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: 69 (1978)

Heft: 18

Artikel: Auslegung von Stossgeneratoren für die Blitzstoßspannungsprüfung von Transformatoren

Autor: Feser, K.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-914936

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: 09.12.2025

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

Auslegung von Stossgeneratoren für die Blitzstoßspannungsprüfung von Transformatoren

Von K. Feser

621.317.333.8:621.314.21;

Es werden die Grenzen der normalen Marxschen Stoßspannungsschaltung bei der Prüfung von Transformatoren mit Blitzstoßspannungen aufgezeigt. Bei kleinen induktiven Belastungen kann die Rückenhalbwertszeit von 40 µs nicht erreicht werden. Die heute übliche Stoßspannungsschaltung lässt sich aber durch zwei neu vorgeschlagene Schaltungen erweitern, die auch bei extrem kleinen induktiven Belastungen von wenigen mH die Verwirklichung einer Rückenhalbwertszeit von 40 µs erlauben. Praktische Messungen bestätigen die theoretischen Überlegungen.

Les limites du circuit de choc classique selon Marx lors d'essais de transformateurs avec des impulsions de foudre sont démontrées. Avec des charges inductives petites, la durée jusqu'à mi-valeur de 40 µs ne peut pas être obtenue. Toutefois, le circuit de choc usuel peut être amélioré par deux couplages nouvellement proposés. Ces couplages permettent également de garantir une durée jusqu'à mi-valeur de 40 µs pour des charges inductives extrêmement petites de l'ordre de quelques mH. Des mesures réalisées confirment les considérations théoriques.

1. Einleitung

Entsprechend den nationalen und internationalen Vorschriften ist für die Stoßspannungsprüfung elektrischer Betriebsmittel die Blitzstoßspannung 1,2/50 vorgesehen [1; 2][1]). An kleinen induktiven Belastungen, wie sie in der Praxis bei der Prüfung der Niederspannungswicklung von Maschinentransformatoren, bei Verteiltransformatoren oder bei Drosselspulen und Hochfrequenzsperren auftreten, kann mit der üblichen Marxschen Stoßspannungsschaltung oft keine normgerechte Rückenhalbwertszeit von 50 ± 10 µs erreicht werden. In den Vorschriften ist deshalb bei der Prüfung von Transformatoren vorgesehen, dass man die nicht gestossenen Wicklungen über Widerstände von maximal 400 Ω an Erde legen kann. Diese Massnahme bewirkt eine Erhöhung der Prüflingsimpedanz und damit eine Verlängerung des Rückens. Der Widerstand verändert aber gleichzeitig die Spannungsverteilung im Transformator.

Im folgenden werden die Grenzen der heute üblichen Stossspannungsschaltungen bei der Erzeugung von normgerechten Stoßspannungen an induktiven Prüflingen diskutiert. Anschliessend werden zwei Schaltungen näher erläutert, die längere Rückenhalbwertszeiten bei direkter Erdung der nicht gestossenen Wicklungen ergeben und damit den Bereich der normgerechten Prüfung zu kleineren Induktivitäten bzw. höheren Leistungen bei Transformatoren verschieben.

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

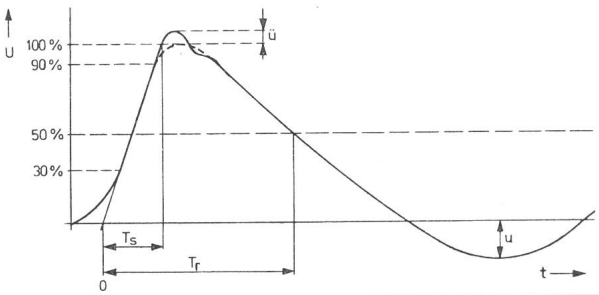

Fig. 1 Definitionen der Blitzstoßspannungen 1,2/50
T_s Stirnzeit — $ü$ Überschwingen
T_r Rückenhalbwertszeit — u Unterschwingen

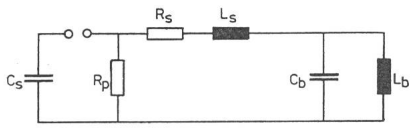

Fig. 2 Einstufige Ersatzschaltung eines vielstufigen Stoßspannungsgenerators
C_s Stosskapazität
R_p Parallelwiderstand
R_s Seriewiderstand
L_s Streuinduktivität des Stosskreises
C_b Belastungskapazität inkl. Prüflingskapazität und Stoßspannungsteiler
L_b Belastungsinduktivität

2. Grenzen der normgerechten Prüfung von kleinen Induktivitäten mit der Marxschen Stoßspannungsschaltung

Die Vorschriften schreiben für die Prüfung von Transformatoren mit Blitzstoßspannungen eine Impulsform 1,2/50 (Fig. 1) mit folgenden Toleranzen vor [1]:

Stirnzeit:	$T_s = 1{,}2\ \mu s \pm 30\%$
Rückenhalbwertszeit:	$T_r = 50\ \mu s \pm 20\%$
Überschwingen:	$ü < 5\%$
Unterschwingen:	$u < 50\%$

Die heute übliche Schaltung, um diese Impulsform zu erzeugen, ist die bekannte Marxsche Vervielfachungsschaltung, die für die folgenden Ausführungen hinreichend genau durch die einfache Ersatzschaltung nach Fig. 2 dargestellt werden kann. Der Prüfling und die Messeinrichtungen sind in die Belastungsgrössen L_b und C_b eingerechnet. Die Kenngrössen der Blitzstoßspannungen werden durch die Belastung und die Schaltelemente bestimmt.

Für rein kapazitive Belastungen ist das Einhalten der genormten Rückenhalbwertszeit kein Problem. Der Parallelwiderstand R_p wird entsprechend den Kapazitäten C_s und C_b gewählt: $T_r \sim R_p \cdot (C_b + C_s)$. In der Praxis ist die Stosskapazität C_s gegeben. Der Parallelwiderstand R_p wird so gewählt, dass bei kleiner kapazitiver Belastung die Rückenhalbwertszeit innerhalb der Toleranzgrenzen liegt. Fig. 3 zeigt als Beispiel für eine bestimmte Stosskapazität C_s den Belastungsbereich, in dem die Rückenhalbwertszeit innerhalb der Toleranzgrenzen bleibt. Für die meisten praktischen Anwendungsfälle genügt ein einziger Widerstandswert. Mit zusätzlichen Parallelwiderständen ist für praktisch beliebige kapazitive Belastungen C_b die Einhaltung der Rückenhalbwertszeit möglich.

