

Technische Empfehlung Nr. 8

vom März 1980

Anleitung

**zur rechnerischen und meßtechnischen Ermittlung
der Reduktionswirkung von Kompensationsleitern**

Herausgegeben von der
Schiedsstelle für Beeinflussungsfragen
der Deutschen Bundesbahn, der Deutschen Bundespost
und der Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke

© 1980 Verlags- und Wirtschaftsgesellschaft der Elektrizitätswerke mbH VWEW,
Stresemannallee 23, 6000 Frankfurt/Main 70
ISBN 3-8022-0013-6

ISBN 3 — 8022 — 0013 — 6

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Übersicht	7
2. Grundlagen	7
2.1. Beeinflussende Ströme	7
2.2. Reduktionsfaktor	8
2.3. Messung von Beeinflussungsspannungen	8
2.4. Zu verwendende Werte des spezifischen Erdwiderstandes	8
3. Beeinflussungsfall ohne Kompensationsleiter	8
4. Beeinflussungsfälle mit nur an den Enden geerdeten Kompensationsleitern	10
4.1. Beeinflussung bei einem Kompensationsleiter	10
4.1.1. Ableitung einer Formel für den Reduktionsfaktor	10
4.1.2. Einflußgrößen auf den Reduktionsfaktor	11
4.1.3. Einfaches Berechnungsverfahren für den Reduktionsfaktor	11
4.2. Beeinflussung bei mehreren Kompensationsleitern	13
4.3. Einfluß der Erdungsimpedanzen am Anfang und Ende der Kompensationsleiter ...	15
5. Beeinflussungsfälle mit kontinuierlich geerdeten Kompensationsleitern .	16
5.1. Wichtige Beeinflussungsfälle in der Praxis	17
5.1.1. Fall „Rohrleitung“	17
5.1.2. Fall „Banderder, Bodenseil“	18
5.2. Verteilung des Fehlerstromes bei ausgeglichener Stromverteilung	18
5.3. Stromverteilung im kontinuierlich geerdeten Kompensationsleiter	19
5.3.1. Fall „Banderder, Bodenseil“	19
5.3.2. Fall „Rohrleitung“	21
5.4. Reduktionsfaktor des kontinuierlich geerdeten Kompensationsleiters	23
5.5. Behandlung eines kontinuierlich geerdeten Kompensationsleiters als ein nur an den Enden geerdeter Leiter	25
6. Einfluß der Lage des Kompensationsleiters	26
6.1. Lage des Kompensationsleiters nahe am beeinflussenden Leiter	26
6.2. Lage des Kompensationsleiters nahe am beeinflussten Leiter	26

6.3.	Reduktionsfaktor eines Erdseil-Luftkabels	27
6.4.	Beeinflußter Leiter im Bereich eines Spannungstrichters	28
7.	Reduktionsfaktor eines Fernmeldekabelmetallmantels	28
7.1.	Rechnerische Behandlung	28
7.2.	Einfluß des Erdpotentials auf die reduzierten Beeinflussungsspannungen	31
7.2.1.	Von Erde isolierte Kabel	32
7.2.2.	Kontinuierlich geerdete Kabel	33
7.3.	Meßtechnische Behandlung	34
8.	Zusammenfassung von Reduktionsfaktoren	37
8.1.	Multiplikationsmethode	37
8.2.	Leitwertadditionsmethode	37
8.3.	Kehrwertadditionsmethode	39
9.	Messung der Schutzwirkung von Kompensationsleitern	40
9.1.	Messungen an Kabelmustern im Labor	40
9.2.	Messung unbekannter Parallel-Leitwerte bei ausgelegten Kabeln	40
9.3.	Messungen an Anlagen im Gelände	41
9.3.1.	Benutzung von freien Kabeladern	41
9.3.2.	Benutzung eines Hilfskabels für die beeinflusste Leitung	42
9.3.3.	Benutzung eines Hilfskabels für die beeinflussende Leitung	42
9.4.	Vorausmessungen für geplante Anlagen	43
10.	Berücksichtigung der magnetisch wirksamen Bewehrung	44
10.1.	Allgemeine Betrachtungen	44
10.2.	Berücksichtigung der magnetischen Bewehrung bei einem Kompensationsleiterbündel	46
10.3.	Der Reduktionsfaktor bei Verwendung eines Kabels mit magnetisch wirksamer Bewehrung im allgemeinen Fall	51
11.	Ermittlung des Reduktionsfaktors r_z eines zusätzlich erforderlichen Kompensationsleiters	53
11.1.	Kabel ohne magnetische Bewehrung	53
11.2.	Kabel mit magnetischer Bewehrung	54

12.	Beispiele	54
12.1.	Beeinflussung von Fernmelde- und Signalkabeln der $_DB$ durch $16\frac{2}{3}$ -Hz-Bahnströme	54
12.1.1.	Vorbemerkungen	54
12.1.2.	Kabel ohne magnetisch wirksame Bewehrung	57
12.1.3.	Kabel mit magnetisch wirksamer Bewehrung	59
12.2.	Rechnerische Ermittlung der Wirkung von mehreren Kompensationsleitern (Beispiel zu Punkt 4.2)	63
12.3.	Kompensationswirkung von Rohrleitungen (Beispiel zu Punkt 5)	66
12.4.	Kompensationswirkung eines Bodenseils (Beispiel zu Punkt 5)	70
12.5.	Das Zusammenfassen mehrerer bekannter Reduktionsfaktoren (Beispiel zu Punkt 8)	73
12.6.	Ermittlung des zusätzlich erforderlichen Reduktionsfaktors r_2 (Beispiel zu den Punkten 9.2, 11.1 und 11.2)	75
12.6.1.	Bestimmung des unbekanntes Parallel-Leitwertes G_U und der induzierten Spannung E_1 durch Messungen an dem bereits vorhandenen Fernmeldekabel	75
12.6.2.	Bestimmung des erforderlichen Reduktionsfaktors für ein zusätzlich in der gleichen Trasse zu verlegendes Kabel ohne magnetisch wirksame Bewehrung	76
12.6.3.	Bestimmung des erforderlichen Reduktionsfaktors für ein zusätzlich in der gleichen Trasse zu verlegendes Kabel mit magnetisch wirksamer Bewehrung	77
12.7.	Vergleich der verschiedenen Methoden zur Ermittlung des resultierenden Reduktionsfaktors bei mehreren Kompensationsleitern (Beispiel zu Punkt 8)	79
12.7.1.	Exakte Berechnung des Reduktionsfaktors	80
12.7.2.	Näherungsweise Berechnung des Reduktionsfaktors	80
12.8.	Berücksichtigung der magnetisch wirksamen Bewehrung bei einem Kompensationsleiterbündel (Beispiel zu Punkt 10.2 auf der Basis der Gleichung (77))	82
13.	Diagramme	86
13.1.	Reduktionsfaktor in Abhängigkeit vom Leitwert G' , bei $f = 50$ Hz, für $G' = 0 \dots 15 \frac{\text{km}}{\Omega}$	86
13.2.	Reduktionsfaktor in Abhängigkeit vom Leitwert G' , bei $f = 50$ Hz, für $G' = 5 \dots 20 \frac{\text{km}}{\Omega}$	87
13.3.	Reduktionsfaktor in Abhängigkeit vom Leitwert G' , bei $f = 16\frac{2}{3}$ Hz, für $G' = 0 \dots 15 \frac{\text{km}}{\Omega}$	87
13.4.	Reduktionsfaktor in Abhängigkeit vom Leitwert G' , bei $f = 16\frac{2}{3}$ Hz, für $G' = 5 \dots 20 \frac{\text{km}}{\Omega}$	88
13.5.	Imaginärteil des Quotienten \underline{F} nach Gleichung (5a), bei $f = 50$ Hz und $\rho_E = 50 \Omega \text{ m}$	88

13.6.	Imaginärteil des Quotienten \underline{E} nach Gleichung (5 a), bei $f = 16\frac{2}{3}$ Hz und $\rho_E = 30 \Omega\text{m}$	89
13.7.	Imaginärteil des Quotienten \underline{E} nach Gleichung (5 a), bei $f = 800$ Hz und $\rho_E = 200 \Omega\text{m}$	89
14.	Tafeln	90
14.1.	Reziprokwert des Impedanzbelages von Kompensationsleitern bei Stromrückleitung über Erde	90
14.2.	Gegenüberstellung von Reduktionsfaktorrichtwerten für Außenkabel mit und ohne Stahlbandbewehrung	91
15.	Zusammenstellung der verwendeten Formelzeichen	93
15.1.	Indices für Leiterbezeichnung	93
15.2.	Großbuchstaben	93
15.3.	Kleinbuchstaben	94
15.4.	Griechische Buchstaben	95
15.5.	Bemerkungen	95
16.	Literaturverzeichnis	95

1. Übersicht

Die Technische Empfehlung Nr. 8 (TE 8) befaßt sich mit der Wirkung von Kompensationsleitern bei induktiver und ohmscher Beeinflussung von Fernmeldeanlagen durch Starkstromanlagen. Als Kompensationsleiter werden in diesem Zusammenhang alle mehrfach (mindestens 2-fach) geerdeten Leiter bezeichnet, in denen im Beeinflussungsfall ein Strom fließt, der das Feld der beeinflussenden Anlage schwächt. Dies hat eine Reduzierung der in die Fernmeldeanlage eingekoppelten Spannungen zur Folge.

Die TE 8 soll helfen, die Reduktionswirkung von Kompensationsleitern in der Umgebung starkstrombeeinflusster Fernmeldeanlagen mit angemessenem Aufwand rechnerisch bzw. meßtechnisch zu ermitteln und das Verständnis für die verschiedenen Beeinflussungsfälle zu erleichtern. Außerdem werden Verfahren zur Bemessung metallener Kabelmäntel und zusätzlich notwendiger Kompensationsleiter beschrieben sowie Möglichkeiten angegeben, wie sich die magnetisch wirksame Bewehrung von Fernmeldekabeln berücksichtigen läßt.

Als Kompensationsleiter können wirken:

- metallene Mäntel von Fernmeldekabeln
- metallene Mäntel von Starkstromkabeln
- Erdseile von Starkstromfreileitungen
- Fahrschienen von Bahnen
- metallene Rohrleitungen (Gas- und Wasserrohre sowie Pipelines)
- Bänderder
- Bodenseile usw.

Bei der Berechnung der verschiedenen Beeinflussungsfälle wird in der TE 8 von der Voraussetzung homogener Beeinflussung, d.h. Parallelführung aller vorhandener Leiter, ausgegangen. Im inhomogenen Fall kann nach der TE 1 (vom November 1971) der gesamte Streckenverlauf in einzelne Abschnitte unterteilt werden, für die jeweils homogene Beeinflussung angenommen werden darf.

Eine Zusammenstellung der verwendeten Formelzeichen befindet sich unter Punkt 15.

2. Grundlagen

2.1. Beeinflussende Ströme

Ursache für die induktive und ohmsche Beeinflussung von Fernmeldeanlagen sind Wechselströme von Starkstromanlagen, die durch die Erde fließen. Dabei ist es grundsätzlich gleichgültig, ob es sich um Fehlerströme (Kurzzeitbeeinflussung) oder Betriebsströme (Langzeitbeeinflussung) handelt.

Je nach Art der Hochspannungsanlage sollen bei Beeinflussungsrechnungen folgende Ströme zugrunde gelegt werden:

- Drehstromfreileitungen: $I = 3 I_0$
- 110-kV-Bahnstromleitungen: $I = 2 I_0$
- 15-kV-Bahnfahrleitungen
- Kurzschlußfall: $I = I_k$
- Normalbetrieb: $I = I_F$

I_0 . . . Nullkomponente der Leiterströme eines Mehrphasensystems

Für die Ermittlung der beeinflussenden Ströme wird bei Starkstromfreileitungen und -kabeln mit Erderwirkung der Kabelmängel entsprechend VDE 0228/7.75 von der ausgeglichenen Stromverteilung sowie der Annahme ausgegangen, daß die Größe des induzierenden Stromes von den Eigenschaften vorhandener Kompensationsleiter unabhängig ist und nur durch die elektrischen Betriebsmittel des Starkstromnetzes bestimmt wird [1], [2], [3].

2.2. Reduktionsfaktor

Der Reduktionsfaktor r ist ein Maß für die reduzierende Wirkung von Kompensationsleitern in der Umgebung starkstrombeeinflusster Fernmeldeanlagen. Er wird aus dem Verhältnis zweier Spannungen gebildet.

$$r = \frac{U_1}{E_1} \quad (1)$$

U_1 ... in den beeinflussten Leiter induzierte Spannung bei Anwesenheit aller Kompensationsleiter (U_1 wird in der TE 1 mit E_1 bezeichnet)

E_1 ... in den beeinflussten Leiter induzierte Spannung ohne den oder die betrachteten Kompensationsleiter

2.3. Messung von Beeinflussungsspannungen

Die Messung von Beeinflussungsspannungen wird an einer Fernmeldeader, der sogenannten Meßader, repräsentativ für alle anderen durchgeführt. Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, kommen dabei grundsätzlich hochohmige Spannungsmesser (Innenwiderstand $R_i \rightarrow \infty$) zum Einsatz. Während des Meßvorganges ist somit der beeinflusste Leiter stromlos ($I_1 = 0$ bzw. $I_{MA} = 0$).

2.4. Zu verwendende Werte des spezifischen Erdwiderstandes

Sofern Meßwerte über die Größe des spezifischen Erdwiderstandes nicht vorliegen, können Beeinflussungsrechnungen in Abhängigkeit von der Frequenz f des beeinflussenden Stromes I mit folgenden Werten für den spezifischen Erdwiderstand ρ_E durchgeführt werden:

$f = 16\frac{2}{3}$ Hz	$\rho_E = 30 \Omega \text{ m}$
$f = 50$ Hz	$\rho_E = 50 \Omega \text{ m}$
$f = 800$ Hz	$\rho_E = 200 \Omega \text{ m}$

Bei den Berechnungsbeispielen und Kurven dieser TE 8 wurden die obengenannten Werte zugrunde gelegt.

Bei anderen Frequenzen und bei anderen spezifischen Erdwiderständen können Induktivitäten nach VDE 0228/7.75, Teil 1, ermittelt werden.

3. Beeinflussungsfall ohne Kompensationsleiter

In Bild 1 verlaufen eine Starkstromleitung (0) und eine Fernmeldeleitung (1) im Abstand a voneinander über einen bestimmten Streckenabschnitt der Länge s parallel.

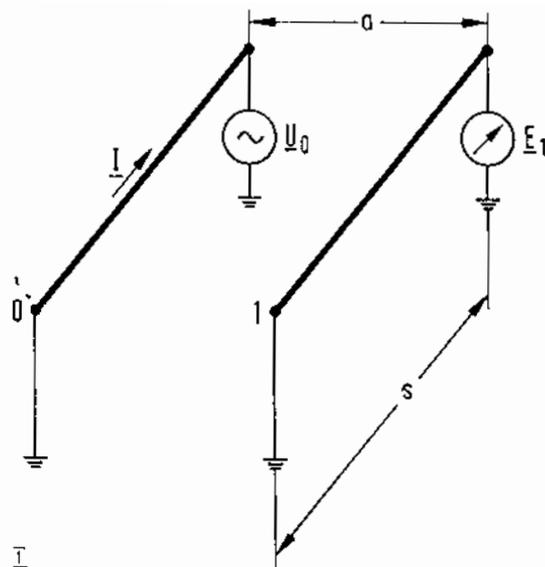
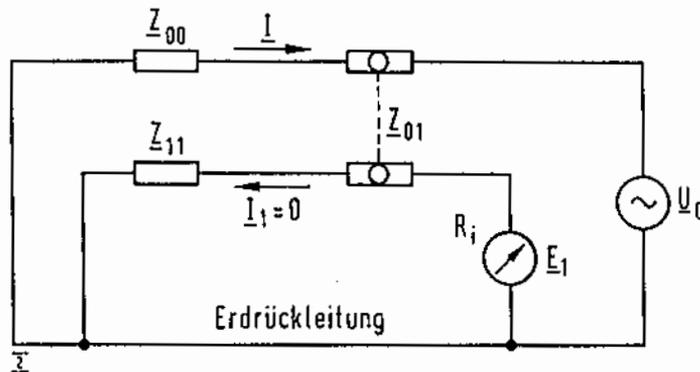


Bild 1: Beispiel für die Beeinflussung ohne Kompensationsleiter

Im Beeinflussungsfall wird im Erdkreis des Fernmeldeleiters durch das Magnetfeld der Hochspannungsanlage sowie durch das sich im Erdboden ausbildende elektrische Strömungsfeld eine Spannung induziert.

Der Ersatzschaltplan dieses Beeinflussungsfalles ist in Bild 2 für vernachlässigbare Erdungsimpedanzen dargestellt.



- U_0 ... Verlagerungsspannung an der Fehlerstelle [4], [5]
- Z_{00} ... Selbstimpedanz der Schleife Leiter (0) – Erde
- Z_{11} ... Selbstimpedanz der Schleife Leiter (1) – Erde
- Z_{01} ... Kopplungsimpedanz der beiden Leiterschleifen

Bild 2: Ersatzschaltplan zweier gekoppelter Leiter

Die eingekoppelte Spannung berechnet sich zu

$$E_1 = I Z_{01} \quad (2)$$

4. Beeinflussungsfälle mit nur an den Enden geerdeten Kompensationsleitern

4.1. Beeinflussung bei einem Kompensationsleiter

4.1.1. Ableitung einer Formel für den Reduktionsfaktor

In dem Beeinflussungsfall nach Bild 3 ist zusätzlich ein an beiden Enden geerdeter Kompensationsleiter vorhanden.

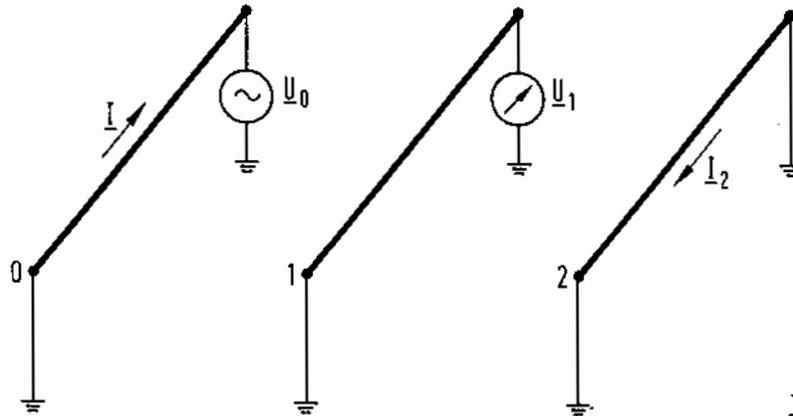


Bild 3: Beispiel für die Beeinflussung mit einem nur an den Enden geerdeten Kompensationsleiter

Der Ersatzschaltplan lässt sich bei Vernachlässigung der Erdungsimpedanzen gemäß Bild 4 darstellen.

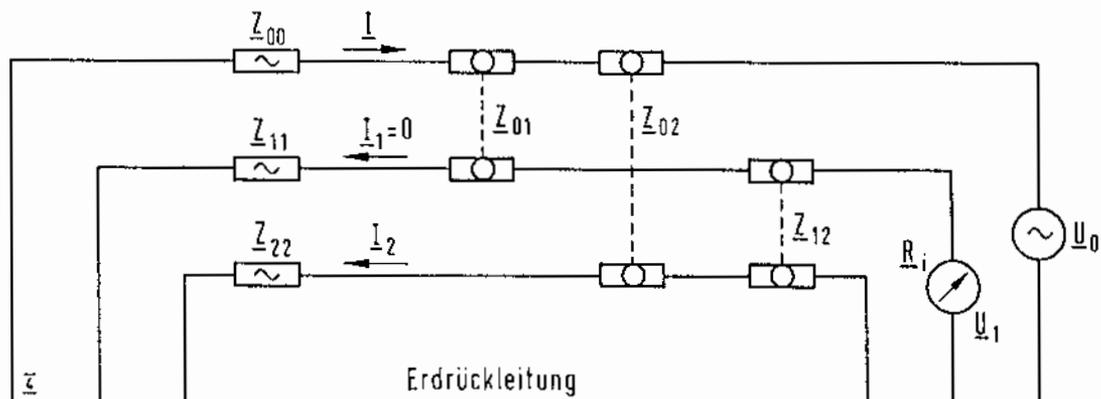


Bild 4: Ersatzschaltplan eines Beeinflussungsfalles mit einem nur an den Enden geerdeten Kompensationsleiter

Die eingekoppelte Spannung \underline{U}_1 und der Strom \underline{I}_2 können aus den Maschengleichungen für die Leiter 1 und 2

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 + \underline{I}_2 \underline{Z}_{12} &= \underline{I} \underline{Z}_{01} \\ \underline{I}_2 \underline{Z}_{22} &= \underline{I} \underline{Z}_{02} \end{aligned}$$

und errechnet werden:

$$I_2 = I \frac{Z_{02}}{Z_{22}} \quad (3)$$

$$U_1 = I Z_{01} \left(1 - \frac{Z_{12} Z_{02}}{Z_{01} Z_{22}} \right) \quad (4)$$

Mit Hilfe der Gleichungen (1), (2) und (4) ergibt sich der Reduktionsfaktor des Kompensationsleiters zu

$$r = r_2 = 1 - \frac{Z_{12} Z_{02}}{Z_{01} Z_{22}} \quad (5)$$

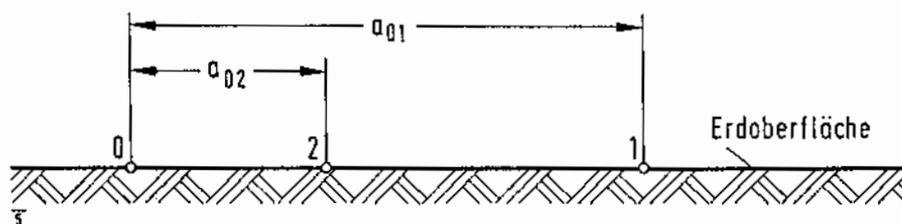
4.1.2. Einflußgrößen auf den Reduktionsfaktor

Der Reduktionsfaktor eines Kompensationsleiters nach Gleichung (5) ist abhängig von:

- den Eigenschaften des Kompensationsleiters.
Gute Leiter haben einen besseren, d. h. kleineren Reduktionsfaktor als schlechte Leiter.
- der Lage der Leiter zueinander.
Besonders günstige Verhältnisse ergeben sich, wenn der Leiter 2 in Bild 3 nahe am beeinflussenden (0) oder beeinflussten Leiter (1) liegt (siehe auch Punkt 6).
- den Erdungsverhältnissen an den Enden des Kompensationsleiters.
Es spielt z. B. nicht nur die Größe der Erdungsimpedanzen eine Rolle, sondern es ist auch von Bedeutung, ob die Leiter getrennt geerdet oder bestimmte Leiter einer gemeinsamen Erdungsanlage zugeführt werden (siehe Punkt 4.3 und 7.1).
- äußeren Randbedingungen.

Hierzu gehören z. B. die Länge des Kompensationsleiters, die Frequenz f des beeinflussenden Stromes I und der spezifische Erdwiderstand ρ_E , ferner die Lage der Fehlerstelle (z. B. des Erdkurzschlußpunktes) im beeinflussenden System.

4.1.3. Einfaches Berechnungsverfahren für den Reduktionsfaktor



- 0 ... beeinflussender Leiter
- 1 ... beeinflusster Leiter
- 2 ... Kompensationsleiter

Bild 5: Leiteranordnung

Nach VDE 0228/7.75, Teil 1, kann der Reduktionsfaktor einer Leiteranordnung gemäß Bild 5 durch Benutzung von Diagrammen und Tabellen auf einfache Art und Weise ermittelt werden. Dieses Verfahren wird mit Vorteil besonders dann angewandt, wenn der Kompensationsleiter weder zur Anlage des beeinflussenden noch zu derjenigen des beeinflussten Leiters gehört.

Dabei wird von folgenden Annahmen ausgegangen:

- Die Erdungsimpedanzen an den Enden des Kompensationsleiters seien verschwindend klein gegenüber seinem Wechselstromwiderstand bei Stromrückleitung über Erde.
- Alle drei Leiter liegen in einer Ebene. Unterschiedliche Verlegungstiefen bleiben unberücksichtigt.

Der Reduktionsfaktor des Leiters 2 berechnet sich nach Gleichung (5). Hierin ist bei gegebener Frequenz f und festem spezifischem Erdwiderstand ρ_E der Ausdruck

$$\frac{Z_{12} Z_{02}}{Z_{01}} = F \left(\frac{a_{02}}{a_{01}} \right) \quad (5a)$$

nur eine Funktion vom Abstandsverhältnis $\frac{a_{02}}{a_{01}}$

Der Reduktionsfaktor ergibt sich somit zu

$$r = 1 - F Y_{22}$$

mit
$$Y_{22} = \left(\frac{1}{Z_{22}} \right)$$

und
$$F = \operatorname{Re}(F) + j \operatorname{Im}(F)$$

Y_{22} : Die Leitwerte Y_{22} können in der Tafel 14.1 für verschiedene Kompensationsleiter entnommen werden.

$\operatorname{Re}(F)$: Der Realteil der Funktion $F \left(\frac{a_{02}}{a_{01}} \right)$ läßt sich angenähert (nach den

Richtlinien des CCITT Kap. VII, Abschnitt 3.33) angeben zu

$$\operatorname{Re}(F) \approx \frac{\omega \mu_0}{8} \mp f \left(\frac{a_{02}}{a_{01}} \right)$$

$$f = 16 \frac{3}{4} \text{ Hz} \quad \operatorname{Re}(F) \approx 16 \cdot 10^{-3} \frac{\Omega}{\text{km}}$$

$$f = 50 \text{ Hz} \quad \operatorname{Re}(F) \approx 49 \cdot 10^{-3} \frac{\Omega}{\text{km}}$$

$$f = 800 \text{ Hz} \quad \operatorname{Re}(F) \approx 800 \cdot 10^{-3} \frac{\Omega}{\text{km}}$$

Im (E): Der Verlauf des Imaginärteiles $\text{Im}(E)$ in Abhängigkeit vom Parameter $\left(\frac{a_{02}}{a_{01}}\right)$ ist in den Diagrammen unter

Punkt 13.5 für 50 Hz
 Punkt 13.6 für $16\frac{2}{3}$ Hz
 Punkt 13.7 für 800 Hz
 dargestellt.

4.2. Beeinflussung bei mehreren Kompensationsleitern

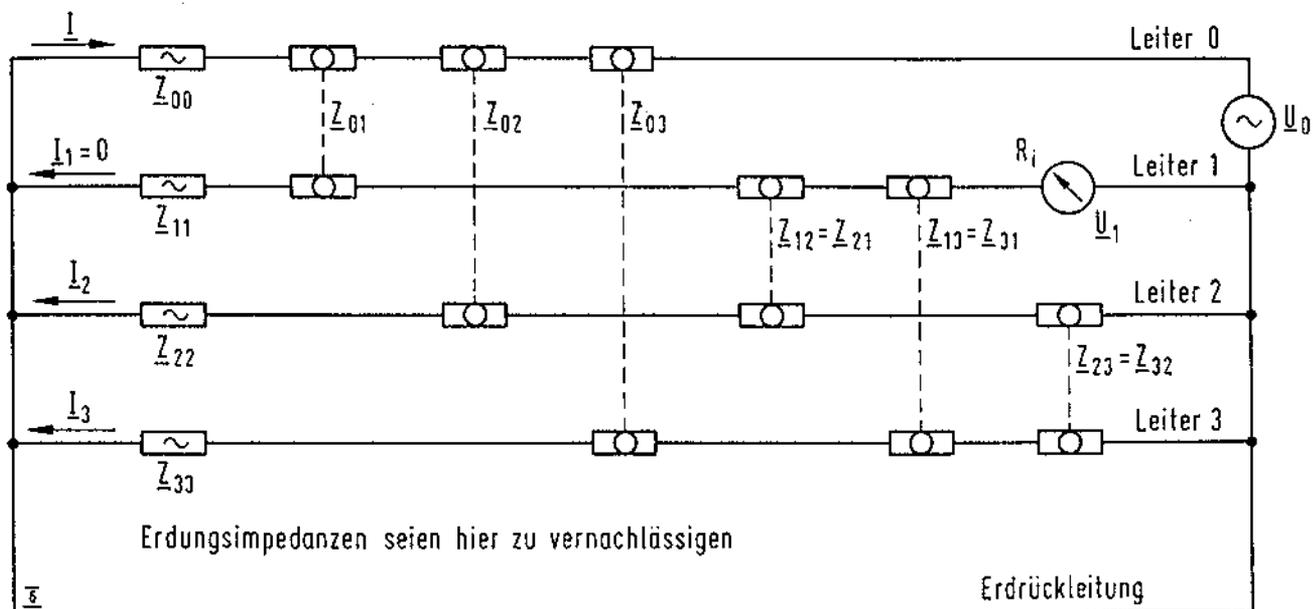


Bild 6: Ersatzschaltplan eines Beeinflussungsfalles mit zwei an den Enden geerdeten Kompensationsleitern

Aus den Maschengleichungen für die Leiter 1, 2 und 3

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 + \underline{I}_2 \underline{Z}_{12} + \underline{I}_3 \underline{Z}_{13} &= \underline{I} \underline{Z}_{01} \\ \underline{I}_2 \underline{Z}_{22} + \underline{I}_3 \underline{Z}_{23} &= \underline{I} \underline{Z}_{02} \\ \underline{I}_2 \underline{Z}_{32} + \underline{I}_3 \underline{Z}_{33} &= \underline{I} \underline{Z}_{03} \end{aligned}$$

lassen sich die Kompensationsleiterströme und die induzierte Spannung \underline{U}_1 berechnen [20].

Für den Gesamtreduktionsfaktor erhält man

$$r = \frac{U_1}{E_1} = \frac{I Z_{01} - I_2 Z_{12} - I_3 Z_{13}}{I Z_{01}} \quad \text{oder}$$

$$r = \frac{U_1}{E_1} = 1 - \frac{Z_{12} I_2}{Z_{01} I} - \frac{Z_{13} I_3}{Z_{01} I}$$

$$I_2 = I (1 - p_{02}) k_2 \quad (6)$$

$$I_3 = I (1 - p_{03}) k_3 \quad (7)$$

$$p_{02} = 1 - \frac{Z_{02}}{Z_{22}} \quad (8)$$

$$k_2 = \frac{1 - \frac{Z_{03} Z_{23}}{Z_{02} Z_{33}}}{1 - \frac{Z_{23} Z_{32}}{Z_{22} Z_{33}}} \quad (9)$$

$$p_{03} = 1 - \frac{Z_{03}}{Z_{33}} \quad (10)$$

$$k_3 = \frac{1 - \frac{Z_{02} Z_{32}}{Z_{03} Z_{22}}}{1 - \frac{Z_{23} Z_{32}}{Z_{22} Z_{33}}} \quad (11)$$

Aus den Gleichungen (6) bis (11) ergibt sich

$$r = \frac{U_1}{E_1} = 1 - \frac{Z_{12} Z_{02}}{Z_{01} Z_{22}} k_2 - \frac{Z_{13} Z_{03}}{Z_{01} Z_{33}} k_3 \quad (12)$$

Für n Kompensationsleiter gilt allgemein

$$r = 1 - \frac{Z_{12} I_2}{Z_{01} I} - \frac{Z_{13} I_3}{Z_{01} I} - \dots - \frac{Z_{1n} I_n}{Z_{01} I} \quad (13)$$

Die Ströme I_2, I_3, \dots, I_n müssen aus den Maschengleichungen bestimmt werden

4.3. Einfluß der Erdungsimpedanzen am Anfang und Ende der Kompensationsleiter

Die Erdungsimpedanzen an den Leiterenden vergrößern, sofern sie nicht mehr vernachlässigbar klein sind, die Selbstimpedanzen der Leiter-Erd-Schleifen. In die Kopplungsimpedanz zwischen zwei Leiterschleifen gehen die Erdungswiderstände nur dann ein, wenn die betrachteten Leiter gemeinsam geerdet sind. Diese Ausführungen seien zur Verdeutlichung anhand des Beeinflussungsfalles nach Bild 7 erläutert. Leiter 0 (Ader eines Einleiterstarkstromkabels mit Erdkurzschluß in der Erdungsanlage D) und Leiter 2 (Starkstromkabelmetallmantel mit äußerer isolierender Schutzhülle) sind gemeinsam über die Erdungsanlagen A und D geerdet. Die Leiter 1 (Fernmeldeader) und 3 (Fernmeldekabelmetallmantel mit äußerer isolierender Schutzhülle) werden an die Erdungsanlagen B und C angeschlossen.

