Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 63 (1972)

Heft: 11

Artikel: Die Berechnung stationärer und transienter elektrischer Vorgänge in Prüfkaskaden

Autor: Heilbronner, F. / Landers, E.U.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915700

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: 27.12.2025

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

Die Berechnung stationärer und transienter elektrischer Vorgänge in Prüfkaskaden [1])

Von *F. Heilbronner* und *E. U. Landers*, München

621.317.2.027.3

Der Umgang mit Prüfkaskaden erfordert eine genaue Kenntnis derjenigen Fälle, in denen eine Beanspruchung über die Nenndaten hinaus möglich ist. Für eine rechnerische Ermittlung wird aufgrund eines Ersatzschaltbildes das Knotenpunktpotentialverfahren angewendet und durch ideale Übertrager ergänzt, die durch die Spannungen und Ströme ihrer Wicklungen simuliert werden.

Bei stationärem Betrieb begrenzen die thermisch zulässigen Wicklungsströme, die durch die Prüflingslast und die Beschaltung der Kaskade bestimmt sind, die zulässige Beanspruchung. Im transienten Betrieb hingegen ist auf die ungleichmässige Spannungsaufteilung Rücksicht zu nehmen, die im wesentlichen durch die Dauer des sekundärseitigen Kurzschlusses und durch eine primärseitige Bedämpfung bestimmt ist.

Le maniement des cascades d'essai exige une connaissance précise des cas dans lesquels une charge supérieure aux données nominales est possible. Pour la détermination par calculs, on utilise sur la base d'un circuit équivalent le procédé de potentiel par point nodal, complété par des transformateurs parfaits, simulés par les tensions et les courants de leurs enroulements.

En service stationnaire, les courants d'enroulement thermiquement admissibles, déterminés par la charge de l'éprouvette et le branchement de la cascade, limitent la charge admissible. En service transitoire, il faut par contre tenir compte de la répartition inégale de la tension, essentiellement causée par la durée du court-circuit du côté du secondaire et par un amortissement du côté primaire.

1. Einführung

Zur Simulation tatsächlich auftretender Spannungsbeanspruchungen erfolgt die Prüfung elektrischer Hochspannungsgeräte im allgemeinen mit zwei Spannungsarten, nämlich mit Stoßspannung und mit betriebsfrequenter Wechselspannung. Sehr hohe Wechselspannungen werden üblicherweise durch Transformatorenkaskaden erzeugt [1][2]) — einer Art Reihenschaltung identischer Einzeltransformatoren, bei der es auslegungstechnisch darauf ankommt, jedes Glied optimal auszunutzen, d. h. die Beanspruchung gleichmässig auf die gesamte Anordnung zu verteilen. Dieses Prinzip bedeutet, im stationären Betrieb die *Leistung* und im transienten Betrieb die *Spannung* der Einzelglieder ein vorgegebenes Mass nicht übersteigen zu lassen.

Die Ermittlung dieser Leistungs- und Spannungsverteilung wird im folgenden theoretisch hergeleitet und an einer dreistufigen Prüfkaskade rechnerisch durchgeführt.

2. Ersatzschaltbild, Rechenverfahren

2.1 Ersatzschaltbild

Der Aufbau einer Prüfkaskade aus gleichartigen Transformatoren mit den Hauptbestandteilen Niederspannungs-, Hochspannungs- und Kopplungswicklung (N, H, K) erlaubt, die einzelnen Stufen durch das Sternersatzschaltbild des Dreiwicklers darzustellen, selbst wenn im Inneren mehr als drei Wicklungen vorhanden sind [2]. Da bei der Kaskadenschaltung jede Stufe auf dem Potential der vorhergehenden aufbaut, muss das Sternersatzschaltbild durch einen idealen Übertrager zur Potentialtrennung ergänzt werden. Wenn — wie im Transformatorenbau üblich — mit bezogenen Grössen gerechnet wird, hat dieser Übertrager das Übersetzungsverhältnis 1 : 1. Als weitere wesentliche Elemente müssen die Eigenkapazitäten der Transformatoren C_T und die Streukapazitäten gegen Erde C_S mit in die Rechnung einbezogen werden, um die kapazitive Eigenlast der Kaskade richtig nachzubilden. Die zur Blindleistungskompensation eingebauten Drosselspulen werden im Ersatzschaltbild an der Kopplungswicklung angeschlossen. Die Impedanzen der Magnetisierungszweige werden weggelassen, weil der Magnetisierungsstrom (ca. 1...2 % des Nennstromes) das Verhalten der Kaskade nicht wesentlich beeinflusst, wenn man von möglichen Resonanzerscheinungen im Oberwellenbereich absieht und zudem eine für alle drei Wicklungen gemeinsame Hauptfeldreaktanz eine nur bei grösseren Vernachlässigungen mögliche Annahme ist. Wenn man noch den — im allgemeinen kapazitiven — Prüfling mit einbezieht, erhält man z. B. für eine 3stufige Kaskade ein Ersatzschaltbild (Fig. 1) ähnlich dem in [3] angegebenen.

