} u_L(0) &= 0 \\ \dot{u}_L(0) &= \frac{L_\sigma C_s}{a_n} \\ \ddot{u}_L(0) &= -\frac{L_\sigma C_s}{a_n} r \\ \dddot{u}_L(0) &= \frac{L_\sigma C_s}{a_n}\left(\frac{1}{L_\sigma C_s} + r^2 - s\right) \\ u_L^{IV}(0) &= -\frac{L_\sigma C_s}{a_n}\left(\frac{r}{L_\sigma C_s} + r^3 - 2rs + q\right) \end{aligned}\right\} \quad (15)$$

3. Digitale Berechnung der Stosswellenform

Der vorstehende Abschnitt liefert alle Angaben, die für die Berechnung der Stosswelle mit einem Digitalrechner benötigt werden. Folgende Berechnungsmethoden bieten sich an:

Einmal werden einfach die Spannungswerte aus der Zeitgleichung der Stosswelle $u_L(t)$ in diskreten Zeitpunkten berechnet. Dazu muss diese Funktion aber bekannt sein. Die strenge Lösung für den Dreispeicherkreis wurde im Abschn. 2.1 angegeben. Für die Kreise höherer Ordnung bestimmt man mit numerischen Näherungsverfahren die Wurzeln der Stammgleichung und die Integrationskonstanten.

Ein zweites Verfahren besteht in der direkten numerischen Integration der Differentialgleichung für den Stosskreis, wobei deren formelmässige Lösung $u_L(t)$ nicht bekannt ist. Diese Methode braucht bei gleicher Genauigkeit jedoch ein Vielfaches an Rechenzeit, erlaubt aber die einfache Berücksichtigung von zeitlichen Änderungen der Stosskreisparameter, wie in Abschn. 3.3 gezeigt wird.

3.1 *Bestimmen der Stosswellengleichung $u_L(t)$ mit numerischen Methoden*

3.1.1 Lösen der Stammgleichung

Die Stoßspannung an den Klemmen des induktiven Prüflings gehorcht in einem Stosskreis mit n Speicherelementen einer homogenen Differentialgleichung n-ter Ordnung:

$$a_n u_L^{(n)} + a_{n-1} u_L^{(n-1)} + \ldots + a_1 \dot{u}_L + a_0 u_L = 0 \quad (16)$$

Der exponentielle Lösungsansatz liefert dann für die Stammgleichung ein Polynom n-ten Grades mit positiv reellen Koeffizienten:

$$f(p) = a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \ldots + a_1 p + a_0 = 0 \quad (17)$$

Die n Wurzeln $p_i = -\delta_i \pm j\omega_i$ findet man zahlenwertmässig z. B. mittels Newton-Raphson-Verfahren [2]. Der komplexe Algorithmus dieser Iteration lautet:

$$\bar{p}_{j+1} = \bar{p}_j + \frac{f(\bar{p})}{f'(\bar{p})} \quad (18)$$

worin $f'(\bar{p})$ die erste Abteilung des Polynoms bedeutet. Als Startwert kann $\delta_0 = \omega_0 = 1000$ gewählt werden, womit die Lösung für eine Wurzel meist schon nach einigen wenigen bis höchstens 20 Schritten stabil wird. Anschliessend wird die Ausgangsgleichung durch synthetische Division mit der gefundenen Wurzel reduziert, und zwar um einen Grad, wenn diese reell ist ($\omega_0 = 0$), um zwei Grade bei einer komplexen Wurzel, die ja nur paarweise (d. h. konjugiert $-\delta_1 \pm j\omega_1$) auftreten kann.

Die Rekursionsformeln zur Berechnung der neuen Polynomkoeffizienten sind:

$$\left.\begin{aligned} &b_n = 0 \quad b_{n-1} = a_{n-1} \\ &b_j = a_j - b_{j+1}\,\delta_0 \\ &\text{bzw. } b_j = a_j - 2\,\delta_1\, b_{j+1} - (\omega_1^2 + \delta_1^2)\, b_{j+2} \end{aligned}\right\} \quad (19)$$

3.1.2 Bestimmen der Integrationskonstanten

Das weitere Vorgehen sei am Fall einer schwingenden Welle nach Gl. (6) verfolgt. Die Stammgleichung möge dabei je eine reelle und eine konjugiert komplexe Wurzel besitzen.

Durch die Anfangsbedingungen in $t = 0$ werden die $(n-1)$ Ableitungen der Funktion festgelegt. Aus der folgenden Matrizengleichung lassen sich die Integrationskonstanten A_0, A_1, B_1 dann etwa nach dem Gaußschen Eliminationsverfahren bestimmen [2]:

$$\begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 & \cdots \\ -\delta_0 & \mathrm{Re}(\bar{p}_1) & \mathrm{Im}(\bar{p}_1) & \\ \delta_0^2 & \mathrm{Re}(\bar{p}_1^2) & \mathrm{Im}(\bar{p}_1^2) & \\ \cdot & & & \\ \cdot & & & \\ \cdot & & & \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} A_0 \\ A_1 \\ B_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} u_L(0) \\ \dot{u}_L(0) \\ \ddot{u}_L(0) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{vmatrix} \quad (20)$$

Die Elemente der links stehenden Matrix ergeben sich bereits während der Newton-Raphson-Iteration. Damit die Rundungsfehler möglichst wenig ins Gewicht fallen, sollen auch ihre Spalten so angeordnet werden, dass jeweils der grösste Wert als Pivot erscheint.

Damit ist nun die Zeitgleichung der Stoßspannung $u_L(t)$ numerisch bestimmt und der Verlauf der Welle kann berechnet werden.

In Fig. 4b wurde als Beispiel ein Stosskreis mit folgenden Elementen berechnet.

$L = 100$ mH $\quad R_d = 245\ \Omega$
$L_s = 100\ \mu$H $\quad R_e = \infty$
$C_{st} = 23$ nF $\quad R_{st} = \infty$
$C_b = 2$ nF

Die Rechnung ergab:

$-\delta_1 \pm j\,\omega_1 = -1037 \pm j\,19974$
$-\delta_2 \pm j\,\omega_2 = -1{,}224\ 10^6 \pm j\ 1{,}984.10^5$
$A_1 = -0.921 \quad B_1 = -0.5673$
$A_2 = +0{,}921 \quad B_2 = -0{,}0395$

$T_s/T_r = 1{,}14/49\ \mu$s. Die Überprüfung der Wellenform mit dem Repetitionsstossgenerator an einem Modellkreis ergab $T_s/T_r = 1{,}2/49\ \mu$s (Fig. 4a).

