

|                     |  |
|---------------------|--|
| <b>Zeitschrift:</b> | Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins  |
| <b>Herausgeber:</b> | Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke   |
| <b>Band:</b>        | 48 (1957)  |
| <b>Heft:</b>        | 5  |
| <b>Artikel:</b>     | Die in tschechoslowakischen Netzen vorherrschenden Bedingungen über Steilheit, Eigenfrequenz und Amplitudenfaktor der wiederkehrenden Spannung |
| <b>Autor:</b>       | Gert, R.   |
| <b>DOI:</b>         | <a href="https://doi.org/10.5169/seals-1060593">https://doi.org/10.5169/seals-1060593</a>  |

### 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:** 23.02.2026

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

Schon bei der Projektierung der Umbauten und auch während der Bauzeit fand eine enge Zusammenarbeit zwischen Architekt und den Organen des Elektrizitätswerkes statt. So wurde es dem Architekten möglich, alle die mannigfachen technischen Forderungen, die ein so umfangreicher Beratungsdienst stellt, zu berücksichtigen und zu erfüllen. Aber auch architektonisch entspricht das Ganze den gestellten Anforderungen und dem modernen Empfinden. Besonders grosser Wert wurde auf eine gediegene und harmonische Farbgebung aller Räume wie auch auf eine mustergültige Beleuchtung gelegt. Wo es immer angängig war, wurde die durch die Aufgabe bestimmte

12 000 Beratungen erteilt werden. Ein Barverkauf von elektrischen Gebrauchsapparaten und Beleuchtungskörpern findet nicht statt. Diese Tätigkeit ist dem privaten Installationsgewerbe vorbehalten, dagegen vermittelt das Werk im Einverständnis mit



Fig. 11  
Saaleingang an der  
Kohlenberggasse mit den  
beiden Stockwerken für die  
Schulen

technische Strenge der Ausstellungs- und Instruktionsräume durch Pflanzenarrangements und Blumenfenster aufgelockert. Die Blumenfenster des Vortragssaales sind sogar mit einer besonderen Beleuchtung ausgestattet.

Mit dieser Anlage hat die Direktion des Elektrizitätswerks der Basler Bevölkerung eine vorbildlich ausgebaute Beratungsstelle zur Verfügung gestellt. Der Andrang zu diesen Ausstellungsräumen und das Bedürfnis nach solchen Beratungen nimmt auch stetig zu und beweist, wie sehr diese Einrichtung von den Energiebezügern geschätzt wird. Im ersten Halbjahr seit der Eröffnung konnten rund

den konzessionierten Installationsfirmen grössere Apparate auf dreijährige Abzahlung.

So ist die Stadt Basel um eine weitere ständige und auf das neueste eingerichtete Institution bereichert worden, die sich zum Ziele setzte, allen Energiebezügern mit Rat und Tat zur Seite zu stehen, sie über die zweckmässige und wirtschaftliche Anwendung der Elektrizität zu beraten und sie immer mit den neuesten Errungenschaften auf diesem Gebiet vertraut zu machen.

#### Adresse des Autors:

H. Hofstetter, Inspektor der Installations-, Zähler- und Beratungsdienste des Elektrizitätswerkes Basel, Basel.

## Die in tschechoslowakischen Netzen vorherrschenden Bedingungen über Steilheit, Eigenfrequenz und Amplitudenfaktor der wiederkehrenden Spannung

Von R. Gert, Brno

621.315.051(437) : 621.316.5.064.31

Der vorliegende Artikel fasst die Resultate einer Untersuchung über die in tschechoslowakischen Netzen vorherrschenden Bedingungen über Steilheit, Eigenfrequenz und Amplitudenfaktor der wiederkehrenden Spannung zusammen. Nach einer kurzen Beschreibung der Methoden zur Ermittlung der wiederkehrenden Spannung und einem Vergleich von Resultaten der Berechnungen und Messungen, werden die Ergebnisse mitgeteilt, die in drei tschechoslowakischen Systemen gewonnen wurden, welche sich aus 100-, 35-, 22-, 6-kV-Netzen zusammensetzen. Diese Resultate wurden statistisch bearbeitet und dienten als Grundlage für die Ausarbeitung eines Vorschages einer Prüfvorschrift, die Nennwerte der wiederkehrenden Spannung für Leistungsprüfungen von Hochspannungsschaltern betrifft.

*Le présent article décrit les résultats des recherches effectuées en Tchécoslovaquie sur les fréquences propres, la vitesse d'accroissement et le facteur d'amplitude de la tension transitoire de rétablissement. Après une brève description des méthodes employées pour les recherches et une comparaison des résultats théoriques et expérimentaux, l'auteur indique les résultats obtenus dans trois systèmes tchécoslovaques constitués par des réseaux à 220, 100, 35, 22 et 6 kV. Ces résultats traités statistiquement ont servi de base pour l'élaboration d'un projet de Prescriptions concernant les valeurs nominales de la vitesse d'accroissement de la tension transitoire de rétablissement pour les essais de puissance de disjoncteurs à haute tension.*

### Einleitung

Man ist heute darüber einig, dass die Spannung, die nach dem Abschalten von Kurzschlüssen an den

Schalterkontakte wiederkehrt, eine grundsätzliche Bedeutung für den Ausschaltvorgang hat. Massgebend für die Ausschaltleistung der Schalter ist die

einem Kreise eigene transitorische wiederkehrende Spannung<sup>1)</sup>, die dann entsteht, wenn man sich einen Kurzschluss durch einen idealen Schalter (ohne Lichtbogenspannung und Restleitfähigkeit) abgeschaltet denkt.

Der Verlauf dieser Spannung, die wir weiter kurzwegs als wiederkehrende Spannung bezeichnen wollen, hängt bekanntlich vom Einbauort des Schalters ab. Er wird durch die Steilheit des Spannungsanstieges oder durch die Eigenfrequenz bzw. Eigenfrequenz des Netzes und den Amplitudenfaktor gekennzeichnet.

Die Nennausschaltleistung eines Schalters bezieht sich auf einen gegebenen Nennwert der transitorischen wiederkehrenden Spannung. Diesen Nennwert bildet die dem Prüfkreis zugeordnete transitorische wiederkehrende Spannung, die durch einen einfrequenten Verlauf gekennzeichnet wird. In verschiedenen Ländern wurden bereits Vorschläge für Nennwerte der wiederkehrenden Spannung ausgearbeitet, die man bei Leistungsprüfungen von Schaltern anwenden soll. Diese Arbeiten sind umfangreiche Untersuchungen über den Verlauf der wiederkehrenden Spannung in Leitungsnetzen vorgenommen, über die z. B. der Aufsatz von *Baltensperger* [15]<sup>2)</sup> Auskunft gibt. Vorschläge bezüglich des Verlaufes der wiederkehrenden Spannung bei Leistungsprüfungen von Schaltern wurden unseres Wissens bereits in der Schweiz [9], in Frankreich [5], in Schweden [7], in der Sowjetunion [14], in Grossbritannien [17] und in Japan [21] vorgelegt.

Es handelt sich nun darum, festzustellen, inwiefern der unterschiedliche Aufbau der Versorgungssysteme der einzelnen Staaten unterschiedliche nationale Vorschriften rechtfertigt und ob eine Einigung auf internationaler Grundlage möglich ist. Die vorliegende Arbeit will zur Lösung dieses Problems beitragen. Wir haben zu diesem Zwecke die Steilheiten, Eigenfrequenzen und Amplitudenfaktoren in tschechoslowakischen Netzen untersucht und haben auf Grund der erhaltenen Ergebnisse Bedingungen abgeleitet, denen die Leistungsschalter standhalten sollten. Wir kamen dabei zu dem Schluss, dass die besondere Gestaltung unseres Versorgungssystems eine strengere Prüfvorschrift wie anderswo wohl verlangt, dass man jedoch zu einer internationalen Einigung kommen kann, wie dies auch *H. Schiller* auf der letzten CIGRE-Tagung ausgesprochen hat [23].

### Methoden zur Ermittlung der wiederkehrenden Spannung

Die Steilheiten und Eigenfrequenzen der wiederkehrenden Spannung in tschechoslowakischen Netzen wurden zum grössten Teil berechnet, die errechneten Ergebnisse aber so oft als möglich experimentell überprüft. Bei der Berechnung der wiederkehrenden Spannung stützen wir uns grundsätzlich auf eine Methode, welche *Hammarlund* zu grosser Vollkommenheit entwickelt hat [2]; diese haben wir für praktische Zwecke in einigen Punkten erweitert [20].

<sup>1)</sup> Inherent restriking voltage — tension transitoire de rétablissement propre à un circuit.

<sup>2)</sup> siehe Literaturverzeichnis am Schluss der Arbeit.

Für experimentelle Ermittlungen erwiesen sich in unseren Verhältnissen als am besten geeignet: die direkte Methode (Abschalten von Kurzschlüssen), die Resonanzmethode nach *Fourmarier* und *Brown* [1] und die Stromimpulsmethode mittels eines Indikators der wiederkehrenden Spannung. Der Indikator arbeitet auf demselben Prinzip, wie ein von *Sing-Yui-King* beschriebener Injektor [3]. Beide Geräte wurden aber gänzlich unabhängig voneinander entwickelt. Eine nähere Beschreibung der einzelnen Apparaturen enthalten frühere Aufsätze des Verfassers [16; 19].

Im Einklang mit den Regeln der Commission Electrotechnique Internationale (CEI) wurde die wiederkehrende Spannung immer für die erstlöschen Phasen eines 3 poligen Kurzschlusses ohne Erde ermittelt. Nur ausnahmsweise — dort wo wir Fehler auf Freileitungen vorausgesetzt haben, wurden auch 3 polige Kurzschlüsse mit Erde in Erwägung gezogen, da Fehler auf Leitungen fast immer die Folge von Überspannungen oder Isolatorenbrüchen sind, die gewöhnlich auch Erdverbindungen mit sich bringen.