2.2 Rechenverfahren

Die Berechnung der Strom- und Spannungsverteilung kann für den stationären Fall mit Hilfe der komplexen Rechnung durchgeführt werden, wenn Strom und Spannung zeitlich sinusförmig angenommen werden. Dies ist im allgemeinen zulässig, da die maximale Abweichung z. B. der Ausgangsspannung von der Sinusform durch die Prüfbedingungen [4] begrenzt ist.

Für transiente Vorgänge lässt sich die Berechnung mit Hilfe der Differentialrechnung ausführen, was im folgenden noch gezeigt wird.

Bezeichnet man mit a die Zahl der Knotenpunkte je Stufe und mit s die Anzahl der Stufen, so erhält man zunächst mit dem in der Netzberechnung üblichen Knotenpunktverfahren [5; 6] ein Gleichungssystem der Form

$$(\boldsymbol{Y})\,\boldsymbol{p} = \boldsymbol{i} \tag{1}$$

Hierbei ist $(\boldsymbol{Y})$ die Knotenpunktadmittanzmatrix mit $a \cdot s$ Zeilen und Spalten, $\boldsymbol{p}$ der Potentialvektor und $\boldsymbol{i}$ der Vektor der Knotenpunktströme. Wenn man die Wicklungen der 1 : 1-Übertrager durch ihre Ströme und Spannungen ersetzt, erhält man zusätzlich $s-1$ unbekannte Knotenpunktströme $\boldsymbol{i}_T$, aber auch $s-1$ Gleichungen daraus, dass die Potentialdifferenzen der Anschlussknotenpunkte paarweise gleich gross sind (Der 1 : 1-Übertrager in der letzten Stufe läuft leer). Z. B. lautet] die Gleichung für den 1 : 1-Übertrager zwischen der zweiten und dritten Stufe in Fig. 1:

$$(p_8 - p_{15}) - (p_{16} - p_{17}) = 0 \tag{2}$$

[1]) Wissenschaftlicher Beitrag zum Internationalen Symposium Hochspannungstechnik des VDE und der IEEE Power Engineering Society, München, März 1972.

[2]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Verwendete Rechenwerte

Tabelle I

Nenndaten			
Spannung:	5/1200 kV in 3 Stufen		
Leistung:	800 kvar (KB)		
Auf 5 kV Spannung bezogene Werte			
R_N =	0,563 Ω	L_N =	5,08 mH
R_H =	0,288 Ω	L_H =	−0,23 mH
R_K =	0,563 Ω	L_K =	5,08 mH
R_D =	0 Ω	L_D =	0,31 H
Werte der Kapazitäten			
C_T =	8,71 μF	C_S =	0,77 μF
C_n =	11,32 μF (800 kvar bei 15 kV)		

Das Gesamtsystem mit den zueinander transponierten Verknüpfungsmatrizen $\boldsymbol{K}_i$ und $\boldsymbol{K}_p$ ist dann

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{Y} & \boldsymbol{K}_i \\ \boldsymbol{K}_p & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \boldsymbol{p} \\ \boldsymbol{i}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{i} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{3}$$

2.3 Verwendete Daten

Den folgenden Berechnungen sind die Daten der in [7] näher beschriebenen Prüfkaskade zugrunde gelegt, deren Nenndaten mit den in der Rechnung verwendeten Werten in Tabelle I zusammengestellt sind. Dabei wurde angenommen, dass Niederspannungs- und Kopplungswicklung identisch aufgebaut sind.

3. Stationärer Betrieb

Der ungünstigste stationäre Fall für eine Prüfkaskade ist der Betrieb mit Nennspannung. In den folgenden Berechnungen wird die bezogene Ausgangsspannung deshalb 15 kV = konst. gesetzt und die Lastkapazität C_L in den Grenzen $0 \leq C_L \leq C_n$ variiert. Die Auflösung des linearen, komplexen Gleichungssystems [Gl. (3)] ergibt die gesuchte Spannungs- und Stromverteilung.

3.1 Strombelastung der Wicklungen

Ohne besondere Massnahmen geben Prüftransformatoren meist schon im Leerlauf Blindleistung ab und haben demzufolge auch einen nicht vernachlässigbaren Leerlaufstrom. Die kapazitive Blindleistung eines Prüflings wird zum Teil durch die Blindleistungen der Streuinduktivitäten kompensiert, so dass am Eingang der Kaskade im Beispiel nur um 640 kvar mehr abgegeben werden, wenn die Last von 0 auf 800 kvar kapazitiv vergrössert wird. Die Strombelastung der Niederspannungswicklungen (Fig. 2) kann herabgesetzt werden, indem ein Teil der abgegebenen Blindleistung durch Drosselspulen in den Transformatorstufen selbst aufgenommen wird, und so die vorhergehenden Stufen entlastet werden. Diese Kompensation führt dazu, dass sich die Kaskade bei kleinen Werten von C_L wie eine Induktivität verhält. Die Ohmschen Stromanteile bleiben in bezug auf den Blindstrom vernachlässigbar, ausgenommen im Bereich des Blindleistungsgleichgewichts. In Fig. 2 wurde deshalb dieser Bereich ausgespart.

