Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 64 (1973)

Heft: 15

Artikel: Kurzschlussbelastbarkeit von Schirmen elektrischer Kabel

Autor: Bott, J.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915580

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

Kurzschlussbelastbarkeit von Schirmen elektrischer Kabel

Von *J. Bott*

621.317.613 : 621.315.221.7 : 669.3

Die Kurzschlusserwärmung verschiedener Kupferschirme von Mittelspannungskabeln wurde, abhängig von Kurzschlußstrom und Kurzschlusszeit, gemessen und unter vereinfachten Voraussetzungen berechnet. Zum Vergleich mit der Rechnung wurden auch anderweitige Messungen der 1-s-Kurzschlusserwärmung von Schirmen aus Kupfer, eines Bleimantels und einer Stahlflachdrahtbewehrung herangezogen. Der zulässige Kurzschlußstrom bei gegebener Kurzschlusserwärmung kann mit Hilfe einer empirischen Konstanten aus dem Aufbau des Schirmes und den thermischen Materialkonstanten für die spezifische Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit der dem Schirm unmittelbar anliegenden Stoffe in sehr einfacher Weise mit ausreichender Sicherheit berechnet werden.

L'échauffement dû à un court-circuit dans différents écrans en cuivre de câbles pour moyennes tensions et qui dépend du courant et de la durée du court-circuit, a été mesuré et calculé en admettant quelques simplifications. Pour comparaison avec le calcul, d'autres mesures de l'échauffement par court-circuit de 1 s d'écrans en cuivre, d'une gaine en plomp et d'une protection en fils d'acier méplats ont été considérées. Pour un échauffement donné, le courant admissible de court-circuit peut être déterminé très simplement et avec une sûreté suffisante à l'aide d'une constante empirique d'après la constitution de l'écran et les constantes de la capacité et de la conductibilité thermiques spécifiques des matières qui entourent directement l'écran.

Einleitung

Mittel- und Hochspannungskabel müssen als Berührungsschutz einen geerdeten Schirm haben. Als solcher dient bei den Papier-Masse-Kabeln der Bleimantel, bei den Kunststoffkabeln die Stahlbewehrung oder eine Bespinnung aus Kupferdraht oder Band mit mindestens 6 mm² elektrischem Querschnitt (VDE 0271 § 8). Ein solcher Schirm kann im ungestörten Betrieb den Ladestrom in der Grössenordnung von Ampèren mit Sicherheit aufnehmen. Bei einphasigem Erdkurzschluss im Netz mit niederohmig geerdetem Sternpunkt und bei Doppelerdschluss fliesst über den Schirm jedoch ein Kurzschlußstrom in der Grössenordnung von Kiloampèren. Die Erfahrung zeigt, dass der Bleimantel den auftretenden Kurzschlußstrom im allgemeinen ohne Schaden aufnehmen kann, nicht aber der Kupferschirm von 6 mm² elektrischem Querschnitt. Um den Schirm den Anforderungen für den Fall einer Störung entsprechend dimensionieren zu können, muss der Zusammenhang zwischen dem Aufbau und der zulässigen Kurzschlusserwärmung des Schirmes, der Kurzschlusszeit und dem zulässigen Kurzschlußstrom gefunden werden. Dieser Zusammenhang in Form einer Gleichung soll so einfach sein, dass zahlenmässige Berechnungen mit genügender Genauigkeit in einfachster Weise durchgeführt werden können.

Üblicherweise wird die Kurzschlusserwärmung eines Leiters berechnet unter der Annahme, dass die gesamte Stromwärme im Leiter gespeichert wird (adiabatische Kurzschlusserwärmung). Der Einfluss des Wärmeflusses aus dem Leiter in die umgebende Isolierung wurde verschiedentlich untersucht. Messungen von *A. Hecht* [1][1]) an Papier-Blei-Kabeln zeigten, dass auch bei den verhältnismässig grossen Leiterquerschnitten von 25...150 mm² innerhalb der Kurzschlusszeit von 2...10 s ein nicht zu vernachlässigender Teil der Stromwärme in die Isolierung abfliesst. Für die praktische Anwendung führt *Hecht* einen «Kurzschlusserwärmungsfaktor» ein, das ist das Verhältnis der im Leiter einschliesslich der Tränkmasse im Leiterseil gespeicherten Wärme zur gesamten Stromwärme. Er ist abhängig von Leiterquerschnitt und Kurzschlusszeit.

Berechnungen von *H. Buchholz* [2] wurden von *A. Hecht* auf die Kurzschlusserwärmung von Kabeln angewandt. Übereinstimmung mit den Messungen wurde nicht erzielt. Ausserdem bemerkt *Hecht*, dass die Auswertung auf derartige Schwierigkeiten und Umständlichkeiten stösst, dass eine Anwendung in der Praxis wohl nicht in Frage kommt. Dasselbe gilt sicher auch für die folgenden zwei Methoden zur Berechnung der Kurzschlusserwärmung von Leitern und Schirmen.

G. Grünberg und *M. Soutz* [3] berechnen den zeitlichen Temperaturanstieg eines Leiters beim Kurzschluss durch schrittweise Näherung. Ausgehend vom adiabatischen Temperaturanstieg des Leiters wird mittels der Wärmeleitungsgleichung die in die Isolierung abgeleitete Wärmemenge berechnet und damit der angenommene Temperaturanstieg nullter Näherung im Leiter korrigiert. Unter realen Bedingungen eines Phasenleiters fliessen 10...15 % der Stromwärme innerhalb der Kurzschlusszeit aus dem Leiter in die Isolierung ab, und die zweite Näherung bringt ausreichende Genauigkeit von 1...2 %. Bei dünnwandigen Schirmen fliessen aber 30...80 % der Stromwärme ab, und man muss einige weitere Näherungen berechnen, um die geforderte Genauigkeit zu erreichen. Damit wird diese Methode zur Berechnung der Kurzschlusserwärmung von Schirmen für die Praxis unbrauchbar.

