Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 65 (1974)

Heft: 18

Artikel: Leitungsschutz gestern - heute - morgen

Autor: Bächtold, R.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915459

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: 09.07.2025

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

Leitungsschutz gestern – heute – morgen

Von R. Bächtold

621.316.91

Der Artikel untersucht den «Schutzgrad» der heute bekannten Leitungsschutzsysteme. Dabei wird vor allem auf die Erwärmungen eingegangen, welche der durch die Leitungsschutzvorrichtungen geschützte Leiter im ganzen Überstrombereich erhalten kann.

Dans cet article, on étude le degré de protection des systèmes de protection de canalisation actuellement connus, en considérant surtout les échauffements que peuvent atteindre, dans tout le domaine des surintensités, les conducteurs protégés par des dispositifs de protection de canalisation.

1. Einleitung

Jedes kleine Kind, das sich schon einmal an einem Bügeleisen die Finger verbrannt hat, musste die schmerzliche Erfahrung machen, dass der elektrische Strom neben seinen segensreichen Auswirkungen auch solche gefährlicher Art haben kann. Damit diese unerwünschten Auswirkungen einen gewissen Rahmen nicht sprengen, müssen in elektrischen Anlagen Schutzeinrichtungen eingebaut werden. Ein sehr beschränkter Bereich dieser notwendigen Schutzeinrichtungen betrifft den Leitungsschutz.

Wie in jedem Zweig der Technik hat es auch in diesem Bereich in den letzten Jahrzehnten grosse Veränderungen gegeben, so dass es interessant sein dürfte, einen kleinen Rückblick auf die alten Leitungsschutzsysteme, aber auch einen Ausblick auf die neuen, wahrscheinlich kommenden Systeme zu halten.

An sich ist der Name Leitungsschutz nicht ganz richtig, denn bei einer Überlast ist nicht der Leiter, sondern seine Isolation der schwächste Teil. Die früher verwendeten Gummiisolationen alterten unter dem Einfluss von erhöhten Temperaturen ziemlich rasch, wurden brüchig, und die Isolationsfähigkeit sank ab. Die heute verwendeten Thermoplastisolationen zeigen wohl kaum eine Alterung, aber sie werden bei erhöhten Temperaturen weich, so dass dann relativ geringe mechanische Beanspruchungen genügen, um sie zu beschädigen. Diese Gefahr besteht bei Dauertemperaturen ab etwa 70 °C. Wenn man bedenkt, dass normalerweise mit Umgebungstemperaturen von etwa 30 °C gerechnet werden muss (diese Temperatur ist übrigens auch in den HV 42.224.3 [1]) erwähnt), bleibt für die eigentliche Erwärmung des Leiters durch den Strom noch ein Wert von 40 °C übrig. Diese Erwärmung sollte natürlich auch dann nicht überschritten werden, wenn mehrere Leiter nebeneinander in einem Rohr und Unterputz verlegt sind. Unter den erwähnten Umständen wird diese Erwärmung von den in den HV 42.512.1 erwähnten Minimalnennquerschnitten beim etwa 1,5...1,7fachen Nennstrom erreicht, während ein einzelner, sich in freier Luft befindlicher Leiter bei diesem Strom natürlich bei weitem nicht um 40 °C, sondern nur um knapp 20 °C erwärmt wird.

Ein optimal bemessener Leitungsschutz sollte daher in jedem Überlastfall eine Erwärmung des Leiters um mind. 40 °C, wenn er in einem Rohr verlegt ist, oder entsprechend weniger, wenn er sich frei in der Luft befindet, zulassen. Am Beispiel eines frei aufgehängten Kupferleiters von 1,5 mm² Querschnitt mit schwarzer Thermoplastisolation sei im folgenden das Verhalten der verschiedenen Leitungsschutzvorrichtungen untersucht.

Die heute und auch früher angewandten Leitungsschutzvorrichtungen lassen für einen Leiter von 1,5 mm² Querschnitt einen Dauerstrom von etwa 17 A zu. *Ein in freier Luft aufgespannter Cu-Leiter mit schwarzer Tdc-Isolation erwärmt sich unter diesem Strom um 19 °C.* Bei höheren Dauerströmen steigt die Endtemperatur, die der Leiter erreicht, rasch an.

In Fig. 1 ist die Endtemperatur eines 1,5-mm²-Leiters in Abhängigkeit des Dauerstromes eingetragen, während Fig. 2 den Temperaturanstieg dieses Leiters bei Strömen von 17, 25 und 40 A zeigt. Die Zeitkonstante beträgt 78 s, d.h., nach 78 s Einwirkung eines konstanten Stromes hat der Leiter etwa 64 % seiner Endtemperatur erreicht.

Um eine Beschädigung der Leiterisolation zu vermeiden, muss bei Überströmen die Dauer der Stromeinwirkung begrenzt werden. Der Umfang dieser Begrenzung kann der Fig. 3 entnommen werden. Man sieht daraus, dass z.B. ein Strom von 40 A, der während 15 s fliesst, den Leiter um den gleichen Betrag erwärmt, wie wenn dieser mit einem Strom von 17 A

[1]) HV = Hausinstallations-Vorschriften des SEV, Ausgabe 1960.

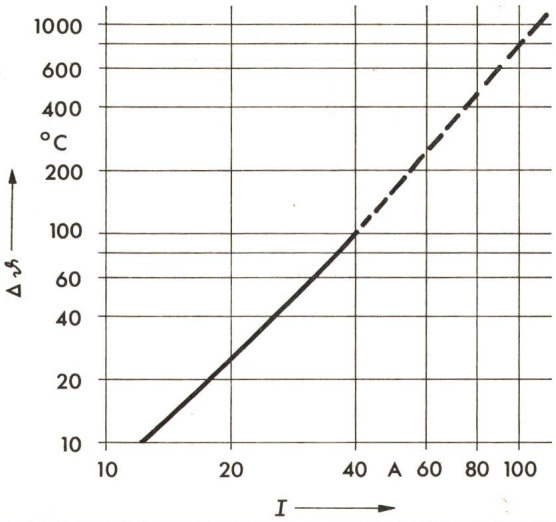


Fig. 1 Max. Erwärmung $\Delta\vartheta$ eines Kupferleiters von 1,5 mm² in Abhängigkeit von der Belastung durch den Dauerstrom I

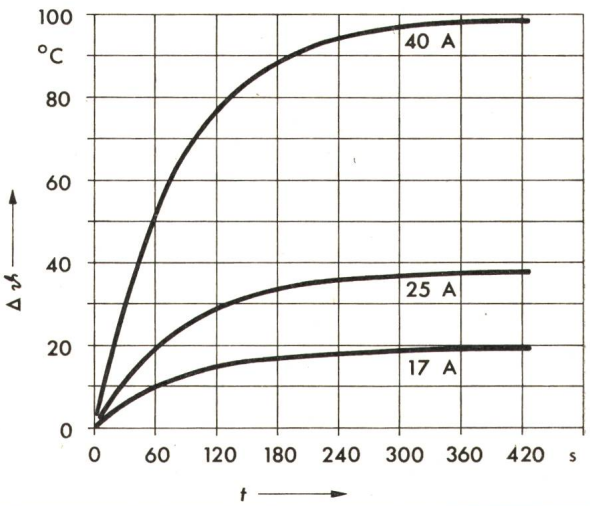


Fig. 2 Temperatur $\Delta\vartheta$ eines Kupferleiters von 1,5 mm² in Abhängigkeit von der Zeit t und vom Dauerstrom I

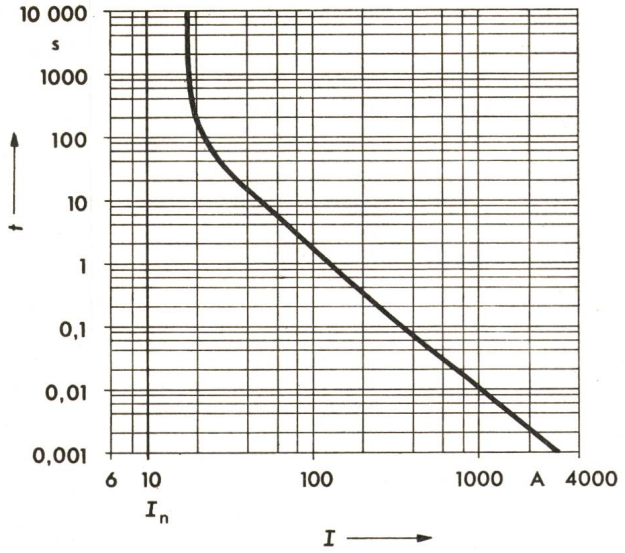


Fig. 3 Strom–Zeit-Kennlinie eines Kupferleiters von 1,5 mm² für gleiche Erwärmung

