Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 38 (1947)

Heft: 26

Artikel: Einführung zu den Regeln und Leitsätzen für die Koordination der Isolationsfestigkeit in Wechselstrom-Hochspannungsanlagen

Autor: Wanger, W.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1061463

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: 06.01.2026

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

SCHWEIZERISCHER ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

BULLETIN

REDAKTION:
Sekretariat des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Zürich 8, Seefeldstrasse 301

ADMINISTRATION:
Zürich, Stauffacherquai 36 ◆ Telephon 23 77 44
Postcheckkonto VIII 8481

Nachdruck von Text oder Figuren ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit Quellenangabe gestattet

38. Jahrgang Nr. 26 Samstag, 27. Dezember 1947

Einführung zu den Regeln und Leitsätzen für die Koordination der Isolationsfestigkeit in Wechselstrom-Hochspannungsanlagen

Von *W. Wanger*, Baden

621.316.93 : 621.313.048

*Der Autor, Präsident des Fachkollegiums 28 des Schweizerischen Elektrotechnischen Komitees (CES), Koordination der Isolationen, erläutert die Grundsätze, auf denen der Entwurf der Regeln für die Koordination der Isolationsfestigkeit in Wechselstrom-Hochspannungsanlagen basiert und zeigt die technischen und wirtschaftlichen Auswirkungen dieser Regeln *).*

L'auteur, président du Comité Technique n° 28 du Comité Electrotechnique Suisse (CES), coordination des isolements, explique les principes de la coordination sur lesquels est basé le projet de Règles pour la coordination des isolements dans les installations à courant alternatif à haute tension, ainsi que des répercussions techniques et économiques de ces règles.

Allgemeines

Die Koordination der Isolationen in elektrischen Anlagen ist ein Problem, das in verschiedenen Ländern seit mehreren Jahren intensiv studiert wird. Bereits vor Kriegsausbruch nahm es die «Commission Electrotechnique Internationale» auf den Antrag der Schweiz in ihr Arbeitsprogramm auf. Der Krieg verhinderte dann allerdings die internationale Zusammenarbeit; dafür wurden diese Fragen in einzelnen Ländern weiter verfolgt.

In der Schweiz wurde am 1. Mai 1941 ein Komitee zum Studium der Koordination der Isolationen, das Fachkollegium 28 des CES, gebildet. Dieses Komitee hat in sehr intensiver Arbeit — wobei auch ausgedehnte Versuche in 8 schweizerischen Hochspannungslaboratorien durchgeführt wurden — alle Fragen innerhalb dreier Jahre gründlich untersucht und Regeln für die Koordination der Isolationen ausgearbeitet. Diese Materie interessiert noch eine ganze Reihe anderer Fachkollegien, denn die Koordinationsregeln haben ja den Zweck, eine aufeinander abgestimmte Isolation von sämtlichem Hochspannungsmaterial sicherzustellen. Am 17. Mai 1944 wurden daher alle Fachkollegien, die sich mit Hochspannungsmaterial befassen, zu einer Tagung eingeladen, an der der damalige Entwurf der Koordinationsregeln — er stimmte übrigens dem Inhalt nach sehr weitgehend mit dem heutigen Entwurf überein — besprochen wurde.

In der Folge haben dann die einzelnen Fachkollegien die sie betreffenden Fragen studiert und allerlei Aenderungen angeregt. Auf gewissen Gebieten gingen die verschiedenen Wünsche anfänglich sehr weit auseinander. Nun war es die Aufgabe des FK 28, alle Fragen derart abzuklären, dass man sich gegenseitig verständigen konnte. So ist der heute vorliegende Entwurf der «Regeln und Leitsätze für die Koordination der Isolationsfestigkeit in Wechselstrom-Hochspannungsanlagen» entstanden. Er enthält vorläufig nur die Abschnitte über das Stationsmaterial und die Kabel. Die Abschnitte über die Freileitungen sind gegenwärtig noch im Studium und sollen später beigefügt werden.

Im folgenden soll nun gezeigt werden, auf welchen Grundlagen die Koordinationsregeln basieren und wie die einzelnen Vorschriften entstanden sind [1]).

Was versteht man eigentlich unter der Koordination der Isolationen? Man versteht darunter die Gesamtheit aller Massnahmen, die ergriffen werden, um in elektrischen Anlagen Durchschläge infolge von Ueberspannungen zu verhindern, Ueberschläge möglichst weitgehend ebenfalls zu verhindern, und, soweit das mit wirtschaftlichen Mitteln nicht erreicht werden kann, die unvermeidlichen Ueberschläge auf Stellen zu beschränken, an denen sie womöglich keinen Schaden anrichten und den Betrieb nicht stören. Für die Ableitung der hohen Ueberspannungen, die sich irgendwo entladen müssen, werden am vorteilhaftesten Ueberspannungsableiter verwendet. Man denkt daher bei der «Koordination» in erster Linie an die Ableiter; tatsächlich erstreckt sich aber das Gebiet sehr viel weiter.

Zur «Koordination» gehört nämlich auch die ganze Frage der Isolationshöhe, sowohl für das Material der Stationen, als auch für die Freileitungen und Kabel. Einerseits muss bei der Wahl der Isolationsfestigkeit der richtige Kompromiss getroffen werden, damit möglichst wenig Betriebsstörungen auftreten und die Anlagen doch nicht zu

*) Siehe Seite 869.

[1]) Der Aufsatz lehnt sich an den Vortrag an, den der Verfasser am 17. Mai 1944 an der Tagung der verschiedenen Fachkollegien des CES gehalten hat.

kostspielig werden, anderseits müssen die Isolationen verschiedener Anlageteile so gegeneinander abgestuft werden, dass die unvermeidlichen Entladungen an den gewünschten Stellen erfolgen.

Man wird vielleicht einwenden, dass man sich schon seit 50 oder mehr Jahren bemühte, die Betriebstörungen in zulässigen Grenzen zu halten, und dabei nicht mehr als nötig für die Isolation aufwendete. Das Problem ist also altbekannt, und man könnte sich wundern, warum diese Fragen seit einigen Jahren so intensiv studiert werden.

Dazu ist nun zu sagen, dass zwar die mehr empirische Methode der Isolationsauswahl, die bisher angewendet wurde, im allgemeinen zu durchaus brauchbaren Resultaten geführt hat, dass uns aber die Erforschung der Ueberspannungen doch die Möglichkeit gibt, allerlei besser zu machen, als es früher gemacht wurde. Die verschiedenartigen Isolationen verhalten sich gegenüber den verschiedenen Ueberspannungsarten ganz ungleich. Man muss daher zuerst wissen, welche Ueberspannungsart für die Bemessung einer Isolation massgebend ist, bevor man die richtige Isolationshöhe festlegen kann. Ferner lassen sich durch eine zweckmässige Isolations*abstufung*, die bis vor wenigen Jahren nicht oder nur sehr unvollständig durchgeführt wurde, noch bedeutende Verbesserungen erzielen. Alle diese Fragen sind unter dem Stichwort «Koordination der Isolationen» zusammengefasst und seit etwas mehr als 10 Jahren eingehend studiert worden. Es handelt sich heute darum, aus dieser Forschungsarbeit den grösstmöglichen Nutzen für den Betrieb der elektrischen Netze zu ziehen.

Ueberspannungen

Da man mit der Koordination der Isolationen die Auswirkungen der Ueberspannungen bekämpfen will, muss man sich zu allererst über das Wesen der in den Netzen vorkommenden Ueberspannungen klar werden. Nach den Regeln des SEV über genormte Werte der Spannungen, Frequenzen und Ströme (Publ. Nr. 159) darf die maximale Betriebspannung von Hochspannungsanlagen höchstens 15 % über der Nennspannung liegen. Alle kurzzeitigen Spannungssteigerungen, die diese Grenze überschreiten, sind als Ueberspannungen zu betrachten.

Eigentliche

betriebsfrequente Ueberspannungen,

d. h. Erhöhungen der Betriebspannung über den dauernd zulässigen Wert hinaus, entstehen vor allem bei der Abschaltung von Wirk- und Blindlast, besonders ausgeprägt, wenn lange Leitungen im Spiel sind. Durch moderne Spannungs-Schnellregler kann ein Teil dieser Ueberspannungen am Entstehen verhindert, ein anderer Teil sehr rasch wieder ausgeglichen werden. So kommt es, dass man bei der Isolationsbemessung in den meisten Fällen überhaupt nicht auf die betriebsfrequenten Ueberspannungen Rücksicht nehmen muss, da sie ohne Schwierigkeit wesentlich kleiner gehalten werden können als die andern Ueberspannungsarten.

Unter

Schaltüberspannungen

versteht man mittel- bis hochfrequente gedämpfte Schwingungen der Spannung, die beim Einschalten und vor allem beim Ausschalten entstehen. Beim Abschalten von Kurzschlüssen sind die Ueberspannungen harmloser als beim Abschalten von leerlaufenden Transformatoren oder Leitungen. Aber auch in den beiden letzten Fällen lassen sich die Ueberspannungen mit wirtschaftlichen Mitteln und ohne Inkaufnahme anderer Nachteile auf etwa den 2- bis 2,5fachen Wert der Betriebspannung begrenzen.

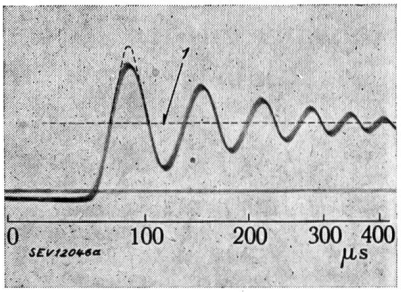
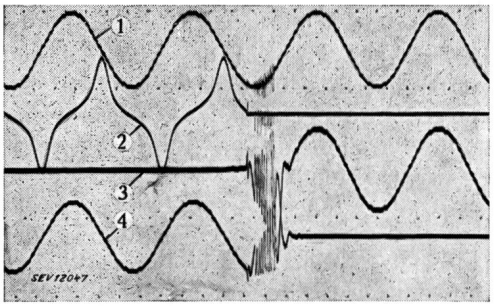


Fig. 1
Kathodenstrahloszillogramm der wiederkehrenden Spannung bei einer Kurzschlussabschaltung
1 betriebsfrequenter Scheitelwert

Fig. 1...5 zeigen einige Beispiele von Schaltüberspannungen. Fig. 1 ist das Kathodenstrahloszillogramm der wiederkehrenden Spannung nach der Abschaltung eines Kurzschlusses. Ausgehend vom relativ kleinen Wert der Lichtbogenspannung muss die Spannung nach der Unterbrechung des Stromes auf den betriebsfrequenten Scheitelwert übergehen, der durch eine gestrichelte Horizontale



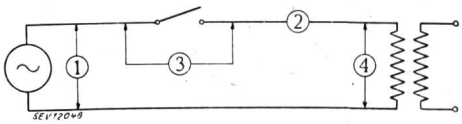


Fig. 2
Schleifenoszillogramm, aufgenommen bei der Abschaltung eines leerlaufenden Transformators
1 Spannung am Generator
2 Leerlaufstrom des Transformators
3 Spannung über dem Schalter
4 Spannung am Transformator

dargestellt ist. Der Uebergang erfolgt durch eine hochfrequente Schwingung, die relativ rasch abklingt. Wäre die Schwingung vollständig ungedämpft, so würde die Spannung nach der gestrichelten Sinuslinie verlaufen, wobei ein maximaler

Ausschlag erreicht würde, der rund doppelt so gross wäre wie der betriebsfrequente Scheitelwert. Infolge der Dämpfung wird der Maximalwert der Schwingung wesentlich reduziert.

Fig. 2 zeigt das Schleifenoszillogramm von der Abschaltung eines leerlaufenden Transformators. Nach der Unterbrechung des Stromes erscheint die wiederkehrende Spannung über dem geöffneten Schalter. Diese Spannung steigt aber nur bis zu einem

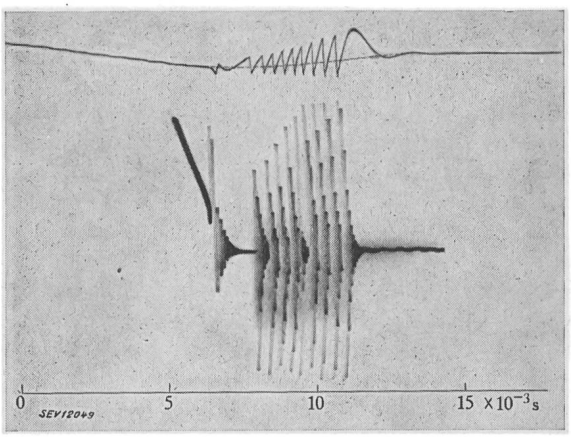


Fig. 3
Kathodenoszillogramm, aufgenommen bei der Abschaltung eines leerlaufenden Transformators
oben: Spannung am Transformator
unten: abgeschalteter Strom
Bemerkung: Diese Oszillogramme sind beim gleichen Versuch aufgenommen worden wie die Kurven der Fig. 2

bestimmten Wert an, worauf sie infolge Rückzündung zwischen den Schalterkontakten zusammenbricht. Von jetzt an fliesst wieder ein Strom. Nach kurzer Zeit wird dieser von neuem unterbrochen. Das ganze Spiel wiederholt sich mehrmals bis zur endgültigen Unterbrechung des Stromes.

