

# Auslegung von Stossgeneratoren für die Blitzstoßspannungsprüfung von Transformatoren

Autor(en): **Feser, K.**

Objektyp: **Article**

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

Band (Jahr): **69 (1978)**

Heft 18

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-914936>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# 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  $40 \mu\text{s}$  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  $40 \mu\text{s}$  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  $40 \mu\text{s}$  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  $40 \mu\text{s}$  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]<sup>1)</sup>. An kleinen induktiven Belastungen, wie sie in der Praxis bei der Prüfung der Niederspannungswicklung von Maschinentransformatoren, bei Verteiltransformatoren oder bei Drosselspulen und Hochfrequenzsperrn auftreten, kann mit der üblichen Marxschen Stoßspannungsschaltung oft keine normgerechte Rückenhalbwertszeit von  $50 \pm 10 \mu\text{s}$  erreicht werden. In den Vorschriften ist deshalb bei der Prüfung von Transformatoren vorgesehen, dass man die nicht gestossenen Wicklungen über Widerstände von maximal  $400 \Omega$  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. An-

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

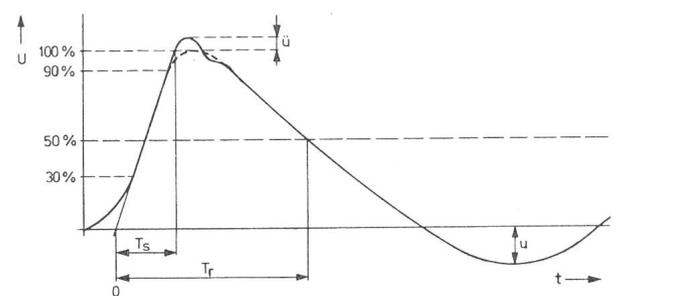


Fig. 1 Definitionen der Blitzstoßspannungen 1,2/50

$T_s$  Stirnzeit  
 $T_r$  Rückenhalbwertszeit  
 $\ddot{u}$  Überschwingen  
 $u$  Unterschwingen

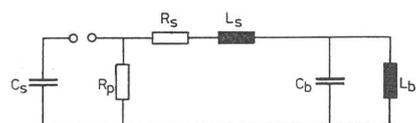


Fig. 2 Einstufige Ersatzschaltung eines vielstufigen Stoßspannungsgenerators

$C_s$  Stosskapazität  
 $R_p$  Parallelwiderstand  
 $R_s$  Seriawiderstand  
 $L_s$  Streuinduktivität des Stosskreises  
 $C_b$  Belastungskapazität inkl. Prüflingskapazität und Stoßspannteiler  
 $L_b$  Belastungsinduktivität

schliessend 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.

## 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:  $T_s = 1,2 \mu\text{s} \pm 30\%$   
Rückenhalbwertszeit:  $T_r = 50 \mu\text{s} \pm 20\%$   
Überschwingen:  $\ddot{u} < 5\%$   
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  $\ddot{u}$  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 Seriawiderstand  $R_s$  ändern zu können.

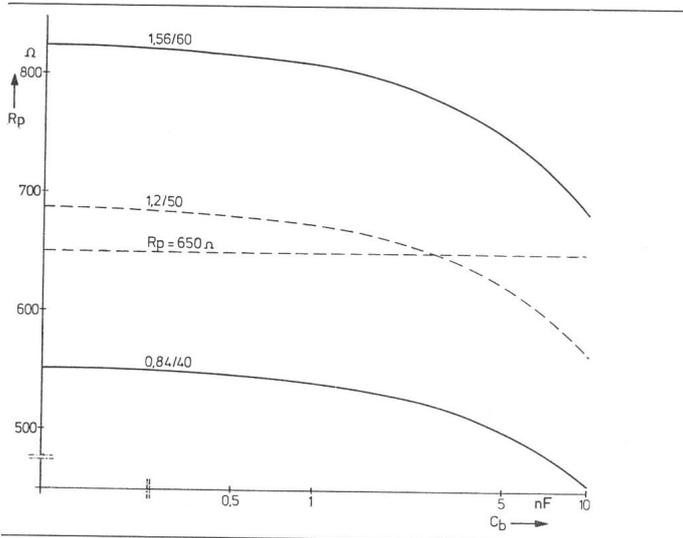


Fig. 3 Toleranzbereiche der Rückenhalbwertszeit für bestimmte Parallelwiderstände  $R_p$  in Abhängigkeit von der rein kapazitiven Belastung  $C_b$   
2-MV-Stossgenerator, 400 kW,  $C_s = 100$  nF