R. C. Mildner, C. B. Arends und *P. C. Woodland* [4] berechnen die Temperaturerhöhung des Schirmes und im umgebenden Medium mathematisch exakt als Funktion von Zeit, Ort und Kurzschlußstrom und finden Übereinstimmung mit Messungen. Auch nach Vereinfachung der angegebenen Beziehungen ist die zahlenmässige Berechnung eines zulässigen Kurzschlußstromes mit Hilfe der angegebenen Funktionstafeln so aufwendig, dass auch diese Methode für die Praxis nicht anwendbar ist.

Messung der Kurzschlusserwärmung von Schirmen

Messungen der Kurzschlusserwärmung des Schirmes wurden an den in Tabelle I aufgeführten Kabeln mit Schirmen aus Kupferband, Kupferrunddrähten, einem Bleimantel und einer Stahlflachdrahtbewehrung durchgeführt. In der Tabelle sind nur die für das gegebene Problem wesentlichen Daten der Kabel angegeben, das ist der Aufbau des Schirmes und die ihn umgebenden Stoffe.

An den Kabeln 1...3 wurde die Kurzschlusserwärmung des Schirmes bei verschiedenen Kurzschlusszeiten, abhängig vom Kurzschlußstrom, gemessen, an den übrigen Kabeln 4...8

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Kabelangaben

Tabelle I

Kabel Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8
Typ	2YHCY 1 × 25/3 20 kV	V2YCY 1 × 70/6 20 kV	V2YCY 1 × 70/6 20 kV	YHCY 1 × 50/6 20 kV	YHCY 1 × 50/6 20 kV	XHCY 1 × 50/10 20 kV	YHKY 1 × 50/10 20 kV	NY(H)FGbY 3 × 25 10 kV
Über Isolierung	halbl. Haftkleber graph. Gewebeband	halbl. Haftkleber graph. Kreppapier	halbl. Haftkleber graph. Kreppapier	graph. Gewebeband	graph. Gewebeband	graph. Gewebeband	graph. Gewebeband	halbl. Gummi-Innenmantel
Wanddicke und ∅	0,35 mm 18,3 mm	0,35 mm 22,0 mm	0,35 mm 22,0 mm	0,35 mm 22,2 mm	0,35 mm 22,2 mm	0,35 mm 22,2 mm	0,35 mm 22,2 mm	1,5 mm 36,3 mm
Schirm	1 Cu-Band 32 × 0,1 Zuschlag 60% Sonderkonstrukt.	10 Cu-Bänder 6 × 0,1 Zuschlag 5%	40 Cu-Drähte 0,40 ∅ Zuschlag 4,9% Cu-Band-Wendel 14 × 0,1 Zuschl. 28,5%	1 Cu-Band 25 × 0,6 Zuschlag 149%	6 Cu-Bänder 12 × 0,1 Zuschlag 15,5% Überlappung 16%	6 Cu-Bänder 14 × 0,15 Zuschlag 15,5% Überlappung 27%	Bleimantel 1,3 mm	27 Stahlformdrähte 4,0/3,4 × 0,8 Zuschlag 4,5% 2 Stahlbd. 16 × 0,3 Zuschlag 87,5%
Polster Wanddicke	PVC-Folie 0,2 mm	Gewebeband 0,35 mm	Gewebeband 0,35 mm	getr. Baumwollbd.	getr. Baumwollbd.	getr. Baumwollbd.	Bitumenmasse	
Mantel Wanddicke	PVC hochgefüllt 2,0 mm	PVC hochgefüllt 2,0 mm	PVC hochgefüllt 2,0 mm	PVC hochgefüllt 2,0 mm	PVC niedergefüllt 2,0 mm	PVC niedergefüllt 2,0 mm	PVC niedergefüllt 2,0 mm	PVC hochgefüllt 2,4 mm
Schirmquerschnitt geometrisch mm²	3,2 mm²	6,0 mm²	6,42 mm²	15 mm²	7,2 mm²	12,6 mm²	96,0 mm²	89,6 mm²
Schirmquerschnitt gewichtsmässig q_g	5,12 mm²	6,3 mm²	7,06 mm²	37,5 mm²	8,32 mm²	14,55 mm²	96,0 mm²	107,0 mm²
Schirmquerschnitt elektrisch q_e	2,0 mm²	6,0 mm² (Messwert)	5,75 mm² (Messw.)	6,0 mm²	6,23...7,2 mm²	10,9...12,6 mm²	96,0 mm²	
Kurzschluss q_k	3,2 mm²	6,15 mm²	6,37 mm²	15,0 mm²	7,2...7,7 mm²	12,6...13,5 mm²	96,0 mm²	
Schirmwiderstand		2,88 mΩ/m	3,00 mΩ/m					1,33 mΩ/m

wurde die Erwärmung des Schirmes nur bei 1-s-Kurzschluss gemessen [5].

Der Schirm einer Kabelprobe wurde über einen Shunt an einen Hochstromtransformator mit vorgeschaltetem Regeltransformator angeschlossen. Der Spannungsabfall am Shunt, und damit der Strom, und der Spannungsbfall am Schirm wurden mit einem Lichtstrahloszillographen aufgezeichnet und gemessen. Daraus wurde dann die Zunahme des Widerstandes und der Temperatur des Schirmes ermittelt. Die Anfangstemperatur der Schirme war bei allen Versuchen gleich der Raumtemperatur, etwa 20 °C.

