

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

**Band:** 51 (1960)

**Heft:** 3

**Artikel:** Beschreibung der transistorischen wiederkehrenden Schalterspannung durch vier Parameter : Prüfmöglichkeiten in Kurzschluss-Versuchsanlagen

**Autor:** Baltensperger, P.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-917014>

#### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

#### Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

#### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 16.01.2026

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

# BULLETIN

## DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEM VEREINS

GEMEINSAMES PUBLIKATIONSORGAN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEM VEREINS (SEV) UND  
DES VERBANDES SCHWEIZERISCHER ELEKTRIZITÄTSWERKE (VSE)

### Beschreibung der transitorischen wiederkehrenden Schalterspannung durch vier Parameter

#### Prüfmöglichkeiten in Kurzschluss-Versuchsanlagen \*)

Von P. Baltensperger, Baden

621.316.5.064.31

Da die transitorische wiederkehrende Spannung nach einer Kurzschlussunterbrechung meistens einen komplizierten Verlauf hat, ist die von der CEI<sup>1)</sup> festgelegte Näherung durch einen ein-frequenten «aequivalenten» Spannungsverlauf zu grob. Eine bessere Näherung ist durch eine zwei-fre-quente oder allgemein durch eine mittels vier Parameter definierte Einschwingspannung möglich. Die vorliegende Arbeit befasst sich nur mit der Frage, ob man in Kurzschlussprüf-anlagen wiederkehrende Spannungen mit vier vorgegebenen Parametern nachbilden kann. Zwei hiefür vorgeschlagene Methoden werden diskutiert und als in vielen Fällen brauchbar beurteilt. In andern Fällen, wo Vier-Parameterprüfungen nicht realisierbar sind, wird vorgeschlagen, zwei verschiedene Prüfungen mit je einer einzigen Eigenfrequenz durchzuführen.

Comme la tension transitoire apparaissant aux bornes de chaque pôle d'un disjoncteur aussitôt après la coupure d'un courant de court-circuit a généralement une allure compliquée, la courbe de référence proposée par la CEI<sup>1)</sup> et comportant une composante transitoire oscillant à une seule fréquence paraît être une approximation beaucoup trop grossière. Une meilleure approximation pourrait être donnée par la courbe d'une oscillation à deux fréquences ou plus généralement par une oscillation définie par quatre paramètres. Le présent travail examine la possibilité de reproduire dans les stations d'essais des tensions de rétablissement définies par quatre paramètres donnés. Deux propositions de circuits d'essai sont discutées et sont jugées utilisables pour de nombreux cas. Pour les autres cas, il est proposé d'effectuer deux essais séparés faisant apparaître chacun une oscillation à une seule fréquence, mais celle-ci devant être différente dans les deux essais.

#### 1. Einleitung

Die nach der Unterbrechung eines Netz-Kurzschlusses an den Schalterklemmen erscheinende transitorische wiederkehrende Spannung besitzt meistens mehrere Eigenfrequenzen oder sonstwie einen unregelmässigen Verlauf. Ein Beispiel hiefür ist in Fig. 1, Kurve  $u$ , gezeigt. Von der CEI [1]<sup>2)</sup> wurden für solche Fälle «aequivalente» Spannungsverläufe festgelegt, welche nur eine einzige Eigenfrequenz enthalten. In Fig. 1a ist der nach den Empfehlungen der CEI konstruierte aequivalente Spannungsverlauf durch den Scheitelpunkt  $A$  bzw. durch die gedämpfte einfache Sinuslinie  $u_1$  charakterisiert.

Der Punkt  $A$  kann durch zwei Parameter angegeben werden, z. B. durch die Amplitude  $e_m$  und die Zeit  $t_m$ , oder durch die Amplitude und die Eigenfrequenz  $f$ , oder wiederum durch die Amplitude und die Steilheit  $s$ , oder schliesslich durch die Eigenfrequenz und die Steilheit. Dabei bestehen zwischen diesen Grössen die folgenden einfachen Beziehungen:

$$f = \frac{1}{2 t_m} \quad s = \frac{e_m}{t_m} = 2 f e_m \quad (1)$$

Wie Fig. 1a zeigt, weicht die CEI-Kurve  $u_1$  beträchtlich vom Original-Spannungsverlauf  $u$  ab.

\*) Die vorliegende Arbeit wurde als Antwort auf eine Rundfrage im Schalterkomitee Nr. 3 der CIGRE eingereicht.

<sup>1)</sup> Commission Electrotechnique Internationale.

<sup>2)</sup> Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Man ist heute allgemein der Ansicht, dass eine solche grobe Vereinfachung unzulässig ist.