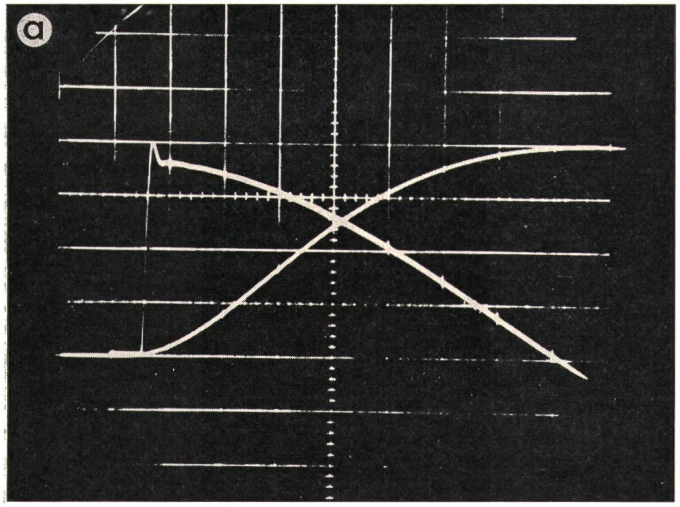
3.2 *Berechnung der charakteristischen Werte der Stoßspannung*

Im allgemeinen ist es nicht notwendig, den gesamten Verlauf der Welle zu berechnen, da nur ihre Kenngrössen nach Fig. 5 interessieren: 30- und 90%-Punkte der Stirn zur Be-

stimmung der normierten Stirnzeit, Scheitelpunkt, 90%-Wert im Rücken zur Bestimmung der Zeitdauer, während der die Spannung grösser als 90 % des Scheitelwertes bleibt, Rückenhalbwert, und sofern vorhanden, Nulldurchgang und Scheitelwert der negativen Halbschwingung.

Das Suchverfahren wurde bereits an anderer Stelle beschrieben [3]. Als erster ist der Scheitelpunkt der Welle zu suchen, der dann als Bezugspunkt für die übrigen dient. Er liefert gleichzeitig den Ausnutzungsgrad η der Schaltung. Man geht dabei von $t = 0$ aus und berechnet mit einer Anfangsschrittweite von Δt_0 (= 10 µs bei Normstoss, 100 µs bei Schaltstoßspannung) jeweils in konstanten Zeitintervallen den Funktionswert $u_L(t + \Delta t_0)$. Nach Überschreiten des Maximums wird das Vorzeichen umgekehrt und die Schrittweite 10fach verfeinert, $\Delta t_{i+1} = -\Delta t_i/10$ usw. bis zur gewünschten Genauigkeit. Alle übrigen Punkte werden auf ähnliche Weise berechnet, zuerst im Rücken der Welle fortschreitend, dann nochmals in $t = 0$ beginnend für die Stirn.

Ein entsprechendes Programm benötigt z. B. zu seiner Ausführung auf einem Kleinrechner (8K) und Ausdrucken auf einer Fernschreibmaschine weit weniger als eine Minute.



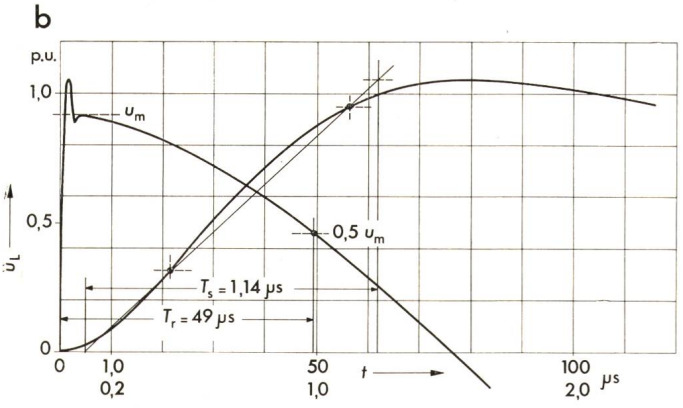


Fig. 4 Beispiel für die Normstossprüfung an einem Einphasentransformator (Modellkreis)

a Oszillogramm der Stoßspannungswelle Zeitmaßstab: 0,2 bzw. 10 µs/E

b berechneter Spannungsverlauf $u_L(t)$ (Verfahren nach Abschnitt 3.1)

u_L Spannung an der Klemme des Prüflings
T_r Stirnzeit
T_s Rückenhalbwertszeit
t Zeit
u_m Spannungsmaximum bei Vernachlässigung der Überschwingung

3.3 *Numerische Integration der Differentialgleichung*

Die Bestimmung der Stoßspannungsgleichung $u_L(t)$ mit ihren Exponenten und Koeffizienten wird durch direkte numerische Integration der Differentialgleichung (16) umgangen. Diese wird dabei z. B. nach dem Verfahren von *Runge-Kutta-Gill* in ein System von n simultanen Differentialgleichungen erster Ordnung zerlegt [2]. Als Startwerte für die Integration müssen wieder die Anfangsbedingungen für den Stosskreis in $t = 0$ vorgegeben werden.

Um gute Genauigkeit zu erreichen, ist als Schrittweite hier etwa $\Delta t = T_s/100$ zu wählen. Da aber die gesamte Welle durchgerechnet werden muss, beträgt die Rechenzeit mehrere Minuten. Diese Methode wird jedoch vorteilhaft angewendet, wenn die Stosskreisparameter während der Stossprüfung nicht konstant bleiben, so dass Koeffizienten und Randbedingungen der Differentialgleichung nach jedem Integrationsschritt laufend angepasst werden müssen.

Als Beispiel wurde eine Schaltstoßspannungswelle an einem Einphasen-Autotransformator unter Berücksichtigung der Sättigung des Eisenkernes berechnet. Die Induktivität L in Fig. 3 ist dabei entsprechend der Magnetisierungskurve des

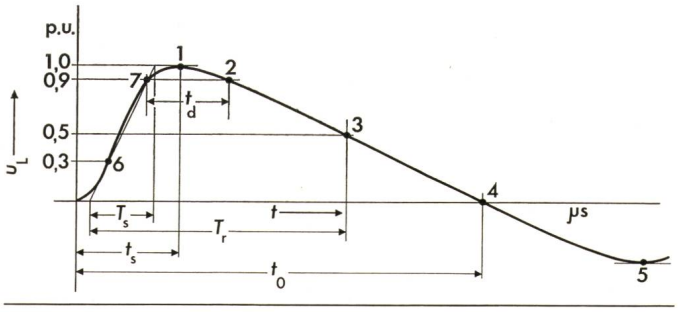


Fig. 5 Charakteristische Grössen einer Stoßspannungswelle

Normstoss:
T_s Stirnzeit
T_r Rückenhalbwertszeit

Schaltstoss:
t_0 Zeit bis zum 1. Nulldurchgang
t_d Zeit während Spannung > 90 % u_m
t_s Stirnzeit
u_m Spannungsmaximum

Kernbleches induktions- und somit indirekt zeitabhängig. Die Induktion $B(t)$ wächst mit der Spannungszeitfläche, ausgehend vom Remanenzwert B_0, der durch die magnetische Vorgeschichte bestimmt ist:

$$B(t) = B_0 + \frac{1}{NA} \int_0^t u_L(t)\,\mathrm{d}t \qquad (21)$$

N Windungszahl
A Eisenkernquerschnitt

Diese Zeitgleichung wird für die numerische Rechnung durch eine Stufenlinie angenähert, so dass sich also L nach jedem Integrationsschritt sprunghaft ändert. Demnach sind in Gl. (14) nach jedem Intervall alle jene Koeffizienten, welche L enthalten, zu korrigieren ($a_0 \ldots a_3$). Dies wird auch für die zeitlichen Derivationen der Stoßspannung nötig, welche ja die Anfangsbedingungen für den nächsten Schritt bilden. Auch bei solcher, in kleinsten Schritten angenommen sprunghafter Änderung einzelner Stosskreisparameter können sich aber die Ströme durch die Induktivitäten sowie die Spannungsabfälle über den Kapazitäten nur stetig ändern. Daraus folgt, dass im