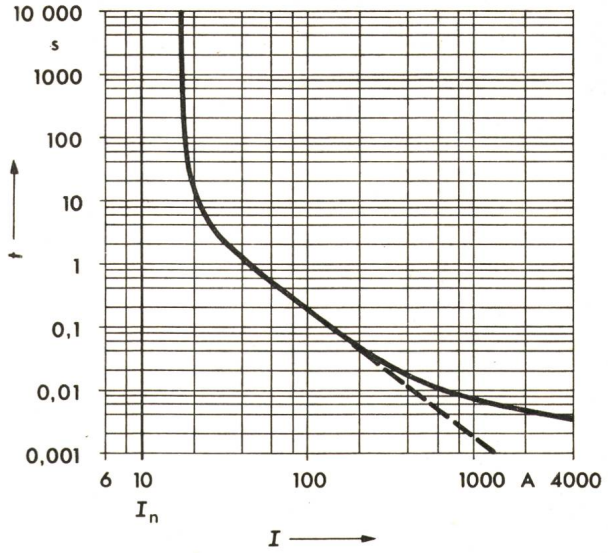


Fig. 4 Abschaltkennlinie (▬▬) und Schmelzkennlinie (▬ ▬ ▬) eines Silberdrahtes von 0,45 mm ⌀

dauernd belastet wäre. Diese Kurve kann als Gefahrenkennlinie des Leiters betrachtet werden, wobei natürlich im Kurzschlussgebiet wegen der sehr kurzen Dauer der Strom- und damit der Temperatureinwirkung wesentlich höhere Erwärmungen (bis ca. 100 °C) zugelassen werden können.

Die folgenden Untersuchungsergebnisse geben die Leitererwärmungen an, welche die verschiedenen Leitungsschutzsysteme im gesamten Strombereich im 50-Hz-Netz zulassen. Sämtliche Resultate beziehen sich auf die Erwärmungen eines frei aufgespannten schwarzen 1,5-mm²-Tdc-Leiters, welcher durch eine Leitungsschutzvorrichtung des Nennstromes von 10 A geschützt ist. Sinngemäss können die Resultate auch auf andere Leiter und andere Verlegungsarten übertragen werden.

2. Leitungsschutzsysteme

2.1 Offener Schmelzdraht

Die älteste und einfachste Leitungsschutzvorrichtung besteht in einem Stück Kupfer- oder Silberdraht mit einem gegenüber dem zu schützenden Leiter reduzierten Querschnitt. Zum Schutze eines Cu-Leiters von 1,5 mm² Querschnitt muss ein Silberdraht mit einem Durchmesser von 0,45 mm verwendet werden. Dieser Silberdraht erträgt gerade noch einen Dauerstrom von 17 A, während er bei etwas höheren Strömen abschmilzt. Fig. 4 zeigt die Auslösekennlinie dieses Silberdrahtes. Obwohl heute solche primitiven Sicherungen kaum mehr verwendet werden, ist es doch interessant, die Auslösekennlinie und die physikalischen Vorgänge während des Abschmelzens des Silberdrahtes etwas genauer zu betrachten:

Durch den Überstrom wird der Silberdraht erwärmt und schliesslich – bei genügend langer Einwirkung des Stromes – zum Schmelzen gebracht. Sobald er durchgeschmolzen ist, entsteht an der Unterbrechungsstelle ein Lichtbogen. Dieser brennt bis zum nächsten Nulldurchgang des Stromes, d.h. im 50-Hz-Netz während maximal 1/100 s. Obwohl der Silberdraht durchgeschmolzen ist, fliesst während der Dauer des Lichtbogens noch weiterhin ein Strom. Die totale Abschaltzeit setzt sich daher aus der Schmelzzeit und der Lichtbogenzeit zusammen. Wenn die Schmelzzeit derart kurz ist, dass die Abkühlung des schmelzenden Silberdrahtes durch die Umgebungsluft keinen Einfluss mehr hat (Schmelzzeiten $< 0{,}1$ s), so kann sie berechnet werden. Bei geringeren Überströmen, welche grössere Schmelzzeiten zur Folge haben, muss sie durch Versuche bestimmt werden.

Die Berechnung der kurzen Schmelzzeiten erfolgt nach folgender Formel:

$$t = \frac{A^2\, c_m\, \Delta\vartheta}{\varrho_m\, I^2}$$

A Querschnitt des Schmelzleiters (bei $d = 0{,}45$ mm ist $A = 0{,}159$ mm²)

I Strom, der fliessen würde, wenn kein Schmelzleiter im Stromkreis wäre (Kurzschlußstrom)

c_m mittlere spez. Wärme zwischen 20 °C und dem Schmelzpunkt
(für Silber: $c_m = 3{,}6 \cdot 10^{-3}$ Ws/mm³ °C

ϱ_m mittlerer spez. Widerstand zwischen 20 °C und dem Schmelzpunkt
(für Silber: $\varrho_m = 4{,}7 \cdot 10^{-5}\ \Omega$ mm)

$\Delta\vartheta$ Differenz zwischen 20 °C und dem Schmelzpunkt
(für Silber: $\Delta\vartheta = 941$ °C)

Da bei kurzen Schmelzzeiten der Strom normalerweise nicht konstant ist oder – bei Wechselstrom – das Abschmelzen an irgendeiner Stelle der Halbwelle erfolgt, ist nicht die tatsächliche Abschmelzzeit, sondern die bis zum Zeitpunkt des Schmelzens geflossene Energie wichtig. Diese kann nach der Formel

$$\int i^2 \mathrm{d}t = \frac{A^2\, c_m\, \Delta\vartheta}{\varrho_m}$$

berechnet werden. Unter Zugrundelegung der vorstehend erwähnten Werte ergibt sich für den 0,45-mm-Silberdraht eine Schmelzenergie von 1820 A² s.

Bei Überströmen, welche Schmelzzeiten in der Grössenordnung von einigen Hundertstelsekunden oder weniger zur Folge haben, beginnt sich die Lichtbogenzeit auf die gesamte Abschaltzeit auszuwirken. Dies ist aus Fig. 5 deutlich zu erkennen. Das Oszillogramm zeigt die Abschaltung eines Kurzschlußstromes von (effektiv) 390 A. 12 ms nach dem Auftreten des Stromes ist der Schmelzleiter durchgeschmolzen (Stromeinbruch an der betreffenden Stelle). Die Auswertung des Oszillogrammes ergibt, dass bis zu diesem Moment eine Energie

von 1750 A^2 s geflossen ist. (Dies entspricht praktisch der errechneten Schmelzenergie von 1820 A^2 s.) Während der Brennzeit des Lichtbogens fliesst noch eine zusätzliche Energie von 750 A^2 s, so dass in diesem Falle eine Abschaltenergie von 2500 A^2 s erreicht wurde. In der Auslösekennlinie ist nun jene Zeit eingetragen, welche multipliziert mit dem Quadrat des Kurzschlußstromes den Wert von 2500 A^2 s ergibt. Diese beträgt 0,0164 s.

In noch grösserem Masse wirkt sich die Lichtbogenzeit bei Strömen aus, welche Schmelzzeiten in der Grössenordnung von einigen Tausendstelsekunden ergeben. Die Abschaltung eines Kurzschlußstromes von (effektiv) 2900 A zeigt Fig. 6. Der Stromeinbruch zeigt, dass der Silberdraht schon nach 2 ms durchgeschmolzen ist. Die Auswertung des Oszillogramms ergibt in diesem Fall eine Schmelzenergie von 1800 A^2 s. Während der Dauer des Lichtbogens fliessen noch weitere 30000 A^2 s. Dies ergibt eine totale Abschaltenergie von 31800 A^2 s. Die Zeit, welche in der Auslösekennlinie eingetragen ist, beträgt 31800 A^2 s : 2900 A^2 = 0,0038 s, obwohl die tatsächliche Dauer des Stromflusses 0,0094 s beträgt. Anderseits wurde aber der volle Wert des Kurzschlußstromes von 2900 A gar nicht erreicht.

Die Auslösekennlinie muss im Bereich der hohen Ströme deshalb richtig interpretiert werden. Sie gibt, wenn man den Kurzschlußstrom quadriert und mit der entsprechenden Zeit multipliziert, die gleiche Energie, wie sie tatsächlich bei der Abschaltung geflossen ist. Für hohe Kurzschlußströme wäre deshalb eine Durchlassenergie/Kurzschlußstrom-Kennlinie aussagefähiger. Fig. 7 zeigt diese Kennlinie.

