

Die Zusatzverluste bei Mittelspannungskabeln lassen sich reduzieren

Autor(en): **Sarbach, Ewald**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **86 (1995)**

Heft 7

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-902435>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Die billigste Art, Energie zu sparen, ist die Vermeidung unnötiger Verluste. Neue Entwicklungen haben es ermöglicht, die sogenannten Zusatzverluste bei Mittelspannungskabeln drastisch zu reduzieren. Im vorliegenden Artikel wird gezeigt, wie bei einem Leiterquerschnitt von 630 mm^2 mit einer neuen Konstruktion je nach Belastung bei den Zusatzverlusten Einsparungen von 37 bis 56% möglich sind; die totalen Verluste reduzieren sich in solchen Fällen um 10–13%. Bei kleineren Querschnitten sind die Gewinne weniger hoch, aber ab 150 mm^2 immer bedeutungsvoll.

Die Zusatzverluste bei Mittelspannungskabeln lassen sich reduzieren

■ Ewald Sarbach

Die Vermeidung unnötiger Verluste ist – neben Verzicht und Nichtverbrauch – die billigste Art, Energie zu sparen. Allerdings meinen viele Kabelfachleute, bei einem seit langem etablierten und hochentwickelten Produkt, wie es die Mittelspannungskabel sind, wäre kaum noch etwas zu holen. Bis vor kurzem stimmte diese Aussage weitgehend. Neue Entwicklungen haben aber ermöglicht, die Zusatzverluste drastisch zu reduzieren. In einem Kundenkatalog einer grossen schweizerischen Kabelfirma liest man: «Induzierte Ströme treten in den Abschirmungen von beidseitig geerdeten Einleiterkabeln mit entsprechenden Verlusten auf. Diese Ströme können in gewissen Fällen grösser als der Leiterstrom werden. Ab 400 mm^2 Leiterquerschnitt reduziert sich die Transportkapazität merkbar...». Bei einem Leiterquerschnitt von 630 mm^2 sind nun aber durch eine neue Konstruktion und Rohrverlegung je nach Belastung bei den Zusatzverlusten Einsparungen von 37 bis 56% möglich; die totalen Verluste reduzieren sich dadurch um 10–13%. Bei kleineren Querschnitten sind die Gewinne weniger hoch, aber ab 150 mm^2 immer bedeutungsvoll.

Die Zusatzverluste in Kabeln können durch eine nur einseitige Erdung der Schirmelemente – und sofern nicht noch zusätzlich eine Stahldrahtarmierung vorge-

sehen ist – vollständig eliminiert werden. Aber es müssen dann andere Vorkehrungen getroffen werden wie Spannungsbegrenzung am offenen Ende durch Überspannungsableiter und weitere Schutzmassnahmen. Dies ist der Grund, warum diese Möglichkeit zur Verlustreduktion gesamtschweizerisch nur zu einem sehr kleinen Teil genutzt wird. Einseitige Erdung wird vor allem dann angewandt, wenn Spannungsverschleppung im Fehlerfall vermieden werden soll. In den meisten Anwendungsfällen werden aber die Schirmelemente bei Mittelspannungskabeln beidseitig geerdet, so dass eine Reduktion der dadurch verursachten Zusatzverluste von grosser Bedeutung ist.

Auch bei vollständig symmetrischem Kabelaufbau (Dreileiterkabel) und symmetrischen Strömen werden in den Schirmelementen Längsspannungen induziert, welche bei einseitiger Erdung am offenen Ende direkt messbar sind und bei beidseitiger Erdung zu Schirmströmen und entsprechenden Verlusten führen.

Konstruktive Massnahmen zur Verlustreduktion

In der Vergangenheit waren die Zusatzverluste bei Mittelspannungskabeln kein oder kaum ein Thema. Dies lag daran, dass alle Kabelkonstruktionen in der Schweiz fast identische Schirmkonstruktionen vorsahen und man die Zusatzverluste als systeminhärent gegeben, also unverrückbar,

Adresse des Autors:

Ewald Sarbach, Dipl. Ing. ETHZ, Studer Draht- und Kabelwerk AG, 4658 Däniken SO.