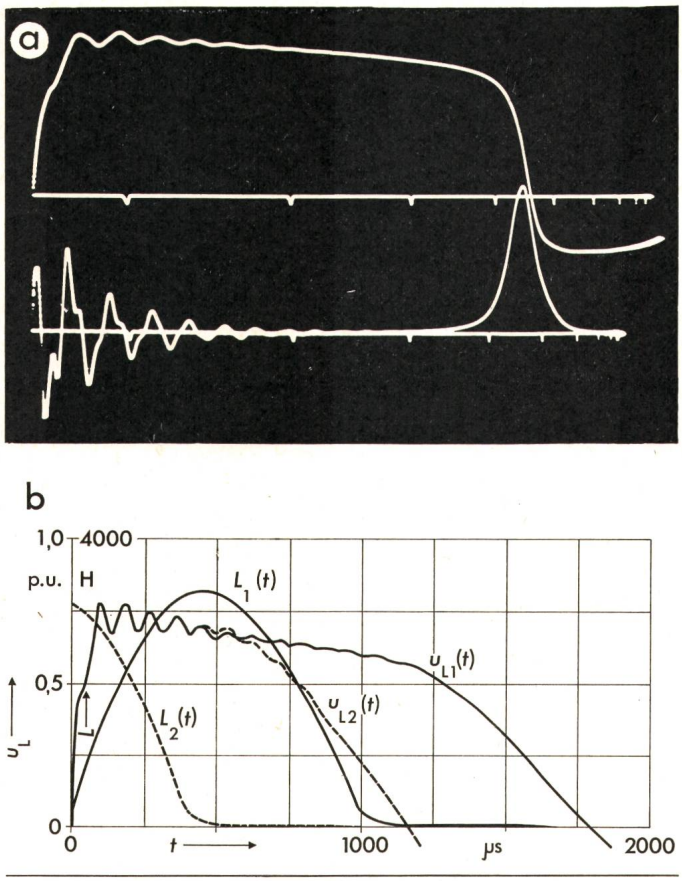


Fig. 6 Beispiel für die Schaltstossprüfung an einem Einphasen-Autotransformator

$\frac{500}{\sqrt{3}} \Big/ \frac{241{,}5}{\sqrt{3}} \Big/ 34{,}5$ kV, 900 : 3 MVA, 60 Hz

a Oszillogramm der Schaltstoßspannung
Zeitmaßstab: 500 µs/E logarithmisch
obere Spur = Spannung, untere Spur = Strom

b berechneter Spannungsverlauf
(Numerische Integration nach Abschnitt 3.3)

u_L Spannung an der Klemme des Prüflings
L Induktivität des Prüflings
t Zeit
L_1 Induktivität des nicht vormagnetisierten Prüflings
L_2 Induktivität des vormagnetisierten Prüflings

Stosskreis nach Fig. 3 $u_L(t)$ und $\dot{u}_L(t)$ ebenfalls stetig sind und sich erst in den hier nicht vollständig angegebenen Ausdrücken für zweite und höhere Ableitungen folgende Terme sprunghaft mit den Stosskreisparametern ändern:

$$\left.\begin{aligned}
\text{in } \ddot{u}_L:\quad & -\frac{1}{LC_b}\,u_L \\
\dddot{u}_L:\quad & -\left[\frac{1}{R_d C_b}\left(1+\frac{R_d}{R_e}\right)\ddot{u}_L+\frac{1}{LC_b}\,\dot{u}_L\right] \\
u_L^{IV}:\quad & -\left[\frac{1}{R_d C_b}\left(1+\frac{R_d}{R_e}\right)\dddot{u}_L+\left(\frac{1}{LC_b}+\frac{1}{L_\sigma C_b}-\right.\right. \\
& \left.\left.-\frac{1}{R_d^2 C_{st} C_b}\right)\ddot{u}_L\right]
\end{aligned}\right\} \quad (22)$$

Für die Rechnung wurde die Permeabilitätskurve $\mu = f(B)$ eines üblichen Kernbleches verwendet, womit sich der in Fig. 6b eingetragene zeitliche Verlauf von $L(t)$ ergibt. Die Daten des Stosskreises waren: $C_{st} = 19{,}75$ nF, $C_b = 4{,}5$ nF, $C_s = 1{,}7$ nF, $R_d = 7$ kΩ, $R_e = R_{st} = 300$ kΩ, $L_\sigma = 150$ mH, $B_0 = 0$, bzw. $+1$ T.

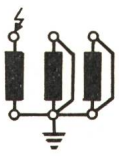
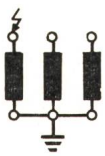
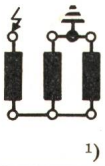
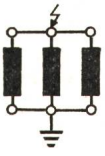
Die Übereinstimmung zwischen dem bei der Prüfung mit der Hochspannungsanlage erhaltenen Oszillogramm (Fig. 6a) und dem errechneten Spannungsverlauf (Fig. 6b) ist recht gut.

4. Dimensionierung des Stosskreises

Durch wiederholte Rechnung unter Variation der Parameter kann der Stosskreis auf die gewünschte Wellenform optimiert werden. Auf diese Weise wurden die in den folgenden Abschnitten beschriebenen Diagramme ermittelt, welche die wesentlichen Stosskreiselemente für Normstoss 1,2|50 an Transformatoren und Drosselspulen, sowie Schaltstoss mit der Stirnzeit $t_s = 100$ µs an Drosselspulen auf einfache Weise zu bestimmen gestatten.

Die Dimensionierung des Schaltstosskreises für Transformatoren nach diesem Diagramm liefert wegen der in den Abschnitten 2.1 und 2.3 erwähnten Zeitabhängigkeit der Leerlaufinduktivität und den aus der sekundären Eingangskapazität und der Streuinduktivität des Transformators herrührenden Oberschwingungen zuwenig genaue Resultate. In der Regel bietet jedoch die Auslegung dieses Kreises keine Schwierig-