Für die Bewertung der Leitungsschutzwirkung sind die Temperaturen massgebend, welche der zu schützende Leiter im ganzen Überstrom- und Kurzschlussbereich erreichen kann, d.h. jene Leiterübertemperatur, welche die Leitungsschutzvorrichtung zulässt. Diese von der «Silberdrahtsicherung» zugelassenen Übertemperaturen zeigt Fig. 8. Bei einem Strom von 17 A – dies ist der Strom, welchen der Silberdraht gerade noch dauernd zu führen vermag – beträgt die Übertemperatur des Leiters 19 °C. Bei einem Strom von 20 A schmilzt der Silberdraht innerhalb von etwa 12 s durch. In dieser Zeit erreicht der zu schützende Leiter lediglich noch eine Übertemperatur von

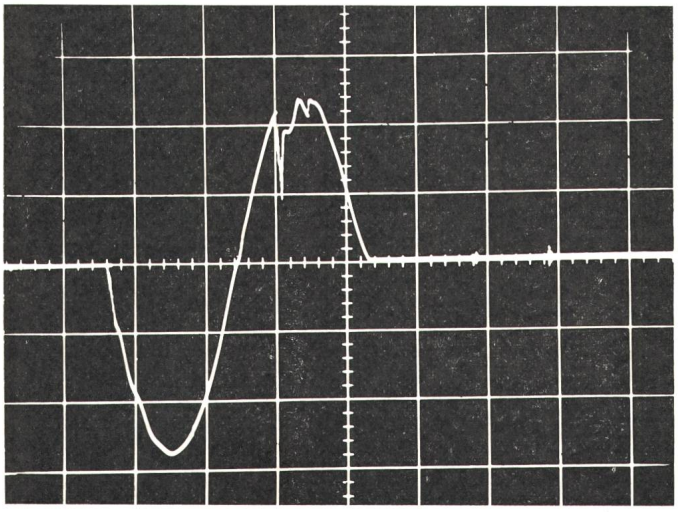


Fig. 5 Abschaltung eines Stromes von (effektiv) 390 A durch einen Silberdraht von 0,45 mm ⌀
Maßstäbe: Strom (vertikal) 200 A/Einheit
Zeit (horizontal) 5 ms/Einheit

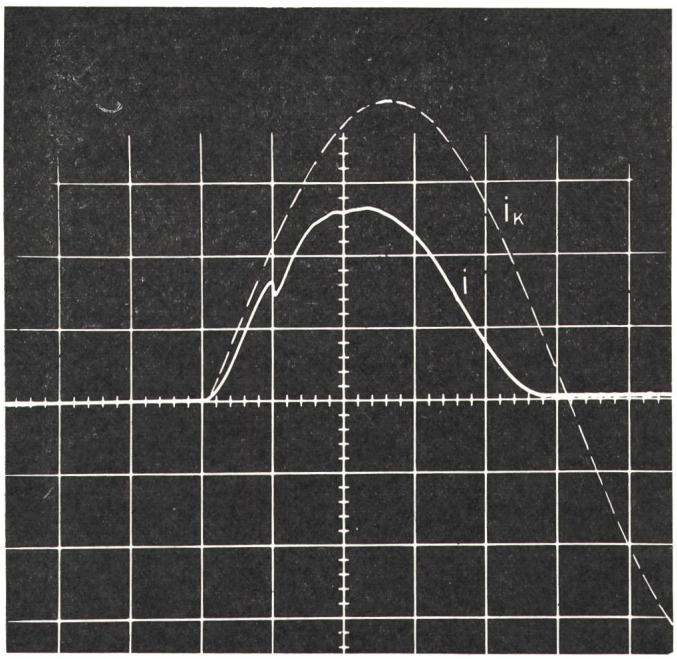


Fig. 6 Abschaltung eines Stromes von (effektiv) 2900 A durch einen Silberdraht von 0,45 mm ⌀
——— Kurzschlußstrom i_K
——— tatsächlich fliessender Strom i
Maßstäbe: Strom (vertikal) 1000 A/Einheit
Zeit (horizontal) 2 ms/Einheit

3...4 °C. Bei Strömen zwischen 40 und 100 A schmilzt der Silberdraht so rasch, dass der zu schützende Kupferleiter nur eine Übertemperatur von etwa 2 °C erreicht. Bei höheren Strömen steigt dann, bedingt durch den Einfluss der Lichtbogenzeit, die Übertemperatur, welche der Leiter erhält, wieder an und erreicht bei einem Kurzschlußstrom von 3000 A einen Wert von 90 °C.

Die Leitererwärmungen lassen sich relativ leicht errechnen. Für kleine Überströme, welche relativ lange Abschaltzeiten ergeben, ist dabei die Auslösekennlinie des Silberdrahtes (Fig. 4) massgebend, während für hohe Kurzschlußströme mit entsprechend kurzen Abschaltzeiten die Durchlassenergie-Kennlinie (Fig. 7) verwendet werden muss.

Für die Erwärmung bei kleinen Überströmen gilt die Formel

$$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_{max}\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

$\Delta\vartheta$ Erwärmung des Leiters nach der Zeit t
$\Delta\vartheta_{max}$ max. Erwärmung des Leiters beim Strom I (Fig. 1)
t Einwirkungszeit des Stromes (Fig. 4)
τ Zeitkonstante des Kupferleiters
(für den schwarzen 1,5-mm²-Tdc-Leiter: τ = 78 s).

Bei hohen Kurzschlußströmen, welche so kurze Abschaltzeiten ergeben, dass nicht mit einer Abkühlung des Leiters durch die Umgebungsluft gerechnet werden muss, erfolgt die Berechnung der Leitererwärmung nach folgender Formel:

$$\Delta\vartheta = \frac{2\,\varrho \int i^2\,dt}{2\,A^2 c - \varrho\alpha \int i^2\,dt}$$

ϱ spezifischer Widerstand des Leiters
(für Cu: $\varrho = 1{,}75 \cdot 10^{-5}\ \Omega$ mm)
$\int i^2 dt$ vom Leiter aufgenommene Energie (Fig. 7)
A Querschnitt des Leiters (1,5 mm²)

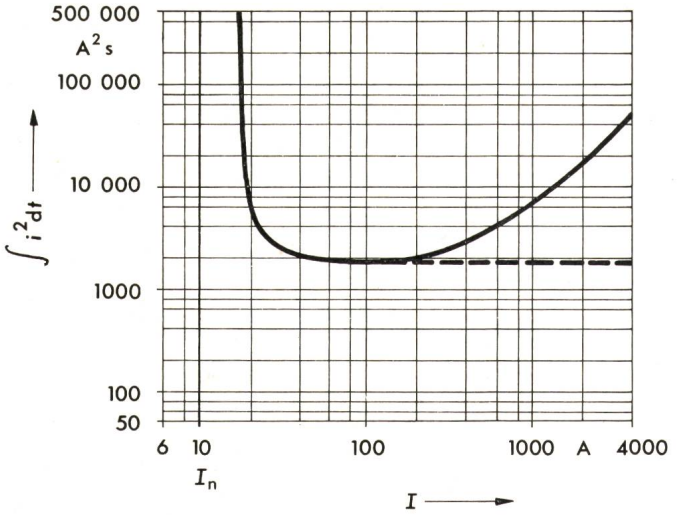


Fig. 7 **Abschaltenergie $\int i^2 dt$ (▬▬) und Schmelzenergie (▬ ▬ ▬) eines Silberdrahtes von 0,45 mm ⌀ in Abhängigkeit vom Strom**

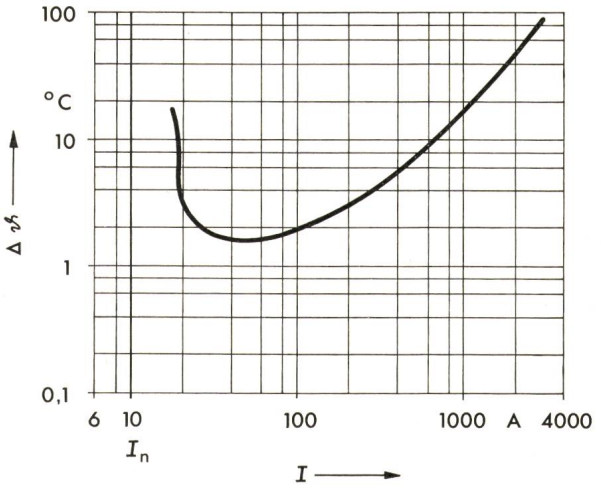


Fig. 8 **Erwärmung $\Delta\vartheta$ eines Kupferleiters von 1,5 mm² in Abhängigkeit vom Strom I, welche durch den Silberschmelzleiter 0,45 ⌀ zugelassen wird**

c spezifische Wärme des Leitermaterials (für Cu: $c = 3{,}43 \cdot 10^{-3}$ Ws/cm³ · °C)

α Temperaturkoeffizient des spezifischen Widerstandes des Leitermaterials (für Cu: $\alpha = 4{,}2 \cdot 10^{-3}$ °C^{-1})

Die Formel berücksichtigt das Ansteigen des spezifischen Widerstandes während der Erwärmung.

