

| | |
|---------------------|---|
| Zeitschrift: | Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins |
| Herausgeber: | Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke |
| Band: | 15 (1924) |
| Heft: | 5 |
| Artikel: | Richtlinien für die Wahl der Schalter in Wechselstrom-Hochspannungsanlagen |
| Autor: | Brühlmann, G. / Bauer, Bruno |
| DOI: | https://doi.org/10.5169/seals-1061825 |

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: 14.01.2026

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

Dabei ist jedoch zu bemerken, dass die Bodenbeschaffenheit für die Widerstandsfähigkeit des Plattenfundamentes sehr günstig war, weil der im groben, festen Schotter einbetonierte untere Teil des Fundamentes eine sehr feste Verbindung mit diesem ergab. Wäre das Fundament in weniger druckfestem Erdreich erstellt worden, so wäre seine Widerstandsfähigkeit wahrscheinlich nicht viel grösser gewesen als die sich aus dem Gewichtsstabilitätsmoment ergebende.

Zum Schlusse sei ausdrücklich betont, dass mit den vorstehenden Ausführungen nicht beabsichtigt ist, eine vollständige Theorie des Verhaltens und der Berechnung von Blockfundamenten aufzustellen. Es handelte sich vielmehr darum, in Anlehnung an die von Andrée angegebene Berechnungsweise die bei den Versuchen in Gösgen erhaltenen Ergebnisse einer kritischen Betrachtung zu unterziehen und diese Berechnungsweise auf bestimmtere Grundlagen zu stellen und möglichst zu vereinfachen. Neu hinzugekommen ist dabei die Rücksichtnahme auf das Mass der Fundamentverdrehung bei einer bestimmten Belastung.

Bei der Beurteilung der Ergebnisse und Ausrechnungen ist folgendes zu berücksichtigen:

Alle Fundamente mit Ausnahme von No. V wurden unter satter Anbetonierung an den gewachsenen Boden erstellt.

Die Reibung der zur Zugrichtung parallelen Fundamentflächen an den Grubenwänden und die Sohlenreibung wurden nicht besonders berücksichtigt.

Es wurde eine für die massgebende Belastung gültige, feste Drehachsenlage angenommen.

Ueber den Druckverlauf im Boden wurden vereinfachende Annahmen gemacht.

Es ist daraus ersichtlich, dass die berechneten Ziffern nicht absolute Gültigkeit haben. Sie sind vielmehr nur unter den gemachten Voraussetzungen zutreffend. Mit einiger Uebung wird es in den gewöhnlichen Fällen möglich sein, die Bodenziffern annähernd richtig zu schätzen. Jedenfalls ist es angezeigt, dieselben eher zu niedrig als zu hoch anzunehmen. Handelt es sich in wichtigeren Fällen darum, Blockfundamente so zu bemessen, dass ihr Widerstand gegen Verdrehung genau vorausbestimmt werden kann, so ist dies durch die versuchswise Bestimmung der Baugrundziffern der Fundamentgrube mittels eines passenden Instrumentes möglich. Unter dieser Voraussetzung würde der beschriebene Rechnungsgang in allen Fällen genügend genaue Ergebnisse liefern.

Richtlinien für die Wahl der Schalter in Wechselstrom-Hochspannungsanlagen¹⁾.

Aufgestellt von der Gruppe a (Ueberstromschutz und Oelschalter)
der Kommission des S. E. V. und V. S. E. für Hochspannungsapparate, Ueberspannungsschutz
und Brandschutz²⁾ unter besonderer Mitarbeit von G. Brühlmann, Baden.

Vorwort.

Von Dr. Bruno Bauer, Präsident der Gesamtkommission.

Unsere Verbände, S. E. V. und V. S. E., haben sich schon seit geraumer Zeit durch ihre gemeinsam bestellte Kommission mit der Aufgabe der Erhöhung der Betriebssicherheit elektrischer Schaltapparate, im besondern der *Oelschalter*, beschäftigt. Wie erinnerlich, haben die Studien und Versuche, unter tatkräftiger Unterstützung der schweizerischen Konstruktionsfirmen, im Jahre 1914 mit der mehr theoretischen Erforschung des Abschaltvorgangs im Oelschalter ihren Anfang genommen. Es galt,

¹⁾ Vorlage für die Generalversammlung vom 22. Juni 1924 in Siders.

²⁾ Die Gruppe a der genannten Kommission besteht aus den Herren: Dr. Roth-Baden (Präsident); Dr. Bauer-Bern; Egg-Bern; Glaser-Oerlikon; Gysel-Zürich; Heusser-Aarau; Schmidt-Lausanne und ex officio dem Generalsekretär des S. E. V. und V. S. E.; Mitarbeiter Brühlmann-Baden.

die physikalischen und chemischen Erscheinungen der Stromunterbrechung unter Oel zu studieren, um den Einfluss der verschiedenen Abschaltbedingungen zu erkennen. Die Kommission hat in den Jahren 1915, 1916 und 1917 in drei grösseren Berichten das Resultat ihrer Arbeiten veröffentlicht. Die Untersuchungen gliederten sich im wesentlichen nach drei Richtungen:

1. Festlegung der charakteristischen, für die Gefährdung des Apparates massgebenden Merkmale der Stromunterbrechung (Lichtbogenlänge, Schalterarbeit, Wärme- bzw. Gasentwicklung);
2. Einfluss der elektrischen Verhältnisse in dem zu unterbrechenden Stromkreis auf die Stromunterbrechung (Strom, Spannung, Phasenverschiebung);
3. Einfluss der Schalterart und -Konstruktion (Schaltgeschwindigkeit, Vielfachunterbrechung, Oeldruck, Kontaktform usw.).

Trotz der bedeutenden Mittel, die unsere zwei Verbände und die Konstruktionsfirmen für die Sache zur Verfügung stellten, konnten die Untersuchungen, wenn auch sehr eingehend durchgeführt, nur vorbereitender Natur sein. Die relativ geringen Abschaltleistungen, mit denen die Kommission arbeitete, liessen die Frage offen, inwieweit die gefundenen Resultate auf die Verhältnisse mit grosser Unterbrechungsleistung im Kurzschluss anwendbar seien.

Unsere Arbeiten sind in der Folge im In- und Ausland im grossen weiter verfolgt und erweitert worden, so dass nunmehr ein reichhaltiges Versuchsmaterial über diesen Gegenstand vorliegt. Wir dürfen konstatieren, dass wir durch unsere Untersuchungen nützliche Vorarbeit geleistet haben.

So kann heute das Wesen und die Wirkung der Stromunterbrechung im Schalter im grossen und ganzen als abgeklärt betrachtet werden, wenngleich die zahlenmässige Erfassung dieser Vorgänge noch nicht so weit gediehen ist, dass hieraus genaue Berechnungsregeln für die Konstruktion der Apparate abgeleitet werden könnten. Immerhin sind die Konstruktionsfirmen auf Grund der gewonnenen Erfahrungen nunmehr in der Lage, annähernd anzugeben, welche maximale Abschalt-Beanspruchung ein gegebener Schalter in Strom und Spannung ohne Schaden zu nehmen ertragen kann.

Damit ist in der Betriebssicherheit der elektrischen Schaltanlagen, im besondern der Schaltapparate selbst, ein wesentlicher Fortschritt zu verzeichnen, indem wir nunmehr jeden Oelschalter, den wir benötigen, von vorneherein in seiner Grösse und Ausführung so wählen können, dass er der maximal möglichen Abschalt-Beanspruchung an seinem Aufstellungsort mit Sicherheit gewachsen ist. Die Kommission hat sich die Aufgabe gestellt, Richtlinien für die nach diesem Gesichtspunkt zu treffende Wahl der Schaltapparate aufzustellen. Sie wendet sich damit in der Hauptsache an die Betriebsleitungen der Werke, um diesen zu ermöglichen, auf Grund der Verhältnisse in der betreffenden elektrischen Anlage diejenigen charakteristischen Daten zu ermitteln, welche für die Wahl des gewünschten Schalters massgebend sind.

Früher begnügte man sich bei der Bestellung eines Schalters mit der Angabe der Betriebsspannung und des Vollast-Stromes der Leitung, den der Apparat zu unterbrechen hat. Diese Daten sind nicht hinreichend für die sichere Wahl eines Schalters. Die Richtlinien verlangen als weitere Merkmale die maximale *Abschalt-Stromstärke*, mit welcher der Schalter an seinem Aufstellungsort beansprucht wird, und die *Abschalt-Spannung*, welche nach erfolgter Ausschaltung an den Schalterklemmen herrscht. In manchen Fällen ist auch die Kenntnis des maximalen *Kurzschluss-Stromes* am Aufstellungsort des Schalters erforderlich.

Die genaue Ermittlung dieser Daten ist bei mehrfach miteinander verknüpften Leitungsnetzen, wie wir sie gerade in unserem Lande treffen, nur durch ausserordentlich umständliche Rechnungen möglich. An Stelle der exakten Rechnung eine praktisch brauchbare und hinreichend genaue Berechnungsmethode aufgestellt zu haben, darf als ein kleines Verdienst der Gruppe a unserer Kommission bezeichnet

werden, wofür deren Präsident, Herrn Dr. Roth, und seinem Mitarbeiter, Herrn Ing. Brühlmann, besonderer Dank gebührt.