Für kapazitive Prüfobjekte wird hingegen die Einhaltung der genormten Stirnzeit T_s zum Problem ($T_s \sim R_s \cdot C_b$). Ab einer bestimmten Belastungskapazität müsste der Widerstand R_s so klein gewählt werden, dass das Überschwingen $ü$ grösser als 5% würde. Dies bedeutet, dass die konstruktiv bedingte Streuinduktivität L_s den möglichen Belastungsbereich für die Erzeugung einer normgerechten Blitzstoßspannung begrenzt. Wie Fig. 4 zeigt, ist es für das Erreichen einer normgerechten Blitzstoßspannung bereits bei einem relativ kleinen Belastungsbereich notwendig, den Seriewiderstand R_s ändern zu können.

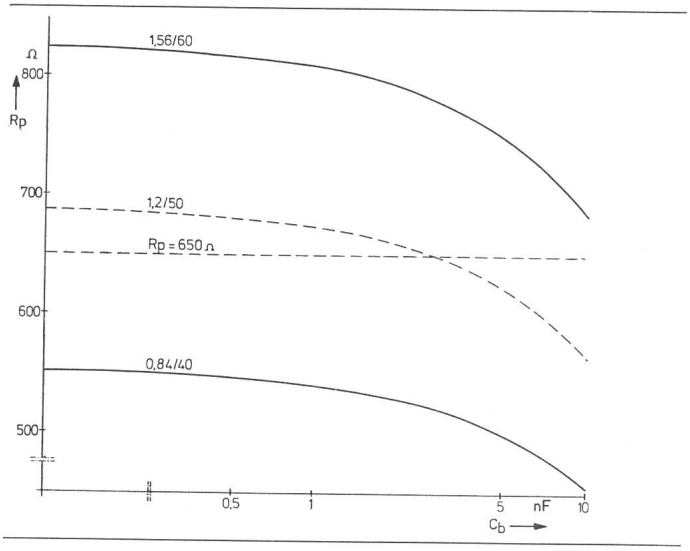

Fig. 3 **Toleranzbereiche der Rückenhalbwertszeit für bestimmte Parallelwiderstände R_p in Abhängigkeit von der rein kapazitiven Belastung C_b**
2-MV-Stossgenerator, 400 kWs, $C_s = 100$ nF

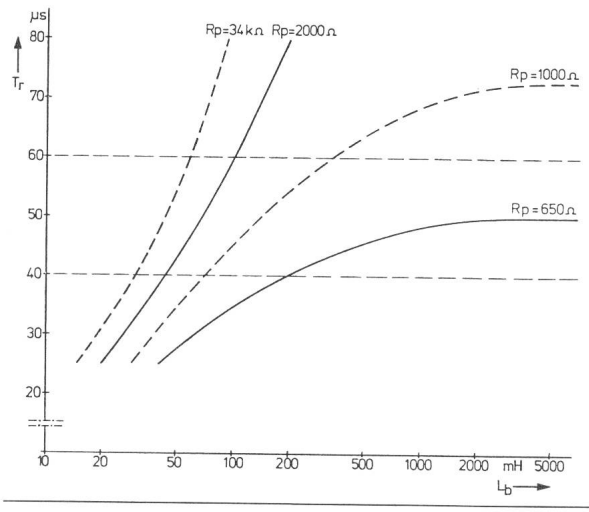

Fig. 5 **Rückenhalbwertszeit T_r in Abhängigkeit von der induktiven Belastung L_b mit dem Parallelwiderstand R_p als Parameter**
2-MV-Stossgenerator, 200 kWs, $C_s = 100$ nF

Dies wird in der Praxis durch Serie- und Parallelschaltungen von Widerständen ermöglicht. Bei der Konstruktion eines Stossgenerators ist deshalb die rasche und einfache Schaltung von Seriewiderständen eine praktische Notwendigkeit.

Betrachtet man Prüfobjekte mit gemischt induktiver und kapazitiver Last, so bedeutet die induktive Belastung bei kleinen Induktivitäten eine Entladung des Stosskreises, dass heisst, dass eine induktive Belastung die Rückenhalbwertszeit beeinflusst, während die Stirnzeit praktisch nicht beeinflusst wird. Dies führt dazu, dass für die Stirnzeit die gleichen Begrenzungen wie bei rein kapazitiver Belastung gelten.

Die Beeinflussung der Rückenhalbwertszeit kann bis zu einer bestimmten minimalen Induktivität durch die Vergrösserung des Parallelwiderstandes R_p aufgehoben werden. Fig. 5 zeigt die Abhängigkeit der Rückenhalbwertszeit von der Belastungsinduktivität bei verschiedenen Parallelwiderständen R_p. In der Praxis sind mindestens 2 Parallelwiderstände verfügbar, und zwar der Widerstandswert, der für die Erzeugung einer Rückenhalbwertszeit von 50 µs ausgelegt wird, und derjenige Wert, der für eine Rückenhalbwertszeit von 2500 µs (Schaltstoss) vorgesehen ist. Eine Erhöhung von R_p über den Schaltstossparallelwiderstand bringt keine wesentliche Erweiterung des Belastungsbereiches zu kleineren Induktivitäten.

Die untere Grenze für die normgerechte Prüfung von induktiven Belastungen mit Blitzstoßspannungen für eine bestimmte Stosskapazität C_s wird neben dem Parallelwiderstand R_p wesentlich durch den Seriewiderstand R_s bestimmt. Wählt man als Parallelwiderstand R_p den Schaltstossparallelwiderstand, so zeigt Fig. 6, dass für einen gegebenen Seriewiderstand R_s ab einer bestimmten Induktivität L_b keine normgerechte Prüfung möglich ist. Nur eine Verkleinerung von R_s bringt eine zusätzliche Erweiterung des induktiven Belastungsbereiches bei gegebener Stosskapazität C_s. R_s kann aber wegen dem Überschwingen nicht beliebig verkleinert werden (Fig. 4). Dies ist in Fig. 7 nochmals verdeutlicht. Bei einer Verkleinerung von R_s muss C_b entsprechend vergrössert werden, um eine normgerechte Stirnzeit T_s zu erreichen. Bei gegebenem Stosskreis kann eine bestimmte Streuinduktivität L_s nicht unterschritten werden. Durch diese Streuinduktivität L_s, die ein 5% Überschwingen ergibt, wird die kleinste Induktivität L_b bestimmt, an der noch eine normgerechte Rückenhalbwertszeit erreichbar ist. Man erkennt aus Fig. 7, dass für die normale Marxsche Stoßspannungsschaltung bei Streuinduktivitäten von 20 µH (realisierbar bei Stosskreisen für 200 kV bis 400 kV) und Seriewiderständen von ca. 50 Ω an einer Induktivität von $L_b > 3$ mH normgerechte Rückenhalbwertszeiten mit einer Stosskapazität von 3 µF erreichbar sind. Bei grösseren Werten von L_s oder kleineren von C_s verschieben sich die Grenzwerte von L_b zu höheren Werten.