Im Comité d'Etudes 3 (Hochspannungsschalter) der CIGRE wird zur Zeit eine genauere Beschreibung des Spannungsverlaufes studiert. Man betrachtet insbesondere 2 exponierte repräsentative Punkte der Spannungskurve, z. B. die Punkte  $A_1$  und  $A_2$  in Fig. 1b. Jede andere Kurve, welche durch  $A_1$  und  $A_2$  geht, und in welcher  $A_1$  und  $A_2$  exponierte Punkte nach «oben» sind, stellt eine bessere Näherung an die Originalkurve  $u$  dar als es zwischen  $u_1$  und  $u$  in Fig. 1a der Fall ist. Zur Beschreibung der beiden Punkte  $A_1$  und  $A_2$  sind jedoch 4 Parameter nötig, z. B.  $e_1, t_1$  für  $A_1$ , und  $e_2, t_2$  für  $A_2$ . Die zwischen den Parametern bestehenden Beziehungen lauten analog den Formeln (1):

$$\begin{aligned} f_1 &= \frac{1}{2 t_1} & s_1 &= \frac{e_1}{t_1} = 2 f_1 e_1, \\ f_2 &= \frac{1}{2 t_2} & s_2 &= \frac{e_2}{t_2} = 2 f_2 e_2 \end{aligned} \quad (2)$$

Ob man mit den Anstiegsdauern  $t_1, t_2$ , den Amplituden  $e_1, e_2$ , den Steilheiten  $s_1, s_2$  oder den Eigenfrequenzen  $f_1, f_2$  als Parameter arbeitet, ist unwesentlich. Wichtig ist nur, dass man von den insgesamt 8 genannten Parametern 4 unabhängige besitzt, welche die Lage der Punkte  $A_1$  und  $A_2$  bestimmen.

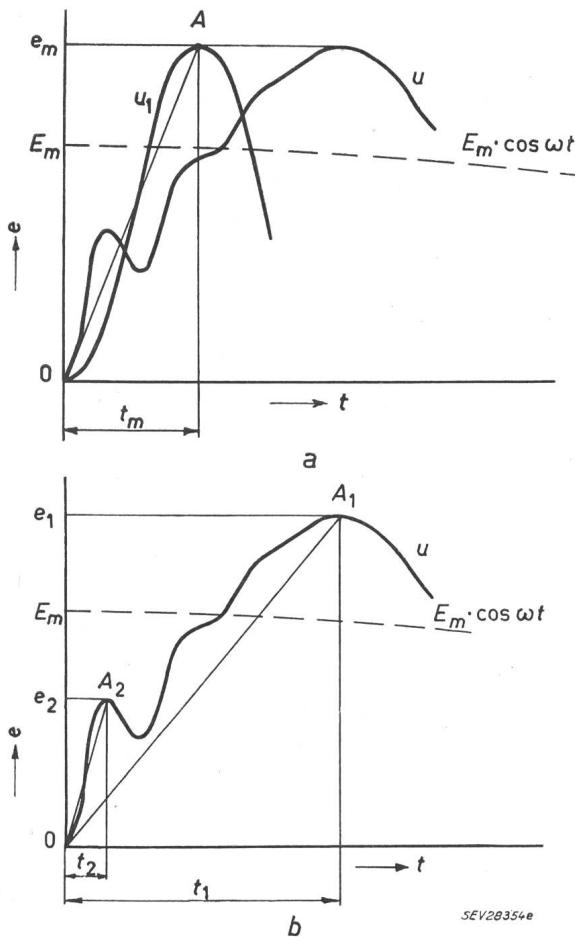


Fig. 1

- Beschreibung eines vorgegebenen transitorischen wiederkehrenden Spannungsverlaufes  $u$  durch 2 bzw. 4 Parameter
- nur 1 repräsentativer Punkt (A), welcher durch 2 Parameter ( $e_m, t_m$ ) bestimmt ist
  - Die gedämpfte Sinuslinie  $u_1$  stellt den nach der CEI-Konstruktion «aequivalenten» Verlauf zu  $u$  dar
  - 2 repräsentative Punkte ( $A_1, A_2$ ), bestimmt durch 4 Parameter ( $e_1, t_1, e_2, t_2$ )
  - $E_m \cdot \cos \omega t$  betriebsfrequente wiederkehrende Spannung
  - Momentanwert der transitorischen wiederkehrenden Spannung;  $t$  Zeit;  $u$  vorgegebener Verlauf der transitorischen wiederkehrenden Spannung

## 2. Die Verwirklichung von vier vorgeschriebenen Parametern in Kurzschluss-Prüfanlagen

Man kümmere sich jetzt nicht weiter um die Eignung der 4 Parameter für die Darstellung der transitorischen Spannungsverläufe, sondern wende sich der folgenden Frage zu: Können die Kurzschluss-Prüfanlagen 4 vorgegebene Parameter der Einschwingspannung verwirklichen? Es liegt nahe, dieses Problem durch einen zweifrequenten Schwingkreis zu lösen, wobei der erste Scheitelwert der hochfrequenten Spannungskomponente mit dem Punkt  $A_2$  und der grösste Scheitelwert der Einschwingspannung mit dem Punkt  $A_1$  der Fig. 1b identisch sein soll.