Die Erwärmungskennlinie (Fig. 8) des durch den Silberdraht geschützten Leiters zeigt, dass der Leiter bei weitem nicht optimal ausgenützt ist. So erreicht er bei Überströmen bis zu 400 A nur eine Übertemperatur von 6 °C. Auf den ersten Blick scheint es, dass der Leiter bei Kurzschlußströmen ab etwa 1000 A gefährdet ist, da in diesem Moment die Anfangserwärmung 19 °C erreicht. Dies ist jedoch nicht der Fall, da in diesem Strombereich die Zeiten, während welcher diese Erwärmung auftritt, nur sehr kurz sind, d.h. in der Grössenordnung von 0,01 s liegen. Für so kurze Zeiten ertragen die Isolationen ohne weiteres Übertemperaturen bis zu 100 °C.

Wie man sieht, hatten unsere Gross- und Urgrossväter im Schmelzleiter einen einwandfrei funktionierenden und billigen Leitungsschutz.

2.2 Schmelzsicherung

Aufgrund der Figuren und Berechnungen sieht man wohl, dass der Silberdraht einwandfrei funktioniert, dagegen bleibt es der persönlichen Vorstellungskraft überlassen, sich die Begleiterscheinungen auszumalen, die auftreten, wenn ein offener Silberdraht einen Kurzschlußstrom von einigen hundert oder mehr Ampère abzuschalten hat. Von einer grossen Betriebssicherheit kann jedenfalls kaum mehr gesprochen werden. Man hat deshalb den Silberdraht in Sand eingepackt und das Ganze mit einer Keramikhülse umschlossen. Damit war die Schmelzsicherung geboren. Eine erste Konsequenz dieser neuen Anordnung war die folgende:

Durch die innige Berührung des Schmelzdrahtes mit dem Sand wird der Schmelzleiter im Dauerstrombereich wesentlich stärker abgekühlt als der offenliegende Silberdraht. Damit die Auslösevorschriften trotzdem eingehalten werden, musste der Querschnitt des Schmelzleiters beim gleichen Nennstrom reduziert werden. Diese Reduktion ist ganz beträchtlich. Während der frei ausgespannte Silberdraht von 0,45 mm ⌀ einen Querschnitt von 0,159 mm² aufweist, hat die entsprechende 10-A-

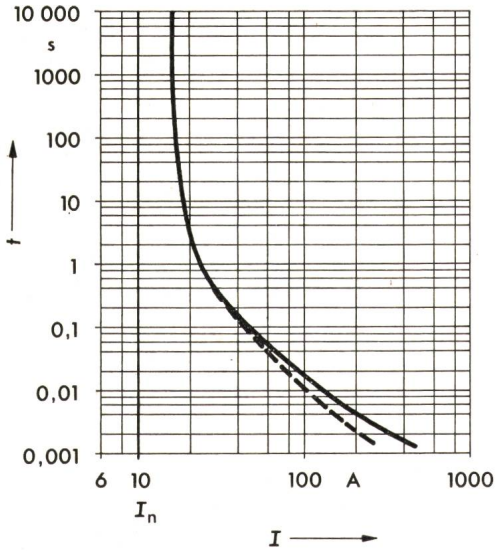


Fig. 9 **Abschaltkennlinie (▬▬) und Abschmelzkennlinie (▬ ▬ ▬) einer flinken Diazedsicherung von 10 A**

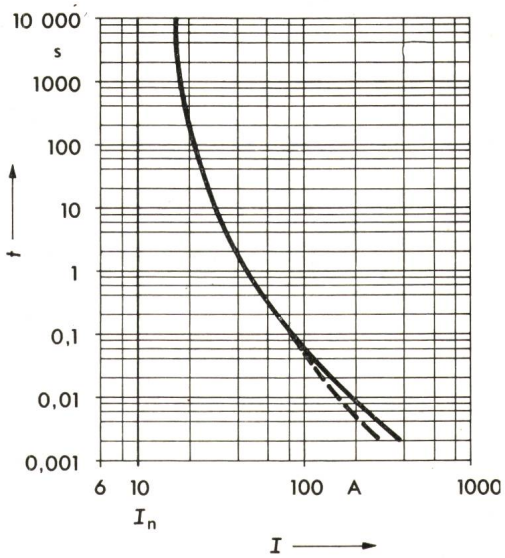


Fig. 10 **Abschaltkennlinie (▬▬) und Abschmelzkennlinie (▬ ▬ ▬) einer trägen Diazedsicherung von 10 A**

Sicherung einen Schmelzleiterquerschnitt von nur etwa 0,05 mm². Dies wirkt sich bei Überströmen bis zu etwa 22 A kaum aus. Bei höheren Überströmen dagegen ist die Schmelzsicherung bedeutend flinker als der Silberdraht. Fig. 9 und 10 zeigen die mittleren Abschaltkennlinien von flinken bzw. trägen 10-A-Sicherungen.

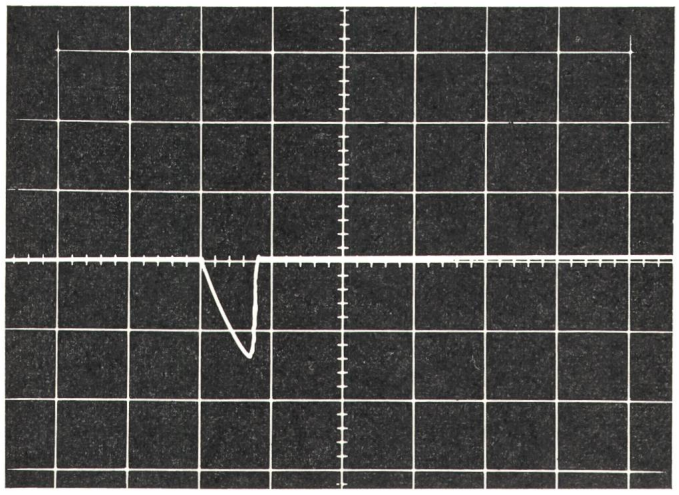
Auch bei den Sicherungen fällt bei Strömen, welche relativ kurze Schmelzzeiten bedingen, die Lichtbogenzeit ins Gewicht, wenn auch bei weitem nicht so stark wie beim Silberdraht. Bei einer einwandfrei funktionierenden Schmelzsicherung wird die Energie, die während des Löschvorganges noch fliesst, höchstens gleich der minimalen Schmelzenergie sein, während bei einer Schmelzsicherung, welche nicht einwandfrei löscht, die Löschenergie ein Mehrfaches der Schmelzenergie betragen kann. Das Oszillogramm in Fig. 11a zeigt eine einwandfreie Abschaltung eines Kurzschlußstromes durch eine Sicherung, während das Oszillogramm in Fig. 11b erkennen lässt, dass die Unterbrechung des Stromes für die Sicherung nicht ganz problemlos war.

Wenn man die Durchlassenergie/Kurzschlußstrom-Kennlinie für die Schmelzsicherung betrachtet (Fig. 12a und b), so stellt man fest, dass eine (einwandfrei funktionierende) Schmelzsicherung in der Lage ist, die durchfliessende Energie – unabhängig von der Höhe des Kurzschlußstromes – zu begrenzen. Diese Energie beträgt für die flinke 10-A-Sicherung etwa 200 A^2 s und für die träge etwa 300 A^2 s. Dabei ist die Löschenergie bei der flinken 10-A-Sicherung mit 100 A^2 s und bei der trägen mit 200 A^2s angenommen.

Die Leiterübertemperaturen, welche die flinke und die träge Sicherung zulassen, sind in den Fig. 13a und b aufgetragen. Man sieht, dass auch eine Schmelzsicherung den Leiter viel zu gut schützt. So lässt bei Kurzschlußströmen in der Grössenordnung von 100 A die flinke Sicherung Leitererwärmungen von nur 0,5 °C und die träge Sicherung nur solche von 1 °C zu.