Den Verlauf der wiederkehrenden Spannung kennzeichnen wir durch die Steilheit  $S$  und den Amplitudenfaktor  $\alpha$ . Die Steilheit werten wir im allgemeinen nach den Regeln der CEI aus. Bei einer einzigen Eigenfrequenz  $f_0$  und einer Nennspannung  $U$  (verkettete Spannung) berechnet man daher die Steilheit für die erstlöschen Phasen eines dreipoligen Kurzschlusses ohne Erde mit Hilfe der Formel

$$S = 4f_0 \cdot 1,5 \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} U = 4,9 f_0 U \quad [\text{V}/\mu\text{s}, \text{kHz}, \text{kV}] \quad (1)$$

Bei mehrfrequenten Verläufen wird eine graphische Konstruktion angewendet, für welche die Kenntnis des ganzen Verlaufes der wiederkehrenden Spannung nötig ist. Diese Konstruktion ist darum bei Anwendung der Berechnungsmethode, bei welcher man die Eigenfrequenzen und deren prozentuale Amplituden einzeln erhält, ziemlich langwierig. Deshalb haben wir bei errechneten mehrfrequenten Verläufen die Steilheit einfacher als Richtungskonstante einer Geraden gewählt, die den Ursprung mit jedem Wert der wiederkehrenden Spannung verbindet, der dem Scheitel der schnellsten Frequenz entspricht (Fig. 1a). Die so gekennzeichnete Steilheit weicht im Mittel um + 10 % von der nach den Regeln der CEI konstruierten Steilheit ab, wie dies eine eingehende Untersuchung gezeigt hat [8]. Dort, wo der Momentanwert der wiederkehrenden Spannung, welcher dem ersten Scheitel der schnellsten Frequenz entspricht, kleiner ist als 40 % der Amplitude der betriebsfrequenten wiederkehrenden Spannung, führen wir nach Hammarlund die Gerade zu jenem Momentanwert, der dem zweiten Scheitel der schnellsten Frequenz entspricht (Fig. 1b). In den Fig. 1a, b sind die beiden Komponenten der wiederkehrenden Spannung strichliniert dargestellt, der resultierende Verlauf ist stark und voll ausgezogen. Die Steilheiten  $S$  nach unserer Methode sind schwach voll dargestellt und die Steilheiten nach den Regeln der CEI schwach

strichliniert. Der Vorteil unserer Darstellung besteht darin dass man auch bei mehrfrequenten Verläufen (mit 2 Eigenfrequenzen) die Steilheit mittels einfacher Formeln berechnen kann [8, 19]:

$$S = 2 f_1 U \left[ 1 + a_1 - \sum_2^q a_n \cos \left( 180 \frac{f_n}{f_1} \right)^0 \right] \quad [V/\mu s, kV, kHz] \quad (2)$$

(Konstruktion nach Fig. 1a)

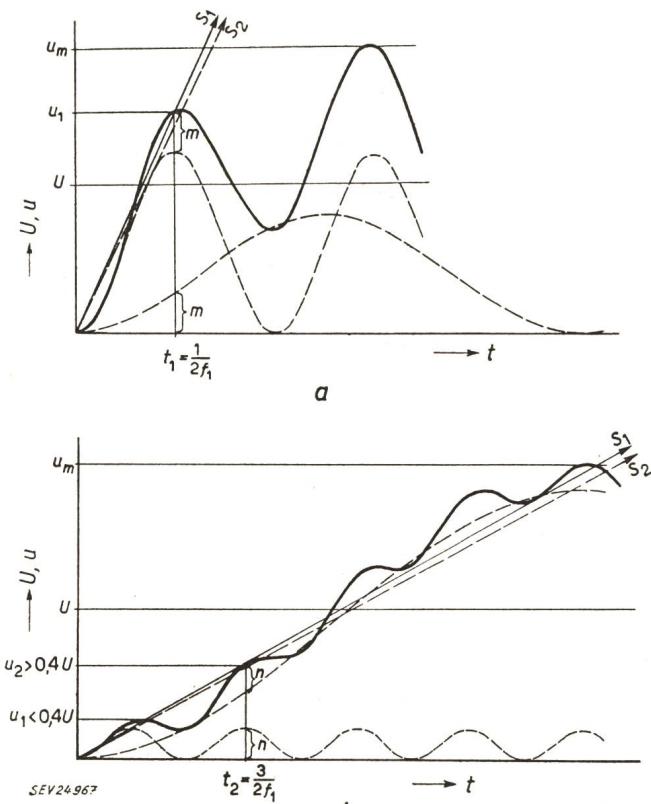


Fig. 1

Vergleich der Steilheiten mehrfrequenter Verläufe, welche einerseits nach den Regeln der CEI und anderseits auf Grund der vorgeschlagenen vereinfachten Methode bestimmt wurden  
 a erster Scheitelwert  $> 0,4 U$  b erster Scheitelwert  $< 0,4 U$

$S_1$  Steilheit nach der vorgeschlagenen Methode

$S_2$  Steilheit nach den Regeln der CEI

m Momentanwert der langsameren Frequenz, welcher dem Scheitelwert der schnelleren Frequenz zur Zeit  $t_1$  entspricht

n zweiter Scheitelwert der schnellsten Frequenz zur Zeit  $t_2$

t Zeit

$$S = \frac{2}{3} f_1 U \left[ 1 + a_1 - \sum_2^q a_n \cos \left( 180 \frac{3f_n}{f_1} \right)^0 \right] \quad [V/\mu s, kV, kHz] \quad (3)$$

(Konstruktion nach Fig. 1b)

Hierin bedeuten:  $S$  Steilheit,  $f_1$  schnellste Eigenfrequenz,  $a_1$  ihre prozentuale Amplitude,  $f_n$  zweite bis  $q$ -te Eigenfrequenz,  $a_n$  ihre prozentuellen Amplituden,  $U$  betriebsfrequente wiederkehrende Spannung.

Die wiederkehrende Spannung wurde unter folgenden Voraussetzungen ermittelt:

a) Der Schalter arbeitet bei einer Netzsspannung, die gleich seiner Nennspannung ist. Spannungsschwankungen infolge veränderlicher Belastung usw. werden nicht berücksichtigt.

b) Der Kurzschluss wird durch denjenigen Schalter abgeschaltet, der der Kurzschlußstelle speiseseitig am nächsten liegt.

c) Netzteile, die nicht stromführend zum Kurzschluss beitragen, betrachten wir als bereits abgeschalten.

d) Die Ohmschen Widerstände, Netzverluste und Parallelast werden bei der Berechnung zunächst vernachlässigt und finden erst zum Schluss durch einen Korrektionsfaktor Berücksichtigung.

e) Für jeden Schalter wird die wiederkehrende Spannung einerseits für jenen Kurzschluss berechnet, bei dem der Schalter mit der grösstmöglichen Steilheit beansprucht wird, und anderseits bei jenem Kurzschluss, bei dem der Schalter den grösstmöglichen Kurzschlußstrom abzuschalten hat. Hammarlund hat gezeigt [2], dass durch diese beiden Angaben die Beanspruchung eines Schalters in einem bestimmten Netzpunkt vollständig gekennzeichnet wird.

Aus betriebstechnischen Gründen ist es schwierig, die wiederkehrende Spannung experimentell auf breiter Grundlage zu ermitteln. Schwierig ist es, eine gewünschte Netzkonfiguration zu erhalten, oft ist es unmöglich, einen genügend grossen Netzteil zur Verfügung gestellt zu bekommen und fast immer ist die Zeit für die Messung beschränkt. Wir mussten daher zum grössten Teil die Berechnungsmethode verwenden, deren Genauigkeit glücklicherweise für eine allgemeine statistische Untersuchung genügend gross ist. Stichprobenweise experimentelle Überprüfungen der Rechnungsresultate zeigten auch eine gute Übereinstimmung zwischen Experiment und Rechnung, wie aus Tabelle I ersichtlich ist. Beim Vergleich der Angaben dieser Tabelle ist zu beachten, dass die berechneten Steilheiten ohne Berücksichtigung der dämpfenden Einflüsse (z. B. Ohmscher Widerstände) erhalten wurden, während die gemessenen Steilheiten diese natürlich mit einbeziehen und darum um etwa 10...20 % niedriger sind.

### Das untersuchte System

Das tschechoslowakische Versorgungssystem wird nach vollendetem Aufbau folgende charakteristische Eigenschaften aufweisen: ein übergeordnetes Verteilungssystem, bestehend aus einem 380-kV-Netz und einigen 220-kV-Netzen, wird neun verschiedene regionale Verbrauchssysteme verbinden, die 100-kV-, 35-kV-, 22-kV- und 6-kV-Netze enthalten. Fig. 2 zeigt den schematischen Aufbau dieses Versorgungssystems. Die einzelnen regionalen Netze sind auf zentrale Umspannstationen orientiert: die 22-kV- und 35-kV-Netze auf 100-kV-Umspannstationen, die 100-kV-Netze auf 220-kV-beziehungsweise auf 380-kV-Umspannstationen. Die einzelnen, besonders die Mittelspannungsnetze, haben vorwiegend radialen Aufbau. Die Einspeisung erfolgt auf allen Spannungsstufen; die grössten Werke arbeiten direkt auf das 380-kV-Netz. Grundsätzlich soll der Verbrauch durch Erzeugung an Ort und Stelle gedeckt werden, erst bei Mangel an lokaler Energie erfolgt Energieentnahme aus dem übergeordneten System. Die Längen der 100-kV-Leitungen bewegen sich zwischen einigen zehn bis hundert Kilometern, die einzelnen Abschnitte der Höchstspannungsleitungen werden ungefähr 100 bis 500 km lang sein. Besondere Aufmerksamkeit muss — im Vergleich zu anderen Staaten — der Tatsache gewidmet werden, dass regionale Netze gleicher

Vergleich zwischen experimentell ermitteltem und berechnetem Verlauf der wiederkehrenden Spannung in wirklichen Netzen  
Tabelle I