In einem ungedämpften, zweifrequenten Prüfkreis stellt sich dann die transitorische wiederkehrende Spannung z. B. nach Fig. 2 dar.

Die beiden ungedämpften Teil-Schwingungen  $u_{21}$ ,  $u_{22}$  mit den Frequenzen

$$f_1 = \frac{1}{2t_1} \quad f_2 = \frac{1}{2t_2}$$

und den Amplituden

$$a_1 = e_1 - a_2, \quad a_2$$

ergeben die zusammengesetzte Schwingung  $u_2$ , welche mit der Originalkurve  $u$  die beiden Extrempunkte  $A_1$  und  $A_2$  gemeinsam hat.

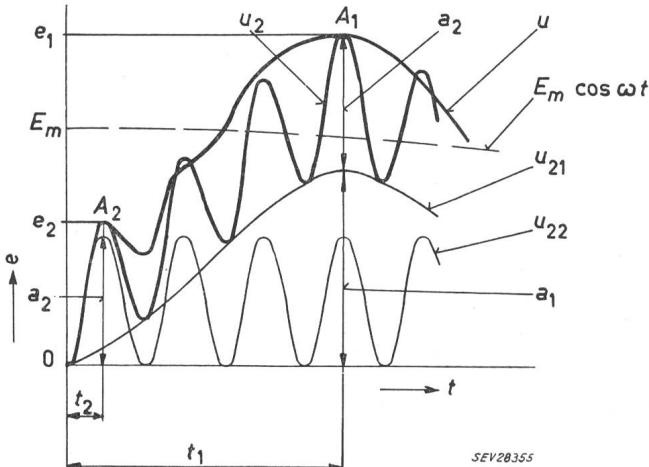


Fig. 2

Annäherung des Originalspannungsverlaufes  $u$  durch eine zweifrequente ungedämpfte Schwingung  $u_2$ , welche mit  $u$  die beiden Extrempunkte  $A_1, A_2$  gemeinsam hat

$u_{21}$  Teilschwingung mit der Frequenz  $f_1$  und der Amplitude  $a_1$ ;  
 $u_{22}$  Teilschwingung mit der Frequenz  $f_2$  und der Amplitude  $a_2$ ;  
 $u_2 = u_{21} + u_{22}$ ;  $e_1 = a_1 + a_2$   
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 1

Auch bei gedämpften Teilschwingungen  $u_{21}, u_{22}$  lässt sich dieses Prinzip anwenden, wenn auch die Verhältnisse etwas komplizierter sind.

## 3. Vorschlag von A. Hochrainer

A. Hochrainer hat den in Fig. 3 dargestellten Prüfkreis vorgeschlagen [2]. Der Prüfkreis nach Fig. 3 ergibt eine zweifrequente transitorische wie-

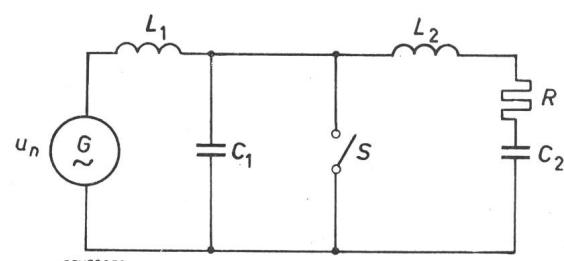


Fig. 3

Vier-Parameter-Prüfkreis nach A. Hochrainer [2]  
 $u_n$  treibende Spannung;  $S$  Prüfschalter;  $L_1$  Induktivität der Leistungsquelle (Generator, Transistor) inklusive Strombegrenzungs-Drosselpulen;  $C_1$  Kapazität der Leistungsquelle plus event. zusätzliche Kapazität zur Regelung der Parameter;  $L_2, R, C_2$  Induktivität, Ohmscher Widerstand und Kapazität zur Regelung der Parameter

derkehrende Spannung, und durch geeignete Wahl von  $L_1, C_1, L_2, C_2, R$  kann man 4 vorgegebene Parameter, z. B.  $f_1, f_2$  (Eigenfrequenzen) und  $e_1, e_2$  bzw.  $a_1, a_2$  (Amplituden) reproduzieren. Um den Aufwand an Mitteln und den praktisch möglichen Anwendungsbereich zu beurteilen, sind in Tabelle I eine Reihe von Beispielen angegeben. In dieser Tabelle werden (1polige) Schalterprüfungen bei 10,