1. Einleitung.

Die Schalter bilden einen besonders wichtigen Teil in Hochspannungsanlagen. Von ihrem richtigen Funktionieren ist die Betriebssicherheit der Anlage wesentlich abhängig. Besonders bei Kurzschlüssen sind zur Fernhaltung der Störung von den gesunden Netzteilen und zur raschen Wiederherstellung des Betriebes im gestörten Netzteil zuverlässig arbeitende Schalter notwendig. Für Wechselstrom-Hochspannungsnetze grosser Leistung oder hoher Spannung kommen heute ausschliesslich Oelschalter in Betracht. Ungenügend dimensionierte Oelschalter bilden aber nicht nur eine Gefahr für die Aufrechterhaltung des Betriebes, sondern auch für die Anlagen selbst, da sie Anlass zu Explosionen und Oelbränden geben können. Es ist deshalb notwendig, dass die Auswahl der in Neuanlagen zu verwendenden Schalter und die Nachkontrolle vorhandener Schalter bei Netzerweiterungen mit grosser Sorgfalt geschieht. Zur Bestimmung der notwendigen Schaltergrösse ist die Kenntnis der Abschaltstromstärke, mit welcher der Schalter beansprucht wird, notwendig. Die Bestimmung des Abschaltstromes erfordert in vielen Fällen eine grössere Rechnung, welche aber bei der Wichtigkeit der Frage nicht umgangen werden kann. Diese Rechnung sollte zweckmässigerweise von denjenigen Organen vorgenommen werden, welche die Betriebsbedingungen der Leitungsnetze und deren Ausbaumöglichkeiten am besten überblicken und beurteilen können.

Schalter werden an solchen Orten in Wechselstromleitungen eingebaut, wo ein Unterbrechen der Leitung während des Stromdurchganges notwendig ist. Der Strom im Abschaltmoment kann der Betriebsstrom, ein Ueberlaststrom oder ein Kurzschlussstrom sein. Die Abschaltung eines direkt nach dem Schalter auftretenden Leitungskurzschlusses bildet stets die höchste Beanspruchung, welche ein Schalter an seinem Aufstellungsplatz erfahren kann. Für Kurzschlussabschaltungen müssen alle Schalter bemessen sein, welche bei Kurzschlüssen ausgelöst werden.

2. Definitionen der verwendeten Ausdrücke.

In diesen Richtlinien bezeichnen wir mit *Schalter* einen Apparat, der zur Unterbrechung eines Stromkreises während des Stromdurchganges dient.

Oelschalter sind Schalter, bei welchen die Trennung der Kontakte unter Oel erfolgt.

Betriebsspannung ist die höchste am Verwendungsort des Schalters in irgend einem Betriebszustand der Anlage herrschende Spannung, bei Ein- und Dreiphasennetzen zwischen den Aussenleitern gemessen³⁾.

Betriebsstromstärke ist der Effektivwert der grössten Stromstärke, welche den Schalter in irgend einem Betriebszustand dauernd durchfliesst⁴⁾.

Abschaltstromstärke ist der Effektivwert des Wechselstromanteils, der bei der Abschaltung im Moment der Oeffnung der Kontakte durch den Schalter fliesst.

Abschaltspannung ist der Effektivwert der Spannung, welche bei der Abschaltung an der unter Spannung verbleibenden Leitung auftritt, unmittelbar nachdem die Abschaltlichtbogen in allen Phasen gelöscht haben.

Anfangskurzschlusstrom ist der Effektivwert des Wechselstromanteils, der bei Abwesenheit von Sättigungseinflüssen im ersten Moment des Kurzschlusses auftritt (siehe Abschnitt 4 a).

Dauerkurzschlusstrom ist der Effektivwert der Stromstärke, die sich bei dauerndem Kurzschluss einstellt.

Schalterpol ist ein Schalter oder ein Teil eines Schalters, der eine einfache Leitung zwischen 2 Punkten öffnet oder schliesst.

³⁾ Von Ueberspannungen abgesehen.

⁴⁾ Von Kurzschluss und kurzzeitigem Ueberstrom abgesehen.

Hauptkontakt ist ein Kontakt oder ein Teil eines Kontaktes im Schalter, welcher den Betriebsstrom führt.

Löschkontakt ist ein Kontakt, an welchem die Löschung des Abschaltlichtbogens erfolgt.

Hauptkontakt und Löschkontakt können auch in einem Element vereinigt sein.

Schutzwiderstand ist ein mit dem Schalter zusammengebauter Widerstand, der die durch Schaltvorgänge erzeugten Ueberspannungen und Stromstöße vermindern soll⁵⁾.

Löschwiderstand ist ein mit dem Schalter verbundener Widerstand, der die im Schalter freiwerdende Energie verringert und damit die Lichtbogenlöschung erleichtert⁵⁾.

3. Für die Wahl eines Schalters erforderliche Angaben.

Die hauptsächlichsten Betriebsanforderungen, denen ein Schalter genügen muss, und welche die Wahl desselben bestimmen, sind die Betriebsspannung, die Betriebsstromstärke, der Anfangskurzschlusstrom, die Abschaltstromstärke und die Abschaltspannung.

a) Die Betriebsspannung.

Die Betriebsspannung ist massgebend für die Isolierabstände des Schalters. Sie bedingt häufig für sich allein die Grösse des Schalters, nämlich in allen den Fällen, in welchen die Einhaltung der notwendigen Isolierabstände grössere Dimensionen ergibt, als die Abschaltstromstärke oder eventuell die Betriebsstromstärke erfordern.

Die Prüfspannung der Schalter muss den Normen des S. E. V. entsprechen⁶⁾. Es ist nicht begründet, die Prüfspannung mit der Kurzschlusstromstärke in Zusammenhang zu bringen.

b) Die Betriebsstromstärke.

Die Betriebsstromstärke bedingt die Grösse der Hauptkontakte, der Bolzen der Durchführungsisolatoren und anderer leitender Teile. Bei sehr grossen Strömen kann dieselbe auch aus Erwärmungsgründen bestimmt werden für die Grösse der äussern Abmessungen des Schalters. Bei der Festlegung der Stromstärke für neu aufzustellende Schalter empfiehlt es sich, auf vorauszusehende Erhöhung der Netzbelastung Rücksicht zu nehmen. Im Interesse der Austauschbarkeit und Reservehaltung erweist es sich auch oft als zweckmässig, in ein- und derselben Anlage nur gleiche Schalter zu verwenden und dieselben für den Netzteil mit der grössten Betriebsstromstärke zu bemessen.

c) Der Anfangskurzschlusstrom.

Jeder Schalter soll so gewählt werden, dass er im geschlossenen Zustande den grössten Anfangskurzschlusstrom, der am Aufstellungsorte auftreten kann, schadlos ertragen kann. Der Anfangskurzschlusstrom kann grosse thermische und infolge elektrodynamischer Wirkung auch mechanische Beanspruchungen der Durchführungen, Kontakte und anderer Teile verursachen und ist deshalb für die Konstruktion dieser Teile von Bedeutung. Im Interesse grösster Betriebssicherheit soll jeder Schalter so gewählt werden, dass er am Aufstellungsort auch auf bestehenden Kurzschluss einschalten kann. Angaben für die Berechnung des Anfangskurzschlusstromes an gegebener Netzstelle finden sich im Abschnitt 4. Zur Bestimmung der mechanischen Beanspruchungen soll der Sättigungsstoss (Abschnitt 4a) ebenfalls berücksichtigt werden.

⁵⁾ Siehe auch Abschnitt 5.

⁶⁾ Normen des S. E. V. für Spannungen und Spannungsprüfungen (siehe auch Bulletin 1923 No. 8, Seite 455 u. ff.)

d) Die Abschaltstromstärke.

Bei gegebener Abschaltspannung ist die Abschaltstromstärke massgebend für die Beanspruchung eines Schalters beim Abschalten und damit im allgemeinen für dessen Grösse.

Verläuft der Strom im Abschaltmoment asymetrisch, so wird nur der Wechselstromanteil berücksichtigt, da der darüber gelagerte Gleichstromanteil den Abschaltvorgang nicht erschwert, sondern unter Umständen sogar erleichtert.

Die zulässige Abschaltstromstärke eines Schalters ist abhängig von der Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung im Abschaltmoment und zwar in dem Sinne, dass Nacheilung des Stromes die Abschaltung erschwert. Alle Angaben über zulässige Abschaltstromstärken sollen sich auf einen $\cos \varphi$ unter 0,4 beziehen, indem innerhalb der Grenzen von 0 bis 0,4 der Einfluss der Änderung der Phasenverschiebung auf die Beanspruchung eines Schalters vernachlässigbar ist. Zudem liegt bei Netzkurzschlüssen der $\cos \varphi$ im allgemeinen unter 0,4.

Jeder Schalter muss für die grösste Abschaltstromstärke bemessen sein, welche im Laufe seiner Verwendung, wenn auch nur anormalerweise, auftreten kann. Dieser Strom wird der grösste, am Aufstellungsort des Schalters mögliche Kurzschlussstrom (Anfangskurzschlusstrom oder Dauerkurzschlusstrom je nach Relaisstellung⁷⁾ des Netzes sein, wenn nicht Gewähr dafür besteht, dass der betreffende Schalter bei Kurzschluss im Netze weder automatisch noch von Hand ausgelöst wird.

Die Abschaltstromstärke, mit welcher bei Kurzschluss an einer bestimmten Netzstelle ein Schalter beansprucht wird, steht in keinem Zusammenhang mit der Betriebsstromstärke, welche an dieser Stelle durch den Schalter fliesst, sondern ist durch die Daten der den Kurzschluss speisenden Netzteile bestimmt. (So führen z. B. die von den Sammelschienen eines Kraftwerkes abzweigenden Leitungen, welche die Hülfsbetriebe speisen, bei Kurzschluss gleich grosse Ströme wie die Hauptleitungen, welche von denselben Sammelschienen abzweigen.)

Im Abschnitt 4 finden sich Angaben über die Berechnung der Abschaltstromstärke. Bei der Bestimmung des vorzusehenden Abschaltstromes von Schaltern wird zweckmässigerweise auf vorauszusehende spätere Leistungsverhöhungen oder Erweiterungen des speisenden Netzes z. B. durch Anschluss neuer Stromerzeuger oder Transformatoren, Verstärkung von Leitungen oder durch Zusammenschluss mit andern Leitungsnetzen Rücksicht genommen.

