

Probleme bei der Erdung von Kabelmänteln in 50-Hz-Energieversorgungsnetzen

Autor(en): **Buchmann, E.**

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): **76 (1985)**

Heft 4

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-904560>

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.

Kabeltechnik 84

Am 16. und 17. Oktober 1984 fand an der ETH in Zürich unter der Leitung von Herrn Prof. W. Zaengl ein weiteres Kabelseminar statt, das vom Institut für elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnik in Zusammenarbeit mit dem Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke veranstaltet wurde. Die wiederum grosse Zahl von gegen 80 Teilnehmern, vor allem aus Kreisen der Elektrizitätswerke, zeigt, dass dieses Seminar einem echten Bedürfnis entspricht.

Neben eher grundsätzlichen Vorträgen über Probleme und Entwicklungstendenzen bei Isoliermaterialien sowie über die Kabelkonstruktion, -herstellung und -prüfung waren verschiedene Beiträge den Fragen der Erdung, des Überspannungs- und Überstromschutzes sowie der gegenseitigen Beeinflussung von Kabeln gewidmet. Den internationalen Entwicklungen wurde durch Berichte von der CIGRE und JICABLE Rechnung getragen.

Nachdem bereits in den Bulletins SEV/VSE Nummer 24/1982 und 24/1983 über die vorausgegangenen Kabelseminare berichtet worden war, wird diese Tradition im vorliegenden Heft fortgesetzt und eine Auswahl der Referate des Seminars 1984 – aus Platzgründen teilweise in gekürzter Form – veröffentlicht.

Probleme bei der Erdung von Kabelmänteln in 50-Hz-Energieversorgungsnetzen

E. Buchmann

Die verschiedenartigen Erdungssysteme in Kabelanlagen werden erörtert und deren Auswirkung auf die Strombelastbarkeit, Berührungs- und Beeinflussungsspannungen aufgezeigt. Verschiedene Kurvendarstellungen gestatten es, die Einflussgrösse verschiedener Parameter praxisgerecht abzuschätzen.

Cet article examine les différents types de systèmes de mise à la terre pour les réseaux de câbles et présente les conséquences que ceux-ci ont sur les tensions de contact et d'influence. Diverses représentations graphiques permettent d'estimer, pour la pratique, l'importance des influences des différents paramètres.

Adresse des Autors

Ernst Buchmann, Kabelwerke Brugg AG, 5200 Brugg

1. Einleitung

Aufgrund gesetzlicher Bestimmungen müssen alle Hoch- und Niederspannungskabel der öffentlichen Stromversorgung als Berührungsschutz eine geerdete Metallumhüllung aufweisen.

Darüber hinaus hat dieser Metallmantel bei Hochspannungskabeln die Funktion, zusammen mit einer allfälligen vorhandenen Halbleiterschicht, das elektrische Feld auf der Oberfläche der Kabelisolation zu begrenzen und den dielektrischen Verschiebungsstrom abzuleiten.

Die Erdungsprobleme in Hochspannungs-Kabelnetzen lassen sich deshalb in die folgenden beiden Hauptgruppen unterteilen:

- Gesichtspunkte bezüglich des Personen- und Anlagenschutzes (Berührungs- und Schrittspannungen).
- Technische und thermische Probleme bei verschiedenartiger Erdung der Kabelmäntel und -abschirmungen.

In den nachstehenden Betrachtungen wird vor allem auf die technischen und thermischen Belange der Kabelmantel-Erdung eingegangen. Dabei ist es unumgänglich, die Kabelanlage als integralen Teil des gesamten Netzes zu

betrachten; insbesondere die Behandlung des Netz-Sternpunktes erfordert dabei besondere Beachtung.

2. Sternpunktschaltungen in Mittelspannungsnetzen

Im normalen, symmetrischen und ungestörten Drehstrombetrieb ist die Art der Sternpunktbehandlung von eher untergeordneter Bedeutung.

Fehlerstatistiken zeigen, dass der einpolige Erdschluss in den Netzen als häufigster Störungsfaktor auftritt.

Dessen Auswirkungen werden vornehmlich durch die Art der Sternpunktbehandlung beeinflusst, die verschiedenen Schaltungen sollen darum kurz vorgestellt werden (Fig. 1).

● Starr geerdeter Sternpunkt

Diese Schaltung ist üblich in den USA, Kanada, vereinzelt auch in Frankreich und Grossbritannien. Es ist ein einfaches, ökonomisches Verteilungssystem, wobei die Verbraucher in der Regel über Einphasen-Transformatoren angespeist werden.