Bei unendlich grosser Stosskapazität C_s würde die Rückenhalbwertszeit T_r allein durch den Seriewiderstand R_s begrenzt. Für $R_p = \infty$ errechnet sich die Rückenhalbwertszeit T_r zu

$$T_r = (L_b/R_s) \cdot \ln 2.$$

Also wird die kleinste Induktivität L_b, bei der noch eine genormte Rückenhalbwertszeit von 40 µs erreichbar ist, zu

$$L_b \approx 0{,}058 \cdot R_s \ (L_b \text{ in mH}, R_s \text{ in } \Omega).$$

Um die Grenzen der üblichen Stoßspannungsschaltung für die Prüftechnik besser abschätzen zu können, sind im folgenden die heute üblichen Daten von Transformatoren zusammengestellt. Daraus soll deutlich werden, welcher Anwendungsbereich mit der Marxschen Stoßspannungsschaltung die Einhaltung der genormten Blitzstoßspannung nicht erlaubt.

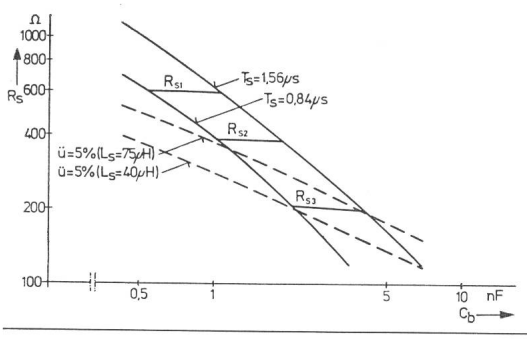

Fig. 4 **Toleranzbereich der Stirnzeit für bestimmte Seriewiderstände R_s in Abhängigkeit von der Belastung C_b**
2-MV-Stossgenerator, 400 kWs, $C_s = 100$ nF

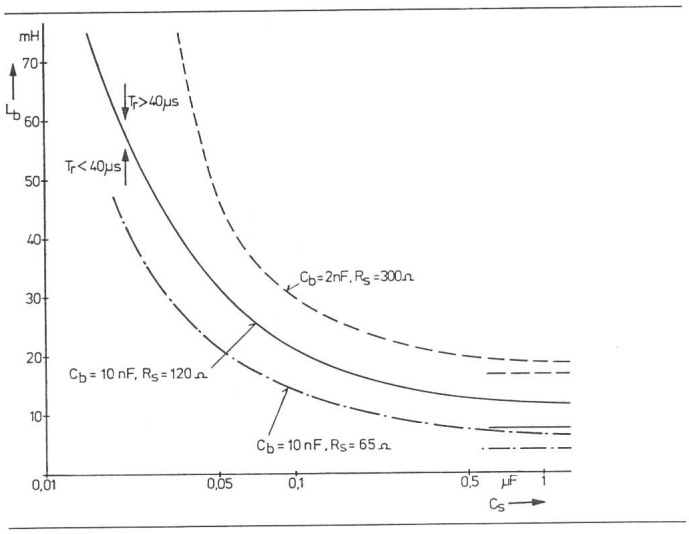

Fig. 6 Notwendige Stosskapazität C_s eines Stossgenerators, um an einer bestimmten Induktivität L_b eine Rückenhalbwertszeit von 40 µs zu erreichen

R_p Schaltstossparallelwiderstand

Parameter: Seriewiderstand R_s, Belastungskapazität C_b

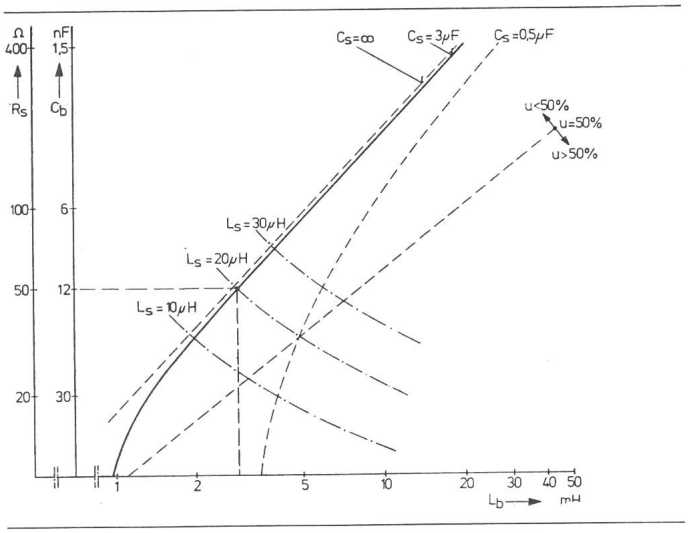

Fig. 7 Grenzkurven für das Erreichen einer normgerechten Blitzstossprüfspannung bei induktiver Belastung

Rückenhalbwertszeit: T_r = 40 µs

Überschwingen: $ü$ = 5 %

Parameter: Streuinduktivität L_s, Stosskapazität C_s

3. Prüflingsimpedanzen

Prüflinge, die Induktivitätswerte unter 15 mH annehmen können und einer Blitzstoßspannungsprüfung unterworfen werden, sind praktisch nur Transformatoren und Drosselspulen. Die Induktivität von Transformatoren kann mit Hilfe der Formel

$$L_K = \frac{u_k \cdot U_{ph}^2}{100\,\omega P_n}$$

berechnet werden [3], wobei u_K die Kurzschlußspannung (%), U_{ph} die Phasenspannung und P_n die Nennleistung pro Phase bedeuten. Die für die Prüfung wirksame Induktivität hängt noch von der Prüfschaltung ab [3]. Im Extremfall wird $L_b = {}^1/_3\, L_K$, falls die 3 Wicklungen parallel gestossen werden. In Tab. I sind für verschiedene Reihenspannungen Induktivitätswerte L_K angegeben, mit denen in Zukunft gerechnet wird. Für die Belastungskapazität kann ein Wert von 5...10 nF angenommen werden.

Man erkennt aus Tab. I, dass bei Höchstspannungstransformatoren auf der Oberspannungsseite im gesamten Bereich 15 mH nicht unterschritten werden, d.h. für die Prüfung der Oberspannungsseite dieser Transformatoren ist die Rückenhalbwertszeit mit der bisherigen Schaltung erreichbar. Tab. I beinhaltet auch zukünftige Entwicklungen, die mit dem heutigen Stand der Technik nicht realisierbar sind. Heute werden z.B. für 420 kV Oberspannungen, Leistungen von Maschinentransformatoren, die bahntransportfähig sind, von maximal 1700 MVA für möglich erachtet [4; 5].

Nicht erreichbar ist die geforderte Rückenhalbwertszeit T_r von 40 µs bei der Stossprüfung der Unterspannungswicklung von grossen Maschinentransformatoren bzw. bei Verteiltransformatoren ab einer bestimmten Leistung. Induktivitätswerte unter 15 mH sind dort bereits heute üblich.