Induktivität L des Prüflings — Tabelle I

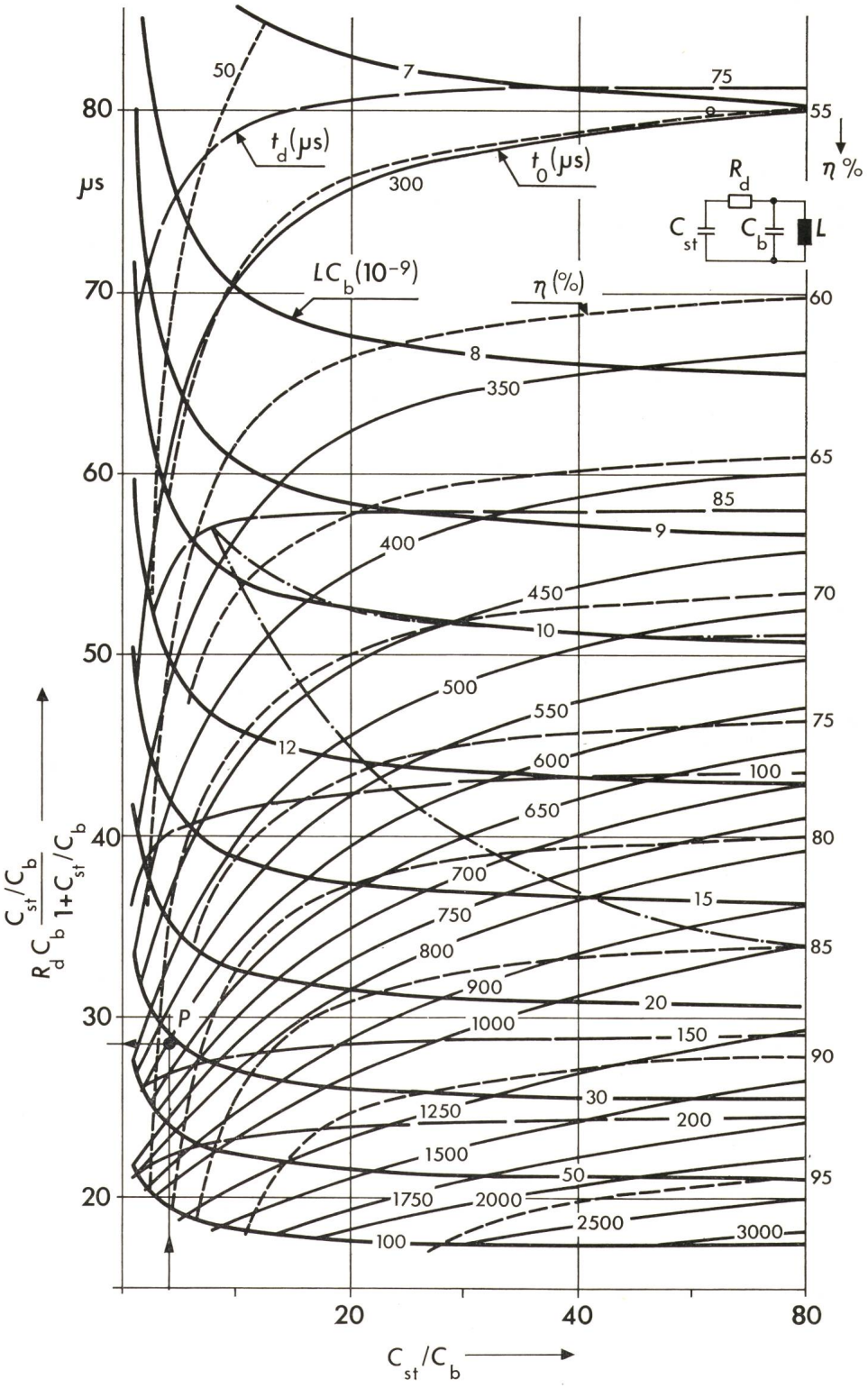
Schaltung der gestossenen Wicklung				 [1]			
Transformator (nicht gestossene Wicklungen kurzgeschlossen) $L =$	L_K	L_K	L_K	$\frac{3}{2} L_K$	$\frac{1}{3} L_K$	$\frac{1}{2} L_K$	$\frac{2}{3} L_K$
Drosselspule $L =$	L_{ph}	$L_\sigma + \frac{2 L_h}{3 + \frac{L_h}{L_\sigma}}$	$L_\sigma + \frac{2}{3} L_h$	$\frac{3}{2} L_{ph}$	$\frac{1}{3} L_\sigma$	$\frac{1}{2} L_{ph}$	$\frac{2}{3} L_{ph}$

Darin bedeuten: $L_K = \frac{u_K U_{ph}^2}{100\,\omega\, P_N}$ und $L_{ph} = \frac{U_{ph}^2}{\omega\, P_N}$

P_N Nennleistung des Prüflings je Phase; u_K Kurzschlußspannung in %; L_σ Streuinduktivität; L_h Hauptinduktivität.

[1]) Es sei darauf aufmerksam gemacht, dass bei Schaltstossprüfungen bei Verwendung dieser Schaltung die Sternpunktspannung auf wesentlich höhere Werte als $^1/_3\, U_p$ schwingen kann.

Fig. 7
Diagramm zur Dimensionierung des Stosskreises für die Schaltspannungsprüfung an Drosselspulen (t_s = 100 µs)



keiten. Die Front lässt sich aus $t_s \approx 5...10\ R_d C_b$ grob abschätzen. Die Bedingungen $t_d > 200$ µs und $t_0 > 1000$ µs können schlimmstenfalls durch Gegenmagnetisierung eingehalten werden. Der Ausnutzungsfaktor liegt um ca. 60...80 %. Genauere Berechnungen können nach Abschnitt 2.3 und 3.3 vorgenommen werden.

Im allgemeinen geht man in den Diagrammen von der Prüflingsinduktivität L und der Belastungskapazität C_b aus, welche als bekannt vorausgesetzt werden. Mit der freien Wahl von einem weiteren Stosskreiselement wird dann die Schaltung und damit die Wellenform an Hand der Diagramme voll bestimmt.

Die Belastungskapazität C_b setzt sich aus der Prüflingseingangskapazität und der Kapazität des Teilers sowie der Kapazität eines eventuellen Zusatzkondensators zusammen.

Aus der Erfahrung geschätzt werden müssen Streuinduktivität L_s und Prüflingseingangskapazität. Die Induktivität L des Prüflings lässt sich aus den in Tabelle I für die üblichsten Stossprüfungsschaltungen angegebenen Näherungsformeln errechnen.

Die berechnete Wellenform wird um so besser mit der tatsächlichen übereinstimmen, je genauer das zugrundegelegte Ersatzschaltbild entspricht, und je genauer seine Elemente angegeben werden können.

Laufzeiterscheinungen und Reflexionen konnten in den Diagrammen selbstverständlich nicht berücksichtigt werden. In Anbetracht der zulässigen Toleranzen sind diese aber nur in wenigen speziellen Fällen von Bedeutung. Sättigungseffekte bei Schaltspannungen können mehr oder weniger grosse Verkürzungen des Rückens hervorrufen.

4.1 *Diagramm für Schaltstoßspannung an Drosselspulen* ($t_s = 100$ µs)

Zur abschätzenden Berechnung einer Schaltstosswelle wurde der Kreis aus Fig. 1 herangezogen und dabei die Entladewiderstände vernachlässigt ($R_{st} = R_e = \infty$). Für die Entwicklung des Dimensionierungsdiagrammes Fig. 7 wurde die strenge Lösung Gl. (6) bzw. (10) verwendet.

Fig. 7 gibt den Zusammenhang zwischen der Zeitkonstante $\tau_s = R_d C_b \dfrac{C_{st}/C_b}{1 + C_{st}/C_b}$ und dem Kapazitätsverhältnis C_{st}/C_b wieder. Als Parameter dient das Produkt LC_b, dargestellt durch die stark ausgezogenen Linien. Im Diagramm finden sich ferner:

- Kurven für konstanten Ausnützungsfaktor $\eta = \dfrac{u_m}{U_0}$ der Schaltung (punktiert)
- Kurven für die Zeitdauer, während der die Spannung an der gestossenen Klemme des Prüfobjektes 90% des Scheitelwertes ($0{,}9\, u_m$) übersteigt (strichliert)
- Kurven für die Dauer t_0 bis zum ersten Spannungsnulldurchgang bei schwingender Wellenform (dünn ausgezogen)

Die mathematische Schwingungsgrenze wurde (strichpunktiert) eingezeichnet, um den Anschluss an frühere Arbeiten [1] herzustellen.

Die Anwendung des Diagrammes sei an einem Beispiel erläutert: Eine einphasige Drosselspule für 150 : 3 MVA, $500/\sqrt{3}$ kV, 50 Hz, soll mit Schaltstoßspannung der Form $t_s = 100$ µs, $0{,}83 \cdot BIL = 1285$ kV geprüft werden.