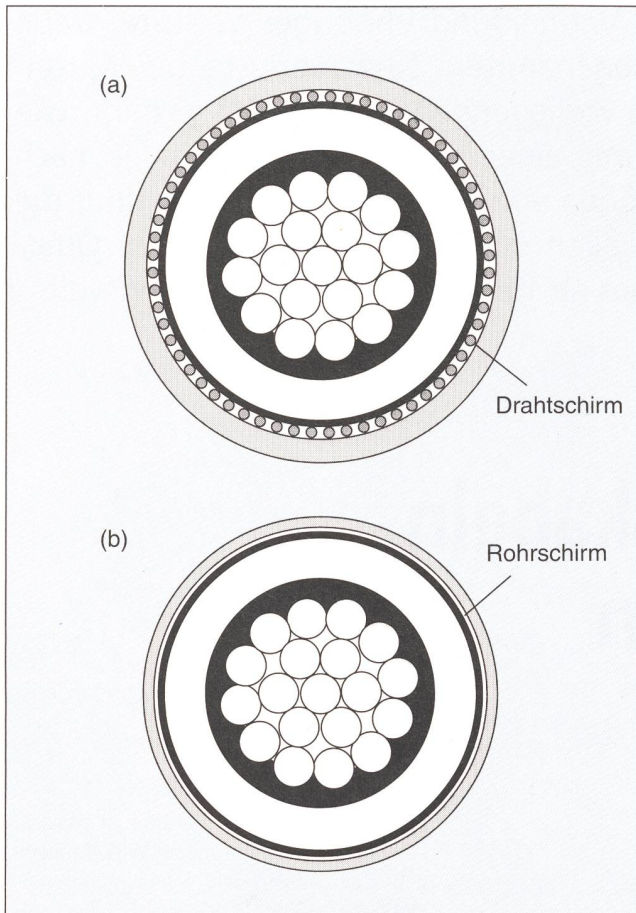


Bild 1 Querschnitt eines Mittelspannungskabels

- a mit Drahtschirm
- b mit Rohrschirm

Leiterquerschnitt [mm ²]	P_{St}/P_{Cu}
95	1,44
150	1,19
240	1,40

Tabelle II Verluste in Stahldrahtarmierung P_{St} bezogen auf die Verluste in Cu-Drahtschirm P_{Cu}

einem Drahtschirm (a) und einem Rohrschirm (b). Der Aufbau ist um so kompakter, je höher der Füllfaktor (Verhältnis der Fläche der Schirmelemente zur Kreisringfläche, in welcher diese liegen) ist. Mit einem Rohrschirm, anstelle eines Drahtschirms mit Füllfaktor 0,2–0,3 (heutige Ausführung allgemein), erreicht man einen idealen Füllfaktor von 1,0.

B. Reduktion der Wandstärke des Einleitermantels: Dies lässt sich durch den Einsatz eines hochzähen Materials erreichen. Es ist heute möglich, die Sicherheit gegen Beschädigung auch bei reduzierter Wandstärke zu verbessern, denn hochzähe Materialien haben eine bis zu einem Faktor 15 höhere Abriebfestigkeit als übliches Polyethylen (PE), wie es für Mäntel von Mittelspannungskabeln noch häufig eingesetzt wird.

C. Verseilen der Einleiter: Diese Massnahme ist für Leiterquerschnitte bis 300 mm² fabrikatorisch möglich. Aus Transportgründen, aber auch fabrikatorisch ist die Länge jedoch begrenzt. Der Anwender hat die Wahl, ob er für Leiterquerschnitte ≤300 mm² eine verseilte Ausführung oder drei Einleiter einsetzen will. Drei Einleiter unverseilt im Rohr ergeben immer wesentlich höhere Zusatzverluste (Faktor von ungefähr 2) als die verseilte Ausführung. Wenn Querschnitt und Länge es ermöglichen, lohnt sich eine verseilte Ausführung immer, denn die Mehrkosten für das Verseilen und den Schutzmantel betragen nur 2–3% des Kabelpreises und die Rückflussdauer der Mehrinvestition beträgt nur wenige Monate.

Durch die konstruktiven Massnahmen gemäss Punkt A und B, welche bei bestimmten Kabeltypen (XDMZ und XDMZ-Z) bereits realisiert sind, lassen sich die induzierten Spannungen um rund 7–9% und damit die Verluste um 14–18% reduzieren.

Erhöhung des Schirmwiderstandes

Der ohmsche Widerstand R_s des Schirms lässt sich erhöhen, sofern sichergestellt ist, dass die Schirmströme im Fehlerfall beherrscht werden [1]. Auch dies spricht für den Einsatz von Al-Rohrschirmen. Durch den vollflächigen Kontakt solcher Rohrschirme ergibt sich gegenüber Drahtschirmen eine um rund einen Faktor 2 verbesserte Wärmeabfuhr und eine bes-

ansah. Die Verluste P_s in den Schirmelementen sind angenähert proportional zu:

$$P_s \approx U_i^2 / R_s \quad (1)$$

U_i = induzierte Spannung im Schirm
 R_s = Widerstand des Schirms

Bei zusätzlicher Stahldrahtarmierung erhöhen sich die Verluste wegen Wirbelströmen und Ummagnetisierung.