| Nr. | Netz oder Netzteil in dem die wiederkehrende Spannung ermittelt wurde           | Messung                                  |   | Resultate der Berechnungsmethode   |
|-----|---|--|---|--|
|     |   | Messmethode                              | Messresultate   |  |
| 1   | Umspannstation, 35/10 kV  | Indikator                                | $f_1 = 73 \text{ kHz}, f_2 = 22 \text{ kHz}$                                      | $f_1 = 72 \text{ kHz}, f_2 = 31,2 \text{ kHz}, f_3 = 52 \text{ kHz}$<br>$a_1 = 0,54, \quad a_2 = 0,24, \quad a_3 = 0,22$                                 |
| 2   | Teil eines 100-kV-Netzes  | direkte Methode                          | $f = 4,1 \text{ kHz}, \alpha = 1,57$<br>$S = 1050 \text{ V}/\mu\text{s}$          | $f = 4,07 \text{ kHz}, \alpha = 2$<br>$S = 1330 \text{ V}/\mu\text{s}$   |
| 3   | Umspannstation, 35/10 kV  | Indikator                                | $f_1 = 1 \text{ kHz}, f_2 = 72,3 \text{ kHz}$                                     | $f_1 = 1,1 \text{ kHz}, f_2 = 72 \text{ kHz}$<br>$a_1 = 0,46 \quad a_2 = 0,54$   |
| 4   | Umspannstation, 35/10 kV (andere Konstellation)                                 | Indikator                                | $f_1 = 1,1 \text{ kHz}, f_2 = 13,3 \text{ kHz}$                                   | $f_1 = 1,1 \text{ kHz}, f_2 = 16 \text{ kHz}$<br>$a_1 = 0,46 \quad a_2 = 0,54$   |
| 5   | Umspannstation, 100/22 kV   | Resonanzmethode                          | $f_1 = 3 \text{ kHz}, f_2 = 18,5 \text{ kHz}$<br>$a_1 = 0,27 \quad a_2 = 0,73$    | $f_1 = 2,3 \text{ kHz}, f_2 = 19,1 \text{ kHz}$<br>$a_1 = 0,20 \quad a_2 = 0,80$   |
| 6   | 60-kV-Anlage eines Wasserkraftwerkes  | Indikator                                | $f = 4,8 \text{ kHz}$<br>$S = 1200 \text{ V}/\mu\text{s}$                         | $f = 5,1 \text{ kHz}$<br>$S = 1540 \text{ V}/\mu\text{s}$  |
| 7   | Verteilungsnetz, 22 kV  | direkte Methode (Kurzschlussabschaltung) | $S = 98,5 \text{ V}/\mu\text{s}$<br>$f_1 = 2,4 \text{ kHz}, f_2 = 100 \text{ Hz}$ | $f_1 = 96 \text{ Hz}, f_2 = 800 \text{ Hz}, f_3 = 2,8 \text{ kHz}$<br>$a_1 = 0,63 \quad a_2 = 0,06 \quad a_3 = 0,31$<br>$S = 99,5 \text{ V}/\mu\text{s}$ |
| 8   | 100-kV-Leitung  | Indikator                                | $f_1 = 1,83 \text{ kHz}, S = 845 \text{ V}/\mu\text{s}$                           | $f_1 = 1,85 \text{ kHz}, S = 905 \text{ V}/\mu\text{s}$  |
| 9   | 100-kV-Anlage eines Elektrizitätswerkes   | Indikator                                | $S = 1940 \text{ V}/\mu\text{s}$  | $S = 2050 \text{ V}/\mu\text{s}$   |
| 10  | Transformator 100/22/6 kV   | Indikator                                | $f = 8,8 \text{ kHz}$   | $f = 8,77 \text{ kHz}$   |
| 11  | Kopfstation, 100/22 kV  | Indikator                                | $S = 2000 \text{ V}/\mu\text{s}$<br>(mehr frequenter Verlauf)                     | $S = 1920 \text{ V}/\mu\text{s}$   |
| 12  | Kopfstation, 100/22 kV (andere Konfiguration)                                   | Indikator                                | $S = 1640 \text{ V}/\mu\text{s}$  | $S = 1480 \text{ V}/\mu\text{s}$   |
| 13  | Teil eines 100-kV-Netzes  | Indikator                                | $f = 3,56 \text{ kHz}$<br>$S = 1640 \text{ V}/\mu\text{s}$                        | $f = 3,2 \text{ kHz}$<br>$S = 1620 \text{ V}/\mu\text{s}$  |
| 14  | Umspannstation, 100 kV  | Indikator                                | $f = 9,7 \text{ kHz}$<br>$S = 2600 \text{ V}/\mu\text{s}$                         | $f = 9,6 \text{ kHz}$<br>$S = 2700 \text{ V}/\mu\text{s}$  |
| 15  | Umspannstation, 22/100 kV   | Indikator                                | $f = 6,3 \text{ kHz}$<br>$S = 580 \text{ V}/\mu\text{s}$                          | $f = 5,8 \text{ kHz}$<br>$S = 640 \text{ V}/\mu\text{s}$   |
| 16  | Umspannstation, 100/22 kV   | Indikator                                | $f = 16,5 \text{ kHz}$  | $f = 15,5 \text{ kHz}$   |
| 17  | Kabelnetz, 6 kV   | Indikator                                | $f = 9,25 \text{ kHz}$  | $f = 9,3 \text{ kHz}$  |
| 18  | 22-kV-Anlage eines Elektrizitätswerkes  | Resonanzmethode                          | $f_1 = 6,5 \text{ kHz}, f_2 = 37,8 \text{ kHz}$<br>$a_1 = 0,98 \quad a_2 = 0,02$  | $f_1 = 6,4 \text{ kHz}, f_2 = 29 \text{ kHz}$<br>$a_1 = 0,99 \quad a_2 = 0,01$   |
| 19  | Wie Nr. 18, aber bei anderer Netzkonfiguration                                  | Resonanzmethode                          | $f_1 = 5 \text{ kHz}, f_2 = 39 \text{ kHz}$<br>$a_1 = 0,99 \quad a_2 = 0,01$      | $f_1 = 4,7 \text{ kHz}, f_2 = 28,2 \text{ kHz}$<br>$a_1 = 0,99 \quad a_2 = 0,01$   |
| 20  | 22-kV-Anlage eines Elektrizitätswerkes, aber bei anderer Netzkonfiguration      | Resonanzmethode                          | $f_1 = 5 \text{ kHz}, f_2 = 39 \text{ kHz}$<br>$a_1 = 0,99 \quad a_2 = 0,01$      | $f_1 = 4,15 \text{ kHz}, f_2 = 36 \text{ kHz}$<br>$a_1 = 0,99 \quad a_2 = 0,01$  |
| 21  | 22-kV-Anlage eines Elektrizitätswerkes, aber bei noch anderer Netzkonfiguration | Indikator                                | $f = 4,1 \text{ kHz}$   |  |
| 22  | Generator, 50 MVA, 10 kV  | Indikator                                | $f = 30 \text{ kHz}, S = 1350 \text{ V}/\mu\text{s}$                              | $f = 28 \text{ kHz}, S = 1370 \text{ V}/\mu\text{s}$   |
| 23  | Generator-Transformatorm-Block, 100 kV  | Indikator                                | $f = 8,6 \text{ kHz}$<br>$S = 4170 \text{ V}/\mu\text{s}$                         | $f = 8,5 \text{ kHz}$<br>$S = 4160 \text{ V}/\mu\text{s}$  |
| 24  | Eigenbedarfsanlage 6 kV mit Drosselspule  | Indikator                                | $f = 230 \text{ kHz}$<br>$S = 5200 \text{ V}/\mu\text{s}$                         | $f_1 = 220 \text{ kHz}, f_2 = 11 \text{ kHz}$<br>$a_1 = 0,84 \quad a_2 = 0,16$<br>$S = 5800 \text{ V}/\mu\text{s}$                                       |

Spannung im Normalbetrieb miteinander nicht galvanisch verbunden sind (Fig. 2). Ihre Verbindung besorgt nur das nächste übergeordnete Netz. So sind z. B. die 100-kV-Netze der einzelnen 220/100-kV-Punkte miteinander nur über das 220-kV-Netz verbunden. Aus dieser Anordnung folgt, dass in den tschechoslowakischen Mittelspannungsnetzen das Verhältnis zwischen lokal erzeugter Kurzschlussleistung  $P_{cL}$  und totaler Kurzschlussleistung  $P_{tot}$  [11, 18] in allen Fällen den Wert 0,5 weit überschreitet und in vielen Fällen gleich 1 wird. Auch in den 100-kV-Kopfstationen erreicht das Verhältnis  $P_{cL} / P_{tot}$  diese Grösse, doch ist hier die grösstmögliche Kurzschlussleistung verhältnismässig niedrig (kleiner als 1500 MVA) und auch die Steilheit des Spannungsanstieges wird 500 bis 600 V/ $\mu$ s kaum überschreiten.

als charakteristisch für das ganze tschechoslowakische Versorgungssystem betrachten kann. Als Grundlage für unsere Betrachtungen diente der wahrscheinliche Stand der Netze im Jahre 1960. Ausserdem berechneten wir auch die wiederkehrende Spannung im heutigen 220-kV-Netz. Da dieses Netz aber den zukünftigen Stand — über den bis heute noch nicht definitiv entschieden wurde —, nicht genügend veranschaulicht, berechneten wir die wiederkehrende Spannung auch für eine idealisierte 380/220/100-kV-Umspannstation, deren Schema auf Grund der wahrscheinlichsten Variante des übergeordneten Höchstspannungssystems konstruiert wurde.

Es war zur Zeit noch nicht möglich, die wiederkehrende Spannung für das 380-kV-Netz zu berechnen, da die Parameter (Kapazitäten, Induk-

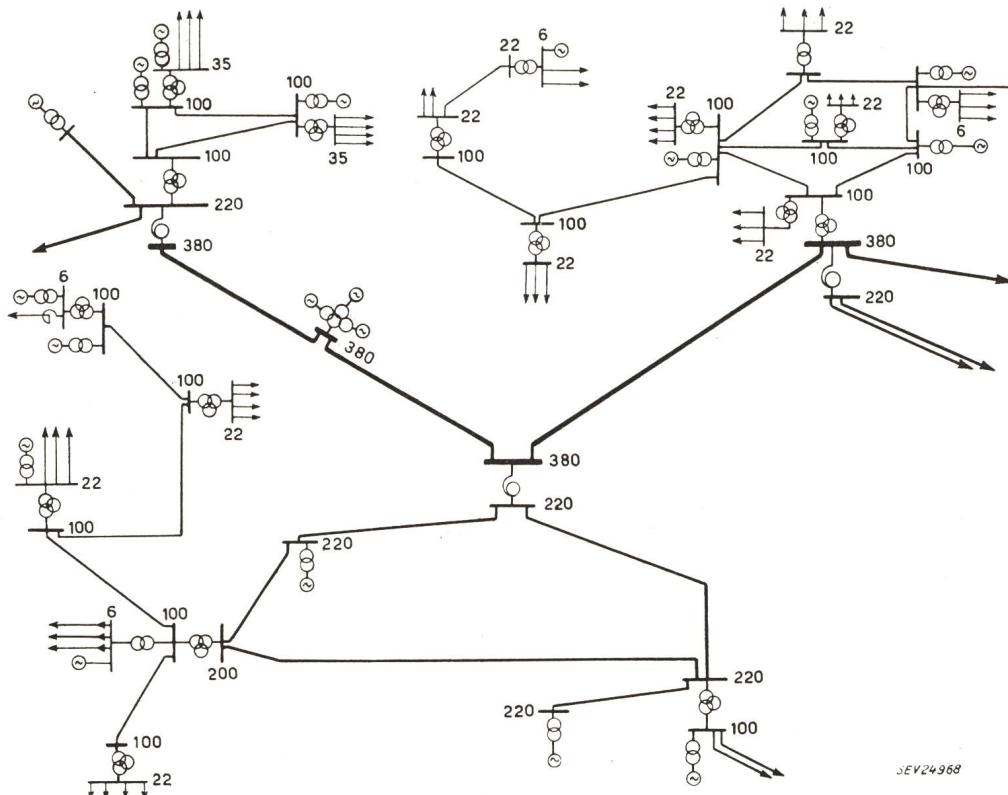


Fig. 2

Prinzipielles Schema, welches die Art des Aufbaues des tschechoslowakischen Versorgungssystems veranschaulicht  
Die Zahlen bedeuten Spannungen in kV

Die 6-kV- und 10-kV-Netze sind Kabelnetze oder Eigenbedarfsanlagen der Elektrizitätswerke. Die Netze höherer Spannungen bestehen vorwiegend aus Freileitungen. Drosselpulen kommen in Mittelspannungsstationen zur Anwendung, während sie in Hoch- und Höchstspannungsanlagen gänzlich fehlen.

Die Hoch- und Höchstspannungsnetze (100...380 kV) haben starre Nullpunktterdung, in Mittelspannungsnetzen befinden sich Löschspulen; einige 6-kV-Anlagen werden mit isoliertem Sternpunkt betrieben.

Die vorgenommenen Untersuchungen umfassen 6...100-kV-Netze, welche drei verschiedenartigen regionalen Verbrauchssystemen angehören. Diese wurden so ausgewählt, dass man den in ihnen gewonnenen Verlauf der wiederkehrenden Spannung

tivitäten) der Maschinen, Apparate und Leitungen noch unbekannt sind. Wir waren darum auch bei der Berechnung der oben erwähnten idealisierten Umspannstation gezwungen, uns auf eine rohe Abschätzung der Kapazitäten des Kupplungsspartransformators zu stützen.

### Die Steilheiten der wiederkehrenden Spannung

Die bisherigen Untersuchungen wurden für insgesamt 3226 Schalter durchgeführt, davon 31 220-kV-Schalter, 429 100-kV-Schalter, 395 35-kV-Schalter, 1295 22-kV-Schalter und 1076 Schalter bis 6 kV. Für jeden dieser Schalter wurden die beiden früher erwähnten extremen Fälle, nämlich die maximale Steilheit und die maximale Kurz-

schlussleistung bestimmt. Für den Schalter  $V_1$  in Fig. 3 bedeutet dies, dass der Schalter  $V_2$  ausgeschaltet ist und der Kurzschluss an den Schalterklemmen im Punkte  $a$  entsteht. Die maximale Steilheit erhalten wir bei lokaler Einspeisung, bei der die Leitungen nach  $B$  abgeschaltet sind und die ganze Kurzschlussleistung von den beiden Generatoren  $G_1$  und  $G_2$  aufgebracht wird. Falls die beiden Leitungen nach  $B$  zugeschaltet werden, trägt auch die Station  $B$  zum Kurzschluss bei, und wir erhalten den hier maximal möglichen Kurzschlußstrom.