Jeder Erdschluss bedeutet Kurzschluss und muss sofort mittels Sicherungen der Schalter abgeschaltet werden.

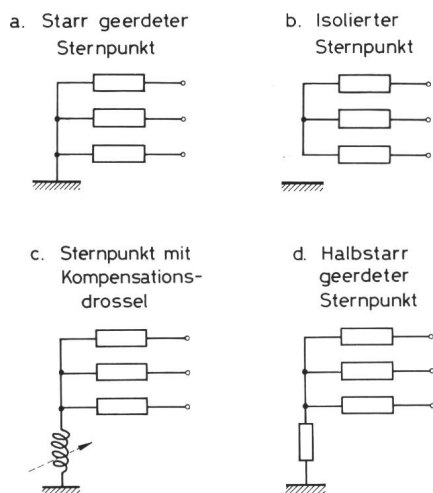


Fig. 1 Sternpunktschaltungen in Mittelspannungsnetzen

Die einphasige Anspeisung ist nachteilig, vor allem für motorische Verbraucher. Falls mehrere Phasen benötigt werden, werden mehrere solche Systeme nebeneinander installiert.

● **Isolierter Sternpunkt**

Diese Schaltung ist für gemischte Freileitungs- und Kabel-Drehstromnetze kleinerer bis mittlerer Ausdehnung recht verbreitet. Solche Netze können während beschränkter Zeit mit einem anstehenden Phasen-Erdschluss betrieben werden. Die Erfahrung zeigt, dass ein erheblicher Anteil aller Erdschlüsse von selbst wieder verschwindet, sofern der Erdschlussstrom I_e unter etwa 10...20 A gehalten werden kann.

$$I_e = 3 \cdot U_0 \cdot \omega \cdot C_N$$

C_N = Kapazität des Netzes

Wenn der Phasen-Erdschluss nicht möglichst rasch verschwindet oder abgeschaltet wird, stehen die «gesunden» beiden Phasen unter voller verketteter Spannung gegen Erde.

Dieser Spannungsanstieg gegenüber Erdpotential sowie die Erfahrung, dass intermittierende Erdschlusslichtbögen recht oft zu Resonanz-Erscheinungen führen, erhöhen das Risiko eines Doppelerdschlusses oder Kurzschlusses wesentlich, weshalb Erdschlüsse aus Gründen der Betriebssicherheit immer raschmöglichst eliminiert werden sollten.

● **Sternpunkt mit Kompensationsdrossel**

Hierbei wird der Sternpunkt des einspeisenden Netztransformators über

eine Drossel geerdet, deren Induktivität auf die Netzkapazität abgestimmt ist.

Dadurch gelingt es, den Erdschluss-Fehlerstrom auf einen kleinen Reststrom zu begrenzen.

Die Resonanzfrequenz wird dabei auf die Grundwelle 50 Hz abgestimmt, Oberwellenströme, vorwiegend durch Leistungselektronik verursacht, lassen die Restströme in den letzten Jahren zunehmend anwachsen.

● **Halbstar geerdeter Sternpunkt**

In grösseren Netzkomplexen ist es erwünscht, den Erdschlussstrom auf Werten unter 1...2 kA zu halten.

Hierzu wird der Sternpunkt über eine entsprechende Impedanz (z.B. Widerstand) geerdet. Die einzelnen Leitungsabgänge sind durch Schutzeinrichtungen überwacht, erdschluss-behaftete Netzteile werden sofort abgeschaltet.

3. Erdungsprobleme in Kabelanlagen

3.1 Vorschriften

Gemäss den Bestimmungen der Starkstromverordnung ist der Metallmantel von Hochspannungskabeln grundsätzlich an beiden Enden zu erden.

- Ausnahmen sind zulässig
- für kurze Kabelabschnitte innerhalb des Werkbereiches
- wenn die beidseitige Mantelerdung zu wesentlichen technischen Schwierigkeiten oder hohen finanziellen Kosten führen würde, dann sind aber geeignete Massnahmen zum Schutze von Personen und Sachwerten vorzusehen (s. Erdungsverordnung).

3.2 Dreileiterkabel

(drei Phasenleiter mit gemeinsamem Mantel)

Dieser Kabeltyp ergibt in der Regel keine Probleme bezüglich beidseitiger Mantelerdung.

