

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 23 (1932)
Heft: 17

Artikel: Ein Beitrag zur Frage des Ueberstromschutzes in Niederspannungsanlagen
Autor: Müller, P.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1059336>

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 16.01.2026

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

SCHWEIZERISCHER ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

BULLETIN

REDAKTION:

Generalsekretariat des Schweiz. Elektrotechn. Vereins und des Verbandes Schweiz. Elektrizitätswerke, Zürich 8, Seefeldstr. 301

VERLAG UND ADMINISTRATION:

Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei A.-G., Zürich 4
Stauffacherquai 36/38

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

XXIII. Jahrgang

N^o 17

Mittwoch, 17. August 1932

Ein Beitrag zur Frage des Ueberstromschutzes in Niederspannungsanlagen.

Von der Materialprüfanstalt des SEV (Ing. P. Müller).

621.316.92

Zur Abklärung einzelner Fragen des Ueberstromschutzes von Niederspannungsnetzen führte die Materialprüfanstalt des SEV eine Reihe von Abschalt- und Kurzschlussversuchen laboratoriumsmässig und in Anlagen, sowie ziemlich ausgedehnte Erwärmungsversuche an verschiedenen Leitertypen in gebräuchlichen Verlegungsarten durch. Die Ergebnisse dieser Versuche sind im nachstehenden Aufsatz zusammengestellt und die verschiedenen als Ueberstromschutz von Leitungen gebräuchlichen Mittel (Sicherungen und Selbstschalter) kritisch betrachtet.

Pour éclaircir certaines questions relatives à la protection contre les surintensités dans les réseaux à basse tension, la Station d'Essai des Matériaux de l'ASE a exécuté une série d'essais de déclenchement et de courts-circuits, au laboratoire et dans des installations, ainsi que des essais d'échauffement assez étendus portant sur différents types de conducteurs et modes de pose courants. Les résultats de ces essais sont résumés dans l'article ci-dessous, et les dispositifs usuels pour protéger les lignes contre les surintensités (coupe-circuit et interrupteurs automatiques) soumis à des considérations critiques.

Die Ausarbeitung der Normalien für Sicherungen und die Vorbereitung solcher für Installations-selbstschalter bot der Materialprüfanstalt des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (MP) Gelegenheit zu einer Reihe von Untersuchungen, deren Resultate der vorliegenden Arbeit zugrunde gelegt sind.

Vergleicht man die ausserordentlichen Anstrengungen, die auf dem Gebiete des Leitungsschutzes in Hochspannungsanlagen seit Jahren gemacht werden, mit den entsprechenden Arbeiten für Niederspannungsnetze, so lässt sich bis vor kurzem ein gewisses Missverhältnis nicht verkennen, das sicherlich nicht nur durch die grössere Bedeutung der Hochspannungsanlagen oder durch die Kompliziertheit der Probleme gegenüber den Verhältnissen im Niederspannungsnetz erklärbar wird. Es scheint uns hier in erster Linie der Impuls der Elektrizitätswerke gefehlt zu haben, der die Industrie veranlasste, neue Möglichkeiten zu studieren. Um so erfreulicher ist das Ergebnis der letzten Jahre, die interessante Konstruktionen und Verbesserungen auf dem Gebiete des Schutzes von Niederspannungsanlagen gebracht haben.

Das Problem des Leitungsschutzes von Niederspannungsanlagen ist sozusagen ausschliesslich eine Ueberstromangelegenheit, so dass eine Abklärung der Ueberstromfragen volle Aufmerksamkeit verdient.

1. Grösse der in Niederspannungsanlagen auftretenden Ueberströme.

Die Bemessung und Konstruktion der Schutzorgane wird wesentlich beeinflusst durch die Grösse der in den verschiedenen Anlageteilen auf-

tretenden maximalen Ueberströme (Kurzschlussleistung). Die genaue Berechnung der Kurzschlussströme in Niederspannungsanlagen ist noch schwieriger durchzuführen als bei Hochspannungsanlagen, da stets eine Anzahl zahlenmässig nicht zu erfassender Faktoren (Uebergangswiderstände usw.) auftreten und bewirken, dass die tatsächlich auftretenden Kurzschlussströme in unbestimmtem Masse unterhalb der durch Rechnung gefundenen Werte liegen.

Es sind eine Anzahl Untersuchungen an Niederspannungsanlagen aus den Berichten der Internationalen Installationsfragen-Kommission bekannt geworden. Auch die MP hat diesbezügliche Messungen in grösserem Umfange ausgeführt, deren Resultate in Tabelle I zusammengestellt sind.

Unter besonders ungünstigen Verhältnissen wurden bei Kurzschlüssen an 400-V-Sammelschienen Stromstärken bis zu 45 000 A_{eff} erreicht. Versuche hierüber sind in der Elektrizitätswirtschaft¹⁾ veröffentlicht. Bei Untersuchungen in einem holländischen städtischen Kabelnetz wurden Stromstärken von einigen tausend Ampères festgestellt.

Aus allen diesen Versuchen geht mit Deutlichkeit hervor, dass die Anforderungen an ein Schutzsystem nicht generell formuliert werden können, sondern mit Aufbau und Betriebszustand des zu schützenden Netzes verknüpft sind.

¹⁾ Heinz Freiburger: Selbstsicherung von vermaschten Niederspannungskabelnetzen durch Ausbrennen der Fehlerstellen. Elektrizitätswirtschaft 1930, S. 282.

Heinz Freiburger: Maschennetz-sicherungen. Elektrizitätswirtschaft 1931, S. 651.

Vgl. auch: Bulletin SEV 1932, Nr. 10, S. 232.

Messungen der MP (einphasige Kurzschlüsse bei 50 Per./s.).

Tabelle I

Anlage	Gerechnete Impedanz des Kurzschlusskreises (Impedanz zwischen den Sekundärklemmen des Speisetransformators) Ohm	Oszillographisch gemessener Kurzschlussstrom A _{eff}	Sollwert *) des Dauer- kurzschluss- stromes unter Berücksichtigung des Spannungsabfalles des Speisetransformators A _{eff}	Verhältnis von gemessenem zu gerechnetem Kurzschlussstrom
Transformatorstation, Transformator 40 kVA 3 ~ 50 6000/540 V	0,17 0,27	745 644	1040 915	0,72 0,70
Kurzschluss zwischen zwei Phasen				
Unterstation, Eigenbedarfs-Transformator 280 kVA 3 ~ 50 8800/555 V	0,015	4500	4920	0,91
Kurzschluss zwischen zwei Phasen				
Hausinstallation in städt. Wohnhaus, Speisung durch Einheitstransformator 230 kVA 3 ~ 50 6000/380/220 V	0,6	265	375	0,71
Kurzschluss zwisch. einer Phase u. Nulleiter				
Hausinstallation, Wohnhaus a.d. Stadtperipherie, Speisung durch Einheitstransformator 100 kVA 3 ~ 50 6000/380/220 V	2,1	88	104	0,84
Kurzschluss zwisch. einer Phase u. Nulleiter				
Hausinstallation mit eigenem Transformator 100 kVA 3 ~ 50 3800/380/220 V	(Widerstand gemessen) 0,6	376	390	0,96
Kurzschluss zwisch. einer Phase u. Nulleiter				
Städt. Umformerstation, Versuchsanlage 200 kVA, Einphasentransformator 6000/440 V	veränderlich	bis 6000	—	—
Kurzschluss zwischen zwei Phasen				

Die Impedanzen der Kurzschlusskreise waren mit Ausnahme der beiden Anlagen 100 kVA, 6000/380/220 V und 100 kVA 3800/380/220 V praktisch rein Ohmsche Widerstände.