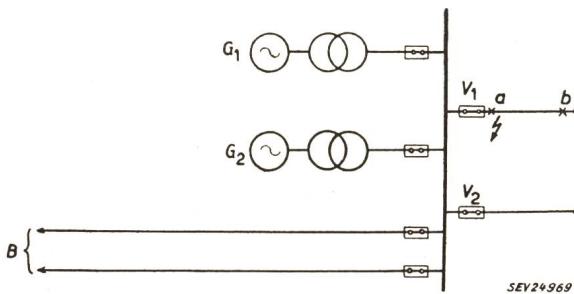


Fig. 3

Schema einer einfachen 100-kV-Anlage  
 $a, b$  Fehlerstellen;  $B$  zu Station B, 2500 MVA;  
 $G_1, G_2$  Generatoren;  $V_1, V_2$  Leistungsschalter

In tschechoslowakischen Netzen versagten Schalter schon mehrmals beim Abschalten von Kurzschläßen auf Freileitungen. Eine eingehendere Untersuchung zeigte, dass bei Kurzschläßen in einer Entfernung bis zu etwa 10 km von der Station recht strenge Schalterbeanspruchungen entstehen können [16]. Da Kurzschlüsse auf Leitungen gewöhnlich Erdschlüsse sind, wurde bei einem Fehler im Punkte  $b$  (Fig. 3) die wiederkehrende Spannung für die erstlöschende Phase eines dreipoligen Kurzschlusses mit Erdschluss ermittelt. Es zeigte sich nun, dass bei einer Kurzschlussleistung von z. B. 3500 MVA auf den Sammelschienen einer 100-kV-Station ein Schalter bei einem solchen Kurzschluss folgendermassen beansprucht wird:

| Entfernung des Punktes $b$<br>[km] | Steilheit $S$<br>[V/ $\mu$ s] | Kurzschlussleistung<br>[MVA] |
|------------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| 3                                  | 2550                          | 2400                         |
| 5                                  | 2000                          | 2000                         |
| 10                                 | 1450                          | 1400                         |

Die Wahrscheinlichkeit dafür, dass in den ersten 10 km einer Freileitung Kurzschlüsse infolge von atmosphärischen Überspannungen auftreten, ist bemerkenswert. Es wurden in Mittelspannungsnetzen 2 Kurzschlüsse pro Jahr, in Hochspannungsnetzen (100 kV) dagegen nur 1 Kurzschluss in 10 Jahren [13] verzeichnet. Bei noch höheren Spannungen ist die Wahrscheinlichkeit solcher Kurzschlüsse schon sehr gering. Darum haben wir bei Nennspannungen bis zu 100 kV diese Kurzschlüsse mit in unsere Betrachtungen einbezogen, indem wir für je einen Schalter in jeder Station auch «den Fall b» berechnet haben.

Die Resultate unserer Untersuchungen wurden graphisch und statistisch bearbeitet. Die Steilheiten wurden in Abhängigkeit von den zuge-

hörigen Kurzschlussleistungen in einem semilogarithmischen Koordinatensystem dargestellt. Die untersuchten Netze lassen sich durch die höchsten in ihnen vorkommenden Kurzschlussleistungen kennzeichnen und von einander unterscheiden. Als Netz bezeichnen wir dabei die Gesamtheit aller galvanisch verbundenen Stationen und Leitungen. Alle jene Punkte, die zu einem Netz in obigem Sinne oder zu einer Gruppe von Netzen gleicher Kurzschlussleistung gehören, wurden durch Hüllkurven begrenzt. Aus diesen Hüllkurven, welche wir Netzkennlinien nennen wollen, ist ersichtlich, welche höchsten Steilheiten man in einem bestimmten Netz bei verschiedenen Kurzschlussleistungen erwarten muss.

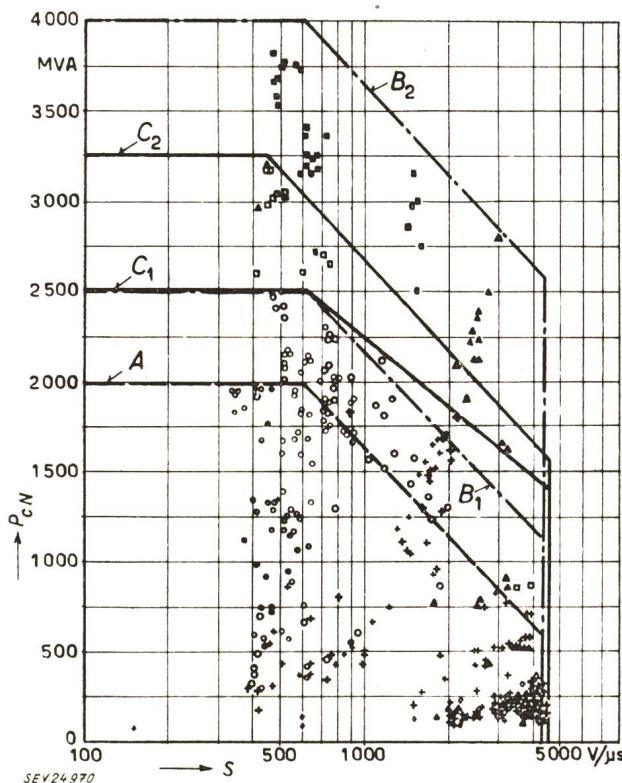
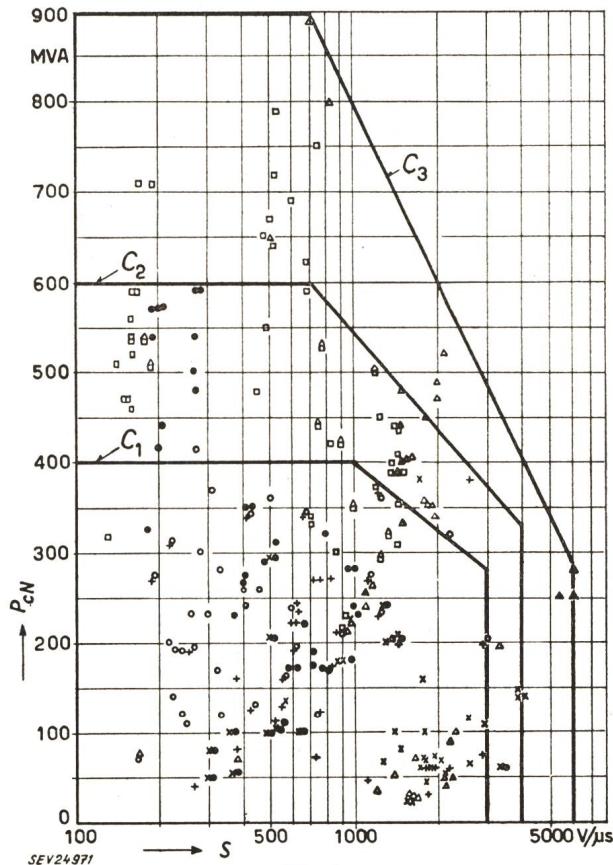


Fig. 4  
 Kennlinien der 100-kV-Netze

$P_{cN}$  Kurzschlussleistung der Netze;  $S$  Steilheit  
 A System A:  $P < 2000$  MVA;  $B_1$  System B:  $P \leq 2500$  MVA;  
 $B_2$  System B:  $P \leq 4000$  MVA;  $C_1$  System C:  $P \leq 2500$  MVA;  
 $C_2$  System C:  $P < 3500$  MVA  
 Bezeichnung der Messwertpunkte siehe in der Tabelle unter Fig. 8

Die Kennlinien der 100-, 35-, 22- und 6-kV-Netze zeigen die Fig. 4, 5, 6 und 7. Die drei Verbrauchersysteme, in denen die wiederkehrende Spannung ermittelt wurde, sollen als System  $A$ ,  $B$  und  $C$  bezeichnet werden. Es folgt dann z.B. aus Fig. 4, dass das System  $A$  ein einziges 100-kV-Netz enthält, dessen höchste Kurzschlussleistung kleiner als 2000 MVA ist. Das System  $B$  enthält — ebenso wie das System  $C$  — zwei 100-kV-Netze, mit den höchsten Kurzschlussleistungen von 2500 MVA, 3500 MVA und 4000 MVA. 35-kV-Netze enthält nur das System  $C$ , wie aus Fig. 5 ersichtlich ist. Kennlinien der 22-kV- und 6-kV-Netze wurden lediglich für die Systeme  $A$  und  $B$  bestimmt, da wir im System  $C$  die wiederkehrende Spannung nurmehr

für einige isolierte 22-kV- und 6-kV-Stationen berechneten. Wir wollten uns damit überzeugen, inwieweit die in den Systemen *A* und *B* ermittelten Netz-Kennlinien auch anderswo zutreffen. Es hat sich gezeigt, dass die im System *C* ermittelten Werte innerhalb der früher gezeichneten Hüllkurven liegen, und dass diesen daher allgemeinere Bedeutung zu-

Fig. 5  
Kennlinien der 35-kV-Netze

*C*<sub>1</sub> System *C*:  $P < 400$  MVA; *C*<sub>2</sub> System *C*:  $P < 600$  MVA;  
*C*<sub>3</sub> System *C*:  $P < 900$  MVA  
Bezeichnungen siehe Fig. 4

kommt. Die Steilheiten, die im heutigen 220-kV-Netz und in der idealisierten Umspannstation vorkommen, zeigt die Fig. 8.

Obzwar die elektrische Gestaltung der einzelnen Netze sehr unterschiedlich ist, zeigen ihre Kennlinien viele Ähnlichkeiten. Vor allem fällt auf, dass sich die Steilheiten bei den grössten Kurzschlussleistungen der Netze in engen Grenzen bewegen, und dass auch die maximalen Steilheiten in den einzelnen Netzen keine grossen Unterschiede aufweisen. Ferner kann man aus einer näheren Analyse erkennen, dass

a) hohe Steilheiten bei Kurzschlüssen vor oder hinter Transformatoren oder Drosselpulen entstehen, falls die Verbindung zwischen dem Schalter und dem Transformator (Drosselpule) keine Kabelleitung ist;

b) Leitungsschalter dann mit hoher Steilheit beansprucht werden, wenn sie lokal gespeiste Kurzschlüsse an ihren Klemmen oder Kurzschlüsse auf der Leitung bis zu einer Entfernung von etwa 10 km abzuschalten haben.