Der maximale Betrag des Stromes in der Niederspannungswicklung der ersten Stufe lässt sich also durch die Kompensation von 230 auf 80 A reduzieren. Damit vermindert sich auch die erforderliche Einspeiseblindleistung von 960 auf 360 kvar.

3.2 Spannungsverteilung

Wie schon erwähnt ist die Spannungsverteilung im stationären Betrieb im allgemeinen kein kritisches Problem. So weicht im vorliegenden Beispiel die Stufenspannung maximal +6,5 % bei Betrieb ohne und maximal +4,5 % bei Betrieb mit Kompensationsdrosselspulen vom bezogenen Nennwert 5 kV ab.

3.3 Wahl der Stufenzahl

Mit steigender Stufenzahl der Kaskade lassen sich zwar höhere Spannungen erreichen, aber die Gesamtleistung der Kaskade bleibt durch die Leistungsfähigkeit der untersten Stufe begrenzt, wenn man sie nicht stärker auslegt als die

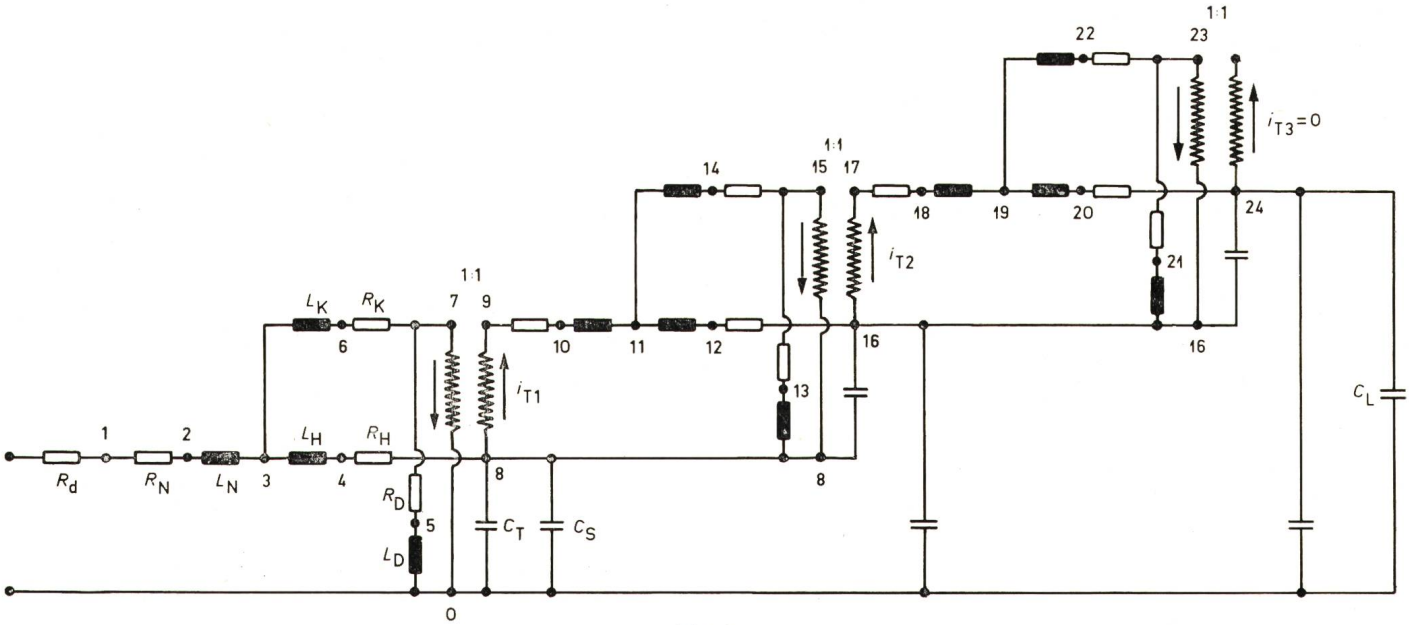

Fig. 1
Ersatzschaltbild einer 3stufigen Prüfkaskade

R_d	primärseitiger Dämpfungswiderstand	C_T	Eigenkapazität der Kaskadenstufe
R_D	Wicklungswiderstand der Kompensationsdrosselspule	C_S	Streukapazität gegen Erde
R_N, R_H, R_K	Wicklungswiderstände der Kaskadenstufe	C_L	Lastkapazität
L_D	Induktivität der Kompensationsdrosselspule	i_T	Ströme in den 1 : 1-Übertragern
L_N, L_H, L_K	Streuinduktivitäten der Kaskadenstufe	1...24	Knotenpunkte