Berechnungsbeispiel zu: 40 kVA 6000/540 V

Transformatorschaltung: γ/γ

Kurzschlußspannung 3,2 %

Kurzschlussimpedanz pro Phase bezogen auf 540-V-Seite 0,232 Ω

Kurzschlussresistenz pro Phase 0,163 Ω

Aeusserer Widerstand pro Phase 0,085 Ω

Totale Impedanz pro Phase

$$\sqrt{0,232^2 - 0,163^2 + (0,163 + 0,085)^2} = 0,298 \Omega$$

$$\text{Kurzschlußstromstärke} = \frac{\frac{540}{\sqrt{3}}}{0,298} = 1040 \text{ A}$$

*) Die Kurzschlußstromstärke wurde aus der Kurzschlußspannung des Speisetransformators ermittelt in der Annahme, dass auf der Primärseite desselben beim Kurzschluss kein Spannungsabfall auftritt.

Die Gefährdung durch Ueberströme dürfte in den meisten Fällen thermischer Natur sein, die dynamischen Wirkungen machen sich bei Stromstärken unterhalb 5000 bis 10 000 A kaum bemerk-

bar, also nur in den zur Zeit noch relativ seltenen Fällen stark vermaschter Niederspannungsnetze.

Sobald die thermischen Wirkungen der Ueberströme vorwiegen, braucht man dem asymptotisch verlaufenden Gleichstromglied, das bei jedem Schaltvorgang in Stromkreisen mit Induktivität auftritt, keine Bedeutung zuzumessen, da das Abklingen innerhalb weniger Perioden erfolgt.

Die prinzipiellen Verschiedenheiten der Anlagen mit relativ kleinen und solchen mit bedeutenden Kurzschlußströmen in der Größenordnung einiger 10 000 A drängen zu einer Zerteilung in der Behandlung des Fragenkomplexes, von dem im folgenden hauptsächlich die Verhältnisse in Anlagen mit mässigen Kurzschlußleistungen (Hausinstallationen) behandelt werden sollen.

2. Erwärmungscharakteristik der Leitungen.

Die dauernd zulässigen Belastungen isolierter Leiter sind durch Versuche von Teichmüller und Humann 1907²⁾ festgestellt, und es ist hierbei für gummiisierte Leiter eine Erwärmung von 20° C, für Papierbleikabel eine solche von 25° C zugrunde gelegt worden. Untersuchungen über den Verlauf der Leitererwärmung bei kurzzeitiger Ueberlastung (ca. 30 Minuten) wurden bei der MP im Hinblick auf die Bearbeitung von Vorschriften für träge Sicherungen und für automatische Schalter durchgeführt. Sollen aus den dabei erhaltenen Kurven Rückschlüsse auf die zulässige Grenzbelastung der Leiter gezogen werden, so ist in erster Linie eine Annahme der kurzzeitig und der dauernd von dem betreffenden Isolationsmaterial ausgehaltenen Temperaturen erforderlich. Die grundlegenden Versuche Apts vom Jahre 1927³⁾ haben ergeben, dass bei guter Gummiisolation Temperaturen von 70° C während kürzerer Zeit und solche von 60° C auch dauernd ohne Beschädigung der Gummiisolation ertragen werden. Die Alterungsprüfung der gummiisierten Leiter nach den Normalien des SEV sieht denn auch eine Wärmeprüfung mit 70° C während 8·24 h vor, wobei keine wesentliche Qualitätsminderung eintreten darf⁴⁾. Die Festlegung einer Temperatur von 60° C würde unter Annahme der Bezugstemperatur des VDE von 35° C bzw. der Bezugstemperatur des CEI von 40° C zu Erwärmungen von 25 bzw. 20° C führen. Da jedoch die Fälle mit 35 und 40° C Raumtemperatur für unsere Verhältnisse sicher eine Ausnahme bilden, dürfte die Festlegung der dauernden Erwärmung auf 30° C (Bezugstemperatur 30° C) angemessen sein. Für Niederspannungs-Papierbleikabel können vielleicht höhere Temperaturen zugelassen werden; im Interesse der Einheitlichkeit und mangels zuverlässiger Unterlagen wurde bei der Aufstellung der Strom-Zeit-Charakteristiken, Fig. 1 bis 7 (Kurven,

²⁾ Dr. R. Apt: Isolierte Leitungen und Kabel. Erläuterungen zu den für isolierte Leiter und Kabel geltenden Vorschriften und Normen des Verbandes Deutscher Elektrotechniker.

³⁾ Dr. R. Apt: Die Belastung isolierter Leitungen, ETZ 1927, S. 65.

⁴⁾ SEV-Vorschriftenbuch.

welche die zur Erreichung der Uebertemperatur von 30° C erforderliche Stromstärke und Belastungsdauer angeben), hievon abgesehen und durchwegs eine Erwärmung von 30° C angenommen. Diese geringen Uebertemperaturen schliessen eine Brandgefahr vollständig aus.

In den Figuren 1 bis 7 sind die Ergebnisse der Versuche an Gummischlauchleitern (GS), Papierbleikabeln (PK), Rundschnüren (RS) und verstärkten Apparateschnüren (VAS mit SGS-Isolation) graphisch dargestellt. (Bezüglich Aufbau der verschiedenen Leiterarten siehe Leiternormalien des SEV, II. Auflage, 1928.) Die Unterputzmontage erweist sich für kurzzeitige Belastungen (einige Sekunden) nicht und für langdauernde wenig ungünstiger als die Aufputzmontage. Bei den PK wurde deshalb nur der ungünstigere Fall der Unterputzmontage berücksichtigt. Besonderes Interesse verdienen die RS und VAS (Fig. 6 und 7), bei denen zwei extreme Fälle untersucht wurden. Die Temperaturmessung bei den Versuchen erfolgte auf Grund der Widerstandszunahme der Leiter. Die Strombelastung und die Widerstandsmessung erfolgten mit Gleichstrom;

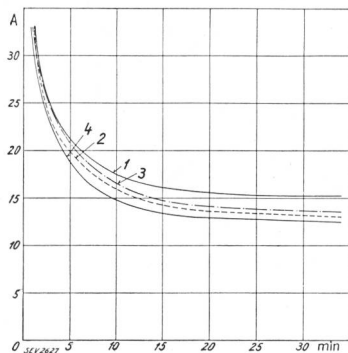


Fig. 1.
Strom-Zeit-Kurven von
GS 1 mm².
Uebertemperatur 30° C.
Bergmannrohr Aufputzmontage
1 2 Drähte in 11 mm
2 3 Drähte in 11 mm
Bergmannrohr Unterputzmontage
3 2 Drähte in 11 mm
4 3 Drähte in 11 mm

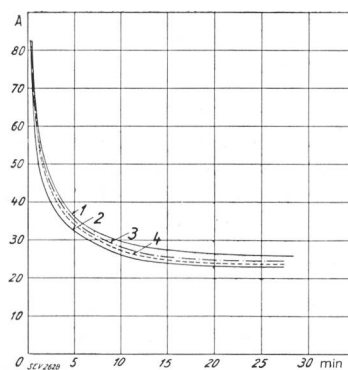


Fig. 2.
Strom-Zeit-Kurven von
GS 2,5 mm².
Uebertemperatur 30° C.
Bergmannrohr Aufputzmontage
1 2 Drähte in 13,5 mm
2 3 Drähte in 13,5 mm
Bergmannrohr Unterputzmontage
3 2 Drähte in 13,5 mm
4 3 Drähte in 13,5 mm

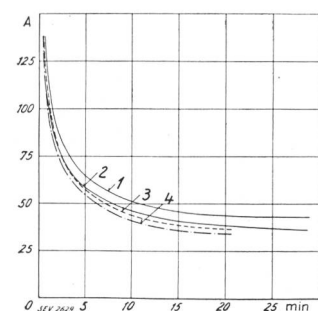


Fig. 3.
Strom-Zeit-Kurven von
GS 6 mm².
Uebertemperatur 30° C.
Bergmannrohr Aufputzmontage
1 2 Drähte in 16 mm
2 3 Drähte in 23 mm
Bergmannrohr Unterputzmontage
3 2 Drähte in 16 mm
4 3 Drähte in 23 mm