Bei nur lokaler Einspeisung, die in Mittelspannungsnetzen vorwiegt, müssen Schalter manchmal ihre volle Ausschaltleistung bei hohen Steil-

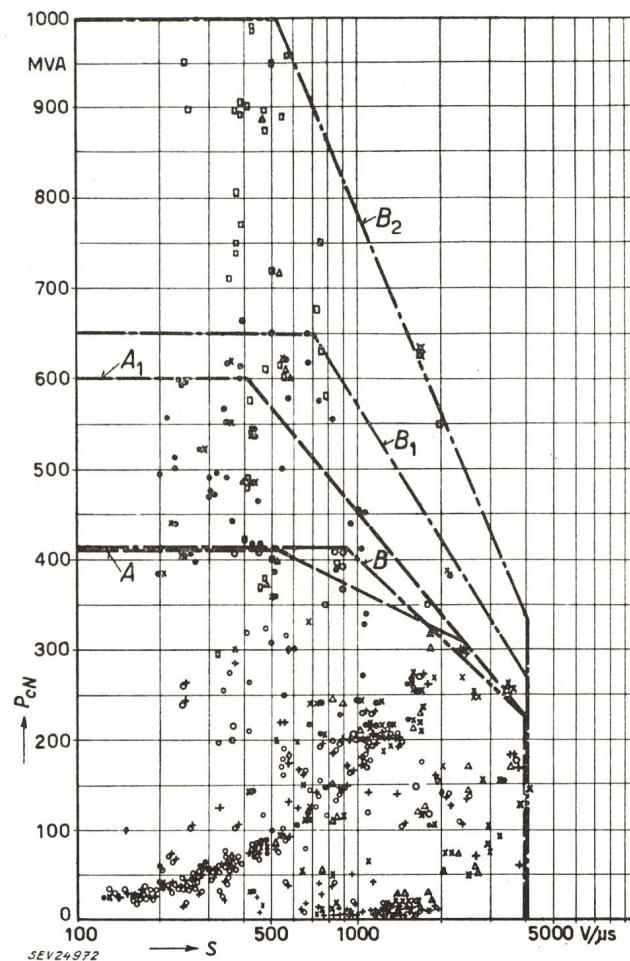


Fig. 6

## Kennlinien der 22-kV-Netze

A System *A*:  $P \leq 420$  MVA; *A*<sub>1</sub> System *A*:  $P \leq 600$  MVA;  
B System *B*:  $P \leq 420$  MVA; *B*<sub>1</sub> System *B*:  $P \leq 650$  MVA;  
*B*<sub>2</sub> System *B*:  $P \leq 1000$  MVA  
Bezeichnungen siehe Fig. 4

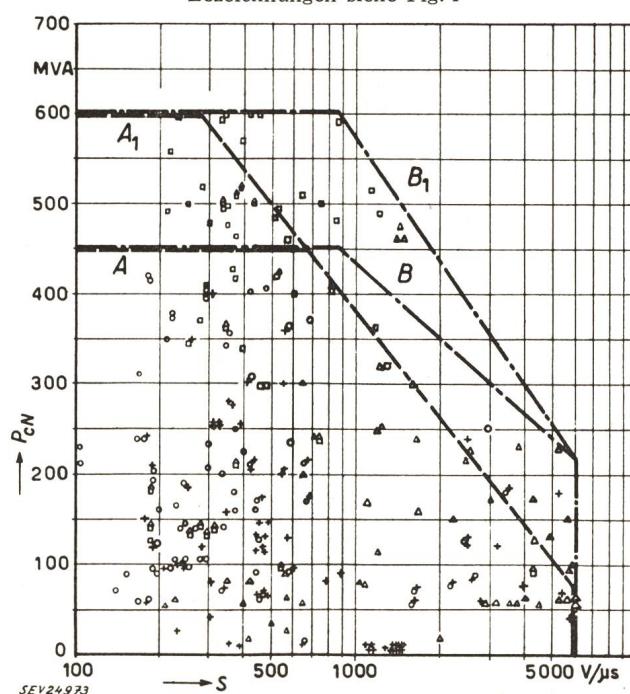
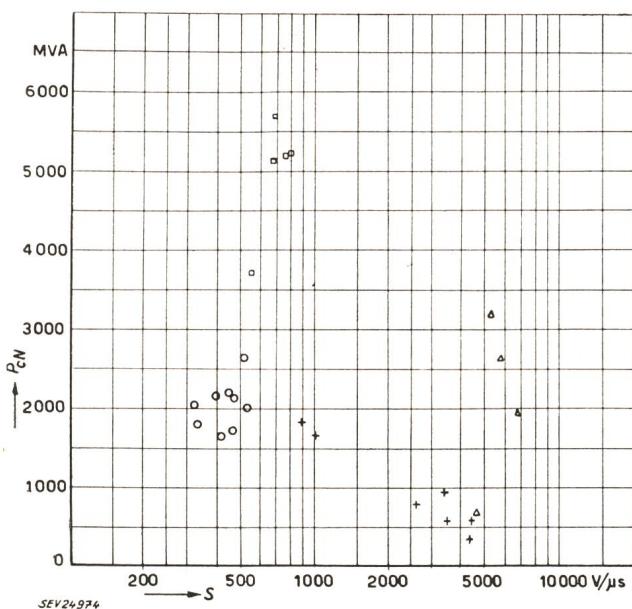


Fig. 7

## Kennlinien der 6-kV-Netze

A System *A*:  $P < 450$  MVA; *A*<sub>1</sub> System *A*:  $P \leq 600$  MVA;  
B System *B*:  $P < 450$  MVA; *B*<sub>1</sub> System *B*:  $P \leq 600$  MVA  
Bezeichnungen siehe Fig. 4



| Grösste Kurzschlussleistung eines Netzes<br>MVA | Bezeichnungen                 |   |
|---|-------------------------------|---|
|   | für maximale Steilheiten<br>S | für Steilheiten bei maximalen Kurzschlussleistungen<br>$P_{cN}$ |
| ≤ 2500  | +                             | ○   |
| < 3500  | △                             | □   |
| < 4000  | ▲                             | ■   |
| < 400   | +                             | ○   |
| < 600   | ×                             | ●   |
| < 1000  | △                             | □   |
| < 420   | +                             | ○   |
| ≤ 650   | ×                             | ●   |
| ≤ 1000  | △                             | □   |
| < 450   | +                             | ○   |
| ≤ 600   | △                             | □   |
| Messwerte aus anderen Netzen                    | ◊                             |   |
| Für das bestehende 220-kV-Netz                  | +                             | ○   |
| In der idealisierten Umspannstation             | △                             | □   |

heiten bewältigen. Von «nur lokaler Einspeisung» sprechen wir, wenn die gesamte Kurzschlussleistung an Ort und Stelle von Generatoren und Transformatoren erzeugt wird. Es hat sich jedoch gezeigt, dass hohe Steilheiten nur bei niedrigeren Nennaußschalteinstellungen der Schalter bis zu etwa 400 MVA vorkommen. Bei höheren Leistungen wird der Kurzschluss immer aus einer grösseren Anzahl von Maschinen gespeist, und dann ist schon aus rein örtlichen Gründen wenigstens eine der Maschinen an die Sammelschienen durch eine Kabelleitung angeschlossen, deren Kapazität aber die Steilheit beträchtlich herabsetzt.

Extreme Steilheiten über 4000 V/μs entstehen fast immer nur in Stationen mit Drosselpulsen; ihre Häufigkeit ist verhältnismässig gering.

Aus den ermittelten Steilheitswerten wurde deren Häufigkeitsverteilung in Form von Summenhäufigkeits-Kurven berechnet. Die Kurven umfassen alle Netze gleicher Spannung und sind in Fig. 9 für 100-kV-Netze, Fig. 10 für 35-kV-Netze, Fig. 11 für 22-kV-Netze und Fig. 12 für 6-kV-Netze dargestellt. Jede Figur enthält eine Kurve für die grössten Steilheiten pro Netzpunkt und eine Kurve für die Steilheiten bei den grössten Kurzschlussleistungen pro Netzpunkt. Die bei einigen Punkten angeführten Kurzschlussleistungen sind Maximalwerte, die bei höheren als diesem Punkt entsprechenden Steilheiten nicht mehr erreicht werden.

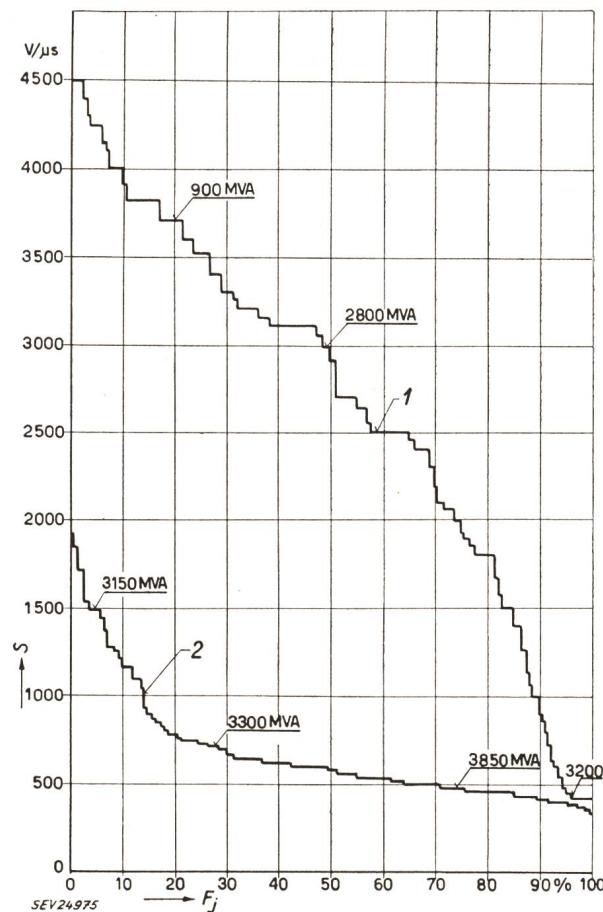


Fig. 9  
Summenhäufigkeit  $F_j$  der Steilheitsverteilung in 100-kV-Netzen  
S Steilheit

1 Maximale Steilheiten ohne Rücksicht auf die Kurzschlussleistungen;  
2 Steilheiten bei maximalen Kurzschlussleistungen

In den Höchstspannungsnetzen (von 100 kV aufwärts) ist der Unterschied zwischen diesen beiden Kurven markant, während bei niedrigeren Spannungen der Unterschied immer kleiner wird. Das ist dadurch erklärlich, dass bei höherer Spannung die maximale Kurzschlussleistung sehr selten an Ort und Stelle erzeugt wird, während dies bei niedrigeren Spannungen häufig der Fall ist.

Allgemein kann bemerkt werden, dass die grösste Anzahl der Schalter mit niedrigeren oder nur mässig hohen Steilheiten (bis 3000 V/μs) beansprucht wird, und dass nur ein kleiner Prozentsatz bei hohen Steilheiten zu arbeiten hat. Leider dürfen

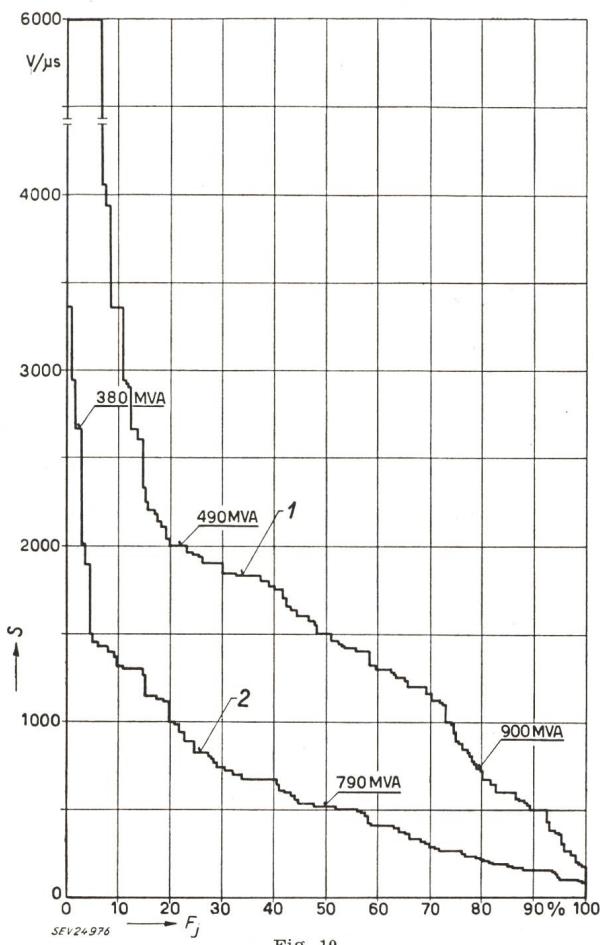


Fig. 10  
Summenhäufigkeit der Steilheitsverteilung in 35-kV-Netzen  
Bezeichnungen siehe Fig. 9