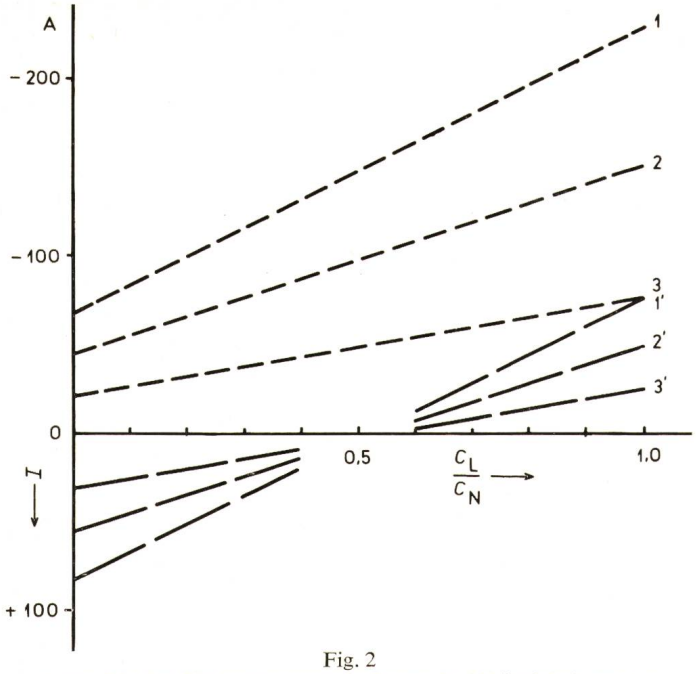

Fig. 2
Strom I in den Niederspannungswicklungen in Abhängigkeit von der Lastkapazität C_L

1,1' untere, *2,2'* mittlere, *3,3'* obere } Kaskadenstufe
1,2,3 ohne, *1',2',3'* mit } Kompensation

anderen Stufen. Dieser Effekt wurde mit den Daten aus Tabelle I untersucht, wobei die Ausgangsblindleistung mit 800 kvar kapazitiv konstant gehalten wurde und die Ausgangsspannung linear mit der Stufenzahl vergrössert wurde (Fig. 3a und b).

Die Kurzschlußspannung wächst also stark an, wobei sich die Kompensationsdrosselspulen nur wenig auswirken. Deshalb darf keine zu grosse Stufenzahl gewählt werden, wenn man keine weiche Spannungsquelle zulassen will.

Für den Verlauf der eingangsseitigen Blindleistung in Abhängigkeit von der Stufenzahl s hat dagegen die Kompensation einen grossen Einfluss. Ohne Kompensation steigt die eingangsseitige Blindleistungsabgabe im Leerlauf stark an, während sie bei Nennlast nur langsam wächst und für $s > 5$ wegen der dann grossen Induktivität der Kaskade sogar wieder abfällt. Mit Kompensation dagegen gibt es am Eingang der Kaskade bei $s = 4$ ein Maximum für die Blindleistungsaufnahme im Leerlauf und ein Minimum für die Blindleistungsabgabe bei Nennlast.

4. Einschwingvorgänge

Bei der Berechnung zeitlich beliebig veränderlicher Vorgänge in einem Netzwerk aus Widerständen R, Induktivitäten L und Kapazitäten C lassen sich die Differentialgleichungen innerhalb eines Zeitschritts Δt so linearisieren, dass für die Ermittlung der Spannungsverteilung die gleichen Rechenregeln wie für den stationären Zustand verwendet werden können. Formal wirkt sich das so aus, dass zum Aufbau der Knotenpunktadmittanzmatrix in Gl. (3) bei Elementen zwischen den Knotenpunkten i und k als Leitwert $1/R_{ik}$ oder $\Delta t/(2L_{ik})$ oder $2C_{ik}/\Delta t$ verwendet und die rechte Seite nach jedem Schritt h neu gebildet wird [6]; die Teilmatrizen $\boldsymbol{K}_i$ und $\boldsymbol{K}_p$ bleiben die gleichen wie in Gl. (3). Will man z. B. bei 50 Hz Grundfrequenz einen Zeitbereich von 4 Perioden erfassen, so ist bei $\Delta t = 0{,}05$ ms das Gleichungssystem (3) für 1600 verschiedene rechte Seiten zu lösen.