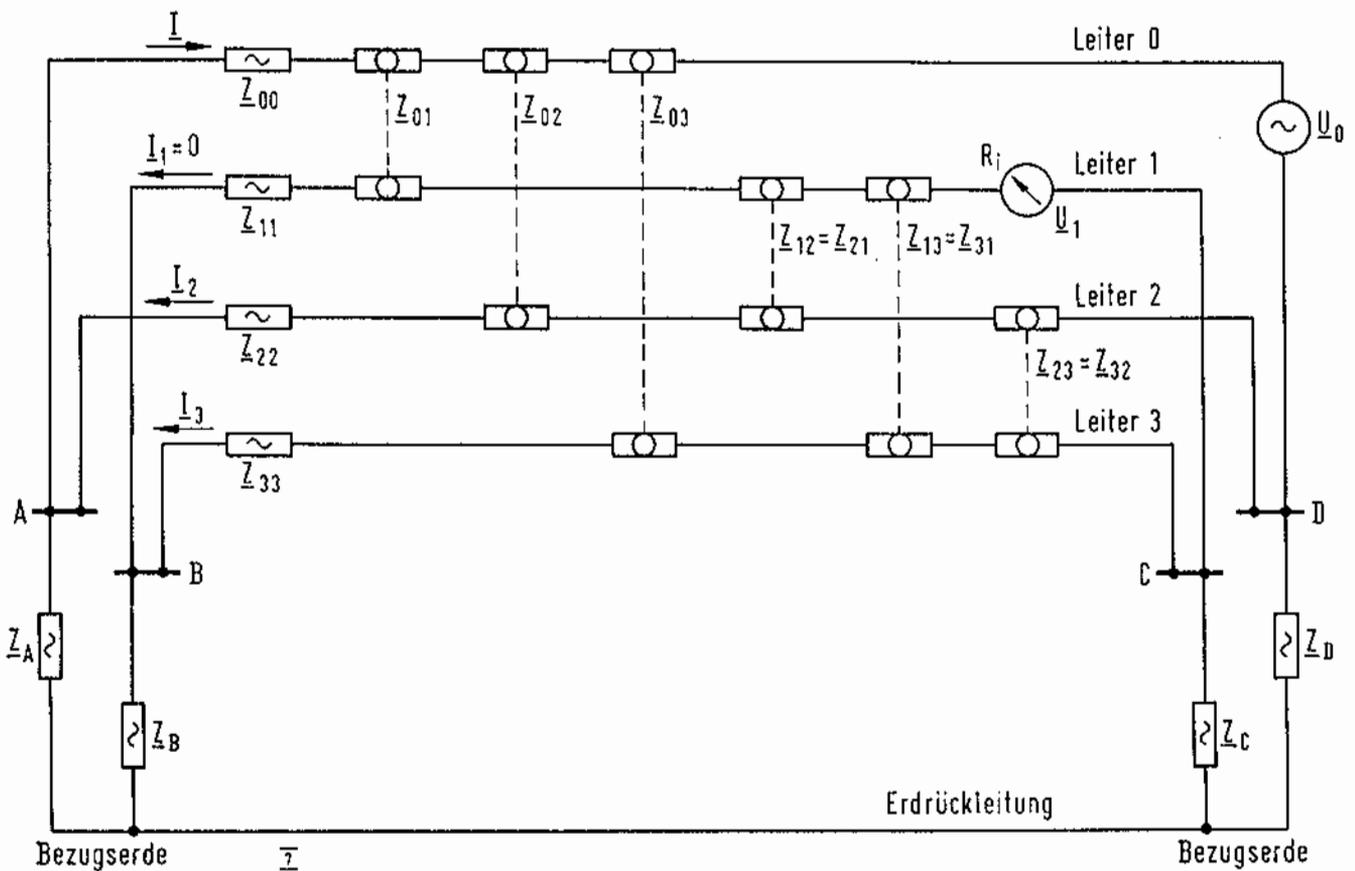


Bild 7: Ersatzschaltplan eines Beeinflussungsfalles mit zwei an den Enden geerdeten Kompensationsleitern bei nicht mehr zu vernachlässigenden Erdungsimpedanzen

Die Maschengleichungen für die Leiter 2 und 3 lauten:

$$(\underline{Z}_A + \underline{Z}_D) (I_2 - I) + \underline{Z}_{22} I_2 + \underline{Z}_{23} I_3 = \underline{Z}_{02} I$$

$$(\underline{Z}_B + \underline{Z}_C) (I_1 + I_3) + \underline{Z}_{32} I_2 + \underline{Z}_{33} I_3 = \underline{Z}_{03} I$$

oder nach Zusammenfassung mit $I_1 = 0$

$$(\underline{Z}_A + \underline{Z}_D + \underline{Z}_{22}) I_2 + \underline{Z}_{23} I_3 = (\underline{Z}_A + \underline{Z}_D + \underline{Z}_{02}) I \quad (14 a)$$

$$\underline{Z}_{32} I_2 + (\underline{Z}_B + \underline{Z}_C + \underline{Z}_{33}) I_3 = \underline{Z}_{03} I \quad (14 b)$$

Kopplungsimpedanz zwischen Leiter 0 und 2 (gemeinsam geerdet):

$$\underline{Z}_A + \underline{Z}_D + \underline{Z}_{02}$$

Kopplungsimpedanz zwischen Leiter 0 und 3 (getrennt geerdet):

$$\underline{Z}_{03}$$

Selbstimpedanzen der Leiter 2 und 3:

$$\underline{Z}_A + \underline{Z}_D + \underline{Z}_{22}$$

$$\underline{Z}_B + \underline{Z}_C + \underline{Z}_{33}$$

5. Beeinflussungsfälle mit kontinuierlich geerdeten Kompensationsleitern

Kontinuierlich geerdete Kompensationsleiter sind insbesondere Rohrleitungen, metallene Kabelmäntel mit Erderwirkung, Schienen, Bänderder und Bodenseile.

Fahrschienen einer elektrisch betriebenen Bahnlinie sind streng genommen wie ein kontinuierlich geerdeter Kompensationsleiter zu betrachten. Sie unterscheiden sich jedoch von anderen Kompensationsleitern dadurch, daß die Erdfähigkeit der Schienen durch den Ableitungsbelag bestimmt wird, der durch die Art des

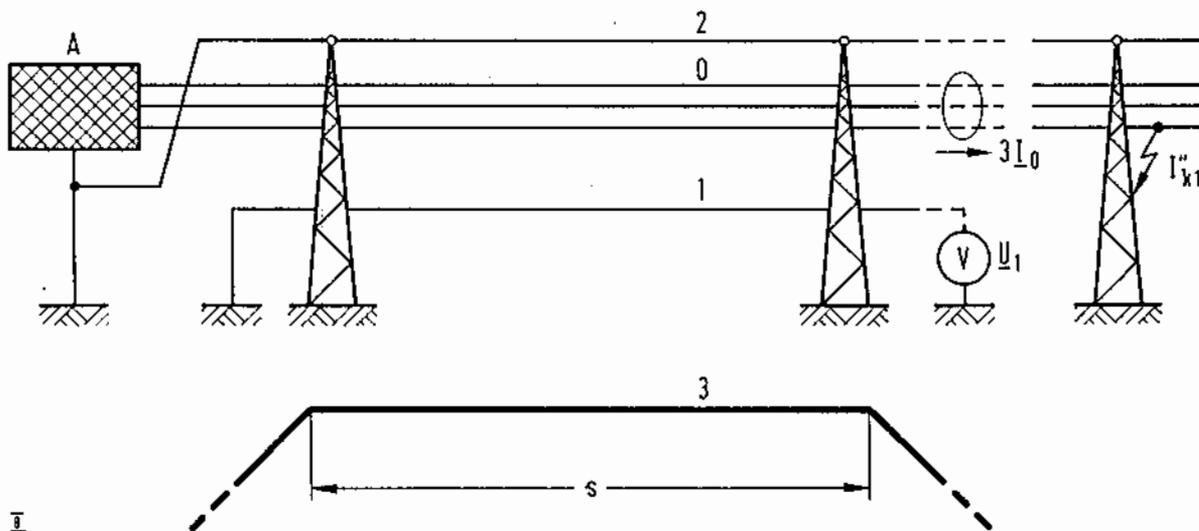
Oberbaues gegeben ist und Werte von $1 \dots 10 \frac{S}{km}$ annehmen kann.

5.1. Wichtige Beeinflussungsfälle in der Praxis

Aus der Vielzahl der Möglichkeiten von Beeinflussungsfällen mit mehrfach geerdeten Kompensationsleitern werden nachfolgend zwei häufig vorkommende Beispiele aufgeführt, um die grundsätzliche Vorgehensweise bei der Behandlung erdfühlig verlegter Leiter zu erläutern.

5.1.1. Fall „Rohrleitung“

In Bild 8 ist dieser in erster Linie interessierende Beeinflussungsfall dargestellt. Im Bereich einer Hochspannungsfreileitung (0) mit Erdseil (2) verläuft die Trasse einer Fernmeldeleitung (1). Im Näherungsabschnitt der Länge s befindet sich zusätzlich die Trasse einer Rohrleitung (3). Eine nennenswerte Verminderung der Beeinflussungsspannung im Fernmeldeleiter (1) durch den Kompensationsleiter (3) ist nur möglich, wenn der Kompensationsleiter einen genügend großen Strom führt. Für die Kompensationswirkung ist deshalb besonders der Fall der langen Rohrleitung von Bedeutung.



- 0 ... Leiterseile
- 1 ... Fernmeldeleiter
- 2 ... Erdseil
- 3 ... Kompensationsleiter (Rohrleitung)
- s ... Näherungsabschnitt mit Kompensationsleiter

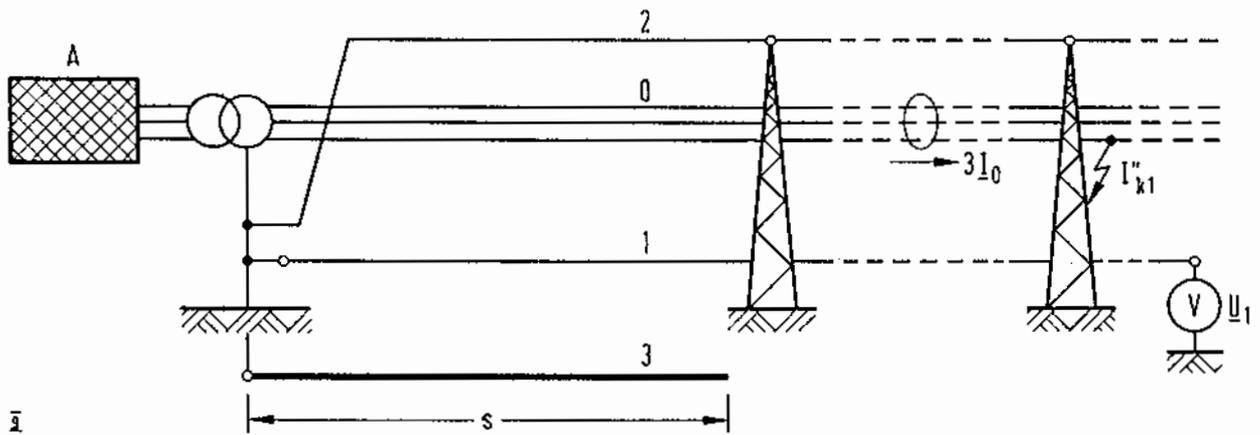
Bild 8: Beeinflussungsfall „Rohrleitung“

5.1.2. Fall „Banderder, Bodenseil“

In Bild 9 ist eine der vielen möglichen Anordnungen dargestellt. Eine Freileitung (0) mit Erdseil (2) führt zu einem Umspannwerk. An die Erdungsanlage des Umspannwerkes mit dem Erdungswiderstand R_E ist ein Banderder (3) von der Länge s angeschlossen. Im Bereich der Freileitung verläuft die Trasse einer Fernmeldeleitung (1). Der Banderder wirkt im Hinblick auf die Beeinflussung des Fernmeldeleiters als Kompensationsleiter.

Banderder und Bodenseile haben jeweils nur eine begrenzte Länge. Banderder können von der Erdung einer Hochspannungsanlage aus in jeder beliebigen Richtung verlegt sein. Bodenseile liegen in den Trassen der Freileitungen und sind mit den Erdungen der Masten verbunden.

Aus Gründen der Vereinfachung wird in den beiden oben angeführten Beeinflussungsfällen die reduzierende Wirkung des Fernmeldekabelmantels vernachlässigt.



- 0 ... Leiterseile
- 1 ... Fernmeldeleiter
- 2 ... Erdseil
- 3 ... Kompensationsleiter (Banderder)
- s ... Näherungsabschnitt mit Kompensationsleiter

Bild 9: Beeinflussungsfall „Banderder, Bodenseil“

5.2. Verteilung des Fehlerstromes bei ausgeglichener Stromverteilung

Bei einem einpoligen Erdkurzschluß an einem Mast im mittleren Teil der Freileitung fließt der Fehlerstrom

$$I_{k1}'' = I = 3 I_0$$

Die Nullströme $3 I_0$ fließen im Nährungsabschnitt s nach Bild 8 und 9 über das Erdseil (2), den Kompensationsleiter (3) und durch die Erde zu den Transformator-Sternpunkten im Netz A zurück. Geht man vom Fehlerstrom $3 I_0$ als einer fest vorgegebenen Größe aus, so ist in den Bildern 10 und 11 die Verteilung des Beeinflussungsstromes auf die einzelnen Leiter bei ausgeglichener Stromverteilung angegeben. Hierbei verhalten sich die Leiter 2 und 3 wie zwei nur an den Enden geerdete Kompensationsleiter nach Punkt 4.2. Die Ströme bleiben längs eines Abschnittes unverändert. Ausgeglichene Stromverteilung erhält man im Erdseil (2) bei Vernachlässigung der Mastwiderstände ($R_{\text{Mast}} = 0$) und im kontinuierlich geerdeten Kompensationsleiter (3), indem seine Enden, sofern sie nicht mit anderen stromführenden Leitern in Verbindung stehen, gegen Erde kurzgeschlossen werden (Bilder 10 und 11).

5.3. Stromverteilung im kontinuierlich geerdeten Kompensationsleiter

Die ausgeglichene Stromverteilung in dem kontinuierlich geerdeten Kompensationsleiter (3) nach Bild 10 und 11 ist der theoretische Grenzwert, den der Strom unter den gewählten Bedingungen im günstigsten Fall erreichen kann. Um die wirkliche Stromverteilung zu erhalten, müssen den Strömen der ausgeglichenen Stromverteilung Zusatzströme überlagert werden.

$$I_3(x) = I_{a3} + h_3(x) \quad (15)$$

mit
$$I_{a3} = 3 I_0 (1 - p_{03}) k_3 \quad (16)$$

$I_3(x)$... wirkliche Stromverteilung im kontinuierlich geerdeten Kompensationsleiter (3)

I_{a3} ... ausgeglichene Stromverteilung im Leiter 3

$h_3(x)$... zu überlagernder Zusatzstrom im Leiter 3

Bei der Berechnung der Zusatzströme wird der kontinuierlich geerdete Kompensationsleiter (3) mit der Erde als Rückleitung als eine verlustbehaftete Leitung aufgefaßt, in die nach Bild 12 zur Einhaltung der Randbedingungen die Ströme der ausgeglichenen Stromverteilung mit negativem Vorzeichen eingespeist werden.

5.3.1. Fall „Bänderder, Bodenseil“

Die Leitungstheorie liefert den Ansatz

$$h_3(x) = h_H e^{-\gamma x} + h_R e^{\gamma x} \quad (17)$$

h_H ... Amplitude der ungedämpften hinlaufenden Welle

h_R ... Amplitude der ungedämpften rücklaufenden Welle

γ ... Ausbreitungskoeffizient

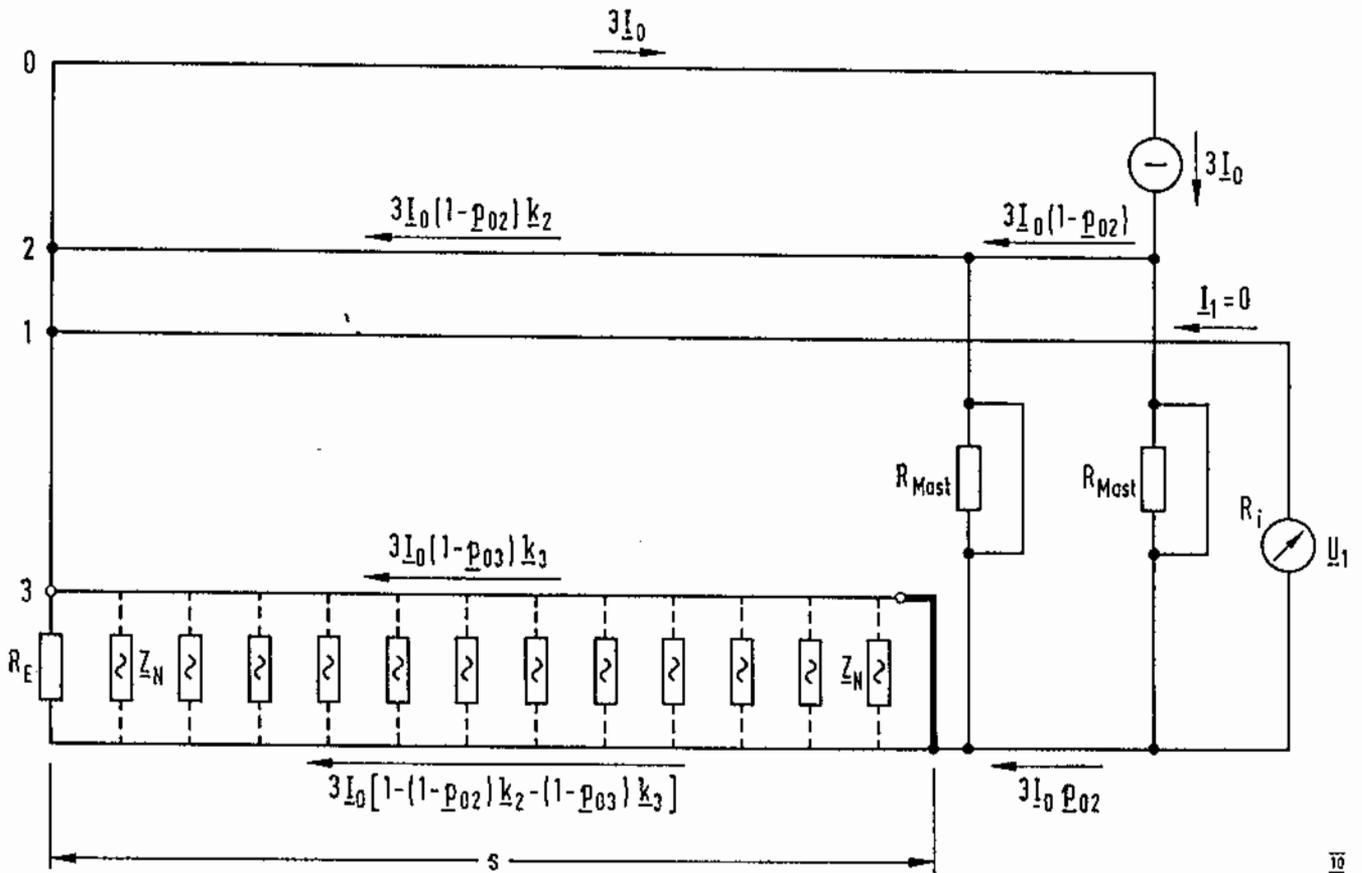


Bild 10: Ausgeglichene Stromverteilung im Beeinflussungsfall
„Bänderder, Bodenseil“

Zur Vereinfachung der Darstellung sind Eigenimpedanzen und Kopplungsimpedanzen nicht eingezeichnet

Randbedingungen:

$$1.) \quad \underline{h}_3 (x = 0) = \underline{h}_H + \underline{h}_R = -\underline{I}_{a3} = -3 \underline{I}_0 (1 - \underline{p}_{03}) \underline{k}_3 \quad (18)$$

$$2.) \quad \underline{q} (x = 0) = - \left(\frac{\underline{h}_R}{\underline{h}_H} \right) \quad (19)$$

$\underline{q} (x)$... Reflexionsfaktor

\underline{Z}_w ... Wellenwiderstand

Mit den Beziehungen

$$\underline{q} (x = s) = \underline{q} = \frac{\underline{R}_E - \underline{Z}_w}{\underline{R}_E + \underline{Z}_w} \quad \text{und} \quad (20)$$

$$\underline{q} (x = 0) = \underline{q} (x = s) e^{-2 \gamma x} = \underline{q} e^{-2 \gamma x} \quad (21)$$

ergibt sich

$$\underline{h}_3(x) = \underline{h}_3(x=0) \left[\frac{e^{2\gamma s}}{e^{2\gamma s} - \underline{q}} e^{-\gamma x} - \frac{\underline{q}}{e^{2\gamma s} - \underline{q}} e^{\gamma x} \right]$$

Strom im Banderder:

$$\underline{I}_3(x) = 3 \underline{I}_0 (1 - \underline{p}_{03}) \underline{k}_3 \left[1 - \frac{e^{2\gamma s}}{e^{2\gamma s} - \underline{q}} e^{-\gamma x} + \frac{\underline{q}}{e^{2\gamma s} - \underline{q}} e^{\gamma x} \right] \quad (22)$$

mit
$$\underline{q} = \frac{R_E - \underline{Z}_w}{R_E + \underline{Z}_w}$$

5.3.2. Fall „Rohrleitung“

Die Zusatzströme im kontinuierlich geerdeten Kompensationsleiter erhält man durch ähnliche Betrachtungen wie im Fall „Banderder, Bodenseil“. Wenn man von der Annahme ausgeht, daß die Rohrleitung nach Bild 8 ihren Verlauf an den Enden der Parallelführung zu beiden Seiten über eine große Länge hinweg fortsetzt, so ist der Kompensationsleiter (3) außerhalb der Beeinflussungstrecke s mit seinem eigenen Wellenwiderstand \underline{Z}_w abgeschlossen. Unter dieser Bedingung vereinfachen sich die Gleichungen für die Zusatzströme, da mit $\underline{q} = 0$ gerechnet werden kann. Bei Anwendung des Überlagerungsprinzips erhält man:

$$\underline{h}_3(x) = -\frac{1}{2} e^{-\gamma x} 3 \underline{I}_0 (1 - \underline{p}_{03}) \underline{k}_3 \quad (23)$$

$$\underline{h}_3(y) = -\frac{1}{2} e^{-\gamma y} 3 \underline{I}_0 (1 - \underline{p}_{03}) \underline{k}_3$$

Werden die Größen x und $y = s - x$ durch $x_0 = x - \frac{s}{2}$ ersetzt, so erhält man für den resultierenden Zusatzstrom

$$\underline{h}_3(x) + \underline{h}_3(y) \rightarrow \underline{h}_3(x_0) = -3 \underline{I}_0 (1 - \underline{p}_{03}) \underline{k}_3 \frac{\cosh(\gamma x_0)}{e^{\gamma \frac{s}{2}}}$$

Strom in der Rohrleitung:

$$\underline{I}_3(x_0) = 3 \underline{I}_0 (1 - \underline{p}_{03}) \underline{k}_3 \left[1 - \frac{\cosh(\gamma x_0)}{e^{\gamma \frac{s}{2}}} \right] \quad (24)$$

mit
$$x_0 = -\frac{s}{2} \dots \dots + \frac{s}{2}$$

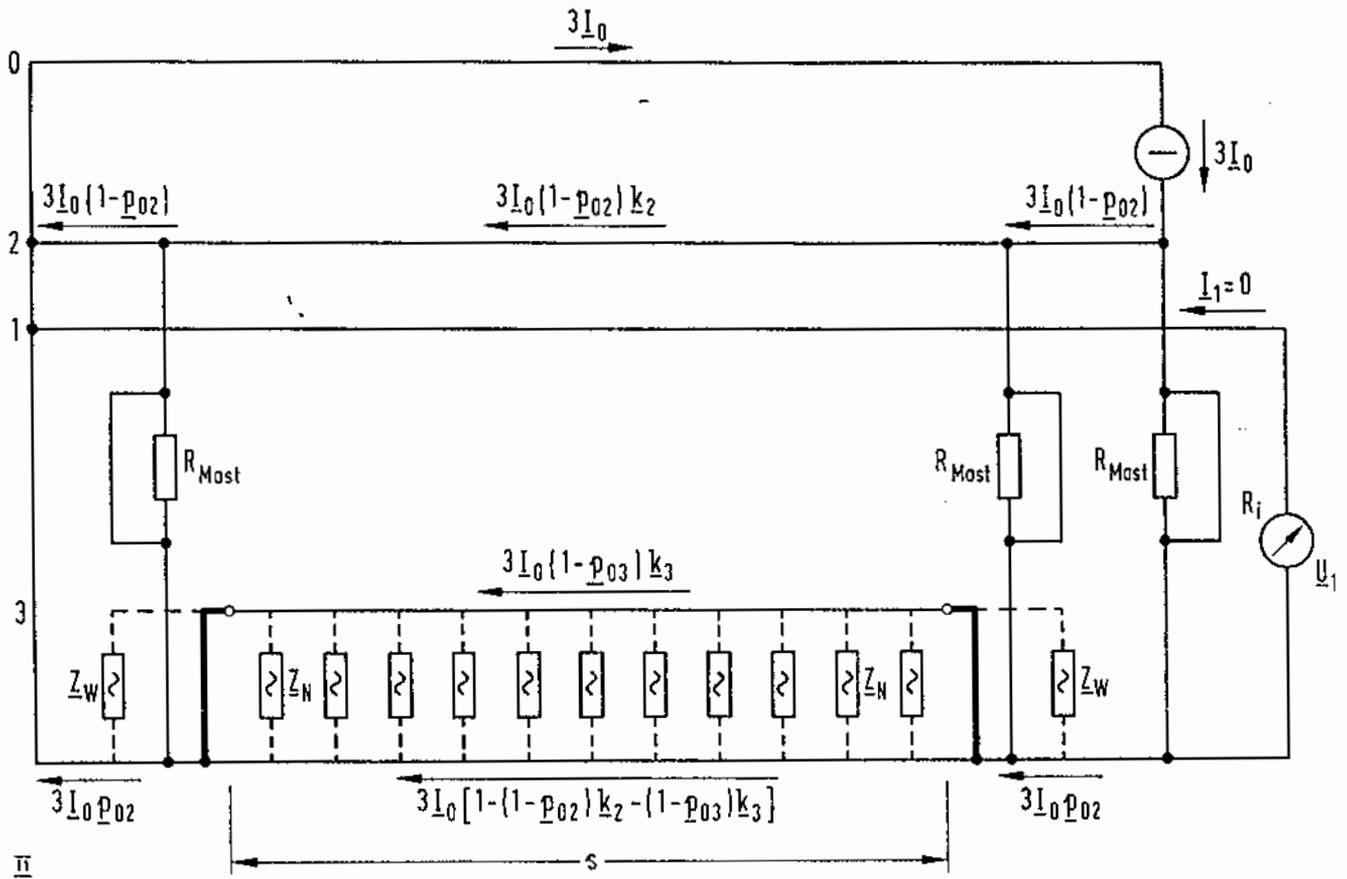
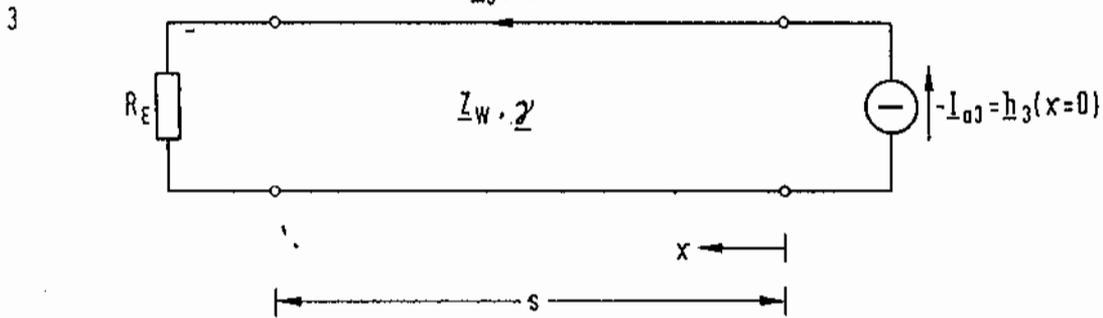
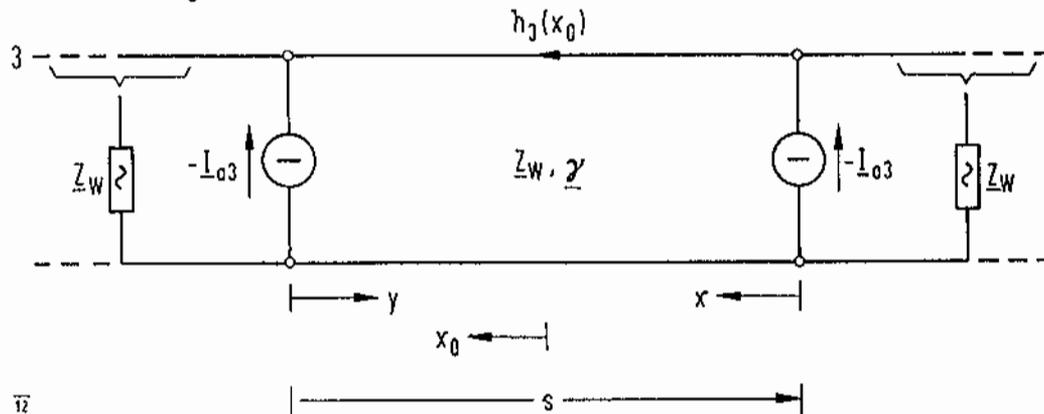


Bild 11: Ausgeglichene Stromverteilung im Beeinflussungsfall „Rohrleitung“
 Zur Vereinfachung der Darstellung sind Eigenimpedanzen und Kopplungsimpedanzen nicht eingezeichnet.