Der Mantel- oder Schirmquerschnitt soll lediglich für die am Verlegeort möglichen Erdschlussströme ausgelegt sein.

An den von leistungsstarken Unterwerken oder von kombinierten Freileitungstragwerken abgehenden Mittelspannungs-Dreileiterkabeln wird zur Verhinderung einer möglichen Potentialverschleppung bei Erdschlüssen,

wenn nötig, die einseitige Mantelerdung vorgesehen.

Dabei muss der Kabel-Metallmantel entsprechend gegen Erde isoliert sein.

3.3 Einleiterkabel

In Einleiter-Kabelanlagen mit grösserem Leiterquerschnitt sind die sich ergebenden Konsequenzen bei ein- oder zweiseitiger Mantelerdung in jedem Falle genauer abzuklären.

3.3.1 Einseitige Mantelerdung

Sowohl im Normalbetrieb als vor allem bei Kurzschlüssen treten am freien, nicht geerdeten Mantelende je nach Verlegeanordnung, Kabellänge und Leiterstrom beträchtliche induzierte Spannungen auf.

Je nach Netzausbildung beidseits des Kabels können extrem hohe Spannungs-Scheitelwerte in Erscheinung treten bei transienten Vorgängen (Schaltvorgänge, einlaufende Wanderwellen). Der Metallmantel (Schirm) ist deshalb mit einem entsprechend isolierenden Aussenmantel zu umgeben und am freien Ende mit einem entsprechenden Überspannungsschutz zu versehen (Ableiter, spannungsabhängiger Widerstand).

Die Ansprechspannung eines Ableiters soll derart gewählt werden, dass bei 50-Hz-Kurzschlussströmen die induzierte Mantelspannung unter dem Wert der Ableiter-Ansprechspannung liegt, weil sonst der Ableiter durch die 50-Hz-Folgeströme thermisch überlastet würde.

In solchen Kabelanlagen ist unter Umständen eine periodische Überprüfung des Isolationszustandes des Aussenmantels angezeigt, weil ein unbemerkt gebliebener Isolationsdefekt im Aussenmantel zu einer thermischen Überlastung oder zu einer Beschädigung der Hauptisolation des Kabels führen könnte.

Die Grösse der induzierten Mantelspannung am freien Mantelende bei Drehstrombelastung 50 Hz ist für die üblichen Verlegeanordnungen auf dem Kurvenblatt Figur 2, in Funktion des Verhältnisses Achsabstand zu Manteldurchmesser, grafisch aufzeichnet.

3.3.2 Beidseitige Mantelerdung

Als Folge der induzierten Mantelspannungen fliessen bei beidseitiger Mantelerdung von Einleiterkabeln unter Umständen bereits derart grosse Mantelströme, dass die dabei entste-

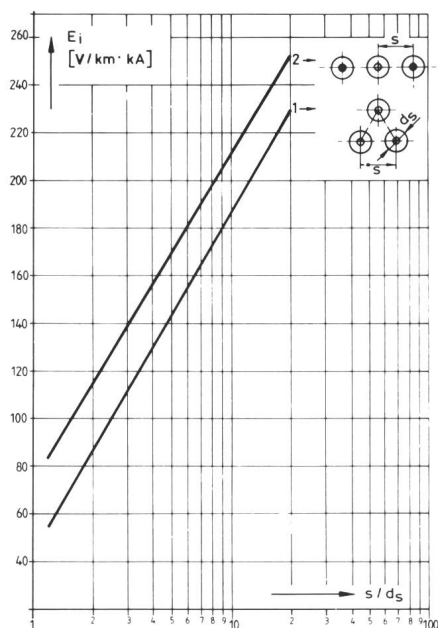


Fig. 2 Induzierte Mantelspannung 50 Hz bei Einleiterkabeln als Funktion des Verhältnisses Achsabstand (s) zu Manteldurchmesser (d_s)

(bei Anordnung 2 gelten die Werte für die beiden aussenliegenden Phasen)

henden Mantelverluste die thermische Bilanz für die Berechnung der zulässigen Leiterströme massgeblich beeinflussen können.

Als Masszahl zur Beurteilung dient dabei der

$$\text{Mantel-Verlustfaktor } \lambda = \frac{\text{Mantelverluste}}{\text{Leiterverluste}}$$

Aus der Figur 3 kann der Faktor λ für die Anordnung von 3 Einleiterkabeln im Dreieck in Abhängigkeit der Einflussparameter einfach ausgewertet werden.