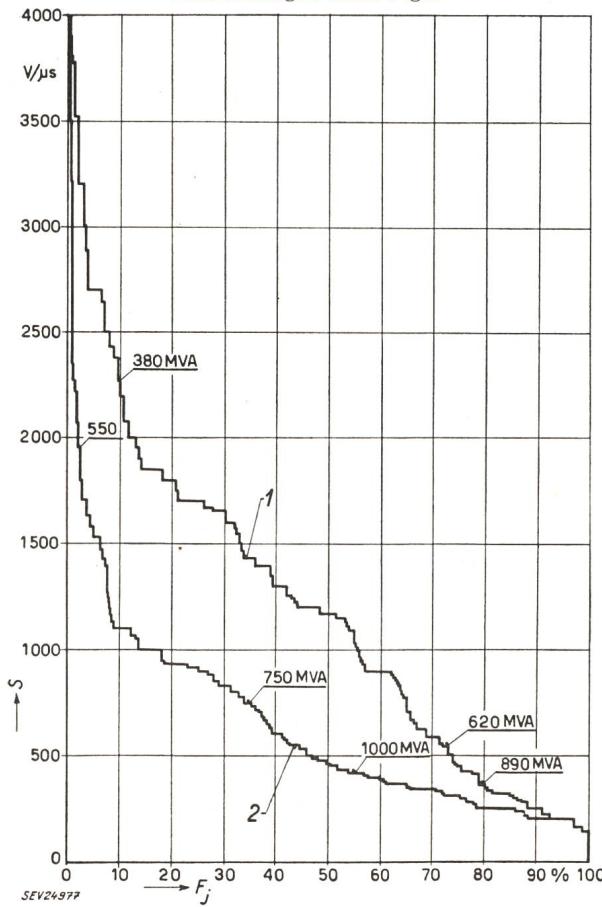


Fig. 11  
Summenhäufigkeit der Steilheitsverteilung in 22-kV-Netzen  
Bezeichnungen siehe Fig. 9

aber diese Fälle bei der Ausarbeitung einer Prüfvorschrift nicht gänzlich ausgeschlossen werden, da diese Schalter häufig in wichtigen Knotenpunkten und Werken arbeiten, in denen ein Versagen zu grossen wirtschaftlichen Schäden führen kann.

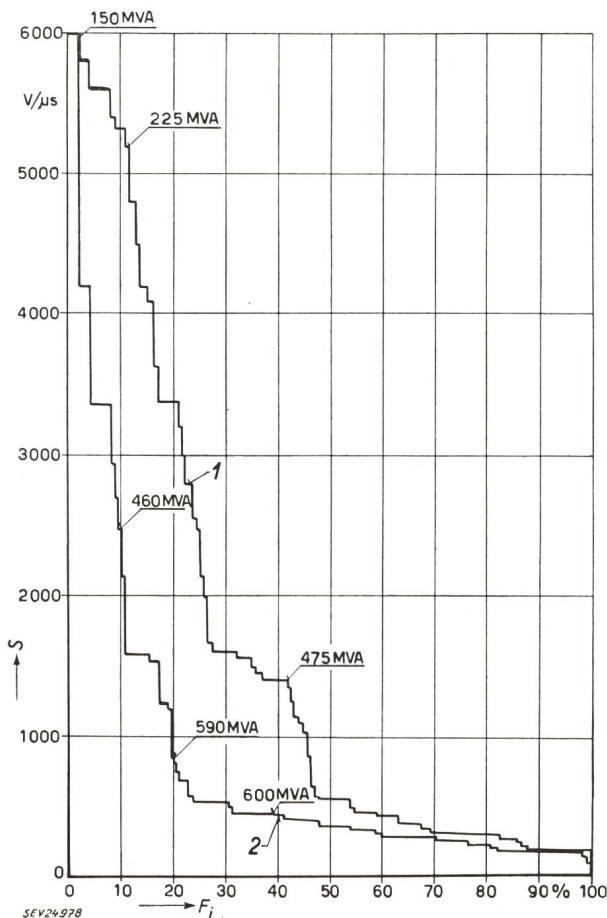


Fig. 12  
Summenhäufigkeit der Steilheitsverteilung in 6-kV-Netzen  
Bezeichnungen siehe Fig. 9

### Die ermittelten Amplitudenfaktoren

Die erwähnten Steilheiten wurden unter der Voraussetzung berechnet, dass die dämpfenden Einflüsse des Netzes vernachlässigbar sind. Diese Voraussetzung führt bei einem einfrequenten Verlauf der wiederkehrenden Spannung auf einen Amplitudenfaktor  $\alpha = 2$ . In Wirklichkeit wird dieser Amplitudenfaktor niemals erreicht, da die Eigenschwingungen des Netzes durch Ohmsche, Hysteresis- und Koronaverluste und auch durch Parallellast gedämpft werden. Es ist daher sicherlich richtig, die errechneten sog. «theoretischen» Steilheiten vor der Ausarbeitung einer Prüfvorschrift in bezug auf den Dämpfungsfaktor zu korrigieren [15]. Bei der Wahl des Korrektionsfaktors muss man sich auf konkrete Netzwerte stützen. Um diese zu erlangen, haben wir aus einer grösseren Anzahl von Netzmessungen die Amplitudenfaktoren ausgewertet und statistisch zusammengestellt.

Die Messungen wurden einerseits mit dem Indikator der wiederkehrenden Spannung an stromlosen Netzteilen und Netzelementen ohne Parallellast und anderseits bei Kurzschlussabschaltungen

mit und auch ohne Parallellast mittels eines Kathodenstrahlzosillographen vorgenommen. Es wurde immer der Amplitudenfaktor der zuerst löschenen Phase gemessen. Die Messwerte stammen von 48

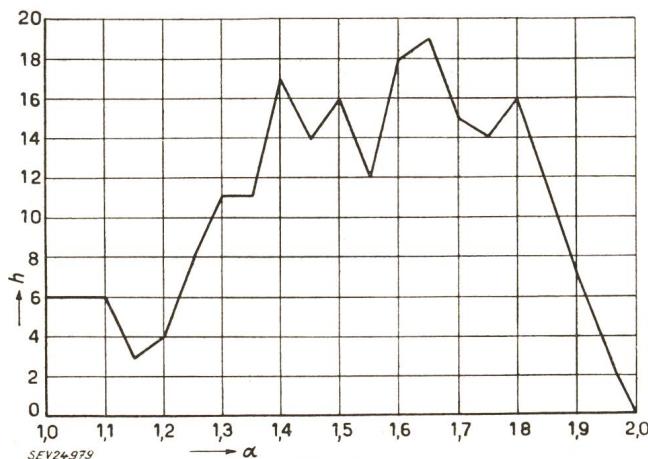


Fig. 13  
Häufigkeitsverteilung  $h$  der Amplitudenfaktoren  $\alpha$  in tschechoslowakischen Netzen

Kathodenstrahlzosillogrammen aus 10 verschiedenen Netzknotenpunkten, deren Betriebsspannung 22, 35, 100 und 220 kV betrug und von 170 Stromimpulsoszillogrammen aus insgesamt 19 Netzknoten. Die Amplitudenfaktoren beider Oszillogrammgruppen bewegen sich in denselben Grenzen.

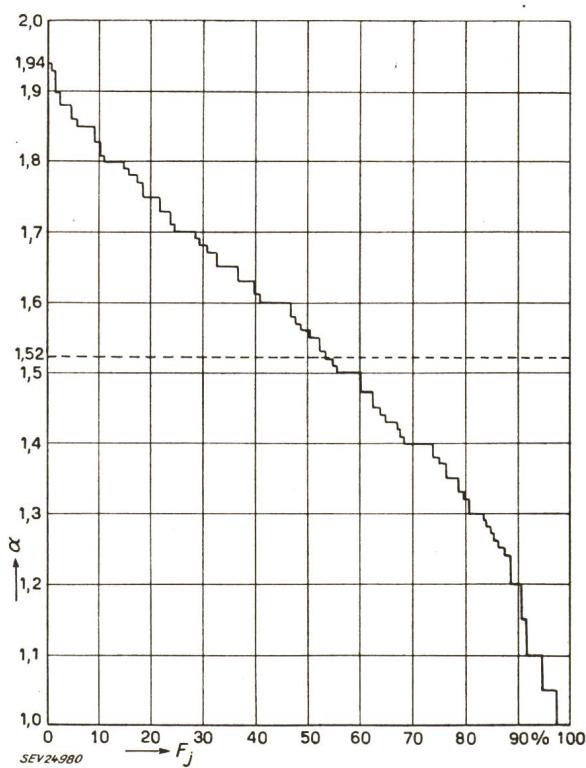


Fig. 14  
Häufigkeitskurve der Amplitudenfaktoren  $\alpha$   
 $F_j$ : Summenhäufigkeit

Es ist möglich, die Amplitudenfaktoren richtig auch ohne oder mit nur geringer Parallellast zu messen, da deren Einfluss in vielen Betriebsfällen viel geringer ist, als ursprünglich angenommen wurde.

Dies haben auch kürzlich *ter Horst* und *Bertrums* bestätigt [22].

Bei den gemessenen Amplitudenfaktoren konnte weder eine ausgeprägte Abhängigkeit von der Steilheit noch von der Kurzschlussleistung festgestellt werden, worauf auch schon in früheren Arbeiten hingewiesen wurde [6, 7, 15].

Fig. 13 enthält die Häufigkeitsverteilung der von uns gemessenen Amplitudenfaktoren, während die Fig. 14 die entsprechende Häufigkeitskurve darstellt. Der niedrigste gemessene Wert ist  $\alpha_{min} = 1$ , der grösste Wert  $\alpha_{max} = 1,94$  und der Mittelwert  $\alpha = 1,52$ . Der häufigste Amplitudenfaktor ist 1,6; er wird in 40 % aller Fälle überschritten.