Fall "Bänderder, Bodenseil"



Fall "Rohrleitung"



12

$$Z_w = \sqrt{Z_{33} Z_N}$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{Z_{33}}{Z_N}}$$

$$I_{a3} = 3 I_0 (1 - \rho_{03}) k_3$$

Z_N ... Querimpedanz (Ableitwiderstand)

Bild 12: Berechnung der Zusatzströme bei den kontinuierlich geerdeten Kompensationsleitern

5.4. Reduktionsfaktor des kontinuierlich geerdeten Kompensationsleiters

Der Reduktionsfaktor des kontinuierlich geerdeten Kompensationsleiters (3) berechnet sich gemäß Gleichung (1) zu

$$r_3 = \frac{U_1}{E_1}$$

U_1 ... Beeinflussungsspannung im Leiter 1 mit Kompensationsleiter (3)

E_1 ... Beeinflussungsspannung im Leiter 1 ohne Kompensationsleiter (3)

Die Komponenten der Beeinflussungsspannung (hierzu Bild 8 und 9) sind:

im Abschnitt ohne Kompensationsleiter (3):

von den Leiterseilen

$$\underline{E}_{10} = 3 \underline{I}_0 \underline{Z}_{01} \quad (25)$$

vom Erdseil

$$\underline{E}_{12} = -3 \underline{I}_0 (1 - p_{02}) \underline{Z}_{12} \quad (26)$$

Beeinflussungsspannung

$$\underline{E}_1 = \underline{E}_{10} + \underline{E}_{12} \quad (27)$$

im Abschnitt mit Kompensationsleiter (3):

von den Leiterseilen

$$\underline{U}_{10} = 3 \underline{I}_0 \underline{Z}_{01} \quad (28)$$

vom Erdseil

$$\underline{U}_{12} = -3 \underline{I}_0 (1 - p_{02}) k_2 \underline{Z}_{12} \quad (29)$$

vom Leiter 3

$$\underline{U}_{13} = -3 \underline{I}_0 (1 - p_{03}) k_3 \underline{Z}_{13} + \frac{1}{s} \int_{x=0}^{x=s} h_3(x) \underline{Z}_{13} dx \quad (30)$$

oder

$$\underline{U}_{13} = -\underline{I}_{a3} \underline{Z}_{13} \underline{c} \quad (31)$$

mit

$$\underline{I}_{a3} = 3 \underline{I}_0 (1 - p_{03}) k_3$$

$$\underline{c} = 1 + \frac{1}{s \underline{I}_{a3}} \int_{x=0}^{x=s} h_3(x) dx$$

Beeinflussungsspannung

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_{10} + \underline{U}_{12} + \underline{U}_{13} \quad (32)$$

5.5. Behandlung eines kontinuierlich geerdeten Kompensationsleiters als ein nur an den Enden geerdeter Leiter

Bei ausgeglichener Stromverteilung verhält sich ein kontinuierlich geerdeter Kompensationsleiter wie ein nur an den Enden geerdeter Leiter (siehe Punkt 5.2). Soll die erdfähige Verlegung richtig berücksichtigt werden, muß im Ersatzschaltplan für die ausgeglichene Stromverteilung (Bild 13) die Kopplungsimpedanz zwischen beeinflusstem Leiter und kontinuierlich geerdetem Kompensationsleiter nach Gleichung (31) mit einem Faktor \underline{c} multipliziert werden.

Allgemein errechnet sich \underline{c} zu

$$\underline{c} = 1 + \frac{1}{s I_a} \int_{x=0}^{x=s} h(x) dx \quad (33)$$

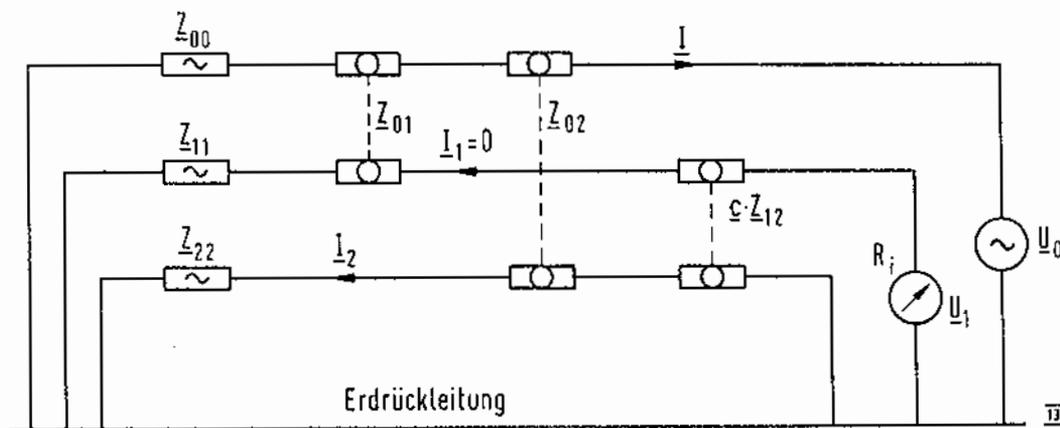


Bild 13: Ersatzschaltplan eines Beeinflussungsfalles mit kontinuierlich geerdetem Kompensationsleiter (Leiter 2)

Für den Fall „Bänderder, Bodenseil“ ergibt sich

$$\underline{c} = 1 - \frac{1}{\gamma s} \frac{(e^{\gamma s} - 1) (e^{\gamma s} - q)}{e^{2 \gamma s} - q} \quad (34)$$

Für den Fall „Rohrleitung“ ergibt sich

$$\underline{c} = 1 - \frac{1}{\gamma s} (1 - e^{-\gamma s}) \quad (35)$$

Literatur: [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14].

6. Einfluß der Lage des Kompensationsleiters

Die folgenden Ausführungen beziehen sich wieder auf Kompensationsleiter, die nur an den Enden geerdet sind. Der Sonderfall der kontinuierlichen Erdung wurde in Punkt 5 behandelt.

6.1. Lage des Kompensationsleiters nahe am beeinflussenden Leiter

Liegt der Kompensationsleiter (2) nach Bild 5 nahe am beeinflussenden Leiter (0), so vereinfacht sich die Gleichung (5) für den Reduktionsfaktor wegen $Z_{01} = Z_{12}$ zu

$$r = 1 - \frac{Z_{02}}{Z_{22}} \quad (36)$$

oder

$$r = \frac{Z_{22} - Z_{02}}{Z_{22}} \quad (37)$$

Ein Kompensationsleiter mit den oben angegebenen Eigenschaften ist z. B. der Kabelmantel eines Starkstromkabels [21]. Bei einfachem Aufbau der Kabelhülle (Leiter 2 sei ein einziger Kupfer-, Blei- oder Aluminiumschirm) gilt wegen der engen Kopplung der Leiter 0 und 2 ($a_{02} \rightarrow 0$)

$$L_2 \approx M_{02}$$

Somit ergibt sich der Mantelreduktionsfaktor zu

$$r_v = \frac{R_2}{Z_{22}} \quad (38)$$

R_2 ... Gleichstromwiderstand des Starkstromkabelmantels

Z_{22} ... Impedanz der metallenen Kabelhülle bei Rückleitung über Erde

Gleichung (38) gilt mit guter Näherung im Bereich niedriger Frequenzen (Sprachfrequenzen).

6.2. Lage des Kompensationsleiters nahe am beeinflussten Leiter

Liegt der Kompensationsleiter (2) nach Bild 5 nahe am beeinflussten Leiter (1), so errechnet sich der Reduktionsfaktor entsprechend Gleichung (5) wegen $Z_{01} = Z_{02}$ zu

$$r = 1 - \frac{Z_{12}}{Z_{22}} \quad (39)$$

oder

$$r = \frac{Z_{22} - Z_{12}}{Z_{22}} \quad (40)$$

In der Praxis kann der metallene Mantel eines Fernmeldekabels als ein Kompensationsleiter mit den oben angegebenen Eigenschaften gelten. Bei einfachem Aufbau der Kabelhülle gilt auch hier wegen der engen Kopplung von Leiter 1 und 2 ($a_{12} \rightarrow 0$)

$$L_2 \approx M_{12}$$

Der Mantelreduktionsfaktor¹⁾ ergibt sich somit im Bereich niedriger Frequenzen (Sprachfrequenzen) zu

$$r_K = \frac{R_2}{Z_{22}} \quad (41)$$

R_2 ... Gleichstromwiderstand des Fernmeldekabelmantels

Z_{22} ... Impedanz des metallenen Kabelmantels bei Rückleitung über Erde

6.3. Reduktionsfaktor eines Erdseil-Luftkabels

Der Reduktionsfaktor eines Erdseil-Luftkabels ist abhängig von der Lage der beeinflussten Leitung.

Liegt der beeinflusste Leiter außerhalb des Erdseil-Luftkabels, so kann in der Regel davon ausgegangen werden, daß das Erdseil wesentlich näher am beeinflussenden Leiter (Hochspannungsleitung) liegt als die beeinflusste Fernmeldeader. Nach Gleichung (36) ergibt sich somit der „Erdseil-Reduktionsfaktor“ des Erdseil-Luftkabels zu

$$r_E = 1 - \frac{Z_{02}}{Z_{22}}$$

Befinden sich die Fernmeldeadern im Innern des Erdseiles, so läßt sich die reduzierende Wirkung des Erdseil-Luftkabels nach Gleichung (41) berechnen.

Der Wert von r_K ist im allgemeinen günstiger (kleiner) als der Wert von r_E . Für die Adern im Innern des Erdseil-Luftkabels beträgt die induzierte Längsspannung

$$\underline{U}_1 = \underline{E}_1 r_K$$

Mit Gleichung (2), (3) und (41) erhält man

$$\underline{U}_1 = \underline{I}_2 R_2 \quad (42)$$

Dies bedeutet, daß die in die Fernmeldeadern induzierte Spannung gleich dem Spannungsfall des im Erdseil-Luftkabel fließenden Stromes am Mantelgleichstromwiderstand ist.

1) Der Reduktionsfaktor eines Fernmeldekabelmantels ist abhängig, von der Größe der Erdungsimpedanzen und der Schaltung der Adern (Bild 14).

6.4. Beeinflußter Leiter im Bereich eines Spannungstrichters

Befindet sich der beeinflusste Leiter im Bereich eines vom Fehler betroffenen Mastes einer Starkstromfreileitung, so muß zu der von der Hochspannungsleitung induzierten Spannung $\underline{E}_1 = \underline{I} \underline{Z}_{01}$ noch die Erdungsspannung \underline{U}_E des vom Fehler betroffenen Mastes phasengerecht hinzuaddiert werden.

Für die Adern im Innern eines Erdseil-Luftkabels gilt

$$\underline{U}_1 = r_K (\underline{I} \underline{Z}_{01} + \underline{U}_E) \quad (43)$$

$$\underline{U}_E = r_E \underline{I} \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}_{\infty A}} + \frac{1}{R_{\text{Mast}}} + \frac{1}{\underline{Z}_{\infty B}}} \quad (44)$$

$$\underline{Z}_{\infty} = \frac{\underline{W}_L}{2} + \sqrt{\left(\frac{\underline{W}_L}{2}\right)^2 + \underline{W}_L R_{\text{Mast}}} \approx \sqrt{\underline{W}_L R_{\text{Mast}}} \quad (45)$$

\underline{W}_L ... Erdseilimpedanz eines Spannungsfeldes der Freileitung mit Erde als Rückleiter

$\underline{Z}_{\infty A}$... { Kettenleiterimpedanzen der Erdseile zu beiden Seiten des vom Fehler
 $\underline{Z}_{\infty B}$... { betroffenen Mastes

Literatur: [11], [15], [16], [17], [18]

7. Reduktionsfaktor eines Fernmeldekabelmetallmantels

7.1. Rechnerische Behandlung

Für den Reduktionsfaktor eines Fernmeldekabelmetallmantels gilt nach Gleichung (40) allgemein

$$r_K = \frac{\underline{U}_1}{\underline{E}_1} = \frac{\underline{Z}_{22} - \underline{Z}_{12}}{\underline{Z}_{22}}$$

Bei Vernachlässigung der Wirkkomponente $\frac{\omega \mu_0}{8}$ in Eigen- und Kopplungsimpedanzbelag ergeben sich die Impedanzen \underline{Z}_{22} und \underline{Z}_{12} mit den Annahmen von Punkt 6.2 ($L_2 = L_M \approx M_{12} = M$) zu

$$\underline{Z}_{22} = R_{E1} + R_{E2} + R_M + j \omega L_M$$

und $Z_{12} = R_{E1} + R_{E2} + j \omega L_M$ (Bild 14 a)

bzw. $Z_{12} = R_{E2} + j \omega L_M$ (Bild 14 b)

bzw. $Z_{12} = R_{E1} + j \omega L_M$ (Bild 14 c)

bzw. $Z_{12} = j \omega L_M$ (Bild 14 d)

$$R_E = R_{E1} + R_{E2}$$

R_M ... Gleichstromwiderstand des Fernmeldekabelmantels

L_M ... Induktivität der Schleife Kabelmantel-Erde

$$\left(\text{durchschnittlicher Wert für unbewehrte Kabel: } L_M' = L_0' \approx \frac{2 \text{ mH}}{\text{km}} \right)$$

R_E ... Summe der Erdungswiderstände an den Enden des Kabelmantels

Die Kopplungsimpedanz Z_{12} zwischen Mantel und Meßader und damit auch der Kabelmantelreduktionsfaktor r_K sind von der Meßschaltung für die Beeinflussungsspannung $\underline{U}_1 = \underline{U}_{MA}$ abhängig.

In den Bildern 14 a bis 14 d ist für die jeweilige Meßschaltung der Betrag des Reduktionsfaktors angegeben. Der komplexe Reduktionsfaktorwert hat nur in Sonderfällen Bedeutung, wenn nämlich bei Beeinflussungsrechnungen höhere Frequenzen berücksichtigt werden müssen, wie z. B. bei der Thyristoranschnittsteuerung elektrischer Bahnen.

Die Messung der Beeinflussungsspannung U_1 gegen örtliche Erde (öE), d. h. zwischen Ader und Mantel, ist im Prinzip immer möglich. Die örtliche Erde kann jeder beliebige Schaltpunkt (VSt, KVz u. a.) mit eigener Erdungsanlage sein. Ader und Mantel sind während des Meßvorganges gemeinsam geerdet.

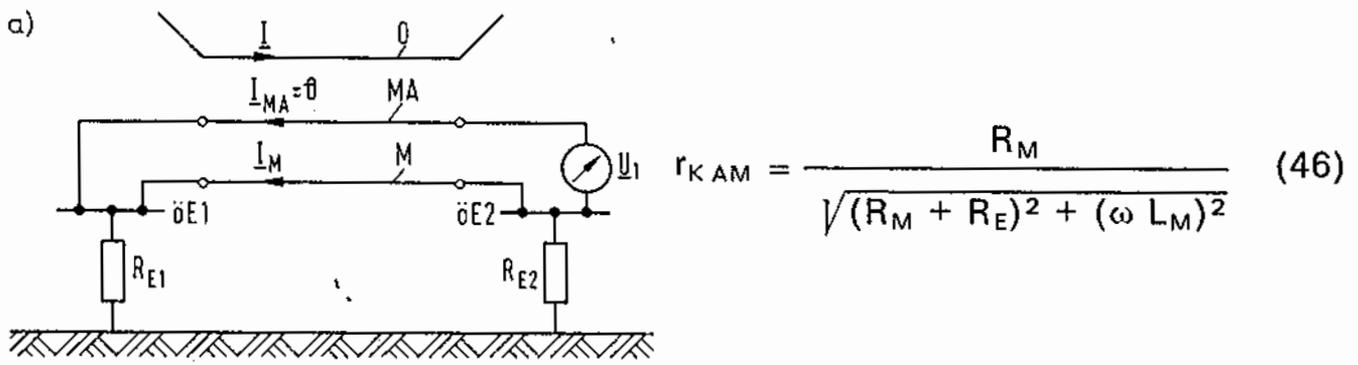
Die „ferne Erde“ (Potential Null) läßt sich nur in Sonderfällen zur Messung der Beeinflussungsspannung U_1 heranziehen. Dabei muß die Meßader durch eine oder zwei senkrecht zum Fernmeldekabel verlaufende Leitungen verlängert und in genügend großer Entfernung geerdet werden. Die Potentiale der Spannungstrichter sollen an den Erdungsstellen auf unbedeutende Werte abgeklungen sein. Für $R_E = 0$ sind die verschiedenen Kabelmantelreduktionsfaktoren nach Gleichung (46) bis (49) untereinander gleich

$$r_K = \frac{R_M}{\sqrt{R_M^2 + (\omega L_M)^2}} \quad (50)$$

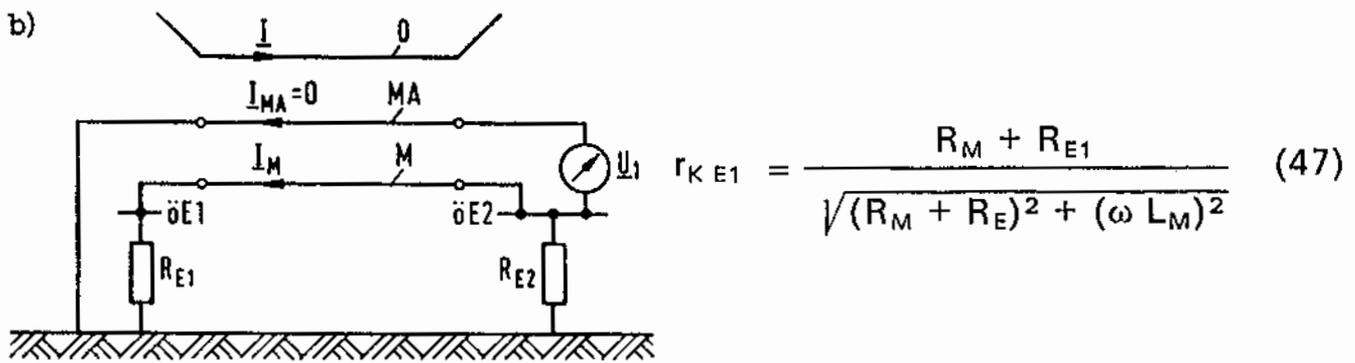
Beim Schutz von Fernmeldeanlagen geht man im allgemeinen vom Ader-Mantelreduktionsfaktor $r_{K \text{ AM}}$ aus. Dieser wird im folgenden kurz mit

$$r_K = r_{K \text{ AM}} \quad (51)$$

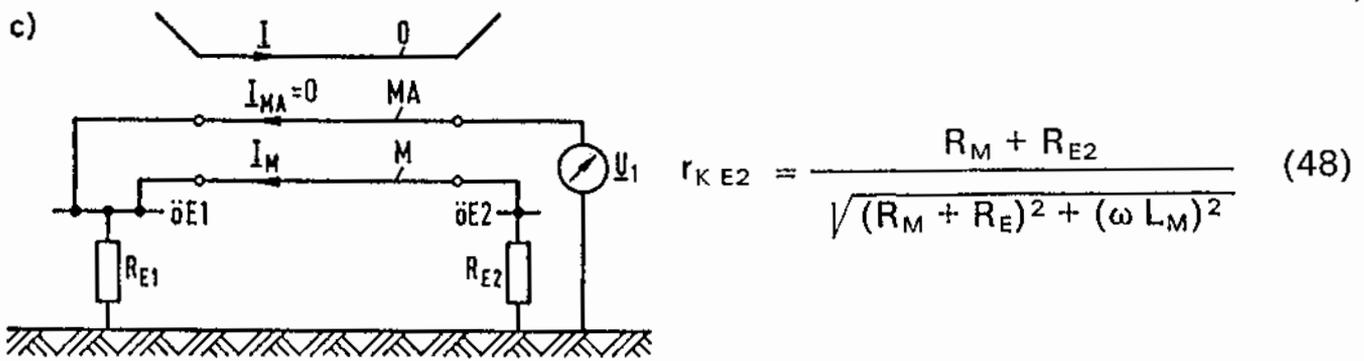
bezeichnet.



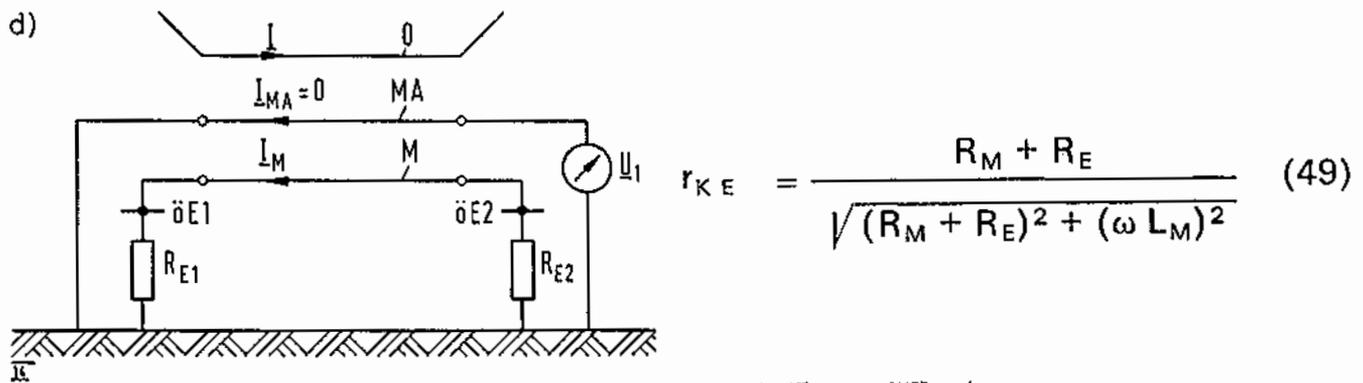
a: Messung von \underline{U}_1 zwischen Ader und Mantel (örtlicher Erde)



b: Messung von \underline{U}_1 zwischen örtlicher (öE_2) und ferner Erde



c: Messung von \underline{U}_1 zwischen örtlicher (öE_1) und ferner Erde



d: Messung von \underline{U}_1 gegen ferne Erde

Bild 14: Betrag des Reduktionsfaktors bei den verschiedenen Meßschaltungen

7.2. Einfluß des Erdpotentials auf die reduzierten Beeinflussungsspannungen

In den Bildern 15 bis 20 sind die Potentiale φ entlang des Kabels für homogene Beeinflussung aufgetragen. Die als Geraden eingezeichneten Potentialkurven gelten mit hinreichender Genauigkeit für kurze Kabellängen und unter der Voraussetzung, daß die Kabellänge der Beeinflussungslänge entspricht.

Die praktischen Einsatzfälle der Darstellungen können beispielsweise sein:

Bild 15:

Eine Teilnehmer-Anschlußleitung (AsL), die entweder nur einen metallenen Schirm (Folie) als Kabelmantel hat (Schichtenmantelkabel) – wobei dieser Mantel üblicherweise nicht geerdet wird – oder eine AsL, die überhaupt keinen metallenen Mantel besitzt.

Bild 16:

Eine Ortsverbindungsleitung (OVL), die von Vermittlungsstelle (Vst) zu Vermittlungsstelle führt, wobei davon ausgegangen werden kann, daß die Erdungswiderstände der Vermittlungsstellen schon aus betrieblichen Gründen sehr kleine Werte haben und daher Null gesetzt werden können.

Bild 17:

Die Mehrzahl aller beeinflussten Fernmeldeleitungen mit nicht mehr zu vernachlässigenden Erdungswiderständen in den Schaltpunkten (Vermittlungsstelle, Kabelverzweiger usw.). Diese Darstellung gilt für alle Arten von Fernmeldekabeln, sofern sie einen metallenen Mantel, der an beiden Enden geerdet ist, besitzen.

Bild 18:

Fernmeldeleitung, die über die Beeinflussungsstrecke weiter geführt ist, bei der daher ein Potential gegen (ferne) Erde abgegriffen werden kann.

Bild 19:

Fernmeldekabel, deren Mantel Erderwirkung hat ohne zusätzliche Erdungswiderstände an den Enden

Bild 20:

Fernmeldekabel mit Erderwirkung und mit besonders niedrigen Erdungswiderständen an den Enden

7.2.1. Von Erde isolierte Kabel

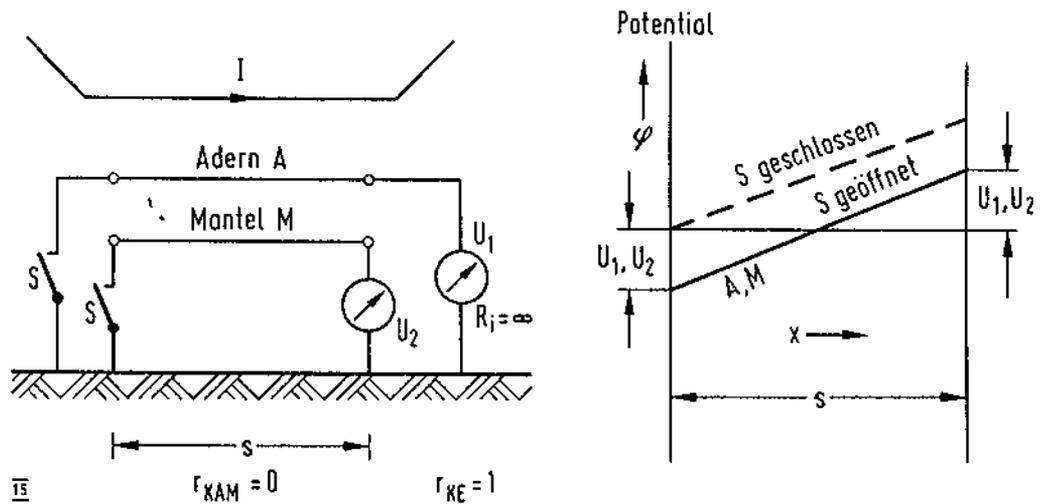


Bild 15: Mantel ohne galvanische Verbindung zur Erde

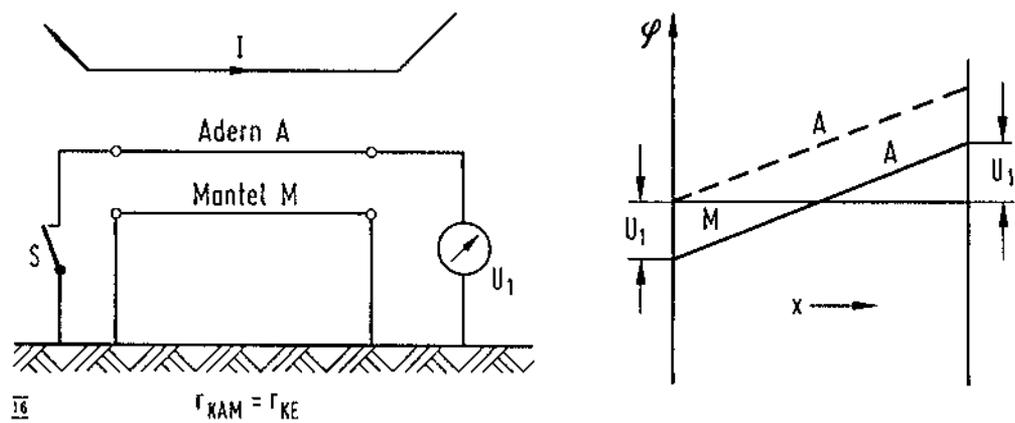


Bild 16: Mantelkreis über Erde geschlossen

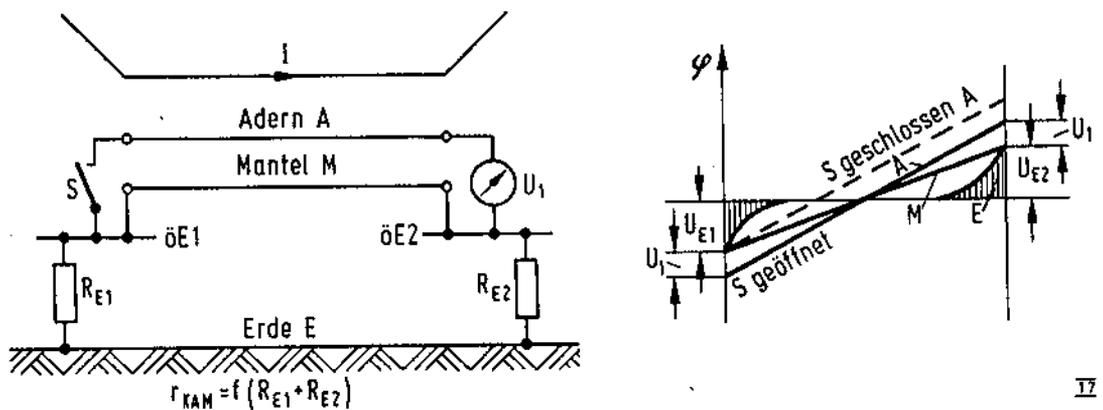
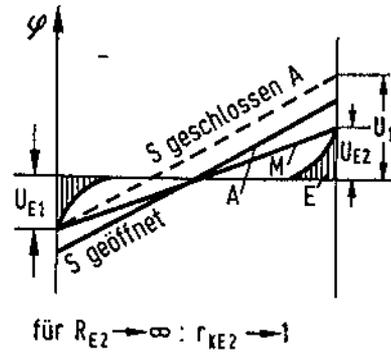
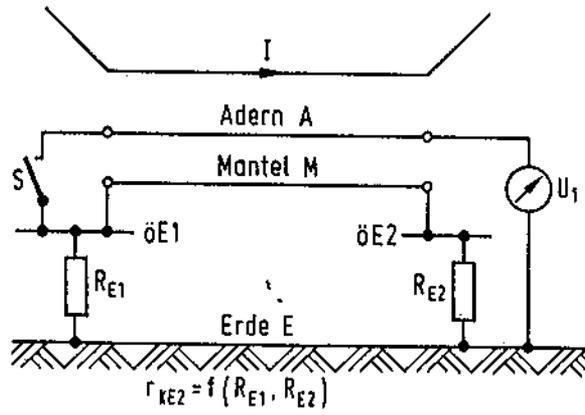


Bild 17: Mantel an den Enden geerdet; Messung gegen örtliche Erde



18

Bild 18: Mantel an den Enden geerdet; Messung gegen ferne Erde

7.2.2. Kontinuierlich geerdete Kabel

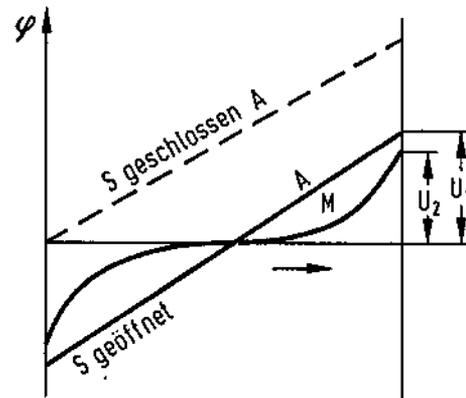
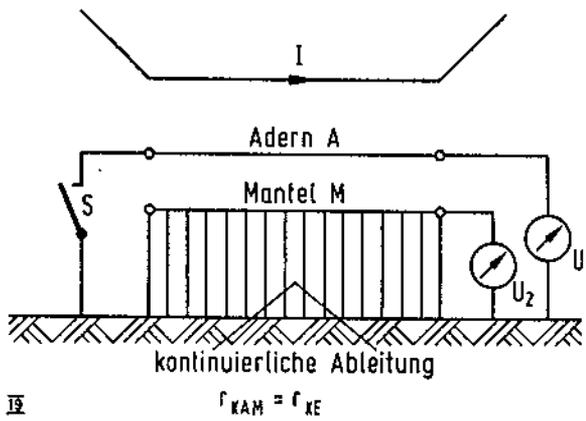


Bild 19: Mantel kontinuierlich geerdet

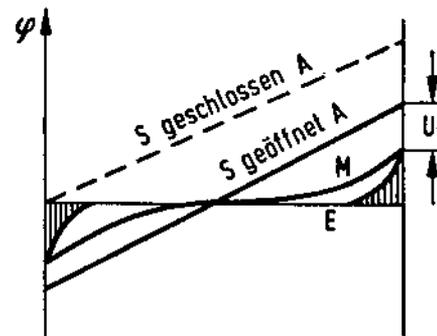
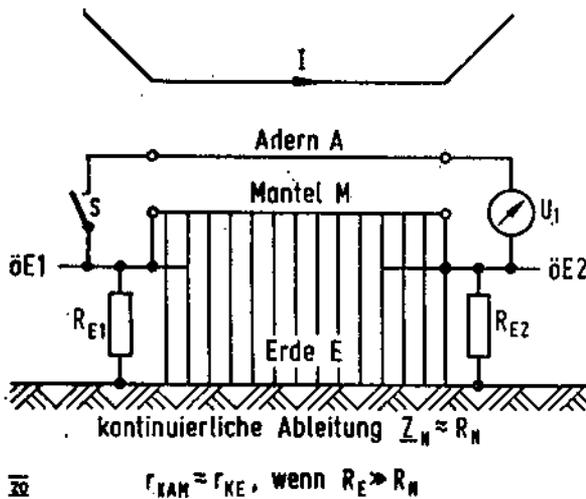


Bild 20: Mantel kontinuierlich geerdet mit zusätzlichen Erdungswiderständen an den Enden

7.3. Meßtechnische Behandlung

Der Kabelmantelreduktionsfaktor nach Gleichung (50) läßt sich mit einer Reduktionsfaktormessbrücke gemäß VDE 0472/6.65 § 507 im Labor messen. Die Meßergebnisse sind in Tafel 14.2 für verschiedene Kabeltypen und Frequenzen zusammengestellt. Sie haben in der Praxis aber nur eingeschränkte Bedeutung. Die Reduktionsfaktorwerte nach Tafel 14.2 gelten immer dort, wo die Erdungswiderstände an den Enden des Kabelmantels vernachlässigbar klein und keine zusätzlichen Kompensationsleiter in der Umgebung vorhanden sind.