Aus Formel (1) geht hervor, dass sich die Zusatzverluste P_s durch eine Reduktion der im Schirm induzierten Spannung U_i und/

oder durch eine Erhöhung des Schirmwiderstandes R_s vermindern lassen.

Reduktion der induzierten Spannung

Die induzierte Spannung in den Schirmelementen lässt sich durch einen kompakten Aufbau reduzieren. Folgende konstruktive Massnahmen können – bei unveränderten Wandstärken von Isolation und innerem und äusserem Halbleiter – dazu beitragen:

A. Wahl eines kompakten Rohrschirms: Bild 1 zeigt den Aufbau eines Kabels mit

Querschnitt Seil/Cu-Drahtschirm [mm ²]	Al-Rohrschirm Querschnitt [mm ²]	zu Al-Rohrschirm äquivalenter Cu-Querschnitt [mm ²]	Widerstandsverhältnis Al-Rohrschirm/Cu-Drahtschirm
25/10	15,4	9,39	1,12
35/10	15,4	9,39	1,12
50/16	16,6	10,12	1,58
70/16	18,4	11,33	1,43
95/25	18,4	11,22	2,23
120/25	21,2	12,93	1,93
150/35	21,2	12,93	2,71
185/35	24,0	14,64	2,39
240/35	24,0	14,64	2,39
300/35	26,0	15,86	2,20
400/50	42,3	25,80	1,94
500/50	45,3	27,63	1,81
630/70	49,2	30,01	2,33

Tabelle I Querschnitte und Widerstandsverhältnisse von Cu-Drahtschirmen und Al-Rohrschirmen

sere Verteilung der Druckkräfte [2], was höhere Schirmtemperaturen erlaubt. Diese Massnahme gestattet, den Schirmwiderstand bei Al-Schirmen – ab 50 mm² Leiterquerschnitt – gegenüber jenem von Cu-Drahtschirmen um den Faktor von 1,58 bis 2,71 zu erhöhen. In Tabelle I, letzte Spalte, sind die entsprechenden Werte aufgeführt.

Verzicht auf Stahldrahtarmierung

Da Stahldrahtarmierungen zusätzliche Verluste verursachen, sollte, wenn möglich, bei Dreileiter-Mittelspannungskabeln auf solche verzichtet werden. Dies bedeutet nicht, dass man Sicherheit einbüsst, denn ein hochzäher Kunststoffmantel schützt die

Einleiter ebenso wirkungsvoll. Eine mehr als dreijährige Erfahrung zeigt, dass die Schutzfunktion eines hochzähen Kunststoff-Aussenmantels für übliche Anwendungen einer Stahldrahtarmierung mindestens ebenbürtig ist. Für extreme Beanspruchungen in Stollen existiert zudem eine interessante, verlustarme Kombination eines hochzähen Mantels mit einer Stahlbandarmierung.

Muss ein Kabel in Dreileiterausführung zu Schutzzwecken trotzdem mit einer Stahldrahtarmierung ausgerüstet werden, so entstehen Verluste, welche sich zu den Verlusten in den Schirmelementen der Einleiter addieren. Das Verhältnis der Verluste in der

Stahldrahtarmierung zu den Verlusten im Drahtschirm ist aus Tabelle II für drei Leiterquerschnitte ersichtlich. Es zeigt sich, dass die Zusatzverluste in einer Stahldrahtarmierung immer höher sind als die Zusatzverluste im Cu-Drahtschirm allein.

Berechnung der Zusatzverluste

Grundlagen

Die Berechnung der Zusatzverluste ist in der IEC-Publikation 287, 2. Teil, Seite 22 ff., eingehend dargestellt [3]. Diese Darstellung ist allerdings sehr umfangreich und wegen der vielen behandelten

Querschnitt Cu-Leiter [mm ²]	Durchmesser Cu-Leiter [mm]	Strom i_R im Leiter für $\Delta\vartheta \approx 40^\circ\text{C}$ [A]	Cu-Drahtschirm (Ceander/Mäander)		Al-Schirm (Rohrschirm) ^a	
			Achsabstand Kabel [mm]	mittlerer Schirm- \varnothing [mm]	Achsabstand Kabel [mm]	mittlerer Schirm- \varnothing [mm]
25	6,15	112	26,5	21,5	24,6	21,4
35	7,25	134	27,8	22,6	25,7	22,5
50	8,40	155	29,0	23,7	26,6	23,4
70	10,15	193	31,3	25,4	28,3	25,1
95	11,95	230	33,1	27,2	30,1	26,9
120	13,75	257	35,2	29,3	31,7	28,5
150	15,25	289	36,8	30,8	33,1	29,9
185	17,15	326	38,7	32,7	34,9	31,7
240	19,45	375	41,0	35,0	37,2	34,0
300	22,70	411	45,5	39,1	40,0	36,8
400	25,70	450	49,9	42,8	43,6	40,3
500	27,20	474	50,9	44,5	46,3	43,0
630	31,30	492	55,0	48,6	50,4	47,1