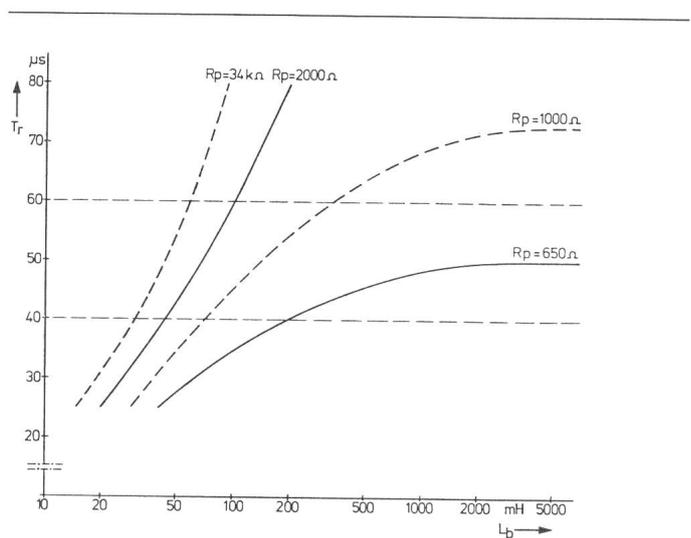


Fig. 5 Rückenhalbwertszeit  $T_r$  in Abhängigkeit von der induktiven Belastung  $L_b$  mit dem Parallelwiderstand  $R_p$  als Parameter  
2-MV-Stossgenerator, 200 kW,  $C_s = 100$  nF

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, das 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  $\mu$ s ausgelegt wird, und derjenige Wert, der für eine Rückenhalbwertszeit von 2500  $\mu$ s (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 be-

stimmte 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  $\mu$ H (realisierbar bei Stosskreisen für 200 kV bis 400 kV) und Seriewiderständen von ca. 50  $\Omega$  an einer Induktivität von  $L_b > 3$  mH normgerechte Rückenhalbwertszeiten mit einer Stosskapazität von 3  $\mu$ F 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  $\mu$ s erreichbar ist, zu

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

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.

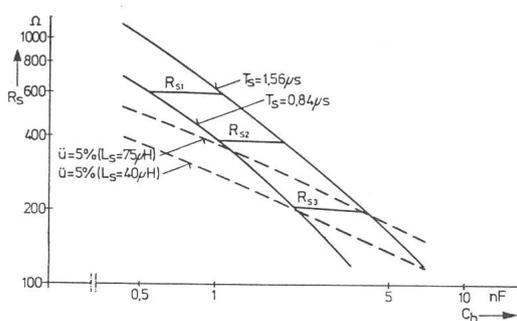
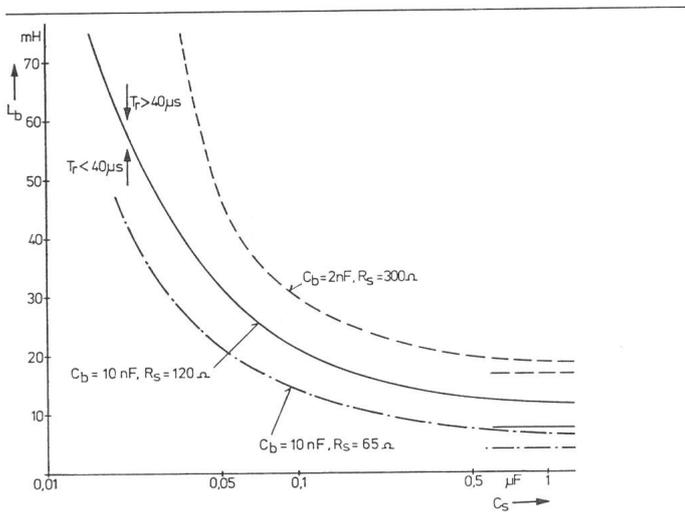