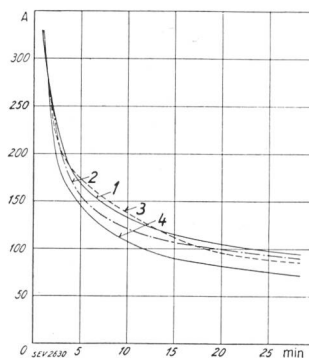


Fig. 4.
Strom-Zeit-Kurven von
GS 20 mm².
Uebertemperatur 30° C.
Bergmannrohr Aufputzmontage
1 2 Drähte in 23 mm
2 3 Drähte in 29 mm
Bergmannrohr Unterputzmontage
3 2 Drähte in 23 mm
4 3 Drähte in 29 mm

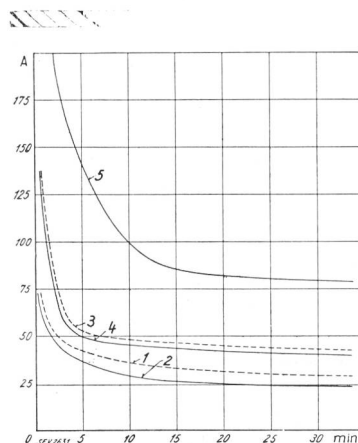


Fig. 5.
Strom-Zeit-Kurven von
PK, Unterputzmontage.
Uebertemperatur 30° C.
1 2,5 mm² 2 Leiter
2 2,5 mm² 3 »
3 6 mm² 2 »
4 6 mm² 3 »
5 20 mm² 3 »

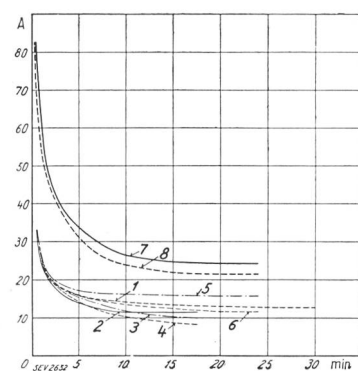


Fig. 6.
Strom-Zeit-Kurven von
RS.
Uebertemperatur 30° C.
1 0,75 mm² 2 Leiter,
gestreckt auf Boden
2 0,75 mm² 3 Leiter
gestreckt auf Boden
3 0,75 mm² 2 Leiter
gerollt unt. Teppich
4 0,75 mm² 3 Leiter
gerollt unt. Teppich
5 1 mm² 2 Leiter
gestreckt frei auf
Holzboden
6 1 mm² 2 Leiter
unt. Teppich gerollt
7 2,5 mm² 2 Leiter
gestreckt frei auf
Holzboden
8 2,5 mm² 2 Leiter
unt. Teppich gerollt

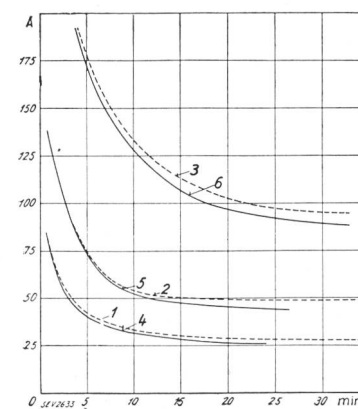


Fig. 7.
Strom-Zeit-Kurven von
VAS
Uebertemperatur 30° C.
1 4 × 2,5 mm² 3 Adern
belastet, gestreckt
auf Holzboden liegd.
2 4 × 6 mm² 3 Adern
belastet, gestreckt
auf Holzboden liegd.
3 4 × 20 mm² 3 Adern
belastet, gestreckt
auf Holzboden liegd.
4 4 × 2,5 mm² 3 Adern
belastet, unter Tep-
pich gerollt
5 4 × 6 mm² 3 Adern
belastet, unter Tep-
pich gerollt
6 4 × 20 mm² 3 Adern
belastet, unter Tep-
pich gerollt

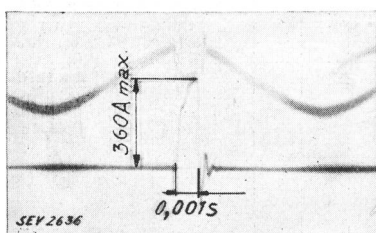
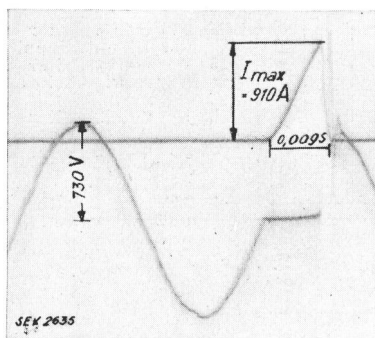
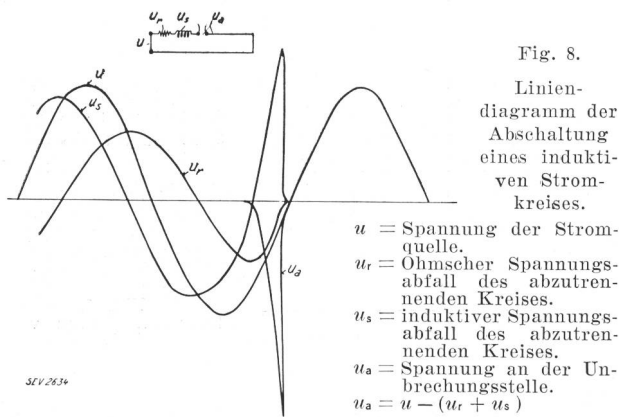
in jenen Fällen, da sich Unterschiede in der Erwärmung ergaben (20 mm² Querschnitte), sind die Resultate der Prüfung mit Wechselstrom von 50 Per./s angegeben⁵⁾. Bei Gleichstrom war in letzterem Falle die zulässige Belastungsdauer um 10 bis 15 % grösser.

Ein Schutzsystem, das sich auf dem Prinzip der Erwärmung aufbaut, ist dann ideal zu nennen, wenn es einerseits der Charakteristik der zu schützenden Leitungstrecke entspricht und andererseits eine sichere Abtrennung des gefährdeten Leitungsschnittes gewährleistet.

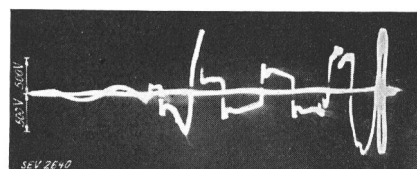
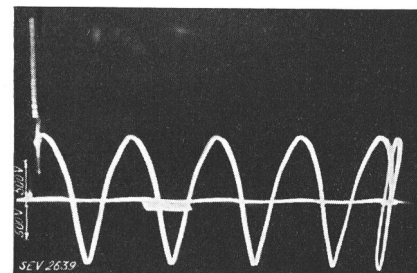
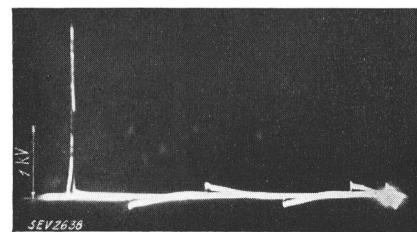
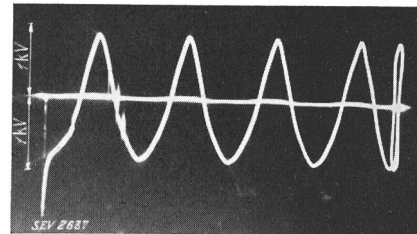
3. Abschalteigenschaften der Schutzapparate für mässige Kurzschlussleistungen.

Die Verhältnisse bei der Abschaltung sind durch zahlreiche Untersuchungen an Hochspannungsschaltern zwar prinzipiell erforscht, sollen jedoch im Zusammenhange nochmals angeführt werden.

Das Stromlosmachen eines Netzteiles kann man sich so vorstellen, dass sich an der Unterbrechungs-



stelle ein Widerstand einschleibt, der dem Werte «unendlich» zustrebt. Die Art der Veränderung dieses Widerstandes ist bei den einzelnen Schutzapparaten verschieden und von wesentlichem Einfluss auf das Abschaltvermögen. Es ist möglich, den gesamten Schaltvorgang mathematisch darzustellen, wenn die Veränderung des Widerstands-



⁵⁾ H. Vollhardt: Rechnerische Bestimmung der Stromzeitkurve und des Grenzstromes, ETZ 1931, S. 37.