Nennspannung kV	Grundeigenfrequenz $f_1$ Hz	Zu $f_1$ gehörende Amplitude $a_1$ %	Höhere Frequenz $f_2$ Hz	Zu $f_2$ gehörende Amplitude $a_2$ %	Kurzschlussleistung 3-phasig MVA	$L_1$ mH	$L_2$ mH	$C_1$ $\mu\text{F}$	$C_2$ $\mu\text{F}$	Energiequelle
10	3 000	10	15 000	90	700	0,455	4,55	(0,274)	0,548	ohne Transformatormotor, d. h. Generator allein
		50	15 000	50			0,455	(0,55)	2,75	
		90	15 000	10			0,455	5,39	1,078	
		10	60 000	90			0,0455	(0,153)	6,1	
		50	60 000	50			0,455	(0,03)	3,0	
		90	60 000	10			4,55	(0,0154)	0,46	
80	700	10	3 500	90	2 500	8,2	82	0,278	0,556	mit Transformatormotor
		50	3 500	50			8,2	0,554	2,77	
		90	3 500	10			8,2	4,76	0,952	
		10	14 000	90			0,82	0,157	6,3	
		50	14 000	50			8,2	0,0305	3,05	
		90	14 000	10			82	0,0156	0,47	
220	400	10	70 000	90	2 500	62	0,82	0,007	6,3	mit Transformatormotor
		50	70 000	50			8,2	(0,0012)	2,87	
		90	70 000	10			82	(0,0006)	0,4	
		10	2 000	90			(620)	0,116	0,232	
		50	2 000	50			62	0,222	1,1	
		90	2 000	10			62	1,96	0,392	
		10	8 000	90		62	6,2	0,065	2,6	
		50	8 000	50			62	0,0125	1,25	
		90	8 000	10			(620)	0,0063	0,19	
		10	40 000	90			6,2	(0,00282)	2,53	
		50	40 000	50			62	(0,00049)	1,16	
		90	40 000	10			(620)	(0,00025)	0,163	

80 und 220 kV angenommen, wobei eine Kurzschlussleistung der Prüfanlage von höchstens 2500 MVA (3phasig) zu Grunde gelegt ist. Der Widerstand  $R$  wurde zur Vereinfachung der Rechnung stets vernachlässigt, d. h. gleich null gesetzt. Als kleinere Frequenz  $f_1$  sind die vom SEV genormten Frequenzen bei voller Leistung angenommen. Die höheren Frequenzen sind je gleich  $5 f_1$ ,  $20 f_1$  und z. T.  $100 f_1$  angenommen, während für die Amplituden  $a_1, a_2$  je 10 bzw. 90%, 50 bzw. 50% und 90 bzw. 10% eingesetzt wurden. Aus der Tabelle geht hervor, welche Größen von  $L_1, L_2, C_1, C_2$  nötig sind. Dabei sind jene Werte der Induktivitäten und Kapazitäten (Generatoren, Transformatoren, Drosselpulen), welche in den meisten heute bestehenden Kurzschluss-Prüfanlagen nicht realisierbar sind, in der Tabelle eingeklammert. Z. B. ist in der 1. Zeile die Eigenkapazität des speisenden Generators  $C_1$  sicher grösser als  $0,274 \mu\text{F}$ , so dass dieser Fall nicht durchgeführt werden kann. Auch sind z. B. Induktivitäten der Drosselpulen  $L_2$  von 620 mH prohibitiv. Die Kondensatoren  $C_2$  und die Drosselpulen  $L_2$  sind für die volle Versuchsspannung  $u_n$  zu isolieren. Obwohl die Drosselpulen  $L_2$  und der Kondensator  $C_2$  keinen Kurzschlußstrom führen müssen, werden sie anlässlich des Schaltvorganges mit Stromspitzen belastet, die z. T. einen Scheitelwert von einigen kA erreichen können.

Die Berechnung der Stromkreiskonstanten aus den 4 vorgegebenen Parametern ist verhältnismässig kompliziert. Bei einer Schalterprüfung sind a priori Spannung und Strom, d. h.  $u_n$  und  $L_1$  vorgeschrieben. Ferner werden bestimmte Werte für die Eigenfrequenzen  $f_1$  und  $f_2$ , sowie die Amplituden  $a_1$  und  $a_2$  verlangt. Daraus berechnet man  $L_2, C_1, C_2$  nach den im Anhang angegebenen Formeln. Im Anhang sind

auch die Umkehrformeln für die Berechnung von  $f_1, f_2, a_2/a_1$  angegeben, wenn  $L_1, C_1, L_2, C_2$  bekannt sind. All diese Formeln sind nicht sehr «durchsichtig» und erfordern einen gewissen Rechenaufwand. Überdies hat die Änderung eines Parameters stets die Änderung der 3 übrigen Parameter zur Folge. Die Rechnungen wurden auf einer Analogie-Rechenmaschine durchgeführt.

Zusammenfassend kann das Schema gemäss Fig.3 als durchführbar bezeichnet werden. Jedoch sind die bekannten Prüfanlagen mit ihren heutigen Mitteln eingeschränkt und können nur einen gewissen Bereich von 4 Parameter-Fällen verwirklichen. Eine wesentliche Ansdehnung dieses Bereiches würde eine wesentliche Vergrösserung der Kondensatorbatterien und der Drosselpulen-Anlagen bedingen.