Analoge Kurvenscharen lassen sich auch für die Verlegung in einer Ebene aufzeichnen.

Die Mantelverluste erreichen den Höchstwert, wenn Mantelreaktanz und Mantelwiderstand gleich gross sind.

Drei Beispiele:

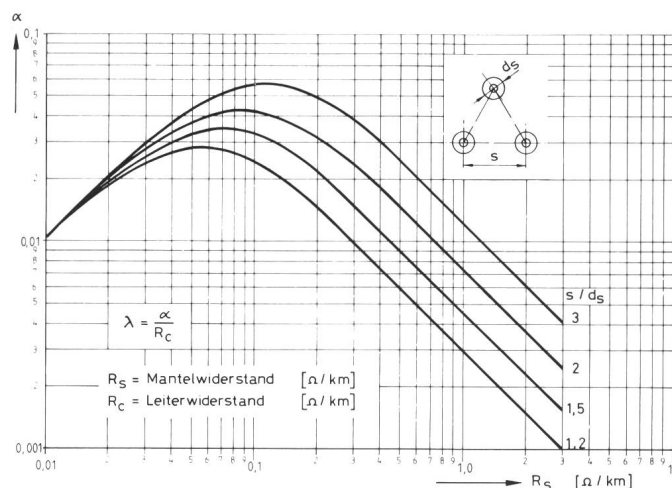
Drei kleine Beispiele sollen die Grössenordnung möglicher Mantelverluste veranschaulichen:

Es wird angenommen, dass der Längswiderstand der Kabelmäntel $0,2 \Omega/\text{km}$ und das Abstandsverhältnis $s/d_s = 1,5$ betrage.

Der Hilfsfaktor α kann dann aus Figur 3 zu $0,021$ ermittelt werden.

- a) Leiterquerschnitt 150 mm^2 entsprechend einem Widerstand von $0,15 \Omega/\text{km}$

Fig. 3 Hilfsfaktor α zur Bestimmung des Mantel-Verlustfaktors λ bei 50 Hz als Funktion des Mantel-Längswiderstands und des Abstandsverhältnisses s/d_s



$$\lambda_a = \frac{0,021}{0,15} = 0,14 \triangleq 14\%$$

- b) Leiterquerschnitt 630 mm^2 entsprechend einem Widerstand von $0,034 \Omega/\text{km}$

$$\lambda_b = \frac{0,021}{0,034} = 0,618 \triangleq 62\%$$

- c) Leiterquerschnitt 2000 mm^2 entsprechend einem Widerstand von $0,011 \Omega/\text{km}$

$$\lambda_c = \frac{0,021}{0,011} = 1,91 \triangleq 191\%$$

3.4 Erdschlussströme in Kabelmänteln

Bei der Wahl des Mantel-Erdungssystems ist auch die im Abschnitt 2 erwähnte Behandlung des Netzsternpunktes angemessen zu berücksichtigen.

Bei nur einseitiger Erdung der Kabelmäntel muss sich der Erdschlussstrom im Erdreich und in allfällig vorhandenen anderen metallischen Leitern den Rückstrom-Pfad suchen (andere Kabel, Wasserleitungen usw.).

Bei grösseren Erdschluss-Stromstärken kann dies unter Umständen zu erheblichen Schritt- und Berührungsspannungen sowie zu Beeinflussungsproblemen führen.

Bei beidseitiger Mantelerdung fliesst in der Regel ein beachtlicher Anteil des Erdschlussstromes über den Kabelmantel zur Einspeisung zurück.

Die Nullimpedanz einer Kabelstrecke wird dadurch erheblich verkleinert.

Der Mantel-/Schirm-Aufbau des Kabels ist aber der Grösse und Dauer des Erdschlussstromes angepasst zu dimensionieren.

3.5 Crossbonding-Systeme

Wie schon erwähnt, ist es in Leitungssystemen mit grossen Erdschlussströmen erwünscht, die Kabelmäntel beidseitig erden zu können. In längeren Trassenstrecken mit Einleiterkabeln und mit Verbindungsmuffen werden deshalb die Kabelmäntel vermehrt im sogenannten Crossbonding-System ausgekreuzt.

Im symmetrischen Normalbetrieb bilden im Idealfall die drei induzierten und in Serie geschalteten Mantel-Teilspannungen der drei Phasenleiter ein «geschlossenes» Dreieck, so dass nur unbedeutende Mantelströme fließen können (Schaltung siehe Figur 4).