Man errechnet $L = U_{ph}^2/\omega P_N = 5{,}34\, H$ und schätzt die Prüflingseingangskapazität zu ca. 1,65 nF. Die externe Belastungskapazität inkl. Spannungsteiler wird zu 4,25 nF gewählt. Somit ergibt sich eine gesamte Belastungskapazität von $C_b = 5{,}9$ nF.

Als nächstes wird vorzugsweise die Schaltung des Stossgenerators bestimmt, z. B. $m = 10$ Stufen in Serie, zusammen $C_{st} = 23{,}7$ nF.

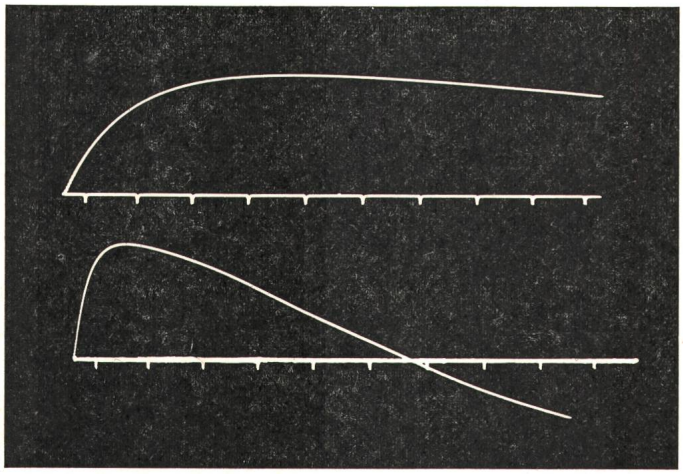


Fig. 8 Oszillogramm einer Schaltstoßspannungswelle an einer Einphasen-Kompensationsdrosselspule $500/\sqrt{3}$ kV, 50 MVA, 50 Hz bei Auslegung des Stosskreises mittels Fig. 7 (Punkt *P*)
Zeitmaßstab: 25 bzw. 100 µs/E

Mit $L \cdot C_b = 31{,}5 \cdot 10^{-9}$ und $C_{st}/C_b = 4{,}02$ ist bereits der «Zustandspunkt *P*» der Schaltung festgelegt. Zu ihm gehört nach dem Diagramm ein Ausnutzungsfaktor $\eta \approx 72\,\%$. Bei einer maximalen Ladespannung von $u_0 = 200$ kV pro Stufe lässt sich mit dieser Schaltung des Stossgenerators am Prüfling eine maximale Stoßspannung von $\eta\, m\, u_0 = 1440$ kV, somit die geforderte Prüfspannung erreichen. Gleichzeitig lässt sich die Wellenform kontrollieren:

Die 90%-Dauer der schwingenden Welle liegt bei 140 µs, der Nulldurchgang erfolgt nach $t_0 \approx 600$ µs. Auf der Ordinate wird der Wert $\tau_s = 28{,}6$ µs abgelesen und daraus der erforderliche Dämpfungswiderstand

$$R_d = \frac{\tau_s}{C_b} \cdot \frac{(1 + C_{st}/C_b)}{C_{st}/C_b} = 6{,}05\ \text{k}\Omega \text{ errechnet.}$$

Das mit der Hochspannungsanlage aufgenommene Oszillogramm (Fig. 8) beweist sehr gute Übereinstimmung zwischen Rechnung und Versuch.

4.2 *Diagramme für Normstossprüfung* ($T_s/T_r = 1{,}2\,|\,50$)

Im Ersatzschaltbild für die Normstosswelle wird ein Entladewiderstand berücksichtigt, der entweder parallel zur Kurzschlussinduktivität des Transformators (VDE-Schaltung a), $R_{st} = \infty$), oder parallel zur Stosskapazität gelegt wird (Schaltung b), $R_e = \infty$). Die normierte Stirnzeit ergibt sich aus

$$T_s = \frac{5}{3}(t_{0,9} - t_{0,3})$$

4.2.1 Vernachlässigung der Stosskreisstreuinduktivität

Wird zunächst die Streuinduktivität des Stosskreises vernachlässigt ($L_s = 0$), so kann für die Berechnung wiederum die strenge Lösung $u_L(t)$ des Dreispeicherkreises aus Fig. 1 herangezogen werden. In den beiden Diagrammen Bild 9a und 9b ist auf der Ordinate $(R_d C_b)_0$, auf der Abszisse C_{st}/C_b aufgetragen. Als Parameter dienen auch hier $L\, C_b$-Linien. Eingetragen sind noch R_e/R_d-Linien, sowie die Ausnutzungsfaktor $-\eta$ Kurven. Werden wieder L und C_b als gegeben angesehen, so ist von den Parametern C_{st}, R_d, R_e noch einer frei wählbar, um die Schaltung vollständig festzulegen.

Das Diagramm spannt sich zwischen den Linien für R_e bzw. $R_{st} = \infty$ und $L = \infty$ aus. Letztere gilt bereits genügend genau ab $L\, C_b > 5 \cdot 10^{-9}$. Dies ist z. B. bei Drosselspulen der Fall, weshalb dort der Einfluss der Prüflingsinduktivität auf die Wellenform praktisch vernachlässigbar wird. Der Stosskreis erscheint dann rein kapazitiv belastet ($L = \infty$), wofür die VDE-Vorschriften [6] im Anhang Dimensionierungskurven angeben. Für die zugehörigen Näherungsformeln wurden geringfügig abgeänderte Faktoren gefunden:

$$\left.\begin{aligned} &\frac{1}{a} = 0{,}72 \qquad \frac{2}{b} = 3{,}0 \\ &\eta_a = \frac{R_e/R_d}{1 + R_e/R_d} \cdot \frac{C_{st}/C_b}{1 + C_{st}/C_b} \qquad \eta_b = \frac{C_{st}/C_b}{1 + C_{st}/C_b} \\ &T_s = \frac{2}{b}\,\eta\, R_d\, C_b \qquad T_r = \frac{1}{a} \cdot \frac{R_d\, C_b}{\eta} \cdot \frac{R_e}{R_d} \cdot \frac{C_{st}}{C_b} \end{aligned}\right\} \qquad (24)$$

4.2.2 Berücksichtigung der Stosskreisstreuinduktivität

Wie bereits in Abschn. 2.2 erwähnt, ist jedoch der Einfluss der Serienstreuinduktivitäten von Stossgenerator und Kreis auf die Wellenstirn nicht immer vernachlässigbar und wird nach Fig. 2 berücksichtigt. L_s bewirkt eine der Grundwelle