Jeder Schalter soll das Abschalten mit der zulässigen Abschaltstromstärke, sowie darauffolgendes zweimaliges Ein- und Wiederabschalten in Zeitabständen von wenigstens einer Minute erlauben, wobei der Anfangskurzschlusstrom den zulässigen Wert nicht überschreiten darf.

In gewissen Fällen sind Massnahmen zur Einschränkung der Kurzschlusstromstärke zu empfehlen. Durch diese Einschränkung werden nicht nur die Schalter, sondern auch alle andern im Kurzschlusstromkreis befindlichen Anlageteile in bezug auf ihre Beanspruchung durch Kurzschlusstrom entlastet. Diese Massnahmen können in einer Unterteilung des Betriebes in mehrere nicht miteinander gekuppelte Sammelschienensysteme bestehen, oder in der Einschaltung von Drosselpulsen, sei es in die Leitungen der einzelnen Stromerzeuger, in die abgehenden Leitungen oder zwischen einzelne Sammelschienabteilungen. Ein solcher Kurzschlusschutz kann hauptsächlich notwendig werden in Kraftwerken sehr grosser Leistung, oder für Leitungen geringer Normalleistung, welche an grosse Kraftwerke angeschlossen

⁷⁾ Siehe Abschnitt 4a.

sind, wozu speziell auch die Leitungen für den Eigenbedarf grosser Anlagen gehören.

Einfluss der Frequenz auf den Abschaltvorgang. Derselbe ist von der Schalterkonstruktion abhängig und kann deshalb nicht in allgemein gültiger Weise beurteilt werden. Zur sichern Bestimmung der Verwendungsmöglichkeit eines gegebenen Schalters bei verschiedenen Frequenzen fehlen zurzeit genügende Versuchsresultate; auf Grund der Vorgänge im Lichtbogen, welche für dessen Lösung massgebend sind, kann aber angenommen werden, dass zwischen ca. 25 und 50 Perioden kein wesentlicher Unterschied besteht.

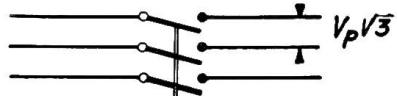
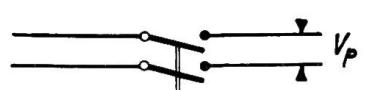
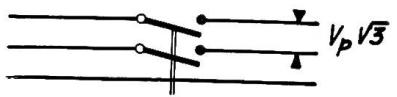
e) Die Abschaltspannung.

Die Abschaltspannung bestimmt zusammen mit der Abschaltstromstärke die Beanspruchung eines Schalters beim Abschalten. Die Abschaltspannung kann gleich oder aber bedeutend kleiner sein als die Betriebsspannung; über ihre Berechnung finden sich Angaben unter Abschnitt 4.

Einfluss der Stromart auf die beanspruchende Spannung beim Abschalten. Schalten mehrere Schalterpole, sei es in mehreren einpoligen Schaltern, sei es in einem mehrpoligen Schalter, zusammen einen Kurzschluss in einem Mehrphasennetz ab, so ist im allgemeinen die Beanspruchung eines einzelnen Poles nicht gleich dem entsprechenden Bruchteil der unterbrochenen Gesamtleistung, sondern grösser. Diese Erscheinung erklärt sich dadurch, dass die Lösung der Lichtbogen an den Schalterpolen der einzelnen Phasen nicht gleichzeitig geschieht, und der Schalter der zuerst löschenen Phase bis zur Lösung in den andern Phasen unter erhöhter Spannung steht.

Die Tabelle I zeigt für verschiedene Stromarten und Schaltungen die Spannung, welche für die Beanspruchung eines Poles massgebend ist.

Beanspruchende Spannung pro Schalterpol bei Abschaltung mehrphasiger Kurzschlüsse. Tabelle I

| Stromart | Anzahl Schalterpole | Schaltung | Beanspruchende Spannung pro Pol V_p = Phasenspannung im Abschaltmoment |
|--|---------------------|--|---|
| Dreiphasenstrom ⁸⁾ | 3 |  | $1,5 V_p$ |
| Einphasenstrom | 2 |  | $\frac{1}{2} V_p$ |
| Einphasenstrom | 1 |  | V_p |
| Dreiphasenstrom ⁸⁾ (Bahnbetrieb) | 2 |  | 1 Pol $1,5 V_p$ 1 Pol $1,73 V_p$ nach zufälliger Wahl |

⁸⁾ Bei Generatorkurzschlägen kann die beanspruchende Spannung im Dreiphasensystem wegen Verzerrung der Kurvenform der Spannung noch grösser werden. Die genauen Werte sind von der Querfelddämpfung des Generators abhängig; Tabelle I setzt ideale Dämpfung voraus. Genaueres über die Spannungserhöhung einer Phase beim Abschalten dreiphasiger Kurzschlüsse siehe: Biermanns, Magnetische Ausgleichsvorgänge in elektrischen Maschinen, Verlag Springer, Seite 134 u. ff.

Die Tabelle I ermöglicht die Umrechnung der beanspruchenden Spannung von einer Stromart resp. Schaltung auf eine andere. Die zulässigen Abschaltströme und Abschaltspannungen von Schaltern werden gewöhnlich nur für eine Stromart und Schaltung angegeben; normalerweise beziehen sich die Angaben auf die Verwendung im Dreiphasennetz. Werden solche Schalter in anderer Schaltung verwendet, so muss ihre beanspruchende Spannung zuerst umgerechnet werden nach folgendem

Beispiel:

Ein Einphasennetz mit einer Betriebsspannung von 24000 V, einer Kurzschlussstromstärke von 10000 A und einer Abschaltspannung von $V_{p1} = 10000$ V soll durch zwei einpolige Schalter zweipolig abgeschaltet werden können. Welche Schaltergrösse muss gewählt werden aus einer Schalterliste, deren Angaben über zulässige Abschaltströme und -Spannungen sich auf Dreiphasennetze beziehen?

Man bestimmt zunächst die beanspruchende Spannung eines einzelnen Schalterpoles im Einphasennetz; sie ist nach Tabelle I gleich $\frac{1}{2} V_{p1}$, d. h. in unserem Falle gleich 5000 V. Aus der Spannung pro Pol ergibt sich umgekehrt die entsprechende Phasenspannung im Dreiphasennetz durch Division mit dem entsprechenden Faktor der Tabelle zu

$$V_{p3} = \frac{1}{1,5} \cdot \frac{1}{2} V_{p1} = \frac{1}{3} V_{p1}.$$

Es soll also ein Schalter verwendet werden, welcher nach der Liste, d. h. bei Verwendung im Dreiphasennetz 10000 A bei einer Phasenspannung von $\frac{1}{3} V_{p1}$

Grösse der Phasenspannung im Dreiphasennetz, bei welcher die Schalter gleich beansprucht sind wie bei der Phasenspannung V_p einer andern Schaltungsart. Tabelle II

= 3300 V, also einer verketteten Spannung von ca. 5800 V abschalten kann. Der Schalter muss dabei natürlich für 24000 V isoliert sein.

Die auf gleiche Weise bestimmten Umrechnungsfaktoren von einer andern Schaltung auf Dreiphasenschaltung sind in Tabelle II zusammengestellt.

Die Tabellen I und II haben die Abschaltung eines allpoligen Kurzschlusses (oder fast rein induktiver Belastung) als Voraussetzung, welche für die Schalter

die grösste Beanspruchung darstellt. Bei Abschaltung zweipoliger Kurzschlüsse in Mehrphasennetzen sind die Verhältnisse dieselben, wie bei Abschaltung von Einphasennetzen.

4. Berechnung der Abschaltstromstärke und Abschaltspannung an einer bestimmten Stelle eines Netzes.

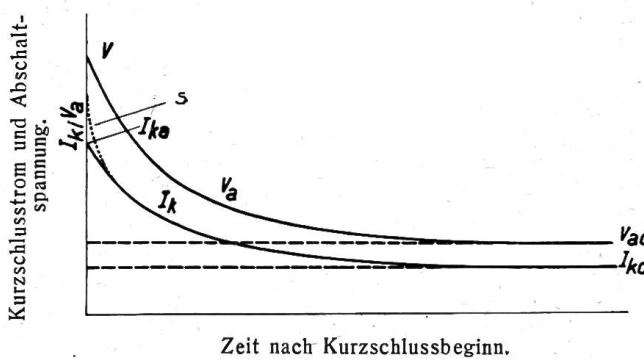
a) Allgemeine Angaben.

Die von einem Schalter bei Kurzschluss abzuschaltende Stromstärke und Spannung ist abhängig vom Zeitpunkt, in welchem die Abschaltung geschieht, da sowohl der Strom als die Abschaltspannung von ihrem Anfangswert auf einen bestimmten Endwert abklingen; ihr Verlauf entspricht etwa den in Fig. 1 abgebildeten Kurven.

Die Bemessung der Schalter für eine Abschaltstromstärke, die kleiner ist als der Anfangskurzschlusstrom und für eine Abschaltspannung, die kleiner ist als

| Stromart | Anzahl Schalterpole | Entsprechende Phasenspannung für 3 Pole, 3phas g |
|----------------------------------|---------------------|---|
| Einphasenstrom | 2 | $\frac{1}{3} V_p$ |
| Einphasenstrom | 1 | $\frac{1}{1,5} V_p$ |
| Dreiphasenstrom (Bahnbetrieb) | 2 | Für 1 Pol V_p Für 1 Pol $\frac{1,73}{1,5} V_p$ |

die Betriebsspannung, setzt ein zuverlässiges Arbeiten der Relais und die sichere Vermeidung von zu frühem Auslösen auf anderem Wege voraus (z. B. durch Handbetätigung, besonders auch unverzögerte Nullspannungsauslösung).



Zeit nach Kurzschlussbeginn.

Fig. 1

In der Kurve für I_k und Sättigungsstoss s ist kein Gleichstromanteil berücksichtigt.

(bis zu ca. 30 %) und nimmt einen Verlauf wie in Fig. 1 durch die punktierte Linie angedeutet.