Noch extremer sind die Verhältnisse bei den Niederspannungshochleistungssicherungen, da diese – bedingt durch die Aufteilung des Schmelzleiters in mehrere parallele Leiter – noch flinker arbeiten. Dagegen bietet die Schmelzsicherung den Vorteil, dass auch bei sehr hohen Kurzschlußströmen eine Übererwärmung des Leiters nicht möglich ist.

a



b

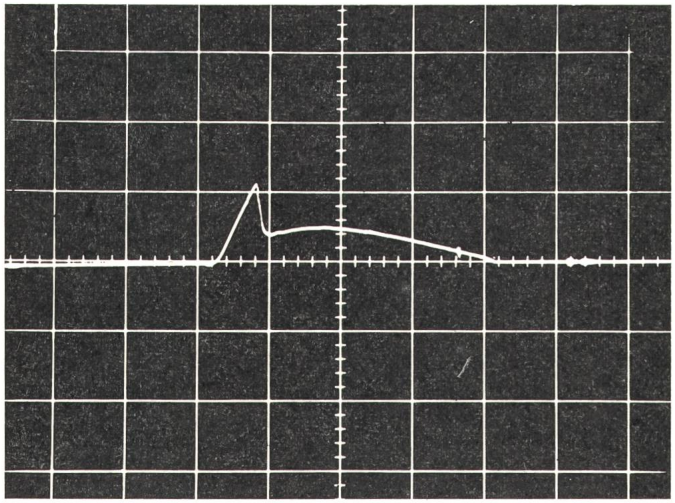


Fig. 11 Abschaltung eines Stromes von effektiv 700 A einer flinken Diazedsicherung von 10 A

a Unterbrechung einwandfrei
b Unterbrechung nicht einwandfrei
Maßstäbe: Strom (vertikal) 400 A/Einheit
Zeit (horizotnal) 2 ms/Einheit

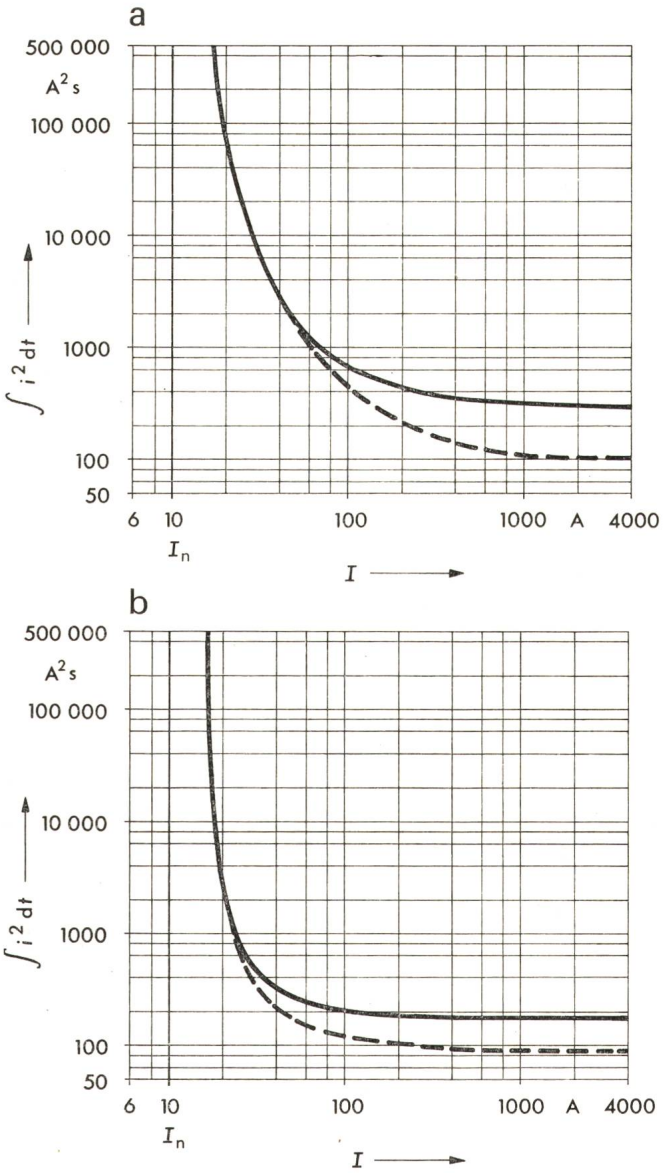


Fig. 12 Abschaltenergie $\int i^2 dt$ (▬▬) und Schmelzenergie (▬ ▬ ▬) einer flinken (*a*) und einer trägen (*b*) Diazedsicherung von 10 A in Abhängigkeit vom Strom *I*

2.3 Leitungsschutzschalter

2.3.1 Leitungsschutzschalter mit indirekt beheiztem Bimetall

Die Tatsache, dass eine Schmelzsicherung, sobald sie zum Funktionieren kommt, defekt wird, hat sehr früh zur Entwicklung des Leitungsschutzschalters geführt. Bei diesen Apparaten wird die stromabhängige Auslösung und damit der Leitungsschutz meist von einem Bimetall übernommen. Ursprünglich erfolgte die Beheizung der Bimetalle indirekt, d.h., der Strom floss durch ein Heizelement, das um das oder nebem dem Bimetall angebracht war. Dieses erwärmte und verbog sich je nach der Höhe des Stromes nach kürzerer oder längerer Zeit und führte die Auslösung des Leitungsschutzschalters herbei. Fig. 14 zeigt die Auslösekennlinie eines 10-A-Leitungsschutzschalters mit einem indirekt beheizten Bimetall. Je nach Konstruktion des Bimetalls kann natürlich diese Kennlinie etwas variieren.

Da das Bimetall einerseits wesentlich voluminöser ist als der Schmelzdraht einer Sicherung und anderseits eine gewisse Zeit verstreicht, bis die Temperatur vom Heizleiter auf das Bimetall übergetreten ist, arbeiten diese Schalter beträchtlich träger als Schmelzsicherungen. So beträgt z.B. die Auslösezeit bei einem Strom von 60 A, d.h. beim 6fachen Nennstrom, etwa 8 s, während die träge Sicherung bei diesem Strom schon nach 0,4 s schmilzt.

Die Auslösekennlinie des Leitungsschutzschalters mit indirekt beheiztem Bimetall wird bei höheren Überströmen immer flacher. Der Grund für diese Erscheinung liegt darin, dass die Zeit, welche verstreicht, bis die Wärme vom Heizleiter auf das Bimetall übergetreten ist, immer mehr ins Gewicht fällt. Mit einem indirekt beheizten Bimetall ist es deshalb – auch bei sehr hohen Strömen – unmöglich, Auslösezeiten von weniger als 1 s zu erreichen. Bei hohen Überströmen wird deshalb die Heizwicklung des indirekt beheizten Bimetalls zerstört. Dies wird aber durch die magnetische Schnellauslösung verhindert. Die neueste Fassung der Publikation 19 der CEE sieht die obere Ansprechgrenze der Momentauslösung beim etwa 12fachen Nennstrom vor. Da immer mit gewissen Toleranzen gerechnet werden muss, werden wahrscheinlich die meisten Fabrikanten die Momentauslösung ihrer Leitungsschutzschalter in Zukunft auf etwa den 10fachen Wert des Nennstromes einstellen. Die Auslösekennlinie erhält deshalb an dieser Stelle einen Knick. Sobald der Strom den Ansprechwert der Momentauslösung überschreitet, sinkt die Auslösezeit stark ab. Die Ansprechzeit der Momentauslösung beträgt bei modernen Leitungsschutzschaltern etwa 0,001 s oder sogar noch weniger. Allerdings bedeutet dies nicht, dass der Strom innerhalb dieser Zeit abge-