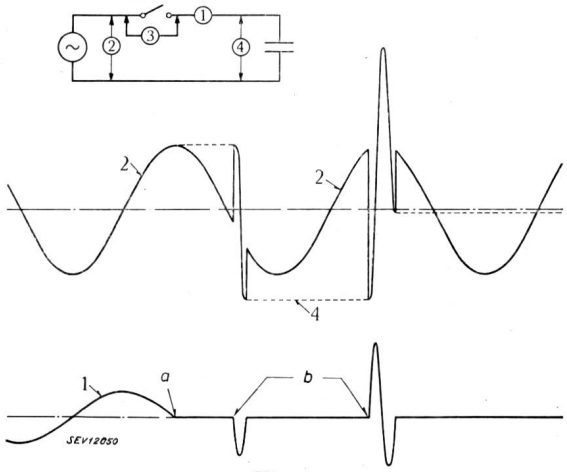


Fig. 4
Abschaltung einer Kapazität
1 abgeschalteter Strom
2 Spannung am Generator
3 Spannung über dem Schalter = Differenz von 2 und 4
4 Spannung an der Kapazität
a Löschung
b Rückzündung

Die Vorgänge sind in einem Kathodenstrahloszillogramm noch viel klarer ersichtlich. In Fig. 3 wird daher ein solches gezeigt. Es ist nichts anderes als ein vergrösserter Ausschnitt aus den Kurven von Fig. 2. Hier sieht man deutlich, wie bei jeder Rückzündung des Stromes eine Schwingung auftritt, die aber sehr rasch abklingt. Die Spannung am Transformator beschreibt eine sägezahnförmige Kurve. Die Maximalwerte der Spannung, die dabei erreicht werden, hängen sehr weitgehend von den Eigenschaften des verwendeten Schalters ab. Die Spannung über dem Schalter steigt nämlich gerade so weit an, bis sie genügt, um die Schaltstrecke zu durchschlagen. Dadurch bricht dann die Spannung zusammen; der Schalter begrenzt sich also die Ueberspannungen selber.

Wesentlich anders sind die Vorgänge beim Abschalten einer leerlaufenden Leitung oder einer Kapazität (Fig. 4). Der Kapazitätsstrom erlischt zum ersten Mal bei einem natürlichen Nulldurchgang, d. i. in einem Moment, wo die Spannung ihr Maximum hat. Die Spannung auf der Generatorseite (Kurve *2*) verläuft nun weiter nach einer Sinuslinie, die Spannung an der Kapazität (Kurve *4*) behält dagegen von jetzt an ihren Wert unverändert bei (in der Fig. durch eine gestrichelte horizontale Gerade angedeutet). Dadurch entsteht über dem geöffneten Schalter eine Spannungsdifferenz, und wenn diese einen bestimmten Wert erreicht, findet eine Rückzündung statt. Es erfolgt eine Schwingung des Stromes, die nach kurzer

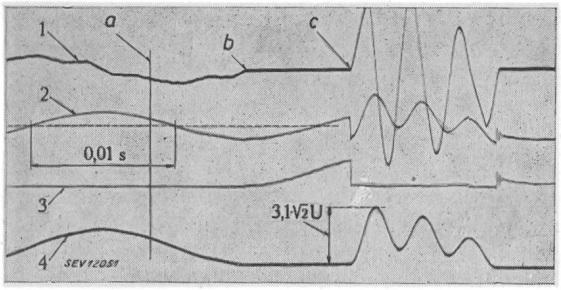


Fig. 5
Schleifenoszillogramm, aufgenommen bei der Abschaltung einer Kapazität mit einem Oelschalter
1 abgeschalteter Strom
2 Spannung am Generator
3 Spannung über dem Schalter
4 Spannung an der Kapazität
a Kontakttrennung
b Löschung
c Rückzündung

Zeit wieder verschwindet. Nun wiederholt sich das Spiel, wobei jedoch eine grössere Spannungsdifferenz nötig ist, um wieder eine Rückzündung einzuleiten, da sich unterdessen die elektrische Festigkeit zwischen den Schalterkontakten erhöht hat.

Dass diese theoretisch erwarteten Vorgänge tatsächlich vorkommen können, zeigt Fig. 5, die ein Oszillogramm von der Abschaltung einer Kapazität mit einem Oelschalter darstellt. Nach der erstmaligen Löschung des Lichtbogens läuft die Spannung am Generator (Kurve *2*) nach der Sinuslinie weiter, die Spannung an der Kapazität bleibt tatsächlich konstant (Kurve *4*), und die Spannung über dem Schalter steigt nach Kurve *3* an. Wenn diese einen bestimmten Wert erreicht hat, erfolgt eine Rückzündung, gefolgt von einer Schwingung des Stromes und einem ziemlich heftigen Sprung der Span-

nung an der Kapazität. Diese Rückzündungen mit ihren Ueberspannungen können vollständig vermieden werden, wenn man einen Schalter wählt, dessen Isolationsfestigkeit zwischen den geöffneten Kontakten genügend rasch ansteigt. Sie muss nämlich rascher zunehmen als die nach der ersten Unterbrechung des Stromes erscheinende Spannungsdifferenz über dem Schalter.

Eine weitere Sorte von Ueberspannungen stellen die

Erdschlussüberspannungen

dar. Am gefährlichsten sind die intermittierenden Erdschlüsse, die theoretisch zu sehr hohen Ueberspannungen führen können. Es scheint aber, dass die Bedingungen, die zum Entstehen intermittierender Erdschlüsse nötig wären, in den Netzen nur sehr selten vorkommen. Beispielsweise sind bei ausgedehnten Versuchen, die die FKH im Netz der BKW durchführte, überhaupt nie intermittierende Erdschlüsse aufgetreten. Auf alle Fälle lassen sich aber diese durch Verwendung von Löschspulen oder durch feste Erdung des Sternpunktes mit Sicherheit vermeiden. Unter diesen Umständen überschreiten die Erdschlussüberspannungen — wie theoretische Untersuchungen zeigen und durch Versuche bestätigt wurde — den 2fachen Wert der verketteten Betriebspannung nicht.

Bei der Wahl der Isolationen gilt nun als Prinzip, dass die bisher erwähnten Ueberspannungsarten weder zu Durchschlägen noch zu Ueberschlägen führen dürfen. Auch die Ueberspannungsableiter sollen in der Regel nicht darauf ansprechen. Da alle diese Ueberspannungen irgendwie von der Betriebspannung abhängig sind, müssen die Stationen und Freileitungen um so höher isoliert werden, je höher die Betriebspannung ist. Das scheint durchaus logisch und ist auch wirtschaftlich gesehen in Ordnung.

Im Gegensatz dazu sind die

atmosphärischen Ueberspannungen

nicht von der Betriebspannung abhängig. Da sie meistens auf den Freileitungen entstehen — sei es durch direkte Blitzeinschläge, sei es als induzierte Spannungen bei Blitzschlägen in der Nähe —, so wollen wir zuerst die Verhältnisse auf den Leitungen betrachten. Aus wirtschaftlichen Gründen kann man selbstverständlich nicht alle Leitungen ohne Rücksicht auf die Betriebspannung gleich hoch isolieren und muss daher in Kauf nehmen, dass Leitungen niedrigerer Spannung mehr Blitzstörungen erleiden als solche höherer Spannung. Das ist aber durchaus tragbar, da jene Leitungen im allgemeinen weniger wichtig sind als diese.

Im übrigen verringert man die durch atmosphärische Ueberspannungen verursachten Störungen, indem man bei den kleinen und mittleren Hochspannungen häufig Holzstangen verwendet, die man zur Verbesserung der Stossisolation heranzieht, und bei den sehr hohen Spannungen ausgedehnten Gebrauch von Erdseilen macht. Die Erdseile fangen die meisten direkten Blitzschläge ab, so dass die Polleiter in der Regel nicht getroffen werden. Man muss dann nur noch dafür sorgen, dass der Spannungsabfall in den Masten bei der Ableitung keinen Rücküberschlag von einem Mast zu den Polleitern verursacht. Man muss daher den Erdwiderstand der Masten genügend tief halten und eine entsprechend hohe Leiterisolation wählen. Bei Spannungen von etwa 220 kV und mehr ist es wirtschaftlich möglich, die Isolation so hoch zu bemessen, dass praktisch keine Rücküberschläge vorkommen, dass die Leitungen also praktisch blitzsicher sind.

In den Stationen kommen normalerweise keine direkten Blitzschläge in die spannungführenden Teile vor, wenn bei Innenraumanlagen ein guter Gebäudeblitzschutz und bei Freiluftanlagen eine zweckmässige Abschirmung nach oben und aussen vorhanden ist. Die atmosphärischen Ueberspannungen gelangen in diesem Fall nur auf den Freileitungen in die Station hinein. Ihre Höhe ist daher durch die Stossisolation der Freileitungen begrenzt. Tritt auf einer Freileitung eine höhere Ueberspannung auf, so überschlägt die Leitung, und es gelangt nur die abgeschnittene Stosswelle, deren Scheitelwert durch die Stossüberschlagspannung der Leitung gegeben ist, in die Station.

Grundsätzliches zur Koordination der Isolationsfestigkeit

Man könnte nun daran denken, die ganze Station wesentlich höher zu isolieren als die angeschlossenen Leitungen, damit in den Stationen überhaupt keine Ueberschläge vorkommen. Das lässt sich aber praktisch nicht durchführen. Durch Reflexionen in den Stationen können nämlich die einlaufenden Ueberspannungswellen bis auf das Doppelte erhöht werden; man müsste daher die Stationen ausserordentlich viel höher isolieren als heute üblich, was natürlich aus wirtschaftlichen Gründen ausgeschlossen ist. Ebenso wenig ist es möglich, die heute übliche Isolation der Stationen beizubehalten und die Freileitungen soviel schwächer zu isolieren, dass die in die Station einlaufenden Ueberspannungswellen dort keine Ueberschläge verursachen; man bekäme auf diese Art viel zu viel Störungen auf den Freileitungen.

Der Ausweg aus dieser Schwierigkeit besteht nun darin, dass man in den Stationen die sogenannten schwachen Stellen schafft, an denen die unvermeidlichen Entladungen stattfinden können, ohne Schaden anzurichten und den Betrieb zu stören. Man kann dann die Isolation der Freileitungen unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Gesichtspunkte so hoch wie möglich wählen, damit dort möglichst wenig Störungen vorkommen, und die Isolation der Stationen ohne Rücksicht auf die Isolation der Leitungen festlegen. Man verzichtet also bewusst auf die Isolationsabstufung zwischen Leitung und Station und führt statt dessen eine

Isolationsabstufung innerhalb der Station

ein. Ueberschläge (oder genauer gesagt: Entladungen) in der Station werden auf diese Art nicht vermieden, aber harmlos gemacht.

Als sogenannte schwache Stellen in den Anlagen eignen sich am besten Ueberspannungsableiter. Moderne Ableiter mit spannungsabhängigen Widerständen haben eine sehr günstige Stosscharakteristik; sie stellen während der Dauer einer Ueberspannung eine leitende Verbindung mit der Erde her, wobei sie die Ueberspannung auf ungefährliche Werte begrenzen, ohne einen Kurzschluss zu bilden, und sie unterbrechen nach Ableitung der Ueberspannung die Verbindung zur Erde automatisch wieder. Statt Ableiter können auch Schutzfunkenstrecken die schwache Stelle bilden, wobei allerdings zu beachten ist, dass ihre Stosscharakteristik ungünstiger ist, und dass sie zum mindesten bei mehrpoligem Ansprechen in der Regel nicht von selber löschen.

Solange die schwachen Stellen richtig ansprechen, schützen sie die ganze übrige Isolation der Anlage. Wenn sie aber aus irgendeinem Grund einmal versagen, besteht die Gefahr, dass gerade ein besonders wichtiger oder wertvoller Teil der Anlage beschädigt wird. Es könnte z. B. im Innern eines Transformators ein Durchschlag stattfinden. Zweifellos ist aber ein äusserer Ueberschlag immer noch harmloser, wenn schon irgendwo eine Entladung stattfinden muss. Es empfiehlt sich daher, auch noch die äussere und innere Isolation der Anlage gegeneinander abzustufen, um nicht ganz allein auf das gute Funktionieren der Ableiter oder Schutzfunkenstrecken angewiesen zu sein.