Tabelle III Repräsentative Annahmen zur Berechnung der Schirmverluste für 20-kV-Mittelspannungskabel

a Wandstärke des Al-Schirms für Leiterquerschnitt bis 300 mm²: 0,2 mm; für Leiterquerschnitt ab 400 mm²: 0,3 mm

Querschnitt Cu-Leiter [mm ²]	Querschnitt Cu-Drahtschirm [mm ²]	Verluste im Drahtschirm (Cu), bezogen auf Leiterverluste		Schirmquerschnitt Al-Rohrmantel [mm ²]	Verluste im Al-Schirm, bezogen auf Leiterverluste	
		3 Einleiter verseilt [%]	3 Einleiter nicht verseilt, nebeneinander anliegend [%]		3 Einleiter verseilt [%]	3 Einleiter nicht verseilt, nebeneinander anliegend [%]
25	10	0,20	0,37 ^a	15,4	0,16	0,31 ^a
35	10	0,28	0,52 ^a	15,4	0,22	0,41 ^a
50	16	0,63	1,17 ^a	16,6	0,34	0,66 ^a
70	16	0,90	1,65 ^a	18,4	0,51	1,01 ^a
95	25	1,85	3,40 ^a	18,4	0,68	1,35 ^a
120	25	2,26	4,21 ^a	21,2	0,97	1,94 ^a
150	35	3,88	7,20 ^a	21,2	1,20	2,40 ^a
185	35	4,66	8,70 ^a	24,0	1,64	3,30 ^a
240	35	5,85	11,00 ^a	24,0	2,08	4,19 ^a
300	35	7,10	13,40 ^a	26,0	2,72	5,53 ^a
400	50	(13,10) ^b	24,32	42,0	(5,60) ^b	11,97
500	50	(15,14) ^b	28,54	45,0	(7,13) ^b	14,52
630	70	(17,61) ^b	33,52	49,0	(9,07) ^b	18,55

Tabelle IV Schirmverluste für Drahtschirm und Al-Schirm unter Annahmen gemäss Tabelle III

a nicht verseilte Verlegung für Querschnitte 25–300 mm² nur für grosse Längen sinnvoll

b ab 400 mm² ist Verseilung bei den meisten Herstellern nicht möglich, und es ergäben sich Transportprobleme

Fälle umständlich in der Handhabung. Der Durchschnittsanwender findet sich darin nur sehr mühsam zurecht, und der Rechenaufwand ist beträchtlich. Auch fehlen dem Anwender meistens die für eine Rechnung notwendigen Detailkenntnisse über das Kabel. Die folgenden Grundlagen und Tabellen sollen dem Anwender erlauben, auf einfachere Art die Zusatzverluste für unterschiedliche Kabelkonstruktionen zu bestimmen. Das zur Erarbeitung dieser Zahlen erstellte Rechenprogramm basiert auf den erwähnten IEC-Unterlagen. Kabelspezifische Daten, welche der Rechnung zugrunde liegen, sind in Tabelle III zusammengestellt.

Je nach Kabelhersteller weichen die Abmessungen der Kabel von den Werten in den Spalten 2, 4 und 5 etwas ab; dies wirkt sich jedoch nur unbedeutend auf die Ergebnisse aus. In Spalte 3 ist der Strom im Leiter angegeben, welcher bei einer Bodentemperatur von 20 °C und Verlegung der Kabel im Rohr bei einem Lastfaktor von 0,627 und unter Berücksichtigung der Zusatzverluste zu einer Leitertemperatur von ungefähr 60 °C führt. Die Temperatur der Schirmelemente ist um einige Grad tiefer; die Rechnungen basierten jedoch einheitlich für alle Kabeltypen auf einer Schirmtemperatur von 60 °C; der Fehler ist mit etwa 3%, bezogen auf die Schirmverluste, nicht von wesentlicher Bedeutung.

Ergebnisse

Die Ergebnisse der Berechnungen sind in den Spalten 3 und 4 sowie 6 und 7 der Tabelle IV aufgeführt. Die drei Einleiter der Spalten 3 und 6 sind als verseilt (Kabeltypen Tri-Delta oder Y oder runde Ausführungen, jedoch ohne Armierungsdrähte), jene der Spalten 4 und 7 als anliegend in einer Ebene angenommen worden.