Fig. 4 Toleranzbereich der Stirnzeit für bestimmte Seriewiderstände  $R_s$  in Abhängigkeit von der Belastung  $C_b$   
2-MV-Stossgenerator, 400 kW,  $C_s = 100$  nF



**Fig. 6** Notwendige Stosskapazität  $C_s$  eines Stossgenerators, um an einer bestimmten Induktivität  $L_b$  eine Rückenhalbwertszeit von  $40 \mu s$  zu erreichen  
 $R_p$  Schaltstossparallelwiderstand  
 Parameter: Seriewiderstand  $R_s$ , Belastungskapazität  $C_b$

### 3. Prüflingsimpedanzen

Prüflinge, die Induktivitätswerte unter  $15 \text{ mH}$  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  $5 \dots 10 \text{ nF}$  angenommen werden.

#### Induktivitätswerte von Transformatoren in Abhängigkeit von der Reihenspannung und der Nennleistung

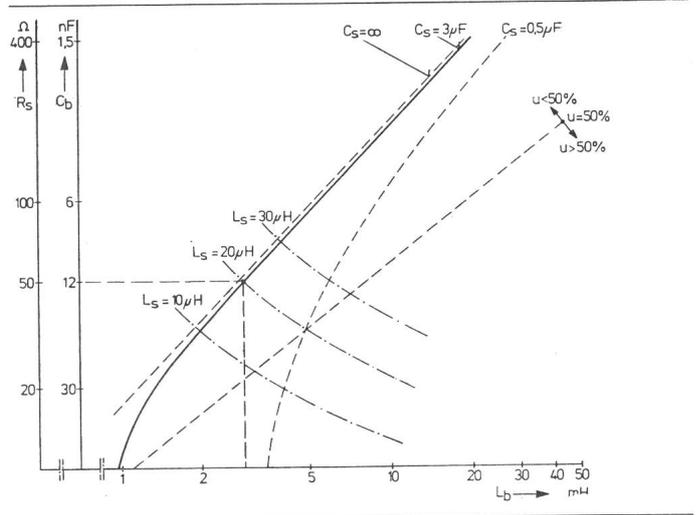
Annahmen: Kurzschlußspannung 15 %, Netzfrequenz 50 Hz

Tabelle I

Systemspannung $U_m$ (r.m.s.) kV	Prüfspannungen nach CEI 71-1 (1976) (Maximalwerte)				Induktivität $L_K$ in mH						
	Blitzstossspannung 1,2/50 kV	Abgeschnittene Blitzstossspannung kV <sup>2)</sup>	Schaltstossspannung 250/2500 kV	Summenladespannung kV	Drehstromleistung in MVA						
					50	100	200	400	600	1000	2000
1100 <sup>3)</sup>	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	—	—	—	—

<sup>2)</sup> Abgeschnittene Stoßspannungswerte:  $1,15 \cdot U_{p1,2/50}$ .

<sup>3)</sup> Für Reihe 1100 kV wurden die Prüfwerte aus den niedrigeren Reihenspannungen abgeleitet.



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

Rückenhalbwertszeit:  $T_r = 40 \mu s$

Überschwingen:  $\ddot{u} = 5 \%$

Parameter: Streuinduktivität  $L_s$ , Stosskapazität  $C_s$

Man erkennt aus Tab. I, dass bei Höchstspannungstransformatoren auf der Oberspannungsseite im gesamten Bereich  $15 \text{ mH}$  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  $420 \text{ kV}$  Oberspannungen, Leistungen von Maschinentransformatoren, die bahntransportfähig sind, von maximal  $1700 \text{ MVA}$  für möglich erachtet [4; 5].