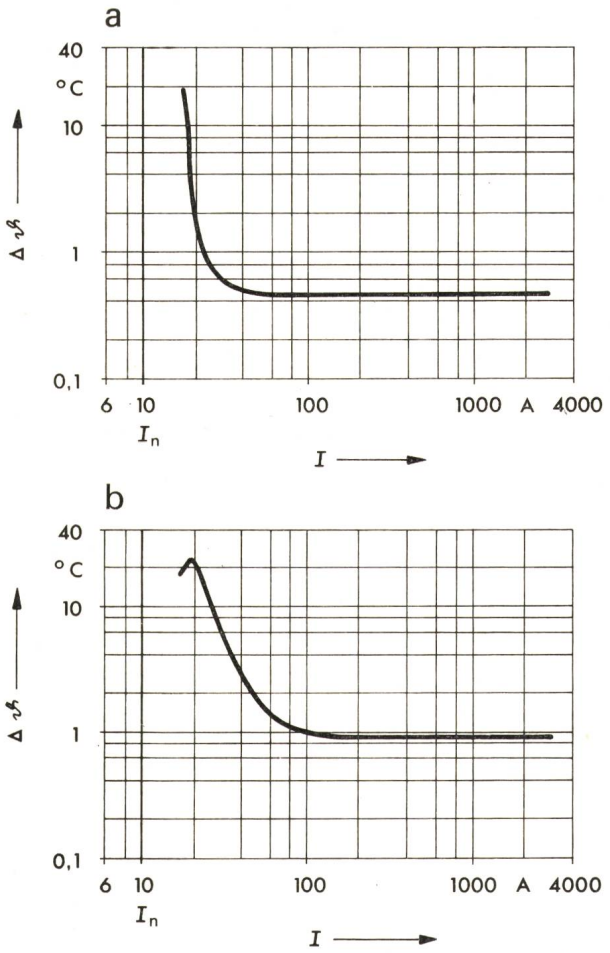


Fig. 13 Erwärmung Δϑ eines Kupferleiters von 1,5 mm² in Abhängigkeit vom Strom *I*, welcher durch eine flinke (*a*) und eine träge (*b*) 10-A-Diazedsicherung geschützt wird

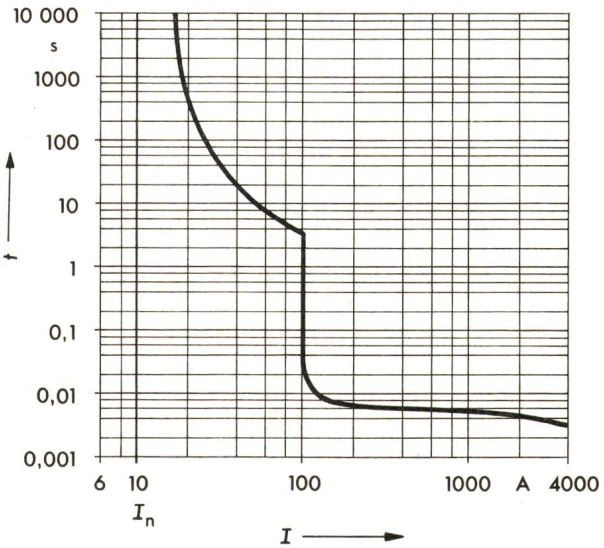


Fig. 14 Leitungsschutzschalter 10 A mit indirekt beheiztem Bimetall
Abschaltkennlinie

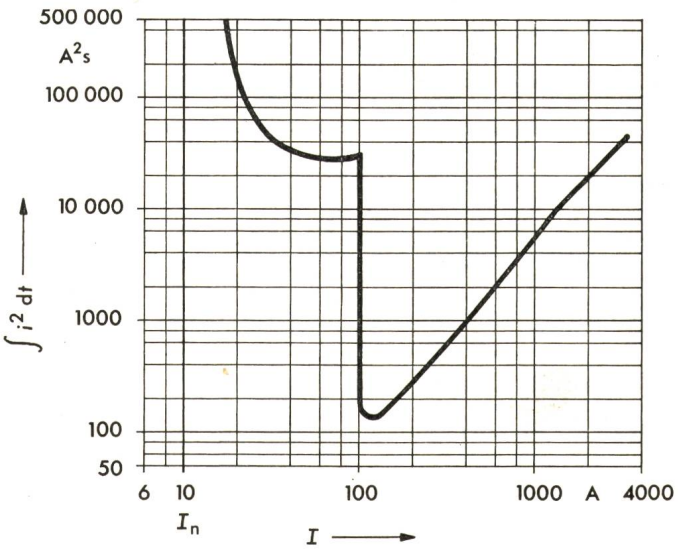


Fig. 15 Durchlassenergie $\int i^2 dt$ eines Leitungsschutzschalters 10 A mit indirekt beheiztem Bimetall in Abhängigkeit vom Strom *I*

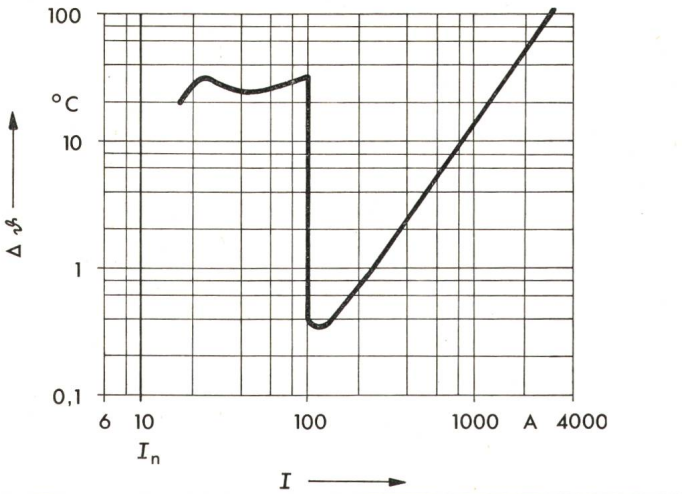


Fig. 16 Erwärmung $\Delta\vartheta$ eines Kupferleiters von 1,5 mm² in Abhängigkeit vom Strom I, welche von einem 10-A-Leitungsschutzschalter mit indirekt beheiztem Bimetall zugelassen wird

schaltet ist. Ähnlich wie beim Schmelzdraht muss noch mit einer Lichtbogenzeit in der Grössenordnung von etwa 0,01 s gerechnet werden. Der Leitungsschutzschalter hat deshalb bei hohen Kurzschlußströmen etwa ähnliche Abschaltzeiten wie die «Silberdrahtsicherung».

Die Durchlassenergie/Kurzschlußstrom-Kennlinie des Leitungsschutzschalters mit indirekt beheiztem Auslöser (Fig. 15) zeigt, dass dieser Apparat im Überstromgebiet eine wesentlich grössere Energie durchlässt als die beschriebenen Leitungsschutzvorrichtungen. Dementsprechend werden auch die Leiter wesentlich besser ausgenutzt. Fig. 16 zeigt die Leitererwärmung, welche der mit einem indirekt beheizten Bimetall versehene Leitungsschutzschalter an einem 1,5-mm²-Cu-Leiter zulässt. Die Übertemperatur ist im Gebiet bis zum Ansprechen der Momentauslösung sogar noch höher als beim Dauerstrom. Sie beträgt etwa 30 °C. Dies bedeutet jedoch keine Gefahr für den Leiter bzw. dessen Isolation, da bei einem Strom von z. B. 25 A nach etwa 2 min die Abschaltung erfolgt. Bei einem Überstrom, welcher knapp unterhalb der Ansprechgrenze der Momentauslösung liegt, erfolgt die Auslösung schon nach 3 s, so dass für den Leiter keine Gefahr besteht. Bei höheren Überströmen wird dann die Leitererwärmung durch das Ansprechen der Momentauslösung stark begrenzt. Eine merkbare Leitererwärmung setzt erst wieder bei Kurzschlußströmen ab etwa 1500 A ein, um dann bei Kurzschlußströmen von 3000 A auf 90 °C anzusteigen. Die Erwärmungskurve zeigt, dass ein Leitungsschutzschalter mit einem indirekt beheizten thermischen Überstromauslöser im Überstromgebiet einen optimalen Schutz des Leiters darstellt.

2.3.2 Leitungsschutzschalter mit direkt beheiztem Bimetall

Moderne Leitungsschutzschalter in Schmalbauweise sind für Nennströme zwischen 6 und 25 A mit einem direkt beheizten Bimetall ausgerüstet. Der Strom fliesst direkt durch das Bimetall, das sich dadurch erwärmt, verbiegt und gegebenenfalls zur Auslösung des Schalters führt. Bei dieser Ausführungsart des thermischen Auslösers wird die Temperatur im Bimetall selbst erzeugt, und die Zeit, die beim indirekt beheizten Bimetall verstreicht, bis die Wärme von der Heizwicklung auf das Bimetall übergetreten ist, fällt weg. Dadurch sind solche Schutzschalter bedeutend weniger träg. Die Trägheit ist beim direkt beheizten Bimetall nur vom Volumen desselben abhängig. Bei neueren Leitungsschutzschalter-Konstruktionen dürfte die Auslöseträgheit bei allen Fabrikaten etwa gleich sein und nach der Kennlinie gemäss Fig. 17 verlaufen. In dieser Figur ist zusätzlich (gestrichelt) die Auslösekennlinie des Leitungsschutzschalters eingetragen, welche sich ergeben würde, wenn der Schalter nicht mit einer Momentauslösung versehen wäre. Wie man sieht, erreicht die Auslösegeschwindigkeit des Bimetalls bei genügend hohen Kurzschlußströmen (ab etwa 2000 A) praktisch gleiche Werte wie der magnetische Auslöser.