Verseilte Dreileiterkabel weisen gemäss Rechnung – siehe Tabelle IV – gegenüber drei Einleiterkabeln anliegend in einer Ebene knapp halbe Zusatzverluste auf; ab ungefähr 95 mm² Leiterquerschnitt ist der Gewinn relevant. Unabhängig von der Schirmausführung empfiehlt es sich, alle Mittelspannungskabel für Leiterquerschnitte bis etwa 300 mm² zu verseilen und, sofern gut praktikable Lieferlängen die Systemlänge unterschreiten, eventuell Muffen vorzusehen. Richtwerte für gut praktikable Lieferlängen sind für kleine Querschnitte

Kabelquerschnitt [mm ²]	innerer Rohrdurchmesser [mm]
bis 150	120
185–300	150
> 300	200

Tabelle V Zuordnung Rohrrinnendurchmesser zu Kabelquerschnitt

Bild 2 Korrekturfaktor für die Zusatzverluste bei Übertemperaturen und Strömen, welche von den Berechnungsannahmen abweichen

k Korrekturfaktor
 $\Delta\vartheta$ Übertemperatur
 i/i_R tatsächlicher Strom, bezogen auf den in der Berechnung eingesetzten Strom

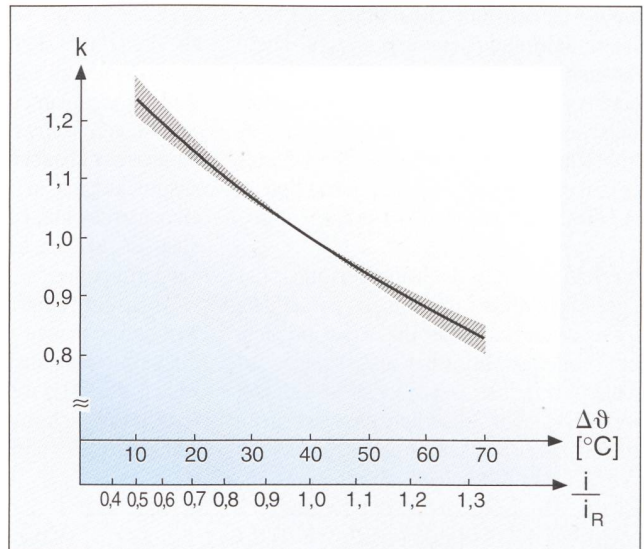
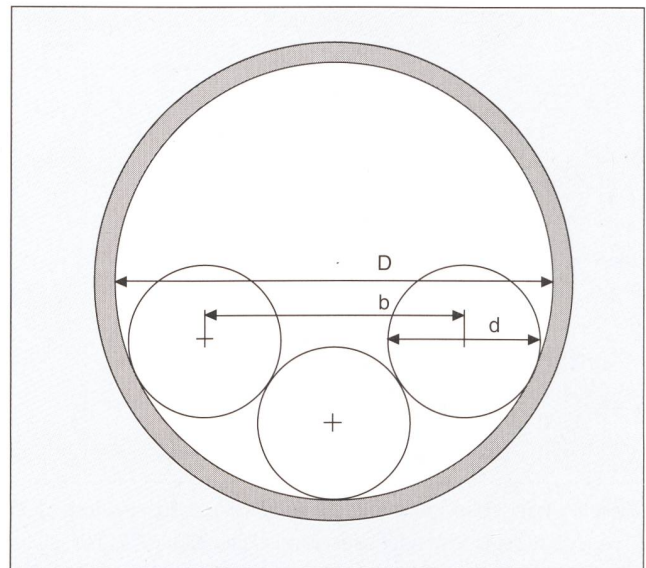


Bild 3 Bestimmung des mittleren geometrischen Abstandes für drei Einleiterkabel im Rohr



(z. B. 50 mm²) etwa 1500 m, für grosse Querschnitte (300 mm²) etwa 600 m.

Die Verluste in Al-Schirmen (Wandstärke 0,2 und 0,3 mm) sind immer ausgeprägt tiefer als jene in Cu-Drahtschirmen. Am günstigsten ist also eine verseilte Ausführung mit Al-Schirm. Gegenüber einer Verlegung von drei Einleitern mit Drahtschirm nebeneinander lassen sich mit der verseilten Ausführung mit Al-Schirm zum Beispiel für den Leiterquerschnitt 240 mm² und den früher erwähnten Annahmen die bezogenen Zusatzverluste von rund 11,0% auf ungefähr 2,1% reduzieren; die totalen Verluste (Leiter- und Schirmverluste) reduzieren sich um 8%. Vergleicht man die verseilte Ausführung mit Drahtschirm mit der verseilten mit Al-Schirm, so reduzieren sich für das gleiche Beispiel die bezogenen Schirmverluste von rund 5,9% auf ungefähr 2,1% und die totalen Verluste um 3,6%.