Da diese Annahmen in der Regel nicht zutreffen, muß der Einfluß der Umgebung auf den Kabelmantelreduktionsfaktor in geeigneter Weise berücksichtigt werden. Die folgenden Betrachtungen gehen dabei von einem Reduktionsfaktor nach Gleichung (51) aus.

Die bekannten und unbekanntenen Kompensationsleiter in der Nachbarschaft eines verlegten Fernmeldekabels lassen sich zu einem fiktiven resultierenden Kompensationsleiter (Bild 21) zusammenfassen, dem folgende Eigenschaften unterstellt werden:

- Der Kompensationsleiter verläuft ganz dicht am Kabelmantel und ist mit diesem gemeinsam geerdet, d. h.

$$Z_{01} = Z_{02} = Z_{03}$$

und

$$Z_{12} = Z_{13} = Z_{23}$$

- Die Erdkreisinduktivität L_x ist genauso groß wie die des Kabelmantels.

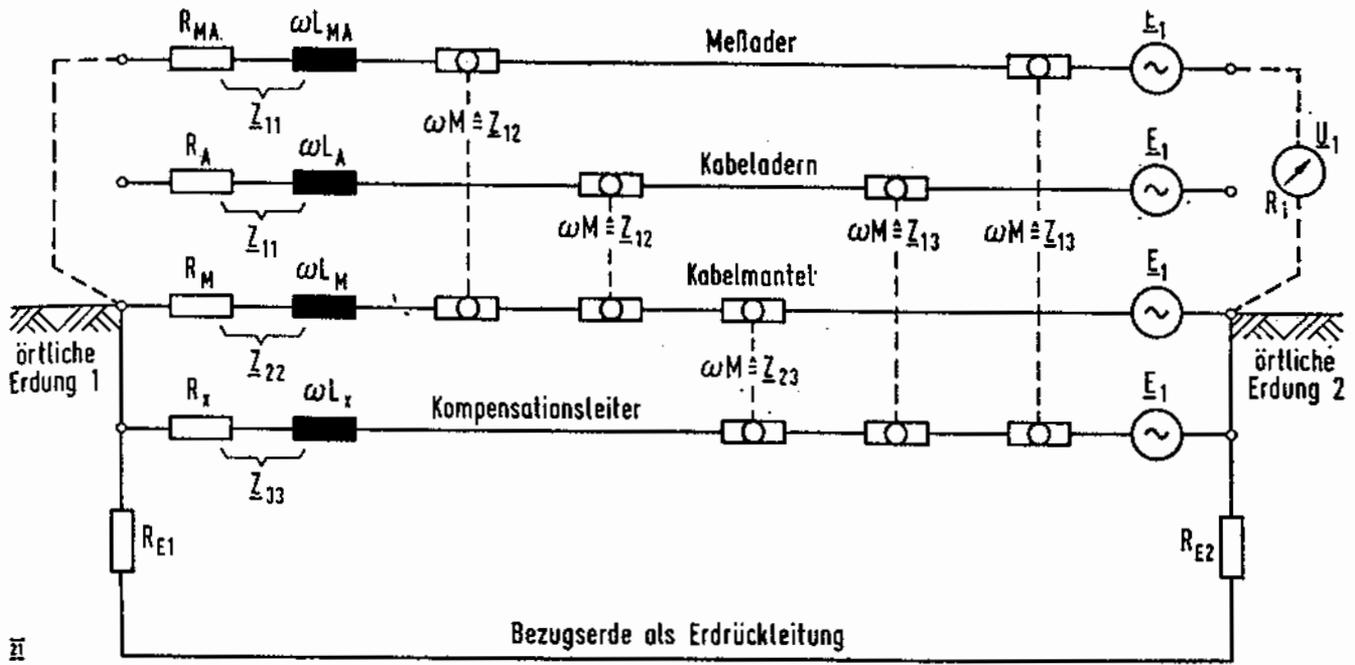
$$L_x = L_M = L_0$$

Der Ersatzschaltplan für die Beeinflussung eines Fernmeldekabels mit fiktivem resultierendem Kompensationsleiter ist in Bild 21 dargestellt. Dabei wurde der Einfluß der induzierenden Starkstromleitung durch die Spannungsquelle $E_1 = I Z_{01}$ berücksichtigt.

Der resultierende Reduktionsfaktor r errechnet sich unter Voraussetzung der Ersatzschaltung in Bild 14 a unter Beachtung von Punkt 4.3 zu

$$r = \frac{U_1}{E_1} = \frac{\frac{R_M R_X}{R_M + R_X}}{\frac{R_M R_X}{R_M + R_X} + R_E + j \omega L_0} \quad (52)$$

Damit läßt sich die Ersatzschaltung nach Bild 21 vereinfachen (Bild 22).



- E_1 ... die durch die Starkstromanlage induzierte Spannung
- \underline{U}_1 ... die Meßspannung zwischen Ader und örtlicher Erdung
- R ... ohmsche Widerstände der Leiter und der Erdungsanlage
- R_i ... Innenwiderstand des Meßgerätes
- L ... Erdkreis-Induktivitäten
- M ... magnetische Kopplung zwischen den Leitern

Bild 21: Ersatzschaltplan des Fernmeldekabels mit Kompensationsleiter bei Starkstrombeeinflussung

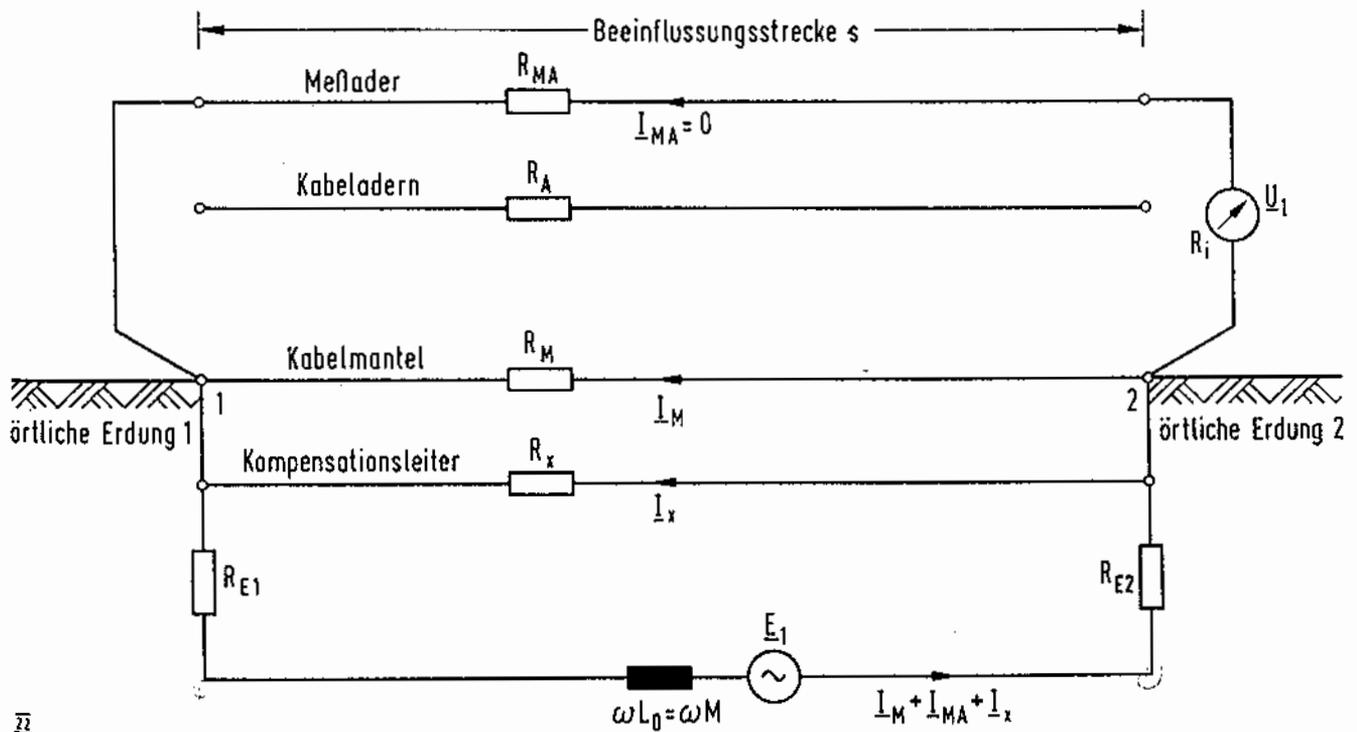


Bild 22: Vereinfachter Ersatzschaltplan des Fernmeldekabels mit Kompensationsleiter bei Starkstrombeeinflussung

Aus Bild 22 erhält man für die zwischen Ader und Mantel gemessene Beeinflussungsspannung

$$\underline{U}_1 = \underline{I}_M R_M \quad (53)$$

Sie ist gleich dem Spannungsfall des Mantelstromes \underline{I}_M am Gleichstromwiderstand R_M des Mantels.

Der Reduktionsfaktor der Kabelhülle beträgt bei Abwesenheit des Kompensationsleiters ($R_x = \infty$) entsprechend Gleichung (41)

$$r_K = \frac{\underline{U}_1}{\underline{E}_1} = \frac{R_M}{R_M + R_E + j \omega L_0}$$

In Übereinstimmung mit Gleichung (46) ergibt sich der Betrag zu

$$r_K = \frac{U_1}{E_1} = \frac{1}{\sqrt{(1 + R_E G_M)^2 + X_0^2 G_M^2}} \quad (54)$$

mit $G_M = \frac{1}{R_M}$ und $X_0 = \omega L_0$

Bei wirksamem Kompensationsleiter x errechnet sich der Betrag des resultierenden Reduktionsfaktors nach Gleichung (52) zu

$$r = \frac{U_1}{E_1} = \frac{1}{\sqrt{[1 + R_E (G_M + G_x)]^2 + X_0^2 (G_M + G_x)^2}} \quad (55)$$

Dabei stellt der Ausdruck

$$G_U = G_M + G_x \quad (56)$$

den (fiktiven) Leitwert des Fernmeldekabelmantels in der Umgebung zusätzlicher Kompensationsleiter dar.

Werden dem Kabelmantel Fernmeldeadern parallelgeschaltet (Leitwert G_A), so ist (unter der Voraussetzung $L_A = L_0$)

$$r = \frac{U_1}{E_1} = \frac{1}{\sqrt{[1 + R_E (G_M + G_x + G_A)]^2 + X_0^2 (G_M + G_x + G_A)^2}} \quad (57)$$

Der resultierende Reduktionsfaktor läßt sich also auf einfache Weise durch Addition der einzelnen ohmschen Parallel-Leitwerte bestimmen.

Der Leitwert G_x (oder Widerstandswert R_x) der kompensierenden Leiter gilt für die gesamte Beeinflussungsstrecke s wie sie in Bild 22 eingezeichnet ist, unabhängig davon, ob die tatsächlich vorhandenen Kompensationsleiter wirklich über die gesamte Strecke s geführt sind oder nur auf Teilstrecken vorhanden sind oder nur die Fernmeldeanlage kreuzen. In jedem Fall wird durch die Messung (siehe Punkt 9.2) ein wirksamer Summenwert für G_x ermittelt, der der weiteren Rechnung zugrunde zu legen ist. Selbst Abweichungen im Wert des angenommenen spezifischen Bodenwiderstandes und der damit veränderten Erdkreisinduktivität L_0 drücken sich durch den Leitwert G_x aus. In Sonderfällen kann der Leitwert sogar negativ werden, nämlich dann, wenn der spezifische Bodenwiderstand wesentlich kleiner als angenommen ist.

8. Zusammenfassen von Reduktionsfaktoren

Bei Anwesenheit mehrerer Kompensationsleiter muß der Gesamtreduktionsfaktor nach Gleichung (13) bestimmt werden. Dieses Verfahren ist jedoch recht aufwendig, so daß man sich in der Praxis mit den folgenden Näherungslösungen begnügt.

Die Näherungsverfahren liefern im allgemeinen unterschiedliche Ergebnisse.

8.1. Multiplikationsmethode

Die nach Gleichung (5) ermittelten Einzelreduktionsfaktoren der Kompensationsleiter werden durch Multiplikation zu einem Gesamtreduktionsfaktor zusammengefaßt.

$$r = r_1 \cdot r_2 \cdot r_3 \dots \quad (58)$$

8.2. Leitwertadditionsmethode

Die Einzelreduktionsfaktoren der Kompensationsleiter nach Gleichung (5) lassen sich in (fiktive), dem Kabelmantel parallelgeschaltete Leitwerte (Bild 22) umwandeln. Der aus den Einzelleitwerten gebildete Gesamtleitwert ist dann wieder in einen äquivalenten Reduktionsfaktor umzurechnen.

$$\begin{array}{r}
 \text{Gleichung (60)} \\
 r_1 \longrightarrow G_1 \\
 r_2 \longrightarrow G_2 \\
 r_3 \longrightarrow G_3 \\
 \cdot \qquad \qquad \cdot \\
 \cdot \qquad \qquad \cdot \\
 \cdot \qquad \qquad \cdot \\
 \hline
 \text{Gleichung (59)} \\
 r \longleftarrow G = G_1 + G_2 + G_3 + \dots
 \end{array}$$

Für die Umwandlung von Reduktionsfaktoren in Leitwerte und umgekehrt sollen die aufgeführten Diagramme 13.1 und 13.2 (für 50 Hz) sowie 13.3 und 13.4 (für 16 2/3 Hz) herangezogen werden. Dabei sind die verschiedenen Größen auf eine Längeneinheit von 1 km zu beziehen. Der Erdungswiderstand R_E ist dann aus mathematischen Gründen ebenfalls durch die Länge s der Beeinflussungsstrecke zu dividieren.

Die Umrechnung kann auch über die Gleichungen (59) und (60) erfolgen.

$$G \rightarrow r \quad r = \frac{1}{\sqrt{(1 + R_E G)^2 + X_0^2 G^2}} \quad (59)$$

$$r \rightarrow G \quad G = \frac{\sqrt{(1 - r^2) X_0^2 + R_E^2} - r R_E}{(R_E^2 + X_0^2) r} \quad (60)$$

Es wird empfohlen, den Gesamtreduktionsfaktor r für den ungünstigsten Fall ($R_E = 0$) zu bestimmen.

Liegt ein Beeinflussungsfall mit zwei Kompensationsleitern vor, so erhält man nach der Multiplikations- und Leitwertadditionsmethode

für $R_E = 0$ nur dann ein übereinstimmendes Ergebnis, wenn

$$\frac{1}{\sqrt{1 + X_0^2 (G_1 + G_2)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + X_0^2 G_1^2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + X_0^2 G_2^2}}$$

ist, d. h.:

$$G_1 G_2 = 2 X_0^{-2} \quad \text{oder} \quad (61)$$

$$R_1 R_2 = \frac{1}{2} X_0^2$$

1. Fall: $G_1 G_2 < 2 X_0^{-2}$

In diesem Fall wird bei Anwendung der Gleichung (58) der resultierende Reduktionsfaktor zu groß bestimmt, d. h. das Ergebnis liegt auf der sicheren Seite. Dies ist bei großen Einzelreduktionsfaktoren zu erwarten ($r_i \approx 0,8$ bis 1).

2. Fall: $G_1 G_2 > 2 X_0^{-2}$

In diesem Fall wird bei Anwendung der Gleichung (58) der Gesamtreduktionsfaktor zu klein bestimmt, d. h. das Ergebnis liegt auf der unsicheren Seite. Dies ist bei kleinen Einzelreduktionsfaktoren zu erwarten ($r_i < 0,3$).

8.3. Kehrwertadditionsmethode

Die nach Gleichung (5) bestimmten Einzelreduktionsfaktoren werden gemäß Gleichung (62) zu einem Gesamtreduktionsfaktor zusammengefaßt.

$$r = \frac{1}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} + \dots} \quad (62)$$

Das Kehrwertadditionsverfahren liefert praktisch nur bei kleinen Einzelreduktionsfaktoren ($r_i < 0,3$) ein mit dem Leitwertadditionsverfahren übereinstimmendes und damit genügend genaues Ergebnis (siehe Gleichung (64)).

Bei einem Beeinflussungsfall mit zwei Kompensationsleitern, deren Einzelreduktionsfaktoren in der gleichen Größenordnung liegen, gilt für den ungünstigsten Fall ($R_E = 0$).

$$r = \frac{1}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}} \approx \frac{1}{\left| \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right|} = \frac{1}{|1 + j X_0 G_1 + 1 + j X_0 G_2|}$$

$$r \approx \frac{1}{\sqrt{1 + 3 + X_0^2 (G_1 + G_2)^2}}$$

Im Vergleich dazu liefert das Leitwertadditionsverfahren

$$r = \frac{1}{\sqrt{1 + X_0^2 (G_1 + G_2)^2}}$$

Für $X_0^2 (G_1 + G_2)^2 \gg 3$

oder $G_1 + G_2 \gg \frac{\sqrt{3}}{X_0} \quad (63)$

stimmen beide Lösungen näherungsweise überein.

Bei $G_1 \approx G_2$ ergibt sich somit die Bedingung

$$r_1 \approx r_2 \ll \frac{1}{\sqrt{1 + X_0^2 \left(\frac{\sqrt{3}}{2} X_0\right)^2}}$$

$$r_1 \approx r_2 \ll \frac{1}{\sqrt{1 + 0,75}} = 0,756 \quad (64)$$

9. Messung der Schutzwirkung von Kompensationsleitern

9.1. Messungen an Kabelmustern im Labor

Labormessungen zur Bestimmung des Reduktionsfaktors eines metallenen Kabelmantels können mit Hilfe eines Reduktionsfaktormessgerätes durchgeführt werden (siehe Punkt 7.3).

9.2. Messung unbekannter Parallel-Leitwerte bei ausgelegten Kabeln

Der fiktive Leitwert G_U eines Fernmeldekabelmantels in der Umgebung unbekannter Kompensationsleiter (siehe Punkt 7.3) läßt sich durch zweimaliges Messen der Beeinflussungsspannung bestimmen. Gleichung (55) enthält neben G_U als zweite Unbekannte die im allgemeinen nicht meßbare Spannung E_1 . Zur Lösung ist daher eine zweite Gleichung erforderlich. Diese erhält man gemäß Gleichung (57) dadurch, daß dem unbekanntem Leitwert G_U ein bekannter Leitwert G_A parallelgeschaltet wird.

Aus den beiden Gleichungen

$$E_1 = U_1 \sqrt{(1 + R_E G_U)^2 + X_0^2 G_U^2} \quad (65)$$

und

$$E_1 = U_{11} \sqrt{[1 + R_E (G_U + G_A)]^2 + X_0^2 (G_U + G_A)^2} \quad (66)$$

ergibt sich G_U zu

$$G_U = \frac{G_A}{k} - \frac{R_E}{Z^2} + \sqrt{\frac{n^2}{k^2} G_A^2 - \frac{X_0^2}{Z^4}} \quad (67)$$

Zur Vereinfachung ist gesetzt

$$n = \frac{U_1}{U_{11}}, \quad k = n^2 - 1, \quad Z^2 = R_E^2 + X_0^2$$

Das Meßergebnis ist abhängig von der Größe des parallelgeschalteten Leitwertes G_A .

Der Leitwert G_U enthält die in die Kompensationswirkung eingehenden, rechnerisch nur näherungsweise bestimmbar Parameter (Bodenleitfähigkeit, Abweichungen von der einheitlich angesetzten Erdkreisinduktivität usw.) und damit die möglichen Reduktionsfaktoren der Umgebung einschließlich des Reduktionsfaktors des eigenen metallenen Kabelmantels. Der in der Umgebung der Kabeltrasse vorkommende Reduktionsfaktor r_U kann nach Gleichung (59) mit $G = G_U$ ermittelt werden.

9.3. Messungen an Anlagen im Gelände

An bereits vorhandenen oder für weitere hinzukommende Fernmeldekabel sollen die Parameter ermittelt werden, die für die Bemessung der erforderlichen Reduktionsfaktoren benötigt werden.

9.3.1. Benutzung von freien Kabeladern

Bild 23 zeigt den Schaltungsaufbau, wenn die Adern des vorhandenen Kabels als bekannter Parallel-Leitwert verwendet werden.

Innerhalb der Meßstrecke mit der Länge s zwischen zwei Schaltpunkten (Vermittlungsstelle, Kabelverzweigung usw.) werden alle für die Messung zur Verfügung stehenden freien Adern des Fernmeldekabels an beiden Enden parallel geschaltet. Die Verbindungen müssen elektrisch einwandfrei hergestellt sein (z.B. durch Löten). Die parallel geschalteten Adern sind mit einer mindestens querschnittgleichen Verbindungsleitung zu versehen, mit der sie an die örtliche Erdung, oder wenn möglich, direkt an den Kabelmantel angeschlossen werden können. Zum Beispiel ergibt sich bei 25 Doppeladern mit 0,8 mm Durchmesser entsprechend 0,5 mm² ein erforderlicher Gesamtquerschnitt von $A = 2 \cdot 25 \cdot 0,5 = 25 \text{ mm}^2$. Die parallel geschalteten Adern dürfen zunächst nur an einer Seite mit der örtlichen Erdung verbunden werden, um den Spannungswert U_1 messen zu können. Die Spannung U_{11} ist meßbar nach beiderseitigem Anlegen der parallel geschalteten Adern an die örtliche Erdung. Die Meßader liegt einseitig an der örtlichen Erdung, an der anderen Seite wird ein hochohmiger Spannungsmesser gegen Erde eingeschaltet.

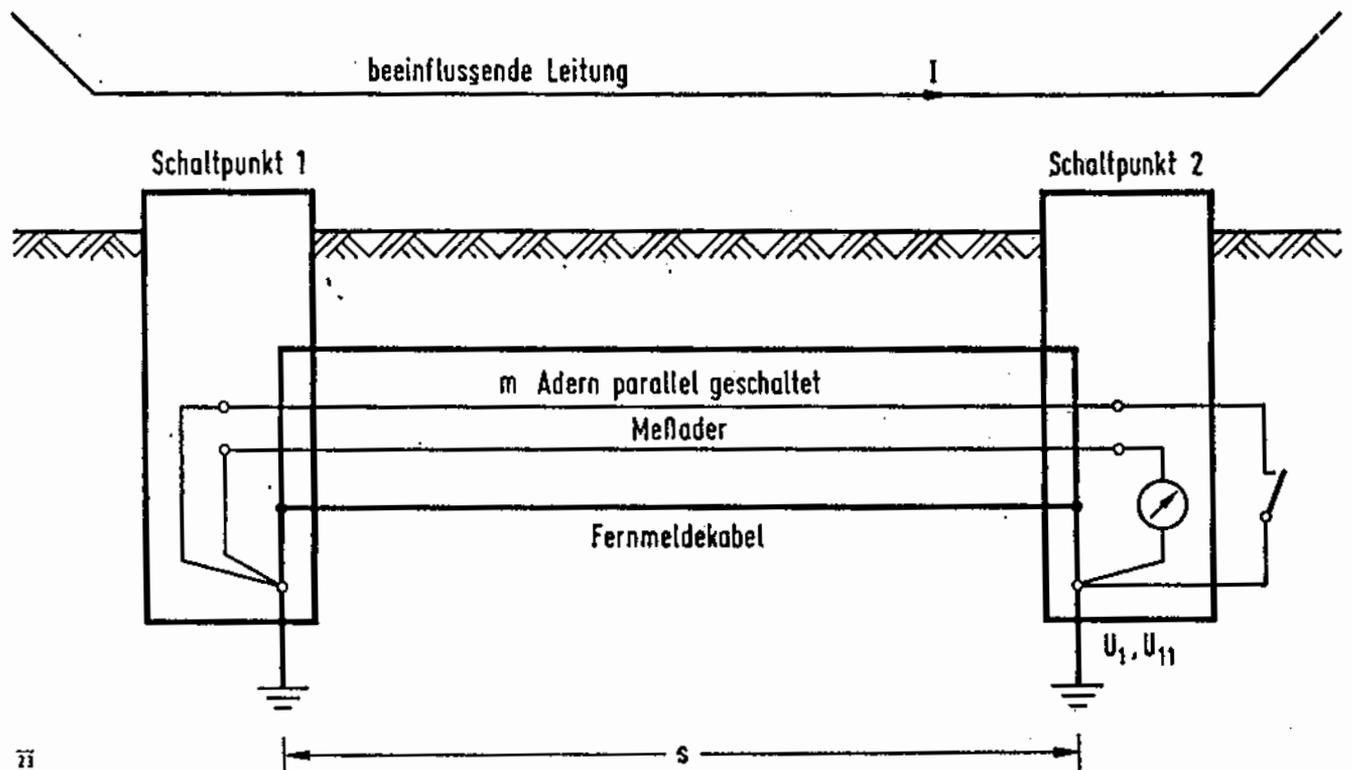


Bild 23: Schaltungsaufbau zur Bestimmung des unbekanntes Leitwertes G_U

9.3.2. Benutzung eines Hilfskabels für die beeinflusste Leitung

Stehen keine freien Adern in den betreffenden Kabeln zur Verfügung, so kann ein Hilfskabel (Einleiterkabel) mit bekanntem Leitwert (etwa $25 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$) über der Kabeltrasse ausgelegt werden.

Sind an der gleichen Strecke Messungen nach 9.3.1 und 9.3.2 möglich, so kann ein Vergleich der Meßwerte von U_{11} einen Aufschluß über die Auswirkung der verschiedenen Abstände der Hilfsleiter zum Kabelmantel und damit der unterschiedlichen Kreisinduktivitäten liefern.

9.3.3. Benutzung eines Hilfskabels für die beeinflussende Leitung

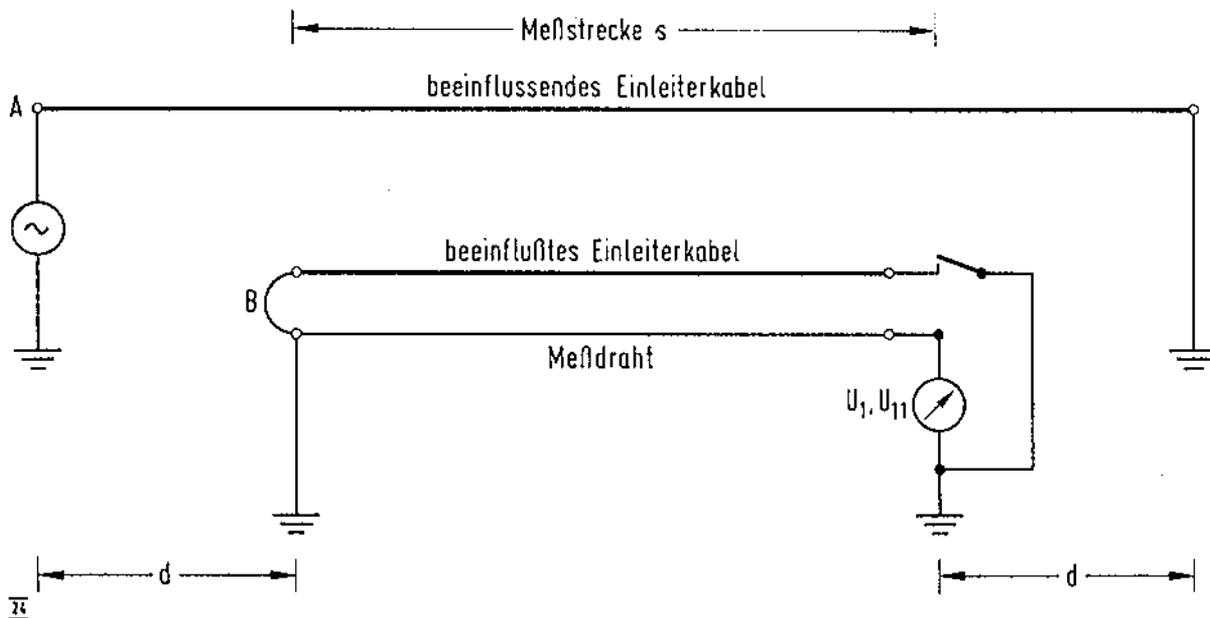
Die beeinflussende Leitung mit dem Strom I wird in der Regel eine Starkstromleitung des EVU oder eine Fahrleitung der DB sein. Ist es nicht möglich, die Hochspannungsleitung für Meßzwecke abzuschalten, genügt es, wenn die Beeinflussung über ein ausgelegtes Einleiterkabel erfolgt. Die Einspeisung kann über eine Netzersatzanlage (Hilfsstromquelle) oder über einen Trenntransformator vom Niederspannungsnetz aus erfolgen. Dieses beeinflussende Kabel sollte etwa der Trasse der Hochspannungsleitung folgen und zu beiden Enden mindestens 150 m über die Meßstrecke s hinausgehen. Die Spannungswerte sind mit dem

Stromfaktor $v_i = \frac{I}{I_{\text{mess}}}$ zu multiplizieren.

9.4. Vorausmessungen für geplante Anlagen

In Fällen, in denen ein Fernmeldekabel erst ausgelegt werden soll und Beeinflussungen und Fremdanlagen in der projektierten Trasse zu erwarten sind, verfährt man entsprechend Bild 24 wie folgt:

- In der Trasse der beeinflussenden Leitung wird für die Dauer der Messung ein Einleiterkabel, das an beiden Enden über die vorgesehene Meßstrecke hinausgeht und an geeigneten Punkten an Erdungsanlagen mit niedrigem Erdungswiderstand angeschlossen werden soll, ausgelegt. In diesen Kreis wird mit einer Hilfsstromquelle der beeinflussende Strom eingespeist.
- In der Trasse der beeinflussten Leitung wird ebenfalls ein Einleiterkabel mit einem Querschnitt wie unter 9.3.2 und dazu parallel ein Meßdraht verlegt. Das Messen der Spannungen U_1 und U_{11} erfolgt wie unter 9.3.2 und 9.3.3.