Ergebnisse der Messungen

Die Ergebnisse der Messungen: Die Kurzschlusserwärmung $\vartheta_k - \vartheta_0$ des Schirmes, abhängig von der Kurzschlussbelastung $I^2 t$, sind für das Kabel 1 in Fig. 1, für die Kabel 4...8 nach [5] in Fig. 2 dargestellt. In Fig. 1 sind als Parameter die verschiedenen Kurzschlusszeiten t_k eingetragen. Weiter sind die adiabatischen Erwärmungskurven nach Gl. (5) eingetragen. Es ergibt sich daraus: Bei gleicher Erwärmung kann die Kurzschlussbelastbarkeit eines dünnwandigen Schirmes, besonders bei grossen Kurzschlusszeiten, wesentlich grösser sein als nach der adiabatischen Berechnung. Ein wesentlicher Teil der Stromwärme muss also schon innerhalb der Kurzschlusszeit aus dem Schirm in die umgebenden Stoffe abfliessen.

Voraussetzungen für die Berechnung der Kurzschlussbelastbarkeit

Der Übergang der Wärme aus dem Schirm in das umgebende Medium erfolgt durch reine Wärmeleitung. Das setzt guten Kontakt zwischen dem Schirm und dem umgebenden Medium voraus. Das ist auch aus anderen Gründen zu fordern, z. B. um elektrische Teilentladungen in Hohlräumen zu vermeiden. Das umgebende Medium ist innerhalb der Schichtdicke, in die innerhalb der Kurzschlusszeit Wärme einfliesst, homogen. Um die Rechnung in einfacher Form durchführen zu können, werden die Stoffwerte als konstant, d. h. unabhängig von der Temperatur, vorausgesetzt; nur die Abhängigkeit des elektrischen Widerstandes des Schirmes von der Temperatur muss berücksichtigt werden. Dieselben Voraussetzungen werden auch in den Arbeiten [3] und [4] gemacht.

Weiter wird vorausgesetzt, dass die Dicke x_k der Schicht, in die innerhalb der Kurzschlusszeit Wärme aus dem Schirm in das umgebende Medium eindringt, klein ist gegen den Krümmungsradius der Schirmoberfläche. Die Wärmeleitung kann dann als lineares Problem behandelt werden. Die Rechnungen und Messungen von *A. Hecht* ergaben diese Schichtdicke x_k in der Grössenordnung von 0,2...1 mm, so dass diese Voraussetzung für Schirme aus Metallbändern und Bleimänteln erfüllt ist. Es zeigt sich aber, dass die Rechnung auch für Schirme aus Runddrähten ein brauchbares Ergebnis liefert.

Der Schirm wird in jedem Zeitpunkt als isotherm vorausgesetzt. Da die Wärmeleitfähigkeit der Metalle um 2...3 Zehnerpotenzen grösser ist als die der isolierenden Stoffe, ist diese Voraussetzung berechtigt, und die Wärmeleitfähigkeit des Leitermaterials spielt für das behandelte Problem keine Rolle. Endlich muss bei Schirmen aus überlappten Metallbändern vorausgesetzt werden, dass die Querleitfähigkeit und damit der elektrische Querschnitt während der Kurzschlussbelastung konstant bleibt.

Berechnung der Kurzschlussbelastbarkeit

Für die Berechnung der Kurzschlussbelastbarkeit des Schirmes sollen folgende Bezeichnungen gelten:

I in A	Kurzschlußstrom
ϑ in K	Temperatur
ϑ_0 in K	Anfangstemperatur

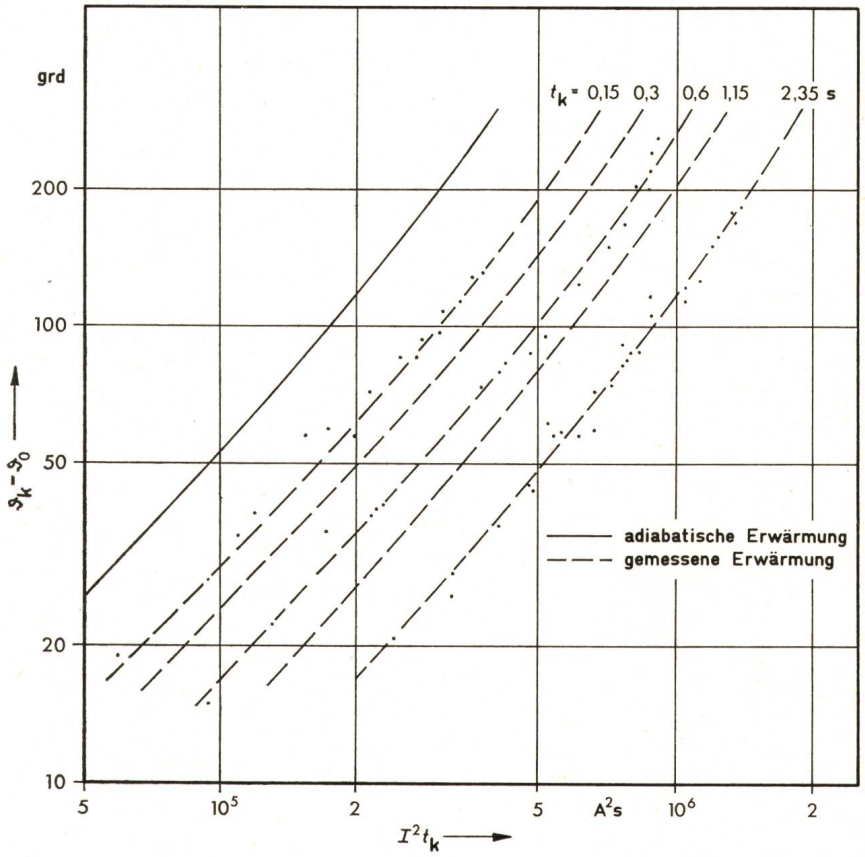

Fig. 1
Erwärmung des Schirmes von Kabel 1
2YHCY 1 × 25/6 für 11,6/20 kV
durch die Kurzschlussbelastung $I^2 t_k$ bei verschiedenen Kurzschlusszeiten t_k und bei adiabatischer Erwärmung
ϑ_k Kurzschlusstemperatur
ϑ_0 Anfangstemperatur

t	in s	Zeit vom Beginn der Kurzschlussbelastung an
t_k	in s	Kurzschlusszeit
x	in cm	Abstand von der Schirmoberfläche