#### Vorschlag einer Prüfvorschrift für Leistungsschalter

Der Korrektionsfaktor wurde auf Grund folgender Erwägung gewählt:

Es sei die Wahrscheinlichkeit für eine grössere Steilheit als  $S_1$  gleich  $p_1$ . Diese Wahrscheinlichkeit lässt sich aus den Häufigkeitskurven (Fig. 9...12) leicht bestimmen. Es sei weiter die Wahrscheinlichkeit für einen grösseren Amplitudenfaktor als  $\alpha_2$  gleich  $p_2$ . Die Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein Schalter sowohl bei einer grösseren Steilheit als  $S_1$  und als auch bei einem grösseren Amplitudenfaktor als  $\alpha_2$  zu arbeiten hat, wird demnach

$$p = p_1 p_2 \quad (4)$$

Weiter soll diejenige wirkliche Steilheit  $S^*$  berechnet werden, die einer theoretischen Steilheit  $S$  und einem Amplitudenfaktor  $\alpha$  entspricht. Aus Gl. (1) folgt, dass

$$S^* = S \frac{k}{2} \quad (5)$$

In diesem Ausdruck ist  $k/2$  der Korrektionsfaktor. Für  $k$  nehmen wir nun den häufigsten Amplitudenfaktor 1,6, so dass

$$S^* = 0,8 S \quad (5a)$$

Wir reduzieren also die theoretischen Steilheiten um 20 %. Die Wahl des häufigsten Amplitudenfaktors rechtfertigt sich durch die oben angeführten Wahrscheinlichkeitserwägungen. Nach Fig. 14 ist die Wahrscheinlichkeit eines grösseren Amplitudenfaktors als 1,6 näherungsweise  $p_2 = 0,4$ . Setzen wir nun in die Prüfvorschrift einen solchen theoretischen  $S_1$ -Wert ein, dass höheren Steilheiten  $S_n > S_1$  auf Grund der Häufigkeitskurven eine näherungsweise Wahrscheinlichkeit  $p_1 = 0,25$  zukommt, so ist die Wahrscheinlichkeit für die Überschreitung der wirklichen Steilheit  $S_1^* = 0,8 S_1$  nach Gl. (4)  $0,4 \cdot 0,25 = 0,1 (= 10\%)$ . Durch richtige Wahl der theoretischen Steilheit kann also erzielt werden, dass die Prüfvorschrift mindestens 90 % aller Fälle umfasst, was eine genügende Garantie, sowohl in technischer, als auch in ökonomischer Hinsicht darstellt.

In vielen Fällen wird der Prozentsatz der mit-inbezogenen Schalter noch günstiger sein. Eine weitere Reserve liegt auch im Koeffizient der betriebsfrequenten wiederkehrenden Spannung, der in Wirklichkeit kleiner ist, als der nach den Regeln der CEI verwendete theoretische Wert 1,5 [10].

Fortsetzung von Seite 204

**Die in tschechoslowakischen Netzen vorherrschenden Bedingungen über Steilheit, Eigenfrequenz und Amplitudenfaktor der wiederkehrenden Spannung (Fortsetzung)**

Bei der Ausarbeitung des Vorschlagewaren wir bestrebt, auch den Beanspruchungen der Leitungsschalter bei Kurzschlüssen auf Leitungen in der Nähe der Stationen Rechnung zu tragen, wie es schon weiter oben begründet wurde. Wir hatten auch mehrmals zu entscheiden, ob ein Schalter, der eine Kurzschlussleistung  $P_1$  bei einer Steilheit  $S_1$  bewältigt, auch noch befriedigend bei einer Kurzschlussleistung  $P_2$  und einer Steilheit  $S_2$  arbeiten wird. Da für unsere Schalter die Abhängigkeiten zwischen Schaltleistung und Steilheit der wiederkehrenden Spannung noch nicht gänzlich bekannt sind, lösten wir dieses Problem mit Hilfe der Johansen'schen idealisierten Kurve [7]; ihr mathematischer Ausdruck lautet

$$S_2 = \frac{9,231 S_1}{\lg 1,26 \frac{P_2}{P_1}} \quad (6)$$

Die meisten Schalter arbeiten bei verhältnismässig milden Steilheiten; grosse Steilheiten kommen gewöhnlich bei kleineren Kurzschlussleistungen vor. Nur in speziellen Fällen haben Mittelspannungsschalter bis 400 MVA bei voller Ausschaltleistung hohe Steilheiten zu bewältigen. Diese speziellen Fälle können aber aus einer Normung wegen ihrer Wichtigkeit nicht ausgeschlossen werden. Wir kamen daher zu dem Schluss, zwei Reihen von Mittelspannungsschaltern bis zu einer Nennausschaltleistung von 400 MVA vorzuschlagen. Die Reihe A

Vorgeschlagene Nennwerte der wiederkehrenden Spannung für Leistungsprüfungen von Hochspannungsschaltern

Tabelle II

| Nennspannung                       | kV   | 0 ... 6 | 10   | 22   | 35   | 100  | 220  |
|------------------------------------|------|---------|------|------|------|------|------|
| Bei 100% der Nennausschaltleistung |      |         |      |      |      |      |      |
| Reihe                              | V/μs | 2000    | 1500 | 900  | 900  | —    | —    |
| A                                  | kHz  | 68      | 30   | 8,3  | 5,25 | —    | —    |
| Bei 50% der Nennausschaltleistung  |      |         |      |      |      |      |      |
| Reihe                              | V/μs | 4200    | 3000 | 2500 | 2500 | —    | —    |
| A                                  | kHz  | 140     | 60   | 23   | 14,5 | —    | —    |
| Reihe                              | V/μs | 2000    | 2000 | 2000 | 2200 | 2800 | 3000 |
| B                                  | kHz  | 68      | 40   | 18,5 | 13   | 5,7  | 2,8  |

**Reihe A:** Ausschaltleistung bis 400 MVA: Schalter in Eigenbedarfsanlagen der Kraftwerke; Schalter vor oder hinter Drosselpulsen; Schalter hinter Transformatoren, falls der Transformator nicht über Kabelleitungen mit dem Schalter verbunden ist; Schalter in Stationen, die von der Umspannstation des übergeordneten Netzes weniger als 5 km entfernt sind.

**Reihe B:**

1. Ausschaltleistung bis 400 MVA: alle anderen, oben nicht angeführten Schalter.
2. Alle Schalter mit grösserer Ausschaltleistung als 400 MVA.

**Amplitudenfaktor:** Der Amplitudenfaktor muss bei allen oben angeführten Steilheiten mindestens gleich 1,6 sein.

umfasst die speziellen Fälle, wie z. B. Generator- und Drosselpulenschalter, während in die Reihe B alle Hochspannungsschalter und alle anderen Mittelspannungsschalter gehören [12]. In beiden Reihen sollen die Schalter bei voller Ausschaltleistung mit einer niedrigeren Steilheit geprüft werden, als bei halber Ausschaltleistung.

Tabelle II enthält die für die Schalterprüfungen vorgeschlagenen Steilheiten der wiederkehrenden Spannung. Bei allen diesen Steilheiten soll der Amplitudenfaktor wenigstens 1,6 betragen. Für einen leichteren Vergleich mit ausländischen Normen wurden in diese Tabelle auch die den Steilheiten entsprechenden Frequenzen eingetragen, welche aus Gl. (1) berechnet wurden:

$$f = \frac{S}{4,9 U} \quad [\text{kHz}, \text{V}/\mu\text{s}, \text{kV}]$$

Diese Frequenzen enthält die Fig. 15 in graphischer Darstellung; sie werden mit den schweizerischen

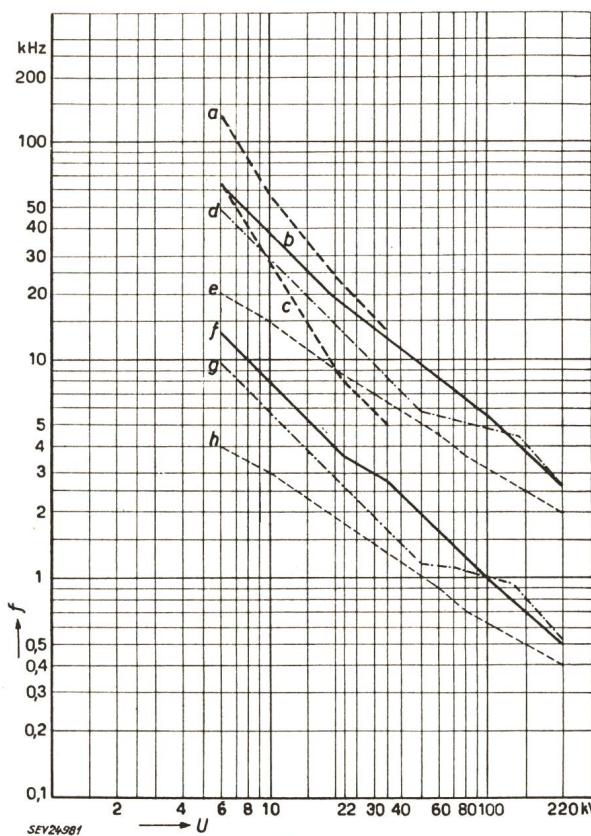


Fig. 15

Eigenfrequenzen  $f$  nach Tabelle II, die den vorgeschlagenen Steilheiten der wiederkehrenden Spannung entsprechen

$U$  Nennspannung

- a tschechoslowakischer Vorschlag, Reihe A; bei 50 % Nennausschaltleistung
- b tschechoslowakischer Vorschlag, Reihe B; bei 50 % Nennausschaltleistung
- c tschechoslowakischer Vorschlag, Reihe A; bei 100 % Nennausschaltleistung
- d Vorschlag nach Johansen [7], Nennausschaltleistung grösser als 500 MVA bei 60 % Nennausschaltleistung
- e schweizerische Schalterregel bei 50 % Nennausschaltleistung
- f tschechoslowakischer Vorschlag, Reihe B; bei 100 % Nennausschaltleistung
- g Vorschlag nach Johansen [7], Nennausschaltleistung grösser als 500 MVA bei 100 % der Nennausschaltleistung
- h schweizerische Schalterregel bei 100 % Nennausschaltleistung

schen und schwedischen Werten verglichen. Die ziemlich grosse Differenz zwischen dem tschechoslowakischen Vorschlag und den Werten anderer Länder ist auf Verschiedenartigkeiten der Netzkonfiguration und auf die aus ihnen abgeleiteten unterschiedlichen Voraussetzungen bei der Ausarbeitung der Normen zurückzuführen. So besteht ein besonders markanter Unterschied zwischen den schweizerischen und tschechoslowakischen Netzen darin, dass in der Schweiz Systeme verschiedener Spannung parallel betrieben werden, während man in der Tschechoslowakei den Parallelbetrieb grundsätzlich vermeidet. Auch wurden in nicht tschechoslowakischen Normen Kurzschlüsse auf Leitungen in der Nähe von Stationen unseres Wissens nicht berücksichtigt.

Die vorgeschlagenen Frequenzen zeigen eine stetige Abhängigkeit von der Netzspannung. Diese Abhängigkeit lässt sich mathematisch folgendermassen darstellen:

$$\begin{aligned} f_{50\%} &= 320 U^{-0,875} & [\text{kHz, kV}] \\ f_{100\%} &= 60 U^{-0,875} \end{aligned} \quad (7)$$

In diesen Ausdrücken ist  $f_{50\%}$  die Eigenfrequenz des Prüfkreises bei halber Ausschaltleistung,  $f_{100\%}$  die Eigenfrequenz des Prüfkreises bei Nennauschaltleistung der Schalter.  $U$  ist die verkettete Nennspannung. Diese Ausdrücke sind mit einer Formel vergleichbar, die St. Germain schon im Jahre 1945 vorgeschlagen hat [4]:

$$f = 50 U^{-\frac{1}{2}}$$

Die Ausdrücke weisen auf eine gewisse Gesetzmässigkeit hin, die eine Extrapolation bei zukünftiger Erhöhung der Nennspannungen zu erlauben scheint. Es ist aus ihnen auch ersichtlich, dass — ähnlich wie in anderen Netzen — auch hier der 50-%-Nennleistung eine fünffache Steilheit bzw. Eigenfrequenz entspricht.