4.1 Einschwingvorgänge beim Draufschalten einer sinusförmigen Wechselspannung

In Fig. 4 ist das Ergebnis einer solchen Berechnung mit den Werten aus Tabelle I dargestellt, und zwar für Spannung und Strom auf der Kaskadeneingangseite und für die Ausgangsspannungen jeder Stufe gegen Erde. Dabei wird primärseitig (vor Knotenpunkt 1 in Fig. 1) über einen Dämpfungswiderstand $R_d = 3\ \Omega$ eine sinusförmige Wechselspannung von

$$5000\sqrt{2}\cos(2\pi \cdot 50 \cdot \Delta t \cdot h)\ \text{V}$$
$$\Delta t = 0{,}05\ \text{ms}$$

im Spannungsmaximum draufgeschaltet. Dadurch ergibt sich kräftedynamisch für die Wicklungen eine um 50 % höhere Beanspruchung gegenüber einem Zuschalten im Nulldurchgang.

Man erkennt, dass zunächst die Spannungen sehr ungleichmässig über die Prüfkaskade verteilt sind und erst nach 2 Pe-

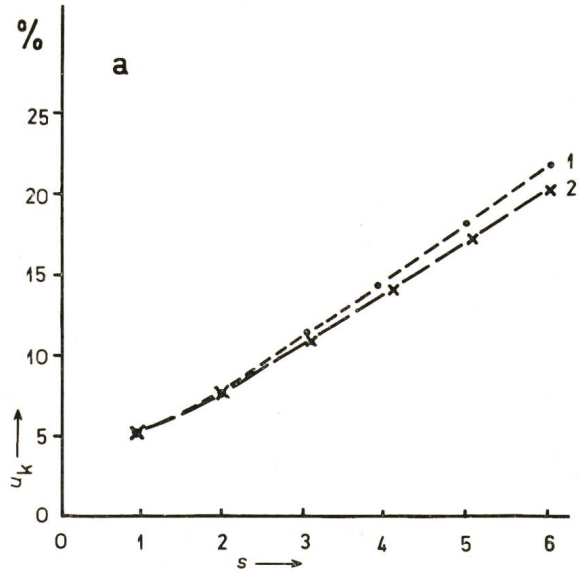

Fig. 3a
Auf 800 kVA bezogene Kurzschlußspannung u_k in Abhängigkeit von der Stufenzahl s
1 ohne Kompensation
2 mit Kompensation

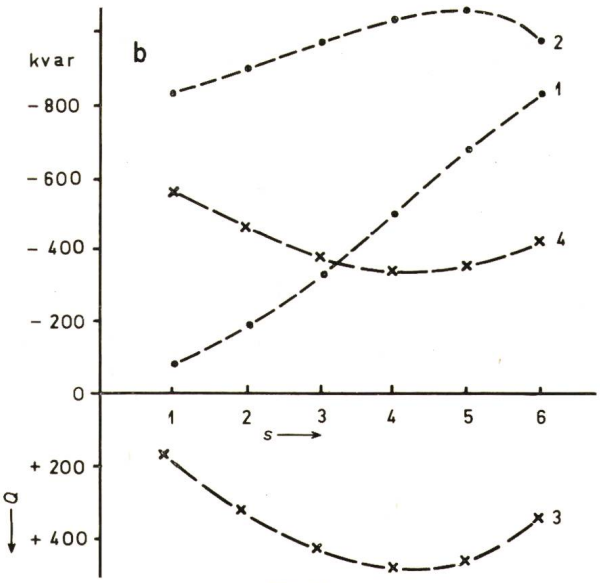

Fig. 3b
Eingangsseitige Blindleistung Q in Abhängigkeit von der Stufenzahl s
1 Leerlauf, *2* Nennlast } ohne Kompensation
3 Leerlauf, *4* Nennlast } mit Kompensation

rioden der eingeschwungene Zustand mit nahezu linearer Spannungsaufteilung und 90°-Phasenvoreilung des Stromes erreicht ist. Die dämpfende Wirkung eines primärseitigen Widerstands auf die Draufschaltvorgänge ist aus Kurve 1 von Fig. 5a und b ersichtlich, in denen auf die Scheitelwerte des eingeschwungenen Zustands bezogene Maximalstrom- und -spannungswerte angegeben sind. So werden z. B. die ersten Maxima des Eingangsstroms und der Ausgangsspannung der 3. Stufe gegen Erde auf 88 % vermindert, wenn dieser Widerstand von 3 auf 5 Ω vergrössert wird.

Die Form der Ausgangsspannung der 2. Stufe nach Beginn des Draufschaltvorgangs (Fig. 4a) ist den zeitlichen Spannungsverläufen, die bei Schalthandlungen in Netzen gemessen werden, sehr ähnlich. Es liegt der Gedanke nahe, diese nunmehr berechenbare Spannungsform zu einer realistischen Laborprüfung der im Netz eingesetzten Hochspannungsgeräte zu verwenden.