Für die Bestimmung der elektrodynamischen Beanspruchungen eines Schalters ist dieser Sättigungsstoss zu berücksichtigen. Die Zeit, welche ein Schalter auch bei Momentanauslösung für seine Betätigung braucht (ca. 0,05 s), genügt im allgemeinen, um diesen Ueberstrom fast vollständig (bis auf ca. 5 %) abklingen zu lassen. Die Sättigungserscheinungen sind daher praktisch ohne Einfluss auf die Abschaltung. Aus diesem Grunde beziehen sich im folgenden alle Rechnungen auf die sättigungsfreie Maschine, und als Anfangskurzschlussstrom ist deshalb stets der Wert verstanden, welcher sich bei Abwesenheit von Sättigungseinflüssen ergibt (siehe I_{ka} in Fig. 1). Unter diesen Voraussetzungen genügt die Kenntnis des Stromverlaufes zur Bestimmung des Spannungsverlaufes eines Stromerzeugers. Das konstante Verhältnis von Spannung zu Strom ergibt sich als Quotient aus Spannung vor dem Kurzschluss und dem definierten Anfangskurzschlusstrom.

Die anfängliche Abschaltspannung V in Fig. 1 kann unter Umständen etwas höher als die Betriebsspannung sein. Ist der Schalter vor dem Kurzschluss von

Die Abschaltspannung ist identisch mit der im Abschaltmoment in den Generatoren induzierten Spannung, und da diese den Kurzschlussstrom durch die Impedanzen des gesamten Kurzschlussstromkreises treibt, so ist das Verhältnis von Spannung zu Strom konstant, solange als diese Impedanzen unverändert bleiben.

Veranlassung zu einer Änderung der Impedanz kann einzige die Folge magnetischer Sättigung im Eisen der Stromerzeuger sein. Bei direkten Generatorkurzschlüssen wird tatsächlich der Strom im ersten Moment grösser

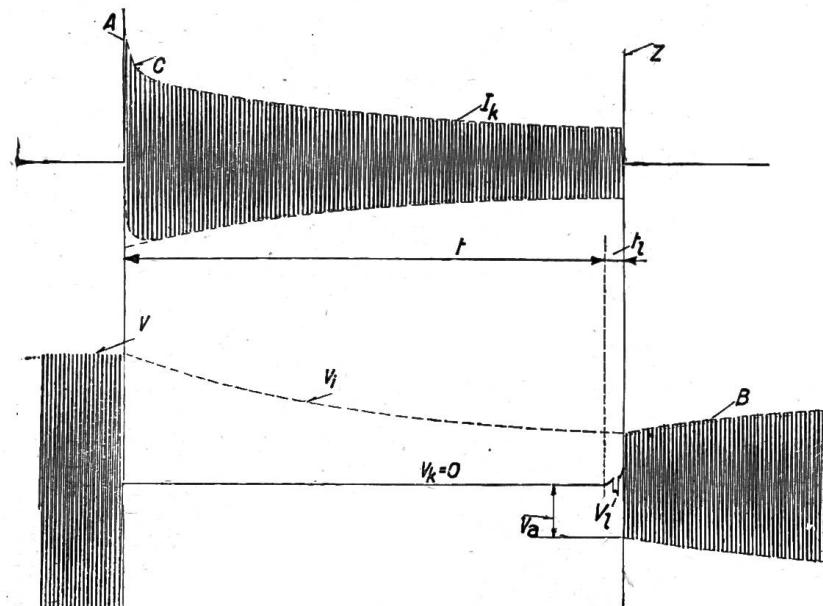


Fig. 2.

Kurzschluss nahe an den Generatoren.

- A = Beginn des Kurzschlusses,
 B = Spannung steigt nach der Abschaltung langsam bis zur Betriebsspannung an,
 C = Asymmetrie (der Sättigungsstrom ist nicht berücksichtigt, in ca. 0,05 S abgeklungen),
 I_k = Kurzschlussstrom,
 t = Auslösezeit des Relais + Zeit zum Funktionieren des Schalters,
 t_1 = Lichtbogendauer,
 V = Betriebsspannung,
 V_a = Abschaltspannung (Scheitelwert),
 V_i = Induzierte Spannung,
 V_k = Spannung während des Kurzschlusses,
 Z = Abschaltmoment.

einem grossen Teil des Belastungstromes der Stromerzeuger durchflossen, so ist, genau genommen, die anfängliche Abschaltspannung zu erhöhen um den Spannungsabfall in den Stromerzeugern, welcher durch diesen Teil des Belastungstromes erzeugt wird.

Im extremen Falle, in welchem der Schalter vor dem Kurzschluss den Vollaststrom der Generatoren führte, beträgt diese Erhöhung der induzierten Spannung zirka $3 \div 15\%$, je nach dem $\cos \varphi$ der Belastung.

Je nach dem gewählten Relaischutzsystem werden die Schalter bei einem Kurzschluss momentan oder mit Zeitverzögerung ausgelöst. Die eingestellten Auslösezeiten (plus die Zeit, welche der Auslösemechanismus zum Funktionieren braucht, welch letztere aber meistens vernachlässigbar klein ist) geben die Grundlage für die Verwendung der Abklingungskurven nach Fig. 1. Die Abklingungszeit bis zur an nähernden Erreichung des Dauerwertes von Strom und Spannung beträgt bei grossen Generatoren (über zirka 1000 kVA) $3 \div 6$ s. Für Schalter, deren Relais auf Momentanauslösung eingestellt sind, muss mit dem fast unverminderten

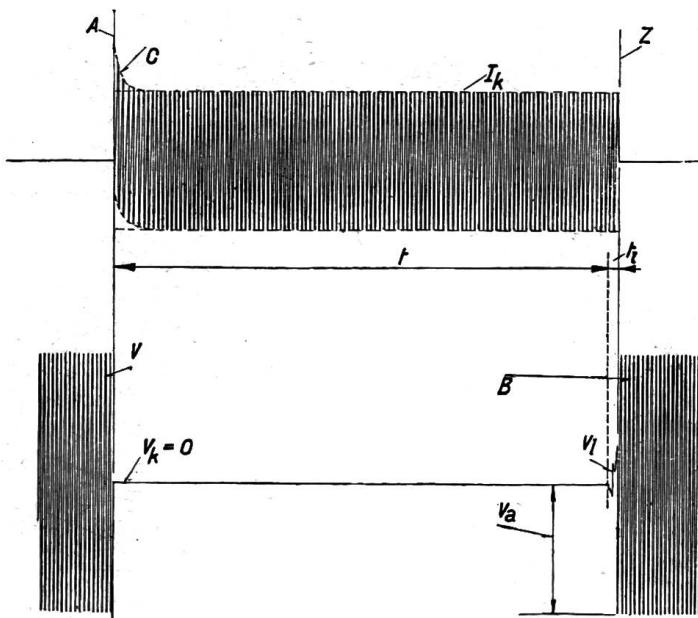


Fig. 3

Kurzschluss über längere Leitungen oder Transformatoren.

- A = Beginn des Kurzschlusses,
- B = Die Spannung ist sofort nach der Abschaltung annähernd gleich der Betriebsspannung,
- C = Asymmetrie (wenig ausgeprägt, kein Sättigungstoss),
- I_k = Kurzschlussstrom (annähernd konstant),
- t = Auslösezeit des Relais + Zeit zum Funktionieren des Schalters,
- t_l = Lichtbogendauer,
- V = Betriebsspannung,
- V_a = Abschaltspannung (Scheitelwert),
- V_k = Spannung während des Kurzschlusses,
- V_l = Spannung der Abschaltlichtbögen im Schalter,
- Z = Abschaltmoment.

Anfangskurzschlussstrom (I_{ka} in Fig. 1) gerechnet werden, währenddem für Schalter mit Zeitauslösung und Einstellung auf mehrere Sekunden annähernd mit dem Dauerkurzschlussstrom gerechnet werden kann (unter Beachtung der Bemerkungen über das zuverlässige Arbeiten der Relais und die Möglichkeit der Auslösung auf anderem Wege, besonders durch Nullspannungsauslöser).

In den Fig. 2 und 3 ist zur Ver deutlichung des Kurzschluss- und Abschaltvorganges der Verlauf des Stromes im Schalter und der Spannung an der ankommenden Leitung bei Kurzschluss und Wiederabschaltung desselben dargestellt, wie er durch oszillographische Aufnahmen gemessen werden kann. Fig. 2 bezieht sich auf einen Kurzschluss in der Nähe von Generatorklemmen, Fig. 3 auf einen Kurzschluss im Netz, bei welchem grössere Leitungsstrecken, eventuell auch Transformatoren, im Kurzschlussstromkreis liegen. In letzterem Falle bleiben sowohl der Strom während des Kurzschlusses

Kurzschlussstrom von Generatoren mit über ca. 1000 kVA Leistung, im Verhältnis zum Normalstrom, bei Vollasterregung.

Im Anfangskurzschlusstrom ist der Sättigungstoss nicht inbegriffen. Tabelle III

| | Anfangs-Kurzschlussstrom gleich Normalstrom mal | Dauer-Kurzschlussstrom gleich Normalstrom mal |
|---|---|---|
| Allpoliger Kurzschluss . . . | 5 - 10 | 3 - 1,8 |
| 2poliger Kurzschluss . . . | 5 - 10 | 3,5 - 2,8 |
| 1poliger Kurzschluss zwischen einer Phase und Nullpunkt | 6 - 12 | 4,5 - 4 |
| (Erdschluss bei geerdetem Nullpunkt) | | |

wie die wieder auftretende Spannung nach demselben beinahe konstant. Bei beiden Figuren ist angenommen, dass die Abschaltung erst nach einigen Sekunden geschieht.

Die Frage, in welchen praktischen Fällen der Verlauf des Kurzschlussvorganges nach Fig. 3 angenommen werden kann, wird im Abschnitt 4d behandelt; dort ist auch ein entsprechendes Beispiel durchgerechnet.