Man kommt so dazu, die Isolationen einer Anlage in 3 Gruppen mit verschiedener elektrischer Festigkeit einzuteilen, man schafft — wie man das nennt —

3 verschiedene Isolationsniveaus.

Das höchste Niveau, d. h. die Isolationsgruppe mit der höchsten elektrischen Festigkeit, umfasst alle *innern Isolationen*, das mittlere Niveau *die äussern Isolationen* und das tiefste Niveau die *Ueberspannungsableiter* oder Schutzfunkenstrecken. In Fig. 6 sind die 3 Niveaus mit ihren verschiedenen Isolationsfestigkeiten schematisch dargestellt:

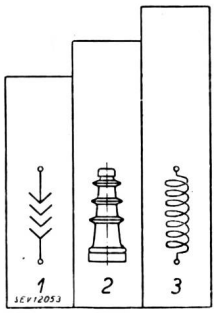


Fig. 6
Schematische Darstellung der 3 Isolationsniveaus einer elektrischen Anlage

1 Schutzniveau
2 Aeussere Isolation
3 Innere Isolation

Links ist das tiefste Niveau mit Ableitern oder Schutzfunkenstrecken. In der Mitte folgt das mittlere Niveau mit der äusseren Isolation, die rein schematisch durch einen Isolator dargestellt ist; es gehören aber selbstverständlich auch noch andere Luftstrecken des Hochspannungsmaterials zur äusseren Isolation. Schliesslich ist rechts das höchste Niveau mit der inneren Isolation schematisch durch eine Wicklung dargestellt.

Es scheint vorteilhaft, nicht nur alle festen und flüssigen Isolationen als eigentliche innere Isolationen ins

höchste Niveau

einzureihen, sondern auch die geöffneten Unterbrechungsstellen von Trennern, Leistungstrennern, Schaltern und Sicherungshaltern, schwer zugängliche Luftstrecken im Innern von Apparaten, Isolatoren, usw., sowie alle freien Luftdistanzen zwischen verschiedenen Polleitern; dies in der Meinung, dass nicht nur Durchschläge, sondern auch Ueberschläge an den genannten Stellen zu vermeiden seien. Zum mittleren Isolationsniveau gehören dann nur die freien Luftstrecken zwischen Polleiter und Erde (unter Ausschluss der schwer zugänglichen Luftstrecken).

Innerhalb des höchsten Isolationsniveaus soll keine weitere Abstufung der Ueberschlag- und Durchschlagspannungen vorgeschrieben werden, da dort überhaupt keine Ueberschläge und Durchschläge vorkommen sollen. Um das zu erreichen, hat man ja das höchste Niveau als Ganzes gegen das mittlere und weiter gegen das tiefste Niveau abgestuft. Freilich könnte man noch mehr Unterteilungen vornehmen, indem man z. B. Durchführungen stärker baut als Stützisolatoren, Sammelschienen höher isoliert als Abzweige usw., aber man muss sich klar sein, dass die Erhöhung der Anzahl Isolationsniveaus schwere wirtschaftliche Konsequenzen hat. Geht man von einer bestimmten Isolationsfestigkeit des untersten Niveaus aus, so wird die Isolation des obersten um so höher, je mehr Niveaus vorhanden sind, wodurch die Anlage stark verteuert wird; denn gerade die Isolation des höchsten Niveaus (nämlich die innere Isolation der Transformatoren, Maschinen, Apparate) beeinflusst ja die Anlagekosten besonders stark.

Die Koordinationsregeln sehen daher als Normallösung 3 Isolationsniveaus (einschliesslich der Ueberspannungsableiter) vor. Mehr als 3 Niveaus sollen aus wirtschaftlichen Gründen nicht gewählt werden. Nur 2 Niveaus scheinen dagegen im allgemeinen ungenügend, weil man dabei ganz allein auf das restlos richtige Funktionieren der Ableiter oder Schutzfunkenstrecken angewiesen wäre. In besondern Fällen mag es allerdings hie und da vorteilhaft sein, nur 2 Niveaus anzuwenden. Wenn man z. B. in Anlagen sehr hoher Spannung aus Kostengründen keine Ableiter einbauen will, kann man auch auf die Verwendung von Schutzfunkenstrecken verzichten. Natürlich wird die Sicherheit der Isolationsabstufung verringert, wenn die Anlage nur das mittlere und höchste Niveau enthält, dafür wird aber die Wahrscheinlichkeit, dass Ueberschläge überhaupt vermieden werden können, grösser, wenn die Schutzfunkenstrecken mit ihrer tiefern Ueberschlagspannung weggelassen werden.

Neben der grundsätzlichen Frage der Zahl der Isolationsniveaus sind noch einige Einzelheiten zu besprechen, die für die Isolationsabstufung von grosser Bedeutung sind. Beginnen wir mit den

Funkenstrecken im mittlern Niveau,

den sog. Sicherheitsfunkenstrecken. Die geforderte Isolationsfestigkeit des mittleren Niveaus darf an keiner Stelle unterschritten werden, weil es sonst durch die Ableiter nicht mehr geschützt würde. Dagegen genügt es, wenn nur einige wenige Stellen vorhanden sind, die eine Ueberschreitung der verlangten Isolationsfestigkeit verhindern. Praktisch werden zur Begrenzung nach oben immer Funkenhörner (oder ähnliche an den Isolatoren angebrachte Elektroden) verwendet; die gemachte Feststellung bedeutet also, dass es nicht nötig ist, sämtliche Isolatoren einer Anlage mit Hörnern auszurüsten, sondern nur einzelne.

Man kann nun diese Hörner an den Isolatoren des Hochspannungsmaterials selber, d. h. an den Transformatoren, Schaltern usw., anbringen. Das hat den Vorteil, dass ihre Einstellung durch einen Versuch in den Werkstätten des Fabrikanten kontrolliert und das Material als Ganzes unverändert an den Aufstellungsort gebracht werden kann. Man hat auf diese Art die beste Gewähr, dass die Hörner die innere Isolation des betreffenden Materials wirklich schützen.

Man kann aber auch am Material selber keine Hörner anbringen und dafür andere Isolatoren der Anlage, die sich in unmittelbarer Nähe des zu schützenden Materials befinden, mit Hörnern versehen. Die Abstufung zwischen Hörnern und innerer Isolation ist allerdings in diesem Fall nicht so sicher; denn einzelne Isolatoren (mit oder ohne Hörner) können ihre Stossüberschlagspannung je nach der Aufstellungsart wesentlich ändern. Fig. 7 gibt hiefür ein Beispiel.

Das Fachkomitee 28 beabsichtigte ursprünglich, die Funkenstrecken, die das mittlere Isolationsniveau darstellen sollten, zu normen und dafür Eichtabellen aufzustellen, so dass man in jedem Fall dieser Tabelle hätte entnehmen können, welche Schlagweite einzustellen sei, um eine bestimmte Ueberschlagspannung zu erhalten. Es zeigte sich aber, dass die Ueberschlagstoßspannung von Funkenstrecken üblicher Bauart viel zu sehr von der Aufstellungsart abhängt (z. B. von der Einbauhöhe über dem Boden, wie Fig. 7 zeigt,

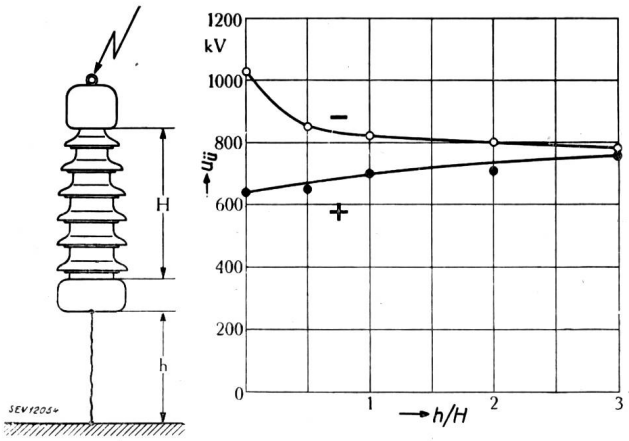


Fig. 7
50-%-Ueberschlagstoßspannung eines Stützisolators bei der Normalwelle 1|50 μs in Funktion des Abstandes vom Erdboden

aber auch vom Abstand von den benachbarten Polen, von den Zellenwänden usw.). Um von diesen Einflüssen unabhängig zu sein, müsste man den Funkenstrecken ausserordentlich grosse Aussenabmessungen geben, d. h. eine riesig grosse Grundplatte, sehr grosse Abstände von den Zellenwänden, von den andern Polleitern usw. Solche Funkenstrecken haben aber in Anlagen mit üblichen Abmessungen bei weitem nicht Platz. Ausserdem ist die Streuung der Ueberschlagstoßspannung selbst bei ganz eindeutiger Aufstellungsart noch sehr gross, ein Punkt, auf den wir später zurückkommen werden.

Nachdem aus diesen Gründen die Normung einer Anlagefunkenstrecke mit zugehöriger Eichtabelle unmöglich ist, bietet die Aufstellung der Funkenstrecken des mittleren Niveaus *neben* dem Material nur noch den Vorteil, dass unvermeidliche Ueberschläge möglichst nicht am Material selber eingeleitet werden. Beim Innenraummaterial, wo man für die Isolationsabstufung nur ganz kleine Hörner verwendet, sind trotzdem auch Ueberschläge an den Isolatoren selber möglich. Wollte man das vermeiden, so müsste man viel grössere Isolatoren, ähnlich wie beim Freiluftmaterial, verwenden, was natürlich aus wirtschaftlichen Gründen nicht in Betracht kommt.

Im übrigen darf nicht übersehen werden, dass Ueberschläge im mittleren Niveau überhaupt nur auftreten, wenn ein Ableiter oder eine Schutzfunkenstrecke versagt. In diesen seltenen Fällen ist es vor allem wichtig, innere Durchschläge zu vermeiden, so dass man wohl besser einen äusseren Ueberschlag, z.B. an einer Transformatorenklemme, in Kauf nimmt, als dass man durch daneben aufgestellte Funkenhörner mit unrichtiger oder ungenauer Einstellung die innere Isolation gefährdet. Aus diesen Gründen dürfte es sich empfehlen, normalerweise die Funkenhörner am Hochspannungsmaterial selber anzubringen, das Material — wie man sagt — in sich zu koordinieren und nur in Sonderfällen die Hörner an besonderen Isolatoren anzuordnen.

Für den

Einbau der Ableiter

gilt der Grundsatz, dass in erster Linie dort Ableiter vorzusehen sind, wo die atmosphärischen Ueberspannungen herkommen, also bei jeder ankommenden und abgehenden Freileitung, und zwar auf der Leitungsseite der Schalter. Diese Ableiter schützen alles dahinter liegende Material gegen die *direkten* einlaufenden Ueberspannungswellen. Es kann aber eine Welle durch Reflexionen in der Anlage erhöht werden und dadurch zu einem Ueberschlag führen, wenn der nächste Ableiter zu weit von der Reflexionsstelle entfernt ist. Daher müssen in räumlich sehr ausgedehnten Stationen ausser den Ableitern beim Freileitungseintritt noch weitere an den Sammelschienen angeschlossen werden.

Wird das tiefste Isolationsniveau durch Schutzfunkenstrecken gebildet, so gelten für ihren Einbau

die gleichen Richtlinien wie für die Aufstellung der Ableiter.

Durch Oeffnen von Schaltern oder Trennern können gewisse Teile einer Station vom Rest abgetrennt werden, und es stellt sich die Frage, ob alle diese abgetrennten Teile die 3 Isolationsniveaus enthalten müssen. Sofern sie in metallischer Verbindung mit einer Freileitung stehen, muss diese Frage unbedingt bejaht werden. Ist dies dagegen nicht der Fall, so scheint es auch nicht nötig, in jedem dieser abtrennbaren Teile Ueberspannungsableiter oder besondere Schutzfunkenstrecken aufzustellen.

Dagegen ist es zweckmässig, in allen abtrennbaren Teilen — gleichgültig, ob sie mit Freileitungen verbunden sind oder nicht — die Abstufung zwischen dem mittleren und höchsten Niveau vorzusehen, damit auch in dem Fall, wo durch irgendeinen Fehler eine atmosphärische Ueberspannung auf den abgetrennten Teil übergreift, die innere Isolation geschützt wird. Diese Abstufung in jedem abtrennbaren Teil ist automatisch vorhanden, wenn alles Hochspannungsmaterial in sich koordiniert wird.