4.2 Auswirkung eines sekundärseitigen Kurzschlusses während der positiven Halbperiode

Eine inhomogene Funkenstrecke mit ihrem ausgesprochenen Polaritätsverhalten bildet eine schwere Beanspruchung für einen Prüftransformator. Da ihre Durchschlagspannung bei negativer Polarität grösser als bei positiver sein kann, wird der Transformator während der negativen Halbperiode nicht geschützt [8]. Zusätzlich regt der Spannungszusammenbruch interne Schwingungen an, die örtliche Ungleichmässigkeiten in der Spannungsaufteilung hervorrufen können.

Das Ergebnis solcher Überlegungen ist in Fig. 4 zusätzlich gezeichnet. Wird vorausgesetzt, dass der Funkenwiderstand des Überschlages der 3. Stufe (Knotenpunkt 24 in Fig. 1) im Zeitpunkt t_e vom Wert Unendlich auf den Wert Null zurückgeht und im Zeitpunkt t_a wieder unendlich gross wird, so äussern sich diese vereinfachenden Annahmen rechentechnisch darin, dass die Matrix $\boldsymbol{Y}$ in Gl. (3) für die Zeitdauer $t_k = t_a - t_e$ zu ändern ist. Dies muss so oft wiederholt werden, wie Wiederzündungen während der positiven Halbperiode zu berücksichtigen sind.

Damit sich zu Demonstration der Effekt des Draufschaltens nicht überlagert, ist in Fig. 4 der Überschlag zum Zeitpunkt des positiven Höchstwerts der 3. Periode gewählt worden, und zwar für eine Zeitdauer von insgesamt $2\,t_k = 2$ ms: Die Spannung bleibt zunächst 1 ms lang auf Null; bedingt durch das Erlöschen der äusseren Funkenstrecke steigt sie nach einem