### Schlussfolgerungen

a) Die auf Grund einer Untersuchung über Steilheit und Amplitudenfaktor vorgeschlagene Prüfvorschrift für tschechoslowakische Leistungsschalter ist strenger als ausländische Vorschriften, mit Ausnahme des englischen Vorschlags. Sie nähert sich aber mit steigender Spannung dem schwedischen Vorschlag und fällt mit ihm bei Höchstspannungen fast gänzlich überein. Die Unterschiede sind jedoch nicht so gross, um grundsätzlich eine Lösung auf internationaler Basis auszuschliessen.

b) Es wird in Verteilungssystemen immer eine gewisse Anzahl von Schaltern geben, deren Beanspruchung höher liegen wird, als es die Schalterregeln vorsehen. Solche Schalter sind als Ausnahmen zu betrachten und verlangen ein besonderes Übereinkommen zwischen dem Hersteller und Abnehmer. Um aber diese Ausnahmen rechtzeitig zu erkennen, muss unserer Meinung nach vom Schalterbesteller verlangt werden, neben der gewünschten Ausschaltleistung auch die, im vorgesehenen Netzpunkt vorherrschende Steilheit der wiederkehrenden

Spannung oder deren Eigenfrequenzen anzugeben. Darum sollten die Elektrizitätsgesellschaften den Verlauf der wiederkehrenden Spannung in ihren Netzen und in neuen Projekten stets ermitteln. Diese Forderung scheint uns berechtigt zu sein, besonders in wichtigen Mittelspannungsanlagen und in allen Hoch- und Höchstspannungsanlagen.

c) Es wird von Bedeutung sein, sich auf internationaler Basis über Voraussetzungen und Ermittlungsmethoden zu einigen.

d) Das Verhalten von Leistungsschaltern in Bezug auf den Verlauf der wiederkehrenden Spannung ist noch immer nicht zufriedenstellend geklärt. Die Schalterfabrikanten sollten daher für jeden Schaltertyp die Abhängigkeit der Ausschaltleistung von der Steilheit oder Eigenfrequenz der wiederkehrenden Spannung ermitteln und im Prüfprotokoll angeben.

### Literatur

- [1] Fourmarier, P. und J. K. Brown: Die Bestimmung des Verlaufs der wiederkehrenden Spannung nach Kurzschlussabschaltungen nach einer Hochfrequenz-Resonanz-Methode. Brown Boveri Mitt. Bd. 24(1937), Nr. 8, S. 217...223.
- [2] Hammarlund, P.: Transient Recovery Voltage Subsequent to Short-Circuit Interruption with Special Reference to Swedish Power Systems. Ingenjörsvetenskapsakademiens Handlingar Nr. 189. Stockholm: Generalstabens Litografiska Anstalts Förlag 1946.
- [3] King, Sing-Yui: Determination of Restriking Transients on Power Networks by a Half-Wave Injection Method. Proc. Instn. Electr. Engrs. Bd. 96(1949), Part 2, Nr. 53, S. 700...704.
- [4] Saint-Germain, J.: Les problèmes relatifs à la coupure des lignes d'interconnexion des réseaux à très haute tension. Bull. Soc. belge Electr. Bd. 67(1951), Nr. 1, S. 1...13.
- [5] Union technique de l'Electricité: Interrupteurs à ouverture automatique/disjoncteurs. Règles C 64—100, février 1951. Paris: 1951.
- [6] Gosland, L. und J. S. Vosper: Etude, à l'aide de la table à calcul, des tensions transitoires inhérentes de rétablissement sur le réseau britannique à 132 kV. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), Paris 1952, Bd. 2, rapp. 120, 21 S.
- [7] Johansen, O. S.: Recherches sur les valeurs de la vitesse d'accroissement de la tension transitoire de rétablissement et du facteur d'amplitude dans les réseaux suédois d'énergie et proposition concernant les valeurs de référence de la vitesse d'accroissement de la tension transitoire de rétablissement. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), Paris 1952, Bd. 2, rapp. 104, 20 S.
- [8] Gert, R.: Über Normungsfragen der wiederkehrenden Spannung. [in tschechischer Sprache.] Elektrotechn. Obz. Bd. 41(1952), Nr. 12, S. 546...558.
- [9] Regeln für Wechselstrom-Hochspannungs-Schalter. Bull. SEV Bd. 44(1953), Nr. 2, S. 71...80.
- [10] Zajic, V.: Hochspannungs-Leistungsschalter. Prag: SNTL 1954.
- [11] Schiller, H. und H. Meyer: Die in schweizerischen 50-kV-Netzen vorkommenden Bedingungen in Bezug auf Ausschaltleistung und Eigenfrequenz. Bull. SEV Bd. 45(1954), Nr. 13, S. 526...530, 543.
- [12] Zajic, V.: Über die Ausführungsformen von Leistungsschaltern für Hochspannung und Höchstspannungen. [in tschechischer Sprache.] Elektrotechn. Obz. Bd. 43(1954), Nr. 4, S. 204...210.
- [13] Jirků, J.: Widerstandsfähigkeit von Leitungen gegen atmosphärische Störungen. [in tschechischer Sprache.] Elektrotechn. Obz. Bd. 43(1954), Nr. 10, S. 526...534.
- [14] Butkevič, G. V.: Einige aktuelle Fragen der Konstruktion von Leistungsschaltern. [in russischer Sprache.] Elektricschestwo Bd. -(1955), Nr. 2, S. 13...17.
- [15] Baltensperger, P.: Statistische Untersuchung über Eigenfrequenzverhältnisse in möglichst vielen Netzen. Bull. SEV Bd. 46(1955), Nr. 11, S. 505...517.
- [16] Gert, R.: Die wiederkehrende Spannung in den Netzen der ČSR. Energie-Techn. Bd. 5(1955), Nr. 5, S. 207...214.
- [17] Anonym: Testing Large Circuit-Breakers. J. Instn. Electr. Engrs. Bd. 1(1955), Nr. 6, S. 371...372.
- [18] Schiller, H. und P. Baltensperger: Die in den schweizerischen 150-kV-Netzen vorkommenden Bedingungen in Be-

- zug auf Abschalteistung und Eigenfrequenz. Bull. SEV Bd. 46(1955), Nr. 22, S. 1065...1067.
- [19] Gert, R.: Untersuchung der wiederkehrenden Spannung in tschechoslowakischen Netzen. [in tschechischer Sprache.] Elektrotechn. Obz. Bd. 44(1955), Nr. 12, S. 641...651.
- [20] Gert, R. und S. Svoboda: Die wiederkehrende Spannung und ihr Einfluss auf die Betriebssicherheit energetischer Anlagen. [in tschechischer Sprache.] Techn. Informationen, UTEIN, Prag. Reihe 12(1956), Nr. 1, 69 S.
- [21] Fukuda, S. und F. Mori: Les caractéristiques de la tension de réamorçage sur les réseaux japonais. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), Paris 1956, rapp. 105, 15 S.
- [22] Horst, D. Th. J. ter und F. S. Bertrums: Influence d'une charge en parallèle sur le facteur d'amplitude de la tension transitoire de rétablissement sur court-circuit, dans les réseaux. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), Paris 1956, rapp. 121, 10 S.
- [23] Meyer, H. und H. Schiller: Rapport sur l'activité du comité d'études n° 3 (Interrupteurs). Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), Paris 1956, rapp. 139, 8 S.

**Adresse des Autors:**

Dipl. Ing. R. Gert, Gajdošova 107/b, Brno 15 (Tschechoslowakei).

**Technische Mitteilungen — Communications de nature technique****Ein Besuch bei der Steatit-Magnesia A.-G., Werk Lauf bei Nürnberg**

666.593.3(43-2.64)

Der schweizerischen elektrotechnischen Industrie wie auch den eidgenössischen Verwaltungen wurde Gelegenheit geboten, die Stema-Werke in Lauf eingehend zu besichtigen.

In ihrem herbstlichen Farbenkleid zieht die würtembergische Landschaft an unserem Auge vorüber. Via Stuttgart erreichen wir das östlich gelegene Nürnberg im bayerischen Flachland. Die im Krieg stark mitgenommene Stadt hat sich inzwischen gut erholt. Der Wiederaufbau zeigt das Stadtbild in seinen schönen alten und neuen Formen, wobei sich die «Burg» aus dem 12. Jahrhundert mit ihrem Sinwell- und Heidenturm majestätisch aus dem Ganzen emporhebt.

Aus den im Werk gehaltenen Vorträgen, sowie der daran anschliessenden Werkbesichtigung sollen im folgenden einige Merkmale wiedergegeben werden:

Die Aktiengesellschaft wurde im Jahre 1921 durch Fusion mehrerer Werke gegründet und beschäftigt heute in den vier Werken Lauf, Holenbrunn, Porz und Berlin insgesamt über 5000 Arbeiter und Angestellte. Die Firma hat sich — dank unermüdlichem Schaffen, grosser Entwicklungs- und Forschungsarbeit — zu einem der grössten Unternehmen der Steatitbranche auf dem europäischen Kontinent emporgearbeitet.



Fig. 1  
Lauf bei Nürnberg  
Marktplatz mit Rathaus

**Der Werkstoff Steatit**

Steatit ist ein dichter keramischer Werkstoff von gelblicher weißer Brennfarbe und weissem Bruch. Sein Hauptbestandteil bildet Speckstein, ein wasserhaltiges Magnesiumsilikat. In Deutschland gewinnt man das Material im Fichtelgebirge als kompakten Stein in Gruben im Tag- wie im Untertagsbau (Fig. 3).

Gemahlener Speckstein ergibt gebrannt, mit geringen Zuschlügen von Tonsubstanz zur Erhöhung der Plastizität und von Feldspat zur besseren Sinterung, einen dichten Scherben.

Steatit ist ein elektrotechnisches Isoliermaterial, das ausser der Säure- und Laugenbeständigkeit besonders gute elektrische Eigenschaften, wie hohe Durchschlagfestigkeit, hohes Isoliervermögen und überragende mechanische Festigkeiteigenschaften aufweist. Steatitpulver gestattet infolge der Gleiteigenschaft des in der Masse vorhandenen rohen Specksteines ein Verpressen im trockenen Zustand. Durch dieses Fertigungsverfahren erreicht man eine geringe Schwindung des Formlings. Die gefertigten Steatit-Teile werden für Hoch- und Niederspannungszwecke sowie für die Hochfrequenztechnik und für chemisch-technische Zwecke verwendet. Sie können unglasiert und glasiert, sowohl farblos wie farbig, verwendet werden.

e) Die Filterkuchen getrocknet und pulverisiert werden mit Wasser und Öl versetzt und so im Nasspressverfahren verarbeitet. Der Staub wird für das Trockenpressverfahren granuliert und getrocknet.

Auf den Werkzeug- und Maschinenbau wird besonderer Wert gelegt. Da die Firma voll autark arbeitet, bilden diese Abteilungen sozusagen das Herz der Produktion. Ausser den Spezialwerkzeugen werden alle Steatitpressen nach eigenen Plänen hergestellt und bilden ein Geheimnis der Fertigung. In den erwähnten Abteilungen werden nur gelernte Fachkräfte eingesetzt, und es ist daher nicht verwunderlich, dass die Firma eine 80 Lehrlinge umfassende Ausbildungs- und Musterierungsabteilung unterhält. Die Lehrlinge machen eine 4jährige Lehrzeit als Werkzeugmacher durch.

Das wichtigste Gebiet stellt das Pressverfahren dar. Man kennt das Trocken- und Nasspressverfahren. Hinzu kommt noch das sehr interessante Strangpressen. Die Herstellung feinkeramischer Erzeugnisse geht in der Weise vor sich, dass die fein vermahlene rohe Masse im Presswerkzeug, mit Wasser und Ölzusatz im Nasspressverfahren oder granuliert im Trockenpressverfahren, verformt, beim Nasspressen anschliessend getrocknet und bei beiden Verfahren verputzt und im gasgefeuerten Tunnelofen bei 1410 °C gebrannt wird.