Bei der Durchführung der Isolationsabstufung in den Anlagen spielt die

Streuung der Ueberschlagstoßspannung

eine eminent wichtige Rolle. Das FK 28 hat daher seinerzeit 8 Firmen und Institutionen veranlasst, ausgedehnte Stoßspannungsmessungen an Stabfunkenstrecken durchzuführen. Wenn auch Funkenhörner an Isolatoren oder andere Ueberschlagstrecken in Luft nicht genau die gleichen Streuungsverhältnisse aufweisen, so liegt nun doch ein ausserordentlich vielseitiges Material über die grundsätzliche Seite des Problems vor. Die Messergebnisse sind im Bulletin SEV veröffentlicht worden [1] [2]; so braucht man hier nicht auf Einzelheiten einzugehen, sondern kann sich mit der Angabe des Endresultates begnügen.

Das wichtigste Ergebnis ist, dass eine ausserordentlich grosse Streuung festgestellt wurde. Wollte man, dass sich die Streubänder der Ueberschlagspannung von 2 benachbarten Isolationsniveaus nicht überlappen, so müssten die mittleren Ueberschlagspannungen sehr weit auseinanderliegen. Die (mittlere) Ueberschlagstoßspannung des mittleren Isolationsniveaus müsste z. B. rund doppelt so gross sein wie die (mittlere) Ansprechspannung der Ableiter, und die Prüfspannung des höchsten Niveaus müsste dann nochmals mindestens $1^1/_2$mal so gross sein wie die Ueberschlagspannung des mittleren Niveaus.

Dass dies aus wirtschaftlichen Gründen unmöglich ist, liegt auf der Hand, und es bleibt gar nichts anderes übrig, als sich mit kleineren Stufenhöhen zu begnügen und eine gewisse

Ueberlappung der Streubänder

in Kauf zu nehmen. Mit anderen Worten: eine Isolationsabstufung mit hundertprozentiger Sicherheit ist nicht möglich. Die Abstufung wird zu einer Wahrscheinlichkeits-Angelegenheit; die Fragestellung lautet jetzt: Ist die Wahrscheinlichkeit für einen Ueberschlag im unrichtigen Niveau genügend klein?

Diese Frage ist sehr eingehend untersucht worden, und es ist hierüber eine Veröffentlichung erschienen [2]. Die in den Koordinationsregeln vorgesehenen Stufenhöhen führen zu Versager-Wahrscheinlichkeiten, die höchstens einige Prozent bis zu Bruchteilen von einem Prozent betragen. Zugegeben, ein Ueberschlag im falschen Niveau ist auch unangenehm, wenn er nur selten zu erwarten ist. Aber man darf nicht vergessen, dass 2 Abstufungen vorhanden sind, die eine zwischen dem tiefsten und dem mittleren, die andere zwischen dem mittleren und dem höchsten Niveau. Wenn in seltenen Fällen die eine Abstufung versagt, so ist immer noch die andere vorhanden, so dass das Unglück nicht so gross ist. Es ist aber wohl nötig, besonders zu betonen, dass es keine *absolute* Sicherheit der Isolationsabstufung gibt; denn am Anfang rechnete man tatsächlich damit, obwohl ja eine solche absolute Sicherheit sonst überhaupt nirgends zu finden ist.

Die Stufenhöhen,

die die genannten Versager-Wahrscheinlichkeiten ergeben und die nach der Meinung des FK 28 auch wirtschaftlich tragbar sind, sind folgende: Die Ansprech- und Restspannung der Ueberspannungsableiter (oder Schutzfunkenstrecken) muss mindestens 25 % unter der Ueberschlagstoßspannung des mittleren Isolationsniveaus und die Prüfspannung [3]) des höchsten Niveaus 15 % darüber liegen. Die obere Stufe konnte aus 2 Gründen wesentlich niedriger gewählt werden als die untere: Erstens liegen die Isolationen des mittleren und höchsten Niveaus immer unmittelbar nebeneinander, während die Ableiter (d. h. das tiefste Niveau) manchmal Teile des mittleren Niveaus in einiger Entfernung zu schützen haben, weshalb mit Rücksicht auf steile Wellen eine grössere Stufenhöhe erforderlich ist. Zweitens kann verlangt werden, dass das mittlere und höchste Niveau immer miteinander geprüft werden, wodurch die grosse Streuung der Ueberschlagspannung zum Teil eliminiert wird.

Diese gleichzeitige Prüfung hat überdies noch verschiedene andere Vorteile. Bei vollständig unabhängiger Messung der 3 Isolationsniveaus müsste das mittlere nach oben und unten begrenzt werden, damit die richtige Abstufung gegen das höchste und tiefste Niveau gewährleistet wird. Eine solche Vorschrift wäre sehr unangenehm, weil für die Ueberschlagspannung des mittleren Niveaus eine bestimmte Bandbreite festgelegt werden müsste, deren Wahl auf alle Fälle willkürlich wäre. Diese Schwierigkeit lässt sich vollständig umgehen, wenn man das mittlere und höchste Niveau gleichzeitig prüft. Man braucht dann für das mittlere Niveau nur einen Mindestwert der Ueberschlagspannung

[2]) siehe Literaturverzeichnis am Schluss.

[3]) Prüfung mit abgeschnittenem Stoss, s. u.

vorzuschreiben, um die richtige Abstufung gegen die Ableiter sicherzustellen, und im weiteren zu verlangen, dass bei der gleichzeitigen Stossprüfung des mittleren und höchsten Niveaus dieses nicht überschlägt und nicht durchschlägt, wenn die Spannung so hoch ist, dass das mittlere Niveau jedesmal überschlägt; dadurch ist dann auch die zweite Abstufung gewährleistet.

Bei der Abnahmeprüfung werden also nicht die 50-%-Ueberschlagspannungen des mittleren und höchsten Niveaus einzeln gemessen, sondern es wird durch gemeinsame Prüfung beider Niveaus direkt kontrolliert, ob die richtige Abstufung vorhanden ist. In der Regel genügt es, dabei Spannungsstösse zu verwenden, die 15 % höher sind als die 50-%-Ueberschlagspannung des mittleren Niveaus, um zu erreichen, dass dieses Niveau bei jedem Stoss überschlägt. Wenn bei dieser Prüfung keine Ueberschläge und keine Durchschläge im höchsten Niveau erfolgen, ist der Nachweis der richtigen Abstufung erbracht.

Eine besondere Schwierigkeit bei der Isolationsabstufung entsteht noch dadurch, dass die Ueberschlagspannungen im allgemeinen bei

positivem und negativem Stoss

nicht gleich sind. Die Abstufung muss aber selbstverständlich bei beiden Polaritäten richtig sein. Die Stützisolatoren, die in den Stationen ein sehr wichtiges Bauelement darstellen, haben normalerweise bei negativem Stoss eine wesentlich höhere Ueberschlagspannung als bei positivem. Sofern man im tiefsten Isolationsniveau Schutzfunkenstrecken verwendet, könnte man daran denken — der Vorschlag ist von *Rump* gemacht worden —, diesen ähnliche Eigenschaften zu geben. Das ist möglich, indem man den Funkenstrecken grundsätzlich die Form einer spannungführenden Spitze gegenüber einer geerdeten Platte gibt. Dagegen lässt sich dieser Polaritätsunterschied im höchsten Isolationsniveau nicht erreichen; denn bei der innern Isolation kann die Polaritätsabhängigkeit kaum willkürlich beeinflusst werden. Wenn zufällig die negative Ueberschlag- oder Durchschlagspannung höher ist als die positive, so stimmt die Spekulation; es kann aber ebensogut auch umgekehrt sein, und meistens ist der Polaritätseinfluss überhaupt relativ gering.

Ferner lässt sich der gewollte Polaritätseinfluss nicht auf die Ueberspannungsableiter ausdehnen. Sowohl die Rest- als auch die Ansprechspannung sind bei positivem und negativem Stoss mehr oder weniger gleich gross. Wenn nun aber das tiefste Niveau (Ableiter) und das höchste Niveau (innere Isolation) wenig polaritätsabhängig sind, so sind die grossen Polaritätsunterschiede beim mittleren Niveau sehr störend. Da die Ueberschlagspannungen des mittleren Niveaus bei beiden Polaritäten zwischen denen der beiden äusseren Niveaus liegen müssen, werden diese auseinandergedrängt (vgl. Fig. 8). Es ist daher sehr zu begrüssen, dass es mit relativ einfachen Mitteln möglich ist, die positive und negative Ueberschlagspannung des mittleren Niveaus (Stützer, Durchführungen usw.) einander weitgehend anzunähern; man erhält so die wirtschaftlichsten Anlagen.

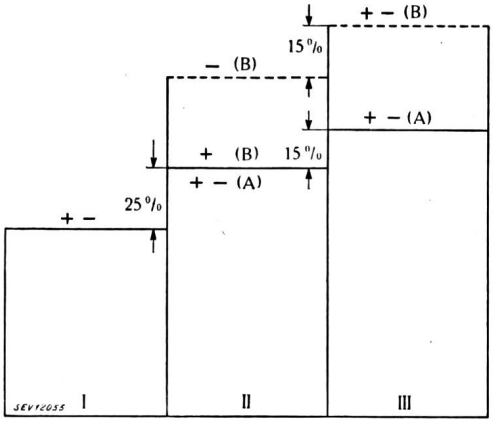


Fig. 8
Abstufung zwischen Ableiter (I), äusserer (II) und innerer (III) Isolation des Hochspannungsmaterials
Es ist angenommen, dass das tiefste Niveau (I) und das höchste Niveau (III) polaritätsunabhängige Isolationsfestigkeit aufweisen. Das mittlere Niveau (II) ist im Fall A ebenfalls polaritätsunabhängig, während im Fall B die negative Stossüberschlagspannung wesentlich höher ist als die positive. Obwohl in *beiden* Fällen die Abstufung zwischen Niveau I und II 25 % und zwischen II und III 15 % beträgt, muss die Isolationsfestigkeit des Niveaus III im Fall B wesentlich höher gemacht werden als im Fall A.

Die Koordinationsregeln tragen dieser Möglichkeit dadurch Rechnung, dass sie für die positive und negative Ueberschlagspannung des mittleren Niveaus die gleichen Mindestwerte vorschreiben. Es steht dem Konstrukteur natürlich frei, z. B. die negative Ueberschlagspannung höher zu machen, aber dann muss auch die innere Isolation entsprechend höher gewählt werden, damit die Abstufung stimmt. Die bereits erwähnte Vorschrift, dass das mittlere und höchste Niveau miteinander geprüft werden müssen, wirkt sich auch hier sehr günstig aus, indem sie dem Konstrukteur möglichste Freiheit lässt und doch dafür sorgt, dass die Abstufung richtig ist.

Im Zusammenhang mit der Isolationsabstufung muss noch etwas über

Schutzkapazitäten

gesagt werden. Man ist vielleicht überrascht, diese nicht wie die Ableiter — vielleicht sogar als Ersatz dafür — in einem bestimmten Niveau vorzufinden. Tatsächlich bilden aber die Kapazitäten (d. h. Kondensatoren oder Kabel) kein Schutzniveau, da sie die Ueberspannungen nicht auf eine bestimmte Höhe begrenzen. Sie dienen vielmehr zur Ergänzung und Verbesserung des Ueberspannungsschutzes, indem sie die einlaufenden Ueberspannungswellen vor allem abflachen und dadurch die Durchführung einer wirksamen Isolationsabstufung erleichtern.

Wie bereits angedeutet, wird die

Isolationsabstufung nur für Stoßspannungen

durchgeführt, da sie nur gegenüber atmosphärischen Ueberspannungen wirksam sein muss. Der

Vollständigkeit halber sei noch rasch gesagt, was eine Stoßspannung ist: eine kurzdauernde Ueberspannung einheitlicher Polarität, die rasch auf ihren Scheitelwert ansteigt und nachher wieder ge-

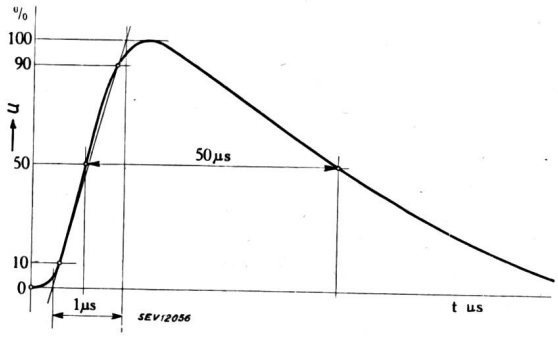


Fig. 9
Genormter Spannungsstoss (1|50 µs)

gen null abfällt. Der genormte Spannungsstoss 1|50 µs (Fig. 9), mit dem die meisten Versuche durchgeführt werden, hat eine Stirn- oder Frontdauer von 1 µs und eine Halbwertdauer, d. h. eine zeitliche Länge in der halben Höhe des Scheitelwertes, von 50 µs. Man sieht, dass die Stoßspannungen, wie eben allgemein die atmosphärischen Ueberspannungen, sehr kurzzeitige Vorgänge sind; ihre Dauer beziffert sich immer nach einigen Mikrosekunden, d. h. Millionstelssekunden.