Aber auch in nicht vollkommen symmetrischen Crossbonding-Systemen (Kabel nicht transponiert, Teillängen nicht genau gleich lang) lassen sich die Zusatzverluste durch Ausgleichströme ganz erheblich reduzieren, weil die Verluste mit dem Quadrat der Mantelspannungs-Reduktion abnehmen.

Für Erdschlussströme hingegen ist ein Crossbonding-System praktisch gleichwertig wie ein beidseitig geerdetes Normalsystem.

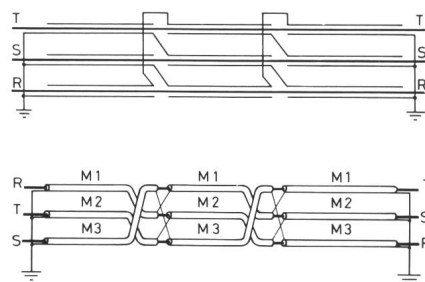


Fig. 4 Crossbonding-Systeme

oben: Übliche Auskreuzung der Mäntel bei drei in einer Ebene verlegten Kabeln
unten: Crossbonding-System mit Transposition der Kabel

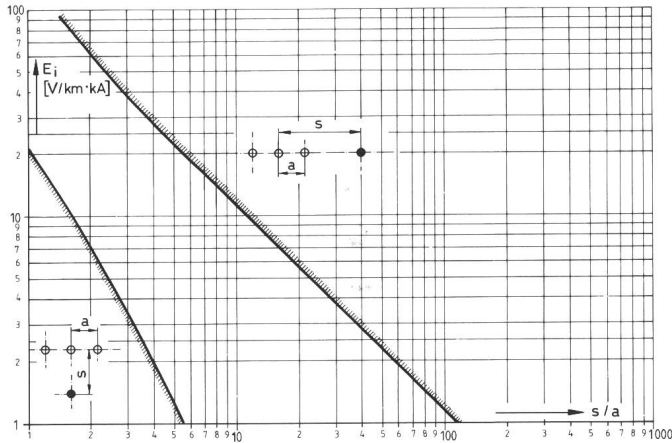


Fig. 5
In einem parallelen Leiter induzierte Spannung bei 50 Hz, die durch symmetrische Strombelastung von drei in einer Ebene verlegten Einleiterkabel verursacht wird, in Funktion der Abstandsverhältnisse

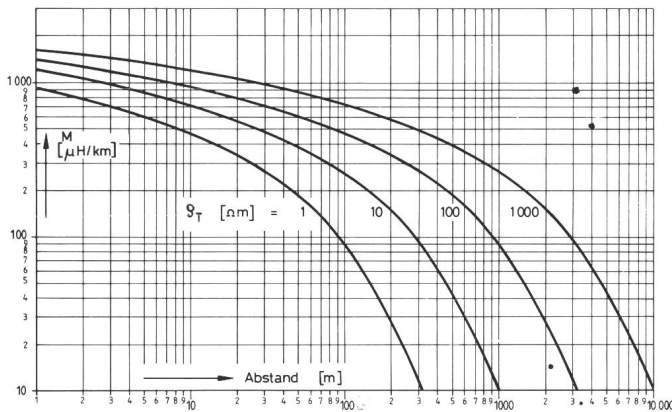


Fig. 6
Gegeninduktivität M bei 50 Hz in Funktion des Abstandes zwischen beeinflussender und beeinflusster Leitung und mit dem spezifischen Bodenwiderstand ρ_T als Parameter

4. Beeinflussungsprobleme

Im Zusammenhang mit den Mantel-Erdungssystemen sollen auch die möglichen Beeinflussungsprobleme noch kurz aufgezeigt werden.

Sind drei Einleiterkabel in einer Ebene verlegt, so werden auf einen fremden, parallel laufenden Leiter auch im normalen Betrieb Spannungen induziert.

In Figur 5 ist die Grösse der resultierenden induzierten Spannung pro Längeneinheit in Funktion der Abstandsverhältnisse für die Frequenz 50 Hz aufgezeichnet, und zwar für die Extremanordnungen in Senkrecht- und Horizontalachse. Kritische Werte werden in der Regel nur bei grossen Kurzschlussströmen erreicht.