Neben der Verlustreduktion hat ein geschlossener Al-Schirm den grossen Vorteil, dass im Unterschied zu Drahtschirmen kein

Wasserdampf in die Isolation hineindiffundieren kann. Der Einsatz von Al-Schirmen ist eine Massnahme, welche bei Kunststoff-Hochspannungskabeln zur Lebensverlängerung allgemein angewandt wird und generell wirksam ist. In [4] wird eindrücklich auf folgendes hingewiesen: «Es ist jedoch noch nicht gelungen, die Wasserbäumchenbildung in polymerisolierten Kabeln ganz zu verhindern, es sei denn, das Eindringen von Wasser werde durch metallische Sperren verunmöglicht.»

Vorgehen, wenn die Betriebsbedingungen von den Berechnungsannahmen abweichen

Unterschiedliche Betriebsströme

Eine wesentliche Einflussgrösse bei den Berechnungen ist der Betriebsstrom. Die obigen Rechnungen gelten für eine Schirm- und Leitertemperatur von 60 °C, das heisst

eine Übertemperatur von 40 °C (Bodentemperatur 20 °C). Wenn der Betriebsstrom kleiner ist als in der Rechnung angenommen (Tabelle III, Spalte 3), so sind die tatsächlichen, bezogenen Schirmverluste höher – und bei höheren Strombelastungen tiefer – als in den Tabellen angegeben. Mittels der Kurve nach Bild 2 können die bezogenen Werte der Tabelle IV, Spalten 3, 4, 6 und 7, aber auf andere Stromwerte umgerechnet werden.

Berechnungsbeispiel

Für Kabeltyp XKT 3×1×240 mm² be-
trage der Leiterstrom $i = 188$ A. Die Rechnung ist mit $i_R = 375$ A durchgeführt, i bezogen auf i_R ist somit gleich 0,50; die Übertemperatur ist ungefähr 10 °C (Bild 2) und der Korrekturfaktor 1,23. Die auf die (ebenfalls tieferen) Leiterverluste bezogenen Schirmverluste für drei Einleiter mit Cu-Drahtschirm, verseilt, ergeben sich demnach zu: $1,23 \cdot 5,85\% = 7,2\%$.

Hinweise zum Korrekturfaktor

In guter Näherung ist der Korrekturfaktor k gegeben durch:

$$k \approx 1 / \{ [1 + \alpha_L(\Delta\vartheta_L - 40)] [1 + \alpha_S(\Delta\vartheta_S - 40)] \} \quad (2)$$

Werden für obiges Beispiel die Temperaturkoeffizienten $\alpha_L = \alpha_S = 3,93 \cdot 10^{-3}$ pro Grad für Cu und die Übertemperaturen $\Delta\vartheta_L = \Delta\vartheta_S = 10$ °C eingesetzt, so ergibt sich für den Korrekturfaktor k :

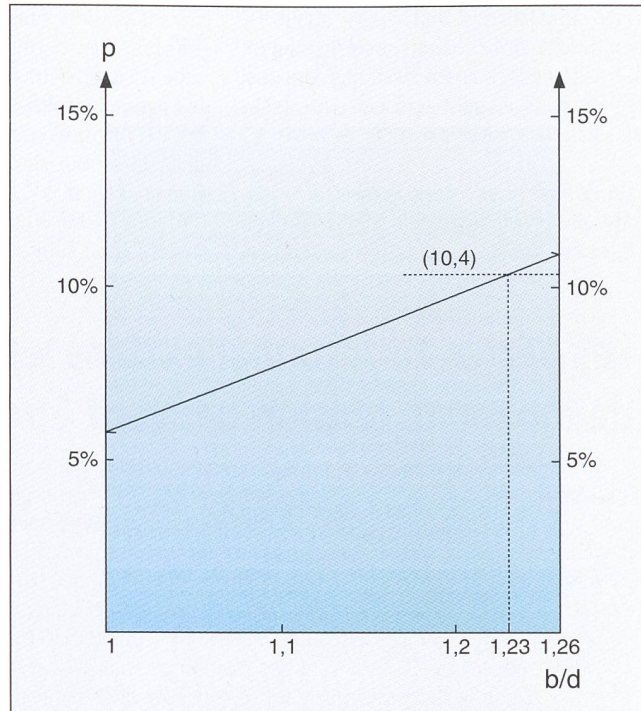
$$k \approx 1 / \{ [1 + 3,93 \cdot 10^{-3}(10 - 40)] [1 + 3,93 \cdot 10^{-3}(10 - 40)] \} \approx 1,29$$