Nicht erreichbar ist die geforderte Rückenhalbwertszeit  $T_r$  von  $40 \mu s$  bei der Stoßprüfung der Unterspannungswicklung von grossen Maschinentransformatoren bzw. bei Verteiltransformatoren ab einer bestimmten Leistung. Induktivitätswerte unter  $15 \text{ mH}$  sind dort bereits heute üblich.

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

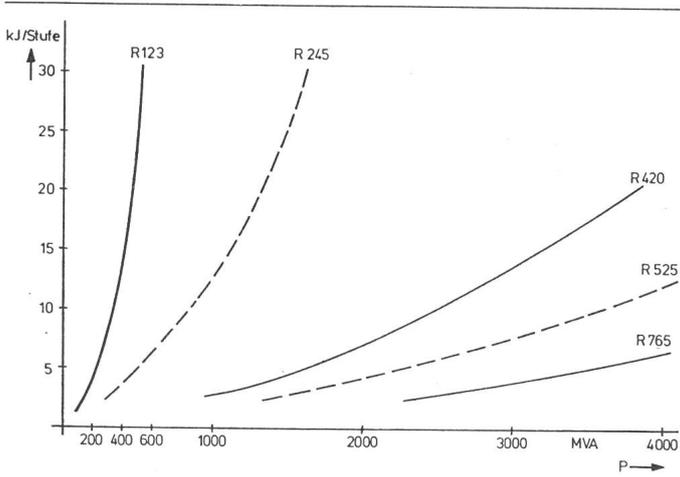


Fig. 8 Notwendige Stossenergie pro 200-kV-Stufe eines vielstufigen Stossgenerators in Abhängigkeit von der Drehstromleistung von Transformatoren

Parameter: Systemspannung

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

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.

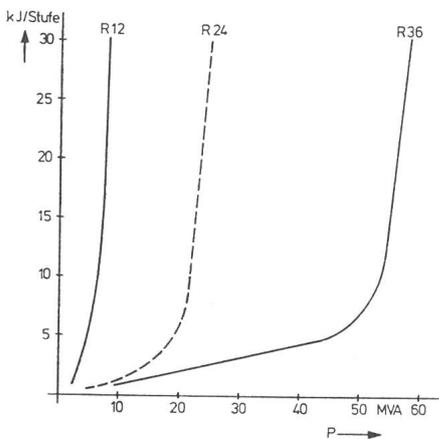


Fig. 9 Notwendige Stossenergie pro 200-kV-Stufe eines Stossgenerators in Abhängigkeit von der Drehstromleistung von Transformatoren

Schaltung des Stossgenerators nach Fig. 2

Parameter: Systemspannung

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

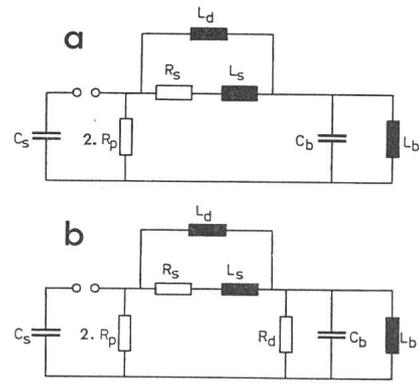


Fig. 10 Einstufige Ersatzschaltungen eines vielstufigen Stossgenerators für die Erzeugung normgerechter Blitzstossspannungen

a Erweiterte Schaltung für die Induktivitäten von  $4 \text{ mH} < L_b < 15 \text{ mH}$

b Erweiterte Schaltung für extrem kleine Induktivitäten von  $0,4 \text{ mH} < L_b < 4 \text{ mH}$

