

**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:** 86 (1995)

**Heft:** 7

**Artikel:** Die Zusatzverluste bei Mittelspannungskabeln lassen sich reduzieren

**Autor:** Sarbach, Ewald

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-902435>

### **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:** 26.01.2026

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

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  $630 \text{ mm}^2$  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  $150 \text{ mm}^2$  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  $400 \text{ mm}^2$  Leiterquerschnitt reduziert sich die Transportkapazität merkbar...». Bei einem Leiterquerschnitt von  $630 \text{ mm}^2$  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  $150 \text{ mm}^2$  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.

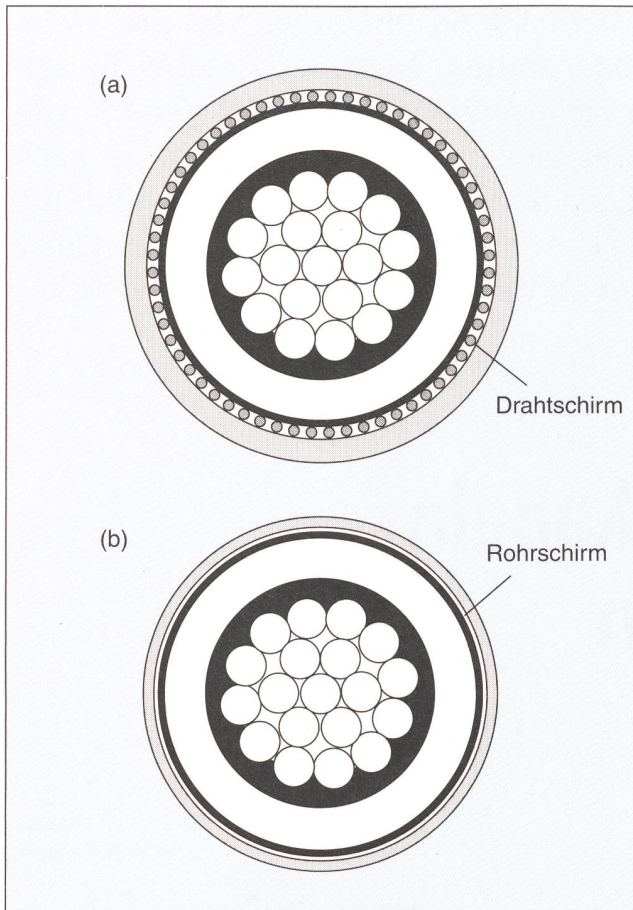
## Konstruktive Massnahmen zur Verlustreduktion

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 <sup>2</sup> ] | $P_{St}/P_{Cu}$ |
|--------------------------------------|-----------------|
| 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 mm<sup>2</sup> fabrikatorisch möglich. Aus Transportgründen, aber auch fabrikatorisch ist die Länge jedoch begrenzt. Der Anwender hat die Wahl, ob er für Leiterquerschnitte ≤ 300 mm<sup>2</sup> 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.

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 <sup>2</sup> ] | Al-Rohrschirm Querschnitt [mm <sup>2</sup> ] | zu Al-Rohrschirm äquivalenter Cu-Querschnitt [mm <sup>2</sup> ] | 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

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-



sere Verteilung der Druckkräfte [2], was höhere Schirmtemperaturen erlaubt. Diese Massnahme gestattet, den Schirmwiderstand bei Al-Schirmen – ab 50 mm<sup>2</sup> 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<br>Cu-Leiter<br>[mm <sup>2</sup> ] | Durchmesser<br>Cu-Leiter<br>[mm] | Strom $i_R$ im Leiter<br>für $\Delta\vartheta \approx 40^\circ\text{C}$<br>[A] | Cu-Drahtschirm (Ceander/Mäander) |                            | Al-Schirm (Rohrschirm) <sup>a)</sup> |                            |
|--|----------------------------------|--|----------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|----------------------------|
|  |                                  |  | Achsabstand Kabel<br>[mm]        | mittlerer Schirm-Ø<br>[mm] | Achsabstand Kabel<br>[mm]            | mittlerer Schirm-Ø<br>[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 mm<sup>2</sup>: 0,2 mm; für Leiterquerschnitt ab 400 mm<sup>2</sup>: 0,3 mm

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

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

a nicht verseilte Verlegung für Querschnitte 25–300 mm<sup>2</sup> nur für grosse Längen sinnvoll

b ab 400 mm<sup>2</sup> 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.