Absolute Höhe der Stoßspannungsfestigkeit

Nachdem wir nun die Isolationsabstufung durchgeführt haben, bleibt uns noch die Aufgabe, die absolute Höhe der Isolationsfestigkeit festzulegen. Dieses Problem ist in erster Linie wirtschaftlicher Natur. Man muss so hoch isolieren, dass keine zu häufigen Störungen auftreten, aber man wird die Anforderungen nicht höher schrauben als unbedingt nötig, da sonst die Anlagen zu teuer werden. Was ist nun aber nötig, damit Störungen genügend selten bleiben? Wir haben eingangs diese Frage von der theoretischen Seite her betrachtet. Noch viel wichtiger als theoretische Ueberlegungen scheinen jedoch die Betriebserfahrungen zu sein.

Auch das FK 28 hat das Problem in erster Linie von dieser Seite her angepackt, d. h. es hat untersucht, welche Werte der Isolationsfestigkeit in elektrischen Anlagen praktisch angewendet werden und was für Erfahrungen dabei im Betrieb gemacht worden sind. In der Schweiz hat man schon seit sehr langer Zeit die Mindestanforderungen der REH [4]) eingehalten. Ursprünglich enthielten diese keine Vorschrift über die Stoßspannungsfestigkeit, sondern schrieben z. B. für die Stationsisolatoren neben einer Mindestschlagweite lediglich eine Prüfspannung U_p bei Industriefrequenz nach der bekannten Formel

$$U_p = 2{,}2\ U_n + 20\ kV \qquad (U_n \text{ Nennspannung})$$

vor und verlangten, dass die Ueberschlagspannung mindestens 10 % über dem Wert der Prüfspannung liege. Dabei waren diese Anforderungen bei Freiluftmaterial unter Regen einzuhalten. Später kamen dann noch Vorschriften über die Stoßspannungsfestigkeit dazu; aber schon durch die Bestimmungen über die Prüf- und Ueberschlagspannung bei Industriefrequenz wurden die Abmessungen der Isolatoren mehr oder weniger festgelegt, so dass auch die Stossfestigkeit des in unsern Anlagen verwendeten Materials gegeben war.

Nun hat ein Teil der schweizerischen Werke grundsätzlich nur Material mit diesen Minimalanforderungen verwendet und damit durchaus zufriedenstellende Betriebserfahrungen gemacht. Das gleiche gilt auch für verschiedene andere Länder. Gewisse schweizerische Werke stellen dagegen die Anforderungen höher und verlangen bis zu Betriebspannungen von etwa 50 kV höhere Isolationsfestigkeiten. Sie verwenden z. B. bei 10 kV eine Isolation, die sonst erst bei 20 kV verlangt wird, oder bei 45...50 kV eine solche, die sonst erst bei 60 kV vorgesehen wird, usw.

So hat man also in der Schweiz langjährige praktische Erfahrungen mit zwei verschiedenen Isolationsgraden. Dabei sind die Anhänger der schwächern Isolation der Ansicht, dass diese im Betrieb durchaus befriedige, und die Vertreter der stärkern Isolation finden, dass es wirtschaftlich gerechtfertigt sei, für die Isolation etwas mehr aufzuwenden, weil dann die Störungen durch Ueberspannungen noch etwas seltener würden als bei Verwendung der schwächern Isolation. Die Frage hängt sehr weitgehend auch mit den Ueberspannungsableitern zusammen, worauf noch zurückzukommen sein wird. Jedenfalls haben es das FK 28, sowie die FKH und mehrere andere Fachkollegien für richtig gefunden, den beiden verschiedenen Ansichten dadurch Rechnung zu tragen, dass in den Regeln und Leitsätzen für die Koordination der Isolationsfestigkeit zwei verschiedene Isolationsgrade vorgesehen werden, zwischen denen die Ersteller der Anlagen wählen können.

Wir werden später noch genauer auf diese Frage eingehen, wollen uns aber vorerst einmal ausschliesslich mit den Anlagen vom Isolationsgrad I befassen. Im Wesentlichen sehen die Koordinationsregeln für den Isolationsgrad I diejenige Isolationsfestigkeit vor, die in den schwächer isolierten schweizerischen Anlagen bisher verwendet wurde und die nach Ansicht der dafür verantwortlichen Betriebsleute im allgemeinen befriedigt hat. Das Prinzip der Isolationsabstufung und andere Gründe haben jedoch gegenüber der bisherigen Praxis zu einigen Aenderungen geführt, die im folgenden kurz besprochen werden sollen.

Zunächst sind für die Ueberschlagstoßspannungen des mittleren Niveaus bei Innenraum- und Freiluftmaterial die gleichen Mindestwerte vorgeschrieben worden. Das schien richtig, da bei zweckmässiger Abschirmung der Anlagen gegen direkte Blitzschläge Freiluftmaterial keinen höhern atmosphärischen Ueberspannungen ausgesetzt ist als Innenraummaterial.

[4]) REH: Regeln für Wechselstrom-Hochspannungsgeräte des VDE (Verband Deutscher Elektrotechniker), VDE 0670.

Sodann ist für sehr hohe Betriebspannungen (110 kV und mehr) der Mindestwert der Ueberschlagstoßspannung im mittleren Niveau erhöht worden. Diese Verbesserung ist möglich, ohne das Material zu verteuern. Man pflegte nämlich bisher bei den hohen Spannungen die Hörner, die die Ueberschlagspannung begrenzen, relativ eng einzustellen. Nun ist aber die Isolatorhöhe durch die vorgeschriebene Spannungsprüfung bei Industriefrequenz unter Regen festgelegt, und es ist zweckmässig, diese ohnehin vorhandene Isolatorgrösse durch Auseinanderziehen der Hörner etwas besser auszunützen; man erhält auf diese Art ohne Verteuerung des Materials eine höhere Ueberschlagsfestigkeit. Die innere Isolation braucht deswegen nicht erhöht zu werden. Denn bisher verwendete man stark polaritätsabhängige Funkenstrecken und musste die innere Festigkeit der hohen negativen Ueberschlagspannung anpassen, während man bei Ueberspannungen positiver Polarität doch nur mit einer wesentlich kleinern Ueberschlagspannung rechnen konnte. Verwendet man nun eine Funkenstrecke, die bei beiden Polaritäten eine so hohe Ueberschlagspannung hat wie früher bei negativer Polarität, so genügt die gleiche innere Isolation wie früher, aber der Mindestwert der Ueberschlagspannung im mittleren Niveau ist bedeutend höher als bisher.

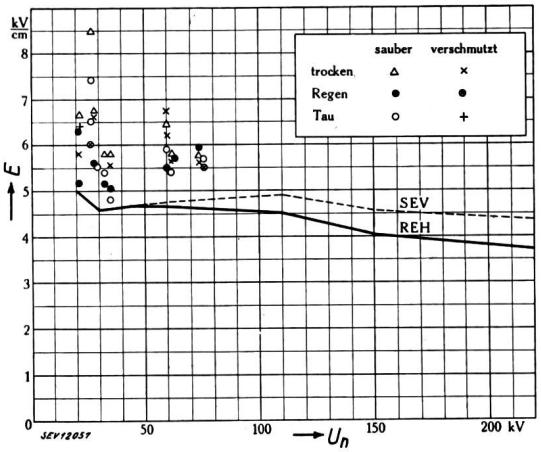


Fig. 10

Spannungsgradienten *(E)* längs Freiluftisolatoren (von Armatur zu Armatur) im Moment, wo zwischen den Hörnern (Sicherheitsfunkenstrecken) die 50-%-Ueberschlagspannung bei positivem genormten Stoss (1|50 μs) erreicht wird, in Funktion der Nennspannung (U_n)

REH: Isolatoren und Sicherheitsfunkenstrecken mit Mindestschlagweiten nach REH.

SEV: Isolatoren mit Mindestschlagweiten nach REH, Funkenhörner so eingestellt, dass gerade der Mindestwert der Stossüberschlagspannung nach den Koordinationsregeln erreicht wird.

Einzelne Punkte: Gemessene Ueberschlaggradienten längs Freiluftisolatoren (ohne Hörner) in trockenem, beregnetem und taubebedecktem Zustand, sauber und verschmutzt.

Fig. 10 zeigt, wie sich die Erhöhung der Ueberschlagspannung zwischen den Hörnern (mittleres Niveau) auf die längs der Isolatoroberfläche möglichen Spannungsgradienten auswirkt.. Als Abszisse ist die Nennspannung aufgetragen. Die Ordinate gibt für Freiluftisolatoren den Spannungsgradienten an, der längs einem Isolator in dem Moment vorhanden ist, wo zwischen den Hörnern die 50-%-Ueberschlagstoßspannung erreicht wird. Die dick ausgezogene, mit REH bezeichnete Kurve zeigt, dass dieser durch die Hörner begrenzte Spannungsgradient beim bisher gebräuchlichen Material für die höchsten Spannungen bedeutend kleiner ist als für die mittlern und tiefen Spannungen. Bei Befolgung der Koordinationsregeln werden dagegen die Hörner unter Belassung der Isolatorhöhe etwas weiter eingestellt und dadurch der längs dem Isolator mögliche Spannungsgradient etwas erhöht, wie die mit SEV bezeichnete, gestrichelte Kurve zeigt.

Die Hörner haben bekanntlich den Zweck, die Stossüberschlagspannung auf einen eindeutigen, vom Zustand der Isolatoroberfläche unabhängigen Wert einzustellen. Die Isolatoren dürfen also nicht längs der Oberfläche überschlagen, bevor ein Ueberschlag zwischen den Hörnern erfolgt. Um abzuklären, ob diese Forderung erfüllt ist, sind in Fig. 10 noch eine Anzahl Messwerte von Stossüberschlaggradienten längs Freiluftisolatoren bei verschiedenen Feuchtigkeits- und Verschmutzungszuständen aufgetragen. Diese Punkte liegen alle oberhalb der Kurven. Trotz der etwas erhöhten Schlagweite der Hörner (bei der SEV-Kurve) ist also nicht zu erwarten, dass bei der in der Schweiz normalerweise vorkommenden Verschmutzung ein Ueberschlag längs der Oberfläche von Freiluftisolatoren erfolgt. Unter Ausnützung der neuen Erkenntnisse kann ein solcher Ueberschlag längs der Oberfläche sogar mit grösserer Sicherheit vermieden werden als bisher. Denn bei den bis jetzt üblichen polaritätsabhängigen Funkenstrecken liegt die REH-Kurve für *negativen* Stoss meistens noch merklich oberhalb der SEV-Kurve in Fig. 10, während polaritätsunabhängige Funkenstrecken erlauben, die SEV-Kurve bei positivem und negativem Stoss einzuhalten.

Alle bis jetzt gemachten Bemerkungen beziehen sich auf das mittlere Isolationsniveau. Die Koordinationsregeln verlangen nun, wie bereits erwähnt, dass die geöffneten Unterbrechungsstellen von Schaltern, sowie sämtliche Abstände zwischen ver-
verschiedenen Feuchtigkeits- und Verschmutzungswerden. Sie dürfen also nicht überschlagen, sondern es muss vorher ein Ueberschlag nach Erde erfolgen. Diese Forderung ist beim Freiluftmaterial mit den bisher üblichen Schlagweiten zwischen den Polen und über die Trennstrecken ohne weiteres erfüllt; beim Innenraummaterial müssen dagegen die Polabstände und Trennstrecken etwas grösser gemacht werden als bisher; der Unterschied ist aber nicht gross.

Gewisse ausländische Vorschriften schreiben für die Isolatoren des Freiluftmaterials nach Entfernung der Hörner eine erhöhte Ueberschlagstoßspannung vor. Damit soll erreicht werden, dass die Isolatoren auch in verschmutztem Zustand noch eine Ueberschlagstoßspannung haben, die genügend hoch über derjenigen der Funkenhörner liegt. Das FK 28 hat keine solche Vorschrift aufgenommen, einerseits, weil es keine Prüfung einführen wollte,

bei der sich das Material in einem andern Zustand befindet als in der Anlage, anderseits, weil sich diese Prüfung bei Material mit Wicklungen nicht durchführen lässt. Die Wicklungen, die diese erhöhte Isolationsfestigkeit nicht brauchen und folglich auch nicht haben, würden bei einer solchen Prüfung gefährdet. Die Koordinationsregeln begnügen sich mit der Regenprüfung bei Industriefrequenz, die ebenfalls eine gewisse Gewähr für genügend hohe Ueberschlagspannung der verschmutzten Isolatoren bietet. Dabei ist diese Prüfung deswegen schärfer, weil sich die industriefrequente Ueberschlagspannung bei gleichem Regen oder gleicher Verschmutzung mehr reduziert als die Ueberschlagstoßspannung.