Aus Tab. I kann auch für die jeweilige Netzspannung die notwendige Ladespannung eines Generators abgelesen werden,

Induktivitätswerte von Transformatoren in Abhängigkeit von der Reihenspannung und der Nennleistung

Annahmen: Kurzschlußspannung 15 %, Netzfrequenz 50 Hz

Tabelle I

System-spannung	Prüfspannungen nach CEI 71-1 (1976) (Maximalwerte)				Induktivität L_K in mH						
U_m (r.m.s.)	Blitzstoss-spannung 1,2/50	Abgeschnittene Blitzstoss-spannung	Schaltstoss-spannung 250/2500	Summen-lade-spannung	Drehstromleistung in MVA						
kV	kV	kV [2])	kV	kV	50	100	200	400	600	1000	2000
1100 [3])	2800	3250	2000	4400	–	–	2890	1145	963	578	289
765	2400	2760	1550	3800	–	–	1400	700	446	280	140
525	1550	1780	1175	2400	–	–	660	330	220	132	66
420	1425	1640	1050	2200	–	840	420	210	140	84	42
245	1050	1200	–	1600	576	287	144	72	48	29	14,5
123	550	635	–	1000	144	72	36	18	12	–	–
36	170	–	–	400	12,4	6,2	3,1	1,5	1,0	–	–
24	125	–	–	200	5,5	2,7	1,4	0,7	–	–	–
12	75	–	–	200	1,4	0,7	0,35	–	–	–	–

[2]) Abgeschnittene Stoßspannungswerte: $1{,}15 \cdot U_{p\,1,2/50}$.

[3]) Für Reihe 1100 kV wurden die Prüfwerte aus den niedrigeren Reihenspannungen abgeleitet.

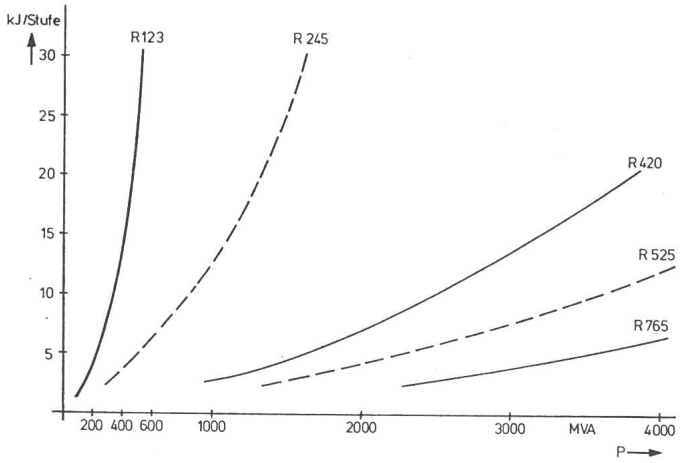

Fig. 8 **Notwendige Stossenergie pro 200-kV-Stufe eines vielstufigen Stossgenerators in Abhängigkeit von der Drehstromleistung von Transformatoren**

Parameter: Systemspannung

Annahmen: Kurzschlußspannung 15 %, $C_b = 10$ nF, $R_s = 100\ \Omega$, $R_p = R_{p\,2500\,\mu s}$, $L_b = L_K$

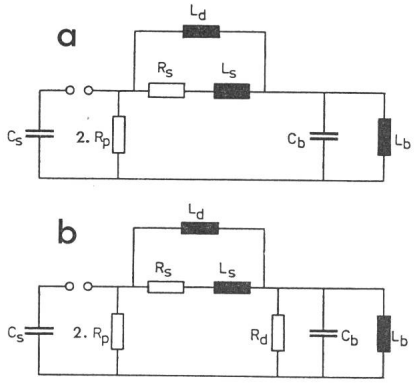

Fig. 10 **Einstufige Ersatzschaltungen eines vielstufigen Stossgenerators für die Erzeugung normgerechter Blitzstoßspannungen**

a Erweiterte Schaltung für die Induktivitäten von 4 mH $< L_b <$ 15 mH

b Erweiterte Schaltung für extrem kleine Induktivitäten von 0,4 mH $< L_b <$ 4 mH

um die Prüfspannungen erzeugen zu können. Da für die jeweilige Reihenspannung die maximale Prüfspannung bekannt ist, kann aus Fig. 6 die notwendige Stosskapazität und damit die notwendige Stossenergie z. B. für eine Stufenspannung eines Stossgenerators von 200 kV in Abhängigkeit von der Leistung eines Transformators abgeleitet werden (Fig. 8). Man erkennt, dass die Oberspannungsseite der zukünftigen Grosstransformatoren mit Generatoren mit 10 kJ pro 200-kV-Stufe normgerecht geprüft werden können. Für die Prüfung von 220-kV-Transformatoren mit Leistungen über 1000 MVA (heute normal um 500 MVA) werden Energien um 20 kJ pro 200-kV-Stufe nötig sein.

Zusammenfassend kann man sagen, dass für die Prüfung der Oberspannungsseite von heutigen Transformatoren über Reihe 123 kV Energien pro 200-kV-Stufe von 15 kJ ausreichen. Damit sind mit der bisherigen Schaltung die genormten Impulsformen erreichbar.

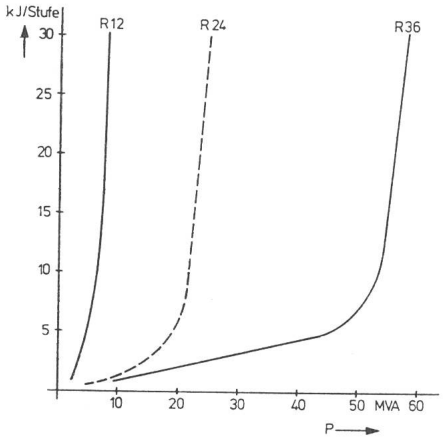

Fig. 9 **Notwendige Stossenergie pro 200-kV-Stufe eines Stossgenerators in Abhängigkeit von der Drehstromleistung von Transformatoren**

Schaltung des Stossgenerators nach Fig. 2

Parameter: Systemspannung

Annahmen: Kurzschlußspannung 15 %; $C_b < 10$ nF, $R_s = 120\ \Omega$, $R_p = R_{p\,2500\,\mu s}$, $L_b = L_K$

Problematisch ist die Prüfung der Unterspannungswicklung von grossen Maschinentransformatoren, die Prüfung der Oberspannungswicklung von Verteiltransformatoren und die Prüfung von Drosselspulen mit Induktivitätswerten unter 15 mH. In diesen Fällen ist mit der Schaltung nach Fig. 2 eine normgerechte Rückenhalbwertszeit nur bei sehr kleinen Leistungen möglich (Fig. 9). Eine Vergrösserung der Stufenenergie bringt keine wesentliche Vergrösserung des Belastungsbereiches, da die Induktivitätswerte wesentlich unter 15 mH liegen.