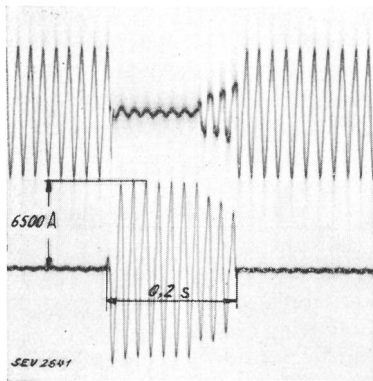


Fig. 15.
Transformator
280 kVA, 8800/555 V,
50 Per./s.,
Kurzschlussabschaltung bei 560 V_{eff} durch
eine 100-A-Griffsicherung.

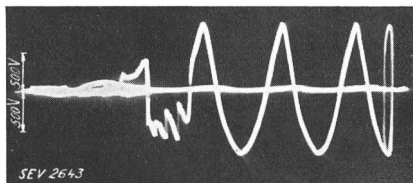


Fig. 16.
Transformator 280 kVA, 8800/555 V, 50 Per./s.,
Kurzschlussabschaltung bei 560 V_{eff} durch 125-A-Röhrensicherung, Kathodenstrahloszillogramm.
Kurzschlussstromstärke 4500 A_{eff}.

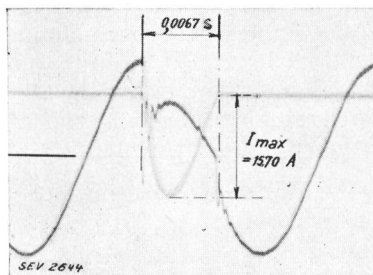


Fig. 17.
Dreiphasengenerator
130 kVA, 350 V,
50 Per./s.,
im Leerlauf auf
275 V erregt.
Kurzschlussabschaltung durch Installationsselbstschalter
250 V 6 A.

wertes der Sicherung oder des Schalters während des Abschaltvorganges bekannt ist. Im Liniendiagramm Fig. 8 wurde ein bestimmter, anlässlich oszillographischer Netzaufnahmen festgestellter Stromverlauf angenommen und der Spannungsverlauf an der Unterbrechungsstelle daraus graphisch bestimmt. Der dargestellte Fall ist immerhin extrem; durch praktisch fast immer vorhandene Parallelbelastungen werden die Ueberspannungen reduziert. Einige Kathodenoszillogramme an Sicherungen geben über die Grösse der jeweils auftretenden Ueberspannungen Aufschluss (Fig. 9 bis 17). In den Oszillogrammen ist jeweils der Spannungsabfall über die Sicherungen während der Abschaltung dargestellt. Bei Einleitung des Kurzschlusses sprach das verzögerungsfreie Kipprelais des Oszillographen an, so dass aus der Strecke links des Löschvorganges jeweils die zur Aufwärmung der Sicherung benötigte Zeit ermittelt werden kann. Die beiden 50periodigen Spannungswellen sind durch ein magnetisches Störfeld in der Anlage etwas verzerrt. Die Stromstärken wurden durch gleichzeitige Aufnahmen mit dem Schleifenoszillo-

graphen ermittelt. Diese Ueberspannungen können direkt bestimmend für das Verhalten von Sicherungstypen werden. Die von der MP oszillographierten Abschaltungen in Hausinstallationen betrafen gewöhnliche (nicht sogenannte träge) Sicherungen mit geschlossenem Schmelzeinsatz, Griffsicherungen mit offenem Schmelzeinsatz sowie Installations-Selbstschalter; dagegen wurden vorläufig keine systematischen Versuche mit sogenannten Hochleistungssicherungen durchgeführt.

Die Beurteilung der verschiedenen Schmelzsicherungen und Installationselbstschalter lässt nach vorstehenden Ausführungen zwei Hauptfragen in den Vordergrund treten:

1. Welche Abschaltleistungen können mit dem betreffenden Apparat beherrscht werden, und
2. welchen Anforderungen genügt ihre Abschaltcharakteristik?

Abschaltleistung der Schutzapparate.

Die Erkenntnis, dass es praktisch schwer hält, für verschiedene Prüflaboratorien die Versuchsbedingungen bei Wechselstrom einheitlich zu gestalten,

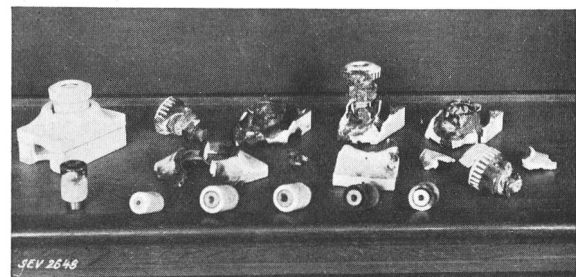


Fig. 18.
Zu den Versuchen Fig. 11 bis 13 benutzte Sicherungen.

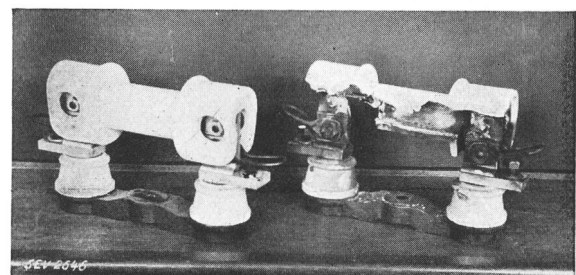


Fig. 19.
Zu den Versuchen Fig. 14, 16 und 17 benutzte Sicherungen.

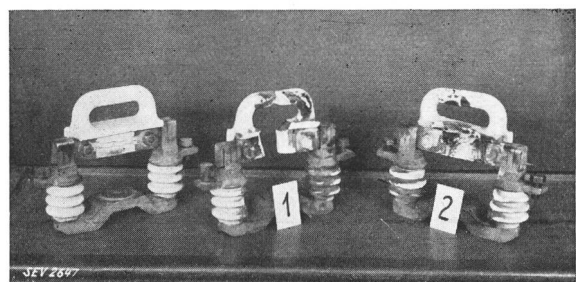


Fig. 20.
Zu dem Versuche Fig. 15 benutzte Sicherungen.

ten, hat dazu geführt, die Sicherungsnormalien, wie solche ausserhalb der Schweiz auch durch den VDE und die IFK (Internationale Installationsfragen-Kommission) festgelegt worden sind, im Sinne einer Prüfung mit Gleichstrom auszubilden. Dabei war auch die Ueberlegung massgebend, dass eine Abschaltung bei Gleichstrom an die Schutzapparate im allgemeinen höhere Anforderungen stellt als eine solche bei Wechselstrom. Die Untersuchungen der MP haben zu einer teilweisen Korrektur dieser Ansicht geführt, denn es hatte sich gezeigt, dass bei Wechselstrom unter gewissen Bedingungen die Höhe der wiederkehrenden Spannungswelle zu Rückzündungen führen kann, während derselbe Apparat Gleichströme ähnlicher Grössenordnung ohne jede Schwierigkeit abschaltet (Fig. 12). Andererseits pflegen Griffsicherungen mit grosser Schmelzmasse, Hochleistungssicherungen und Schalter mit relativ langsamer Kontaktbewegung bei der Gleichstromprobe oft zu versagen, funktionieren hingegen in Wechselstromanlagen einwandfrei. Die Forderung, grosse Abschaltleistungen bei Gleich- und Wechselstrom in einem Apparat zu vereinigen, muss notwendigerweise zu einem Kompromiss führen, der am ehesten verständlich ist, wenn man den grundverschiedenen Aufbau der Gleich- und Wechselstromschalter für grössere Leistungen betrachtet. Die aus dem Hochspannungsschalterbau bekannte Erscheinung der kritischen Abschaltleistung tritt vereinzelt auch bei Niederspannungsschaltern und Sicherungen auf. Bei Abschaltströmen, die nur ein geringes Vielfaches (3- bis 5fach) der Nennstromstärke des betreffenden Apparates betragen, besteht sowohl bei Schmelzsicherungen als auch bei Installationsselschaltern bisweilen eine ausgesprochene Neigung zu Lichtbogenbildung, während bei höheren Stromstärken bei Installationsselschaltern infolge der magnetischen Blaswirkung, bei Sicherungen mit geschlossenen Schmelzeinsätzen infolge der Druckverhältnisse im eigentlichen Schmelzraum der Stromunterbruch einwandfrei erfolgt.