Gegenstand der nachfolgenden Berechnungen ist es, einerseits den *Anfangskurzschlusstrom*, anderseits den vollständig abgeklungenen oder *Dauerkurzschlusstrom*, und die zum letzteren gehörende Abschaltspannung, zu bestimmen.

Sind diese Endwerte bekannt, so können die Werte für die dazwischen liegenden Zeiten anhand der Abklingungskurven der verwendeten Stromerzeuger mit genügender Genauigkeit bestimmt werden. Diese Rechnung wird jedoch nur in besonders wichtigen Fällen notwendig werden.

Zur genauen Berechnung von Anfangs- und Dauerkurzschlusströmen irgend eines Netzes ist ausser der Kenntnis seiner Konstanten auch diejenige der Kurzschlussdaten der in Betracht fallenden Stromerzeuger notwendig. Für Ueberschlagsrechnungen und in Fällen, in welchen die Impedanzen der Leitungen und Transformatoren ein mehrfaches der Impedanzen der Stromerzeuger betragen, können die notwendigen Daten der Generatoren geschätzt werden. Tabelle III gibt dafür einige Anhaltspunkte.

Die erste der beiden Zahlen bezieht sich auf langsam laufende Generatoren, die zweite auf Turbogeneratoren.

b) Die Berechnungsmethode.

Es werden die folgenden Bezeichnungen verwendet:

z = Impedanz von Stromerzeugern, Transformatoren oder Leitungen in Ohm pro Phase.

z_a = Impedanz für den Anfangskurzschlusstrom.

z_d = Impedanz für den Dauerkurzschlusstrom.

I_k = Kurzschlusstrom in Ampere.

I_{ka} = Anfangskurzschlusstrom (ohne Sättigungsstoss).

I_{kd} = Dauerkurzschlusstrom.

V = Betriebsspannung in kV.

V_a = Induzierte Spannung (Abschaltspaltung) in kV zwischen den Außenleitern.

V_{ad} = Induzierte Spannung (Abschaltspaltung bei Dauerkurzschluss) in kV zwischen den Außenleitern.

P = Normalleistung in kVA.

P_k = Abschaltleistung in kVA

P_{ka} = Abschaltleistung bei Kurzschlussanfang⁹⁾ in kVA } für alle Phasen

P_{kd} = Abschaltleistung im Dauerkurzschluss⁹⁾ in kVA } zusammen.

m = Verhältnis von Kurzschlusstrom zu Normalstrom für Transformatoren, Leitungen oder andere konstante Impedanzen.

m_a = Verhältnis von Anfangskurzschlusstrom (Wechselstromanteil) zu Normalstrom für Stromerzeuger.

m_d = Verhältnis von Dauerkurzschlusstrom zu Normalstrom für Stromerzeuger.

ε = Kurzschlussspannung von Transformatoren oder Leitungen bei Normalstrom in % der Normalspannung.

In Absatz *d*) ist eine vereinfachte Berechnungsart angegeben.

Das im folgenden beschriebene Verfahren zur Berechnung der Kurzschlussströme beruht darauf, dass die Kurzschlussimpedanzen pro Phase aller Stromerzeuger, Transformatoren und Leitungen bestimmt werden und mit diesen Impedanzen so gerechnet wird, wie wenn es rein ohmsche Widerstände oder reine

⁹⁾ Definition der Abschaltleistung siehe weiter unten (letzter Abschnitt vor *c*) Berechnungsbeispiele.)

Reaktanzen wären. Die Rechnungsart wird dann die gleiche wie für die Berechnung der Spannungsabfälle von Leitungsnetzen. Man rechnet demnach die resultierende Impedanz von in Serie geschalteten Netzteilen folgendermassen:

$$z_{\text{result.}} = z_1 + z_2 + z_3 + \dots$$

und die resultierende Impedanz von parallel geschalteten Netzteilen:

$$z_{\text{result.}} = \frac{1}{\frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2} + \frac{1}{z_3} + \dots}$$

Diese letztere Rechnungsart wird nicht nur für parallel geschaltete Leitungen oder Transformatoren, sondern auch für parallel arbeitende Stromerzeuger angewendet. Die verschiedene Zusammensetzung der einzelnen Teilimpedanzen aus Reaktanz und Widerstand wird also vernachlässigt. Diese Vernachlässigung ist nötig, um die Rechnung genügend zu vereinfachen; der dadurch entstehende Fehler kann in praktisch vorkommenden Fällen bei Freileitungsnetzen bis zu ca. 5%, bei Kabelnetzen bis zu ca. 15% erreichen. Die errechnete resultierende Impedanz ist bei Serieschaltung zu gross, bei Parallelschaltung zu klein.

Bei der Berechnung des Kurzschlussstromes werden nur diejenigen Netzteile in die Berechnung einbezogen, welche an den betrachteten Kurzschlussort Strom liefern können. Durch Zusammensetzung der Impedanzen dieser Netzteile, als in Serie oder parallel geschaltete Widerstände, erhält man die resultierende Kurzschlussimpedanz am Kurzschlussort. Gewöhnlich ist für diese Rechnung eine Unterteilung des Netzes in Gruppen notwendig, welche ihrerseits wieder parallel oder in Serie geschaltet sind. Aus der resultierenden Impedanz des ganzen Netzes errechnet man dann den Kurzschlussstrom

Impedanzen pro Phase von Dreiphasenleitungen bei Frequenz 50 für im gleichseitigen Dreieck angeordnete Kupferdrähte.

Tabelle IV

| Abstand der Drähte | Leiterquerschnitt mm ² | Impedanz Ohm per km und Phase |
|--------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| 0,8 m | 12,5 | 1,45 |
| | 25 | 0,79 |
| | 50 | 0,495 |
| | 63 | 0,44 |
| 1,2 m | 25 | 0,80 |
| | 50 | 0,515 |
| | 63 | 0,46 |
| | 120 | 0,36 |
| 2,4 m | 50 | 0,55 |
| | 63 | 0,495 |
| | 120 | 0,40 |

$$I_k = \frac{V}{\sqrt{3} z} 1000 \text{ für Dreiphasennetze, resp.}$$

$$I_k = \frac{V}{z} 1000 \text{ für Einphasennetze.}$$

Bei der Berechnung des Dauerkurzschlussstromes wird für die Stromerzeuger eine andere Impedanz in die Rechnung eingeführt. Diese *Impedanz für den Dauerkurzschluss* (z_d) ist eine Hilfsgrösse, welche die Erniedrigung der induzierten Spannung infolge der Feldschwächung in den Stromerzeugern berücksichtigt. Für die Stromerzeuger werden also zwei Impedanzen unterschieden, wovon die wirkliche Impedanz als *Anfangskurzschlussimpedanz* (z_a) bezeichnet wird. Diese Art der Berechnung des Dauerkurzschlussstromes wäre richtig, wenn keine Einflüsse der magnetischen Sättigung vorhanden wären und bei rein induktivem Kurzschlussstromkreis.

Die Abweichungen, welche unter praktisch vorkommenden Verhältnissen auf treten, sind im allgemeinen vernachlässigbar klein. Diese Rechnungsart kann in ungünstigen Fällen Fehler von ca. 10 bis 20% ergeben.

Die Impedanzen für Anfangs- und Dauerkurzschluss von Stromerzeugern können für ein- und dreiphasige Schaltung wie folgt berechnet werden:

$$z_a = \frac{V^2}{m_a P} 1000 \text{ Ohm und} \quad z_d = \frac{V^2}{m_d P} 1000 \text{ Ohm.}$$

Für Rechnungen, welche zur Bestimmung der Schaltergrösse dienen, sollen für m_a und m_d die Werte für Vollasterregung eingesetzt werden.

Ebenso ist für *Transformatoren oder Leitungen* oder andere Impedanzen:

$$z = \frac{V^2}{m P} 1000 \text{ Ohm.}$$

In diesem Falle kann das Verhältnis m auch leicht aus der prozentualen Kurzschlussspannung bei Normalstrom bestimmt werden:

$$m = \frac{100}{\varepsilon}.$$

Die Impedanzen von *Freileitungen* sind abhängig von gegenseitiger Anordnung, Abstand und Querschnitt der Leiter. Für Dreiphasenleitungen mit im gleichseitigen Dreieck angeordneten Kupferdrähten gibt Tabelle IV einige Impedanzen.

Häufig kommen im betrachteten Kurzschlussstromkreis Netzteile mit verschiedenen Spannungen vor, welche durch Transformatoren gekoppelt sind. Um trotzdem den angegebenen Rechnungsgang einhalten zu können, werden zweckmässigerweise alle Impedanzen auf eine einheitliche Spannung umgerechnet, z. B. auf die Spannung am Aufstellungsort des Schalters, für dessen Bestimmung die Rechnung durchgeführt wird. Die Impedanzen ändern sich bei Umrechnung von einer Spannung auf eine andere mit dem Quadrat der Spannung, d. h.

$$z_2 = z_1 \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^2.$$

Die *Abschaltspannung* V_A kann nach früher Gesagtem (Abschnitt 4 a) während der Abklingungszeit proportional dem Kurzschlussstrom I_k gesetzt werden. Da bei Kurzschlussanfang V_k annähernd gleich der vollen Betriebsspannung ist, wird bei Dauerkurzschluss

$$V_{ad} = V \frac{I_{kd}}{I_{ka}}^{10)}.$$

Diese angeführte Rechnung ist nicht nur für Kurzschlüsse in der Nähe von Generatoren, sondern auch für jeden beliebigen Stromkreis gültig.

Aus Kurzschlussstrom und Abschaltspannung ergibt sich dann die *Abschaltleistung*, z. B. für Dreiphasennetze zu:

$$P_{ka} = I_{ka} V \sqrt{3}, \quad P_{kd} = I_{kd} V_{ad} \sqrt{3};$$

für Einphasennetze zu $P_{ka} = I_{ka} V, \quad P_{kd} = I_{kd} V_{ad}$.

c) Berechnungsbeispiele.