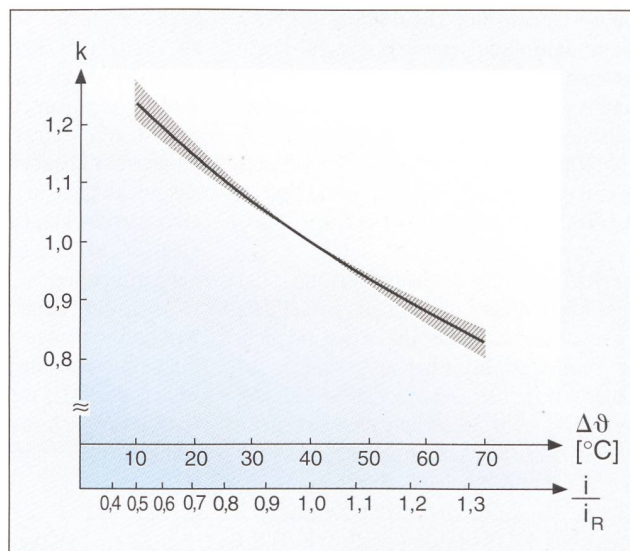
Verseilte Dreileiterkabel weisen gemäss Rechnung – siehe Tabelle IV – gegenüber drei Einleiterkabeln anliegend in einer Ebene knapp halbe Zusatzverluste auf; ab ungefähr 95 mm<sup>2</sup> Leiterquerschnitt ist der Gewinn relevant. Unabhängig von der Schirmausführung empfiehlt es sich, alle Mittelspannungskabel für Leiterquerschnitte bis etwa 300 mm<sup>2</sup> zu verseilen und, sofern gut praktikable Lieferlängen die Systemlänge unterschreiten, eventuell Muffen vorzusehen. Richtwerte für gut praktikable Lieferlängen sind für kleine Querschnitte

| Kabelquerschnitt [mm <sup>2</sup> ] | innerer Rohrdurchmesser [mm] |
|-------------------------------------|------------------------------|
| bis 150                             | 120                          |
| 185–300                             | 150                          |
| > 300                               | 200                          |

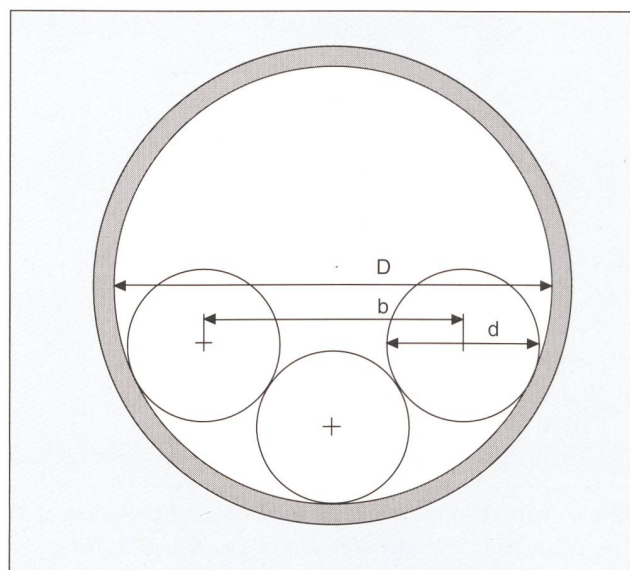
**Tabelle V Zuordnung Rohrrinnendurchmesser zu Kabelquerschnitt**

**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 mm<sup>2</sup>) etwa 1500 m, für grosse Querschnitte (300 mm<sup>2</sup>) 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 mm<sup>2</sup> 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 mm<sup>2</sup> be-  
trage der Leiterstrom  $i = 188$  A. Die Rech-  
nung 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) Leistungsverluste bezoge-  
nen 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 Korrektur-  
faktor  $k$  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 Tempe-  
raturkoeffizienten  $\alpha_L = \alpha_S = 3,93 \cdot 10^{-3}$  pro  
Grad für Cu und die Übertemperaturen  
 $\Delta\vartheta_L = \Delta\vartheta_S = 10$  °C eingesetzt, so ergibt  
sich für den Korrekturfaktor  $k$ :