Fig. 9

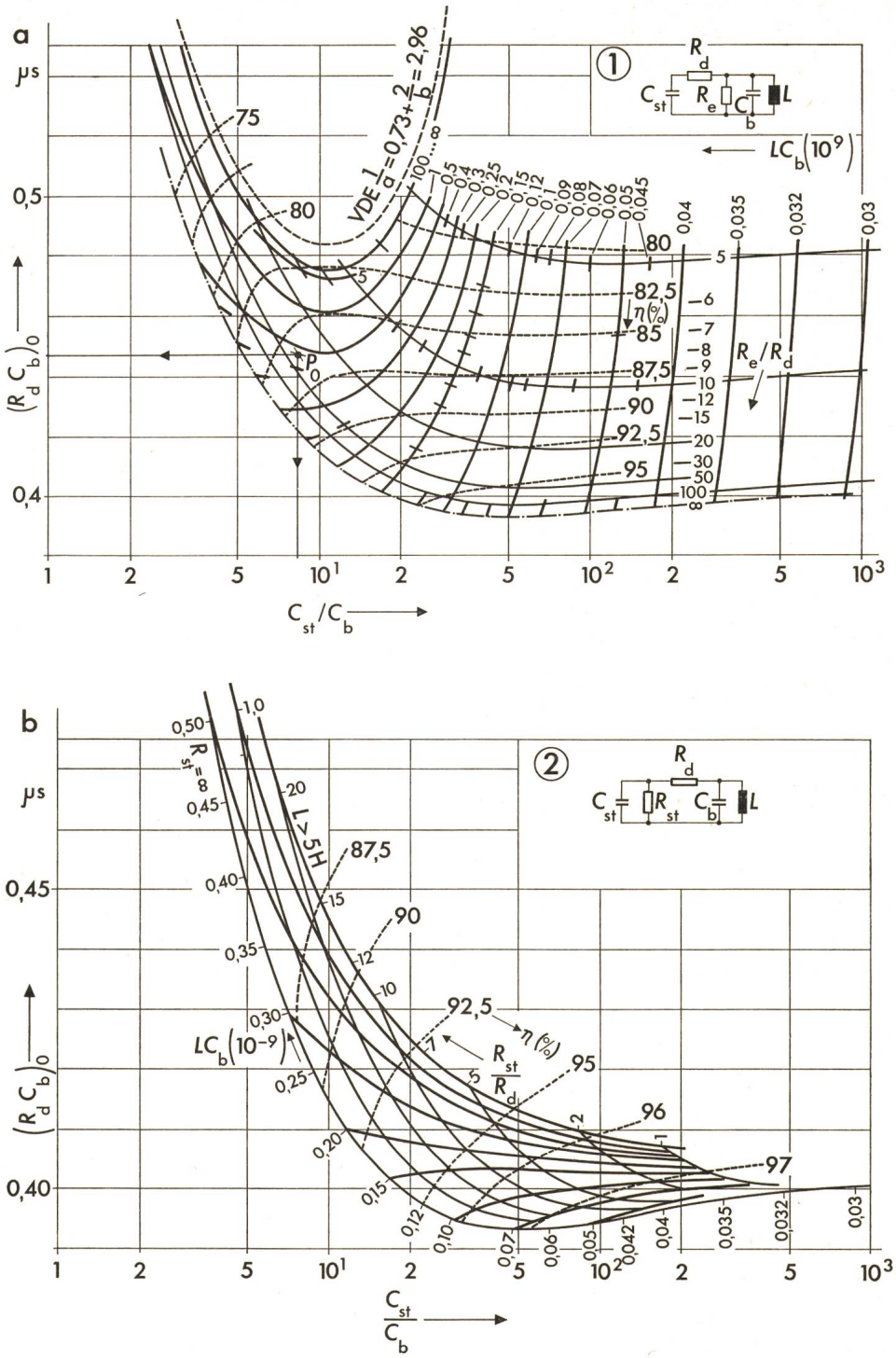
Diagramme zur Dimensionierung des Stosskreises auf Normstoss $T_s/T_r = 1{,}2|50$ µs

bei Vernachlässigung der Streuinduktivität des Stosskreises ($L_s = 0$)

a Schaltung 1 $R_{st} = \infty$

b Schaltung 2 $R_e = \infty$

R_e bzw. R_{st} Entladewiderstand des Stosskreises gemäss Schaltung 1 oder Schaltung 2



überlagerte, hochfrequente und rasch abklingende Spannungskomponente vom aperiodischen oder schwingenden Typ, welche je nach ihrer Frequenz die Stirnzeit verkürzen, oder verlängern kann. Zudem kommt es zum unerwünschten Überschwingen der Spannung, wobei nach den Vorschriften nur 5 % zugelassen sind. Für die Berechnung der Rückenhalbwertszeit T_r wird deshalb die Grundwelle ohne Überlagerungsglieder ($L_s = 0$ nach Kapitel 4.2.1) angesetzt.

Der Einfluss von L_s auf die Stirnzeit T_s wird über den Dämpfungswiderstand R_d kompensiert. Dazu ist der aus Fig. 9a oder 9b ermittelte Wert $(R_d\, C_b)_0$ entsprechend der Kurve in Fig. 10 zu korrigieren, also $R_d C_b = (R_d C_b)_0 + \Delta(R_d C_b)$. Diese Korrekturkurve entspricht nur teilweise den Angaben von Bild 5 aus [7], wo für Stirn und Rücken der Welle voneinander entkoppelte Schwingkreise angenommen wurden.

Der Dämpfungswiderstand R_d ist in grober Näherung proportional der Stirnzeit. Gleichzeitig beeinflusst er jedoch auch mehr oder weniger stark den Rücken. Nach einer Korrektur von R_d muss deshalb auch C_{st} entsprechend angepasst werden, um den Rücken von $T_r = 50$ µs beizubehalten. Dazu dienen die Diagramme aus Fig. 11a und 11b. Sie wurden aus 9a und 9b unter Elimination von C_b abgeleitet. Schliesslich sind noch R_e bzw. R_{st} im selben Verhältnis wie R_d zu korrigieren, um R_e/R_d bzw. R_{st}/R_d unverändert zu halten.

Anhand des nachfolgenden Beispieles sei das Vorgehen genauer erläutert. Geprüft werden sollte die OS-Wicklung eines Einphasentransformators mit der Kurzschlussinduktivität $L = 178$ mH. Die gesamte Belastungskapazität wurde gewählt bzw. geschätzt zu $C_b \approx 2{,}6$ nF. Zunächst wird die Streuinduktivität L_s vernachlässigt. Wählt man $C_{st} = 237/11 = 21{,}5$ nF, so ergibt sich $C_{st}/C_b = 8{,}27$ und $L\, C_b = 0{,}463 \cdot 10^{-9}$.

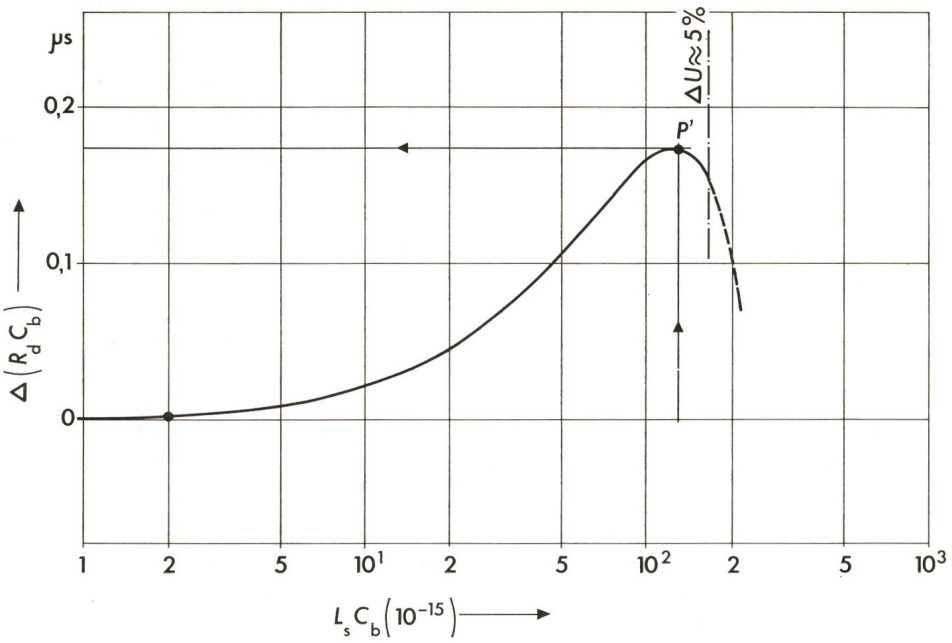


Fig. 10
Korrekturkurve zur Berücksichtigung der Streuinduktivität L_s des Stosskreises

Für Schaltung 1 erhält man somit in Fig. 9a den Schnittpunkt P_0 und daraus $R_e/R_d = 37$ und $(R_d C_b)_0 = 0{,}447 \cdot 10^{-6}$, sowie $\eta \approx 85{,}5\,\%$.