1. Beispiel.

Angenommen ist ein Dreiphasennetz nach Fig. 4. Es sollen die Kurzschlussstromstärken und Abschaltspannungen für die angenommenen Kurzschlussstellen K_1 und K_2 bestimmt werden.

Berechnung für Kurzschlussstelle K_1 :

Annahmen:

Anfangskurzschlussstrom der Stromerzeuger = 6facher Normalstrom ($m_a = 6$),
Dauerkurzschlussstrom der Stromerzeuger = 2facher Normalstrom ($m_d = 2$).

¹⁰⁾ Ueber die Erhöhung der Abschaltspannung um den Spannungsabfall in den Stromerzeugern durch den abgeschalteten Belastungsstrom siehe Bemerkung unter Abschnitt 4a. Da die Rechnung im allgemeinen auch ohne Berücksichtigung dieses Zuschlages genügend genau ist, ist der letztere im folgenden nicht in die Rechnung eingeführt worden.

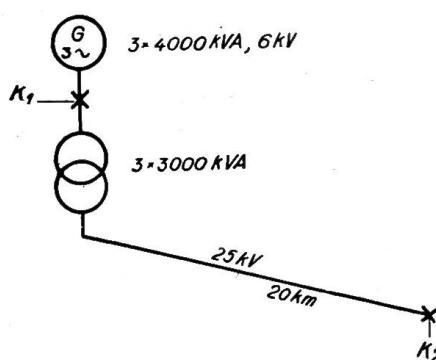


Fig. 4

Der Normalstrom beträgt

$$I_{\text{normal}} = \frac{3 \cdot 4000 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \cdot 6 \text{ kV}} = 1150 \text{ A.}$$

Der Anfangs- bzw. der Dauerkurzschlussstrom beträgt also:

$$I_{\text{ka}} = 6 \cdot 1150 = 6900 \text{ A,}$$

$$I_{\text{kd}} = 2 \cdot 1150 = 2300 \text{ A,}$$

und die Abschaltspannung bei Dauerkurzschluss

$$V_{\text{ad}} = 6 \frac{2300}{6900} = 2 \text{ kV.}$$

Damit ergeben sich die Abschaltleistungen bei plötzlicher Abschaltung und im Dauerkurzschluss zu

$$P_{\text{ka}} = 6900 \text{ A} \cdot 6 \text{ kV} \cdot \sqrt{3} = 72000 \text{ kVA,}$$

$$P_{\text{kd}} = 2300 \text{ A} \cdot 2 \text{ kV} \cdot \sqrt{3} = 8000 \text{ kVA.}$$

Berechnung für Kurzschlussstelle K_2 :

Annahmen: Kurzschlussspannung der Transformatoren 6/25 kV bei Normalstrom = 4 % der Netzspannung. Impedanz der 25 kV Leitung = 0,5 Ohm pro km und Phase.

Die Kurzschlussimpedanz des Netzes für die Kurzschlussstelle K_2 ergibt sich durch Serieschaltung der Impedanz von Stromerzeugern, Transformatoren und Leitung.

Alle Impedanzen werden auf 25 kV bezogen. Es betragen dann für die

Stromerzeuger:

$$z_a = \frac{(25 \text{ kV})^2}{6 \cdot 12000 \text{ kVA}} 1000 = 8,7 \text{ Ohm,}$$

$$z_d = \frac{(25 \text{ kV})^2}{2 \cdot 12000 \text{ kVA}} 1000 = 26 \text{ Ohm.}$$

Transformatoren:

$$m = \frac{100}{4\%} = 25$$

$$z = \frac{(25 \text{ kV})^2}{25 \cdot 9000 \text{ kVA}} 1000 = 2,8 \text{ Ohm.}$$

Leitung:

$$z = 20 \text{ km} \cdot 0,5 \text{ Ohm/km} = 10 \text{ Ohm.}$$

Die Netzimpedanzen für die Kurzschlussstelle K_2 werden also:

$$z_a = 8,7 + 2,8 + 10 = 21,5 \text{ Ohm,}$$

$$z_d = 26 + 2,8 + 10 = 38,8 \text{ Ohm,}$$

woraus sich die Kurzschlusströme ergeben zu

$$I_{\text{ka}} = \frac{25000 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 21,5 \text{ Ohm}} = 670 \text{ A,} \quad I_{\text{kd}} = \frac{25000 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 38,8 \text{ Ohm}} = 370 \text{ A.}$$

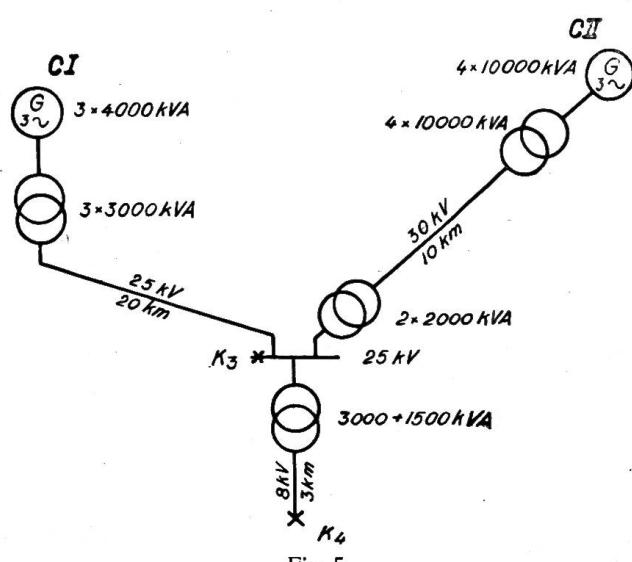


Fig. 5

CI = Kraftwerk I, CII = Kraftwerk II.

Die Abschaltspannung bei Dauerkurzschluss wird

$$V_{ad} = 25 \text{ kV} \cdot \frac{370 \text{ A}}{670 \text{ A}} = 13,8 \text{ kV}$$

und die Abschaltleistungen bei plötzlicher Abschaltung und im Dauerkurzschluss

$$P_{ka} = 670 \text{ A} \cdot 25 \text{ kV} \cdot \sqrt{3} = 29000 \text{ kVA},$$

$$P_{kd} = 370 \text{ A} \cdot 13,8 \text{ kV} \cdot \sqrt{3} = 8800 \text{ kVA}.$$

2. Beispiel.

Angenommen ist ein Dreiphasennetz nach Fig. 5, das durch Zusammenschluss des berechneten Netzes nach Fig. 4 mit einem weitern Netz entstanden sei.

Berechnung für Kurzschlussstelle K_3 :

Die Kurzschlussimpedanz des Netzteiles vom Kraftwerk I bis zur Kurzschlussstelle K_3 wurde im Beispiel I berechnet zu

$$z_a = 21,5 \text{ Ohm}; \quad z_d = 38,8 \text{ Ohm}.$$

Die Kurzschlussimpedanz des Netzteiles vom Kraftwerk II bis zur Kurzschlussstelle K_3 lässt sich berechnen zu:

$$z_a = 16,0 \text{ Ohm}; \quad z_d = 22,7 \text{ Ohm}.$$

Die beiden Netzteile liefern gleichzeitig, in Parallelschaltung, Strom auf die Kurzschlussstelle K_3 . In diesem Falle können die Kurzschlussimpedanzen beider Netzteile zusammengesetzt werden wie die Widerstände beliebiger paralleler Stromzweige. Auf diese Weise ergeben sich die Impedanzen für die Kurzschlussstelle K_3 zu:

$$z_a = \frac{1}{\frac{1}{21,5} + \frac{1}{16,0}} = 9,2 \text{ Ohm},$$

$$z_d = \frac{1}{\frac{1}{38,8} + \frac{1}{22,7}} = 14,3 \text{ Ohm}.$$

Daraus lassen sich die Kurschlusströme wie folgt berechnen:

$$I_{ka} = \frac{25000 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 9,2 \text{ Ohm}} = 1570 \text{ A},$$

$$I_{kd} = \frac{25000 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 14,3 \text{ Ohm}} = 1010 \text{ A}.$$

Die Abschaltspannung bei Dauerkurzschluss ist

$$V_{ad} = 25 \text{ kV} \cdot \frac{1010 \text{ A}}{1570 \text{ A}} = 16 \text{ kV}.$$

Die Abschaltleistungen bei plötzlicher Auslösung und im Dauerkurzschluss ergeben sich zu

$$P_{ka} = 1570 \text{ A} \cdot 25 \text{ kV} \cdot \sqrt{3} = 68000 \text{ kVA},$$

$$P_{kd} = 1010 \text{ A} \cdot 16 \text{ kV} \cdot \sqrt{3} = 28000 \text{ kVA}.$$

Berechnung für Kurzschlussstelle K₄:

Annahmen: Kurzschlussspannung beider Transformatoren von 3000 und 1500 kVA, $\epsilon = 5\%$; Leitung 8 kV, 0,25 Ohm pro km und Phase (Doppelleitung).