Für den Schirm gelten die Bezeichnungen:

ϱ_0	in Ωcm	spez. elektrischer Widerstand bei der Anfangstemperatur
α_0	in 1/K	Temperaturkoeffizient des Widerstandes, bezogen auf den Widerstand bei der Temperatur ϑ_0
δ_l	in g/cm³	die Dichte
c_l	in Ws/gK	die spez. Wärme
q_e	in cm²	der elektrische Querschnitt des Schirmes, aus dem Widerstand zu bestimmen
q_g	in cm²	der Gewichtsquerschnitt des Schirmes, aus dem Gewicht zu bestimmen
A	in cm²/cm	die Oberfläche des Schirmes für 1 cm Kabellänge

Für das den Schirm umgebende Medium gelten die Bezeichnungen:

δ_i	in g/cm³	Dichte
c_i	in Ws/gK	spez. Wärme
k	in W/cmK	spez. Wärmeleitfähigkeit

Die im Schirm erzeugte Stromwärme wird z. T. im Schirm gespeichert, z. T. in das umgebende Medium abgeleitet. Es besteht daher die Beziehung:

$$\frac{I^2 \varrho_0}{q_e} [1 + \alpha_0 (\vartheta - \vartheta_0)] \, dt = q_g \, \delta_l \cdot c_l \cdot d\vartheta - A \, k \left(\frac{d\vartheta}{dx}\right)_{x=0} \cdot dt \tag{1}$$

Zur Berechnung des Temperaturgradienten an der Oberfläche des Schirmes im umgebenden Medium denke man, der Schirm erleide eine periodische Temperaturänderung der Periode $n \, t_k$. Dieser quasistationäre Zustand ist dann mathematisch sehr einfach zu behandeln. Wir ersetzen also den zeitlich angenäherten linearen Temperaturanstieg des Schirmes durch den Anfangsbereich einer Sinus-Funktion. Die Lösung der Wärmeleitungsgleichung

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{k}{\delta_i \, c_i} \cdot \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} \tag{2}$$

für das umgebende Medium ist dann sehr einfach zu finden [6] und liefert mit der Randbedingung $\vartheta - \vartheta_0 = 0$ für $t = 0$ und $x = 0$ die Beziehung:

$$\left(\frac{d\vartheta}{dx}\right)_{x=0} = - \left(\frac{d\vartheta}{dt}\right)_{t=0} \sqrt{\frac{\delta_i \, c_i}{4 \pi k} \, n \, t_k} \tag{3}$$

Der Zahlenfaktor n kann nach der vorliegenden Theorie nicht berechnet werden und wird empirisch bestimmt (s. u.). Aus der 1-s-Belastbarkeit ergibt sich $n = 6{,}0$. Da also die angenommene Periodendauer nicht sehr gross gegen die Kurzschlussdauer ist, wird der angenähert lineare Temperaturanstieg innerhalb der Kurzschlusszeit durch die Sinus-Funktion nur in grober Näherung wiedergegeben. Wir nehmen nun an, dass die Beziehung Gl. (3) nicht nur für $t = 0$, sondern während der ganzen Kurzschlusszeit gilt. Die Berechtigung dieser Annahme wäre schwierig nachzuprüfen, und sie gilt sicher nur in grober Näherung. Infolge dieser beiden Näherungen ist in der Abhängigkeit der Kurzschlussbelastbarkeit von der Kurzschlusszeit eine völlige Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung nicht zu erwarten.

Mit Gl. (3) ist nun Gl. (1) einfach zu integrieren, und man erhält:

$$\left(\frac{I}{I_{ad}}\right)^2 = 1 + \frac{A}{q_g \, \delta_l \, c_l} \sqrt{\frac{\delta_i \, c_i \, k}{4 \pi}} \sqrt{n \, t_k} \tag{4}$$

Dabei gilt für den adiabatischen Kurzschlußstrom bei gleicher Kurzschlusszeit und gleicher Kurzschlusserwärmung:

$$I_{ad}^2 \, t_k = \frac{q_k^2 \, \delta_l \, c_l}{\varrho_0 \, \alpha_0} \ln [1 + \alpha_0 (\vartheta_k - \vartheta_0)] \tag{5}$$

Der für die Kurzschlussbelastbarkeit massgebende Kurzschlussquerschnitt des Schirmes wird:

$$q_k = \sqrt{q_g \, q_e} \tag{6}$$

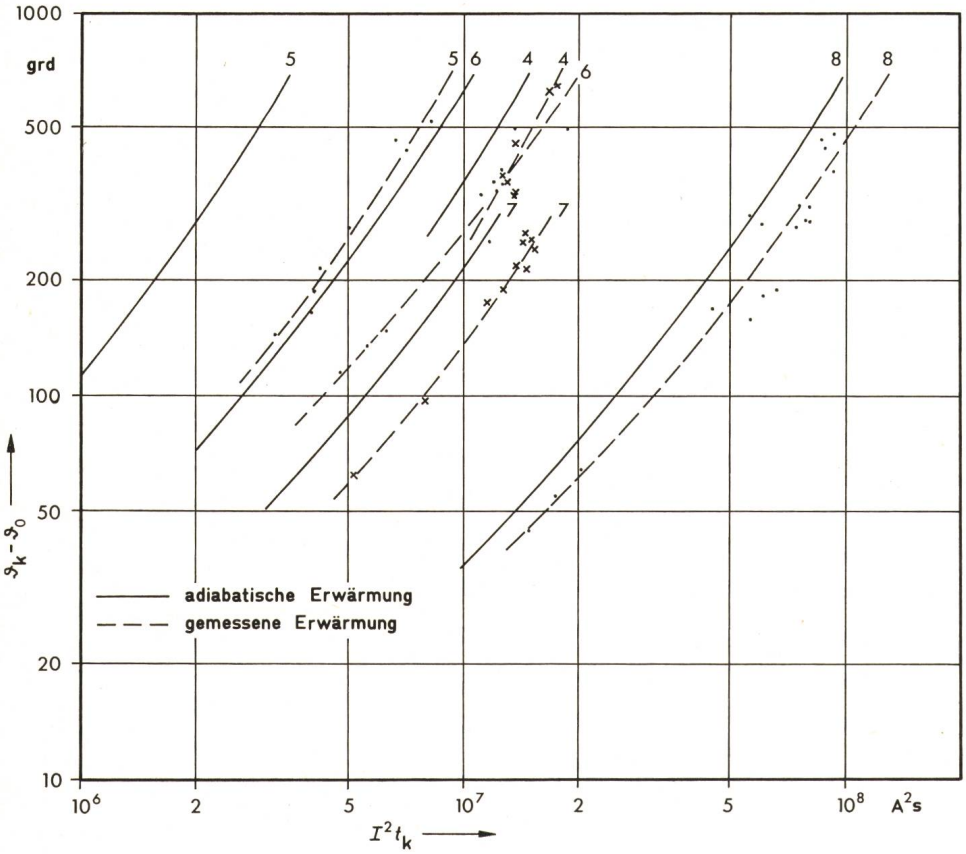

Fig. 2
Erwärmung der Schirme der Kabel 4...8 durch die Kurzschlussbelastung I^2 bei 1-s-Kurzschlusszeit und bei adiabatischer Erwärmung
Bezeichnungen siehe Fig. 1

Materialkonstanten für Schirme

Tabelle II

		Kupfer	Blei	Stahl	Aluminium	Einheit
Dichte	δ_1	8,92	11,35	7,85	2,70	g/cm³
Spez. Wärme	c_1	0,093	0,0309	0,115	0,214	cal/g · K
	$\delta_1 c_1$	3,47	1,47	3,78	2,42	Ws/cm³·K
Spez. Widerst.	ϱ_{20}	1,724	21	13	2,82	10^{-6} Ωcm
Temperaturkoeffizient des Widerstandes	α_{20}	3,93	3,9	4,2	4,03	$10^{-3} \cdot 1/K$

In Gl. (4) kann man die wirksame Wanddicke d des Schirmes einführen:

$$\frac{A}{q_g} = \frac{2}{d} \tag{7}$$

Wenn an die Innen- und Aussenseite des Schirmes Stoffe mit verschiedenen thermischen Materialkonstanten, insbesondere Stoffe mit stark verschiedener Wärmeleitfähigkeit angrenzen, so ist Gl. (4) die rechte Seite über die beiden Oberflächenhälften des Schirmes zu summieren.

Vergleich der Rechnung mit den Messungen

Materialkonstanten

Die in die Rechnung eingehenden Werte der Materialkonstanten sind in Tabelle II für die Schirme, in Tabelle III für die den Schirm umgebenden Stoffe zusammengestellt. Die Werte der Tabelle III wurden, soweit sie nicht gemessen wurden oder bekannt waren, aus denen der Komponenten abgeschätzt. Die Wärmeleitfähigkeit von Gewebeband und graphitiertem Kreppapier, trocken und getränkt, war nicht bekannt und musste erst gemessen werden, um die Messungen richtig auswerten zu können. Die Raumgewichte der Bänder wurden im aufgespulten Zustand gemessen. Über die Genauigkeit der Werte gilt:

Bei den gemessenen Werten für den Wärmewiderstand ist die Unsicherheit 3...5 %.

Bei den Werten für die Wärmekapazität $\delta_i c_i$ und den Wärmewiderstand der niedergefüllten PVC-Mischung für den Mantel 5...10 %.

Bei den in ( ) gesetzten Werten ca. 10...20 %.

Bei den Werten der Tabelle II ist die Unsicherheit im elektrischen Widerstand von Stahl und seinem Temperaturkoeffizienten etwa 5 %, bei den übrigen Werten ist sie zu vernachlässigen.

Kurzschlussbelastbarkeit abhängig von der Kurzschlusszeit

Die Abhängigkeit der Kurzschlussbelastbarkeit von der Kurzschlusszeit ergibt sich nach Gl. (4), indem man $(I/I_{ad})^2 - 1$ abhängig von t_k, beide in logarithmischem Maßstab, aufträgt (Fig. 3). Die Werte von $I^2 t_k$ und $I_{ad}^2 t_k$ für die gleiche Kurzschlusserwärmung sind bei Kabel 1 der Fig. 1 entnommen, analog wurde bei den Kabeln 2 und 3 verfahren. Aus Fig. 3 ist abzulesen: Der Umrechnungsfaktor I/I_{ad} ist innerhalb der Messgenauigkeit unabhängig von der Kurzschlusserwärmung. Die Temperaturabhängigkeit der Wärmekapazität und der Wärmeleitfähigkeit spielen also praktisch keine Rolle.

Für die Kurzschlussbelastbarkeit als Funktion der Kurzschlusszeit ergibt sich die Beziehung:

$$\left(\frac{I}{I_{ad}}\right)^2 - 1 \sim t_k^{0,6} \ldots t_k^{0,8} \tag{8}$$

Nach der Theorie, Gl. (4) ergibt sich Proportionalität mit $t_k^{0,5}$. Auch aus der Theorie von *Mildner* und Mitarbeitern lässt sich zahlenmässig eine Proportionalität mit etwa $t_k^{0,5}$ ableiten. Diese Abhängigkeit ist daher als richtig anzusehen unter den getroffenen Voraussetzungen, insbesondere dass das den Schirm umgebende Medium in genügender Schichtdicke homogen ist. Tatsächlich ist in den untersuchten Beispielen dieses Medium geschichtet, und die zweite Schicht hat grössere Wärmeleitfähigkeit als die erste (eine Ausnahme macht nur die Bitumenschicht auf dem Bleimantel bei Kabel 7). Aus Gl. (3) lässt sich mit $dt = t_k$ abschätzen, dass die aus dem Schirm abgeleitete Wärme die erste Schicht unter dem Schirm von Kabel 1 nach etwa 0,4 s Kurzschlusszeit durchdrungen hat. Ist die Kurzschlusszeit grösser als 0,4 s, so wirkt sich, steigend mit der Kurzschlusszeit, immer mehr die bessere Wärmeleitfähigkeit des darunterliegenden PE aus. Das hat zur Folge, dass das Zusatzglied in Gl. (4) für die Kurzschlussbelastbarkeit stärker als mit $t_k^{0,5}$ wachsen muss. Dasselbe gilt bei den Kabeln 2 und 3 in verstärktem Masse auch für die Aussenseiten der Schirme, die Kurzschlussbelastbarkeit muss mit der Kurzschlusszeit noch stärker ansteigen als bei Kabel 1. Zu einer quantitativen Deutung reicht die Messgenauigkeit nicht aus.

1-s-Kurzschlussbelastbarkeit, abhängig vom Material und Aufbau des Schirmes und dessen Umgebung

Zur Beurteilung des Einflusses des Aufbaues und Materials des Schirmes und der Eigenschaften der den Schirm umgebenden Stoffe stehen neben den angeführten Messungen bei verschiedenen Kurzschlusszeiten noch die Messungen der 1-s-Kurzschlusserwärmung an Kabeln mit anderen Kupferschir-

Materialkonstanten der die Schirme umgebenden Stoffe

Tabelle III

	$1/k$ cm·°K/W	δ_i g/cm³	c_i cal/g·K	$\delta_i c_i$ Ws/cm³ K	$\delta_i c_i k \cdot 10^4$ Ws/cm⁴ K⁴
Graphitiertes Gewebeband	620[1])	0,78	0,30	0,98	15,8
Graphitiertes Gewebeband mit Haftkleber	490[1])			(1,3)	26,6
Graphitiertes Kreppapier	1500[1])	0,65[1])	0,30	0,82	5,5
Graphitiertes Kreppapier mit Haftkleber	1000[1])			(1,2)	12,0
Baumwollband	1100[1])	0,60[1])	0,31	0,78	7,1
Baumwollband, getränkt	(800)			(1,2)	15,0
PVC, niedergefüllt	600[1])	1,4[5])	0,35[1])	2,1	35,0
PVC, hochgefüllt	500[1])	1,5[5])	0,33	2,1	42,0
Innenmantel	(300)			(2,1)	70,0
PE	400[1])	0,92[5])	0,6[2])	2,3	57,0
Bitumen (Asphalt)	140[3])	1,0[5])	0,22[3])	0,92	66,0
Baumwolle		1,48[4])	0,31[4])		
Graphit		2,25[3])	0,17[3])	1,60	
Haftkleber und Tränkmasse		(1,0)	(0,4)	(1,7)	

[1]) eigene Messung
[2]) Kohlrausch: Prakt. Physik
[3]) Siemens Formeln- und Tabellenbuch
[4]) Hütte, Bd. I, 1948
[5]) Chem.-Techn. Labor des Werkes

men, einem Bleimantel und einer Stahlflachdrahtbewehrung von *Bott* und *Schröter* [5] zur Verfügung.

Der Aufbau dieser Kabel ist in Tabelle I, die Messergebnisse in Fig. 2 wiedergegeben. Der adiabatische Kurzschlussstrom der Stahldrahtbewehrung wurde mittels des Widerstandes $R_0 = \varrho_0/q_e$ berechnet.

In Fig. 4 sind die Werte von $(I/I_{ad})^2 - 1$ nach den Messungen in Abhängigkeit von den nach Gl. (4) mit $n = 1$ berechneten Werten aufgetragen. Bei der Rechnung sind nur die an den Schirm unmittelbar anliegenden Schichten berücksichtigt. Weiter sind in Fig. 4 die ungefähren Grenzen der Unsicherheit eingezeichnet. Bei den Rechenwerten wurde die Unsicherheit in den Zahlenwerten der thermischen Konstanten, Tabelle III, bei den Messwerten die Streuung der Einzelwerte (Fig. 1 und 2) und die Unsicherheit im Wert des Kurzschlussquerschnittes, dem der adiabatische Kurzschlußstrom proportional ist, berücksichtigt. Bei den Kabeln 5 und 6 war der Widerstand des Schirmes nicht gemessen, daher konnte für q_e und q_k nur ein sicherer unterer und ein angenäherter oberer Grenzwert angegeben werden (Tabelle I), denen die beiden in Fig. 4 eingezeichneten Messwerte entsprechen.

Berücksichtigt man diese Unsicherheit bei den Kabeln 5 und 6, so zeigt Fig. 4: Die gemessenen Werte von $(I/I_{ad})^2 - 1$ sind den berechneten Werten sehr gut proportional. Der Proportionalitätsfaktor nach Gl. (4) ist aus Fig. 4 abzulesen zu:

$$\sqrt{n} = 2{,}45 \pm 0{,}1 \text{ oder } n = 6{,}0 \pm 0{,}5 \qquad (9)$$

Lässt man dagegen die nur einige $^1/_{10}$ mm dicke Schicht, die dem Schirm unmittelbar anliegt, unberücksichtigt und rechnet nach Gl. (4), so als ob die Wärmeableitung nur durch das Material der Isolierung und des Mantels bedingt wäre, so sind die gemessenen Werte von $(I/I_{ad})^2 - 1$ den berechneten Werten nicht proportional, die Abweichungen sind z. T. um ein Mehrfaches grösser als die Unsicherheit von Messung und Rechnung. Nur bei Kabel 7 ist die Bitumenschicht über dem Bleimantel so dünn, dass die Wärmeableitung nach aussen wesentlich durch den darüberliegenden PVC-Mantel mit bedingt ist (s. die beiden in Fig. 4 eingetragenen Rechenwerte). Die Kabel 5 und 6 fallen aus der Reihe wegen der Unsicherheit in q_e und I_{ad}, also des Messwertes. Aus dem Vergleich der Messung mit der Rechnung ergibt sich daher der Schluss:

Die 1-s-Kurzschlussbelastbarkeit eines Schirmes kann mit Hilfe einer empirischen Konstanten n aus dem Aufbau des Schirmes, den elektrischen und thermischen Konstanten des Schirmmaterials und den thermischen Konstanten der dem Schirm unmittelbar anliegenden Stoffe nach Gl. (4) in einfacher Weise und mit ausreichender Genauigkeit berechnet werden. Nur wenn die Dicke der dem Schirm unmittelbar anliegenden Schicht extrem klein ist, d. h. klein gegen die Schichtdicke, in die Wärme innerhalb der Kurzschlusszeit einfliesst, ist die nächstfolgende Schicht zu berücksichtigen. Nach den Versuchsergebnissen darf diese Berechnung unabhängig vom Aufbau und Material des Schirmes und vom Material der umgebenden Stoffe angewendet werden.

Das Beispiel von Kabel 3 zeigt, dass die Rechnung auch auf Schirme aus Runddrähten angewendet werden darf, obwohl hier die Voraussetzungen der Rechnung z. T. nicht erfüllt sind. Die abkühlende Oberfläche A wird hier aus der Oberfläche der Haltewendel und der Oberfläche der Drähte zwischen den Windungen der Haltewendel berechnet.

Anwendung

Die zulässigen Grenztemperaturen der Schirme bei Kurzschluss wurden so festgelegt, dass der Schirm mehrere 1-s-Kurzschlussbelastungen ohne Schädigung verträgt [5]. Man kann nun, wie bei der Kurzschlussbelastbarkeit der Phasenleiter, festlegen, dass diese Grenztemperatur im ganzen Bereich der Kurzschlusszeiten von 0,1...5 s zulässig sein soll.

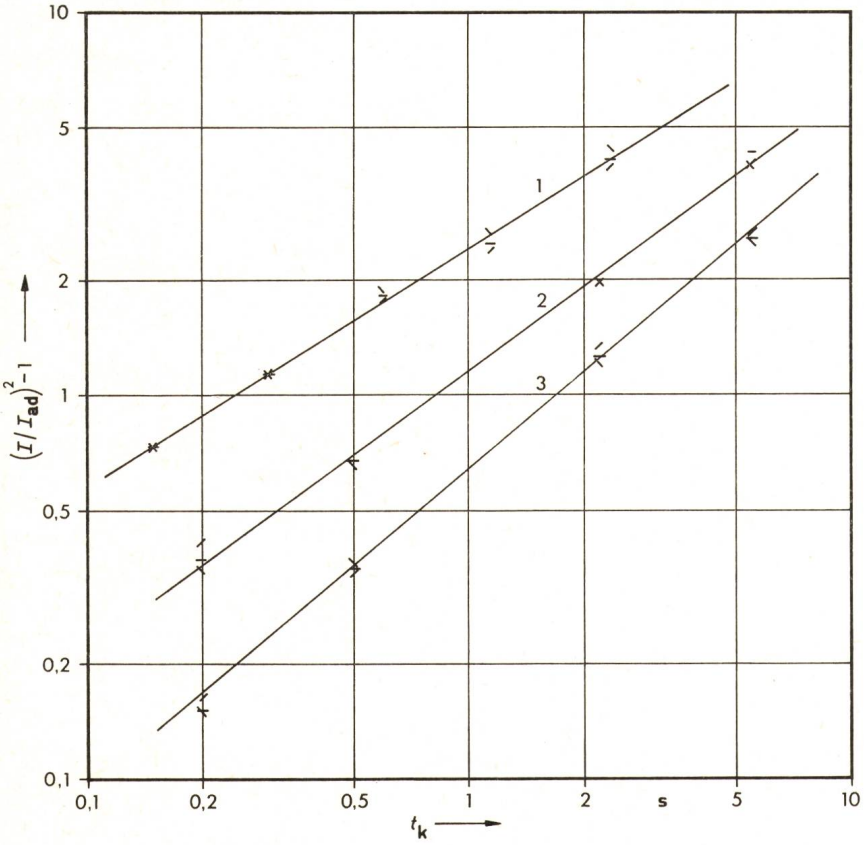

Fig. 3
Relative Belastbarkeit $(I/I_{ad})^2 - 1$ der Schirme der Kabel 1, 2 und 3, abhängig von der Kurzschlusszeit t_k für die Kurzschlusserwärmung ϑ_k -20 K der Schirme von 50, 100 und 200 K