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  $L_b < 15 \text{ mH}$  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 Stoskreiselemente  $L_d$  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

$$L_d = R_d^2 \cdot C_b / 0,544^2$$

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

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

Für einen Belastungsbereich  $C_b$  von  $1,5 \text{ nF} \dots 10 \text{ nF}$  variiert  $R_d$  von  $300 \Omega \dots 50 \Omega$ . Damit würde ein  $L_d$  von  $405 \mu H \dots 70 \mu H$  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.  $L_d = 400 \mu H$ , erreicht man im gesamten anwendbaren Bereich  $15 \text{ mH} < L_b < 1 \text{ mH}$  eine genügende Dämpfung [6]. Dies hat den Vorteil, dass  $L_d$  für alle Belastungen  $L_b > 1 \text{ mH}$  konstant gewählt werden kann. Bei kleineren Belastungen ( $L_b < 1 \text{ mH}$ ) sollte auch die Induktivität  $L_d$  auf z.B.  $100 \mu H$  verkleinert werden, um wieder einen günstigeren Wirkungsgrad zu erreichen und für die Praxis auch Belastungswerte  $200 \mu H \dots 1 \text{ mH}$  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  $40 \mu s$  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  $L_b > 1 \text{ mH}$  eine normgerechte Rücken-

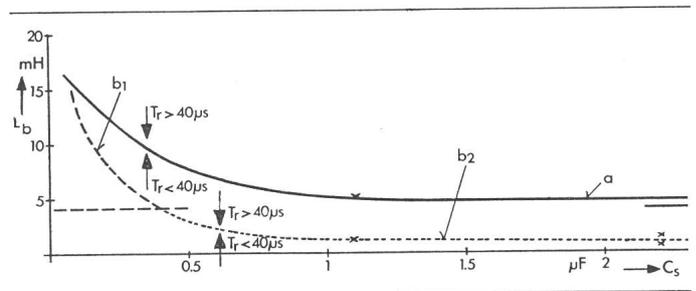


Fig. 11 Notwendige Stosskapazität  $C_s$  eines Stossgenerators, um an einer bestimmten Induktivität  $L_b$  eine Rückenhalbwertszeit von  $40 \mu s$  zu erreichen

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

halbwertszeit zu erreichen. Zusätzlich ist in Fig. 12 der dadurch gewonnene Leistungsbereich bei Transformatoren für verschiedene Reihenspannungen aufgetragen, bei denen noch ein  $T_r > 40 \mu s$  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  $24 \text{ kV}$  von ca.  $20 \text{ MVA}$  auf ca.  $70 \text{ MVA}$  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  $L_b > 4 \text{ mH}$  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  $40 \dots 60 \mu s$  angepasst werden.

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

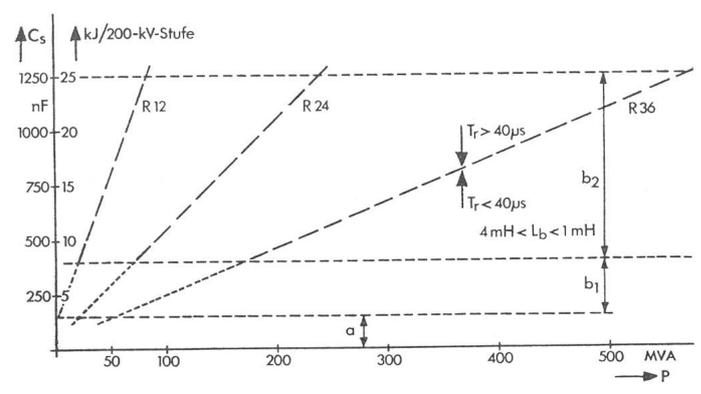


Fig. 12 Notwendige Stosskapazität  $C_s$  bzw. Stossenergie pro  $200\text{-kV}$ -Stufe eines Stossgenerators in Abhängigkeit von der Drehstromleistung von Transformatoren

Parameter: Systemspannung, Schaltung  
Annahmen:  $u_k = 15\%$ ,  $C_b < 10 \text{ nF}$ ,  $L_b = L_k$   
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  $0,4 \mu\text{H}$  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  $1,15 \mu\text{F}$  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  $100 \mu\text{H}$  wählen, wodurch sich der Belastungsbereich auf  $0,2 \text{ mH} < L_b < 0,8 \text{ mH}$  normgerecht vergrössern liesse. Natürlich muss dabei die Stosskapazität entsprechend vergrössert werden, z. B. benötigt man für  $0,2$  mH  $C_s = 5,3 \mu\text{F}$ , um eine Rückenhalbwertszeit von  $40 \mu\text{s}$  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.