Der Korrekturfaktor nach Bild 2 ist für dieses Beispiel 1,23, also etwas kleiner, weil zu seiner Berechnung, in Anlehnung an [3], nicht nur die Temperaturkoeffizienten α_L und α_S des Leiter- und des Schirmwiderstandes berücksichtigt wurden, sondern auch die Kabelabmessungen und die Anordnung der Kabel. Auch der minim höhere Temperaturkoeffizient des Al-Schirms ge-

Bild 4 Interpolation der bezogenen Verluste für Kabelanordnung im Rohr

p bezogene Zusatzverluste
 b/d bezogener mittlerer geometrischer Abstand

Für verseilt Kabel ist $b/d = 1$ und für Kabel anliegend in einer Ebene ist $b/d = 1,26$.



genüber jenem des Cu-Drahtschirms hat einen kleinen Einfluss. In jedem Fall liegt der Korrekturfaktor aber innerhalb des gestrichelt begrenzten Bereiches von Bild 2, und für die Praxis kann mit Werten gemäss der ausgezogenen Kurve gerechnet werden.

Einleiterkabel in Rohrverlegung

Die zwei äusseren Leiter gemäss Bild 3 weisen einen etwas kleineren Abstand auf, als einer Verlegung der Einleiterkabel anliegend in der Ebene entsprechen würde. Die effektiven Verluste sind deshalb in diesem Fall etwas kleiner, als in den Spalten 4 und 7 der Tabelle IV ausgewiesen wird. Der Einfluss kann mit Hilfe des mittleren geometrischen Abstandes, welcher vom Rohrdurchmesser und dem Einleiter-Kabeldurchmesser abhängt, bestimmt werden. Bei Neuanlagen wird häufig eine Zuordnung des Rohrdurchmessers zum Kabel-

querschnitt nach Tabelle V gewählt. Der Abstand b (Bild 3) der äusseren zwei Leiter, welcher zur Berechnung des mittleren geometrischen Abstandes benötigt wird, ist gegeben durch:

$$b = (D-d)\sqrt{1 - \{1 - 2[d/(D-d)]^2\}^2} \quad (3)$$

Der mittlere geometrische Abstand $\sqrt[3]{d^2b}$ sowie sein auf d bezogener Wert sind für die oben aufgeführten und häufig anzutreffenden Zuordnungen von Kabelquerschnitt und Rohrdurchmesser in Tabelle VI berechnet.

Wenn drei Einleiter anliegend in einer Ebene verlegt werden, ist der mittlere geometrische Abstand $\sqrt[3]{2d^3} \approx 1,26 d$. Gemäss der letzten Spalte von Tabelle VI ist der auf d bezogene, mittlere geometrische Abstand 1,21–1,23, also nur wenig kleiner als bei Anordnung der Kabel anliegend in einer Ebene. In guter Näherung können also die

Leiterquerschnitt [mm ²]	Kabeldurchmesser d [mm]	Rohrdurchmesser D [mm]	Abstand b [mm]	mittlerer geometrischer Abstand $\sqrt[3]{d^2b}$ [mm]	bezogener geometrischer Abstand $\sqrt[3]{d^2b} / d$
95	33,1	120	61,2	40,6	1,23
120	35,2	120	64,1	43,0	1,22
150	36,8	120	66,0	44,7	1,21
185	38,7	150	72,6	47,7	1,23
240	41,0	150	76,0	50,4	1,23
300	45,5	150	81,9	55,3	1,22
400	49,9	200	94,1	61,6	1,23
500	50,9	200	95,7	62,8	1,23
630	55,0	200	101,8	67,5	1,23

Tabelle VI Mittlere geometrische und bezogene Abstände von Einleiterkabeln bei Verlegung in Rohren

Werte der Spalten 4 und 7 der Tabelle IV auch für eine übliche Einleiterverlegung im Rohr verwendet werden. Will man präziser rechnen, so kann man nach einer der folgenden Methoden vorgehen.

Lineare Interpolation der Verluste

Bei dieser Methode geht man analog zu folgendem Beispiel vor: Der Leiterquer-

schnitt sei 240 mm^2 , der Rohrdurchmesser 150 mm . Der bezogene, mittlere geometrische Abstand beträgt $1,23$ (Tabelle VI, letzte Spalte). Die bezogenen Verlustwerte sind $5,85\%$ für die verseilte Dreieckanordnung und 11% für die Anordnung in einer Ebene (Tabelle IV, Zeile Leiterquerschnitt 240 mm^2). Die Werte sind in Bild 4 aufgetragen. Eine Interpolation der Werte oder

direktes Ablesen aus Bild 4 ergibt für einen mittleren bezogenen geometrischen Abstand von $1,23$ einen bezogenen Verlustwert von $10,4\%$, also rund 5% weniger als für die Anordnung anliegender Kabel in der Ebene.