Die Rechnung sei auf 8 kV bezogen. Die Kurzschlussimpedanz an Stelle K₃ beträgt auf 8 kV umgerechnet

$$z_a = \left(\frac{8 \text{ kV}}{25 \text{ kV}}\right)^2 \cdot 9,2 \text{ Ohm} = 0,94 \text{ Ohm};$$

$$z_d = \left(\frac{8}{25}\right)^2 \cdot 14,3 \text{ Ohm} = 1,47 \text{ Ohm}.$$

Für die Transformatoren von $3000 + 1500 = 4500$ kVA ergibt sich

$$m = \frac{100}{5\%} = 20,$$

$$z = \frac{(8 \text{ kV})^2}{20 \cdot 4500 \text{ kVA}} \cdot 1000 = 0,71 \text{ Ohm},$$

und für die Leitung 8 kV

$$z = 3 \text{ km} \cdot 0,25 \text{ Ohm/km} = 0,75 \text{ Ohm}.$$

Die Impedanz an der Stelle K₃, diejenige der Transformatoren und der Leitung sind in Serie geschaltet, und es ergibt sich für die Kurzschlussstelle K₄ die totale Kurzschlussimpedanz zu

$$z_a = 0,94 + 0,71 + 0,75 = 2,4 \text{ Ohm}$$

$$z_d = 1,47 + 0,71 + 0,75 = 2,93 \text{ Ohm}.$$

Damit werden die Kurzschlussströme

$$I_{ka} = \frac{8000 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 2,4 \text{ Ohm}} = 1920 \text{ A},$$

$$I_{kd} = \frac{8000 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 2,93 \text{ Ohm}} = 1580 \text{ A}.$$

Die Abschaltung für Dauerkurzschluss ist

$$V_{ad} = 8 \text{ kV} \cdot \frac{1580 \text{ A}}{1920 \text{ A}} = 6,6 \text{ kV}.$$

Die Abschaltleistungen bei plötzlicher Auslösung und im Dauerkurzschluss ergeben sich zu

$$P_{ka} = 1920 \text{ A} \cdot 8 \text{ kV} \cdot \sqrt{3} = 26500 \text{ kVA},$$

$$P_{kd} = 1580 \text{ A} \cdot 6,6 \text{ kV} \cdot \sqrt{3} = 18000 \text{ kVA}.$$

3. Beispiel:

Berechnung der *Verteilung des Kurzschlussstromes* auf mehrere parallelarbeitende Netzteile.

Diese Berechnung ist für die Bestimmung der im Netz einzubauenden Schalter nicht notwendig. Sie kann aber dazu dienen, um bei aufgetretenen Kurzschlägen die stattgefundene Beanspruchung der einzelnen Netzteile und der darin eingeschalteten Apparate nachträglich zu bestimmen, womit erst das Verhalten dieser Apparate beurteilt werden kann.

Im zweiten Beispiel mit Kurzschluss in K_4 (siehe Fig. 5) ergaben sich die Kurzschlusströme, von 8 auf 25 kV umgerechnet, zu

$$I_{ka} = 1920 \text{ A} \cdot \frac{8 \text{ kV}}{25 \text{ kV}} = 615 \text{ A},$$

$$I_{kd} = 1580 \text{ A} \cdot \frac{8 \text{ kV}}{25 \text{ kV}} = 505 \text{ A}.$$

Es soll bestimmt werden, wie sich diese Ströme auf die beiden Stromzweige von Kraftwerk I und II verteilen.

Die Ströme verteilen sich umgekehrt proportional den Impedanzen der parallelen Netzteile, d. h. wenn $z_{res.}$ die gerechnete Impedanz im Knotenpunkt, und $z_1; z_2; z_3$ usw. die Impedanzen mehrerer Parallelzweige sind, wird

$$I_1 = I_{tot.} \cdot \frac{z_{result.}}{z_1} \quad I_2 = I_{tot.} \cdot \frac{z_{result.}}{z_2} \quad \text{usw.}$$

Im Beispiel 2 waren die Impedanzen am Knotenpunkt K_3 auf 25 kV bezogen:

für Netzteil von Kraftwerk I: $z_{aI} = 21,5$; $z_{dI} = 38,8 \text{ Ohm}$;

für Netzteil von Kraftwerk II: $z_{aII} = 16,0$; $z_{dII} = 22,7 \text{ Ohm}$;

für beide Zweige zusammen $z_{a,result.} = 9,2$; $z_{d,result.} = 14,3 \text{ Ohm}$.

Also ergibt sich für den Stromzweig I:

$$I_{kaI} = 615 \text{ A} \cdot \frac{9,2 \text{ Ohm}}{21,5 \text{ Ohm}} = 265 \text{ A}; \quad I_{kdI} = 505 \text{ A} \cdot \frac{14,3 \text{ Ohm}}{38,8 \text{ Ohm}} = 185 \text{ A},$$

und für den Stromkreis II:

$$I_{kaII} = 615 \text{ A} \cdot \frac{9,2 \text{ Ohm}}{16,0 \text{ Ohm}} = 350 \text{ A}; \quad I_{kdII} = 505 \text{ A} \cdot \frac{14,3 \text{ Ohm}}{22,7 \text{ Ohm}} = 320 \text{ A}.$$

Anmerkung zu den Beispielen:

Alle angeführten Beispiele beziehen sich auf einfach verzweigte Netze. Ringnetze werden zur Berechnung zuerst auf einfach verzweigte Netze zurückgeführt, was durch Umrechnung der Impedanz von je drei in Dreieck geordneten Leitern auf die entsprechende Sternschaltung stets möglich ist. Die Methode ist dieselbe wie bei der Berechnung von Netzen auf Spannungsabfall.

Die Methode ist dieselbe wie bei der Berechnung von Netzen auf Spannungsabfall.

d) Fälle, in welchen die Rechnung vereinfacht werden kann.

Die Abschaltspannung bei Dauerkurzschluss V_{ad} weicht von der Betriebsspannung V nur wenig ab in allen Fällen, wo der Kurzschlusstrom hauptsächlich durch die Impedanz von Leitungen oder Transformatoren und nicht durch die Generatoren begrenzt ist. Die Berechnung der Abschaltspannung

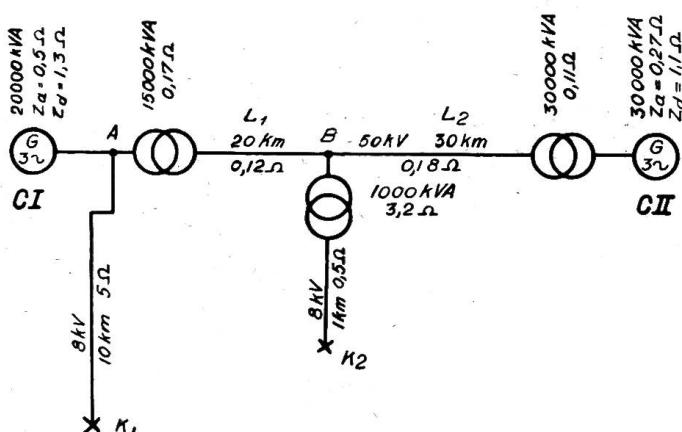


Fig. 6

CI = Kraftwerk I, CII = Kraftwerk II

kann deshalb weggelassen werden, wenn der Kurzschlusstrom für die einzelnen Generatoren nicht mehr als etwa den 1,5fachen Normalstrom erreicht.

Die Fälle, in welchen der Dauerkurzschlussstrom gleich dem Anfangskurzschlussstrom und die volle Spannung als Abschaltspannung gesetzt werden kann, sind meistens folgende: Die Endpunkte von Stichleitungen (unter 50 kV), welche an leistungsfähige Netze angeschlossen sind, ferner die ganzen Netze bzw. Stichleitungen, welche über Transformatoren aus Netzen grosser Leistung gespeist werden.

Als Beispiel dafür sei ein Netz nach Fig. 6 betrachtet, mit Kurzschlusspunkten in K_1 und K_2 .

Die eingeschriebenen Impedanzen beziehen sich alle auf 8 kV.

Berechnung für Kurzschlussstelle K_1 :

Die Impedanzen von Kraftwerk II bis Punkt A sind:

$$z_a = 0,27 + 0,11 + 0,18 + 0,12 = 0,17 = 0,85 \text{ Ohm},$$

$$z_d = 1,1 + 0,11 + 0,18 + 0,12 + 0,17 = 1,68 \text{ Ohm}.$$

Die resultierenden Impedanzen an Stelle A werden:

$$z_a = \frac{1}{\frac{1}{0,85} + \frac{1}{0,5}} = 0,315 \text{ Ohm},$$

$$z_d = \frac{1}{\frac{1}{1,68} + \frac{1}{1,3}} = 0,71 \text{ Ohm}.$$

Für die Kurzschlussstelle K_1 ergeben sich somit:

$$z_a = 0,315 + 5 = 5,315 \text{ Ohm}, \quad z_d = 0,71 + 5 = 5,71 \text{ Ohm}.$$

$$I_{ka} = \frac{8000 \text{ Volt}}{5,315 \text{ Ohm}} = 1500 \text{ A},$$

$$I_{kd} = \frac{8000 \text{ Volt}}{5,71 \text{ Ohm}} = 1400 \text{ A},$$

$$V_{ad} = 8 \text{ kV} \cdot \frac{1400 \text{ A}}{1500 \text{ A}} = 7,5 \text{ kV}.$$

Der Dauerkurzschlussstrom ist nur 7% kleiner als der Anfangs-Kurzschlussstrom, ebenso liegt die Abschaltspannung bei Dauerkurzschluss nur 7% unter der Betriebsspannung.

Berechnung für Kurzschlussstelle K_2 :

Die Impedanzen vom Kraftwerk I bis Punkt B sind:

$$z_a = 0,5 + 0,17 + 0,12 = 0,79 \text{ Ohm}, \quad z_d = 1,3 + 0,17 + 0,12 = 1,59 \text{ Ohm}.$$

Ebenso vom Kraftwerk II bis Punkt B:

$$z_a = 0,27 + 0,11 + 0,18 = 0,56 \text{ Ohm}, \quad z_d = 1,1 + 0,11 + 0,18 = 1,39 \text{ Ohm}.$$

Daraus ergeben sich die resultierenden Impedanzen für Punkt B zu:

$$z_a = \frac{1}{\frac{1}{0,79} + \frac{1}{0,56}} = 0,327 \text{ Ohm},$$

$$z_d = \frac{1}{\frac{1}{1,59} + \frac{1}{1,39}} = 0,74 \text{ Ohm}.$$

Für die Kurzschlussstelle K_2 ergeben sich somit:

$$z_a = 0,327 + 3,2 + 0,5 = 4,027 \text{ Ohm}, \quad z_d = 0,74 + 3,2 + 0,5 = 4,44 \text{ Ohm}.$$

$$I_{ka} = \frac{8000 \text{ V}}{4,027 \text{ Ohm}} = 1990 \text{ A},$$

$$I_{kd} = \frac{8000 \text{ V}}{4,44 \text{ Ohm}} = 1800 \text{ A},$$

$$V_{ad} = 8 \text{ kV} \cdot \frac{1800 \text{ A}}{1990 \text{ A}} = 7,2 \text{ kV}.$$

Im Dauerkurzschluss sind Strom und Spannung um 9,5% kleiner als bei Kurzschlussbeginn.