- A ... Trasse der beeinflussenden Leitung
B ... Trasse der beeinflussten Leitung
d ... Abstand der Erdungsanlagen (mindestens so groß, daß die Potentiale der Spannungstrichter auf unbedeutende Werte abgeklungen sind)

Bild 24: Schaltungsaufbau zur Bestimmung des unbekanntes Leitwertes G_U für geplante Anlagen

10. Berücksichtigung der magnetisch wirksamen Bewehrung

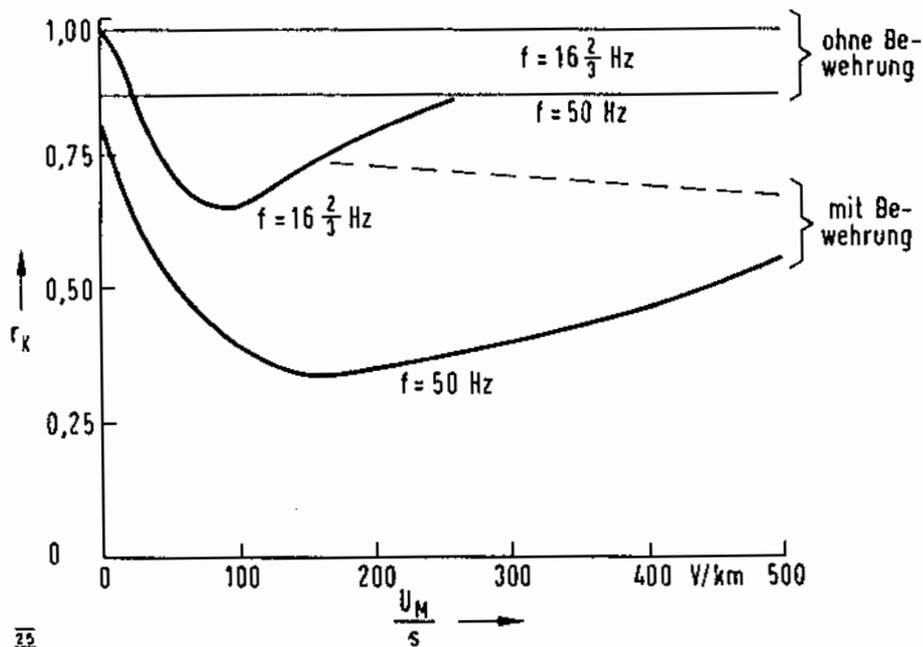
10.1. Allgemeine Betrachtungen

Für eisenbewehrte Fernmeldekabel gelten grundsätzlich die Ausführungen aus Punkt 7.1. Der Kabelmantelreduktionsfaktor ist abhängig von der Meßschaltung für die Beeinflussungsspannung U_1 und berechnet sich nach den Gleichungen (46) bis (49). Eisenbewehrte Kabel haben gegenüber unbewehrten Kabeln einen etwas kleineren Mantelgleichstromwiderstand R_M und eine größere Induktivität der Schleife Kabelmantel-Erde:

$$L_M = L_o + L_{Fe}$$

- L_o ... Induktivität der Schleife Kabelmantel (unbewehrt) – Erde
 L_{Fe} ... zusätzliche Induktivität durch den Einfluß der magnetisch wirksamen Bewehrung (abhängig vom Mantelstrom I_M)

Somit ist der Kabelmantelreduktionsfaktor eisenbewehrter Fernmeldekabel immer günstiger (kleiner) als der unbewehrter Kabel. Wird bei Beeinflussungsrechnungen der Einfluß der magnetisch wirksamen Bewehrung vernachlässigt, so erhält man für den Reduktionsfaktor zu große Werte, womit das Ergebnis auf der sicheren Seite liegt.



Kabeldaten: Durchmesser unter Mantel 35 mm; Bleidicke 1,7 mm, Bewehrung $2 \times 0,5$ mm Stahlband

Bild 25: Reduktionsfaktor eines Kabels als Funktion der in der Schleife Kabelmantel-Erde induzierten, auf die Längeneinheit bezogenen, Spannung

Der Verlauf des Mantelreduktionsfaktors eisenbewehrter Kabel in Abhängigkeit von der in der Schleife Kabelmantel-Erdrückleitung induzierten Längsspannung (Bild 25) kann mit einer Reduktionsfaktormessbrücke nach VDE 0472/6.65 § 507 im Labor gemessen werden. Die Meßergebnisse für verschiedene Kabeltypen und Frequenzen sind in Tafel 14.2 zusammengestellt.

Bezugnehmend auf Punkt 7 ist in Bild 26 das bei der Reduktionsfaktormessung gültige Ersatzschaltbild der Kabelmantel-Erdschleife angegeben.

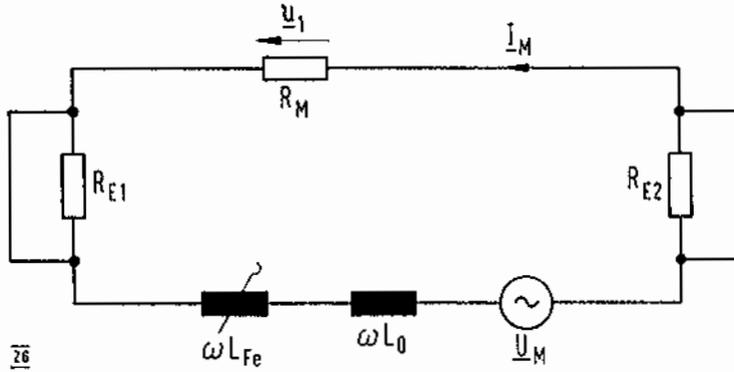


Bild 26: Ersatzschaltbild der Schleife Kabelmantel-Erde bei der Messung des Reduktionsfaktors eines eisenbewehrten Kabels nach VDE 0472/6.65, § 507

\underline{U}_M ... induzierte Kabelmantellängsspannung im Beeinflussungsfall

(In Bild 26 ist $\underline{U}_M = \underline{E}_1$, in TE 1 wird $\frac{\underline{U}_M}{s}$ mit \underline{E}_m bezeichnet)

Für den Reduktionsfaktor eines eisenbewehrten Kabels ergibt sich somit nach Gleichung (50)

$$r_K = \frac{U_1}{U_M} = \frac{R_M}{\sqrt{R_M^2 + \omega^2 (L_0 + L_{Fe})^2}} \quad (69)$$

Die Eiseninduktivität L_{Fe} kann aus den nach VDE 0472 gemessenen Reduktionsfaktorwerten und den bekannten Kabeldaten errechnet werden.

Die für die Magnetisierung des Bewehrungsseisens und damit auch für den Verlauf der Reduktionsfaktorkurve maßgebliche Größe ist der Mantelstrom \underline{I}_M und nicht die induzierte Mantelspannung $\frac{\underline{U}_M}{s}$. Ausschlaggebend für die Darstellung nach

Bild 25 waren meßtechnische Gründe. Eine Umrechnung von Mantelspannungen in äquivalente Mantelströme kann durch die folgende Beziehung vorgenommen werden:

$$\underline{U}_1 = \underline{I}_M R_M = \underline{U}_M r_K$$

$$\left| \underline{I}_M \right| = \left| \frac{\underline{U}_M r_K}{R_M} \right| \quad (70)$$

Für das Kabel nach Bild 25 ergibt sich die in Bild 27 dargestellte Kurve.

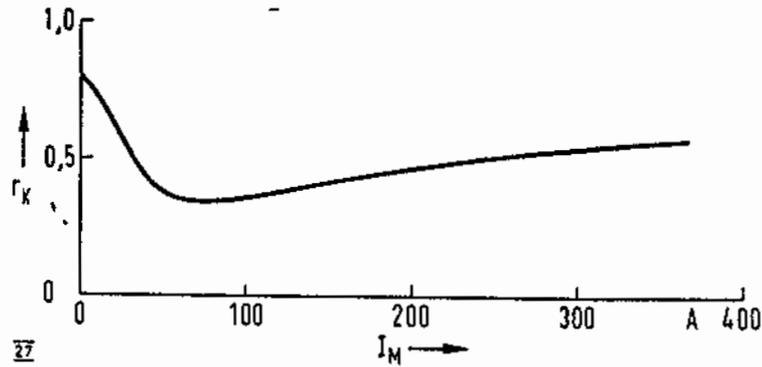


Bild 27: Der Reduktionsfaktor r_k des Kabels nach Bild 25 in Abhängigkeit vom Mantelstrom I_M bei $f = 50$ Hz

Die Kurve $r_k = f(I_M)$ gilt unabhängig von den äußeren Bedingungen wie z. B. den Erdungswiderständen an den Enden des beeinflussten Kabels und der Anwesenheit weiterer benachbarter Kompensationsleiter.

10.2. Berücksichtigung der magnetischen Bewehrung bei einem Kompensationsleiterbündel

Auszugehen ist von einem Ersatzschaltplan, welcher demjenigen nach Bild 21 entspricht.

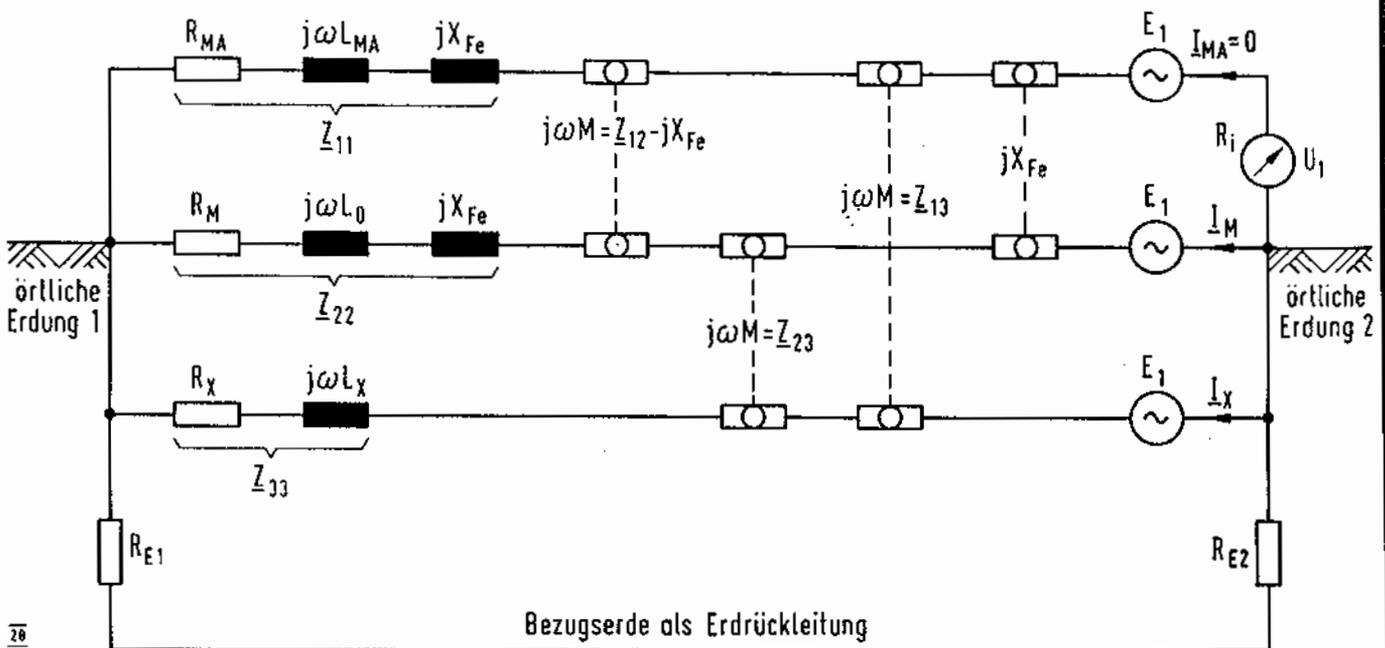


Bild 28: Ersatzschaltplan des Fernmeldekabels mit magnetischer Bewehrung und Kompensationsleiter bei Starkstrombeeinflussung

Unter den in Punkt 7.1 bzw. 7.3 getroffenen Vereinbarungen

$$\omega L_o = \omega M$$

und

$$\omega L_x = \omega M$$

sowie bei Vernachlässigung der Erdungswiderstände R_{E1} und R_{E2} liefern die Maschengleichungen für die Leiter 2 und 3

$$\underline{I}_M [R_M + j(\omega M + X_{Fe})] + \underline{I}_X j\omega M = \underline{E}_1$$

und
$$\underline{I}_M j\omega M + \underline{I}_X (R_X + j\omega M) = \underline{E}_1$$

oder nach Zusammenfassung

$$\underline{I}_g j\omega M + \underline{I}_M (R_M + jX_{Fe}) = \underline{E}_1 \quad (71)$$

$$\underline{I}_g j\omega M + \underline{I}_X R_X = \underline{E}_1 \quad (72)$$

mit

$$\underline{I}_g = \underline{I}_M + \underline{I}_X \quad (73)$$

Diesen Bedingungen genügt der Ersatzschaltplan nach Bild 29.

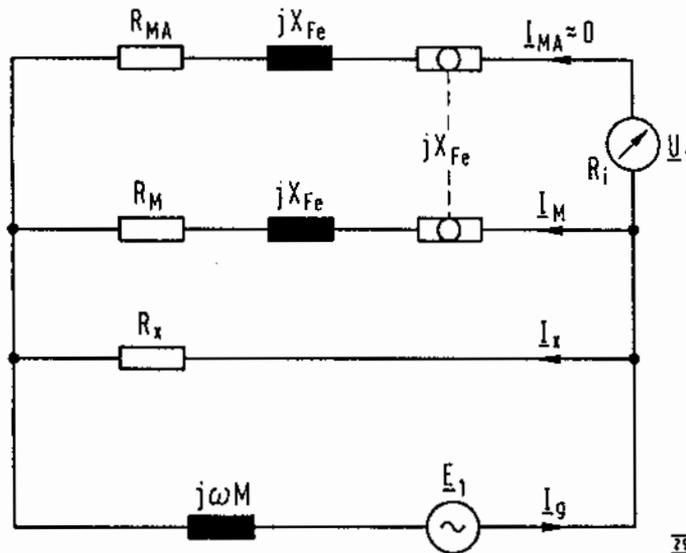


Bild 29: Vereinfachter Ersatzschaltplan des Fernmeldekabels mit magnetischer Bewehrung

Die Beeinflussungsspannung \underline{U}_1 berechnet sich aus Bild 29 in Übereinstimmung mit Gleichung (53) zu

$$\underline{U}_1 = \underline{I}_M (R_M + j X_{Fe}) - \underline{I}_M j X_{Fe}$$

$$\underline{U}_1 = \underline{I}_M R_M$$

Es sei $\underline{Z}_F = R_M + j X_{Fe}$

Aus Bild 29 lassen sich zwei Gleichungen mit den Variablen \underline{Z}_F und \underline{I}_g ableiten.

$$\underline{I}_M \underline{Z}_F = E_1 - \underline{I}_g j \omega M$$

$$\frac{\underline{I}_g}{\underline{I}_M} = \frac{G_X + \frac{1}{\underline{Z}_F}}{\frac{1}{\underline{Z}_F}}$$

Nach \underline{Z}_F aufgelöst ergibt sich

$$\underline{Z}_F = \frac{\frac{E_1}{\underline{I}_M} - j \omega M}{1 + j \omega M G_X} \quad (74)$$

Der komplexe Wert des Kabelmantelreduktionsfaktors berechnet sich nach Bild 26 mit $X_0 = \omega L_0$ zu

$$r_K = \frac{R_M}{\underline{Z}_F + j X_0} \quad (75)$$

Zusammen mit der Gleichung (70)

$$\underline{I}_M = \frac{\underline{U}_M r_K}{R_M}$$

bilden die Gleichungen (74) und (75) ein Gleichungssystem mit den drei Variablen \underline{I}_M , \underline{Z}_F und r_K .

Nach r_K aufgelöst erhält man

$$r_K = \frac{\frac{E_1 R_M}{\underline{U}_M} - R_M - j \omega M G_X R_M}{X_0 \omega M G_X - j (X_0 - \omega M)} \quad (76)$$

Mit den Beziehungen

$$\frac{E_1 R_M}{U_M} = \frac{E_1 R_M}{U_M} e^{j\alpha}$$

$$\frac{E_1 R_M}{s} = A$$

$r_K = r_K e^{-j\varphi}$, mit $\varphi = \arccos r_K$ und

$$X_0 \omega M G_X - j (X_0 - \omega M) = N e^{j\nu}$$

erhält man

$$r_K e^{-j\varphi} = \frac{\frac{A}{\frac{U_M}{s}} \cos \alpha - R_M + j \left(\frac{A}{\frac{U_M}{s}} \sin \alpha - \omega M G_X R_M \right)}{N e^{j\nu}} \quad (76a)$$

oder

$$\frac{r_K N \cos (\nu - \varphi) + R_M}{\frac{A}{\frac{U_M}{s}}} + j \frac{r_K N \sin (\nu - \varphi) + \omega M G_X R_M}{\frac{A}{\frac{U_M}{s}}} = \cos \alpha + j \sin \alpha$$

oder

$$\sqrt{\left(\frac{r_K N \cos (\nu - \varphi) + R_M}{\frac{A}{\frac{U_M}{s}}} \right)^2 + \left(\frac{r_K N \sin (\nu - \varphi) + \omega M G_X R_M}{\frac{A}{\frac{U_M}{s}}} \right)^2} = 1 \quad (77)$$

Unter den Bedingungen von Bild 21 ($\omega M = X_0$) vereinfacht sich die Gleichung (77) zu

$$\sqrt{\left[\frac{r_K^2 X_0^2 G_X + R_M}{\left(\frac{E_1 R_M}{U_M} \right)} \right]^2 + \left[\frac{X_0 G_X R_M - X_0^2 G_X r_K \sqrt{1 - r_K^2}}{\left(\frac{E_1 R_M}{U_M} \right)} \right]^2} = 1$$

Nach $\left(\frac{U_M}{s}\right)$ aufgelöst erhält man

$$\frac{U_M}{s} = \frac{E_1 R_M}{s \sqrt{[r_K^2 X_0^2 G_X + R_M]^2 + [X_0 G_X R_M - X_0^2 G_X r_K \cdot \sqrt{1 - r_K^2}]^2}} \quad (77 a)$$

Für angenommene Werte von r_K wird $\left(\frac{U_M}{s}\right)$ nach Gleichung (77 a) berechnet, in Form einer Wertetabelle erfaßt und graphisch dargestellt:

$$r_K = f_1 \left(\frac{U_M}{s} \right)$$

Diese Funktion erfüllt die Bedingungen des Ersatzschaltplanes nach Bild 29.

Daneben wird der Kabelmantelreduktionsfaktor durch die nach VDE 0472 gemessene Reduktionsfaktorkurve vorgegeben:

$$r_K = f_2 \left(\frac{U_M}{s} \right) \quad (\text{nach Tafel 14.2})$$

Der Schnittpunkt beider Funktionen liefert das zur Reduktionsfaktorbestimmung benötigte Wertepaar r_K^* , $\left(\frac{U_M}{s}\right)^*$.

Der resultierende Reduktionsfaktor entsprechend Gleichung (13) ist dann:

$$r = \frac{r_K^* \left(\frac{U_M}{s}\right)^* s}{E_1} \quad (78)$$

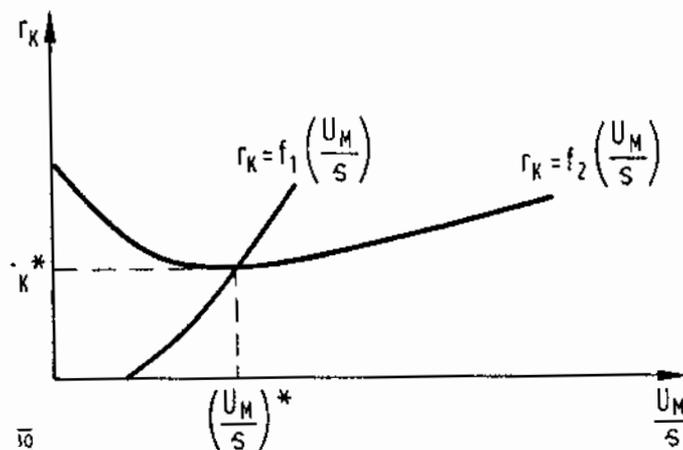


Bild 30: Graphische Bestimmung des Reduktionsfaktors bei magnetisch wirksamer Bewehrung

10.3. Der Reduktionsfaktor bei Verwendung eines Kabels mit magnetisch wirksamer Bewehrung im allgemeinen Fall

Die nach VDE 0472 ermittelten Reduktionsfaktorkurven für Kabel mit magnetisch wirksamer Bewehrung können in der Praxis nicht ohne weiteres zur Reduktionsfaktorbestimmung herangezogen werden, da sie ihren Verlauf durch den Einfluß von

- Mantelerdungswiderständen an den Enden der Beeinflussungsstrecke (Bild 31),
- metallenen Anlagen in der Umgebung des Kabels und
- Adern, die durch Überspannungsableiter dem Kabelmantel parallelgeschaltet werden

ganz wesentlich verändern.

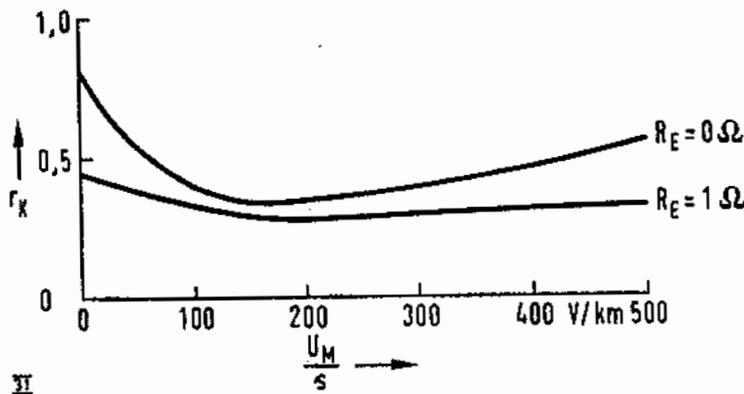


Bild 31: Veränderung des Reduktionsfaktors gemäß Gleichung (51) eines Kabels durch die Erdungswiderstände (Kabeldaten wie in Bild 25 angegeben, Beeinflussungslänge $s = 1 \text{ km}$, $f = 50 \text{ Hz}$)

Die Vorgehensweise bei der Berechnung der den Umgebungsverhältnissen angepaßten Reduktionsfaktorkurve wird anhand des Beeinflussungsfalles nach Bild 21 erläutert.

Wird dort ein eisenbewehrtes Kabel verwendet, so verändern sich die Impedanzen Z_{22} und Z_{12} :

$$Z_{22} = R_M + R_E + j(X_0 + X_{Fe}) = f(I_2) = f(I_M)$$

$$Z_{12} = R_E + j(X_0 + X_{Fe}) = f(I_M)$$

Die Gleichung (12) liefert für den resultierenden Reduktionsfaktor

$$r = \frac{\underline{U}_1}{\underline{E}_1} = \frac{\frac{R_M R_X}{R_M + R_X}}{\frac{R_M R_X}{R_M + R_X} + R_E + jX_0 + jX_{Fe}} \left[\frac{R_X + R_E + jX_0}{R_M + R_X} \right]$$

oder als Betrag

$$r = \frac{U_1}{E_1} = \frac{1}{\sqrt{\left[1 + R_E (G_M + G_X) - \frac{X_0 X_{Fe}}{R_M R_X}\right]^2 + \left[X_0 + X_{Fe} \frac{R_X + R_E}{R_M + R_X}\right]^2 (G_M + G_X)^2}} \quad (79a)$$

Der Reduktionsfaktor nach Gleichung (79 a) ist abhängig von der Eiseninduktivität X_{Fe} und kann nicht direkt berechnet werden, da der Wert von X_{Fe} zunächst unbekannt ist.

Deshalb wird der Reduktionsfaktor graphisch ermittelt.

Aus der nach VDE 0472 gemessenen Reduktionsfaktorkurve $r_K = f\left(\frac{U_M}{s}\right)$ (siehe Tafel 14.2) läßt sich über die Gleichungen (69) und (70) die Funktion $X_{Fe} = f(I_M)$ ableiten. Für vorgegebene X_{Fe} -Werte kann dann der Reduktionsfaktor nach Gleichung (79 a) berechnet und als Funktion der Mantelstromstärke I_M angegeben werden.

$$r = f(X_{Fe}) = f_1(I_M)$$

Entsprechend Gleichung (1) und (53) läßt sich der Reduktionsfaktor auch darstellen als

$$r = \frac{U_1}{E_1} = \frac{R_M}{E_1} I_M = f_2(I_M) \quad (79b)$$

Der Schnittpunkt der Funktionen $f_1(I_M)$ und $f_2(I_M)$ ergibt den gesuchten Reduktionsfaktor r (Bild 32).

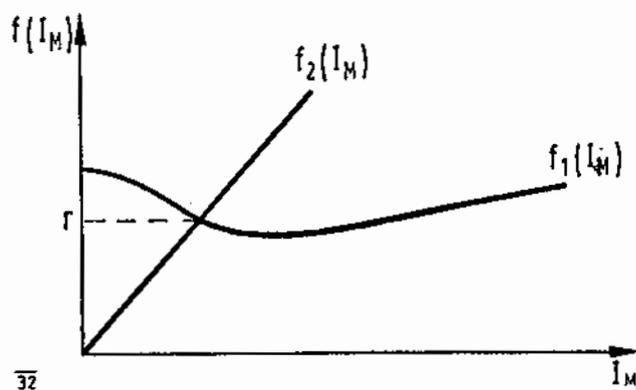


Bild 32: Graphische Bestimmung des Reduktionsfaktors bei Verwendung eines Kabels mit magnetisch wirksamer Bewehrung im Beeinflussungsfall nach Bild 21

Bei der Konstruktion der Funktion $f_1(I_M)$ benutze man folgende Liste:

r_K					} $r_K = f\left(\frac{U_M}{s}\right)$ (aus Tafel 14.2)
$\frac{U_M}{s} \left[\frac{V}{km}\right]$					
$X_{Fe} \text{ } [\Omega]$					} $X_{Fe} = f(I_M)$
$I_M \text{ } [A]$					
$r = f(X_{Fe})$					} $r = f_1(I_M)$

mit
$$X_{Fe} = R_M \sqrt{\left(\frac{1}{r_K}\right)^2 - 1} - X_0$$

$$I_M = \frac{r_K \left(\frac{U_M}{s}\right) s}{R_M}$$

$r = f(X_{Fe})$ nach Gleichung (79 a)

11. Ermittlung des Reduktionsfaktors r_z eines zusätzlich erforderlichen Kompensationsleiters

11.1. Kabel ohne magnetische Bewehrung

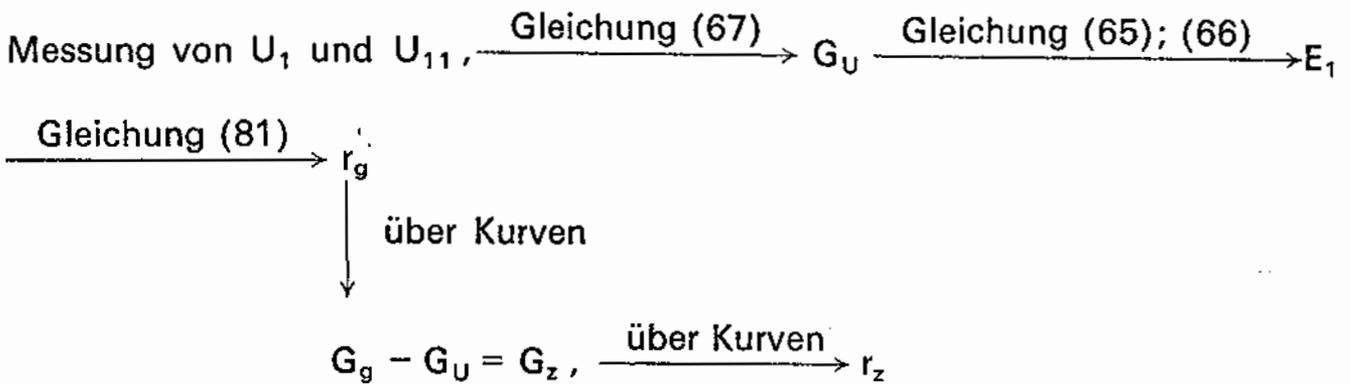
Mit G_U , das nach Punkt 9.2 aus Meßwerten errechnet werden kann, ist die induzierte Spannung E_1 bestimmbar. Der zum Schutz der Fernmeldeanlagen notwendige Gesamt-Reduktionsfaktor ergibt sich aus dem Verhältnis der zulässigen Spannung U_{zul} (z.B. 300 V nach VDE 0228) zur induzierten Spannung E_1 [19].

$$r_g = \frac{U_{zul}}{E_1} \quad (81)$$

Ist r_g kleiner als der gemessene Reduktionsfaktor r_U , der über die Gleichung (55) oder die Diagramme 13.1 bis 13.4 aus G_U berechnet werden kann, so muß ein zusätzlicher Kompensationsleiter z zur Reduktionsfaktorverminderung vorhanden sein. Bei einem Verlauf in unmittelbarer Nähe des Kabelmantels sind folgende Schritte zur Dimensionierung des Leiters z durchzuführen:

- Umrechnung von r_g in einen äquivalenten Leitwert G_g
- der aus den Messungen nach Punkt 9.2 gewonnene Leitwert G_U ist von G_g zu subtrahieren; das ergibt $G_z = G_g - G_U$
- Berechnung des äquivalenten Reduktionsfaktors r_z aus G_z mit Hilfe der Diagramme 13.1 bis 13.4

Eine Übersicht gibt das folgende Schema zur Bestimmung des für die Schutzmaßnahme erforderlichen Reduktionsfaktors. Rechenbeispiele sind unter 12.6 aufgeführt.



11.2. Kabel mit magnetischer Bewehrung

Kann die in die Fernmeldeader induzierte Spannung U_1 nur zwischen Ader und Mantel gemessen werden (Meßschaltung nach Bild 14a), so läßt sich G_U nach Gleichung (67) bei kleinen induzierten Spannungen berechnen. In diesem Fall ist der Einfluß der magnetisch wirksamen Bewehrung auf das Meßergebnis gering ($L_{Fe} \approx 0$). Kleine induzierte Spannungen erhält man, indem die Messung bei vermindertem Beeinflussungsstrom I_{mess} durchgeführt wird (siehe Beispiel 12.6).

Bei großen induzierten Spannungen ist die Bestimmung des Reduktionsfaktors r_U wegen des unbekanntes Wertes der Eiseninduktivität in geschlossener Form nicht möglich. In diesem Fall sind die Iterationsverfahren nach den Punkten 10.2 oder 10.3 anzuwenden. Der so bestimmte Reduktionsfaktor r_U muß in einen äquivalenten Leitwert G_U umgewandelt werden, der von G_g subtrahiert werden muß.

$$G_z = G_g - G_U$$

Aus G_z ist dann r_z bestimmbar.

12. Beispiele

12.1. Beeinflussung von Fernmelde- und Signalkabeln der DB durch $16\frac{2}{3}$ -Hz-Bahnströme

12.1.1. Vorbemerkungen

Bei Beeinflussung von Fernmelde- und Signalkabeln der DB durch $16\frac{2}{3}$ -Hz-Ströme in der Fahrleitung sind einige Besonderheiten zu berücksichtigen:

12.1.1.1

Die Erdungswiderstände R_E der reduzierenden Leiter wie Fahrschienen, Kabelmäntel und Kompensationsleiter sind im allgemeinen sehr klein, so daß bei den Berechnungen $R_E \approx 0$ angenommen werden darf.

12.1.1.2

Die Fahrschiene einer elektrisch betriebenen Bahnlinie ist streng genommen wie ein kontinuierlich geerdeter Kompensationsleiter zu betrachten. Zur Nachbildung der abschnittsweise unterschiedlichen Werte des Ableiterwiderstandes R_N ist die vereinfachte Annahme eines isolierten, beidseitig geerdeten Leiters zulässig. Erfahrungsgemäß sind die so erzielten Ergebnisse ausreichend genau, da die meist sehr langen, weit über den eigentlichen Näherungsabschnitt hinausgehenden Gleise, insbesondere an den „Enden“, stets gut geerdet sind.

12.1.1.3

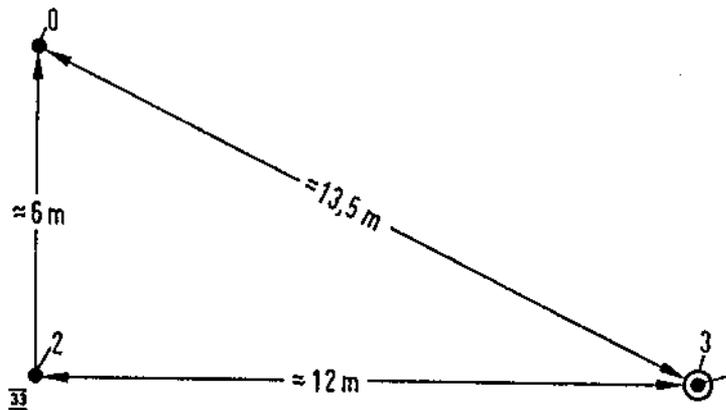
Auch in der Praxis liegt in aller Regel homogene Beeinflussung vor, so daß die entsprechenden Formeln uneingeschränkt gültig sind.