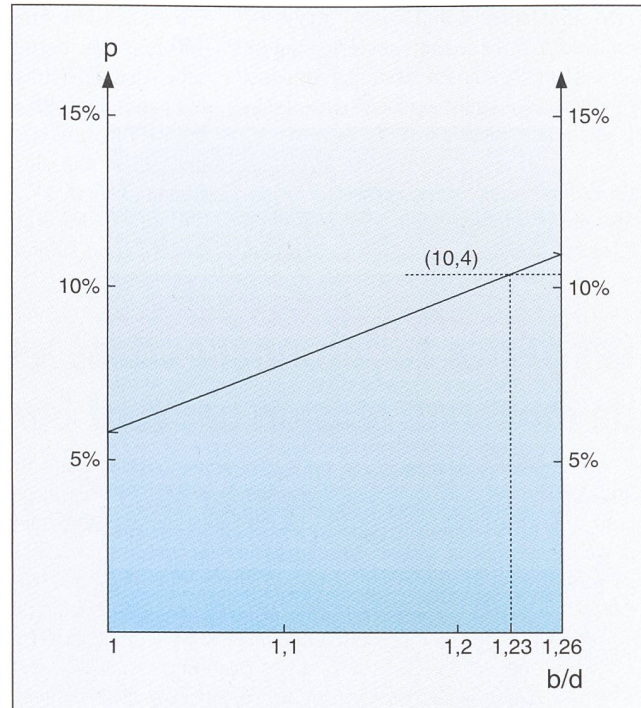
$$k \approx 1 / \{ [1 + 3,93 \cdot 10^{-3}(10 - 40)] [1 + 3,93 \cdot 10^{-3}(10 - 40)] \} \approx 1,29$$

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  $\alpha_L$   
und  $\alpha_S$  des Leiter- und des Schirmwider-  
standes berücksichtigt wurden, sondern  
auch die Kabelabmessungen und die An-  
ordnung der Kabel. Auch der minim höhere  
Temperaturkoeffizient des Al-Schirms ge-

**Bild 4 Interpolation  
der bezogenen  
Verluste für Kabel-  
anordnung im Rohr**

$p$  bezogene  
Zusatzverluste  
 $b/d$  bezogener  
mittlerer  
geometrischer  
Abstand

Für verseilte 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 ge-  
strichelt 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 anlie-  
gend 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 geo-  
metrischen Abstandes, welcher vom Rohr-  
durchmesser und dem Einleiter-Kabel-  
durchmesser abhängt, bestimmt werden.  
Bei Neuanlagen wird häufig eine Zuord-  
nung des Rohrdurchmessers zum Kabel-

querschnitt nach Tabelle V gewählt. Der  
Abstand  $b$  (Bild 3) der äusseren zwei Lei-  
ter, 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 anzu-  
treffenden Zuordnungen von Kabelquer-  
schnitt und Rohrdurchmesser in Tabelle VI  
berechnet.

Wenn drei Einleiter anliegend in einer  
Ebene verlegt werden, ist der mittlere geo-  
metrische 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<br>[mm <sup>2</sup> ] | Kabeldurchmesser<br>$d$<br>[mm] | Rohrdurchmesser<br>$D$<br>[mm] | Abstand<br>$b$<br>[mm] | mittlerer geometrischer<br>Abstand<br>$\sqrt[3]{d^2b}$<br>[mm] | bezogener geometrischer<br>Abstand<br>$\sqrt[3]{d^2b}/d$ |
|---|---------------------------------|--------------------------------|------------------------|--|--|
| 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  $240 \text{ mm}^2$ , der Rohrdurchmesser  $150 \text{ mm}$ . 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  $240 \text{ mm}^2$ ). 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.

### 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 polymerisierten Mittelspannungskabeln. Bull. SEV/VSE, 85(1994)23, S. 27-37.

## 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  $630 \text{ mm}^2$  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  $150 \text{ mm}^2$ , elles sont toujours significatives.

Le calcul des pertes additionnelles dans les câbles est expliqué in extenso dans la publication 287 de l'IEC, 2<sup>e</sup> 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.

**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  $\text{SF}_6$ -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