In Fig. 18 ist die Durchlassenergie/Kurzschlußstrom-Kennlinie des Leitungsschutzschalters mit direkt beheiztem Bimetall eingetragen, während Fig. 19 die Durchlassenergie/Kurzschlußstrom-Kennlinie des gleichen Schalters, aber ohne magnetische Auslösung zeigt.

Die Übertemperatur, welche der 1,5-mm²-Leiter, welcher durch einen Leitungsschutzschalter mit einem direkt beheizten Bimetall geschützt ist, erhält, zeigt Fig. 20. Man erkennt (ge-

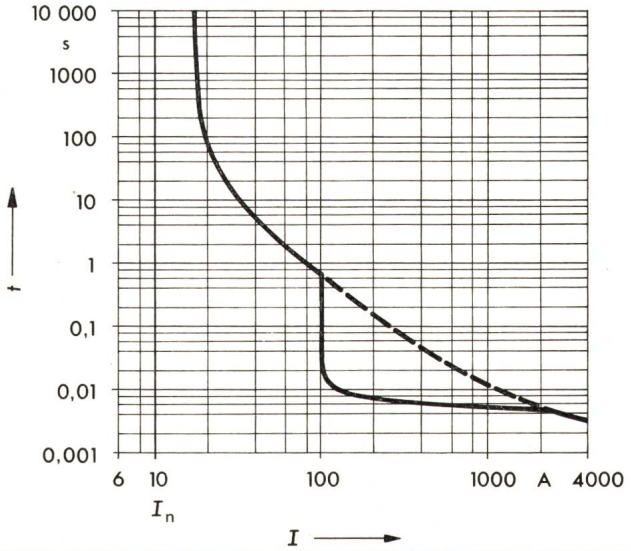


Fig. 17 Abschaltkennlinie eines Leitungsschutzschalters 10 A mit direkt beheiztem Bimetall

▬ mit magnetischer Auslösung
▬ ohne magnetische Auslösung

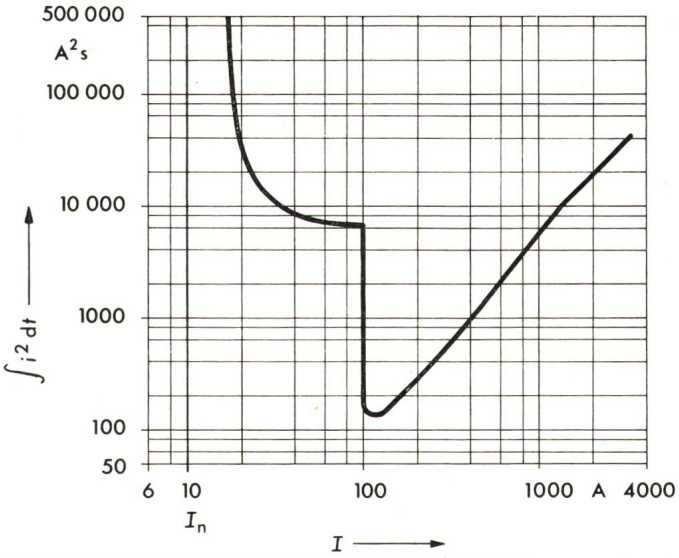


Fig. 18 Durchlassenergie $\int i^2 dt$ in Abhängigkeit vom Strom I eines Leitungsschutzschalters 10 A mit direkt beheiztem Bimetall

strichelte Partie), dass für den eigentlichen Leitungsschutz die Höhe der Einstellung der Momentauslösung des Leitungsschutzschalters mit direkt beheiztem Bimetall keine Bedeutung hat. So wird z. B. bei einem Leitungsschutzschalter, dessen magnetische Auslösung blockiert ist, bei einem Kurzschlußstrom von 1000 A erst eine Leiterübertemperatur von 30 °C erreicht. Bei noch höheren Überströmen entstehen dann Leitertemperaturen in derselben Grössenordnung wie bei Leitungsschutzschaltern mit magnetischer Auslösung oder bei «Silberdraht»-Sicherung. Auf den ersten Blick scheint es überraschend zu sein, dass das relativ träge Bimetall in der Lage ist, den Leiter im ganzen Strombereich zu schützen. Dies ist jedoch leicht verständlich, wenn man bedenkt, dass das Bimetall innerhalb des Leitungszuges liegt, jederzeit vom Strom durchflossen und auch entsprechend erwärmt wird. Es macht daher alle thermischen «Bewegungen» des Leiters mit und führt verzögerungsfrei die Abschaltung herbei, wenn es die Übertemperatur erreicht hat, auf welche es eingestellt ist.

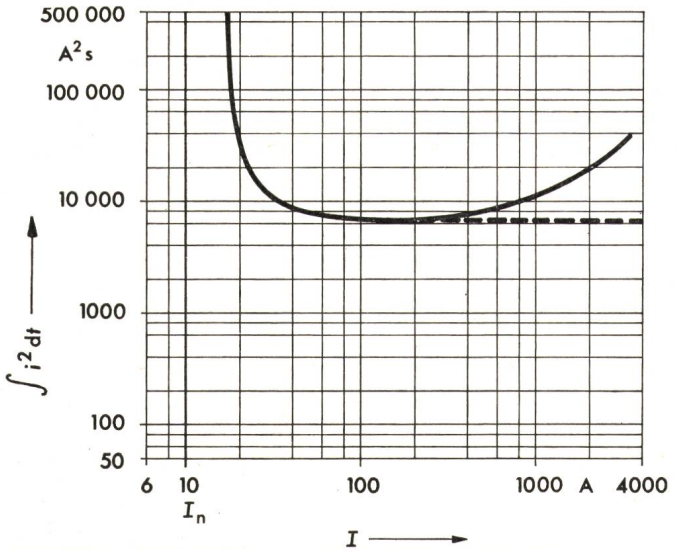


Fig. 19 **Abschaltenergie $\int i^2 dt$ (▬▬) und Auslöseenergie (▬ ▬ ▬) in Abhängigkeit vom Strom I eines Leitungsschutzschalters 10 A mit direkt beheiztem Bimetall ohne magnetische Auslösung**

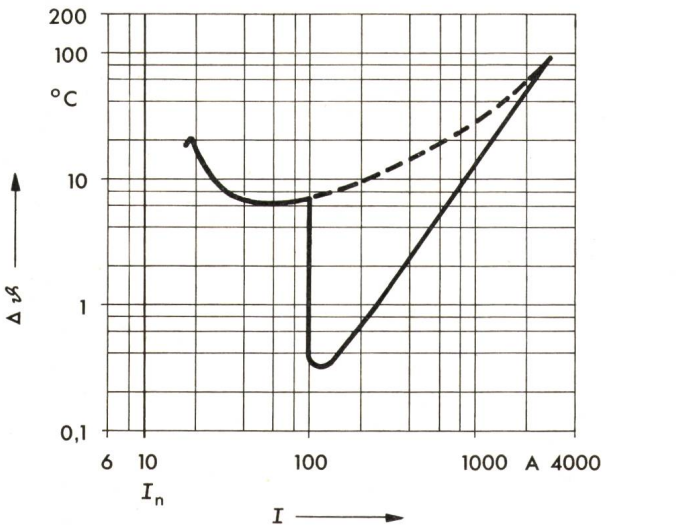


Fig. 20 **Erwärmung $\Delta\vartheta$ eines Kupferleiters von 1,5 mm² in Abhängigkeit vom Strom I, welche vom 10-A-Leitungsschutzschalter mit direkt beheiztem Bimetall zugelassen wird**

▬▬ Leitungsschutzschalter, Normalausführung
▬ ▬ ▬ Leitungsschutzschalter, ohne magnetische Auslösung

2.4 Leitungsschutz in der Zukunft

Absatz 2.3 hat gezeigt, dass die heute verwendeten Leitungsschutzschalter unter extremen Verhältnissen, d. h. bei hohen Kurzschlußströmen, relativ hohe Energien durchlassen. Dies im Gegensatz zur Schmelzsicherung, welche in der Lage ist, die Kurzschlussenergie stark zu begrenzen. Eine ideale Leitungsschutzvorrichtung sollte deshalb im Überstromgebiet träg wie ein Leitungsschutzschalter sein, im Kurzschlussgebiet aber energiebegrenzend wie eine Schmelzsicherung arbeiten. Eine solche Energiebegrenzung wäre z. B. leicht möglich, wenn in den Leitungsschutzschalter ein Widerstand eingebaut würde. So würde z. B. ein Leitungsschutzschalter mit einem Innenwiderstand von 70 mΩ im 220-V-Netz den Strom unabhängig von der verfügbaren Leistung auf einen Wert von maximal 3000 A begrenzen. Diese Lösung wird auch bei einigen geometrisch relativ umfangreichen Konstruktionen angewendet. Bei den modernen Leitungsschutzschaltern in Schmalbauweise ist dies jedoch nicht möglich, weil durch den grossen Innenwiderstand die Erwärmung des Schalters zu gross wäre (bei einem Strom von 10 A nimmt ein Widerstand von 70 mΩ eine Leistung von 7 W auf.) Da eine eigentliche Begrenzung des Stromes und damit der Durchlassenergie auf diese Art nicht ohne weiteres möglich ist, bleibt nur die Möglichkeit, die Lichtbogenzeit und damit die Dauer des Stromflusses zu reduzieren. Dass dies möglich ist, zeigen die folgenden Überlegungen:

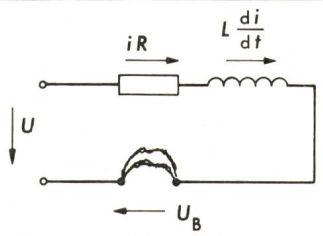


Fig. 21 **Stromkreis während der Abschaltung**

Während der Abschaltung eines Kurzschlußstromes setzt sich der Stromkreis gemäss Fig. 21 aus den folgenden Elementen zusammen:

a) Ohmscher Widerstand;
b) Induktiver Widerstand;
c) Lichtbogen;
d) Netzspannung.

Gemäss dem zweiten Kirchhoffschen Satz ist die Summe der in diesem Kreis liegenden Spannungen gleich Null. Unter der Voraussetzung der angegebenen Bezugssinne gilt folgende Formel:

$$u = iR + L\frac{di}{dt} + u_B$$

Darin sind:

u Momentanwert der Netzspannung
iR Spannung über dem Ohmschen Widerstand
$L\frac{di}{dt}$ Spannung über dem induktiven Widerstand
u_B Lichtbogenspannung

Bestimmte Netzverhältnisse vorausgesetzt, sind in diesem Stromkreis die Werte u, R und L gegeben. Es sei im folgenden das Verhalten des Stromes in diesem Kreis während der Abschaltung betrachtet:

Fig. 22 zeigt im oberen Teil die Netzspannung u_N und die Spannung u_{Sch} über dem Schalter. Im unteren Teil ist der Stromverlauf dargestellt.

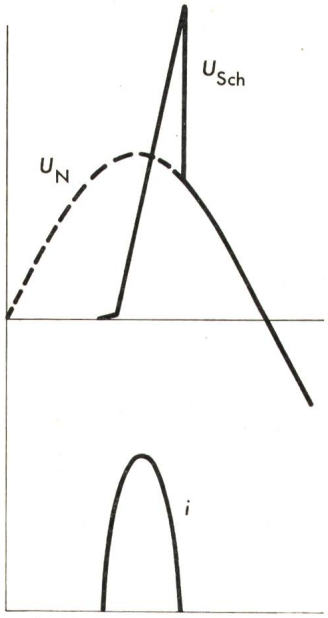


Fig. 22
Energiebegrenzender Schalter
Spannungs- und Stromverlauf während der Abschaltung
Bezeichnungen siehe im Text

Angenommen, es entstehe ein Kurzschluss etwas bevor die Spannung ihr Maximum erreicht hat (bei ca. 70° der Spannungshalbwelle). Der Strom steigt mit einer Anstiegsgeschwindigkeit $\frac{di}{dt}$ an. Diese ist durch das Verhältnis $\frac{L}{R}$ gegeben $\left(\text{je kleiner } \frac{L}{R}, \text{ um so grösser } \frac{di}{dt}\right)$. Die Spannung über dem Schalter ist bis zum Moment, in welchem sich die Kontakte zu öffnen beginnen, sehr gering. Durch das Öffnen der Kontakte entsteht ein Lichtbogen und ein zusätzlicher Spannungsbedarf im Schalter. Die Formel zeigt, dass, wenn die Spannung u_B ansteigt, irgendeine andere Grösse kleiner werden muss. Da i selbst ansteigt, muss $\frac{di}{dt}$ also die Stromanstiegsgeschwindigkeit kleiner werden. Wenn es gelingt, die Lichtbogenspannung u_B noch höher zu treiben, wird $\frac{di}{dt}$ zuerst gleich Null und später sogar negativ. Eine negative Stromanstiegsgeschwindigkeit bedeutet, dass der Strom sinkt und schliesslich zu Null wird. In diesem Moment geht die Spannung über dem Schalter auf die Netzspannung zurück, und die Abschaltung ist vollzogen. Es wird auf diese Art möglich sein, Kurzschlußströme innerhalb von 2...3 ms zu unterbrechen. Man sieht leicht, dass ein so arbeitender Schalter die während der Abschaltung durchfliessende Energie (ähnlich wie die Sicherung) sehr stark begrenzt. Übrigens arbeitet die Schmelzsicherung nach dem gleichen Prinzip, denn dort wird durch die intensive Kühlung des Lichtbogens infolge der Sandfüllung die Lichtbogenspannung sehr hoch getrieben.

Ein auf dem beschriebenen Prinzip arbeitender Schalter hätte vor allem drei Vorteile:

a) Die während der Abschaltung durchfliessende Energie wird stark begrenzt und damit die Erwärmung der Leiter auch bei sehr hohen Kurzschlußströmen gering gehalten.

b) Die Selektivität zur Vorsicherung wird entscheidend verbessert.

c) Mit einem solchen Schalter ist es möglich, sehr hohe Kurzschlußströme zu beherrschen, denn durch das rasche Ansteigen der Lichtbogenspannung wird der Strom daran gehindert, jenen Wert zu erreichen, den er aufgrund der Netzverhältnisse erreichen könnte.

Es gibt schon heute Schalter, welche mit relativ hohen Lichtbogenspannungen (bis ca. 400 V) arbeiten. Wenn auch diese Spannung bei weitem nicht genügt, um in 220...500-V-Netzen die Löschung des Lichtbogens wesentlich vor dem Nulldurchgang des Stromes zu erzwingen, so wird durch die hohe Lichtbogenspannung doch die Durchlassenergie um einiges begrenzt, wobei die relative Begrenzung um so besser wird, je höher der Kurzschlußstrom ist. Natürlich sind bei einem derart stark die Durchlassenergie begrenzenden Schalter die bei der Abschaltung entstehenden Überspannungen zu beachten.

Vielleicht bestehen in der Industrie sogar schon Vorstellungen über den Leitungsschutzschalter von «übermorgen», so dass man auf die weiteren Entwicklungen in diesem Bereich der Technik gespannt sein kann.

Adresse des Autors:
Rudolf Bächtold, El.-Ing. HTL, Bahnweg 23, 8240 Thayngen.

Commission Internationale de Réglementation en vue de l'Approbation de l'Equipement Electrique (CEE)

Tagung vom 4. bis 14. Juni 1974 in Salzburg

Certification Body (CB)

Haupttraktandum des unter der Leitung seines Präsidenten, Dr. E. Wettstein (Schweiz) tagenden CB war die Einführung des europäischen Bestätigungszeichens (Ê-Zeichen) auf Grund der diesbezüglichen Beschlüsse der Plenarversammlung der CEE. Gemäss der in CEE-Publikation 29 verankerten Regelung ist das CB mit der Anwendung dieses Verfahrens beauftragt.

Das Ê-Zeichen kann vorläufig für folgende 5 Produkte zur Anwendung kommen:

1. Staubsauger, gemäss CEE-Publikation 10
2. Elektrische Uhren, gemäss CEE-Publikation 10
3. Elektrische Rasierapparate für Hausgebrauch, gemäss CEE-Publikation 10
4. Massageapparate, gemäss CEE-Publikation 10
5. Konfektionierte Kabel mit Stecker, gemäss CEE-Publikation 22 und 7

Eine Erweiterung auf andere Produkte hängt davon ab, ob Produkte gefunden werden können, für welche in allen CB-Ländern die entsprechenden CEE-Vorschriften *ohne* Abweichungen verbindlich sind. Entsprechende Untersuchungen sind im Gang, doch soll mit einer evtl. Erweiterung noch zugewartet werden, bis Erfahrungen mit der Funktionstüchtigkeit des Systems vorliegen. Auch soll geprüft werden, wie das System auch auf Produkte in Ländern ausserhalb der heutigen Mitgliedländer des CB ausgedehnt werden kann, dies speziell im Hinblick auf die von England formulierten Bedenken, dass das System des Ê-Zeichens den in der gemeinsamen