Sicherungen mit geschlossenem Schmelzeinsatz werden normalerweise für Nennstromstärken bis 200 A und Nennspannungen bis 500 V gebaut, für die Spannung 250 V sind kleinere Modelle im Handel.

Die von der MP durchgeführten Untersuchungen erstreckten sich auf die Gleichstromprüfung einer grossen Zahl Fabrikate und Typen bei Prüfstromstärken bis 6000 A und Prüfspannungen von 550 V.

Die Versuche in 500-V-Wechselstromanlagen mit Abschaltstromstärken von einigen tausend A ergaben ohne Zusammenhang mit der absoluten Stromstärke rasch verlaufende Ueberspannungen; diese können bei 60-A-Elementen zu Rückzündungen und Stehlichtbogen führen, trotzdem die gleiche Elemententype Gleichströme der gleichen und selbst wesentlich höherer Stromstärken einwandfrei abgeschaltet hatte (Fig. 18).

Griffsicherungen, die in Transformatorstationen und Verteilanlagen üblich sind, und von denen

verschiedene Modelle (Stichmass 11 und 15 cm) für Nennstromstärken von 100 bis 400 A geprüft wurden, weisen ein anderes Verhalten auf. Sämtliche Wechselstromabschaltungen waren mit Lichtbogenbildung während mehrerer Halbperioden verbunden; bei Kurzschlussabschaltungen mit 4000 A und 550 V traten bei den halboffenen und geschlossenen Typen fast regelmässig Zerstörungen der Porzellanteile auf (Fig. 19 und 20). Bei einer Type bestand der Griff aus einem innen asbestverkleideten, verstärkten Bakelitrohr, Stichmass 150 mm; die Abschaltung erfolgte hier normal. Gelegentlich einer grösseren Versuchsgruppe bei einer städtischen Stromversorgung (EW der Stadt Bern) wurde ein Modell für 400 A, welches das betreffende Werk durchgehend in seinen Verteilstationen als Hauptsicherungen benützt, bei verschiedenen Spannungen und Stromstärken untersucht. Hierbei erwies sich eine Lichtbogendauer von ca. 15 Perioden bei Stromstärken von ca. 1500 bis 2000 A als zulässig. Bei länger andauernden Lichtbogen bestand aber die Gefahr des Uebergreifens auf die benachbarten Phasen oder auf Erde. Die Grenzstromstärke betrug bei einer Netzspannung von 380 V 1800 A, bei einer solchen von 500 V 1300 A; bei 250 V konnten Abschaltungen bis 5800 A_{eff} ohne Störungen durchgeführt werden. Bei den günstigsten Abschaltungen war der Schmelzdraht nur auf eine kurze Distanz von ca. 1 bis 2 cm ausgeschmolzen. Die Abschaltungen waren in keinem Falle mit Ueberspannungen verbunden, da die Sicherungen beim natürlichen Nulldurchgange des Stromes löschten (Fig. 15). Bei Gleichstromprüfungen versagten aber alle diese Sicherungen.

Die Installationsselschalter sind erst in letzter Zeit in betriebssicherer Ausführung für grössere Kurzschlußstromstärken von ca. 1000 bis 1500 A_{eff} und Spannungen bis 380 V entwickelt worden. Der Abschaltvorgang kann bei ihnen durch konstruktive Mittel so günstig beeinflusst werden (magnetische Funkenlöschung), dass die oben erwähnten Grenzleistungen auch bei Gleichstrom erreicht werden. Bei guten Ausführungen der Schalter sind keine kritischen Stromstärken, also schlechte Abschaltungen bei geringen Ueberströmen festgestellt worden.

Verzögerte oder träge Sicherungen sind in ihrem Verhalten bezüglich Ueberstromsicherheit den normalen geschlossenen Schmelzeinsätzen ähnlich; die MP hat allerdings bis jetzt noch keine Gelegenheit gehabt, Netzversuche mit diesen vorzunehmen.

Hochleistungssicherungen, die in jüngster Zeit als geschlossene Schmelzeinsätze für einige 100 A Nennstromstärke entwickelt worden sind, und mit denen besonders die «Bewag» (Berliner Städtische Elektrizitätswerke A.-G.) ausgedehnte Versuche durchgeführt hat, können, wie aus den Versuchen zu schliessen ist, Kurzschlußströme bis 40 000 A bei 380 V abschalten. Bei schweizerischen Elektrizitätswerken sind unseres Wissens bis jetzt derartige Schutzapparate in grösserem Massstabe noch nicht verwendet worden.

Strom-Zeit-Charakteristik der verschiedenen Schutzapparate.

Hatten wir in vorstehenden Ausführungen die Grenze der Abschaltleistung für die verschiedenen Schutzmittel untersucht, so soll im folgenden deren Strom-Zeitcharakteristik, d. h. deren Abschaltzeit in Abhängigkeit von der Stromstärke behandelt werden. Die ideale Lösung ist vom technisch-wirtschaftlichen Gesichtspunkte aus jene, welche eine maximale Ausnutzung des zu schützenden Leitungsquerschnittes über die ganze Belastungskurve gestattet. Die Abschaltcharakteristiken (Strom-Zeitkurve) von Sicherungen mit geschlossenem Schmelzeinsatz, verzögerten Sicherungen und Installations-Selbstschaltern sind in den Fig. 21 bis 23 aufgezichnet. Da es aus fabrikationstechnischen Gründen unmöglich ist, alle Einzelobjekte einer dieser Typen absolut gleich zu machen und man daher mit einer gewissen Streuung rechnen muss, so ist die Charakteristik erst durch Angabe der Streubänder bestimmt. Die Streuung selbst darf ein gewisses Mass nicht überschreiten, da sie die Selektivität des Leitungsschutzes beeinträchtigt.

Der Kurvenverlauf ist bei den verschiedenen Schutzmitteln wesentlich verschieden.

Die Streubänder der gewöhnlichen *Schmelzsicherungen* sind durch die minimalen und maximalen Prüfströme der in den einzelnen Ländern geltenden Vorschriften festgelegt. Die Konstruktion macht infolge der hohen Schmelztemperaturen des Silberdrahtes (ca. 800° C) die Abschaltzeit unabhängig von den äusseren Temperaturen, bedingt

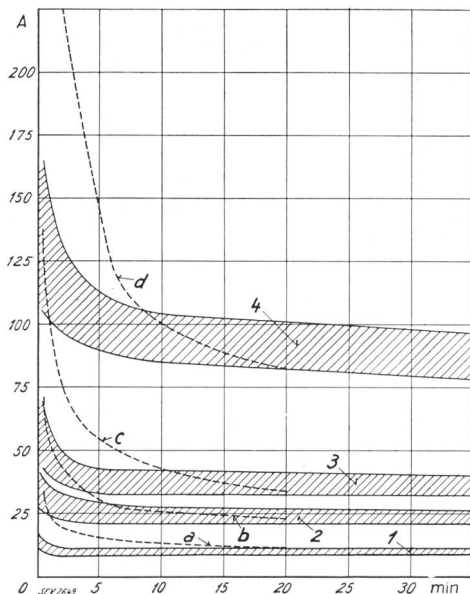


Fig. 21.

Streubänder von Sicherungen mit geschlossenem Schmelzeinsatz und Stromzeitkurven von Leitern entsprechender Nennstromstärken.