Berücksichtigt man nun die Streuinduktivität, welche im vorliegenden Fall zu $L_s \approx 50\,\mu H$ geschätzt wurde, so sind Korrekturen notwendig. Aus $L_s C_b = 130 \cdot 10^{-15}$ erhält man in Fig. 10 Punkt P' und daher $\Delta\,(R_d C_b) = 0{,}172 \cdot 10^{-6}$. Somit ergibt sich $R_d C_b = (R_d C_b)_0 + \Delta\,(R_s C_b) = 0{,}619 \cdot 10^{-6}$ und daraus $R_d = 238\,\Omega$ und $R_e = 37\,R_d = 8800\,\Omega$. Mit $R_d/L = 1340$ erhält man in Fig. 11a Punkt P (Schnittpunkt mit Kurve $R_e/R_d = 37$) und daraus $L\,C_{st} = 3{,}6 \cdot 10^{-9}$. Die korrigierte Stosskapazität wird also $C_{st} = 20{,}2$ nF. Für den tatsächlichen Versuch mit der Hochspannungsanlage wurden geringfügig abweichende Werte verwendet: $R_d = 245\,\Omega$, $R_e = 9000\,\Omega$, $C_{st} = 19{,}7$ nF. Es ergab sich damit das Spannungsoszillogramm aus Fig. 12 mit $T_s = 1{,}25\,\mu s$ und $T_r = 49\,\mu s$.

Es sei jedoch betont, dass in der Praxis nicht in allen Fällen eine perfekte Übereinstimmung erwartet werden darf, da L_s und C_b nicht absolut genau geschätzt werden können. Wohl aber sollten sich für die Rückenhalbwertszeit bei Dimensionierung nach Fig. 11a und b ziemlich exakte Werte ergeben, denn dieses Diagramm ist frei von den beiden Schätzwerten.

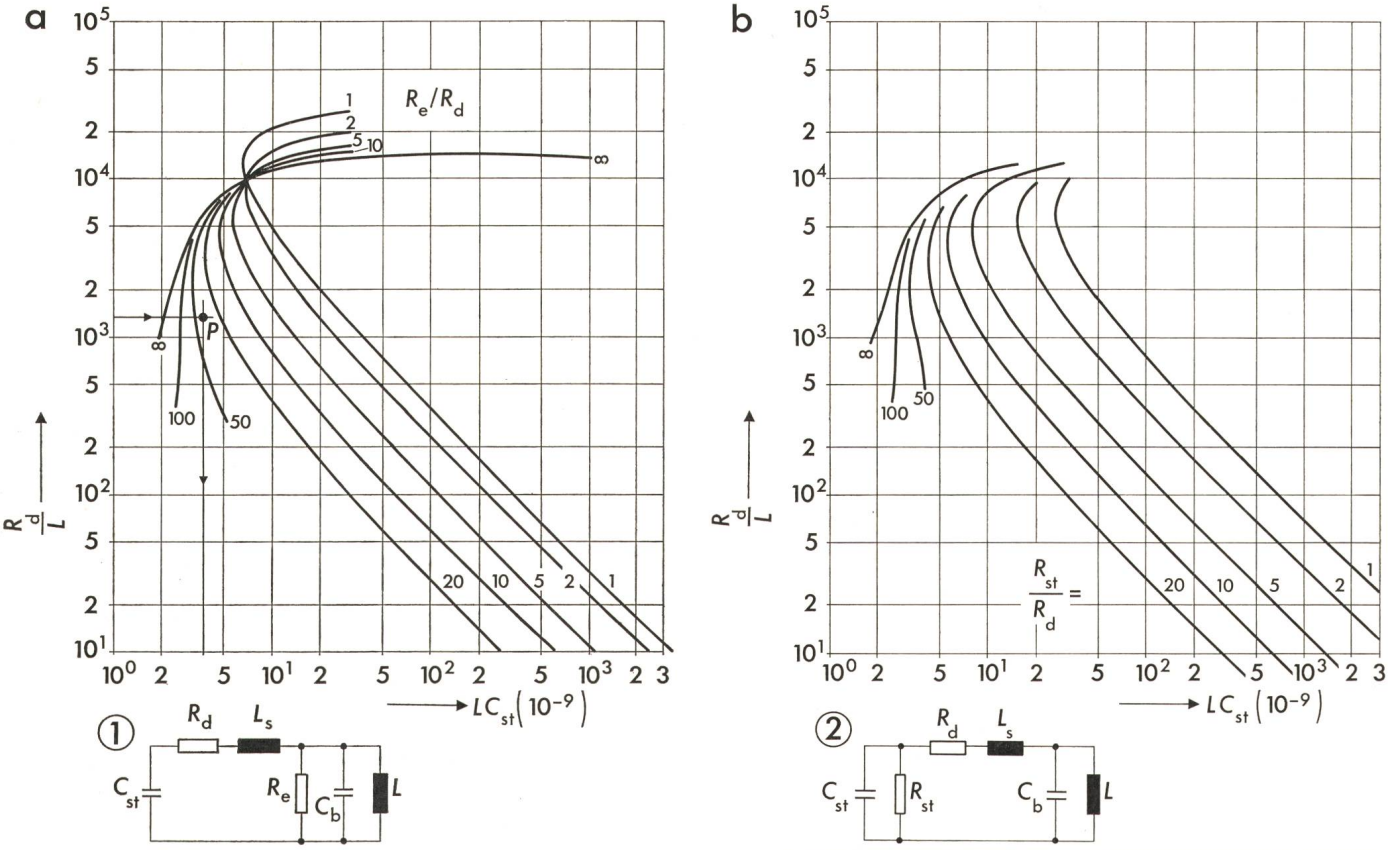


Fig. 11 Diagramm zur Dimensionierung des Stosskreises auf $T_r = 50\,\mu s$
a Schaltung 1: $R_{st} = \infty$ *b* Schaltung 2: $R_e = \infty$