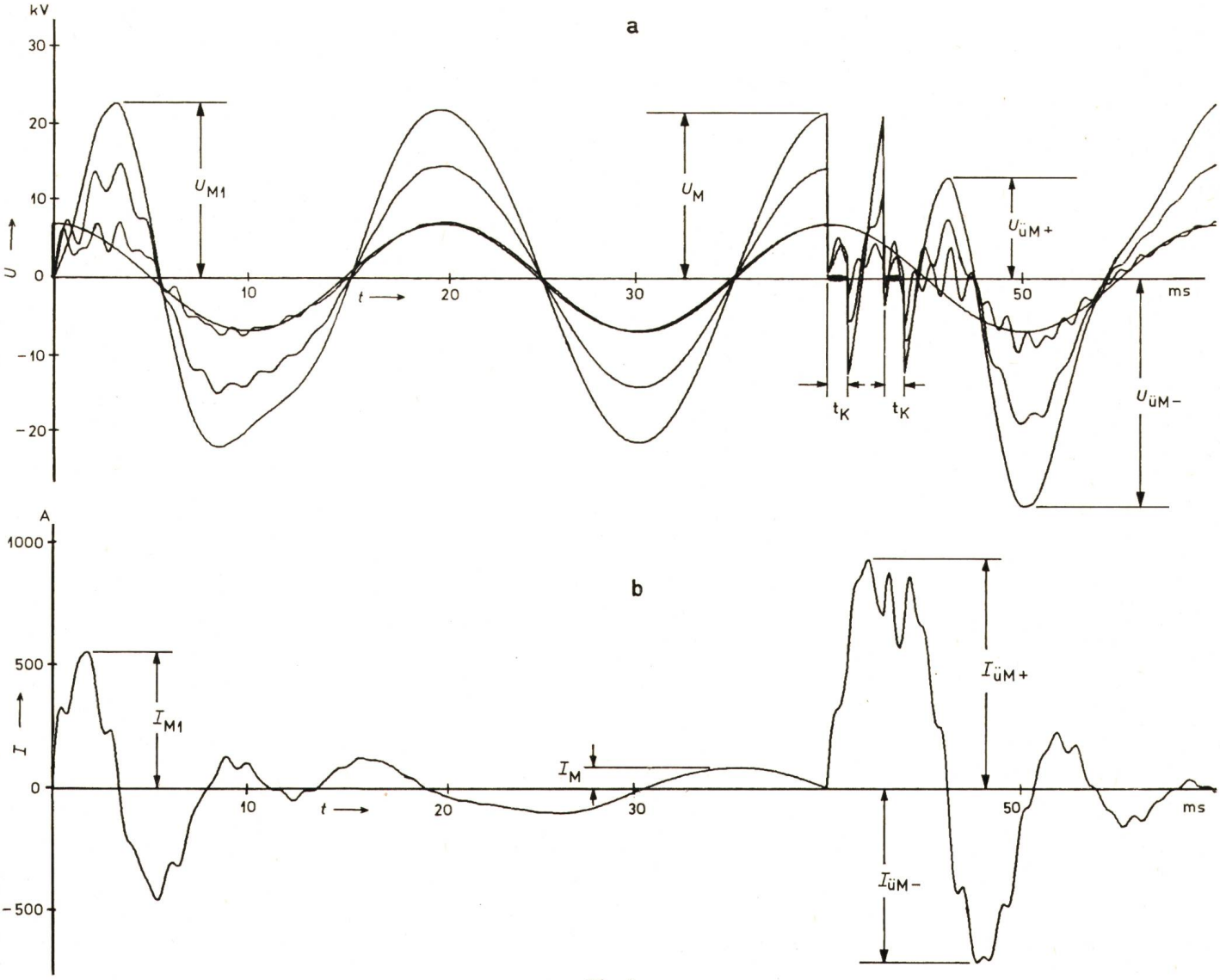

Fig. 4
Transiente Vorgänge in einer dreistufigen Prüfkaskade
(a) Eingangsspannung sowie Ausgangsspannungen der 3 Stufen U
(b) Eingangsstrom I
t Zeit

Einfluss eines primärseitigen Dämpfungswiderstands und der Kurzschlussdauer auf charakteristische Spannungs- und Stromwerte (Bezeichnungen aus Fig. 4) Tabelle II

R_d	U_{M1}	I_{M1}	$t_k = 2$ ms				$t_k = 0{,}5$ ms				$2 \cdot t_k = 2 \cdot 1{,}0 = 2$ ms				U_M	I_M
Ω	kV	A	$U_{üM+}$ kV	$I_{üM+}$ A	$U_{üM-}$ kV	$I_{üM-}$ A	$U_{üM+}$ kV	$I_{üM+}$ A	$U_{üM-}$ kV	$I_{üM-}$ A	$U_{üM+}$ kV	$I_{üM+}$ A	$U_{üM-}$ kV	$I_{üM-}$ A	kV	A
1	26,1	636	33,9	1131	38,9	1040	37,3	1177	35,2	1020	26,1	1270	43,2	1122		
3	22,7	552	26,0	936	28,9	730	30,6	1010	26,5	734	13,0	930	29,8	700	22	102
5	20,0	487	20,5	790	23,8	546	25,6	887	22,4	551	3,6	810	22,9	473		
10	15,4	372	12,6	525	18,9	326	17,6	668	19,4	315	kein zweiter Überschlag					

kurzen Ausgleichsvorgang wieder an und bricht bei 21 kV erneut für 1 ms zusammen. Danach wird nur ein positives Maximum von 13 kV, aber ein negatives von 29,8 kV erreicht.

Die bedämpfende Wirkung einer primärseitigen Widerstands R_d ist für Werte von 1 bis 10 Ω in Tabelle II zusammengestellt und in Auszügen in Fig. 5a und b wiedergegeben. Aus dem Vergleich der Zahlenwerte geht hervor, dass die Kurzschlussdauer t_k die Beträge der überschwingenden Spannungen entscheidend beeinflusst: So sind bei einem einmaligen Überschlag z. B. für $t_k = 0{,}5$ ms die positiven Spannungen grösser als die negativen, während für $t_k = 2$ ms das Umgekehrte der Fall ist. Es ist denkbar, dass das gleiche wegen des grossen Primärstromes durch eine gesättigte Drosselspule oder durch Stromkommutierung bewirkt werden kann.