- | | | | |
|---|------|---|------------------|
| 1 | 6 A | — | Nennstromstärke, |
| 2 | 15 A | — | » |
| 3 | 25 A | — | » |
| 4 | 60 A | — | » |
- a) 2 × 1 mm² RS gerollt unter Teppich
 b) 2 × 2,5 mm² RS gerollt unter Teppich
 c) 3 × 6 mm² GS in 23 mm Bergmannrohr (Unterputzmontage)
 d) 3 × 20 mm² GS in 29 mm Bergmannrohr (Unterputzmontage)
 Übertemperatur 30° C.

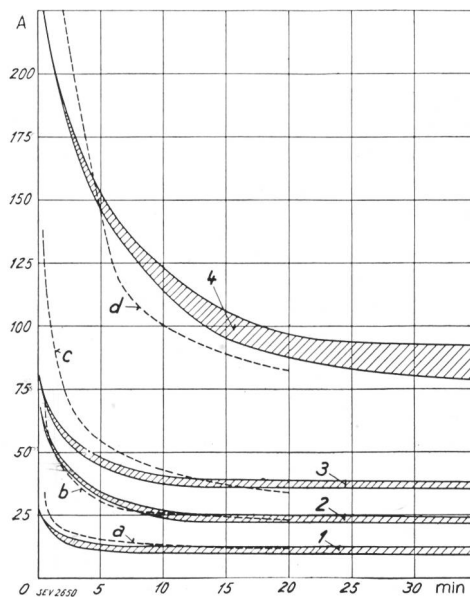


Fig. 22.

Streubänder von trägen Schmelzsicherungen (1 bis 4) und Strom-Zeit-Kurven von Leitern entsprechender Nennstromstärken (a bis d).

- | | | | |
|---|------|---|-----------------|
| 1 | 6 A | — | Nennstromstärke |
| 2 | 15 A | — | » |
| 3 | 25 A | — | » |
| 4 | 60 A | — | » |
- a) 2 × 1 mm² RS gerollt unter Teppich
 b) 2 × 2,5 mm² RS gerollt unter Teppich
 c) 3 × 6 mm² GS in 23 mm Bergmannrohr (Unterputzmontage)
 d) 3 × 20 mm² GS in 29 mm Bergmannrohr (Unterputzmontage)
 Übertemperatur 30° C.

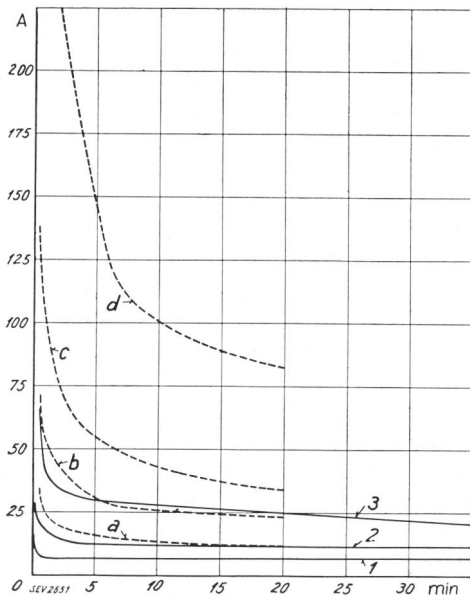


Fig. 23.

Strom-Zeit-Kurven von Installationselbstschaltern (1 bis 3) und Strom-Zeit-Kurven von Leitern entsprechender Nennstromstärken (a bis d).

- | | |
|---|--|
| 1 | Installationselbstschalter 250 V, 5 A (Strombegrenzer) |
| 2 | Stöpselschalter 250 V, 6 A |
| 3 | Stöpselschalter 250 V, 15 A |
- a) 2 × 1 mm² RS gerollt unter Teppich
 b) 2 × 2,5 mm² RS gerollt unter Teppich
 c) 3 × 6 mm² GS in 23 mm Bergmannrohr (Unterputzmontage)
 d) 3 × 20 mm² GS in 29 mm Bergmannrohr (Unterputzmontage)
 Übertemperatur 30° C.

aber gleichzeitig eine geringe Trägheit, da die Wärmeentwicklung in dem kleinen Schmelzeinsatz aus Sicherheitsrücksichten ein gewisses Mass nicht überschreiten darf. Naturgemäss wird das Streuband von einem Fabrikat im allgemeinen nicht voll ausgenützt, aber die Abweichungen der einzelnen Schmelzeinsätze unter sich sind immerhin derart gross, dass auf die Angabe einer mittleren Strom-Zeit-Charakteristik im untersuchten Ueberstromgebiete verzichtet worden ist.

Ein Vergleich der Streubänder mit den zugehörigen Leitungscharakteristiken für thermisch ungünstige Verlegung führt zum interessanten Ergebnis, dass beispielsweise der Querschnitt 20 mm^2 , der normalerweise mit 60 A abzusichern ist, einerseits eine unzulässige Erwärmung bei Dauerbelastung zwischen 80 und 95 A erfährt, anderseits jedoch zur bessern thermischen Ausnützung bei Beanspruchungen über eine Zeitdauer von weniger als 5 Minuten eine mehrfache Erhöhung der Abschmelzstromstärke gestatten würde. Dieser Mangel haftet prinzipiell, allerdings in geringerem Masse, auch den Schmelzsicherungen für kleinere Stromstärken an, wie dies aus den Bändern 1 bis 3 der Fig. 21 ersichtlich ist.

Die Eigentümlichkeit, dass der sogenannte minimale Prüfstrom, der von einer Sicherungstypen während einer Stunde ausgehalten wird, unter Umständen eine Ueberbeanspruchung der Leitung bedeutet, erweckt zunächst den Eindruck, dass mit den Sicherungen ein Leitungsquerschnitt nur ungenügend geschützt sei. Diese Annahme ist aber nicht zutreffend, denn infolge der allmählichen Oxydation des thermisch hoch beanspruchten Schmelzdrahtes reduziert sich die dauernd zulässige Belastung der Einsätze auf den ca. 1,1- bis 1,15fachen Betrag der Nennstromstärke, so dass, wenn nicht starker Verschleiss an Sicherungen in Kauf genommen wird, die Grenzstromstärke nicht ausgenützt werden kann und deshalb eine unzulässige thermische Beanspruchung der Leitung kaum auftritt.

Ungünstig für die grösstmögliche Ausnützung des Leitungsquerschnittes wirkt sich die Abweichung zwischen Leitungs- und Sicherungscharakteristik im Gebiete nur kurzzeitiger Ueberlastung aus. Die Einschaltstromstösse, wie sie bei manchen Verbrauchern elektrischer Energie, insbesondere bei Motoren, auftreten, zwingen oft zu einer reichlicheren Bemessung der Leitung und damit zu einer entsprechenden Verteuerung der Installation, um bei Einschaltstromstössen oder kurzzeitigen Ueberlastungen das Ansprechen der Sicherungen zu vermeiden. Diesen Nachteil weisen die sogen. Griffsicherungen, wie sie in Anlagen mit Nennstromstärken von einigen hundert A stark verbreitet sind, in geringerem Masse auf, da ihr Schmelzkörper im Verhältnis zu den geschlossenen Einsätzen bedeutend voluminöser und ausserdem die Gefahr kurzzeitiger Belastungsstösse an und für sich geringer ist, da zumeist eine grössere Zahl Verbraucher an der zu schützenden Leitung angeschlossen sind und sich dadurch die Wahrscheinlichkeit des Zusam-

mentreffens von Stromstössen vermindert. Die beschränkte Abschaltleistung dieser offenen Schmelzeinsätze darf jedoch nicht ausser acht gelassen werden.