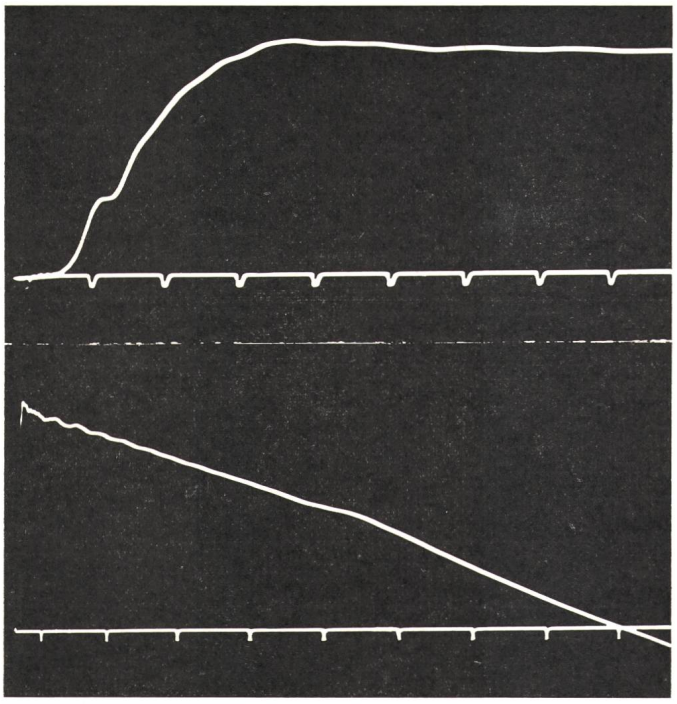


Fig. 12 Oszillogramm einer Normstosswelle an der OS-Wicklung eines Einphasentransformators 13,7/327,75/$\sqrt{3}$ kV, 60 Hz, 100 MVA

bei Auslegung des Stosskreises nach Fig. 9a, 10 und 11a, Punkt *P*

Zeitmaßstab: 0,5 bzw. 10 µs/E

4.2.3 Sonderschaltung für Prüfung von US-Wicklungen

Bei Wicklungen mit sehr kleiner Induktivität ($L < 10$ mH) kann mit den Schaltungen 1 oder 2 die erforderliche Rückenhalbwertszeit von $T_r = 50$ µs oft nicht erreicht werden. Man kann sich dann noch helfen, indem man einen Ohmschen Widerstand R_s in Serie mit der gestossenen Wicklung schaltet.

Dieser Serienwiderstand sollte möglichst klein sein und darf keinesfalls grösser als 500 Ω gewählt werden, da sich über ihm leicht unzulässig hohe Spannungen aufbauen können.

Die Spannungswelle an der gestossenen Klemme zeigt meist ein Überschiessen im Scheitel. Selbst wenn keine Streuinduktivitäten vorhanden wären, ist eine vernünftige Wellenform nur schwer zu erreichen.

Als in vielen Fällen praktikable Lösung wird die Dimensionierungskurve in Fig. 13 vorgeschlagen. Sie gilt für $L_s \approx 0$, $R_e = R_d$ und $R_s = 4\,R_d$ und bietet bei einem meistens ausreichenden Ausnützungsfaktor von $\eta \approx 45$ % eine akzeptable Grundform der Welle. Damit R_s in den vorgeschriebenen Grenzen bleibt, muss jedoch $C_b \approx 10$ nF gemacht werden. Dadurch fallen aber die Streuinduktivitäten ins Gewicht, denn die L_sC_b-Werte überschreiten die 5-%-Grenze für das Überschwingen in Fig. 10. Man wird hier wohl nicht darum herumkommen, etwas mehr Überschwingen zuzulassen und die Toleranz von + 30 % in der Stirnzeit voll auszunutzen.

Literatur

[1] *E. Schwartz:* Schwingungsfreie Stoßschaltungen mit drei, vier und fünf Energiespeichern. Dissertation der Technischen Hochschule Aachen, 1959.

[2] *P. A. Stark:* Introduction to numerical methods. London, Collier-Macmillan, 1970.

[3] *J. Robra:* Ein Programm zur Berechnung der Elemente des Stosskreises für beliebige Stoss- und Schaltspannungen. Bull. SEV 63(1972)6, S. 274...277.

[4] *M. Christoffel:* Schaltüberspannungsprüfung von Transformatoren und Drosselspulen. Brown Boveri Mitt. 53(1966)4/5, S. 283...290.

[5] *H. Gsodam:* Spannungsprüfungen an Transformatoren. Elin-Z. 21(1969)1/2, S. 14...27.

[6] Erzeugung und Messung von Hochspannungen. Teil 3: Bestimmungen für die Erzeugung und Anwendung von Stoßspannungen und Stoßströmen für Prüfzwecke. VDE-Vorschrift 0433 Teil 3/4.66.

[7] *W. Widmann:* Spannungs-Generatoren. Auslegung und Betrieb. Teil I. ATM -(1962)319, S. 187...190.

Adresse der Autoren:

G. Papachristos, dipl. Ing., und Dr. *E. Woschnagg,* dipl. Ing., Transformatoren-Versuchsabteilung der AG Brown, Boveri & Cie., 5401 Baden.

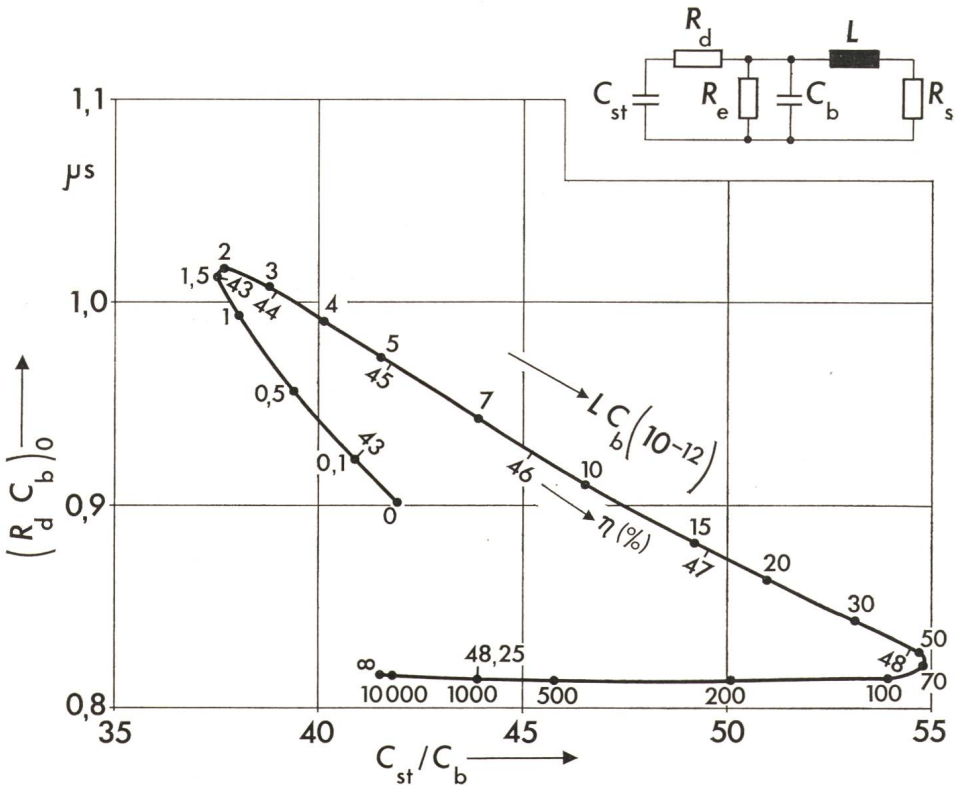


Fig. 13

Dimensionierung eines Stosskreises mit Seriewiderstand R_s

$R_{st} = \infty$, $R_e = R_d = R_s/4$

$L_s \approx 0$

$C_b \approx 10$ nF