Nachdem wir bei der Festlegung der Stoßspannungsfestigkeit vom praktisch bewährten Material ausgegangen sind und dann daran verschiedene Aenderungen vorgenommen haben, ist es nun interessant, zu sehen, wie dieses Material die im Abschnitt «Ueberspannungen» aufgestellten theoretischen Forderungen erfüllt. In Fig. 11 ist als Kurve *1* der Mindestwert der 50-%-Ueberschlagstoßspannung des Materials aufgetragen, und zwar als Vielfaches vom Scheitelwert der verketteten Nennspannung. Bei den kleinen Nennspannungen ist dieser Wert, den man Sicherheitsfaktor nennen könnte, sehr gross — bis über 8 hinaus — und fällt bei den höhern Spannungen bis fast auf den Wert 3 hinunter. Die Höchstwerte der Ansprech- und Restspannungen der Ableiter oder Schutzfunkenstrecken sind durch Kurve *2* dargestellt.

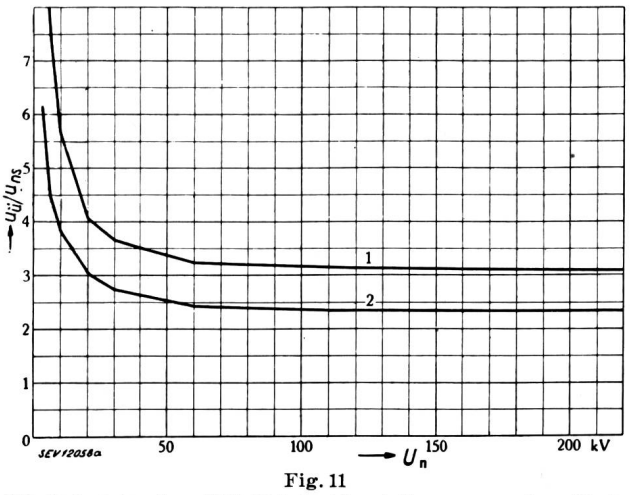


Fig. 11

Mindestwerte der 50-%-Ueberschlagstoßspannung des Hochspannungsmaterials (*1*), sowie Höchstwerte der Rest- und 50-%-Ansprechspannung der Ableiter und Schutzfunkenstrecken (*2*) bei Anwendung von Isolationsgrad I nach dem Entwurf der Koordinationsregeln, bezogen auf den Scheitelwert der verketteten Nennspannung ($u_ü / u_{ns}$)
Abszisse: Nennspannung (U_n)

Der Sicherheitsfaktor ist bei den kleineren Betriebspannungen — etwa von 30 kV an abwärts — so hoch, weil man mit Rücksicht auf die atmosphärischen Ueberspannungen die Isolationsfestigkeit nicht einfach proportional mit der Betriebspannung verkleinern darf, damit nicht allzu häufige Ueberschläge entstehen. Dieser Grund besteht aber eigentlich nur dann, wenn man statt Ueberspannungsableiter bloss Funkenstrecken verwendet, die in der Regel nicht von selber löschen. Bei Verwendung von Ableitern könnte die Isolationsfestigkeit der Anlagen von kleinerer Hochspannung noch beträchtlich reduziert werden. Man hat vorläufig darauf verzichtet, weil man einerseits nicht zweierlei Material für Anlagen mit und ohne Ableiter einführen und anderseits das genormte Material nicht so schwach isolieren wollte, dass man *gezwungen* ist, Ableiter zu verwenden. Man darf aber nicht vergessen, dass hier noch eine Möglichkeit für die Verbilligung elektrischer Anlagen besteht, auf die man vielleicht in einem späteren Zeitpunkt, wenn noch mehr Erfahrungen mit Ableitern vorliegen, zurückkommen wird. Bei der Koordination der Isolationsfestigkeit rotierender Maschinen, die direkt an Freileitungsnetze angeschlossen sind, wird man sicher genötigt sein, von dieser Möglichkeit Gebrauch zu machen.

Betrachten wir nun das andere Ende der Kurven, Fig. 11, so sehen wir, dass bei den hohen Betriebspannungen die Höchstwerte der Ansprechspannung der Ableiter und Schutzfunkenstrecken bis fast auf den 2,3fachen Wert der Nennspannung heruntergehen, d. h. fast auf den 2fachen Wert der höchst zulässigen Betriebspannung. Vergleicht man das mit dem, was eingangs über die Höhe der Schalt- und Erdschlussüberspannungen gesagt worden ist, so sieht man, dass diese Ansprechspannung nur gerade knapp so hoch ist, dass die Ableiter meistens nicht ansprechen. Sicher sind aber hie und da besondere Massnahmen zur Reduktion jener Ueberspannungen nötig, oder man muss Ableiter verwenden, die so gebaut sind, dass sie z. B. auch beim Ansprechen auf Schaltüberspannungen bestimmt keinen Schaden erleiden.

Diese Ueberlegungen gelten für den Isolationsgrad I. Beim Isolationsgrad II kommen dagegen die Höchstwerte der Ansprech- und Restspannungen der Ableiter wesentlich höher über die möglichen Werte der Schalt- und Erdschlussüberspannungen zu liegen. Sie sind z. B. bei 45 und 110 kV Nennspannung etwa 2,8...2,7mal so hoch wie die höchst zulässige Betriebspannung. Man kann daher beim Isolationsgrad II die Ansprechspannung der Ableiter meistens sogar noch etwas tiefer einstellen als auf diese Grenzwerte, ohne ein Ansprechen bei Schalt- und Erdschlussüberspannungen zu riskieren. Das hat den Vorteil, dass der Unterschied zwischen der Ansprechspannung der Ableiter und der Ueberschlagspannung des Materials grösser wird als die oben genannten 25 %. Ableiter, die in einiger Entfernung vom Material aufgestellt sind, schützen daher bei Stössen mit steiler Front dieses Material mit grösserer Sicherheit gegen Ueberschläge.

Der Umstand, dass beim Isolationsgrad I die Ansprechspannungen der Ableiter und Schutzfunkenstrecken etwas nahe an die Werte der Schalt- und Erdschlussüberspannungen zu liegen kommen, ist einer der Hauptgründe, weshalb in den Koordinationsregeln zwei verschiedene Isolationsgrade vorgesehen worden sind. Gewisse Schwierigkeiten, die beim Isolationsgrad I möglich sind, sind beim

Grad II von vornherein ausgeschaltet. Es muss aber betont werden, dass auch mit Anlagen vom Isolationsgrad I, die natürlich billiger sind, durchaus gute Betriebserfahrungen gemacht worden sind.

Prüfspannung bei Industriefrequenz

Bis jetzt war ausschliesslich von der Stoßspannungsfestigkeit des Materials die Rede. Dabei müssen die für die einzelnen Niveaus vorgeschriebenen Werte für sämtliches Material gleich sein; denn nur so ist eine richtige Isolationsabstufung möglich. Es wäre also nicht angängig, für einen Transformator im mittleren Niveau eine kleinere Stossüberschlagspannung zuzulassen als z. B. für einen Leistungsschalter, denn beide müssen ja durch einen Ableiter mit gleicher Ansprechspannung geschützt werden.

Geht man dagegen zur Prüfspannung bei Industriefrequenz über, so kann man nicht immer für alles Material gleiche Werte vorschreiben, denn durch die Stoßspannungsfestigkeit ist sehr weitgehend auch die Isolationsfestigkeit bei Industriefrequenz festgelegt, und wenn jene für zwei verschiedenartige Apparate gleich ist, so kann diese sehr ungleich sein. Diese Erscheinung zeigt sich besonders deutlich beim Vergleich von Luft- und Oelisolation. Die meisten Ueberschlagstrecken in Luft haben bei einer Polarität einen Stossfaktor, der nur ganz wenig über 1 liegt. Dagegen ist der Stossfaktor des Oels sehr hoch. Man findet in der Literatur Werte bis weit über 2. Allerdings ist der Stossfaktor um so kleiner, je besser das Oel getrocknet und gereinigt ist; die Durchschlagspannung bei Industriefrequenz wird dadurch sehr in die Höhe getrieben, während sich die Durchschlagspannung bei Stoss kaum ändert. Aber auch noch bei sehr sorgfältig zubereitetem Oel beträgt der Stossfaktor mindestens 1,8. Bei gleicher Stoßspannungsfestigkeit ist daher die Isolationsfestigkeit bei Industriefrequenz zwangsläufig wesentlich verschieden, je nachdem es sich um Luft- oder Oelisolation handelt, und zwar ist sie bei der Oelisolation niedriger.

Das scheint auf den ersten Blick unschön; es ist aber durchaus kein Nachteil. Denn man will ja bei Industriefrequenz keine Isolationsabstufung durchführen, sondern erreichen, dass überhaupt keine Durch- oder Ueberschläge vorkommen. Die eigentlichen betriebsfrequenten Spannungserhöhungen sind so gering, dass diese Forderung ohne weiteres eingehalten wird, trotzdem die Spannungsfestigkeit der Oelisolation bei Industriefrequenz wesentlich kleiner ist als die der Luftisolation. Man will anderseits auch bei Schalt- und Erdschlussüberspannungen Durchschläge in der Oelisolation vermeiden. Diese Ueberspannungsarten sind zwar keine Stoßspannungen, aber es sind Spannungserhöhungen von sehr kurzer Dauer, und dafür ist die Isolationsfestigkeit ebenfalls ganz beträchtlich höher als bei der Einminutenprüfung mit Industriefrequenz. Die übliche Isolationsfestigkeit von Oeltransformatoren und dergleichen ist daher auch für diese Ueberspannungsarten reichlich hoch genug, was übrigens durch jahrzehntelange Betriebserfahrungen genügend belegt ist.

Ausser diesem prinzipiellen Unterschied zwischen Oel- und Luftisolation bestehen aus allerlei Gründen noch kleinere Unterschiede zwischen dem verschiedenartigen Hochspannungsmaterial, die im folgenden kurz behandelt werden sollen. Dabei werden auch noch einige Besonderheiten der Stoßspannungsprüfung zu besprechen sein, obwohl — wie bereits erwähnt — grundsätzlich immer alles Material im gleichen Niveau die gleiche Stoßspannungsfestigkeit hat.

Spannungsprüfung des verschiedenen Hochspannungsmaterials

Beginnen wir unsere Uebersicht mit den

Hochspannungsapparaten und Stationsisolatoren.

Entsprechend der bisherigen Praxis wird bei diesem Material eine Einminutenprüfung mit einer Spannung, die der Formel

$$U_p = 2{,}2\, U_i + 20\,\text{kV}$$

entspricht, verlangt [5]). Dadurch, dass man sich bei der Stossfestigkeit *und* der industriefrequenten Spannungsfestigkeit an das, was bisher praktisch verwendet wurde, anlehnt, wird erreicht, dass die Vorschriften für die zwei verschiedenen Spannungsarten in einem logischen Zusammenhang stehen.

Bei Industriefrequenz wird kein Ueberschlagversuch verlangt; denn es soll ja nachgewiesen werden, dass das Material bei einer bestimmten Spannung *nicht* durch- oder überschlägt. Dieser Nachweis wird durch die Einminutenprüfung erbracht, während der Ueberschlagversuch bei Industriefrequenz damit nichts zu tun hat.

Mit Recht werden an die geöffneten Unterbrechungsstellen von Trennern erhöhte Anforderungen gestellt. Diese Trennstrecken sollen bei Reparaturarbeiten an einem abgetrennten Anlageteil einen absolut sichern Schutz für das Personal gewährleisten, und anderseits soll im Betrieb auch dann, wenn die Anlage auf beiden Seiten des Trenners unter Spannung steht, eher ein Ueberschlag nach Erde als über die geöffnete Trennstrecke erfolgen. Im Gegensatz zu gewissen andern Landesvorschriften verlangen die Koordinationsregeln für die geöffnete Trennstrecke nicht eine erhöhte Festigkeit bei Industriefrequenz, sondern eine erhöhte Stossspannungsfestigkeit, da es sich tatsächlich darum handelt, eine richtige Abstufung für Stoßspannungen zu erreichen.

Für die industriefrequenten Spannungsprüfungen der

Transformatoren

bestehen schweizerische Vorschriften (die SREM), die auf Vorschriften der CEI (Commission Electrotechnique Internationale) basieren und auch mit

[5]) Die genaue Bedeutung der genormten Nennisolationsspannung U_i wird später noch erklärt. Beschränken wir uns in diesem Kapitel der Einfachheit halber auf Anlagen vom Isolationsgrad I, so bedeutet U_i im wesentlichen die Nennspannung.

einer grossen Zahl anderer Landesvorschriften übereinstimmen. Es besteht kein Grund, diese Vorschriften, mit denen sehr gute Betriebserfahrungen gemacht wurden, sachlich zu ändern. Lediglich mit Rücksicht auf die Normung wurden gewisse mehr formale Aenderungen vorgenommen. Die Spannungswerte für die Einminutenprüfung sind so festgelegt, dass kein Transformator niedriger geprüft wird als bisher üblich, dass aber die Prüfspannung im Prinzip auch nicht höher ist als bisher.