#### 4. Vorschlag einer weiteren Methode

Der Prüfkreis nach Fig. 4 hat zunächst den Vorteil, dass zwischen den Eigenfrequenzen  $f_1, f_2$ , den Amplituden  $a_1, a_2$  einerseits, und den Stromkreiskonstanten  $L_1, L_2, C_1, C_2$  anderseits ganz einfache und «durchsichtige» Beziehungen bestehen.

Es sind:

$$f_1 = \frac{1}{2 \pi \sqrt{L_1 C_1}}$$

$$f_2 = \frac{1}{2 \pi \sqrt{L_2 C_2}}$$

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{L_1}{L_2}$$

$$a_1 + a_2 = 100\%$$

( $f_1$  ist in der Regel die Grundeigenfrequenz,  $f_2$  eine höhere Eigenfrequenz)

Die Schalterspannung hat den genau gleichen Verlauf, ob der Stromkreis vollständig isoliert, oder ob er an irgend einer Stelle an Erde gelegt ist. Zu empfehlen ist eine Erdung gemäss Fig. 4.  $L_1$  und  $L_2$  können durch die in fast jeder Prüfanlage vorhandenen Strombegrenzungsdrosselpulen eingestellt werden. Diese Drosselpulen sind für den vollen

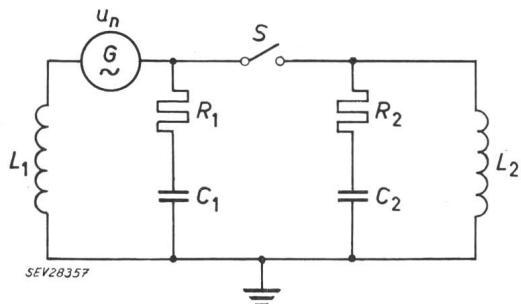


Fig. 4

**Vier-Parameter-Prüfkreis nach dem Vorschlag im Abschnitt 4**  
 $u_n$  treibende Spannung;  $S$  Prüfschalter;  $L_1$  Induktivität der Leistungsquelle (Generator, Transformator) inklusive Strombegrenzung-Drosselpulen;  $L_1$  bestimmt die Amplitude  $a_1$  der niedrigeren Eigenfrequenz;  $C_1$  Kapazität der Leistungsquelle plus eventuelle zusätzliche Kapazität zur Regelung der speise-seitigen Eigenfrequenz;  $L_2$  Drosselpulen zur Strombegrenzung und Einstellung der Amplitude  $a_2$  der höheren Eigenfrequenz;  $C_2$  Kapazität zur Regelung der abschaltseitigen (höheren) Eigenfrequenz;  $R_1, R_2$  Ohmsche Dämpfungswiderstände

Kurzschlußstrom zu bemessen.  $u_a$  kann entweder die Generatorenspannung (bei Prüfkreis ohne Transformator) oder eine Transformatorspannung sein.

Da die Drosselpulen meistens entsprechend der Generator-Nennspannung isoliert sind, dürfen sie spannungsmässig nicht höher belastet werden. Bei den höheren Spannungen (Speisung mittels Trans-

formator) ist insbesondere beim Einschalten des Kurzschlusses zu vermeiden, dass die Entladung der Kapazität  $C_1$  auf die Kapazität  $C_2$  einen zu hohen Spannungsstoss auf die Drosselpulen  $L_2$  bewirkt. Dies kann man z. B. durch synchrones Einschalten im Nulldurchgang der betriebsfrequenten speisenden Spannung verhindern, weil in diesem Moment  $C_1$  nicht aufgeladen ist.

Tabelle II enthält die prinzipiell gleichen Zahlenbeispiele wie die Tabelle I, jedoch für das Schema in Fig. 4 berechnet. Aus dieser Tabelle kann man wieder den ungefähren Bereich der realisierbaren Schaltfälle bzw. die nötigen Mittel (Kondensatoren und Drosselpulen) abschätzen. Die eingeklammerten Zahlen entsprechen jenen Fällen, die mit dem üblichen Aufwand an Drosselpulen oder Kondensatoren nicht verwirklicht werden können.

Bei jenen Beispielen, wo die Amplitude  $a_2$  der hohen Frequenz nur 10% beträgt, ist die für die kleine Frequenz  $f_1$  nötige Kapazität  $C_1$  ungefähr gleich gross wie bei der bisher üblichen einfrequenten Prüfung mit der Grundfrequenz  $f_1$ . Wenn also eine Anlage bisher einfache wiederkehrende Spannungen mit den angegebenen Grundfrequenzen  $f_1$  realisieren konnte, so sind mit dieser Anlage auch doppelfrequente Vorgänge mit gleicher Grundfrequenz und kleiner Amplitude der höheren Frequenz realisierbar.