Die *trägen Sicherungen*, bei denen das Abschaltorgan eine prinzipielle Umbildung erfahren hat, kommen dem berechtigten Verlangen nach besserer Anpassung an die Leitungscharakteristik bei kurzzeitiger Ueberlastung entgegen. Statt den gesamten Strom durch entsprechend dimensionierte Schmelzdrähte zu führen, ist bei einer Konstruktion eine Parallelschaltung einer Lötstelle, die bei etwa 80 bis 120° C öffnet, mit schwach dimensionierten Abschmelzdrähten, welche die eigentliche Abschaltung nach Oeffnung der Lötstelle besorgen, vorgesehen. Die Zeitkonstante der Lötstelle ist nun so gewählt worden, dass die Anpassung an die Leitercharakteristik verbessert ist. Bei andern Konstruktionen sind die Schmelzdrähte in der Mitte durch eine Lötstelle mit niedriger Schmelztemperatur ersetzt und entsprechend stärker als bei den normalen Schmelzeinsätzen dimensioniert. Die relativ tiefe Schmelztemperatur der Lötstelle ermöglicht eine bessere, wenn auch nicht vollkommene Anpassung an die Umgebungstemperatur und die geringe Erwärmung bei Nennstrom gestattet die Höherlegung der dauernd zulässigen Belastung bis nahe an die Grenzstromstärke, da eine Veränderung der Lötstelle oder der Schmelzdrähte nicht auftritt.

Der Grad der Trägheit der einzelnen Konstruktionen ist verschieden, man spricht von kurz- und langträgen Schmelzeinsätzen. Die Kurven 1 bis 4 der Fig. 22 scheinen zu beweisen, dass überstromträge Sicherungen in gewissen Fällen die zugehörigen Querschnitte nicht vor zu grosser Erwärmung zu schützen vermögen (60-A-Kurve bei einer Belastungsdauer von mehr als 5 Min., 15-A-Kurve bei einer solchen von mehr als 15 Min.). Diese Gefahr ist nun in Wirklichkeit aus zwei Gründen nicht gross: erstens sind die eingetragenen Leitercharakteristiken *a* bis *d* bezüglich Abkühlung sehr ungünstig und dann wird das Streuband der verzögerten Sicherung wegen des niedrigen Schmelzpunktes der Lötstellen von der Umgebungstemperatur beeinflusst und wird in jenen Fällen, wo bei hohen Raumtemperaturen wegen der Leitererwärmung Zerstörungen der Isolation eintreten können, merklich tiefer liegen als in Fig. 22.

Die sogenannten *Installationsselbstschalter*, die als Sockelapparate oder in Schraubstöpselform gebaut werden, sind im Prinzip Ueberstromschalter mit sehr kleinen Dimensionen. Die Auslösung kann entweder rein elektromagnetisch oder rein thermisch oder durch Kombination beider Einwirkungen erfolgen. Demzufolge ist auch die Auslösecharakteristik verschieden.

Die Dimensionen der Schalter machen es ohne weiteres verständlich, dass der Kurzschlusssicherheit und damit auch dem Anwendungsgebiet gewisse Grenzen gezogen sind. Da die rein magnetisch auslösenden Installationsselbstschalter von einer ge-

wissen kritischen Stromstärke an unverzüglich ausschalten, also unselektiv sind, und die Kurzschlussicherheit der Schalter mit rein thermischer Auslösung ungenügend ist, sind alle bekannteren Konstruktionen von dem Prinzip nur thermischer oder nur magnetischer Auslösung abgegangen. Die maximale Abschaltleistung der heutigen Installationschalter bester Konstruktion hatten wir oben zu 1500 A bei 380 V angegeben. Hiermit werden auch die Bedenken für deren Anwendung bis zu Nennstromstärken von 15 A in normalen Hausinstallationen hinfällig, da ja praktisch diese Kurzschlussstromstärke nicht erreicht wird. Das Streuband der Installationsselbstschalter ist in beträchtlichem Masse von der Umgebungstemperatur sowie Grösse und Dauer der vorangegangenen Betriebsbelastung abhängig. Da hierüber keine genauen Angaben zur Verfügung standen, so wurden als Kurven nur bei Laboratoriumstemperatur gemessene Werte aufgezeichnet. Alle untersuchten Fabrikate besaßen magnetisch-thermische Auslösung. Bis zu einer gewissen Grösse (ca. 5facher Nennstrom) wird bei solchen Apparaten die Auslösung durch ein thermisches Relais (Bimetallstreifen) gesteuert, wogegen bei grösseren Ueberströmen die Auslösung momentan elektromagnetisch erfolgt.

Die Anpassung an die Leitungscharakteristik ist bei diesen Apparaten im Gebiete der thermischen Auslösung erreicht.

Die bereits oben dargelegte Tatsache, dass normale Sicherungen mit geschlossenem Schmelzeinsatz dauernd nicht wesentlich über die Nennstromstärke hinaus beansprucht werden können, hat bei 1 und 1,5 mm² Querschnitt, der durch 6-A-Sicherungen geschützt wird, zu Schwierigkeiten geführt; denn die zunehmende Verbreitung elektrischer Haushaltgeräte erweckte das Bedürfnis nach Sicherungen, welche die volle «thermische» Dauerausnutzung des Querschnittes gestatten⁶⁾ 7). Durch bemerkenswerte neue Konstruktionen von Installationsselbstschaltern gelang es, die Belastungsgrenze der 1- und 1,5-mm²-Leitungen dauernd auf 10 A zu bringen (Fig. 23, Kurve 2).

In Frankreich verfolgte die Konstruktion der Installationsselbstschalter ein anderes Ziel. Man benützte sie aus tariflichen Gründen als Strombegrenzer. Dabei war eine Ueberlastung von einigen Sekunden, wie sie als Folge von Einschaltvorgängen (Motoren, Lampen) auftrat, ohne Abschaltung zulässig. Die Charakteristik eines solchen Apparates geht aus Kurve 1, Fig. 23, hervor.

Gegenüber Schmelzsicherungen haben die Selbstschalter den Vorteil, nach einer selbsttätigen Auslösung sofort wieder betriebsbereit zu sein.

4. Ueberstromschutz für grosse Kurzschlussleistungen.

Beim Ueberstromschutz für grosse Kurzschlussleistungen bei vermaschten Netzen, den wir nur

⁶⁾ Dr. W. Zimmermann: Ausnutzung und Schutz der Verteilungsstromkreise. ETZ 1931, S. 1379.

⁷⁾ Dr. W. Zimmermann: Anpassung der Sicherungs-

sehr kurz streifen möchten, sind prinzipiell drei Wege beschritten worden:

1. Man baute Griffsicherungen mit entsprechenden Schmelzeinsätzen bis 600 A ein. Trotzdem die Abschaltleistung derselben sehr beschränkt ist, waren die Resultate deshalb recht gut, weil

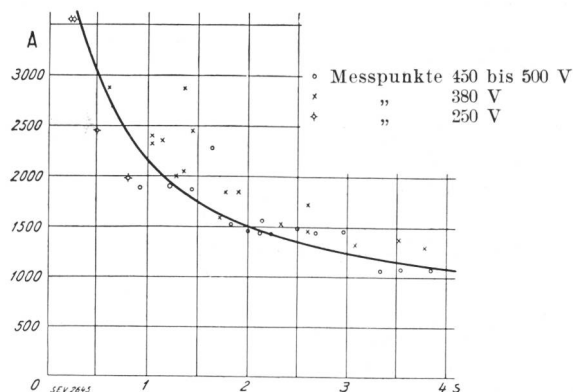


Fig. 24.
Strom-Zeit-Charakteristik von 400-A-Griffsicherungen
(Modell EW Bern).

kurzschlussartige Beanspruchungen selten und die Sicherungen gegen kurzzeitige Ueberlastungen infolge ihrer Trägheit nicht empfindlich waren (Fig. 24).

2. Man verzichtete überhaupt auf jeden Ueberstromschutz; dieser Grundsatz entstammt der amerikanischen Praxis und ist gar nicht so unberechtigt, wie durch Versuche der «Bewag» nachgewiesen wurde⁸⁾. Bedenkt man nämlich, dass die Hauptzahl der in solchen Anlagen auftretenden Störungen Kurzschlüsse im Kabel sind, welche bei genügender Grösse des Kurzschlußstromes ausbrennen und dadurch als Selbstschutz wirksam sind, so hat eine solche Einstellung ihre Berechtigung.
3. Als letzte Lösung endlich wurden Spezialsicherungen (Hochleistungssicherungen) mit geschlossenem Schmelzeinsatz für grosse Stromstärken und Abschaltleistungen, wie sie in Niederspannungsanlagen als Grenzwerte auftreten, vorgeschlagen.