Diese Einminutenprüfung ist normalerweise als Spannungsprüfung gegen Erde (d. h. als Wicklungsprüfung) durchzuführen. In Netzen mit fest geerdetem Nullpunkt dürfen jedoch diejenigen Transformatoren, deren Sternpunkt direkt geerdet ist, mit abgestufter Isolation ausgeführt werden; in diesem Fall kann nur eine Prüfung mit induzierter Spannung vorgenommen werden. Erreicht dabei die Spannung zwischen Klemmen und Erde die gleichen Werte wie bei einem Transformator mit nicht geerdetem Sternpunkt bei der Fremdspannungsprüfung, so sind die übrigen Teile der Anlage genau gleich zu isolieren wie bei Verwendung von Transformatoren mit voller Isolation.

Die Koordinationsregeln begnügen sich jedoch in Uebereinstimmung mit den SREM bei Transformatoren mit direkt geerdetem Sternpunkt für Spannungen von mehr als 80 kV mit einer um 20 % kleineren Prüfspannung. In diesem Fall muss auch die Isolation des mittlern und tiefsten Niveaus entsprechend kleiner gewählt werden, damit die Isolationsabstufung richtig bleibt.

Transformatoren mit Luftisolation haben bei Einhaltung der geforderten Stoßspannungsfestigkeit zwangsläufig eine höhere Festigkeit bei Industriefrequenz, weil der Stossfaktor nicht so hoch ist wie für Oel. Die Koordinationsregeln sehen daher für Transformatoren mit anderer als Oelisolation eine Einminutenprüfung mit Spannungswerten vor, die gleich gross sind wie bei der Einminutenprüfung der Hochspannungsapparate. Für luftisolierte Transformatoren, die in reinen Kabelnetzen aufgestellt werden, begnügen sie sich mit den gleichen Werten der Prüfspannung wie für Oeltransformatoren.

Die Koordinationsregeln schreiben vorläufig keine Stoßspannungsprüfung an Transformatoren als Abnahmeprobe vor, weil noch keine Methode bekannt ist, die einwandfrei festzustellen erlaubt, ob bei einer solchen Prüfung ein Isolationsdefekt aufgetreten ist oder nicht. Die Frage wird aber weiter verfolgt. Obwohl vorläufig keine Prüfung durchgeführt wird, müssen die Transformatoren für eine bestimmte Stossfestigkeit *bemessen* werden, um mit der Isolation der übrigen Anlageteile zusammenzupassen. Sie müssen so gebaut sein, dass sie einen vollen Stoss von der Höhe der 50-%-Ueberschlagstoßspannung des mittleren Niveaus und einen 15 % höheren abgeschnittenen Stoss aushalten. Im übrigen wollen die heute vorliegenden Koordinationsregeln in keiner Weise präjudizieren, wie eine später eventuell einzuführende Stossprüfung von Transformatoren im Einzelnen ausgestaltet werden soll. Insbesondere wird die grosse Anzahl Stösse, die für die Prüfung von Schaltmaterial und dgl. vorgesehen ist, nicht einfach für die Prüfung von Transformatoren übernommen werden können.

Messwandler

wurden bisher in Uebereinstimmung mit einer ausländischen Vorschrift oft für eine höhere industriefrequente Prüfspannung (nämlich wie für Apparate) gebaut, auch wenn sie ölisoliert waren. Es ist aber nicht recht einzusehen, warum ölisolierte Messwandler höher isoliert werden sollten als Oeltransformatoren. Die Koordinationsregeln sehen daher für Messwandler grundsätzlich die gleichen Prüfspannungen vor wie für Leistungstransformatoren mit gleichartiger Isolation.

Rotierende Maschinen und Induktionsregler

lassen sich aus wirtschaftlichen Gründen nicht ins allgemeine Koordinationsschema einreihen. Um nicht die Herausgabe der Koordinationsregeln für die viel zahlreicheren Hochspannungsstationen ohne rotierende Maschinen zu verzögern, hat daher das Komitee diese Maschinen vorläufig ausgeschlossen und wird erst nach Herausgabe der allgemeinen Regeln darauf zurückkommen.

Als

Hochspannungsverbraucher

kommen wohl nur Elektrokessel in Frage. Dafür lassen sich die gleichen Vorschriften wie für Hochspannungsapparate anwenden.

Kondensatoren

sind je nach Grösse und Verwendungszweck verschieden zu behandeln. Phasenschieber-Kondensatoren können aus wirtschaftlichen Gründen nicht entsprechend den allgemeinen Regeln für die Stossspannungsfestigkeit isoliert werden. Das ist aber im allgemeinen auch gar nicht nötig, weil ihre Kapazität so gross ist, dass die in den Anlagen auftretenden stossartigen Ueberspannungen stark abgesenkt werden.

Es ist daher nur eine Prüfung mit mässiger Spannung vorgesehen, die gerade genügen soll, um das einwandfreie Verhalten der Kondensatoren unter Betriebspannung zu gewährleisten. Diese Prüfspannung gilt, wenn die Kapazität so gross ist, dass der Prüfspannungswert durch einen Stoss von 1500 A Scheitelwert und 30 μs Halbwertdauer nicht überschritten wird. Ist die Kapazität kleiner, so muss die Prüfung mit entsprechend höherer Spannung durchgeführt werden. Diese Vorschrift scheint scharf genug; denn es ist sehr unwahrscheinlich, dass bei einem entfernten Blitzschlag in eine Leitung eine grössere Stosswelle als 1500 A und 30 μs in eine Station einläuft. Bei einem nahen Blitzeinschlag muss allerdings mit einem Durchschlag des Kondensators gerechnet werden.

Da sich Stoss- und Wechselspannungsprüfungen wegen der grossen Kapazität kaum durchführen lassen, ist zwischen den Belägen nur eine Prüfung

mit Gleichspannung vorgesehen. Zwischen verbundenen Belägen und Erde wird dagegen eine vollwertige Prüfung verlangt, einerseits eine Stossprüfung nach den normalen Vorschriften, anderseits eine Einminutenprüfung bei Industriefrequenz mit den gleichen Spannungswerten wie für Oeltransformatoren.

Kopplungs- und Ueberspannungsschutz-Kondensatoren haben meist kleinere Kapazitätswerte. Gerade deswegen ist aber auch eine höhere Isolation wirtschaftlich tragbar. Es soll daher eine vollwertige Stoßspannungsprüfung durchgeführt werden. Ferner ist eine Einminutenprüfung vorgesehen, die soweit möglich mit Wechselspannung und nur als Notbehelf mit Gleichspannung durchzuführen ist. Die Prüfspannung ist im allgemeinen gleich hoch wie für Hochspannungsapparate; nur unterhalb 20 kV Nennspannung ist aus wirtschaftlichen Gründen eine Reduktion vorgesehen, wobei aber immer noch mindestens so hohe Werte wie für Transformatoren gelten.

Für

statische Voltmeter,

wohl die einzigen Hochspannungsinstrumente, die für Wechselstrom-Anlagen in Frage kommen, sollen genau die gleichen Prüfvorschriften gelten wie für Kopplungskondensatoren.

Für die

Kabel

bestehen bereits schweizerische Normen, die SEV-Leitsätze für Hochspannungskabel (Publ. Nr. 164). Das FK 28 hat die 20- resp. 15-Minuten-Prüfung aus diesen Vorschriften übernommen, mit einer Spannungshöhe vom 2,5fachen Werte der *Leiter*-Nennspannung.

Da auch für die Kabelendverschlüsse der Nachweis erbracht werden muss, dass ihre Isolationsfestigkeit zu der des übrigen Materials passt, ist ausserdem für die Kabel mit ihren Endverschlüssen eine Einminutenprüfung vorgesehen, bei der die Prüfspannung die gleichen Werte haben soll wie bei der Prüfung der Hochspannungsapparate. Diese Spannung ist im allgemeinen bedeutend höher als die bei der 20-Minuten-Prüfung angewendete. Wegen der kürzeren Dauer ist aber das nach Ansicht der Fachleute zulässig, ohne dass deswegen die bis heute übliche Isolation verstärkt werden müsste.

Alle diese Isolations-Prüfvorschriften sind natürlich noch recht unvollständig. Es kann aber nicht die Aufgabe der Koordinationsregeln sein, für das verschiedene Material vollständige Vorschriften zu geben. Es steht den einzelnen Fachkollegien zu, die Isolationsvorschriften für das von ihnen behandelte Material nach Bedarf zu ergänzen. Die Koordinationsregeln müssen nur diejenigen Vorschriften enthalten, die wegen des Zusammenbaus von verschiedenem Material nicht ohne Rücksicht auf das übrige Material aufgestellt werden können.

Es ist klar, dass alle Stoßspannungsvorschriften darunter fallen; denn die Stossfestigkeit soll ja in jedem einzelnen Niveau für alles Material gleich sein. Dagegen kann man sich fragen, ob sich die Koordinationsregeln überhaupt mit der Isolationsfestigkeit bei Industriefrequenz befassen sollen. Das scheint nun aber doch richtig, weil die Isolationsfestigkeiten bei Stoss und bei Industriefrequenz in einem gewissen Zusammenhang stehen, so dass nach Festlegung der Stossfestigkeit auch die Festigkeit bei Industriefrequenz mehr oder weniger festliegt. Im übrigen haben verschiedene Fachkollegien direkt darauf gewartet, vom Koordinationskomitee solche Unterlagen zu erhalten.

Normung des Materials und dessen Zuordnung zur Betriebspannung

Bei der Aufstellung der Regeln und Leitsätze für die Koordination der Isolationsfestigkeit wurde grosser Wert darauf gelegt, eine Normung des Materials — soweit es sich um dessen Isolationsfestigkeit handelt — zu erreichen. Man hat daher den Begriff der Nennisolationsspannung (U_i), d. i. die Spannung, nach der die Isolation des Materials bemessen und benannt ist, geschaffen und dafür die zehn genormten Werte 3, 10, 20, 30, 45, 60, 80, 110, 150 und 220 kV eingeführt [6]). Abgesehen von einigen wenigen Ausnahmen gibt es isolationsmässig nur Material für diese zehn diskreten Werte der Spannung. Die Koordinationsregeln schreiben zu jedem dieser Werte der Nennisolationsspannung die Isolationsfestigkeit (d. h. 50-%-Ueberschlagstossspannung, Einminuten-Prüfspannung bei Industriefrequenz usw.) für das verschiedene Material vor. Mit diesem Material werden die elektrischen Anlagen aufgebaut, gleichgültig, ob es sich um Anlagen vom Isolationsgrad I oder II handelt.

Die Zuordnung des Materials zur Betriebspannung erfolgt so, dass man zunächst die *kleinst zulässige* Nennisolationsspannung der Anlage bestimmt. Dafür muss einer der oben genannten zehn genormten Werte gewählt werden, und zwar so, dass die Betriebspannung der Anlage diesen Wert um höchstens 15 % überschreitet. Beim Isolationsgrad I wird nun Material verwendet, dessen Nennisolationsspannung gleich der kleinst zulässigen Nennisolationsspannung der Anlage ist; beim Isolationsgrad II wird Material gewählt, dessen Nennisolationsspannung den nächst höheren genormten Wert hat. Bei Anlage-Nennspannungen über 110 kV wird jedoch die Verwendung von Material mit derart erhöhter Nennisolationsspannung nicht in Betracht gezogen, weil in diesem Spannungsbereich die Isolationsfestigkeit des Grades I unter allen Umständen genügen dürfte.

Ein Beispiel möge diese Auswahl des Materials erläutern. Bei einer höchsten Betriebspannung von 50 kV ist die kleinst zulässige Nennisolationsspannung 45 kV. (Die Betriebspannung darf dabei den

[6]) Es gibt noch die Zwischenwerte 6 und 15 kV, die aber nur in bestimmten Ausnahmefällen zulässig sind.

Wert von 1,15 · 45 = 52 kV nicht überschreiten.) Beim Isolationsgrad I wird nun Material mit einer Nennisolationsspannung von 45 kV, beim Isolationsgrad II mit einer solchen von 60 kV verwendet. Ist dagegen die höchste Betriebspannung 55 kV, so muss Material mit einer Nennisolationsspannung von *mindestens* 60 kV verwendet werden; eine Anlage von 55 kV Betriebspannung mit Material von 60 kV Nennisolationsspannung hat also bloss den Isolationsgrad I.