#### Beispiel :

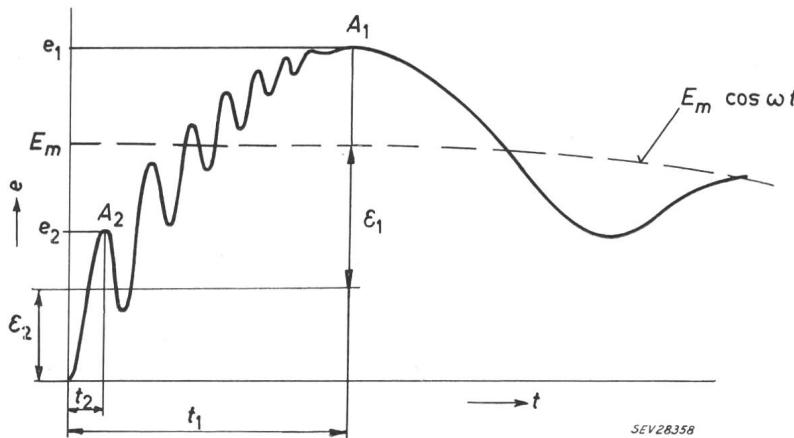
Maximale Betriebsspannung von Generator und Drosselpulen = 13 kV; Spannungsquelle des Prüfkreises mit Transformator  $U_n = 40$  kV. In diesem Fall ist es möglich, die Amplitude der höheren Frequenz bis  $(13/40) \cdot 100\%$  gleich ca. 30% der Totalamplitude  $e_1$  zu verwirklichen.

Zahlenbeispiele für das Schema gemäss Vorschlag in Abschnitt 4

Tabelle II

Nennspannung kV	Grundeigenfrequenz Hz	Zu $f_1$ gehörende Amplitude $a_1$ %	Höhere Frequenz Hz	Zu $f_2$ gehörende Amplitude $a_2$ %	Kurzschlussleistung 3-phasig MVA	$L_1$ mH	$L_2$ mH	$C_1$ $\mu$ F	$C_2$ $\mu$ F	Energiequelle
10	3 000	10	15 000	90	700	0,045	0,405	62,8	0,279	ohne Transformator, d. h. Generator allein
		50	15 000	50		0,225	0,225	12,51	0,503	
		90	15 000	10		0,405	0,045	6,98	2,52	
		10	60 000	90		0,045	0,405	62,8	0,0175	
		50	60 000	50		0,225	0,225	12,51	0,0315	
		90	60 000	10		0,405	0,045	6,98	0,1575	
80	700	10	3 500	90	2 500	0,82	(7,38)	(63,3)	0,281	mit Transformator
		50	3 500	50		4,10	(4,10)	12,63	0,506	
		90	3 500	10		7,38	0,82	7,03	2,53	
		10	14 000	90		0,82	(7,38)	(63,3)	0,0176	
		50	14 000	50		4,10	(4,10)	12,63	0,0317	
		90	14 000	10		7,38	0,82	7,03	0,1585	
220	400	10	70 000	90	2 500	0,82	(7,38)	(63,3)	(0,000702)	mit Transformator
		50	70 000	50		4,10	(4,10)	12,63	0,001262	
		90	70 000	10		7,38	0,82	7,03	0,00630	
		10	2 000	90		6,2	(55,8)	(25,6)	0,1135	
		50	2 000	50		31	(31)	5,12	0,204	
		90	2 000	10		55,8	(6,2)	2,85	1,022	
		10	8 000	90	2 500	6,2	(55,8)	(25,6)	0,0071	
		50	8 000	50		31	(31)	5,12	0,01275	
		90	8 000	10		55,8	(6,2)	2,85	0,0639	
		10	40 000	90		6,2	(55,8)	(25,6)	(0,000288)	
		50	40 000	50		31	(31)	5,12	(0,000518)	
		90	40 000	10		55,8	(6,2)	2,85	0,00259	

In den bisherigen Betrachtungen wurden die Ohmschen Widerstände im Stromkreis einfachheitsshalber vernachlässigt. In Wirklichkeit sind sie aber stets vorhanden und können auch durch Zusatzwiderstände künstlich vergrössert werden (vergl. z. B. Fig. 4). Die beiden Eigenschwingungen sind daher gedämpft; und oft ist z. B. die höherfrequente Schwingung  $f_2$  praktisch schon abgeklungen, wenn



die niederfrequenteren  $f_1$  ihren ersten Scheitelwert erreicht. Im letzteren Fall liest man aus Fig. 5 (und mit Hilfe von Fig. 4) folgende Zusammenhänge heraus:

$\epsilon_1$  und  $\epsilon_2$  stellen die Spannungsabfälle auf der speisenden bzw. auszuschaltenden Seite während des Kurzschlusses dar:

$$\epsilon_1 + \epsilon_2 = E_m$$

Die Amplitudenfaktoren (Überschwingfaktoren)  $k_1$  und  $k_2$  der beiden Schwingungen betragen defini-  
tionsgemäß:

$$k_1 = \frac{\epsilon_1 + e_1 - E_m}{\epsilon_1} \quad (3a)$$

$$k_2 = \frac{e_2}{\epsilon_2} \quad (3b)$$

Bei der Bestimmung der Stromkreiskonstanten kann man etwa wie folgt vorgehen. Es ist verlangt, dass die beiden Punkte  $A_1$  und  $A_2$  als Extrempunkte realisiert werden, d. h.  $e_1$  und  $e_2$  sind bekannt, überdies auch  $E_m$ . Man kennt oder wählt nun zunächst den Amplitudenfaktor  $k_2$ . Daraus ergibt sich aus Gl. (3b):

$$\epsilon_2 = \frac{e_2}{k_2}$$

und ferner

$$\epsilon_1 = E_m - \epsilon_2$$

Somit findet man mittels Gl. (3a) auch den Amplitudenfaktor  $k_1$ , und hat damit, nachdem auch  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  nach früheren Überlegungen bestimmt wurden, alle Größen, um den Versuchs-Stromkreis (Fig. 4) einzurichten.

Natürlich gibt es durch die Beziehung der Ohmschen Widerstände 2 Freiheitsgrade mehr im System, und man kann die vorgegebenen Punkte  $A_1$  und  $A_2$  auch durch sehr viele andere Kombinationen

der Stromkreiskonstanten verwirklichen. Doch scheint das angeführte konkrete Vorgehen einfach und übersichtlich. Es hat auch den Vorteil, dass in erster Näherung die Zahlen des ungedämpften Stromkreises (Tabelle II) zutreffen, sofern die Amplitude der hochfrequenten Schwingung klein ist gegenüber der Amplitude der niederfrequenteren Schwingung.

Mit dieser übersichtlichen Prüfmethode kann man somit eine grosse Zahl praktischer Fälle nachbilden, da die höheren Netz-Eigenfrequenzen meistens mit verhältnismässig kleinen Amplituden auftreten.

Der Vergleich zwischen Tabelle I und II zeigt, dass sich die beiden Methoden bzw. die durch sie realisierbaren Parameterbereiche z. T. gegenseitig ergänzen.

Fig. 5  
Verlauf der transitorischen wiederkehrenden Spannung im gedämpften doppelfrequenten Stromkreis  
Bezeichnungen siehe im Text

## 5. Andere Methoden

Natürlich gibt es noch zahlreiche andere Schaltkombinationen, mit denen in Prüfanlagen 4 Parameter nachgebildet werden können. Meistens sind es aber spezielle Schaltungen, bei welchen die Parameter nur wenig variiert werden können.

## 6. Verfahren bei Nichtanwendbarkeit von Vier-Parameter-Prüfkreisen

Trotzdem Schalterprüfungen mit ihren Mitteln eine grosse Zahl von 4 Parameter-Kombinationen ausführen können, wird dies in vielen anderen verlangten Fällen nicht möglich sein. Dann soll gestattet sein, 2 verschiedene Prüfungen mit je einer einzigen Eigenfrequenz durchzuführen, nämlich eine Prüfung mit der Eigenfrequenz  $f_1$  und der Amplitude  $e_1$ , und eine andere mit der Eigenfrequenz  $f_2$  und der Amplitude  $e_2$ .

## 7. Schlussbemerkung

Alle bisherigen Ausführungen beziehen sich auf die durch das Netz bestimmten, sog. netzeigenen Parameter. Der Schalter kann aber selbst auch einen Einfluss auf den Verlauf der transitorischen wiederkehrenden Spannung haben. Einerseits kann die Lichtbogenspannung eine Vergrösserung der Amplituden  $e_1$ ,  $e_2$  bewirken [3]. Anderseits können z. B. Schalter mit Dämpfungswiderständen, aber auch Schalter mit grosser Restleitfähigkeit die Einschwingspannung dämpfen. Dann wird es nicht ohne weiteres möglich sein, vier vorgegebene Parameter in einer Prüfanlage nachzubilden. Der Schalter wird aber sowohl die Parameter der Prüfanlage als auch die Netzparameter verbiegen. Beim Prüfschema nach Fig. 4 dürfte diese Deformation ungefähr gleich sein wie im Netz, sofern die transitorische wiederkehrende Spannung des Netzes aus einer gewöhnlichen zweifrequenten Schwingung besteht. Um nachzuweisen, dass im Stromkreis der Prüfanlage

tatsächlich die verlangten netzeigenen Parameter vorhanden sind, kann man z. B. vor oder nach der eigentlichen Prüfung mit einem Schalter ohne Dämpfungswiderstände und möglichst geringer Restleitfähigkeit bei 10...20% der Prüfspannung und entsprechend reduziertem Strom schalten. Die Parameter erscheinen dann verkleinert im Oszillogramm, können aber proportional umgerechnet und nachgeprüft werden.

*Fall a).* Gegeben seien die beiden Eigenfrequenzen  $f_1, f_2$ , das Amplitudenverhältnis  $a_2/a_1$  (wobei  $a_1 + a_2 = 100\%$ ), und der Kurzschlußstrom, d. h.  $L_1 \cdot R$  sei gleich Null.