Für die Kurzschlusspunkte K_1 und K_2 ist der Kurzschlussverlauf also mit geringer Abweichung, so wie in Fig. 3 dargestellt.

Eine Vereinfachung der Rechnung ist ferner oft dadurch möglich, dass von vornherein *Netzpunkte mit auch bei Kurzschluss gleichbleibender Spannung* angenommen werden. Wird z. B. der betrachtete Kurzschluss über Transformatoren und Leitungen kleiner Leistung aus einem Netz grosser Leistung gespiesen, so wird während des Kurzschlusses die Spannung des speisenden Netzes nicht wesentlich sinken, da der für dasselbe verhältnismässig schwache Kurzschlusstrom nur eine unwesentliche Mehrbelastung darstellt. Ein solcher Anschlusspunkt unveränderter Spannung entsteht also bei Annahme unbegrenzter Leistung des speisenden Netzes in einem gewissen Punkte desselben konzentriert. Infolge dieser Annahme erübrigt sich die Nachrechnung der Impedanzen des ganzen, oft umfangreichen Netzes. Beim oben durchgerechneten Beispiel (Netz nach Fig. 6) fällt z. B. bei Dauerkurzschluss in K_1 die Spannung am Punkt A nur um 12,5%. Dieser Punkt kann also annähernd als Punkt gleichbleibender Spannung betrachtet werden. Aehnlich mit einem Fehler von 16% der Punkt B.

Die Annahme von Netzpunkten mit auch bei Kurzschluss gleichbleibender Spannung ist im besonderen auch zweckdienlich an Orten mit unbestimmter Leistung oder an Orten, wo die Entwicklung nicht überblickt werden kann, oder wo ein späterer Anschluss an bestehende oder neue Leitungsnetze in Frage kommen kann usw.

Für Kurzschlussrechnungen an Stichleitungen grosser Netze werden die Hauptknotenpunkte dieser Netze immer als Punkte konstanter Spannung zu betrachten sein.

e) Berücksichtigung von Stromverbrauchern bei Kurzschlussrechnungen.

An das kurzgeschlossene Netz angeschlossene Synchronmotoren oder Einankerumformer liefern gleich wie Generatoren einen Anteil an den Anfangskurzschlussstrom und wenn sie weiter angetrieben werden, auch an den Dauerkurzschlussstrom, sie sind deshalb als Stromerzeuger in gleicher Weise wie diese in der Rechnung zu berücksichtigen.

Asynchronmaschinen liefern im ersten Kurzschlussmoment einen Strom ähnlicher Grösse wie die Synchronmaschinen, derselbe klingt aber viel rascher ab, nach 0,05 Sekunden ist ihr Kurzschlusstrom schon auf zirka $1/5$ des Anfangswertes gesunken. Da ein Schalter auch bei Momentanauslösung für die Betätigung Zeiten in der genannten Grössenordnung braucht, ist also die Erhöhung des Abschaltstromes durch angeschlossene Asynchronmaschinen auch bei Momentanauslösung ohne Bedeutung für die Bestimmung des Abschaltstromes. Für die Beurteilung der elektrodynamischen Wirkungen ist jedoch der Stromstoss von Asynchronmaschinen zu berücksichtigen. Im Dauerkurzschluss liefern Asynchronmaschinen keinen Strom.

5. Ausrüstung von Schaltern mit Widerständen.

Die *Schutzwiderstände* (auch hochohmige Widerstände genannt) sollen die beim Ausschalten von leerlaufenden Transformatoren auftretenden Ueberspannungen und

die beim Einschalten entstehenden Ueberströme auf einen ungefährlichen Betrag vermindern. Ueber ihre Anwendung sind die Richtlinien des S. E. V. für Ueberspannungsschutz massgebend.

Die *Löschwiderstände* (auch niederohmige Widerstände genannt) beeinflussen den Abschaltvorgang derart, dass der Schalter bei gleichbleibendem Abschaltstrom für eine höhere Abschaltspannung verwendet werden kann. Da der zulässige Abschaltstrom von der Grösse der Abschaltspannung abhängig ist, kann aber auch umgekehrt bei gleichbleibender Abschaltspannung ein grösserer Strom abgeschaltet werden.

Die Löschwiderstände beeinflussen die Ueberspannungen nicht wesentlich und sind ihrer Wirkung entsprechend als ein Bestandteil des Schalters zu betrachten.

Der Anbau von Löschwiderständen kann umgangen werden durch Verwendung eines grösseren Schalters. Die Wahl zwischen diesen beiden Lösungen ist durch die Platz- und Preisverhältnisse bedingt. Wenn keine andern Gründe dagegen sprechen, sollten im Interesse der Einfachheit Widerstände vermieden werden.

Wirtschaftliche Mitteilungen. — Communications de nature économique.

Vom Bundesrat erteilte Stromausfuhrbewilligungen.

*Bewilligungen No. 72 und 73 vom 16. April 1924*¹⁾. Der Bundesrat erteilte den Nordostschweizerischen Kraftwerken A.-G. in Zürich-Baden die Bewilligung (No. 72), elektrische Energie aus ihren Anlagen an die Kraftübertragungswerke Rheinfelden A.-G. in Badisch-Rheinfelden auszuführen. Die Bewilligung ist gültig bis 30. September 1934.

Im Sommerhalbjahr (1. April bis 30. September), darf die ausgeführte Gesamtleistung in der Schaltanlage des Kraftwerkes Wyhlen gemessen, maximal 12 100 kW betragen. Die täglich ausgeführte Energiemenge darf maximal 290 400 kWh nicht überschreiten.

Im Winterhalbjahr (1. Oktober bis 31. März) darf die ausgeführte Gesamtleistung in der Schaltanlage des Kraftwerkes Wyhlen gemessen, maximal 11 550 kW betragen. Die täglich ausgeführte Energiemenge darf maximal 277 200 kWh nicht überschreiten.

Im Winterhalbjahr haben die N. O. K. die Energieausfuhr, sofern es die Wasserverhältnisse erfordern, von sich aus bis auf etwa 14 % d. h. bis auf eine Leistung von 1650 kW und eine Energiemenge von 39 600 kWh pro Tag einzuschränken. Eine solche Einschränkung kann auch jederzeit vom eidgenössischen Departement des Innern verfügt werden, ohne dass die N. O. K. dem Bunde gegenüber einen Anspruch auf irgendwelche Entschädigung erheben können.

Die N. O. K. sind verpflichtet, alle auf behördliche Verfügung hin oder aus irgend einem andern Grunde gegenüber ihren schweizerischen Verbrauchern durchgeführten Sparmassnahmen in mindestens gleichem Umfange auch ihren ausländischen Bezügern aufzuerlegen.

Die Frage, ob das Expropriationsrecht für den Leitungsbau erteilt werden kann, wird durch die Erteilung der Bewilligung No. 72 in keiner Weise präjudiziert.

Die künftige Gesetzgebung bleibt vorbehalten.

Der Bundesrat hat den Bernischen Kraftwerken A.-G. in Bern (B. K. W.), dem Kraftwerk Laufenburg

in Laufenburg und den Nordostschweizerischen Kraftwerken A.-G. in Zürich-Baden (N. O. K.), gemeinsam die Bewilligung No. 73 erteilt, elektrische Energie ins Elsass, an die Gesellschaften „Forces motrices du Haut-Rhin S. A.“, in Mülhausen und „Electricité de Strasbourg S. A.“, in Strassburg auszuführen.

Gemäss einer Vereinbarung unter den Werken wurde der Anteil der einzelnen Werke an den zur Ausfuhr bewilligten maximalen Leistungen und Energiemengen wie folgt festgesetzt: B. K. W.: 23 500 kW (468 000 kWh täglich), Kraftwerk Laufenburg: 10 000 kW (wovon 2500 kW konstant; 240 000 kWh täglich) und N. O. K.: 11 000 kW (264 000 kWh täglich).

Im Winterhalbjahr können folgende Einschränkungen durch das Departement des Innern verfügt werden; B. K. W. auf minimal 10 000 kW und 80 000 kWh pro Tag, Kraftwerk Laufenburg auf minimal 0 kW, N. O. K. auf minimal 4000 kW und 96 000 kWh pro Tag. Im übrigen wurden im Interesse der Inlandsversorgung schützende Bestimmungen an die Bewilligung geknüpft.

Beim Anteil der B. K. W. handelt es sich um die Erhöhung einer bisher zur Ausfuhr bewilligten Quote, wobei auch die Vertragsbedingungen Abänderungen erfuhrten; beim Anteil des Kraftwerkes Laufenburg wird eine provisorische Regelung durch eine definitive ersetzt; beim Anteil der N. O. K. handelt es sich um eine neu zur Ausfuhr bewilligte Quote. Mit der Erteilung der Bewilligung No. 73 fallen daher die Bewilligungen No. 60 sowie die provisorischen Bewilligungen P 16 und P 18 dahin.

Die Bewilligung No. 73 tritt sofort in Kraft; sie wurde vorläufig mit Gültigkeit bis 31. März 1930 erteilt.

Die Frage, ob das Expropriationsrecht für den Leitungsbau erteilt werden kann, wird durch die Erteilung der Bewilligung No. 73 nicht präjudiziert. — Die Entscheidung über die noch nicht erledigten Einsprachen durch das eidgenössische Departement des Innern bleibt vorbehalten. — Die künftige Gesetzgebung bleibt vorbehalten.

¹⁾ Bundesblatt No. 17, Seite 715.