12.1.1.4

Im Gegensatz zur Beeinflussung durch 50-Hz-Wechselströme ist die reduzierende Wirkung eines Kabelmantels ohne magnetische Bewehrung nur sehr gering.

12.1.1.5

Für eine zweigleisige elektrifizierte Bahnstrecke ergibt sich vereinfacht gesehen folgende Geometrie der Abstände (Querschnitte) nach Bild 33.



- 0 ... 2 Fahrleitungen und Tragseile zu einem Leiter zusammengefaßt
- 1 ... Fernmelde- oder Signalkabel
- 2 ... 4 Schienen zu einem Leiter zusammengefaßt
- 3 ... Kabelmantel

Bild 33: Geometrie der Abstände

Es können die Kopplungs- und Eigenimpedanzen der Erdkreise für 16 $\frac{2}{3}$ Hz und 30 Ω m bezogen auf einen Kilometer berechnet werden.

Kopplungsimpedanzen nach CCITT; sie sind bei den gegebenen Abständen im Bahnbereich stets gleich:

Da der Abstand $a_{01} \approx a_{21}$, wird angenommen, daß

$$\underline{Z}_{01} = \underline{Z}_{03} = \underline{Z}_{21} = \underline{Z}_{23} = \underline{Z}_{32} \text{ ist.}$$

$$\underline{Z}_{01}' = (0,016 + j0,089) \frac{\Omega}{\text{km}} = 0,090 e^{j79,8^\circ} \frac{\Omega}{\text{km}}$$

$$\underline{Z}_{02}' = (0,016 + j0,105) \frac{\Omega}{\text{km}} = 0,106 e^{j81,3^\circ} \frac{\Omega}{\text{km}}$$

Ohne Berücksichtigung einer magnetischen Bewehrung mit

$$L_0' = \frac{2 \text{ mH}}{\text{km}} \text{ und } R_e' = 0,016 \frac{\Omega}{\text{km}} \text{ ist}$$

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{31}' &= R_e' + j \omega L_0' = (0,016 + j2\pi \cdot 16,67 \cdot 2 \cdot 10^{-3}) \frac{\Omega}{\text{km}} \\ &= (0,016 + j0,209) \frac{\Omega}{\text{km}} = 0,210 e^{j85,6^\circ} \frac{\Omega}{\text{km}} \end{aligned}$$

Eigenimpedanzen der jeweiligen Erdkreise:

Nach Tafel 14.1 bzw. VDE 0228, Teil 1, Tabelle 7 ist

$$\underline{Y}_{22}' = \frac{1}{\underline{Z}_{22}'} = (1,2 - j5,5) \frac{\text{km}}{\Omega}$$

$$\underline{Z}_{22}' = \left(\frac{1}{1,2 - j5,5} \right) \frac{\Omega}{\text{km}} = \left(\frac{1,2 + j5,5}{1,2^2 + 5,5^2} \right) \frac{\Omega}{\text{km}}$$

$$\underline{Z}_{22}' = (0,038 + j0,174) \frac{\Omega}{\text{km}} = 0,178 e^{j77,7^\circ} \frac{\Omega}{\text{km}}$$

Die Eigenimpedanz des Kreises Kabelmantel (ohne magnetisch wirksame Bewehrung) – Erde ist naturgemäß entscheidend abhängig von der Stärke und dem Material des Mantels und ergibt sich zu

$$\underline{Z}_{33} = R_e + R_M + j \omega L_0 \cdot \text{wobei } R_M = \frac{1}{x_M \left[\left(\frac{D}{2} + d_M \right)^2 - \left(\frac{D}{2} \right)^2 \right] \cdot \pi} \text{ ist}$$

Dabei ist κ_M der spezifische Leitwert in $\frac{m}{\Omega \text{ mm}^2}$, D die Dicke des Kabels unter dem Mantel und d_M die Dicke des Mantels in mm.

In den nachfolgend aufgeführten Rechenbeispielen ist zur Vereinfachung nur der Kurzschlußfall berücksichtigt worden. Im allgemeinen muß jedoch sonst auch die Langzeitbeeinflussung durch den Fahrstrom I_F berechnet werden.

12.1.2. Kabel ohne magnetisch wirksame Bewehrung

Ein Streckenfernmeldekabel soll parallel einer zweigleisigen elektrifizierten Bahnstrecke verlegt und ohne Übertrager betrieben werden.

Zur Dimensionierung des Kabels muß die induzierte Längsspannung ermittelt, mit dem zulässigen Grenzwert verglichen und der erforderliche Gesamtreduktionsfaktor bestimmt werden. Daraufhin kann, nachdem vorher der Reduktionsfaktor der Schienen errechnet wurde, der notwendige Kabelreduktionsfaktor bemessen werden.

Gegebene Daten:

Beeinflussender Leiter (0):

- 2 Fahrleitungen (15 kV; 16 $\frac{2}{3}$ Hz): wird in der Rechnung wie 1 Leiter berücksichtigt.
- Bezogen auf die Näherung ist mit einem Erdkurzschlußstrom von $I_k = 6,14$ kA zu rechnen. Da es sich um die Kurzzeitbeeinflussung eines Fernmeldekabels handelt, darf nach VDE 0228/7.75, Teil 1, mit einem Erwartungsfaktor $w = 0,7$ gerechnet werden.

Beeinflußter Leiter (1):

- Streckenfernmeldekabel, 42"; Durchmesser ca. 25 bis 30 mm; Länge 4,3 km

Kompensationsleiter (2):

- 4 Schienen einer zweigleisigen elektrifizierten Bahnstrecke; für die Berechnung zu einem Leiter zusammengefaßt;

Abstände und Maße:

- Länge der Näherung 4,3 km (siehe oben)
- Abstände der Leiter voneinander: siehe Bild 33

Der Umweltreduktionsfaktor r_x wird zu 1 angenommen, da keine weiteren Kompensationsleiter vorhanden sind.

Gesuchte Daten:

- Gesucht wird der erforderliche Kabelreduktionsfaktor, um Art und Material des Mantels bestimmen zu können.

Berechnungsgang:

- Ermittlung der induzierten Längsspannung nach der TE 1 für einen Näherungsabstand $a_{01} = 13,5 \text{ m}$:

$$Z_{01}' = 90 \frac{\text{V}}{\text{kA km}}$$

$$E_1 = Z_{01}' s I_k w$$

$$E_1 = 90 \frac{\text{V}}{\text{kA km}} 4,3 \text{ km} 6,14 \text{ kA} 0,7 = 1663 \text{ V}$$

$$U_{zul} = 500 \text{ V nach VDE 0228/7.75, Teil 1, Tabelle 1}$$

Der erforderliche Gesamtreduktionsfaktor ergibt sich zu

$$r_g = \frac{U_{zul}}{E_1} = \frac{500 \text{ V}}{1663 \text{ V}} = 0,306$$

Berechnung des Schienenreduktionsfaktors r_s nach Gleichung (5):

$$r_s = 1 - \frac{Z_{21} Z_{02}}{Z_{01} Z_{22}}$$

Da $Z_{01} = Z_{21}$ ist (vgl. Punkt 12.1.1.5) vereinfacht sich die Beziehung:

$$r_s = 1 - \frac{Z_{02}}{Z_{22}}$$

$$r_s = 1 - \frac{0,106 e^{j81,3^\circ}}{0,178 e^{j77,7^\circ}} = 0,405 - j0,037$$

$$r_s = 0,407$$

Ermittlung des notwendigen Kabelreduktionsfaktors r_k

- Hierzu müssen die nun bekannten Reduktionsfaktoren r_g und r_s mit Hilfe des Diagrammes 13.3 in ihre äquivalenten Leitwerte umgewandelt werden ($R_E = 0$):

$$r_g = 0,306 \quad G_g' = 14,8 \frac{\text{km}}{\Omega}$$

$$r_s = 0,407 \quad G_s' = 10,7 \frac{\text{km}}{\Omega}$$

Gemäß der Beziehung $G_g' = G_s' + G_k'$ ergibt sich

$$G_k' = 14,8 \frac{\text{km}}{\Omega} - 10,7 \frac{\text{km}}{\Omega} = 4,1 \frac{\text{km}}{\Omega}$$

Durch Rückverwandlung des Leitwertes erhält man einen erforderlichen Kabelreduktionsfaktor von

$$r_k = 0,76$$

In diesem Fall führt eine einfachere Berechnung, wie in der TE 1 beschrieben, zum nahezu gleichen Ergebnis:

$r_g = r_s r_k$ daraus folgt

$$r_k = \frac{r_g}{r_s} = \frac{0,306}{0,407} = 0,75$$

Ein Blick in die Tabelle der Reduktionsfaktoren für Außenkabel (Tafel 14.2) zeigt, daß für das vorgesehene Streckenfernmeldekabel (42", Durchmesser ca. 25–30 mm) selbst die reduzierende Wirkung eines Aluminiummantels – siehe Spalte 22 – ohne zusätzliche Bewehrung mit Stahlbändern nicht ausreicht. Es kann lediglich ein Reduktionsfaktor von $r_k = 0,78$ erzielt werden. Deshalb soll in einem zweiten, etwas veränderten Beispiel die Wirkung der zusätzlichen Stahlbandbewehrung verdeutlicht werden.

12.1.3. Kabel mit magnetisch wirksamer Bewehrung

Für die Betrachtung soll ein hochpaariges, bereits verlegtes Aluminiummantelkabel mit $2 \times 0,8$ mm Stahlbandbewehrung und einem Durchmesser von 60 mm unter dem Mantel berücksichtigt werden. Ziel der Berechnungen ist es, die zusätzliche reduzierende Wirkung der Bewehrung zu bestimmen. Hierzu ist es notwendig, zuerst den Gesamtreduktionsfaktor (Schienen und Mantel) ohne Stahlbandbewehrung zu ermitteln.

Die Näherungslänge sei $s = 8,5$ km. Im übrigen gelten die Voraussetzungen und Daten des Beispiels 12.1.2.

Berechnungsgang:

– Ermittlung des Gesamtreduktionsfaktors (Kabelmantel + Schienen) ohne Bewehrung

Der Gesamtreduktionsfaktor errechnet sich nach Gleichung (12) für unser Beispiel zu

$$r = 1 - \frac{Z_{31} Z_{03}}{Z_{01} Z_{33}} k_3 - \frac{Z_{21} Z_{02}}{Z_{01} Z_{22}} k_2$$

wobei

$$k_3 = \frac{1 - \frac{Z_{02} Z_{32}}{Z_{03} Z_{22}}}{1 - \frac{Z_{32} Z_{23}}{Z_{33} Z_{22}}}$$

und

$$k_2 = \frac{1 - \frac{Z_{03} Z_{32}}{Z_{02} Z_{33}}}{1 - \frac{Z_{32} Z_{23}}{Z_{33} Z_{22}}}$$

Für den Aluminiummantel muß zuvor die Impedanz des Erdkreises bestimmt werden:

Der Widerstand des Mantels ergibt sich zu (siehe Punkt 12.1.1.5)

$$R_M' = \frac{1}{x_M \left[\left(\frac{D}{2} + d_M \right)^2 - \left(\frac{D}{2} \right)^2 \right] \pi} = \frac{1 \Omega \text{ mm}^2}{34,3 \text{ m} \left[\left(\frac{60}{2} + 1,8 \right)^2 - \left(\frac{60}{2} \right)^2 \right] \pi \text{ mm}^2}$$

(wobei die Manteldicke mit 1,8 mm angenommen wurde).

$$R_M' = \frac{1}{11986} \frac{\Omega}{\text{m}} = 0,0834 \frac{\Omega}{\text{km}} \text{ d.h.}$$

$$Z_{33}' = R_e' + R_M' + j\omega L_0' = (0,016 + 0,0834 + j2\pi \cdot 16,68 \cdot 2 \cdot 10^{-3}) \frac{\Omega}{\text{km}}$$

$$Z_{33}' = (0,099 + j0,209) \frac{\Omega}{\text{km}} = 0,231 e^{j64,7^\circ} \frac{\Omega}{\text{km}}$$

$$k_3 = \frac{1 - \frac{0,106 \cdot 0,090}{0,090 \cdot 0,178} e^{j(81,3^\circ + 79,8^\circ - 79,8^\circ - 77,7^\circ)}}{1 - \frac{0,090 \cdot 0,090}{0,231 \cdot 0,178} e^{j(79,8^\circ + 79,8^\circ - 64,7^\circ - 77,7^\circ)}}$$

$$k_3 = \frac{0,407 e^{-j5,2^\circ}}{0,814 e^{-j4,1^\circ}} = 0,500 e^{-j1,1^\circ}$$

$$k_2 = \frac{1 - \frac{0,090 \cdot 0,090}{0,106 \cdot 0,231} e^{j(79,8^\circ + 79,8^\circ - 81,3^\circ - 64,7^\circ)}}{1 - \frac{0,090 \cdot 0,090}{0,231 \cdot 0,178} e^{j(79,8^\circ + 79,8^\circ - 64,7^\circ - 77,7^\circ)}}$$

$$k_2 = \frac{0,682 e^{-j6,5^\circ}}{0,814 e^{-j4,1^\circ}} = 0,838 e^{-j2,4^\circ}$$

Damit wird für den Reduktionsfaktor von Schienen und Mantel ohne Bewehrung

$$r = 1 - \frac{0,210 \cdot 0,500 e^{j(85,6^\circ - 1,1^\circ - 64,7^\circ)}}{0,231} - \frac{0,106 \cdot 0,838 e^{j(81,3^\circ - 2,4^\circ - 77,7^\circ)}}{0,178}$$

$$r = 0,073 - j0,164 = \sqrt{0,073^2 + 0,164^2} e^{-j66^\circ}$$

$$r = 0,180$$

Berücksichtigung der magnetisch wirksamen Bewehrung nach Punkt 10.2:

$$r_k = f_1 \left(\frac{U_M}{s} \right) \text{ entsprechend Gleichung (77 a)}$$

$$r_k = f_2 \left(\frac{U_M}{s} \right) \text{ nach Tafel 14.2 Spalte 27}$$

$$\frac{U_M}{s} = \frac{\frac{E_1 R_M}{s}}{\sqrt{[r_k^2 X_0^2 G_X + R_M]^2 + [X_0 G_X R_M - X_0^2 G_X r_k \sqrt{1 - r_k^2}]^2}}$$

Daten:

$$s = 8,5 \text{ km}$$

$$I_k = 6,14 \text{ kA}$$

$$E_1 = I_k Z_{01}' s w = 3288 \text{ V}$$

$$R_M' = 0,0834 \frac{\Omega}{\text{km}}$$

$$R_M = 0,7089 \Omega$$

Annahme: der Mantelwiderstand R_M möge sich zur Vereinfachung der Berechnung beim Aufbringen einer magnetisch wirksamen Bewehrung nicht verändern

$$X_0' = 0,21 \frac{\Omega}{\text{km}}$$

$$X_0 = 1,785 \Omega$$

Zur Bestimmung von G_X muß der ohne magnetisch wirksame Bewehrung errechnete Reduktionsfaktor von $r = 0,18$ entsprechend Gleichung (55) auf die Form

$$r = \frac{1}{\sqrt{[1 + R_E'(G_M' + G_X')]^2 + X_0'^2(G_M' + G_X')^2}}$$

gebracht werden.

$$R_E' = 0; r = 0,18; G_M' = \frac{1}{R_M'} = \frac{1}{0,0834} = 12 \frac{\text{km}}{\Omega}$$

$$X_0' = 0,21 \frac{\Omega}{\text{km}}$$

Nach G_X' aufgelöst erhält man

$$G_X' = \frac{1}{X_0'} \sqrt{\left(\frac{1}{r}\right)^2 - 1} - G_M' = 14 \frac{\text{km}}{\Omega}$$

$$G_X = 1,647 \frac{1}{\Omega}$$

Somit kann Gleichung (77a) als Zahlenwertgleichung angegeben werden.

$$\frac{U_M}{s} = \frac{274,2}{\sqrt{[r_K^2 25,247 + 0,7089]^2 + [2,084 - 5,247 r_K \sqrt{1 - r_K^2}]^2}} \left[\frac{\text{V}}{\text{km}} \right]$$

r_K	0	0,1	0,2	0,3	0,35	0,4
$\frac{U_M}{s} \left[\frac{\text{V}}{\text{km}} \right]$	124,6	157,6	195,9	207,7	195,9	175,8

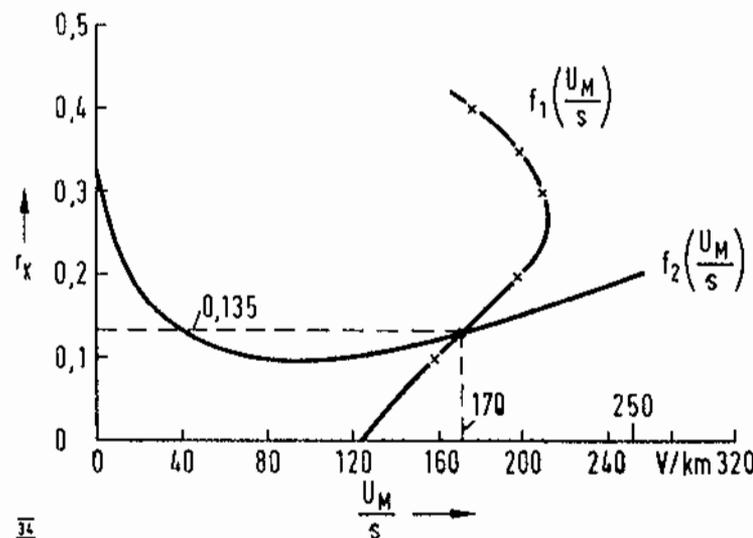


Bild 34: Graphische Ermittlung von r_K

Im Schnittpunkt der Funktionen $r_K = f_1 \left(\frac{U_M}{s} \right)$ und $r_K = f_2 \left(\frac{U_M}{s} \right)$ ergibt sich ein Wertepaar

$$\left(r_K; \frac{U_M}{s} \right) = (0,135; 170)$$

Damit ergibt sich der resultierende Reduktionsfaktor bei Verwendung eines eisenbewehrten Kabels zu

$$r = \frac{r_K \frac{U_M}{s} s}{E_1} = \frac{0,135 \cdot 170 \cdot 8,5}{3288}$$

$$r = 0,06$$

Das Ergebnis zeigt, daß durch die magnetische Bewehrung der Gesamtreduktionsfaktor von 0,18 auf 0,06 abgesenkt wird.

12.2. Rechnerische Ermittlung der Wirkung von mehreren Kompensationsleitern (Beispiel zu Punkt 4.2.)

Beeinflussende Leitung (Leiter 0 und 2)

Ein Drehstromsystem aus 110-kV-Einleiterölkabeln mit Bleimantel

Durchmesser unter Blei	72,4 mm
Bleimantelstärke	2,9 mm
Verlegung der Kabel im Dreieck	
Abstand von Ader zu Ader	ca. 80,0 mm
Induzierender Kurzschlußstrom $3 I_0 = 10 \text{ kA}$, 50 Hz	

Ein Fernmeldekabelschirm sei nicht vorhanden ($I_4 = 0$, d.h. $r_K = 1$)

Das Wasserrohr (Leiter 3) habe die Nennweite (NW) 150, d.h.

einen Außendurchmesser von	170 mm
und eine Wandstärke von	10 mm
Länge der Parallelführung	5 km
Spezifischer Erdwiderstand	50 Ωm

Die Erdungsimpedanzen Z_A und Z_B seien zu vernachlässigen. Anordnung der Leiter entsprechend Bild 35.

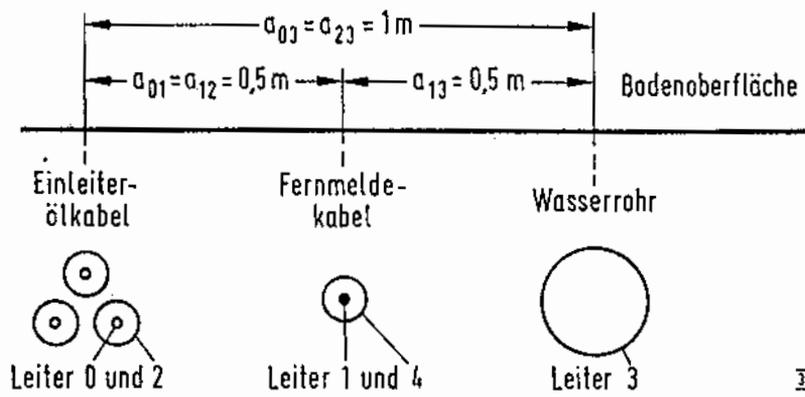


Bild 35: Anordnung der Leiter

Querschnitt der parallelgeschalteten Bleimäntel des Drehstromkabelsystems

$$A = 3 (72,4 + 2,9) \pi 2,9 \text{ mm}^2$$

$$A = 2058 \text{ mm}^2$$

Damit

$$R_2 = \left(\frac{200}{2058} + 0,0494 \right) 5 \Omega$$

$$R_2 = 0,734 \Omega$$

E satzhalbmesser $H = \sqrt[3]{36,2 \cdot 80^2} \text{ mm}$

$$H = 61,3 \text{ mm}$$

Dazu bei $50 \Omega \text{ m}$ spezifischem Erdwiderstand

$$X_2 = 0,581 \cdot 5 \Omega$$

$$X_2 = 2,905 \Omega$$

$$Z_{22} = (0,734 + j 2,905) \Omega$$

Entsprechend für das Wasserrohr mit Leitfähigkeit $6 \frac{\text{S m}}{\text{mm}^2}$ d. h. spezifischer

Widerstand $167 \frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{km}}$

$$R_3 = \left(\frac{167}{(170 - 10) \pi 10} + 0,0494 \right) 5 \Omega$$

$$R_3 = 0,413 \Omega$$

und bei einem äußeren Radius von 85 mm

$$X_3 = 0,545 \cdot 5 \Omega$$

$$X_3 = 2,725 \Omega$$

Also

$$Z_{33} = (0,413 + j 2,725) \Omega$$

Für 1 m Abstand zwischen Drehstromkabelsystem und Wasserrohr bei 50 Ω m spezifischem Erdwiderstand

$$Z_{23} = Z_{32} = (0,049 + j 0,408) 5 \Omega$$

$$Z_{23} = Z_{32} = (0,245 + j 2,04) \Omega$$

Es ergibt sich nun das folgende Gleichungssystem für die Ströme in kA:

$$(0,734 + j 2,905) I_2 + (0,245 + j 2,04) I_3 = (0,245 + j 2,905) 10$$

$$(0,245 + j 2,04) I_2 + (0,413 + j 2,725) I_3 = (0,245 + j 2,04) 10$$

Mit

$$D = (0,734 + j 2,905) (0,413 + j 2,725) - (0,245 + j 2,04) (0,245 + j 2,04)$$

$$\underline{D}_2 = (2,45 + j 29,05) (0,413 + j 2,725) - (0,245 + j 2,04) (2,45 + j 20,4)$$

$$\underline{D}_3 = (0,734 + j 2,905) (2,45 + j 20,4) - (2,47 + j 29,05) (0,245 + j 2,04)$$

errechnet man:

$$I_2 = \frac{\underline{D}_2}{\underline{D}}$$

$$I_2 = (8,706 + j 2,983) \text{ kA}$$

$$I_3 = \frac{\underline{D}_3}{\underline{D}}$$

$$I_3 = (1,033 - j 2,193) \text{ kA}$$

Bei $a_{12} = a_{13} = 0,5$ m

$$Z_{12} = Z_{31} = (0,0494 + j 0,451) 5 \Omega$$

$$Z_{12} = Z_{31} = (0,245 + j 2,255) \Omega$$

errechnet man eine im Fernmeldekabel induzierte Spannung von

$$\underline{U}_1 = (3 I_0 - I_2) Z_{12} - I_3 Z_{13}$$

Da in diesem Beispiel $Z_{12} = Z_{13}$ ist, gilt

$$\underline{U}_1 = (3 \underline{I}_0 - \underline{I}_2 - \underline{I}_3) Z_{12}$$

$$\underline{U}_1 = (10 - 8,706 - j 2,983 - 1,033 + j 2,193) (0,245 + j 2,255) \text{ kV}$$

$$\underline{U}_1 = (1,845 + j 0,395) \text{ kV}$$

$$|\underline{U}_1| = 1,88 \text{ kV}$$

12.3. Kompensationswirkung von Rohrleitungen (Beispiel zu Punkt 5)

Daten für das Berechnungsbeispiel nach Bild 36

Hochspannungs-Freileitung

Nennspannung	$U_n = 110 \text{ kV}$
Mastbild	} nach Bild 36
Leitenseile (0)	
Erdseil (2)	

Kompensationsleiter

Rohrleitung (3)

Länge der Näherung	$s = 20 \text{ km}$
Außendurchmesser	$D_a = 400 \text{ mm}$
Wanddicke	$d = 6,8 \text{ mm}$
Spezifischer Widerstand	$\rho = 166 \frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{km}}$
Permeabilitätszahl	$\mu_r = 200$
Rohrumhüllung	
Ausführung 1	Bitumen
Ausführung 2	Kunststoff

Erde

spezifischer Erdwiderstand	$\rho_E = 50 \Omega \text{ m}$
----------------------------	--------------------------------

Fernmeldeleiter

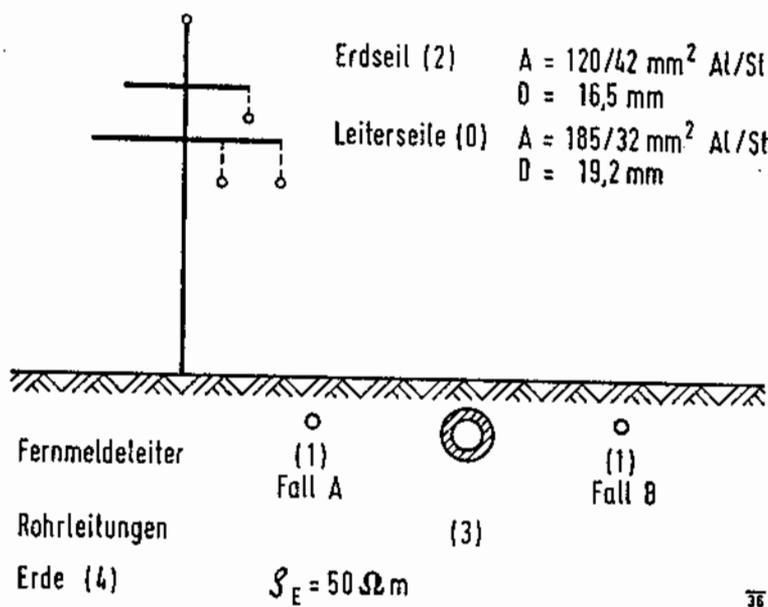
Lage des Leiters (1)	Fall A (innerhalb) Fall B (außerhalb) } nach Bild 36
----------------------	---

Die Wirkungen der Schirme und Bewehrungen des Fernmeldeleiters werden bei diesem Berechnungsbeispiel nicht berücksichtigt, weil deren Einfluß auf die Verteilung der Fehlerströme des Drehstromnetzes vernachlässigbar ist.

Erdkurzschlußstrom

$$I_{k1}'' = 3 I_0 = 1000 \text{ A}$$

Zur Vereinfachung der Berechnung wird für die Verlegungstiefe von Rohrleitung (3) und Fernmeldeleiter (1) einheitlich der Wert von 2 m angenommen.



	Abstände der Leiter in m				
	(0)	(2)	(3)	Fall A (1)	Fall B (1)
Leitersseite (0)	—	10,98	29,73	22,56	41,34
Erdseil (2)		—	38,57	33,35	48,1
Rohrleitung (3)			—	15	15

Bild 36: Daten für das Berechnungsbeispiel „Rohrleitung“

Impedanzen

$$\underline{Z}' = Z' e^{j\varphi} \frac{\Omega}{\text{km}}$$

		$\frac{Z'}{\Omega}$ ($\frac{\Omega}{\text{km}}$)		φ ($^{\circ}$)	
		Fall A	Fall B	Fall A	Fall B
Erdseil – Erde	Z'_{22}	0,797		69,1°	
Rohrleitung – Erde	Z'_{33}	0,568		81,1°	
Leiteseile – Erdseil	Z'_{02}	0,283		79,8°	
Leiteseile – Rohrleitung	Z'_{03}	0,222		76,9°	
Leiteseile – FM Leiter	Z'_{01}	0,239	0,202	77,9°	75,6°
Erdseil – Rohrleitung	Z'_{23}	0,206		75,9°	
Erdseil – FM Leiter	Z'_{21}	0,215	0,192	76,5°	74,9°
Rohrleitung – FM Leiter	Z'_{31}	0,264	0,264	79,1°	79,1°

Daten der Rohrleitung (3)

		Ausführung 1	Ausführung 2
Ableitwiderstand	R_N	5,2 Ω km	97 Ω km
Erdkapazität	$C_{N'}$	9,5 $\frac{\mu F}{\text{km}}$	16 $\frac{\mu F}{\text{km}}$
Wellenwiderstand	Z_w	1,72 Ω (40,5°)	7,05 Ω (27,8°)
Ausbreitungskoeffizient	γ	0,328 $\frac{1}{\text{km}}$ (40,5°)	0,081 $\frac{1}{\text{km}}$ (54°)
		(0,249 + j0,213) $\frac{1}{\text{km}}$	(0,048 + j0,065) $\frac{1}{\text{km}}$

Faktoren zur Bestimmung der Stromverteilung

Erdseil (2)	$p_{02} = 0,654$	(-5,78°)
	$k_2 = 0,807$	(-0,17°)
Rohrleitung (3)	$p_{03} = 0,611$	(-2,68°)
	$k_3 = 0,745$	(-4,14°)

Ströme	mit Rohrleitung	ohne Rohrleitung
Leiteseile (0)	1000 A	1000 A
Erdseil (2)	-286 A (+10,5°)	-335 A (+10,7°)
Rohrleitung(3)	-291 A (+ 8,3°) + h_3 (s)	—
Erde (4)	-435 A (- 3,3°) - h_3 (s)	-654 A (- 5,8°)

ohne Rohrleitung

	Induzierte Spannungen	
	Fall A	Fall B
von den Leiterseilen	$E'_{10} = 239 \frac{\text{V}}{\text{km}} (77,9^\circ)$	$202 \frac{\text{V}}{\text{km}} (75,6^\circ)$
vom Erdseil	$E'_{12} = -76 \frac{\text{V}}{\text{km}} (87,2^\circ)$	$-68 \frac{\text{V}}{\text{km}} (85,6^\circ)$
	$E'_1 = 163 \frac{\text{V}}{\text{km}} (73,5^\circ)$	$134 \frac{\text{V}}{\text{km}} (70,5^\circ)$

mit Rohrleitung (s = 20 km)

		Mittelwerte der induzierten Spannungen	
		Fall A	Fall B
wirkliche Stromverteilung		$\frac{\text{V}}{\text{km}}$	$\frac{\text{V}}{\text{km}}$
von den Leiterseilen	U_{10}	239 (77,9°)	202 (75,6°)
vom Erdseil	U_{12}	-61 (90,2°)	-54 (88,6°)
von der Rohrleitung	U_{13}		
Ausführung 1		-68 (77,1°)	-68 (77,1°)
Ausführung 2		-44 (103,3°)	-44 (103,3°)
Ausführung 1	U_1	111 (71,6°)	81 (65,7°)
Ausführung 2	U_1	142 (64,9°)	114 (58,9°)

		Mittelwerte der induzierten Spannungen	
		Fall A	Fall B
ausgegliche Stromverteilung		$\frac{\text{V}}{\text{km}}$	$\frac{\text{V}}{\text{km}}$
von den Leiterseilen	U_{10}	239 (77,9°)	202 (75,6°)
vom Erdseil	U_{12}	-61 (90,2°)	-54 (88,6°)
von der Rohrleitung	U_{13}		
Ausführung 1		-76 (70,7°)	-76 (70,7°)
Ausführung 2		-76 (70,7°)	-76 (70,7°)
Ausführung 1	U_1^+	103 (76°)	72 (71,0°)
Ausführung 2	U_1^+	103 (76°)	72 (71,0°)

Reduktionsfaktor der Rohrleitung ($s = 20 \text{ km}$)

bei wirklicher Stromverteilung in der Rohrleitung

	Reduktionsfaktor $r_3 = \frac{U_1}{E_1}$	
	Fall A	Fall B
Rohrleitung		
Ausführung 1	$\frac{111 \text{ V}}{163 \text{ V}} = 0,68$	$\frac{81 \text{ V}}{134 \text{ V}} = 0,60$
Ausführung 2	$\frac{142 \text{ V}}{163 \text{ V}} = 0,87$	$\frac{114 \text{ V}}{134 \text{ V}} = 0,85$

bei ausgeglichener Stromverteilung in der Rohrleitung

	Reduktionsfaktor $r_3^+ = \frac{U_1^+}{E_1}$	
	Fall A	Fall B
Rohrleitung		
Ausführung 1	$\frac{103 \text{ V}}{163 \text{ V}} = 0,63$	$\frac{72 \text{ V}}{134 \text{ V}} = 0,54$
Ausführung 2	$\frac{103 \text{ V}}{163 \text{ V}} = 0,63$	$\frac{72 \text{ V}}{134 \text{ V}} = 0,54$

Der Reduktionsfaktor r_3^+ bei ausgeglichener Stromverteilung ist der theoretische Grenzwert des Reduktionsfaktors, der unter den gewählten Bedingungen im günstigsten Fall erreicht werden kann.