Gesucht sind die zugehörigen Stromkreiskonstanten  $L_2, C_1, C_2$ .

Resultat :

$$L_2 = \left[ \frac{1}{(2\pi f_1)^2} - \frac{1}{(2\pi f_2)^2} \right] \cdot \left[ 1 - \frac{\omega^2}{(2\pi f_1)^2} \right] \frac{2a_1}{C_2} + \frac{1}{(2\pi f_1)^2 C_2} \quad (4)$$

wobei  $C_2$  nach Gl. (6) einzusetzen ist.

$$C_1 = \frac{1}{\left\{ [(2\pi f_2)^2 - (2\pi f_1)^2] \cdot \left[ 1 - \frac{\omega^2}{(2\pi f_1)^2} \right] 2a_1 + (2\pi f_2)^2 \right\} L_1} \quad (5)$$

$$C_2 = \frac{1}{(2\pi f_2)^2 L_1} + \left[ \frac{1}{(2\pi f_2)^2} - \frac{1}{(2\pi f_1)^2} \right] \cdot \left[ 1 - \frac{\omega^2}{(2\pi f_1)^2} \right] \frac{2a_1}{L_1} - \frac{1}{\left\{ [(2\pi f_2)^2 - (2\pi f_1)^2] \cdot \left[ 1 - \frac{\omega^2}{(2\pi f_1)^2} \right] 2a_1 + (2\pi f_2)^2 \right\} L_1} \quad (6)$$

*Fall b).* Gegeben seien die Stromkreiskonstanten  $L_1, L_2, C_1, C_2, R = 0$ .

Gesucht die 4 Parameter  $f_1, f_2, a_1, a_2; (a_1 + a_2 = 100\%)$ .

Resultat :

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{-L_1 C_1 - L_2 C_2 - L_1 C_2 + \sqrt{(L_1 C_1 + L_2 C_2 + L_1 C_2)^2 - 4 L_1 C_1 L_2 C_2}}{2 L_1 C_1 L_2 C_2}} \quad (7)$$

$$f_2 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{-L_1 C_1 - L_2 C_2 - L_1 C_2 - \sqrt{(L_1 C_1 + L_2 C_2 + L_1 C_2)^2 - 4 L_1 C_1 L_2 C_2}}{2 L_1 C_1 L_2 C_2}} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{a_1}{a_2} = & - \left\{ \frac{+L_1 C_1 - L_1 C_2 - L_2 C_2 + \sqrt{(L_1 C_1 + L_2 C_2 + L_1 C_2)^2 - 4 L_1 C_1 L_2 C_2}}{+L_1 C_1 - L_1 C_2 - L_2 C_2 - \sqrt{(L_1 C_1 + L_2 C_2 + L_1 C_2)^2 - 4 L_1 C_1 L_2 C_2}} \right\} \\ & \left\{ \begin{aligned} & -L_1 C_1 - L_1 C_2 - L_2 C_2 - \sqrt{(L_1 C_1 + L_1 C_2 + L_2 C_2)^2 - 4 L_1 C_1 L_2 C_2} + 2\omega^2 L_1 C_1 L_2 C_2 \\ & -L_1 C_1 - L_1 C_2 - L_2 C_2 + \sqrt{(L_1 C_1 + L_1 C_2 + L_2 C_2)^2 - 4 L_1 C_1 L_2 C_2} + 2\omega^2 L_1 C_1 L_2 C_2 \end{aligned} \right\} \end{aligned} \quad (9)$$

### Literatur

- [1] Commission Electrotechnique Internationale: Règles de la CEI pour les disjoncteurs à courant alternatif. Kapitel I: Règles relatives au fonctionnement lors de courts-circuits. Publ. Nr. 56-1, 2. Ausg.; Genf: Bureau Central de la CEI 1954.
- [2] Hochrainer, A.: Das Vier-Parameter-Verfahren zur Kennzeichnung der Einschwingspannung in Netzen. ETZ-A Bd. 78 (1957), Nr. 19, S. 689...693.

### Anhang

Während die Beziehungen zwischen den beiden Eigenfrequenzen  $f_1, f_2$ , den Amplituden  $a_1, a_2$  einerseits, und den Stromkreiskonstanten  $L_1, L_2, C_1, C_2$  andererseits beim Prüfvorschlag im Abschnitt 4 (Fig. 4) sehr einfach sind, erfordert der Vorschlag im Abschnitt 3 (Fig. 3) einen grösseren Rechenaufwand. Nachstehend sind die Umrechnungsformeln für den Prüfkreis I angegeben.

[3] Baltensperger, P.: Zum Problem «Steilheit und Amplitudeneffekt der transitorischen wiederkehrenden Spannung». Bull. SEV Bd. 49(1958), Nr. 14, S. 619...621.

### Adresse des Autors:

Dr. sc. math. P. Baltensperger, Chef des Kurzschluss-Versuchslabors, AG Brown, Boveri & Cie., Baden (AG).