5. Schlussbemerkungen.

Der Erfolg der verschiedenen in den Kreis unserer Betrachtungen gezogenen Mittel hängt sehr von der richtigen Anwendung ab. So ist es technisch falsch und unmöglich, Leitungsschutz und Motorschutz mit gleichen Schutzapparaten bewerkstelligen zu wollen, trotzdem dies oft versucht wird. Eine Leitungscharakteristik ist stets wesentlich von der Motorbelastungscharakteristik verschieden.

Die Art der Entwicklung hat mit sich gebracht, dass ein Leitungsschutzsystem meist nicht strikte durchgeführt werden kann, sondern dass in man-

organe für Leitungen an die betrieblichen Belastungsverhältnisse. ETZ 1932, S. 241 und 289.

⁸⁾ Siehe Literaturhinweis 1.

chen Fällen mit Vorteil Selbstschalter und träge Sicherungen in Verbindung mit normalen Schmelzsicherungen verwendet werden. Eine solche Kombination ist möglich, wenn die Nennstromstärke der gewöhnlichen (nichtträgen) Sicherung des vorangehenden grösseren Querschnittes wesentlich höher gewählt wird; z. B. beim Ersatz der 6-A-Hausinstallationssicherungen durch träge Schmelzsicherungen oder verzögerte Installationsselbstschalter muss als vorgeschaltete normale Absicherung unbedingt ein 25-A-Einsatz gewählt werden. Dies erfordert aber, dass die den trägen Sicherungen oder Installationsselbstschaltern vorgeschaltete Leitungsstrecke für eine Stromstärke von 25 A bemessen wird.

Den Leitungsschutzapparaten wird in gewissen Fällen bei genullten Netzen noch die weitere Aufgabe des «Berührungsschutzes» zugedacht. Für die Beurteilung dieser Schutzwirkung müssen einerseits die einschlägigen Vorschriften, andererseits insbesondere die Strom-Zeit-Charakteristik der Schutzapparate im Bereiche der ersten 10 Sekunden einer näheren Betrachtung unterzogen werden. Da uns zur Zeit für diesen Teil der Abschaltcharakteristik weder für normale Schmelzsicherungen noch für träge Sicherungen und Installationsselbstschalter ausreichendes eigenes Versuchsmaterial zur Verfügung steht, soll auf die Berührungsschutzfrage in einer späteren Arbeit näher eingetreten werden.

Fortschritte der Hochspannungstechnik in den letzten Jahren.

Von Prof. A. Imhof, Chefingenieur der Micafil A.-G., Zürich-Altstetten.

Anhand umfassend zitierter Literatur gibt der Autor einen Ueberblick über die neueste Entwicklung und die Tendenzen der Hochspannungstechnik. Zunächst wird über die Physik des Durchschlages und des Ueberschlages berichtet, dann über den Stand der organischen und anorganischen Isolierstoffe, speziell des Porzellans, der Kabeltechnik, der Durchführungen, der Kondensatoren und der Trockenhochspannungsapparate. Zum Schluss werden die Fortschritte in Laboratoriumseinrichtungen und Prüfmethoden beschrieben, das «Barrierenprinzip» erörtert und die heute angewandten Methoden zur Erzeugung hoher Spannungen angedeutet.

537.5+621.3.048+621.315.2+621.315.6+621.316.313+621.319.4
Cet article, contenant de nombreuses indications de sources, donne un aperçu sur les récents progrès et les tendances de la technique des hautes tensions. L'auteur traite tout d'abord le côté physique du percement et du contournement, puis les matières isolantes organiques et inorganiques, la technique des câbles, les traversées, les condensateurs et les appareils à haute tension sans isolant liquide. Pour terminer, l'auteur décrit les progrès réalisés dans les installations de laboratoires et dans les méthodes d'essai, explique le principe des «barrières» et esquisse les méthodes appliquées aujourd'hui pour produire de très hautes tensions.

I. Wissenschaftliche Arbeiten.

Das Gebiet der Dielektrika ist in den letzten Jahren mit Bienenfleiss wissenschaftlich bearbeitet worden und hat viele auch für die technische Praxis wertvolle Ergebnisse gebracht.

Die bekannten Theorien über den elektrischen Durchschlag haben einen weiteren Ausbau erfahren. Für diejenigen Leser, welche den Publikationen auf diesem Gebiet nicht genügend folgen können, um sich den Ueberblick über die Entwicklung der Durchschlagstheorien selbst zu bilden, sei zunächst auf eine zusammenfassende Arbeit von J. K. Gillett¹⁾ hingewiesen durch Wiedergabe einer kurzen, in der ETZ²⁾ erschienenen Zusammenfassung. Ausgehend von Wagnerschen «Wärmedurchschlag», den man heute als unvollständig erklärt ansieht, da er den Einfluss der Isolatorstärke und der Wärmeableitung durch die Elektroden unberücksichtigt lässt, leitet Gillett auf die allgemeinere Theorie von Rogowski und die spezielleren von Dreyfus und Fock über, die Beziehungen zwischen Durchschlagspannung, Isolatorstärke und Temperatur festlegen und Formeln für die direkte Berechnung der Durchschlagspannung aus Wärmekonstanten, Dicke und Verlustfaktor aufstellen. Nachprüfungen hielten diese Theorien nur oberhalb bestimmter Temperaturen stand, während im darunter liegenden Temperaturbereich der Einfluss von Temperatur, Zeit und Leitfähigkeit fast verschwindet. Dem hier vorhandenen «rein elektrischen» Durchschlag scheinen die «Spalttheorien» von Rogowski, Griffith und Horowitz näher zu kommen, die das Vorhandensein winziger Spalten im Di-

elektrikum annehmen, die unter dem Einfluss des elektrischen Feldes gegen die Kräfte der Oberflächenspannung und der Elastizität aufbrechen. Aus der molekularen und technischen Festigkeit sich ergebende Widersprüche schienen in der Homogenität der Stoffe begründet zu sein. Aus einer Betrachtung der Feldverteilung in isotropen und anisotropen Medien wird die höhere Festigkeit von Stoffen möglichst feiner Mikrostruktur abgeleitet.

Unter den experimentellen Arbeiten, welche der weiteren Erforschung des Durchschlagsgebietes dienen, seien u. a. die Untersuchungen von R. Jos über die Durchschlagsfestigkeit einiger fester Isolierstoffe bei Beanspruchungen von langer bis zu ganz kurzer Dauer³⁾ erwähnt: Zunahme der Festigkeit mit abnehmender Beanspruchungsdauer, bei einem Zeitintervall von 10^{-9} bis 10^4 s; Durchschlagsverzögerung erst bei kürzesten Zeiten. W. Rogowski, Flegler und Tanner haben nachgewiesen, dass der Durchschlag bei Stoßspannungen und Atmosphärendruck in einem rapiden Zusammenbruch der Spannung besteht; das ganze Durchschlagsphänomen ist innert rund 10^{-8} s beendet. W. Rogowski und H. Klemperer haben darnach gezeigt, dass auch bei statischem Durchschlag der Zusammenbruch ähnlich rasch erfolgt⁴⁾. Konrad Meyer⁵⁾ unternahm den Versuch, die verschiedenen vorhandenen Anschauungen über den Durchbruch fester Isolatoren zu einer einheitlichen Theorie, die sich nur auf experimentell nachweisbare Voraussetzungen stützt, zusammenzufassen. Die Möglichkeit dazu bot die Anschauung, dass auch der rein elektrische Durchschlag von der Temperatur beeinflusst wird, aber erst von einer kritischen Temperatur an. Diese Anschauung bedingt

¹⁾ Siehe Literaturverzeichnis am Schluss.