12.4. Kompensationswirkung eines Bodenseils (Beispiel zu Punkt 5)

Daten für das Berechnungsbeispiel nach Bild 37

Hochspannungs-Freileitung

Nennspannung

$U_n = 110 \text{ kV}$

Mastbild

Leiterseile (0) }

Erdseil (2) }

nach Bild 37

Kompensationsleiter

Bänderder (3)
Länge

nach Bild 37
 $s = 1000 \text{ m}$

Erde, Erdungsanlage

spezifischer Erdwiderstand
Erdungswiderstand

$\rho_E = 50 \Omega \text{ m}$
 $R_E = 0,1 \Omega$

Fernmeldeleiter

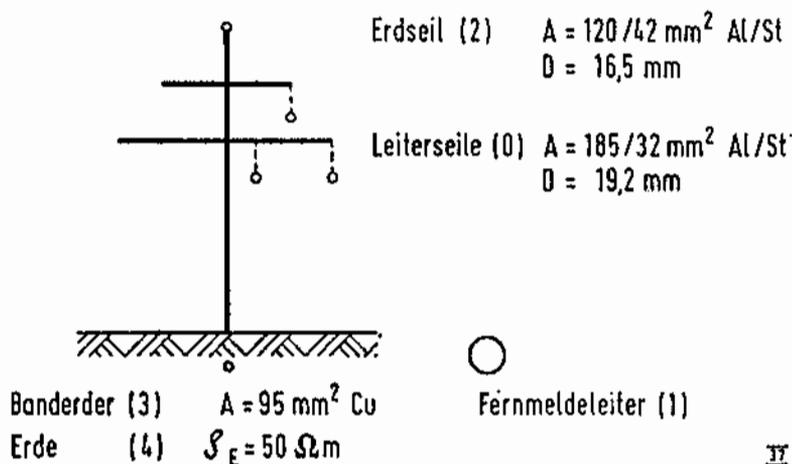
Lage des Leiters (1)

nach Bild 37

Die Wirkung der Schirme und Bewehrungen des Fernmeldeleiters werden bei diesem Berechnungsbeispiel nicht berücksichtigt, weil deren Einfluß auf die Verteilung der Fehlerströme des Drehstromnetzes vernachlässigbar ist.

Erdkurzschlußstrom

$$I_{k1}'' = 3I_0 = 1000 \text{ A}$$



	Abstände der Leiter			
	(0)	(2)	(3)	(1)
Leiterseile (0)	—	10,98 m	17,8 m	22,5 m
Erdseil (2)		—	27,15 m	32,0 m
Bänderder (3)			—	20,0 m
FM-Leiter (1)				—

Bild 37: Daten für das Berechnungsbeispiel „Bänderder“

Impedanzen

$$\underline{Z} = Z e^{j\varphi} (\Omega)$$

		Z (Ω)	φ (°)
Erdseil – Erde	Z_{22}	0,797	69,1°
Banderder – Erde	Z_{33}	0,793	72,2°
Leiterseile – Erdseil	Z_{02}	0,283	79,8°
Leiterseile – Banderder	Z_{03}	0,254	78,6°
Leiterseile – FM Leiter	Z_{01}	0,216	76,6°
Erdseil – Banderder	Z_{23}	0,228	77,3°
Erdseil – FM Leiter	Z_{21}	0,196	75,3°
Banderder – FM Leiter	Z_{31}	0,226	77,2°

Daten des Banderders (3)

Ableitwiderstand
(Seilstück von 1 m Länge)

$$R_N = 75,5 \Omega \text{ m}$$

Wellenwiderstand

$$Z_w = 0,245 \Omega \quad (36,1^\circ)$$

Ausbreitungskoeffizient

$$\gamma = 3,24 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{m}} \quad (36,1^\circ)$$

Faktoren zur Bestimmung der Stromverteilung

Erdseil (2)

$$p_{02} = 0,654 \quad (-5,78^\circ)$$

$$k_2 = 0,807 \quad (-0,17^\circ)$$

Banderder (3)

$$p_{03} = 0,683 \quad (-3,01^\circ)$$

$$k_3 = 0,747 \quad (-3,15^\circ)$$

Ströme

	mit Banderder	ohne Banderder
Leiterseile (0)	1000 A	1000 A
Erdseil (2)	-286 A (10,5°)	-355 A (10,7°)
Banderder (3)	-239 A (3,3°) + $\underline{h}_3(x)$	—
Erde (4)	-484 A (-7,8°) - $\underline{h}_3(x)$	-654 A (-5,7°)

Induzierte Spannungen

ohne Banderder
von den Leiterseilen
vom Erdseil

$$E_{10} = 216 \text{ V} \quad (76,6^\circ)$$

$$E_{12} = -70 \text{ V} \quad (86,0^\circ)$$

$$E_1 = 147 \text{ V} \quad (72,2^\circ)$$

mit Bänderder ($s = 1000 \text{ m}$)

Die kontinuierliche Ableitung des Bänderders kann gemäß Punkt 5.5 durch Multiplikation der Impedanz Z_{31} mit einem Faktor c berücksichtigt werden.

	Stromverteilung	
	wirkliche $c = 0,593 (1,66^\circ)$	ausgeglichene $c = 1 (0^\circ)$
von den Leiterseilen	$\underline{U}_{10} = 216 \text{ V } (76,6^\circ)$	$216 \text{ V } (76,6^\circ)$
vom Erdseil	$\underline{U}_{12} = -56 \text{ V } (85,8^\circ)$	$-56 \text{ V } (85,8^\circ)$
vom Bänderder	$\underline{U}_{13} = -32 \text{ V } (82,2^\circ)$	$-54 \text{ V } (80,5^\circ)$
	$\underline{U}_1 = 129 \text{ V } (71,2^\circ)$	$\underline{U}_1^+ = 108 \text{ V } (69,9^\circ)$

Reduktionsfaktor des Bänderders ($s = 1000 \text{ m}$)
bei wirklicher Stromverteilung im Bänderder

$$r_3 = \frac{U_{1+}}{E_1} = \frac{129 \text{ V}}{147 \text{ V}} = 0,87$$

bei ausgeglichener Stromverteilung im Bänderder

$$r_3^+ = \frac{U_{1+}}{E_1} = \frac{108 \text{ V}}{147 \text{ V}} = 0,73$$

Der Reduktionsfaktor r_3^+ ist der theoretische Grenzwert des Reduktionsfaktors, der unter den gewählten Bedingungen im günstigsten Fall erreicht werden kann.

12.5. Das Zusammenfassen mehrerer bekannter Reduktionsfaktoren (Beispiel zu Punkt 8)

Ein Fernmeldekabel soll in einer Trasse ausgelegt werden, von der bekannt ist, daß durch Fremdanlagen bereits ein Reduktionsfaktor von $r = 0,25$ vorhanden ist. Um die induzierte Längsspannung (z.B. durch den Fahrleitungsstrom der DB) auf einen vorgeschriebenen Wert zu bringen, ist ein Gesamtreduktionsfaktor von $r_g = 0,10$ notwendig.

Der erforderliche Kabelreduktionsfaktor r_K ist zu bestimmen.

Gegebene Werte: $r_g = 0,10$ $r = 0,25$

zu bestimmen: r_K

Die äquivalenten Leitwerte*) sind entweder aus Diagramm 13,3 oder 13,4 für $16\frac{2}{3} \text{ Hz}$ mit $R_E = 0$ abzulesen, oder mit Hilfe der Gleichung (60)

*) Es ist von Vorteil, wenn grundsätzlich bei allen Rechnungen die spezifische Kabellänge von 1 km zugrunde gelegt wird, bei Benutzung der Diagramme 13.1 bis 13.4 ist es sogar erforderlich.

$$G' = \frac{\sqrt{1-r^2}}{r \cdot X_0} = \frac{\sqrt{1-0,1^2}}{0,1 \cdot 0,21} = 47,7 \frac{\text{km}}{\Omega}$$

zu berechnen. Es ist also für

$$r_g = 0,10 : G_g' = 47,7 \frac{\text{km}}{\Omega}$$

$$r = 0,25 : G' = 18,6 \frac{\text{km}}{\Omega}$$

Der Gesamtleitwert ist $G_g' = G' + G_K'$ also der gesuchte Leitwert für den Kabelmantel $G_K' = G_g' - G'$

$$G_K' = 47,7 \frac{\text{km}}{\Omega} - 18,6 \frac{\text{km}}{\Omega} = 28,8 \frac{\text{km}}{\Omega}$$

Aus Gleichung (59) oder der Kurvenschar in Diagramm 13 ist für $G_K' = 28,8 \frac{\text{km}}{\Omega}$ ein Wert von $r_K = 0,16$ zu bestimmen.

Der Wert $r_K = 0,16$ ist der für das auszulegende Fernmeldekabel erforderliche Reduktionsfaktor.

Dasselbe Ergebnis liefert auch die Gleichung (62):

$$r_g = \frac{1}{\frac{1}{r} + \frac{1}{r_K}}$$

oder

$$r_K = \frac{1}{\frac{1}{r_g} - \frac{1}{r}} = \frac{1}{\frac{1}{0,1} - \frac{1}{0,25}} = 0,16$$

Im Vergleich zu diesem Ergebnis erhält man mit Gleichung (58)

$$r_g = r r_K$$

$$r_K = \frac{r_g}{r} = \frac{0,10}{0,25} = 0,4$$

$$r_K = 0,4$$

Die Bemessung des Kabels mit $r_K = 0,4$ würde nicht ausreichen.

Das einfache Verfahren nach Gleichung (58) darf nicht angewendet werden,

wenn nach Gleichung (61) $G \cdot G_K \geq \frac{2}{X_0^2}$ zu erwarten ist, d. h. bei sehr kleinen Reduktionsfaktoren.

12.6. Ermittlung des zusätzlich erforderlichen Reduktionsfaktors r_2 (Beispiel zu den Punkten 9.2., 11.1. und 11.2.)

Parallel zu einem bereits vorhandenen Fernmeldekabel (ohne magnetisch wirksame Bewehrung) soll in der gleichen Trasse ein zusätzliches Kabel verlegt werden. Die erforderlichen Schutzmaßnahmen, um auf eine zulässige Spannung von z. B. 300 Volt zu kommen, sind zu ermitteln [19].

12.6.1. Bestimmung des unbekanntenen Parallel-Leitwertes G_U und der induzierten Spannung E_1 durch Messungen an dem bereits vorhandenen Fernmeldekabel

Meßanordnung nach Bild 23

Kabeltyp: PMbc 100 × 2 × 0,9

Länge der Meßstrecke: s = 5,25 km

Leitwert G_A (durch die für die Messung zusätzlich parallelgeschalteten Adern)

Anzahl der Adern m = 40; 0,9 mm Durchmesser (Kupfer)

$$R_{A'} = 27,9 \frac{\Omega}{\text{km}}; \quad G_{A'} = \frac{m}{R_{A'}}$$

oder durch Messung $G_{A'} = \frac{s}{R};$ $G_{A'} = 1,43 \frac{\text{km}}{\Omega}$

Erdungswiderstand: $R_{E1} = 0,2 \Omega;$ $R_{E2} = 0,8 \Omega;$

$$R_{E'} = \frac{1}{s} (R_{E1} + R_{E2}); \quad R_{E'} = 0,19 \frac{\Omega}{\text{km}}$$

Meßwerte ohne zusätzlichen Leitwert $G_{A'}$ $U_1 = 25,3 \text{ V}$
mit zusätzlichem Leitwert $G_{A'}$ $U_{11} = 20,4 \text{ V}$

Hilfswerte für Gleichung (67)

n	n ²	k	k ²	X ₀ ' [*])	X ₀ ' ²	Z' ²	Z' ⁴	G _A ' ²
—	—	—	—	$\frac{\Omega}{\text{km}}$	$\frac{\Omega^2}{\text{km}^2}$	$\frac{\Omega^2}{\text{km}^2}$	$\frac{\Omega^4}{\text{km}^4}$	$\frac{\text{km}^2}{\Omega^2}$
$\frac{U_1}{U_{11}}$	—	n ² - 1	—	$\omega L_0'$	—	R _E ' ² + X ₀ ' ²	—	—
1,24	1,54	0,54	0,29	0,63	0,4	0,436	0,19	2,04

*) f = 50 Hz $L_0' = \frac{2 \text{ mH}}{\text{km}}$

Mit Gleichung (67):
$$G_{U'} = \sqrt{\frac{n^2}{k^2} \cdot G_A'^2 - \frac{X_0'^2}{Z'^4} - \frac{R_E'}{Z'^2} + \frac{G_A'}{k}}$$

ist der Parallel-Leitwert
$$G_{U'} = 5,16 \frac{\text{km}}{\Omega}$$

Das entspricht nach Gleichung (59) oder Diagramm 13.1 einem Reduktionsfaktor $r_U = 0,26$

Aus den Ergebnissen berechnet man nach Gleichung (65) die durch den Meßstrom I_{mess} induzierte Spannung $E_1 = 96,4 \text{ V}$

Die bei dem Meßstrom I_{mess} gemessene Spannung U_1 und die rechnerisch ermittelte, induzierte Spannung E_1 sind auf den bei Beeinflussung fließenden Strom I mit dem Stromfaktor

$$v_i = \frac{I}{I_{\text{mess}}} \text{ umzurechnen.}$$

Bei $v_i = 20$ ist dann
$$E_{1v} = 1928 \text{ V}$$

$$U_{1v} = 506 \text{ V}$$

12.6.2. Bestimmung des erforderlichen Reduktionsfaktors für ein zusätzlich in der gleichen Trasse zu verlegendes Kabel ohne magnetisch wirksame Bewehrung

Mit einer zulässigen Spannung von z.B. 300 V ergibt sich aus Gleichung (81) der erforderliche Gesamt-Reduktionsfaktor

$$r_g = \frac{300 \text{ V}}{1.928 \text{ V}} \quad r_g = 0,156$$

das entspricht nach Gleichung (60)

$$G_g' = \frac{\sqrt{(1 - r_g^2) X_0'^2 + R_E'^2} - r_g R_E'}{(R_E'^2 + X_0'^2) r_g}$$

oder nach Diagramm 13.1 dem Gesamtleitwert
$$G_g' = 9,16 \frac{\text{km}}{\Omega}$$

Aus der Differenz $G_g' - G_{U'}$ folgt der zusätzlich erforderliche Leitwert

$$G_z' = G_g' - G_{U'} = 9,16 \frac{\text{km}}{\Omega} - 5,16 \frac{\text{km}}{\Omega} : \quad G_z' = 4 \frac{\text{km}}{\Omega}$$

entsprechend einem Längswiderstand $R_z' = \frac{1}{G_z'} : R_z' = 0,25 \frac{\Omega}{\text{km}}$

Der erforderliche Reduktionsfaktor für das zusätzlich zu verlegende Kabel beträgt nach Gleichung (59):

$$r_z = \frac{1}{\sqrt{(1 + R_E' G_z')^2 + X_0'^2 G_z'^2}}$$

oder nach Diagramm 13.1 $r_z = 0,325$

Gegenüberstellung:

Wäre der zusätzlich erforderliche Reduktionsfaktor r_z direkt aus der Meßspannung U_{1v} ermittelt worden, so hätten sich nach Gleichung (58) folgende Werte ergeben:

$$r_z = \frac{r_g}{r_U} = \frac{U_{zul}}{U_{1v}} = \frac{300 \text{ V}}{506 \text{ V}} = 0,593 \left(\text{entsprechend } G_z' = 1,65 \frac{\text{km}}{\Omega} \right)$$

Die Schutzmaßnahme wäre ganz wesentlich unterdimensioniert worden.

12.6.3. Bestimmung des erforderlichen Reduktionsfaktors für ein zusätzlich in der gleichen Trasse zu verlegendes Kabel mit magnetisch wirksamer Bewehrung.

Entsprechend den an dem bereits vorhandenen Fernmeldekabel durchgeführten Messungen wird die induzierte Spannung $E_{iv} = 1928 \text{ V}$ durch die bereits vorhandenen (z.T. unbekannt) Kompensationsleiter auf $U_{1v} = 506 \text{ V}$ reduziert.

Für das neu zu verlegende Kabel wird eine magnetisch wirksame Bewehrung mit $2 \times (0,5 \times 40 \text{ mm}^2)$ Band Eisen gewählt.

Annahme: Verwendetes Kabel habe Eigenschaften nach Bild 25

Daten:

$$X_0' = 0,63 \frac{\Omega}{\text{km}}$$

$$r_{k0} = 0,8 \quad G_M' = \frac{1}{X_0'} \sqrt{\left(\frac{1}{r_{k0}}\right)^2 - 1} = 1,19 \frac{\text{km}}{\Omega}$$

$$R_M' = 0,84 \frac{\Omega}{\text{km}}$$

$$G_X' = G_U' - G_M' = 5,16 - 1,19 = 3,97 \frac{\text{km}}{\Omega}$$

$$R_{X'} = 0,252 \frac{\Omega}{\text{km}}$$

$$R_{E'} = 0,19 \frac{\Omega}{\text{km}}$$

$$s = 5,25 \text{ km}$$

$$E_1 = 1928 \text{ V}$$

Mit diesen Daten lässt sich der Reduktionsfaktor gemäß Gleichung (79 a) als Funktion von $X_{Fe'}$ darstellen:

$$r = \frac{1}{\sqrt{(1,98 - 2,976 X_{Fe'})^2 + (0,63 + 0,404 X_{Fe'})^2} \cdot 5,16^2}$$

mit $X_{Fe'}$ in $\frac{\Omega}{\text{km}}$

r_K	0,75	0,68	0,53	0,39	0,34	0,35	
$\frac{U_M}{s} \left[\frac{\text{V}}{\text{km}} \right]$	10	20	50	100	150	200	
$X_{Fe'} \left[\frac{\Omega}{\text{km}} \right]$	0,11	0,275	0,714	1,353	1,693	1,618	
$I_M \text{ [A]}$	8,93	16,19	31,55	46,43	60,71	83,33	} $r = f_1 (I_M)$
$r = f (X_{Fe'})$	0,259	0,250	0,211	0,156	0,134	0,138	

$$r = f_2 (I_M) = \frac{R_{M'} s}{E_1} I_M = \frac{0,84 \cdot 5,25}{1928} I_M$$

$$r = f_2 (I_M) = 2,287 \cdot 10^{-3} I_M$$

Im Schnittpunkt der Funktionen $f_1 (I_M)$ und $f_2 (I_M)$ ergibt sich ein Gesamtreduktionsfaktor für die Fernmeldeanlage von

$$r_U = 0,135$$

Der mit magnetischer Bewehrung erreichte Reduktionsfaktor $r_U = 0,135$ ist kleiner als der geforderte Reduktionsfaktor $r_g = 0,156$. Zusätzliche Leiter zur Verbesserung des Reduktionsfaktors werden somit nicht benötigt.

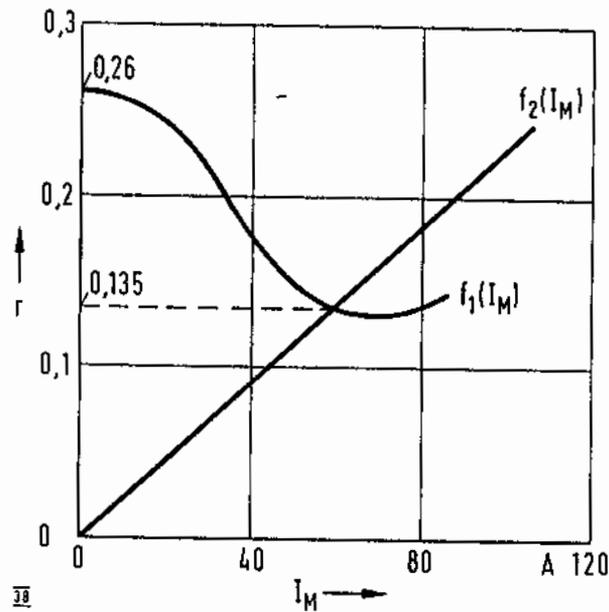


Bild 38: Graphische Darstellung der Funktionen $f_1(I_M)$ und $f_2(I_M)$

12.7. Vergleich der verschiedenen Methoden zur Ermittlung des resultierenden Reduktionsfaktors bei mehreren Kompensationsleitern (Beispiel zu Punkt 8)

Es soll der Reduktionsfaktor der Leiteranordnung aus Beispiel 12.2 bestimmt werden.

Die Impedanzen berechnen sich zu

$$\underline{Z}_{01} = (0,247 + j 2,255) \Omega$$

$$\underline{Z}_{02} = (0,247 + j 2,905) \Omega$$

$$\underline{Z}_{03} = (0,247 + j 2,04) \Omega$$

$$\underline{Z}_{12} = (0,247 + j 2,255) \Omega$$

$$\underline{Z}_{13} = (0,247 + j 2,255) \Omega$$

$$\underline{Z}_{23} = (0,247 + j 2,04) \Omega$$

$$\underline{Z}_{22} = (0,734 + j 2,905) \Omega$$

$$\underline{Z}_{33} = (0,413 + j 2,725) \Omega$$

12.7.1. Exakte Berechnung des Reduktionsfaktors

Nach Gleichung (12) berechnet sich der Reduktionsfaktor zweier Kompensationsleiter zu

$$r = 1 - \frac{Z_{12} Z_{02}}{Z_{01} Z_{22}} k_2 - \frac{Z_{13} Z_{03}}{Z_{01} Z_{33}} k_3$$

$$k_2 = \frac{1 - \frac{Z_{03} Z_{23}}{Z_{02} Z_{33}}}{1 - \frac{Z_{23} Z_{32}}{Z_{22} Z_{33}}} = \frac{0,4745 e^{j0,36^\circ}}{0,5013 e^{-j9,17^\circ}} = 0,9334 + j0,1567$$

$$k_3 = \frac{1 - \frac{Z_{02} Z_{32}}{Z_{03} Z_{22}}}{1 - \frac{Z_{23} Z_{32}}{Z_{22} Z_{33}}} = \frac{0,1625 e^{-j75,81^\circ}}{0,5013 e^{-j9,17^\circ}} = 0,1285 - j0,2975$$

Mit den oben angegebenen Zahlenwerten erhält man

$$r = 1 - (0,8715 + j0,2975) - (0,1024 - j0,2188)$$

$$r = 0,0261 - j0,0787$$

$$r = 0,0829 e^{-j71,56^\circ}$$

oder als Betrag

$$r = 0,0829$$

12.7.2. Näherungsweise Berechnung des Reduktionsfaktors

Bei der näherungsweise Berechnung des Reduktionsfaktors geht man grundsätzlich von den Einzelreduktionsfaktoren nach Gleichung (5) aus, d.h. man berechnet den Reduktionsfaktor eines Kompensationsleiters so, als ob andere Kompensationsleiter nicht vorhanden wären.

Für den Leiter 2 gilt

$$r_2 = 1 - \frac{Z_{12} Z_{02}}{Z_{01} Z_{22}} = 0,1625 e^{-j75,81^\circ}$$

$$r_2 = 0,1625$$

Für den Leiter 3 ergibt sich

$$r_3 = 1 - \frac{Z_{13} Z_{03}}{Z_{01} Z_{33}} = 0,2557 e^{-j 5,00^\circ}$$

$$r_3 = 0,2557$$

Multiplikationsverfahren

Nach Gleichung (58) gilt für den resultierenden Reduktionsfaktor

$$r = r_2 \cdot r_3 = 0,1625 \cdot 0,2557 = 0,0416$$

Leitwertadditionsverfahren

Für $R_E = 0$ erhält man aus den Diagrammen 13.1 und 13.2:

$$r_2 = 0,1625 \longrightarrow G_2' = 10 \frac{\text{km}}{\Omega}$$

$$r_3 = 0,2557 \longrightarrow G_3' = 6 \frac{\text{km}}{\Omega}$$

$$r = 0,1 \longleftarrow G' = 16 \frac{\text{km}}{\Omega}$$

Kehrwertadditionsverfahren

Nach Gleichung (62) ergibt sich der resultierende Reduktionsfaktor zu

$$r = \frac{1}{\frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3}} = \frac{1}{\frac{1}{0,1625} + \frac{1}{0,2557}} = 0,0994$$

Ein Vergleich mit dem exakt berechneten Wert zeigt, daß das Multiplikationsverfahren einen erheblich zu kleinen Wert für den Reduktionsfaktor liefert, während die Ergebnisse des Leitwert- und Kehrwertadditionsverfahrens näherungsweise richtig sind und zugleich auf der sicheren Seite liegen.

12.8. Berücksichtigung der magnetisch wirksamen Bewehrung bei einem Kompensationsleiterbündel (Beispiel zu Punkt 10.2. auf der Basis der Gleichung (77))

Es sei für $s = 1$ km

$$G_X = 6,59 \text{ S}$$

Für einen Ersatzradius des Bündels von 21 cm, eine Frequenz $f = 50$ Hz und einen spezifischen Erdwiderstand

$$\rho_E = 50 \text{ } \Omega \text{ m ist}$$

$$\omega M = 0,508 \text{ } \Omega$$

Für 30 m Abstand zwischen beeinflussender Leitung und Kompensationsleiterbündel ist die Kopplungsimpedanz $0,194 \frac{\Omega}{\text{km}}$

Bei einem Produkt „ $3 I_0 \cdot$ (Reduktionsfaktor der beeinflussenden Leitung)“ von 2 kA

ist bei $s = 1$ km

$$E_1 = 2000 \cdot 0,194 \cdot 1 \text{ V}$$

$$E_1 = 388 \text{ V}$$

Das beeinflusste Kabel habe einen Bleimantel mit 35 mm Durchmesser unter Blei (= Innendurchmesser) und 1,7 mm Bleimanteldicke, wie das Kabel zu Bild 25.

Dann ist für $s = 1$ km

$$R_M = 0,84 \text{ } \Omega; \quad X_0 = 0,63 \text{ } \Omega$$

Dann ist

$$\omega M G_X R_M = 0,508 \cdot 6,59 \cdot 0,84 \text{ } \Omega$$

$$\omega M G_X R_M = 2,812 \text{ } \Omega$$

und

$$X_0 \omega M G_X = 0,63 \cdot 0,508 \cdot 6,59 \text{ } \Omega$$

$$X_0 \omega M G_X = 2,109 \text{ } \Omega$$

$$X_0 - \omega M = (0,63 - 0,508) \text{ } \Omega$$

$$X_0 - \omega M = 0,122 \text{ } \Omega$$

$$N = \sqrt{(X_0 \omega M G_X)^2 + (X_0 - \omega M)^2}$$

$$N = 2,113 \text{ } \Omega$$

$$\nu = \arctan \left(- \frac{X_0 - \omega M}{X_0 \omega M G_X} \right)$$

$$\nu = - 3,311^\circ$$

$$\frac{E_1 R_M}{s} = \frac{388 \cdot 0,84}{1} \frac{V \Omega}{km}$$

$$\frac{E_1 R_M}{s} = 325,92 \frac{V \Omega}{km}$$

Für 2 wählbare Werte von $\frac{U_M}{s}$ wird sodann die folgende Rechnung durchgeführt,

z. B. $\frac{U_M}{s} = 200 \frac{V}{km}$ und $\frac{U_M}{s} = 130 \frac{V}{km}$ die Rechnung entsprechend

den nachstehenden Spalten 3 und 4.

Spalte 1	Spalte 2	Spalte 3	Spalte 4	Spalte 5
$\frac{U_M}{s}$	$\frac{V}{km}$	200	130	138
$r_K = \cos \varphi$		0,350	0,353	0,347
φ	°	69,513	69,329	69,696
$\nu - \varphi$	°	-72,824	-72,640	-73,007
$\cos(\nu - \varphi)$		0,295	0,298	0,292
$\sin(\nu - \varphi)$		-0,955	-0,954	-0,956
$[r_K N \cos(\nu - \varphi) + R_M] = C$	Ω	1,058	1,062	1,054
$[r_K N \sin(\nu - \varphi) + \omega M G_X R_M] = D$	Ω	2,106	2,100	2,111
$\sqrt{C^2 + D^2}$	Ω	2,357	2,354	2,360
$\frac{E_1 R_M}{s} = \frac{E_1 R_M}{s \frac{U_M}{s}}$	Ω	1,630	2,507	2,362
$\frac{\sqrt{C^2 + D^2}}{s \frac{U_M}{s}}$		1,446	0,939	0,999

Da der Quotient in der untersten Zeile für die eine versuchsweise eingesetzte Feldstärke $130 \frac{\text{V}}{\text{km}}$ kleiner als 1 ist, für die andere eingesetzte Feldstärke $200 \frac{\text{V}}{\text{km}}$ größer als 1 ist, bestimmt man eine näher am richtigen Wert liegende Feldstärke durch Interpolation. Diese Feldstärke ist

$$\frac{U_M}{s} = 130 + (200 - 130) \frac{1 - 0,939}{1,446 - 0,939} \frac{\text{V}}{\text{km}}$$

$$\frac{U_M}{s} \approx 138 \frac{\text{V}}{\text{km}}$$

(Ergeben beide versuchsweise eingesetzten Feldstärken Quotientenwerte größer als 1, oder ergeben beide Feldstärken Quotientenwerte kleiner als 1, so tritt an die Stelle einer Interpolation eine Extrapolation, wie nachstehend auch noch gezeigt).

Da die zunächst eingesetzten Feldstärken $130 \frac{\text{V}}{\text{km}}$ und $200 \frac{\text{V}}{\text{km}}$ ziemlich weit auseinanderliegen und die Interpolation möglicherweise recht grob war, wird die Rechnung noch einmal für $\frac{U_M}{s} = 138 \frac{\text{V}}{\text{km}}$ durchgeführt (Spalte 5 vorstehender Aufstellung).