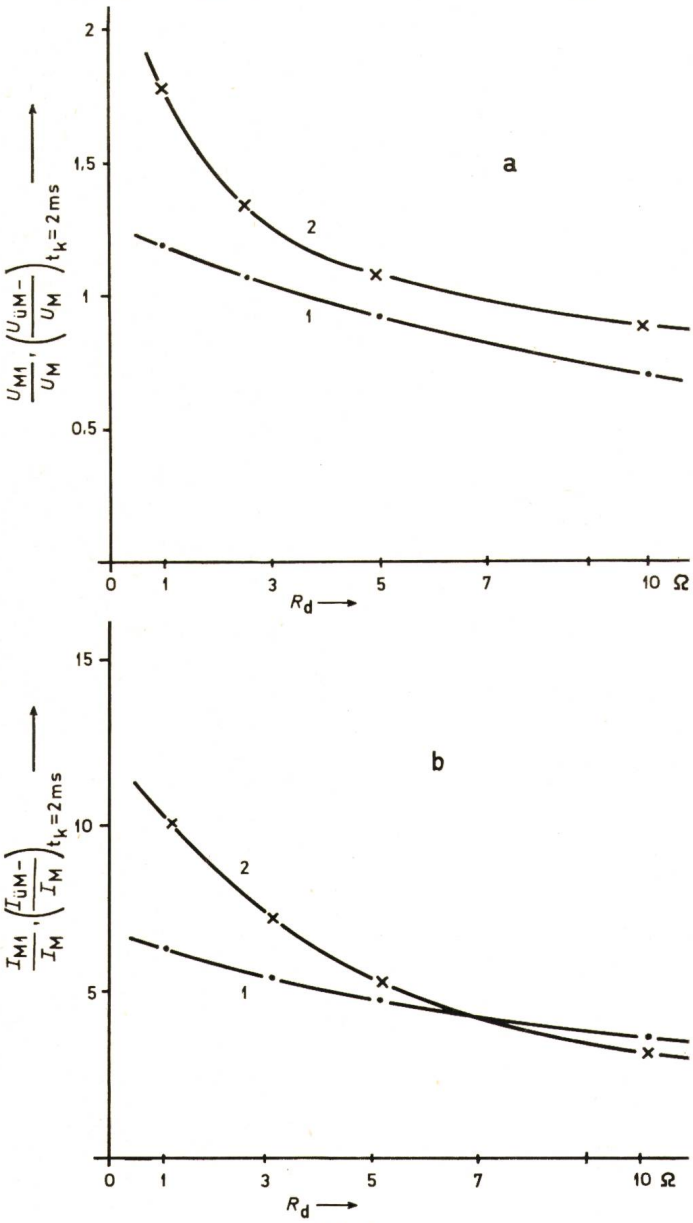

Fig. 5

Einfluss eines primärseitigen Dämpfungswiderstands auf verschiedene Einschwingspannungen (a) sowie auf den Eingangsstrom (b)

Verhältnisse beim Draufschalten (1) sowie bei einem einmaligen Überschlag (2)

Bezeichnungen siehe Fig. 4

Für eine Entscheidung der Frage, ob eine äussere Funkenstrecke als Schutz gegen solche Überspannungen verwendet werden kann, ist die genaue Kenntnis des detaillierten Spannungsverlaufs am Transformator sowie die Stosskennlinie der Funkenstrecke selbst nötig. Da hierfür ein ausführliches Ersatzschaltbild notwendig ist, bietet sich gleichzeitig die Möglichkeit, bei Kenntnis weiterer Funkenstreckenparameter den Einfluss des gesamten Kreises und seines Innenwiderstands auf das Durchschlagverhalten von Funkenstrecken rechnerisch zu untersuchen.

5. Zusammenfassung

Der Umgang mit Prüfkaskaden erfordert eine genaue Kenntnis derjenigen Fälle, in denen eine Beanspruchung über die Nenndaten hinaus möglich ist. Für eine rechnerische Ermittlung wird aufgrund eines Ersatzschaltbildes das Knotenpunktpotentialverfahren angewendet und durch ideale Übertrager ergänzt, die durch die Spannungen und Ströme ihrer Wicklungen simuliert werden.

Bei stationärem Betrieb begrenzen die thermisch zulässigen Wicklungsströme, die durch die Prüflingslast und die Beschaltung der Kaskade bestimmt sind, die zulässige Beanspruchung. Im transienten Betrieb hingegen ist auf die ungleichmässige Spannungsaufteilung Rücksicht zu nehmen, die im wesentlichen durch die Dauer des sekundärseitigen Kurzschlusses und durch eine primärseitige Bedämpfung bestimmt ist.

Die Verfasser danken dem Leibniz-Rechenzentrum der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München, für die zur Verfügung gestellte Rechenzeit.

Literatur

[1] *E. Welter:* Über einen neuen Hochspannungstransformator nach Dessauer für sehr hohe Spannungen. ETZ 39(1918)38, S. 373...375 und Nr. 39, S. 383...387.

[2] *K. Schlosser:* Eine auf physikalischer Grundlage ermittelte Ersatzschaltung für Transformatoren mit mehreren Wicklungen. BBC-Nachrichten 45(1963)3, S. 107...132.

[3] *G. K. M. Pfestorf* und *B. N. Jayaram:* Über die theoretische Behandlung der Kaskadenschaltung von Hochspannungs-Transformatoren. Jahrbuch der Technischen Hochschule Hannover -(1958/60), S. 184...193.

[4] Bestimmungen für Transformatoren und Drosselspulen. VDE-Vorschrift 0532/8.64.

[5] *H. Dommel:* Digitale Rechenverfahren für elektrische Netze. Dissertation der Technischen Hochschule München, 1962.

[6] *H. W. Dommel:* Digital computer solution of electromagnetic transients in single- and multiphase networks. Trans. IEEE PAS 88(1969)4, p. 388...399.

[7] *A. Stirba* u. a.: 1,2MV-Wechselspannungsprüfanlage. In: H. Prinz: Feuer, Blitz und Funke. München, F. Bruckmann, 1965, S. 143...148.

[8] *D. Train:* Transient overvoltages on testing transformers. Electr. Times 151(1967)18, p. 713...717.

Adresse der Autoren:

Dr.-Ing. *F. Heilbronner,* Oberingenieur, und *E. U. Landers,* Wissenschaftlicher Assistent, Institut für Hochspannungs- und Anlagentechnik der TU München, Arcisstrasse 21, D-8 München 2.