Isolationsabstufung bei hohen Spannungsstössen mit steiler Front

Zum Schluss soll noch eine grundlegende Frage kurz behandelt werden. Die Isolationsabstufung ist eine ausserordentlich komplizierte Aufgabe, die nicht ohne gewisse Vereinfachungen gelöst werden kann. Das FK 28 hat daher die Abstufung zunächst einmal für Spannungsstösse der normalen Form 1|50 μs und mit Scheitelwerten in der Nähe der Mindest-Ueberschlagspannung (der sogen. 50-%-Ueberschlagspannung) durchgeführt. Damit diese Voraussetzungen in der Praxis auch einigermassen zutreffen, wird empfohlen, die nötigen Massnahmen vorzusehen, um das Einlaufen von steilen und hohen Ueberspannungswellen in die Stationen zu verhindern. Dazu gehört ein guter Gebäudeblitzschutz oder bei Freiluftanlagen eine entsprechende Abschirmung, ferner u. U. die Verwendung von Nahzonenerdseilen.

Es ist aber gut, sich zu überlegen, wie die Abstufung funktioniert, wenn doch einmal hohe Ueberspannungswellen mit steiler Front vorkommen. Der Unterschied zwischen der Ansprechspannung eines Ableiters und der Ueberschlagspannung des Materials wird dabei niemals kleiner, sondern im Gegenteil grösser, da moderne Ableiter eine viel flachere Stosscharakteristik haben als Ueberschlagstrecken am Hochspannungsmaterial. Das will allerdings nicht heissen, dass deswegen die Abstufung unter allen Umständen sicherer werde; denn wenn ein Ableiter in einiger Entfernung vom zu schützenden Material aufgestellt ist, *muss* der Unterschied jener beiden Spannungen um so grösser sein, je steiler die Front der Ueberspannungswellen ist. Ein Schutz gegen sehr steile Wellen ist daher nur gewährleistet, wenn die Ableiter nicht zu weit vom zu schützenden Material entfernt sind.

Bei der Abstufung von verschiedenen Ueberschlagstrecken gegeneinander (z. B. bei einem Schalter die geöffnete Unterbrechungsstelle in Luft gegen die Ueberschlagstrecke nach Erde) kann die Sicherheit bei hohen, steilen Wellen nur verbessert werden. Zahlreiche Versuche haben gezeigt, dass, wenn bei einer solchen Abstufung im Bereich der Mindestüberschlagspannung hie und da die falsche Ueberschlagstrecke anspricht, der Ueberschlag bei hohen, steilen Wellen ausnahmslos am richtigen Ort erfolgt. Voraussetzung dafür ist allerdings, dass der falsche Ueberschlag im Bereich der Minimalwelle nur selten, d. h. nur in wenigen Prozenten aller Fälle, vorkommt.

In Fig. 12 ist als Beispiel ein Druckluftschalter untersucht, bei dem die Ueberschlagstrecke zwischen zwei Polen gegen die Ueberschlagstrecke zwischen Pol und Erde abgestuft war. Die 50-%-Ueberschlagspannung der ersten Strecke liegt bei *b*, die der zweiten bei *a*. Es wurden nun bei verschiedenen Spannungswerten je eine grosse Zahl Stösse auf den Schalter geleitet und die Anzahl Ueberschläge zwischen den Polen im Verhältnis

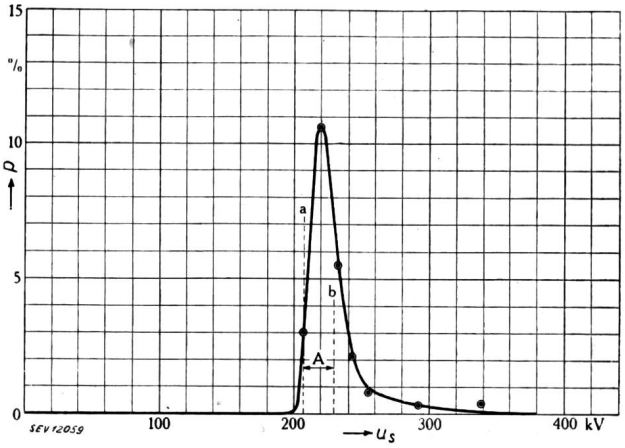


Fig. 12

Prozentzahl der Fehlüberschläge *p* zwischen den Phasen eines Druckluftschnellschalters bei Beanspruchung mit positiven Spannungsstössen 1|50 μs von verschiedenem Scheitelwert, aufgetragen in Funktion der angelegten Spannung u_s

a 50-%-Ueberschlagstoßspannung gegen Erde.
b 50-%-Ueberschlagstoßspannung zwischen den Polen.
Die Isolationsabstufung (A) beträgt 9 %.

zur totalen Anzahl Stösse als Ordinate aufgetragen. Diese «Versagerwahrscheinlichkeit» erreicht im Gebiet der 50-%-Ueberschlagspannungen ein Maximum von ca. 10 %. Unterhalb 200 kV ist die Versagerwahrscheinlichkeit null, aber auch oberhalb des Scheitelwertes der Kurve nimmt sie ausserordentlich rasch ab und ist bei den hohen Spannungen sehr klein.

Der Scheitelwert der Versagerkurve wird bei Vergrösserung der Abstufung sehr rasch reduziert. Es ist aber hier absichtlich ein Beispiel mit ungenügender Abstufung gewählt worden, weil dabei viel deutlicher ersichtlich ist, wie die Versagerwahrscheinlichkeit nach Ueberschreiten des Scheitelwertes mit steigender Spannung abnimmt.

Wesentlich anders verhält es sich mit der Abstufung von festen oder flüssigen Isolationen gegenüber Isolierstrecken in Luft. Wenn z. B. die innere Isolation eines Transformators durch Sicherheitsfunkenstrecken an seinen Klemmen im Bereich der 50-%-Ueberschlagstoßspannung einwandfrei geschützt ist, so kann trotzdem bei einer hohen, steilen Welle die innere Isolation durchschlagen, bevor die Sicherheitsfunkenstrecke anspricht. Wollte man die innere Isolation auch gegen sehr hohe steile Wellen einwandfrei durch Funkenhörner schützen, so müsste man sie — bei gleicher Einstellung der Funkenhörner — ausserordentlich verstärken, was wirtschaftlich untragbar erscheint.

Die vorliegenden Regeln verzichten daher bewusst auf eine solche Forderung. Es gibt übrigens auch keine andere Landesvorschrift und keine internationale Vorschrift, die das verlangen würde. Durch Verwendung von Ableitern kann dagegen auch die innere Isolation von Transformatoren bei hohen Spannungsstössen mit steiler Front einwandfrei geschützt werden.

Literatur

[1] *Wanger, W.:* Stossüberschlagsmessungen an Stabfunkenstrecken. Bull. SEV Bd. 34(1943), Nr. 8, S. 193...201.

[2] *Wanger, W.*, u. *W. Frey:* Untersuchungen über die Sicherheit der Isolationsabstufung bei der Koordination der Isolationen. Brown Boveri Mitt". Bd 30(1943), Nr. 9/10, S. 259...266.

Adresse des Autors:
Dr. *W. Wanger,* Geissbergstrasse 47, Ennetbaden (AG).

Wirtschaftliche Mitteilungen — Communications de nature économique

Zahlen aus der schweizerischen Wirtschaft

(Auszüge aus «Die Volkswirtschaft» und aus «Monatsbericht Schweizerische Nationalbank»)

Nr.			Oktober 1946	Oktober 1947
1.	**Import**	10^6 Fr.	303,7	441,0
	(Januar-Oktober)	10^6 Fr.	(2724,4)	(3824,1)
	Export	10^6 Fr.	269,4	291,5
	(Januar-Oktober)	10^6 Fr.	(2143,5)	(2661,4)
2.	**Arbeitsmarkt: Zahl der Stellensuchenden**		2034	1628
3.	**Lebenskostenindex**	Juli 1914 = 100	212	223
	Grosshandelsindex	Juli 1914 = 100	217	230
	Detailpreise (Durchschnitt von 33 Städten)			
	Elektrische Beleuchtungsenergie Rp./kWh	(Juni 1914 = 100)	34 (68)	33 (66)
	Gas Rp./m³	(Juni 1914 = 100)	31 (148)	31 (148)
	Gaskoks Fr./100 kg	(Juni 1914 = 100)	18,82 (376)	19,72 (394)
4.	**Zahl der Wohnungen in den zum Bau bewilligten Gebäuden in 33 Städten**		881	1191
	(Januar-Oktober)		(10 324)	(12 015)
5.	**Offizieller Diskontsatz**	%	1,50	1,50
6.	**Nationalbank (Ultimo)**			
	Notenumlauf	10^6 Fr.	3858	4192
	Täglich fällige Verbindlichkeiten	10^6 Fr.	1095	1098
	Goldbestand u. Golddevisen	10^6 Fr.	5064	5407
	Deckung des Notenumlaufes und der täglich fälligen Verbindlichkeiten durch Gold	%	98,82	101,60
7.	**Börsenindex (am 25. d. Mts.)**			
	Obligationen		103	100
	Aktien		226	254
	Industrieaktien		345	388
8.	**Zahl der Konkurse**		25	24
	(Januar-Oktober)		(233)	(302)
	Zahl der Nachlassverträge		4	8
	(Januar-Oktober)		(37)	(35)
9.	**Fremdenverkehr**		September 1946	September 1947
	Bettenbesetzung in % nach den *vorhandenen* Betten		35,3	38,9
10.	**Betriebseinnahmen der SBB *allein***		September 1946	September 1947
	aus Güterverkehr	in 1000 Fr.	26 858	33 527
	(Januar-September)	in 1000 Fr.	(250 901)	(276 746)
	aus Personenverkehr	in 1000 Fr.	23 330	23 531
	(Januar-September)	in 1000 Fr.	(218 385)	(227 252)

Miscellanea

In memoriam

Otto Knöpfli †. In der Nacht vom 4. auf den 5. Oktober 1947 entschlief im Krankenhaus Hirslanden in Zürich, wo er durch eine Operation von seiner Krankheit geheilt zu werden hoffte, Otto Knöpfli, Ingenieur, Chef der Firma Otto Knöpfli, Zürich, Kollektivmitglied des SEV.

Otto Knöpfli wurde als Sohn eines Baumeisters am 12. Februar 1882 in Andelfingen geboren und erhielt in der Folge seine Erziehung und Ausbildung in Basel, wohin sein Vater das Baugeschäft verlegt hatte. Früh schon zeigte Otto Knöpfli Interesse und Verständnis an technischen Einrichtungen und an technisch-wissenschaftlicher Literatur. Durch eifriges Studium neben seiner praktischen Betätigung erwarb sich Otto Knöpfli jene weiteren Kenntnisse, die er sich eigentlich in einer höheren technischen Lehranstalt holen wollte. Die durch den allzufrühen Tod seines Vaters veränderten Verhältnisse wiesen ihm einen anderen Weg. Zu einer Erwerbstätigkeit gezwungen, entledigte er sich mit Energie, Beharrlichkeit und Gründlichkeit der an ihn gestellten und selbst übernommenen Aufgaben. Im Jahre 1903 von der Maschinenfabrik Oerlikon engagiert, diente er vorerst für technische Arbeiten am Prüfstand für Motoren, Generatoren und Apparate und später als Chef-Elektriker bis ins Jahr 1918, als er einem Ruf der Firma Schindler & Cie. A.-G. in Luzern Folge gab. Sein Wirken in Luzern als Abteilungschef und bald als Direktor dauerte bis 1925. In diesem Jahr holte die Maschinenfabrik Oerlikon Otto Knöpfli wieder zurück für den Vertrauensposten eines Vertreters in Argentinien. Im Jahre 1934 trat Otto Knöpfli, von Buenos Aires und seinen dortigen Freunden Abschied nehmend, die Heimreise an, verliess nach relativ kurzer Zeit die Dienste bei der Maschinenfabrik Oerlikon und übernahm käuflich das Geschäft Nicolet & Cie., Fabrik elektrischer Apparate, an der Badenerstrasse 60 in Zürich.

Otto Knöpfli
1882—1947

Ingeniös und mit grosser Energie entwickelte er unter anderem die Fabrikation von Spezial-Schalt- und Betätigungs-Apparaturen, und es war eine Freude zu sehen, wie das Geschäft unter seiner Leitung zu raschem Aufschwung kam. Ausserhalb seines geschäftlichen Wirkens, im Kreise seiner Freunde und Bekannten, liess er oft seine Geselligkeit, seine Konzilianz und seinen Humor zur Geltung kommen. Seine Wertschätzung als Gesellschafter verband sich mit der Hochachtung vor seinem technischen Wissen und Schaffen zu gebührender Verehrung. *W.*