4. Schaltungen für die Prüfung von kleinen Induktivitäten

Allen Anwendungsfällen mit $L_b < 15$ mH ist gemeinsam, dass die Amplitude der Blitzstossprüfspannung relativ niedrig ist (Tab. I). Reihenspannungen bis 30 kV können dadurch bei Generatoren mit 200-kV-Stufenspannung mit einer Stufe in Serie und mehreren Stufen parallel (je nach notwendiger Stosskapazität) geprüft werden. Dies bedeutet für die Praxis, dass die notwendige erweiterte Schaltung für das Stossen kleiner Induktivitäten nur für eine Stufe bzw. bei 36-kV-Reihenspannung für 2 Stufen eines Marxschen Stoßspannungsgenerators ausgelegt werden muss. Damit sind die Mehrkosten für die Realisierung dieser zusätzlichen Schaltung gering.

In Fig. 10 sind die erweiterten Schaltungen für das Stossen kleiner Induktivitäten angegeben. Schaltung a) wurde 1973 von *Kannan* und *Narayana Rao* [7] angegeben und von *Glaninger* 1975 um die Schaltung b) für extrem kleine Induktivitäten erweitert [8]. Bei beiden Schaltungen wird die Induktivität L_d so gewählt, dass die Stirnzeit, die mit der Schaltung nach Fig. 2 erreicht wird, praktisch nicht beeinflusst wird, so dass die bisherigen Berechnungsformeln für die Dimensionierung des Seriewiderstandes weiterhin gelten. Physikalisch wird bei den Schaltungen nach Fig. 10 die Belastungskapazität über den Seriewiderstand aufgeladen, da die Parallelinduktivität L_d für hohe Frequenzen einen zu hohen Widerstand darstellt. L_d schliesst im Rücken der Stoßspannung den Seriewiderstand kurz, so dass die Rückenhalbwertszeit im wesentlichen durch eine Schwingung von $(L_d + L_b)$ mit C_b bzw. C_s bestimmt

wird. Da diese Schwingung praktisch nur durch den Parallelwiderstand R_p gedämpft ist, sollte dieser Widerstand möglichst klein gewählt werden, damit das Unterschwingen am kleinsten wird.

Falls die Belastungsinduktivität L_b in die Grössenordnung der Serieinduktivität L_d kommt, tritt bei der Entladung der Stosskapazität eine Spannungsteilung zwischen L_d und L_b auf. Dies ist der Grund, dass für extrem kleine Induktivitäten ein zusätzlicher Widerstand R_d notwendig ist (Fig. 10b), der so dimensioniert wird, dass auch während der Aufladung von C_b eine gleiche Spannungsteilung durch R_s und R_d erfolgt wie bei der Entladung von C_s durch L_d und L_b. R_d ist nicht notwendig, solange $L_b \geq 10 \cdot L_d$ ist. Durch R_d wird der Wirkungsgrad der Schaltung entsprechend der Spannungsteilung reduziert. Auch die Stirnzeit T_s wird dadurch verkürzt, so dass eine Erhöhung des Seriewiderstandes bei extrem kleinen Induktivitäten bzw. bei $L_b < 3\ L_d$ notwendig wird.

Die zusätzlichen Stosskreiselemente L_d und R_d können nach folgenden Kriterien dimensioniert werden:

Die Induktivität L_d muss so dimensioniert sein, dass ihre Impedanz im Anstieg der Blitzstoßspannung einen vernachlässigbaren Einfluss hat und im Rücken den Seriewiderstand praktisch kurzschliesst. Wegen der Spannungsteilung sollte L_d klein gegenüber L_b sein. In [8] wird für die Dimensionierung von L_d für den aperiodischen Grenzfall die Formel

$$L_d = R^2_d \cdot C_b/0{,}544^2$$

für $C_b \ll C_s$ und $L_d = 8 \cdot L_s$ abgeleitet. Um die Stirnzeit von 1,2 µs zu erreichen, sollte aber $R_d \cdot C_b \approx 0{,}4$ µs sein. Daraus ergibt sich für

$$L_d \approx 1{,}25 \cdot R_d \ (L_d \text{ in µH}, R_d \text{ in } \Omega).$$

Für einen Belastungsbereich C_b von 1,5 nF...10 nF variiert R_d von 300 Ω...50 Ω. Damit würde ein L_d von 405 µH...70 µH benötigt. Um mit möglichst kleiner Stosskapazität C_s eine normgerechte Rückenhalbwertszeit zu erreichen, wird man L_d an der oberen möglichen Grenze wählen. Nimmt man z. B. $L_d = 400$ µH, erreicht man im gesamten anwendbaren Bereich 15 mH $< L_b <$ 1 mH eine genügende Dämpfung [6]. Dies hat den Vorteil, dass L_d für alle Belastungen $L_b > 1$ mH konstant gewählt werden kann. Bei kleineren Belastungen ($L_b < 1$ mH) sollte auch die Induktivität L_d auf z. B. 100 µH verkleinert werden, um wieder einen günstigeren Wirkungsgrad zu erreichen und für die Praxis auch Belastungswerte 200 µH...1 mH normgerecht stossen zu können.

Falls infolge der Spannungsteilung zwischen L_d und L_b ab $L_b \approx 10 \cdot L_d$ eine Kurvenformverzerrung auftritt, wird parallel zur Belastung ein Widerstand R_d (Fig. 10b) eingesetzt. Dieser errechnet sich aus der Spannungsteilung zu $R_d/R_s = L_b/L_d$.

Für die Schaltung nach Fig. 10a kann unter der Voraussetzung $L_d < L_b/10$ die notwendige Stosskapazität C_s mit folgender Beziehung errechnet werden, um bei einer bestimmten Belastungsinduktivität noch eine Rückenhalbwertszeit von 40 µs zu erreichen:

$$T_r \approx \frac{\pi}{3} \sqrt{(C_s + C_b) \cdot (L_b + L_d)}$$

Für $L_d < L_b/10$ und $C_b \ll C_s$ wird $C_s \approx T_r^2/L_b$.