Man erhält nun in der untersten Zeile der Aufstellung einen Quotienten 0,999. Durch Extrapolation erhält man den genaueren $\frac{U_M}{s}$ -Wert

$$\frac{U_M}{s} = 138 + (138 - 130) \frac{1 - 0,999}{0,999 - 0,939} \frac{\text{V}}{\text{km}}$$

$$\frac{U_M}{s} = 138,1 \frac{\text{V}}{\text{km}}$$

Der abgerundete Wert bleibt also

$$\frac{U_M}{s} = 138 \frac{\text{V}}{\text{km}}$$

hierzu gehört

$$\kappa = 0,347$$

Der resultierende Reduktionsfaktor ist

$$r = \frac{U_1}{E_1}$$

Mit

$$U_1 = r_K \frac{U_M}{s} s$$

$$r_K = 0,347$$

$$\frac{U_M}{s} = 138 \frac{V}{km}$$

$$s = 1 \text{ km}$$

und

$$E_1 = 388 \text{ V}$$

$$r = \frac{0,347 \cdot 138 \cdot 1}{388}$$

$$r = 0,123$$

Probe: Für

$$\frac{U_M}{s} = 138 \frac{V}{km}$$

erhält man

$$\alpha = \arctan \frac{D}{C}$$

$$\alpha = 63,468^\circ$$

$$\frac{\frac{A}{U_M}}{s} = \frac{E_1 R_M}{s \frac{U_M}{s}} = 2,362 \Omega$$

$$\frac{\frac{A}{U_M}}{s} \cos \alpha = 1,055 \Omega$$

$$R_M = 0,84 \Omega$$

$$\frac{\frac{A}{U_M}}{s} \cos \alpha - R_M = 0,215 \Omega$$

$$\frac{\frac{A}{U_M}}{s} \sin \alpha = 2,113 \Omega$$

$$\omega M G_X R_M = 2,812 \Omega$$

$$\frac{A}{\frac{U_M}{s}} \sin \alpha - \omega M G_X R_M = 0,699 \Omega$$

$$Ne^{j\gamma} = 2,113 e^{-j3,311}$$

Einsetzen der Werte in Gleichung (76a) ergibt

$$r_k = \frac{0,215 - j0,699}{2,109 - j0,122}$$

$$r_k = 0,346 e^{-j69,6^\circ}$$

13. Diagramme

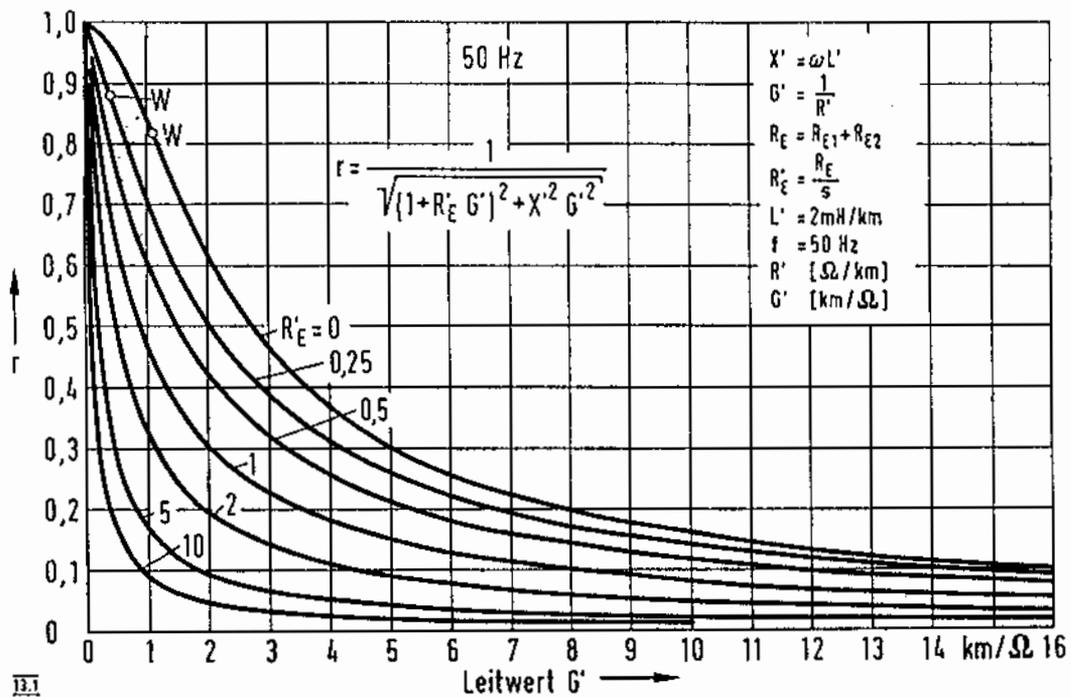


Diagramm 13.1.: Reduktionsfaktor in Abhängigkeit vom Leitwert G' bei $f = 50 \text{ Hz}$, für $G' = 0 \dots 15 \frac{\text{km}}{\Omega}$

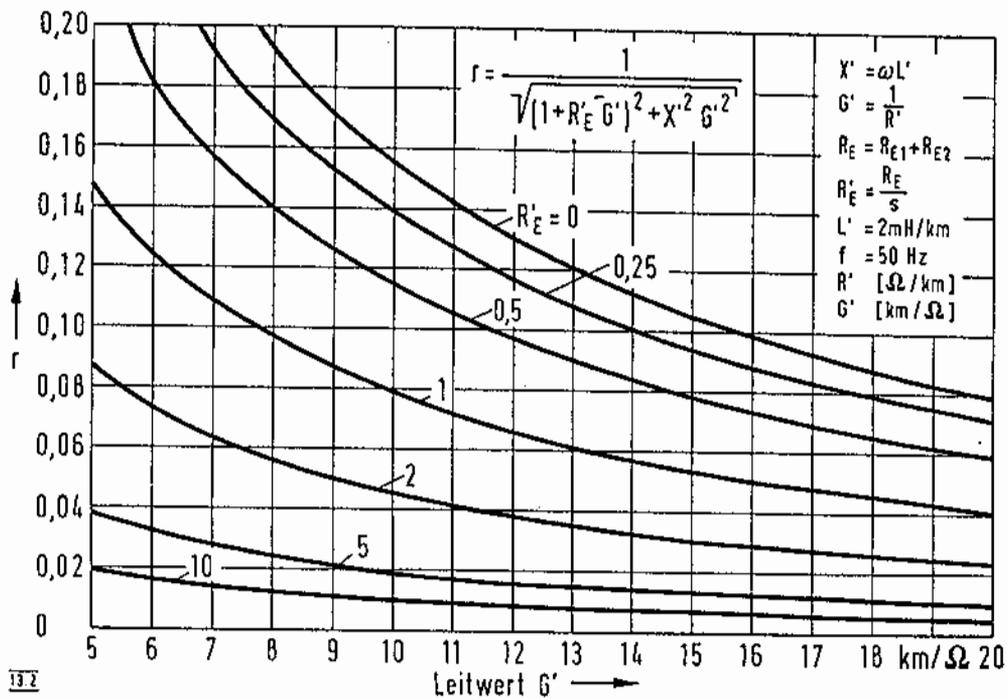


Diagramm 13.2.: Reduktionsfaktor in Abhängigkeit vom Leitwert G' bei $f = 50 \text{ Hz}$, für $G' = 5 \dots 20 \frac{\text{km}}{\Omega}$

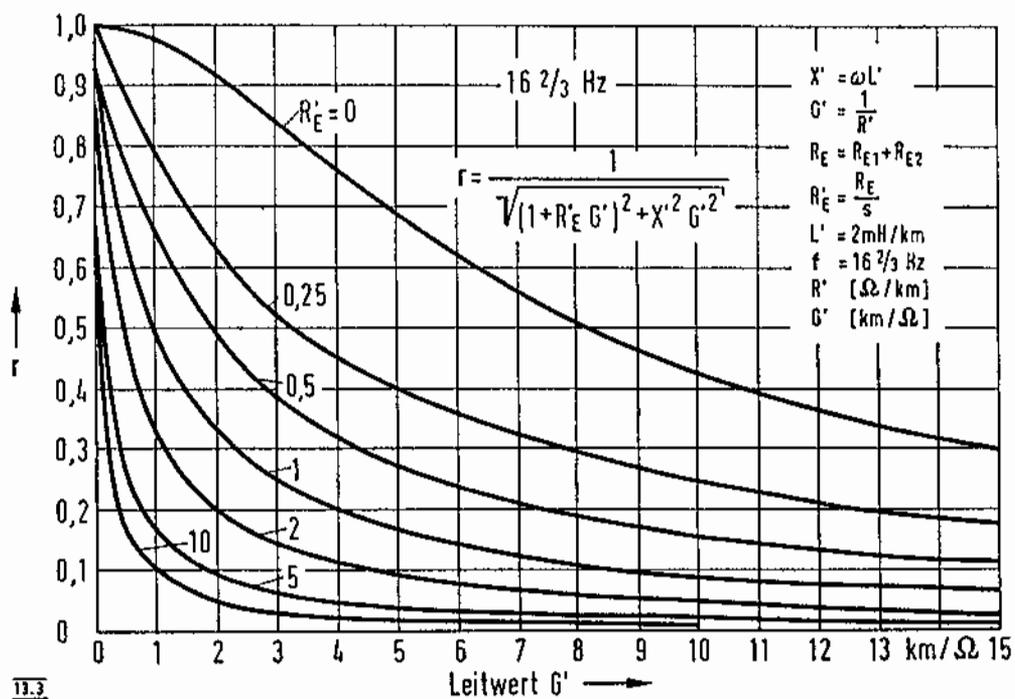


Diagramm 13.3.: Reduktionsfaktor in Abhängigkeit vom Leitwert G' bei $f = 16 \frac{2}{3} \text{ Hz}$, für $G' = 0 \dots 15 \frac{\text{km}}{\Omega}$

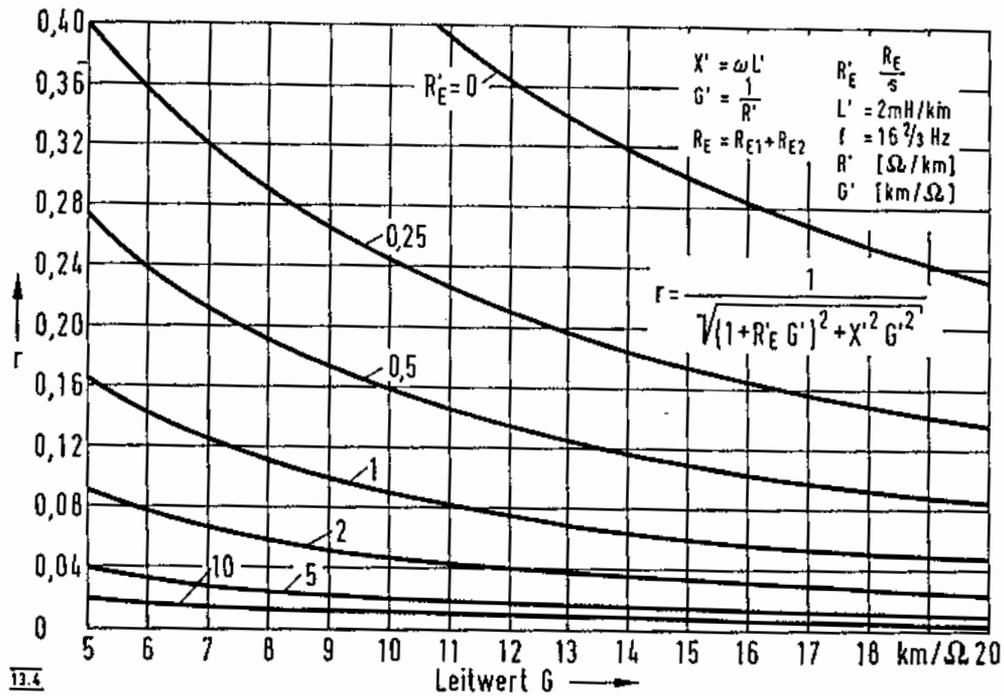
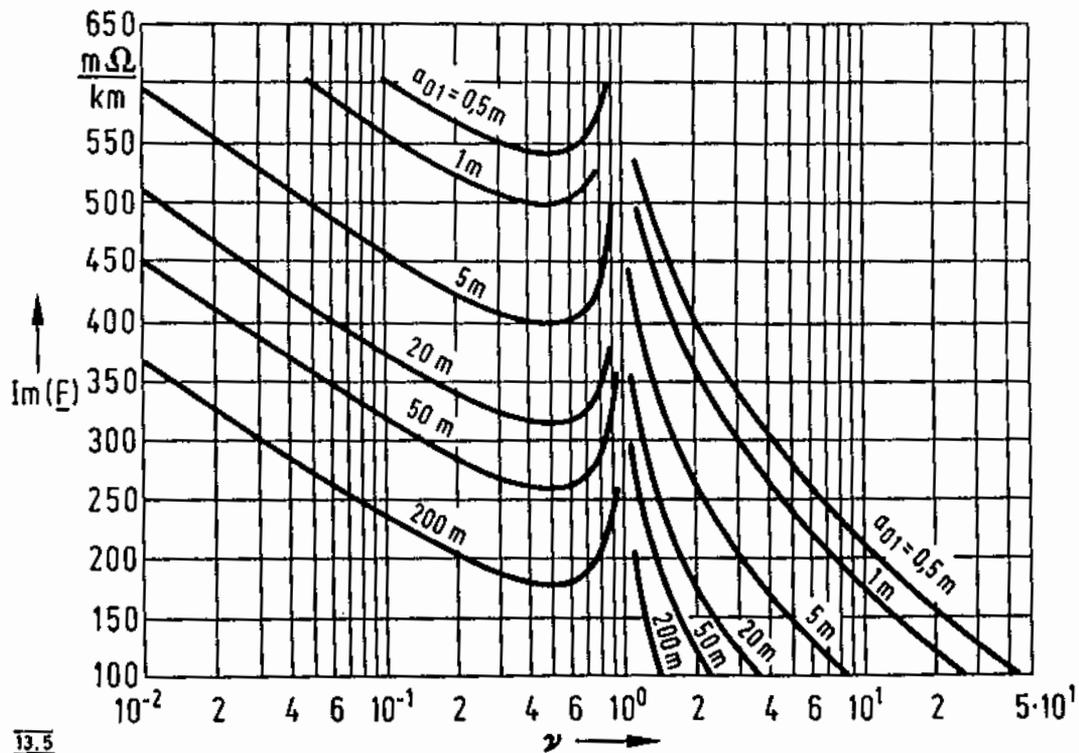


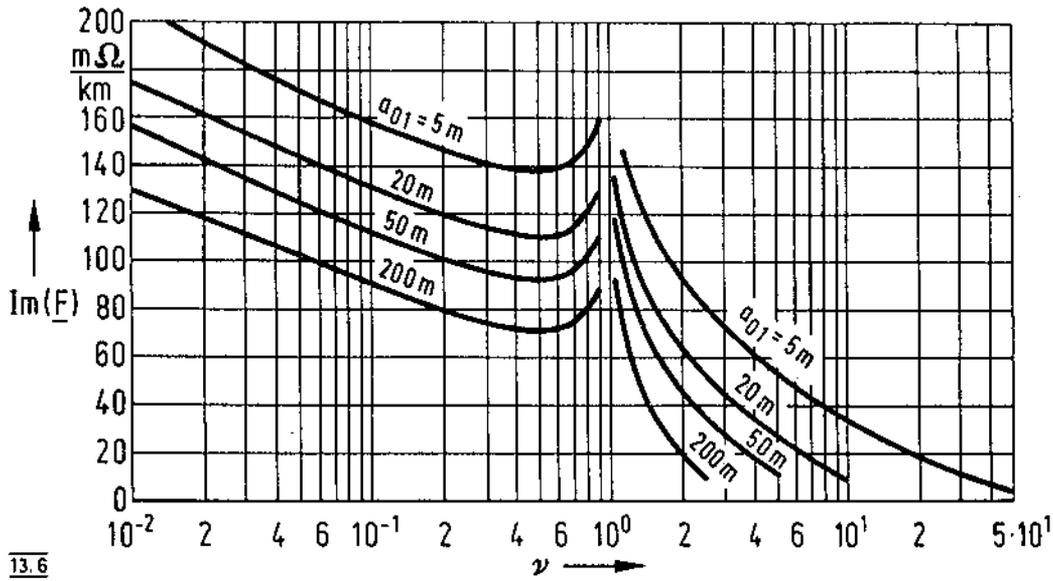
Diagramm 13.4.: Reduktionsfaktor in Abhängigkeit vom Leitwert G' bei $f = 16 \frac{2}{3} \text{ Hz}$, für $G' = 5 \dots 20 \frac{\text{km}}{\Omega}$



$\text{Im}(F)$ in Abhängigkeit vom Entfernungsverhältnis v

für 50 Hz und $50 \Omega \text{ m}$ spez. Erdwiderstand, wobei $v = \frac{a_{02}}{a_{01}}$

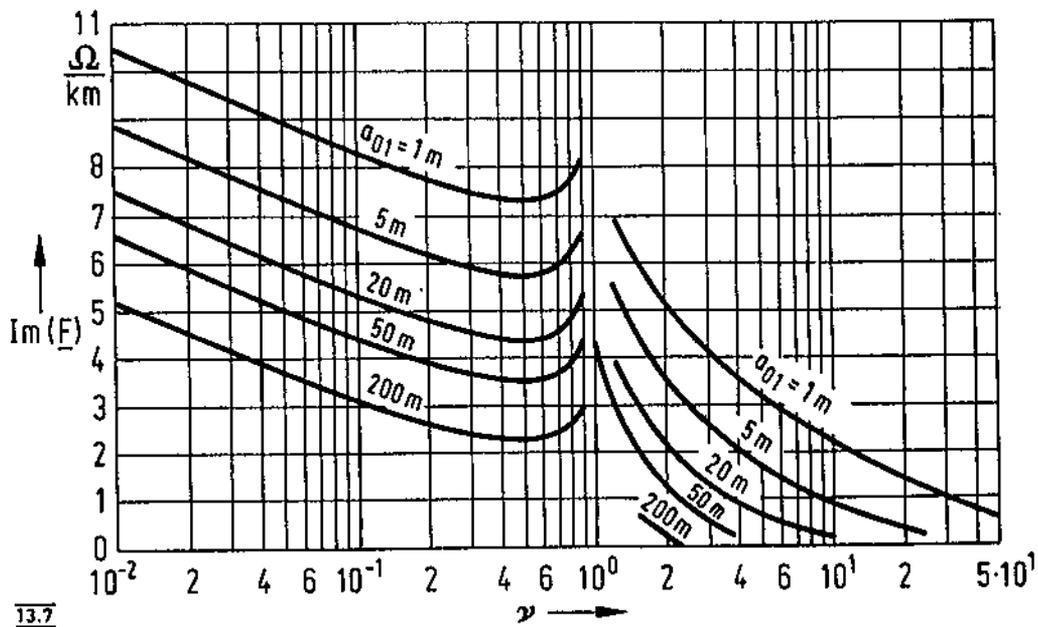
Diagramm 13.5.: Imaginärteil des Quotienten F nach Gleichung (5a) bei $f = 50 \text{ Hz}$ und $\rho_E = 50 \Omega \text{ m}$



Im (F) in Abhängigkeit vom Entfernungsverhältnis ν

für $16 \frac{1}{3}$ Hz und $30 \Omega \text{m}$ spez. Erdwiderstand, wobei $\nu = \frac{a_{02}}{a_{01}}$

Diagramm 13.6.: Imaginärteil des Quotienten \underline{F} nach Gleichung (5a) bei $f = 16 \frac{1}{3}$ Hz und $\rho_E = 30 \Omega \text{m}$



Im (F) in Abhängigkeit vom Entfernungsverhältnis ν

für 800 Hz und $200 \Omega \text{m}$ spez. Erdwiderstand, wobei $\nu = \frac{a_{02}}{a_{01}}$

Diagramm 13.7.: Imaginärteil des Quotienten \underline{F} nach Gleichung (5a) bei $f = 800$ Hz und $\rho_E = 200 \Omega \text{m}$

14. Tafeln

Kompensationsleiter	Bei 50 Hz und 50 Ω m spez. Erdwiderstand	Bei 16 $\frac{2}{3}$ Hz und 30 Ω m spez. Erdwiderstand	Bei 800 Hz und 200 Ω m spez. Erdwiderstand
Freileitungserdseil			
Stahl 50 mm ²	0,28 - j 0,16	0,37 - j 0,073	0,0059 - j 0,041
Aluminiumstahl 44/33	0,66 - j 0,86	1,55 - j 0,73	0,0106 - j 0,090
Aluminiumstahl 120/70	0,48 - j 1,24	2,35 - j 2,32	0,0081 - j 0,089
Aluminiumstahl 185/32	0,38 - j 1,3	1,95 - j 2,86	0,0085 - j 0,095
Kupferseilerder von			
50 mm ² Querschnitt	0,58 - j 1,02	1,80 - j 1,17	0,0091 - j 0,088
70 mm ² Querschnitt	0,50 - j 1,16	1,97 - j 1,70	0,0086 - j 0,080
95 mm ² Querschnitt	0,42 - j 1,23	1,98 - j 2,35	0,0082 - j 0,091
Stahlbänderder 40 x 4	0,64 - j 0,68	1,24 - j 0,47	0,011 - j 0,084
Bleimantel-Kabel			
10-kV-NKBA-Kabel			
3 x 120	0,22 - j 0,20	1,01 - j 0,25	0,060 - j 0,021
PM 50 x 2 x 0,8 *)	0,41 - j 0,13	0,45 - j 0,05	0,024 - j 0,088
PM 500 x 2 x 0,4 **)	0,64 - j 0,49	0,99 - j 0,27	0,013 - j 0,086
Ein Gleis einer elektrisch betriebebenen Bahn	0,2 - j 1,4	1,0 - j 5,0	0,01 - j 0,12
Zwei Gleise einer elektrisch betriebebenen Bahn	0,35 - j 2,2	1,2 - j 5,5	0,02 - j 0,14

*) unbewehrtes Bleimantelkabel im Bezirksnetz

**) unbewehrtes Bleimantelkabel im Ortsnetz

Tafel 14.1.: Reziprokwert $Y_{22}' \left[\frac{\text{km}}{\Omega} \right]$ des Impedanzbelages von Kompensationsleitern bei Stromrückleitung über Erde

15. Zusammenstellung der verwendeten Formelzeichen

15.1. Indices für Leiterbezeichnung

Allgemeiner Beeinflussungsfall	Beeinflussungsfall mit Fernmeldekabel
0 ... beeinflussender Leiter	0 ... Starkstromleitung nach 2.1
1 ... beeinflusster Leiter	MA .. (Fernmelde-)Meßader
2 ...)	M ... Metallmantel eines Fernmelde- kabel
3 ... } Kompensationsleiter	X ... zusätzlicher Kompensationsleiter
4 ... }	A ... dem Kabelmantel parallel ge- schaltete Fernmeldeadern

Mit obigen Indices versehene Formelzeichen sowie Größen, die nur zur Abkürzung längerer Formelausdrücke dienen und für sich allein stehend keine Bedeutung haben (wie z. B. $\underline{Z}_F = R_M + jX_{Fe}$), sind in der folgenden Formelzeichenzusammenstellung nicht berücksichtigt.

15.2. Großbuchstaben

A	Querschnitt
C_N	Erdkapazität eines kontinuierlich geerdeten Kompensationsleiters
D	Durchmesser, allgemein
D_a	Außendurchmesser (von Rohrleitungen)
E	induzierte Längsspannung ohne den oder die betrachteten Kompensationsleiter
G	Leitwert, allgemein
G_g	äquivalenter Leitwert zum Reduktionsfaktor r_g
G_U	(fiktiver) Leitwert eines Kabelmantels in der Umgebung von Kompensationsleitern
G_z	für die Schutzmaßnahme zusätzlich benötigter Leitwert
H	Ersatzhalbmesser
I	induzierender Strom
I_a	ausgeglichene Stromverteilung in einem kontinuierlich geerdeten Kompensationsleiter
I_F	Betriebsstrom in einer Fahrleitung
I_g	Gesamtstrom in einem Kompensationsleiterbündel
I_k	Erdkurzschlußstrom einer Fahrleitung
I_{k1}''	einpoliger Erdkurzschlußstrom im Drehstromnetz
$\text{Im} ()$	Imaginärteil von ()
I_{mess}	Meßstrom
I_o	Nullstromkomponente in einem Mehrphasenstarkstromsystem

L	Induktivität einer Schleife Leiter – Erde
L_o	Induktivität der Schleife (unbewehrter) Fernmeldekabelmantel – Erde
L_{Fe}	zusätzliche Induktivität der Schleife Fernmeldekabelmantel – Erde durch den Einfluß der magnetisch wirksamen Bewehrung
M	Gegeninduktivität
R	Gleichstromwiderstand
R_e	Ausbreitungswiderstand der Erde
$Re ()$	Realteil von ()
R_E	Erdungswiderstände
R_{E1}	
R_{E2}	
R_i	Innenwiderstand des Meßgerätes
R_{Mast}	Masterdungswiderstand
R_N	Ableitwiderstand eines kontinuierlich geerdeten Kompensationsleiters
U	induzierte und durch Kompensationsleiter reduzierte Spannung
U_E	Erdungsspannung
U_n	Nennspannung
U_o	Verlagerungsspannung an der Fehlerstelle
U_{zul}	zulässige Beeinflussungsspannung
W_L	Erdseilimpedanz eines Freileitungsspannfeldes
X	Erdkreisreaktanz ($X = \omega L$)
Y	Reziprokwert von Z
Z	Wechselstromwiderstand (Impedanz)
Z_N	Querimpedanz eines kontinuierlich geerdeten Kompensationsleiters
Z_w	Wellenwiderstand
Z_∞	Kettenleiterimpedanz des Erdseils auf einer Seite des vom Fehler betroffenen Freileitungsmastes

15.3. Kleinbuchstaben

a	Abstand zwischen zwei Leitern
c	Faktor zur Berücksichtigung der kontinuierlichen Erdung eines Kompensationsleiters
d	(Wand-)Dicke
f	Frequenz
$f ()$	Funktion von ()
h	Zusatzstrom bei kontinuierlich geerdeten Kompensationsleitern
h_H	hinlaufende Welle
h_R	rücklaufende Welle
k	Faktor zur Bestimmung der Stromverteilung
m	Anzahl der dem Kabelmantel parallel geschalteten Adern
p	Faktor zur Bestimmung der Stromverteilung
q	Reflexionsfaktor
r	Reduktionsfaktor (nach Gleichung 1)
r_E	Erdseilreduktionsfaktor
r_g	für die Schutzmaßnahme erforderlicher Gesamtreduktionsfaktor
r_K	Fernmeldekabelmantelreduktionsfaktor, allgemein
$r_{K AM}$	spezielle Fernmeldekabelmantelreduktionsfaktoren nach Bild 14
$r_{K E}$	
$r_{K E1}$	
$r_{K E2}$	

r_{ko}	Reduktionsfaktor eines bewehrten Fernmeldekabels bei sehr kleinen induzierten Spannungen
r_s	Schienenreduktionsfaktor
r_U	Reduktionsfaktor eines Fernmeldekabelmantels mit Berücksichtigung der Wirkungen der in der Umgebung vorhandenen unbekanntenen Kompensationsleiter
r_V	Reduktionsfaktor eines Starkstromkabelmantels
r_z	für die Schutzmaßnahme zusätzlich benötigter Reduktionsfaktor
s	Länge der Beeinflussungsstrecke
V_j	Stromfaktor
w	Erwartungsfaktor
x	} Koordinaten
x_o	
y	

15.4. Griechische Buchstaben

γ	Ausbreitungskoeffizient
ρ	spezifischer Widerstand
ρ_E	spezifischer Erdwiderstand
μ	Permeabilitätszahl
ω	Kreisfrequenz ($\omega = 2 \pi f$)
κ	Spezifischer Leitwert

15.5. Bemerkungen

Apostrophierte Zeichen sind auf 1 km bezogene Größen (z. B. R').

Unterstrichene Zeichen sind Zeiger (z. B. \underline{U} , \underline{I} , \underline{Z})

Die Bedeutung der Symbole mit Indices geht aus den Bildern und aus dem Text hervor.

16. Literaturverzeichnis

- [1] Funk, G.: Verfahren zur Bestimmung der Stromverteilung auf Erde, Erdseile, Bodenseile und Erdungsanlagen bei einem Erdkurzschluß an homogenen und inhomogenen Drehstrom-Freileitungen. Diss. TH Aachen 1964.
- [2] Kuhnert, E. und Latzel, G.: Die Berechnung der Stromverteilung auf Erdseil, Maste, Erdrückleitung bei einpoligen Fehlern in Hochspannungsnetzen mit Sternpunktterdung. Elektrizitätswirtschaft, Bd. 66 (1967) H. 22, S. 684–690.
- [3] Kuhnert, E. und Latzel, G.: Die Verteilung des Fehlerstromes auf Erdseil und Masterdungen bei stationsnahe Fehler in Hochspannungsnetzen mit Sternpunktterdung. Elektrizitätswirtschaft, Bd. 67 (1968) H. 23, S. 681–685.
- [4] Funk, G.: Der Kurzschluß im Drehstromnetz. Oldenbourg Verlag, 1962, S. 80.
- [5] Funk, G.: Kurzschlußstromberechnung. Elitera-Verlag Berlin, 1974, S. 8.

- [6] Menemenlis, C.: Induktive Beeinflussung einer Rohrleitung und ihres Steuerkabels durch eine parallellaufende Hochspannungsleitung. Bull. SEV, Bd. 57 (1966), H. 8, S. 366–376.
- [7] Röhrli, G.: Berechnung der induzierten Längsspannungen an hochspannungsbeeinflussten Rohrleitungen. Elektrische Bahnen 38 (1967), H. 1, S. 19.
- [8] Kaiser, G.: Die elektrischen Konstanten von Rohrleitungen und ihre Messung. ETZ A, Bd. 87 (1966), H. 22, S. 792–796.
- [9] Böcker, H., und Öding, D.: Induktionsspannungen an Pipelines in Trassen von Hochspannungsleitungen. Elektrizitätswirtschaft, Bd. 65 (1966), H. 5, S. 157–170.
- [10] Pohl, J.: Hochspannungsbeeinflussung von Rohrleitungen. gwf—gas/erdgas, Bd. 116 (1975), H. 3, S. 105–111.
- [11] Funk, G.: Berechnung der Nullstromverteilung bei Erdkurzschluß einer Freileitung. ETZ A, Bd. 92 (1971), H. 2, S. 74–80.
- [12] Pohl, J.: Grundlagen für die Berechnung der induktiven Beeinflussung einer Rohrleitung bei Parallelführungen mit Hochspannungsfreileitungen oder Wechselstrombahnen. Bericht VEW, Abt. H ET K, 20. 2. 1976.
- [13] Dennhardt, A.: Elektrische Beeinflussungstechnik, Hütte, Bd. IV B, S. 1403, Verlag Ernst und Sohn, Berlin 1962.
- [14] Michailow, M. J.: Elektrische Parameter von metallischen Rohrleitungen im Erdboden. Elektrices two, Bd. 82 (1963), H. 5, S. 60–63.
- [15] Feist, K.-H.: Die Erderspannung geerdeter stromdurchflossener Leiter bei Wechselstrom niedriger Frequenz. Diss. TH Hannover 1958, Formel (88), S. 59–64.
- [16] Feist, K.-H.: Beitrag zur Erdungsbemessung in Netzen mit starrer Sternpunktterdung. VDE-Fachberichte 1956, S. I/52–I/57 (insbesondere I/54).
- [17] Feist, K.-H.: Wirkung und Auswahl der Erderanordnungen für Freileitungsmaste in Hochspannungsnetzen. Siemens-Zeitschrift, Bd. 35 (1961), H. 10, S. 715–722. Formeln (1) bis (3).
- [18] Funk, G.: Größe, Verteilung und Wirkungen unsymmetrischer Kurzschlußströme. ETZ A, Bd. 87 (1966), H. 11, S. 368–372.
- [19] Illgen, M.: Die Ausnutzungsmöglichkeiten des Larza. Elektrizitätswirtschaft, Bd. 75 (1976). H. 19, S. 616–619.
- [20] Directives concerning the protection of telecommunication lines against harmful effects from electricity lines. The International Telecommunication Union Genf 1963, S. 197–202.
- [21] Feist, K.-H.: Über den Reduktionsfaktor von Starkstromkabeln. Siemens-Zeitschrift, Bd. 39 (1965), H. 1, S. 61–67.