Abschätzung der induzierten Spannung

Die induzierten Spannungen in den Schirmelementen sind in guter Annäherung proportional zum natürlichen Logarithmus (\ln) des mittleren geometrischen Abstandes, und demzufolge sind die bezogenen Verluste proportional $p \approx k (\ln c)^2$, wobei k und c Konstanten sind, welche sich für obiges Beispiel aus dem Gleichungspaar $5,85\% = k (\ln c)^2$ und $11,0\% = k [\ln(1,26 \cdot c)]^2$ bestimmen lassen. Man findet $k = 15,10$ und $c = 1,864$, und für den bezogenen geometrischen Abstand von $1,23$ den Wert $p \approx 15,10 [\ln(1,23 \cdot 1,864)]^2 = 10,4\%$, also den gleichen Wert wie oben.

Les pertes additionnelles dans les câbles de moyenne tension peuvent être réduites

La manière la moins chère pour économiser de l'énergie (en dehors de la non-utilisation) consiste à éviter les pertes inutiles. Jusqu'à présent prévalait l'opinion que pour un produit depuis longtemps établi et hautement développé comme le câble de moyenne tension, il n'y aurait à ce sujet plus rien à découvrir. Des développements récents permettent cependant de réduire de manière drastique les pertes additionnelles dans les câbles de moyenne tension. Dans le présent article, on montre comment, pour un conducteur de 630 mm^2 de section, il est possible, grâce à une nouvelle construction et disposition des gaines, de faire des économies dans les pertes additionnelles de 37 à 56% , selon la charge. Lorsque les sections sont plus petites, les gains sont moins élevés, mais à partir de 150 mm^2 , elles sont toujours significatives.

Le calcul des pertes additionnelles dans les câbles est expliqué in extenso dans la publication 287 de l'IEC, 2^e partie, page 22 ss. [3]. Cette présentation est très volumineuse et difficile à manier à cause des nombreux cas traités. L'utilisateur moyen ne s'y retrouve qu'avec beaucoup de peine, et le nombre de calculs est considérable. En plus, la plupart des utilisateurs ne disposent pas de connaissances suffisantes sur les câbles pour faire le calcul. Cet article présente les principes et met à disposition des tableaux qui permettront à l'utilisateur de déterminer d'une façon simple, les pertes additionnelles pour les différentes constructions de câble.

Literatur

[1] Triplex-News Nr. 7, S. 8-16, Ausgabe 1994, Kundenschrift Studer Draht- und Kabelwerk AG, CH-4658 Däniken SO.

[2] Triplex-News Nr. 5, Seite 12, Sept. 1993, Kundenschrift Studer Draht- und Kabelwerk AG, CH-4658 Däniken SO.

[3] CEI (IEC), Publication 287, deuxième édition 1982, S. 22 ff.

[4] T. Heizmann und W. Zaengl: Vor-Ort-Diagnose von polymerisolierten Mittelspannungskabeln. Bull. SEV/VSE, 85(1994)23, S. 27-37.

forgenta

Unser patentiertes
Meßprinzip bringt
Sicherheit



Vakuumschalter-Meßgerät VSM 94/1

Anwendung

- Kontrolle der Funktionssicherheit und des Verschleißes von Vakuum-Leistungsschaltern und Vakuum-Schalterschützen (auch unter SF₆-Schutzgas) in elektrischen Netzen

Besondere Vorteile

- Zerstörungsfreie Kontrolle des Zustandes von Vakuum-Schaltkammern
- Eigenzeitmessung des Schalters
- Fehlfunktionen an den Vakuumkammern werden rechtzeitig erkannt
- Betrieb über die vorgegebene Einsatzzeit ist möglich
- erhebliche Kosteneinsparungen beim Anwender
- Netzunabhängigkeit durch Akkubetrieb
- integrierter Drucker und RS 232 Schnittstelle zur Meßwertausgabe
- einfache Handhabung mit benutzerorientierter Bedienung

Einsatzgebiete

- Industrieanlagen, Verteilernetze, Umspannstationen, Kraftwerke, Bahnbetrieb

FORGENTA Forschungstechnik- und Geräte-Entwicklung Adlershof GmbH • Rudower Chaussee 6 • D-12484 Berlin • Tel. (030) 6392 3272 • Fax (030) 6392 3274