In Fig. 11 ist die notwendige Stosskapazität aufgetragen, um mit den Schaltungen nach Fig. 2 und 10 im einsetzbaren Belastungsbereich von $L_b > 1$ mH eine normgerechte Rückenhalbwertszeit zu erreichen. Zusätzlich ist in Fig. 12 der dadurch gewonnene Leistungsbereich bei Transformatoren für verschiedene Reihenspannungen aufgetragen, bei denen noch ein $T_r > 40$ µs erzielt werden kann. Gegenüber der Schaltung nach Fig. 2 hat sich der Leistungsbereich durch die Schaltung nach Fig. 10a z. B. für die Reihenspannung von 24 kV von ca. 20 MVA auf ca. 70 MVA verschoben. Bei der Schaltung nach Fig. 10a tritt in diesem Bereich ein Unterschwingen von 40% auf. Das Unterschwingen wird kleiner je grösser die Stosskapazität gewählt wird, wobei R_p entsprechend verkleinert werden muss, um eine normgerechte Rückenhalbwertszeit zu erhalten. Wie aus Fig. 11 ersichtlich ist, ist es mit der Schaltung nach Fig. 10a für $L_b > 4$ mH möglich, mit relativ kleinen Stosskapazitäten normgerechte Blitzstoßspannungen zu erreichen. Ist die Stosskapazität grösser als in Fig. 11 für eine bestimmte Induktivität angegeben, so erhöht sich die Rückenhalbwertszeit und es verringert sich das Unterschwingen. Durch eine Verkleinerung von R_p kann T_r bei dieser Schaltung für jede Stosskapazität jeweils in den Bereich von 40...60 µs angepasst werden.

R_p liegt bei den Schaltungen nach Fig. 10 immer zwischen 1...2 $R_{p\,50\,\mu s}$, dem Parallelwiderstand für Blitzstoßspannungen für rein kapazitive Belastung. Ist die Stosskapazität kleiner als in Fig. 11 für eine bestimmte Induktivität angegeben, so kann

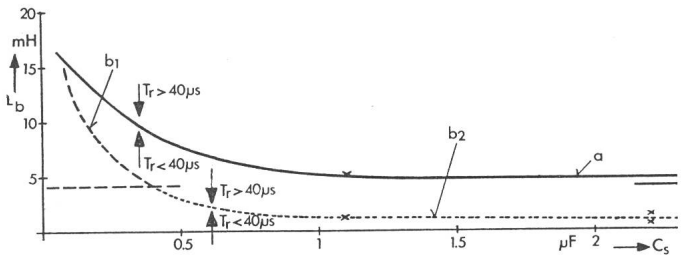

Fig. 11 Notwendige Stosskapazität C_s eines Stossgenerators, um an einer bestimmten Induktivität L_b eine Rückenhalbwertszeit von 40 µs zu erreichen

Schaltung a nach Fig. 2
b1 nach Fig. 10a
b2 nach Fig. 10b

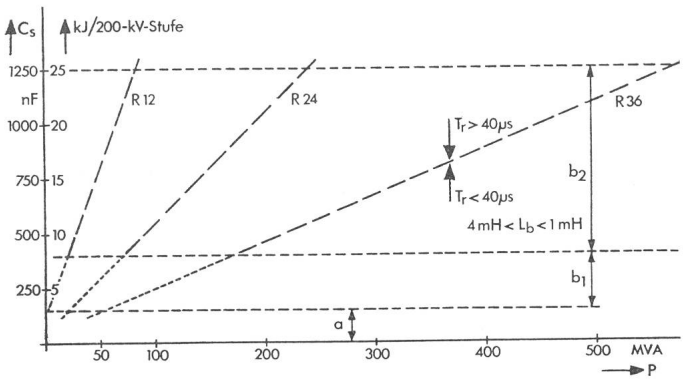

Fig. 12 Notwendige Stosskapazität C_s bzw. Stossenergie pro 200-kV-Stufe eines Stossgenerators in Abhängigkeit von der Drehstromleistung von Transformatoren

Parameter: Systemspannung, Schaltung
Annahmen: $u_k = 15\%$, $C_b < 10$ nF, $L_b = L_K$
Schaltung a nach Fig. 2
Schaltung b1 nach Fig. 10a
Schaltung b2 nach Fig. 10b

man keine normgerechte Rückenhalbwertszeit erreichen. Der Wirkungsgrad der Schaltung nach Fig. 10a ist günstiger als für die Schaltung nach Fig. 2.

5. Prüfschaltung für extrem kleine Induktivitäten

Ist $L_b < 4$ mH, kann mit der Schaltung nach Fig. 10b eine normgerechte Rückenhalbwertszeit erreicht werden (Fig. 11). Das Hauptproblem dieser Schaltung, neben dem Unterschwingen, ist der abnehmende Wirkungsgrad mit abnehmender Induktivität infolge der Spannungsteilung zwischen L_d und L_b. Dies bedeutet z. B., dass man bei Induktivitäten L_b und L_d von je 0,4 µH noch einen Wirkungsgrad von etwa 50% erreicht. Deshalb ist diese Schaltung durch die notwendige Spannungshöhe in der Praxis begrenzt auf Induktivitätswerte $L_b > 2\,L_d$. Eine Induktivität $L_b = 1$ mH kann bereits mit einer Stosskapazität von 1,15 µF bei $L_d = 0{,}4$ mH mit einem Wirkungsgrad von etwa 70% normgerecht gestossen werden (Fig. 11). Je kleiner die Induktivität L_b wird, desto grösser wird die Spannungsteilung und desto grösser wird das Unterschwingen.

L_d sollte wegen dem Wirkungsgrad für die Praxis kleiner als $L_b/2$ sein, d. h. eine Induktivität L_d von 0,4 mH ist anwendbar für Belastungen bis ca. 0,8 mH. Unter 0,8 mH sollte man L_d z. B. zu 100 µH wählen, wodurch sich der Belastungsbereich auf $0{,}2\text{ mH} < L_b < 0{,}8$ mH normgerecht vergrössern liesse. Natürlich muss dabei die Stosskapazität entsprechend vergrössert werden, z. B. benötigt man für 0,2 mH $C_s = 5{,}3$ µF, um eine Rückenhalbwertszeit von 40 µs zu erreichen.

In Fig. 12 ist die Vergrösserung des Leistungsbereiches von Transformatoren aufgetragen, in dem eine normgerechte Rückenhalbwertszeit mit einer Induktivität L_d von 0,4 mH erreichbar ist. Man erkennt, dass die Schaltung nach Fig. 10b bis ca. 1 mH oder z. B. für 24 kV bis 250 MVA normgerechte Rückenhalbwertszeiten mit relativ geringen Stosskapazitäten C_s zulässt.

6. Praktische Messungen

Für die zwei Werte $L_b = 5$ mH und $L_b = 1{,}2$ mH wurden die Schaltungen entsprechend Fig. 2 und 10 im praktischen Aufbau kontrolliert. Dabei wurden zwei Stufen eines vielstufigen Stoßspannungsgenerators parallel geschaltet verwendet. Kontrolliert wurden im wesentlichen die Spannungsform, der Wirkungsgrad und das Unterschwingen.