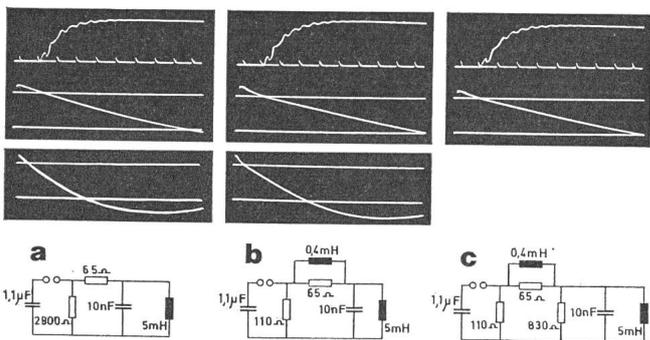


Fig. 13 Erzeugung von Blitzstoßspannungen bei einer Belastung von 5 mH mit verschiedenen Schaltungen

Einfluss von  $L_d$  und  $R_d$

Zeitmaßstab:  $0,5 \mu\text{s}$ ,  $10 \mu\text{s}$  bzw.  $25 \mu\text{s}$ /Raster

- |   |                         |                        |                |            |
|---|-------------------------|------------------------|----------------|------------|
| a | $T_s = 1,5 \mu\text{s}$ | $T_r = 40 \mu\text{s}$ | $\eta = 95\%$  | $u = 30\%$ |
| b | $T_s = 1,5 \mu\text{s}$ | $T_r = 42 \mu\text{s}$ | $\eta = 100\%$ | $u = 35\%$ |
| c | $T_s = 1,5 \mu\text{s}$ | $T_r = 45 \mu\text{s}$ | $\eta = 93\%$  |            |

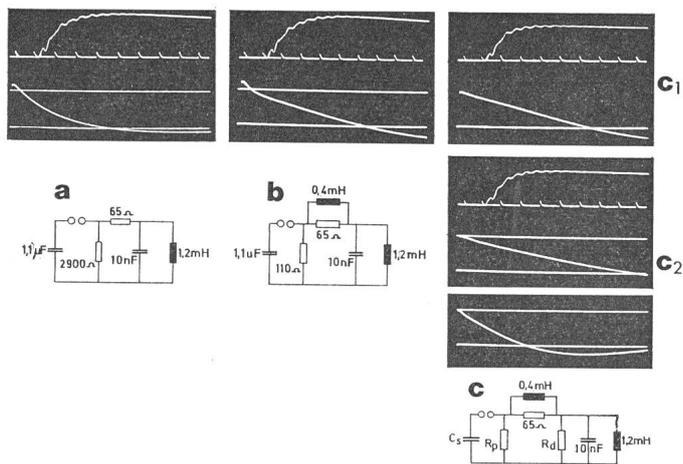


Fig. 14 Erzeugung von Blitzstoßspannungen bei einer Belastung von 1,2 mH mit verschiedenen Schaltungen

Einfluss von  $L_d$  und  $R_d$

Zeitmaßstab:  $0,5 \mu\text{s}$ ,  $10 \mu\text{s}$  bzw.  $25 \mu\text{s}$ /Raster