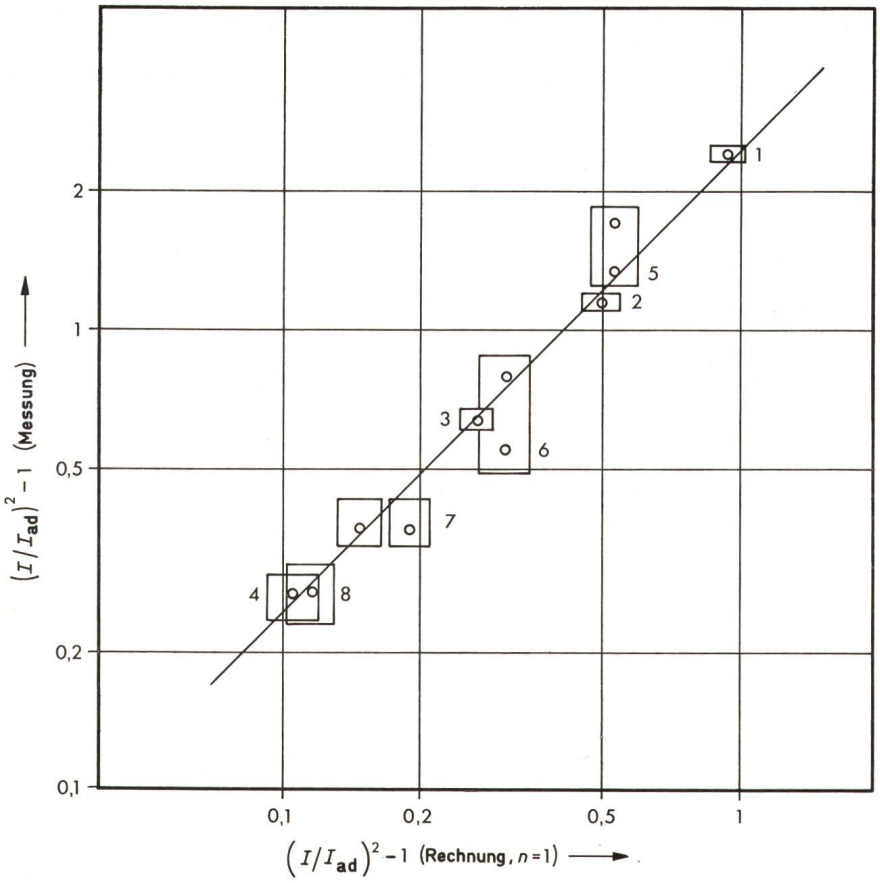

Fig. 4
Relative Belastbarkeit $(I/I_{ad})^2$-1 der Schirme der Kabel 1...8 bei der Kurzschlusszeit 1 s, abhängig von den berechneten Werten nach Gl. 4 mit $n = 1$
Bezeichnungen siehe im Text

Die Erfahrung und eingehende Versuche von *H. C. Müller* [7] zeigten, dass sich mit der Zahl der Kurzschlüsse und der Kurzschlusszeit die zulässige Grenztemperatur deutlich vermindert. Dem kommt man ausreichend entgegen, wenn man in dem Umrechnungsfaktor nach Gl. (4) statt mit dem empirischen mit dem theoretischen Wert 0,5 des Exponenten von t_k rechnet. Der zulässige Kurzschlußstrom ist nach Gl. (4) proportional dem adiabatischen Kurzschlußstrom und eine Funktion des Ausdruckes:

$$\frac{\sqrt{\delta_i\, c_i\, k}}{d\, \delta_1\, c_1}$$

Derselbe Ausdruck tritt auch in der Theorie von *Mildner* [4] auf. Die thermischen Materialkonstanten der den Schirm umgebenden Medien stehen in der 0,5ten Potenz, d. h., ihr Einfluss auf die Kurzschlussbelastbarkeit des Schirmes ist verhältnismässig gering. Damit ist es möglich, Stoffe, in die der Schirm eingebettet ist und für die das Produkt $\delta_i\, c_i\, k$ in einem verhältnismässig weiten Bereich liegen, zu einer Gruppe zusammenzufassen und für diese einen einheitlichen Umrechnungsfaktor vom adiabatischen auf den tatsächlich zulässigen Kurzschlußstrom anzugeben.

Zur Berechnung des adiabatischen Kurzschlußstromes muss der elektrische und der gewichtsmässige Querschnitt des Schirmes bekannt sein. Der elektrische Querschnitt ist abhängig von der Querleitfähigkeit zwischen den Aufbauelementen des Schirmes, er kann also für verschiedene Fertigungslängen oder von Ort zu Ort verschieden sein. Um auch örtliche Überlastung des Schirmes zu vermeiden, ist daher der adiabatische Kurzschlußstrom für den kleinsten Wert des elektrischen Querschnittes zu berechnen. Das ungünstigste Beispiel dafür ist Kabel 5. Die Unsicherheit von ± 7,5% im elektrischen Querschnitt ergibt eine Unsicherheit von ± 3,4% im Kurzschlussquerschnitt und im zulässigen Kurzschlußstrom. Eine genauere Angabe des zulässigen Kurzschlußstromes im Schirm ist nicht sinnvoll.

Nach Gl. (4) kann auch die Kurzschlussbelastbarkeit der Phasenleiter korrigiert werden. Der Unterschied gegenüber dem adiabatischen Kurzschlußstrom wäre nur bei kleinen Leiterquerschnitten und grossen Kurzschlusszeiten zu beachten, besonders bei Leitern aus Aluminium, weil für Aluminium der Wert des Produktes $\delta_1\, c_1$ kleiner ist als für Kupfer.

Literatur

[1] *A. Hecht:* Kurzschlusserwärmung von Kabeln. Dissertation der Technischen Hochschule Berlin. VDI-Forschungsheft 362, 1933.

[2] *H. Buchholz:* Besondere Fälle der Erwärmung elektrischer Leiter. Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik 9(1929)1, S. 280...298.

[3] *G. Grünberg* und *M. Sontz:* Über die Berechnung der Kurzschlusserwärmung von Hochspannungskabeln. Journal of Physics 4(1941)1/2, S. 97..112.

[4] *R. C. Mildner, C. A. Arends* and *P.C. Woodland:* The short-circuit rating of thin metal tape cable shields. Trans. IEEE PAS 87(1968)3, p. 749...759.

[5] *J. Bott* und *G. Schröder:* Zulässige Grenztemperaturen der Schirme von Starkstromkabeln bei Kurzschlussbelastung. ETZ-B 21(1969)11, S. 247...250.

[6] *G. Joos:* Lehrbuch der theoretischen Physik. 2. Auflage. Leipzig, Akademische Verlagsgesellschaft, 1934.

[7] *H. C. Müller:* Zur Kurzschlussbelastbarkeit von 10 kV-Gürtelkabeln mit einer Aderisolierung auf PVC-Basis. Dissertation der Technischen Hochschule Karlsruhe, 1964.

Adresse des Autors:
Dr. *Josef Bott*, Abt. Energieversorgung der Siemens AG, Werk Neustadt, Am Moos 8, D-8632 Neustadt/Cob.