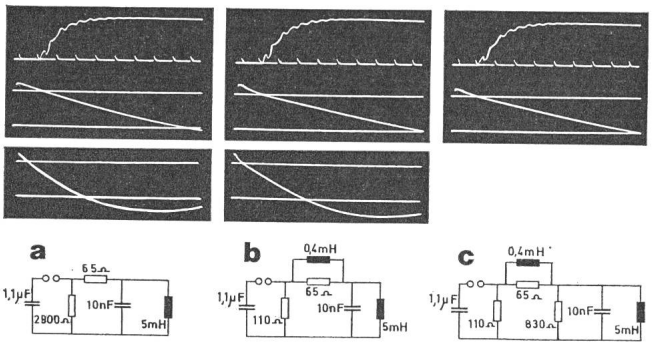

Fig. 13 Erzeugung von Blitzstoßspannungen bei einer Belastung von 5 mH mit verschiedenen Schaltungen
Einfluss von L_d und R_d
Zeitmaßstab: 0,5 µs, 10 µs bzw. 25 µs/Raster

a $T_s = 1{,}5$ µs $T_r = 40$ µs
$\eta = 95\%$ $u = 30\%$

b $T_s = 1{,}5$ µs $T_r = 42$ µs
$\eta = 100\%$ $u = 35\%$

c $T_s = 1{,}5$ µs $T_r = 45$ µs
$\eta = 93\%$

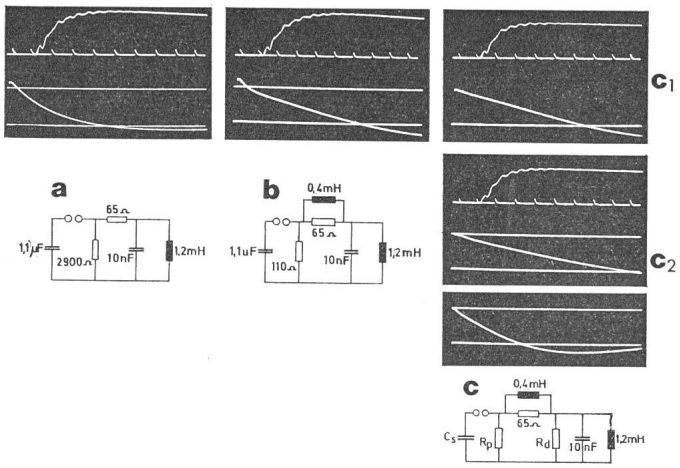

Fig. 14 Erzeugung von Blitzstoßspannungen bei einer Belastung von 1,2 mH mit verschiedenen Schaltungen
Einfluss von L_d und R_d
Zeitmaßstab: 0,5 µs, 10 µs bzw. 25 µs/Raster

a $T_s = 1{,}5$ µs $T_r = 18$ µs $\eta = 91\%$ $u = 7\%$

b $T_s = 1{,}5$ µs $T_r = 26$ µs $\eta = 96\%$ $u = 30\%$

c1 $R_p = 220\ \Omega$, $R_d = 220\ \Omega$, $C_s = 1{,}1$ µF $T_s = 1{,}2$ µs,
$T_r = 40$ µs, $\eta = 78\%$ $u = 40\%$

c2 $R_p = 55\ \Omega$ $R_d = 220\ \Omega$ $C_s = 2{,}2$ µF $T_s = 1{,}2$ µs,
$T_r = 42$ µs $\eta = 78\%$ $u = 25\%$

Belastung $L_b = 5$ mH, $C_b = 10$ nF. Dies entspricht etwa einem 120-MVA-Maschinen-Transformator bei der Prüfung der Unterspannungswicklung bei einer Reihenspannung von 36 kV (Tab. I).

In der Schaltung nach Fig. 2 ist für $C_s = 1{,}1$ µF entsprechend Fig. 11 bei ca. 5 mH die untere Induktivitätsgrenze gegeben, die noch eine Rückenhalbwertszeit von 40 µs ergibt. Fig. 13 bestätigt, dass mit dieser Schaltung die untere Grenze für eine normgerechte Rückenhalbwertszeit bei $R_s = 65\ \Omega$ und dem Parallelwiderstand für Schaltstoßspannungen erreicht wird, ferner, dass T_r mit den Schaltungen nach Fig. 10 grösser ist. Der Wirkungsgrad wird dabei in Schaltung nach Fig. 10b infolge der Spannungsteilung etwas kleiner, die Rückenzeit dagegen noch etwas grösser gegenüber Schaltung Fig. 10a. Das Unterschwingen ist bei dieser Belastung in den drei Schaltungen vergleichbar. Die Stirnzeit wird durch L_d praktisch nicht beeinflusst.

Belastung $L_b = 1{,}2$ mH, $C_b = 10$ nF. Bei dieser Belastung ist mit der Schaltung nach Fig. 2 keine normgerechte Rückenhalbwertszeit mehr erreichbar (Fig. 14). Die Schaltung nach Fig. 10a bringt eine etwas grössere Rückenhalbwertszeit, aber zusätzlich eine Verformung der Impulsform infolge der Spannungsteilung von L_d und L_b. Nur mit einer Schaltung nach Fig. 10b kann noch eine normgerechte Impulsform erreicht werden, wobei durch die Spannungsteilung L_d/L_b der Wirkungsgrad etwa auf das Verhältnis $L_b/(L_b + L_d)$ verkleinert wird. Das Unterschwingen wird durch R_d bei sonst gleichen Kreiselementen vergrössert. Durch die Spannungsteilung sinkt auch die Stirnzeit, so dass eine Erhöhung von R_s notwendig wird. Durch eine Erhöhung von R_p kann die Rückenhalbwertszeit geringfügig erhöht werden, so dass bei der Stosskapazität von 1,1 µF gerade noch 40 µs realisierbar sind. Eine Vergrösserung von C_s bringt eine weitere Erhöhung der Rückenhalbwertszeit und eine Erniedrigung des Unterschwingens.

7. Prüfung eines Einphasentransformators

Im folgenden werden Messungen an einem Einphasentransformator mit den drei Schaltungen wiedergegeben. Daten des Prüflings: Einphasentransformator mit Unterspannung 27 kV, Oberspannung 430 kV $\pm$ 21,5 kV, Nennleistung 380 MVA sowie Kurzschlußspannung $\approx$ 15%. Aus diesen Daten errechnet sich eine induktive Belastung auf der Unterspannungsseite von $L_k = L_b = 0{,}995$ mH.

Um die Prüflingsimpedanz zu erhöhen, wurde die Hochspannungswicklung bei den folgenden Vergleichsmessungen über 250 Ω an Erde gelegt. Die Spannung wurde mit einem gedämpft kapazitiven Spannungsteiler von 1,2 nF, der Strom mit einem Shunt von 0,5 Ω aufgenommen. Als Stossgenerator stand ein 8stufiger Marxscher Stossgenerator mit einer Energie von 120 kJ zur Verfügung, von dem 4 Stufen parallel und 2 in Serie geschaltet waren.