- |    |  |                        |                         |  |
|----|--|------------------------|-------------------------|--|
| a  | $T_s = 1,5 \mu\text{s}$                          | $T_r = 18 \mu\text{s}$ | $\eta = 91\%$           | $u = 7\%$  |
| b  | $T_s = 1,5 \mu\text{s}$                          | $T_r = 26 \mu\text{s}$ | $\eta = 96\%$           | $u = 30\%$   |
| c1 | $R_p = 220 \Omega$ ,<br>$T_r = 40 \mu\text{s}$ , | $R_d = 220 \Omega$ ,   | $C_s = 1,1 \mu\text{F}$ | $T_s = 1,2 \mu\text{s}$ ,<br>$\eta = 78\%$<br>$u = 40\%$ |
| c2 | $R_p = 55 \Omega$<br>$T_r = 42 \mu\text{s}$      | $R_d = 220 \Omega$     | $C_s = 2,2 \mu\text{F}$ | $T_s = 1,2 \mu\text{s}$ ,<br>$\eta = 78\%$<br>$u = 25\%$ |

det. Kontrolliert wurden im wesentlichen die Spannungsform, der Wirkungsgrad und das Unterschwingen.

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  $C_s = 1,1 \mu\text{F}$  entsprechend Fig. 11 bei ca. 5 mH die untere Induktivitätsgrenze gegeben, die noch eine Rückenhalbwertszeit von  $40 \mu\text{s}$  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  $1,1 \mu\text{F}$  gerade noch  $40 \mu\text{s}$  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  $250 \Omega$  an Erde gelegt. Die Spannung wurde mit einem gedämpft kapazitiven Spannungsteiler von 1,2 nF, der Strom mit einem Shunt von  $0,5 \Omega$  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 ( $30 \Omega$ ) 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 erreicht damit die Werte von Tab. II, Kol. a. Eine Vergrößerung der Stosskapazität auf  $6 \mu\text{F}$  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.  $28 \mu\text{s}$  ist bereits mit einer Stosskapazität von  $1,5 \mu\text{F}$  erreichbar. Die Stirnzeit und

Kennwerte zu Fig. 15

Tabelle II

Schaltung		a	b	c
Stirnzeit $T_s$	$\mu\text{s}$	$\approx 1,4$	$\approx 1,3$	$\approx 1,1$
Rückenhalbwertszeit $T_r$	$\mu\text{s}$	$\approx 15$	$\approx 28$	$\approx 40$
Unterschwingen $u$	%	13	39	35
Überschwingen $\ddot{u}$	%	5	0	0

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  $1,5 \mu\text{F}$  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.

## 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.

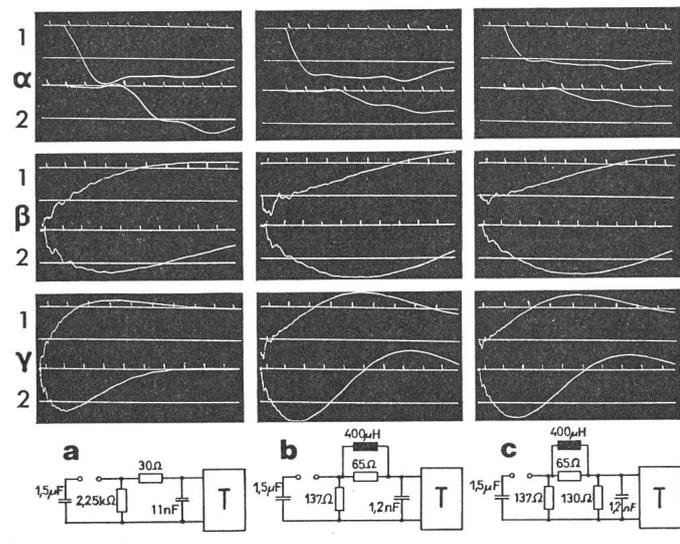


Fig. 15 Erzeugung von Blitzstoßspannungen mit einem 8stufigen 1,6-MV-Stossgenerator bei einer Belastung mit einem Einphasentransformator bei der Prüfung der Unterspannungswicklung

1 Spannung  $\alpha$  0,5  $\mu\text{s}$ /Raster  $\beta$  10  $\mu\text{s}$ /Raster  
2 Strom  $\gamma$  25  $\mu\text{s}$ /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 Prüfungszwecke. 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 und 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 und 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.