Bei Dreileiterkabeln treten diese induzierten Spannungen wegen der Phasenleiter-Verseilung praktisch nicht in Erscheinung, weil das resultierende Magnetfeld ausserhalb des Kabelmantels ohne praktische Bedeutung bleibt.

Bei Netz-Erdschlüssen wird durch die Stromschleife Leiter-Erdrückleitung ebenfalls eine Spannung auf parallel verlaufende metallische Leiter induziert, gemäss der Beziehung

$$E_i = I_e \cdot \omega \cdot M \cdot l \cdot r \quad [\text{V/kAkm}]$$

wobei

- I_e = wirksamer Erdschlussstrom in kA
- ω = Kreisfrequenz s^{-1}
- M = Gegeninduktivität zwischen beeinflussender und beeinflusster Leitung, in mH/km
- l = Länge der Parallelführung in km
- r = vorhandene Reduktionsfaktoren

Die Grösse der Gegeninduktivität M ist anhängig vom Abstand zwischen beeinflussender und beeinflusster Leitung und dem spezifischen elektrischen Widerstand des Bodens. Die für 50 Hz berechneten Werte können Figur 6 entnommen werden.

Bei beidseitiger Mantelerdung fliesst, wie schon erwähnt, ein erheblicher Anteil des Erdschlussstromes über den Kabelmantel zur Einspeisung zurück, entsprechend dem Kabelmantel-Stromreduktionsfaktor r_{ki}

$$r_{ki} = \frac{R_s}{\sqrt{(R_s)^2 + (\omega \cdot L_e)^2}}$$

wobei

- R_s = Mantel-Längswiderstand in Ω/km
- L_e = Induktivität der Erdschleife, etwa 2 mH/km

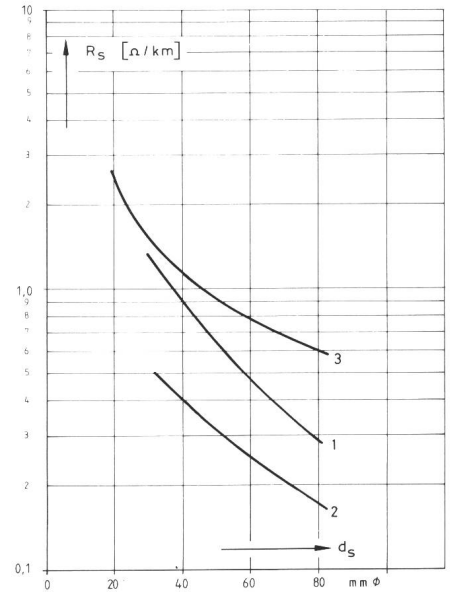


Fig. 7 Richtwerte für den Mantel-Längswiderstand R_s bei etwa 50 °C in Funktion des Mantel-Innendurchmessers d_s

- 1 Bleimantel
- 2 Kupfer-Wellmantel
- 3 Al-Schichtenmantel sowie F-Armierung

Die induzierte Beeinflussungsspannung wird dadurch um den Faktor r_{ki} vermindert.

Für Kabel mit magnetischer Band- oder Flachdrahtarmierung ist zu beachten, dass die Mantelimpedanz vom Armierungsaufbau und vom fließenden Mantelstrom beeinflusst wird. Für Kabel mit Polymerisolation und konzentrischem Cu-Drahtschirm kann der Längswiderstand aus der Schirmquerschnitts-Angabe berechnet werden. Dabei ist lediglich zu beachten, dass der Widerstand durch die sinusförmige Auflage der Drähte um etwa 10% erhöht wird.

Richtwerte für den Mantel-Längswiderstand R_s können für andere Kabeltypen der Figur 7 entnommen werden. Mit diesen Werten kann dann aus Figur 8 der Mantelstromreduktionsfaktor bestimmt werden.

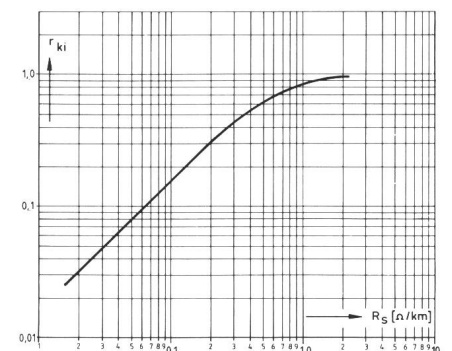


Fig. 8 Mantelstromreduktionsfaktor r_{ki} bei 50 Hz in Funktion des Mantelwiderstandes R_s