Fig. 15 zeigt die Vergleichsoszillogramme, wobei für jede Schaltung versucht wurde, das Optimum bezüglich der Impulsformen zu erreichen.

Fig. 15a zeigt, dass mit der herkömmlichen Schaltung an diesem Prüfling keine normgerechte Rückenhalbwertszeit erreichbar ist. Als Parallelwiderstand ist der Schaltstossparallelwiderstand eingesetzt, der Seriewiderstand (30 Ω) wurde so weit wie möglich reduziert. Das Überschwingen von 5% setzt der Verkleinerung von R_s eine praktische Grenze. Um die Stirnzeit einhalten zu können, wurde dabei die Belastungskapazität proportional erhöht. Man errreicht damit die Werte von Tab. II, Kol. a. Eine Vergrösserung der Stosskapazität auf 6 µF ergibt eine minimale Erhöhung der Rückenhalbwertszeit und eine Verkleinerung des Unterschwingens, bei praktisch gleichen Werten für die Stirnzeit und das Überschwingen. In Fig. 11 ist ersichtlich, dass eine Erhöhung der Stosskapazität ab einem bestimmten Wert keine wesentliche Erhöhung von T_r bewirkt.

Fig. 15b zeigt die Vergleichsoszillogramme für die Schaltung nach Fig. 10a. Es ergeben sich die Werte von Tab. II, Kol. b. Die Rückenhalbwertszeit von ca. 28 µs ist bereits mit einer Stosskapazität von 1,5 µF erreichbar. Die Stirnzeit und das Überschwingen sind wesentlich leichter einzuhalten und können optimal festgelegt werden, da sie unabhängig von T_r eingestellt werden können. Man erkennt zugleich aus Fig. 15b die Spannungsteilung von L_d mit L_b. In Fig. 15c ist diese Spannungsteilung durch die praktisch gleiche Spannungsteilung in der Stirn aufgehoben. Damit lassen sich bei der gleichen Stosskapazität C_s von 1,5 µF die Werte von Tab. II, Kol. c erreichen. Wie auch Fig. 11 zeigt, können bei dieser Belastung mit der Schaltung nach Fig. 10b noch normgerechte Rückenhalbwertszeiten erzielt werden.

Kennwerte zu Fig. 15 — Tabelle II

Schaltung		a	b	c
Stirnzeit T_s	µs	≈1,4	≈1,3	≈1,1
Rückenhalbwertszeit T_r	µs	≈ 15	≈ 28	≈ 40
Unterschwingen u	%	13	39	35
Überschwingen $ü$	%	5	0	0

8. Ergebnis

Die theoretischen Überlegungen und die praktischen Versuche zeigen, dass es mit den beiden Schaltungen in Fig. 10 möglich ist, die Blitzstoßspannung auch bei kleinen induktiven Belastungen innerhalb der zulässigen Grenzen zu erreichen. Damit ist die Prüfung mit Blitzstoßspannungen auch bei extremen Werten für Transformatoren entsprechend den Vorschriften möglich. Die notwendigen Zusatzelemente, um diese Schaltungen realisieren zu können, sind bei modernen Stoßspannungsgeneratoren ohne grossen Aufwand erhältlich. Der grosse praktische und wirtschaftliche Vorteil der vorgeschlagenen Schaltungen besteht darin, dass Generatoren mit geringerer Stufenenergie bereits die normgerechte Prüfung von Transformatoren gestatten. Die Optimierung des Stossgenerators bezüglich der notwendigen Energie kann auf Grund der Daten der Oberspannungswicklung erfolgen. Zusätzlich kann die Anzahl paralleler Stufen bei der Prüfung der Niederspannungswicklungen reduziert werden.

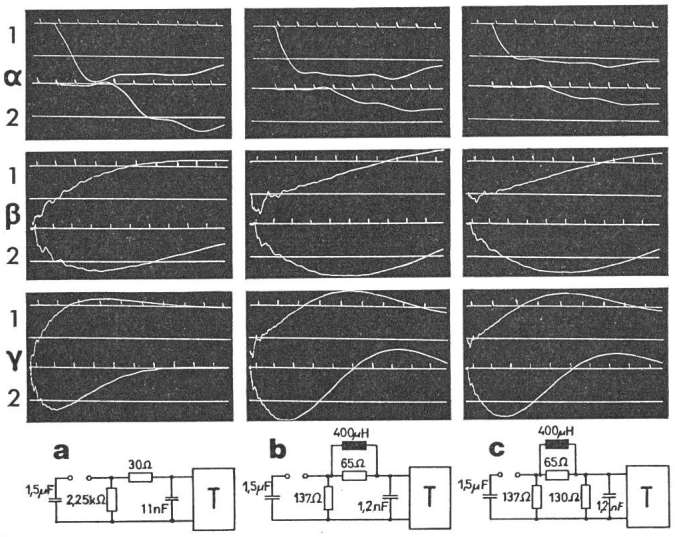

Fig. 15 Erzeugung von Blitzstoßspannungen mit einem 8stufigen 1,6-MV-Stossgenerator bei einer Belastung mit einem Einphasentransformator bei der Prüfung der Unterspannungswicklung

1 Spannung α 0,5 µs/Raster β 10 µs/Raster
2 Strom γ 25 µs/Raster

Literatur

[1] Techniques des essais à haute tension. Première partie: Définitions et prescriptions générales relatives aux essais. Deuxième partie: Modalités d'essais. Publication de la CEI 60–1 et 60–2, 1973.

[2] 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.

[3] *G. Papachristos* und *E. Woschnagg:* Norm- und Schaltstoßspannungsprüfung von Transformatoren und Kompensations-Drosselspulen. Digitale Berechnung der Spannungswellenform und Diagramme zur Dimensionierung des Stosskreises. Bull. SEV/VSE 65(1974)10, S. 721...731.

[4] *K. Gadek:* Betriebsmittel für die Hochleistungsübertragung. Transformatoren, ETZ-A 96(1975)10, S. 455...464.

[5] *R. Baehr* und *W. Casper:* Probleme bei Grenzleistungstransformatoren. ETZ-A 98(1977)3, S. 197...201.

[6] *S.R. Kannan* and *Y. Narayana Rao:* Prediction of the parameters of an impulse generator for transformer testing. Proc. IEE 120(1973)9, p. 1001...1005.

[7] *S.R. Kannan* and *Y. Narayana Rao:* Generator loading limits for impulse testing low-inductance windings. Proc. IEE 122(1975)5, p. 535...538.

[8] *P. Glaninger:* Stoßspannungsprüfung an elektrischen Betriebsmitteln kleiner Induktivität. Internationales Symposium Hochspannungstechnik, Zürich, 1975. Zürich, SEV, 1975; S. 140...144.

Adresse des Autors

Dr.-Ing. *Kurt Feser*, Emil Haefely & Cie. AG, 4000 Basel 28.