

	Grundnorm für die Berechnungs- und Messverfahren bezogen auf die Beeinflussung von Telekommunikationssystemen durch elektrische Energieversorgungs- und Bahnstromsysteme Deutsche Fassung prEN 50351:2000	EN 50351
	Diese Norm ist zugleich eine VDE-Bestimmung im Sinne von VDE 0022. Sie ist nach Durchführung des vom VDE-Vorstand beschlossenen Genehmigungsverfahrens unter nebenstehenden Nummern in das VDE-Vorschriftenwerk aufgenommen und in der etz Elektrotechnische Zeitschrift bekannt gegeben worden.	Klassifikation VDE 0845 Teil 6-1
Einsprüche bis 2001-06-30		
Für den Anwendungsbereich dieser Norm existieren keine entsprechenden Internationalen Normen		
ICS 33.040.20; 33.100.01 Basic standard for the calculation and measurement methods relating to the influence of electric power supply and traction systems on telecommunication systems; German version prEN 50351:2000 Mit E DIN EN 50352 (VDE 0845 Teil 6-2):2001-05 vorgesehen als Ersatz für DIN VDE 0228-1 (VDE 0228 Teil 1):1987-12, DIN VDE 0228-2 (VDE 0228 Teil 2):1987-12 und DIN VDE 0228-3 (VDE 0228 Teil 3):1988-09 Anwendungswarnvermerk Dieser Norm-Entwurf wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt. Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfes besonders zu vereinbaren. Stellungnahmen werden erbeten an die Deutsche Elektrotechnische Kommission im DIN und VDE (DKE), Stresemannallee 15, 60596 Frankfurt am Main. Beginn der Gültigkeit Diese Norm gilt ab ... Nationales Vorwort Für den vorliegenden Norm-Entwurf ist das nationale Arbeitsgremium UK 767.2 „Niederfrequente Felder“ der Deutschen Elektrotechnischen Kommission im DIN und VDE (DKE) zuständig. Fortsetzung Seite 2 und 3 und 36 Seiten prEN und 37 Seiten Englische Fassung Deutsche Elektrotechnische Kommission im DIN und VDE (DKE)		

Dieser Norm-Entwurf enthält die Deutsche Fassung „Schluss-Entwurf“ des Europäischen Norm-Entwurfs prEN 50351:2000-10 „Grundnorm für die Berechnungs- und Messverfahren bezogen auf die Beeinflussung von Telekommunikationssystemen durch elektrische Energieversorgungs- und Bahnsysteme“.

Da die Deutsche Fassung noch nicht endgültig mit der Englischen und der Französischen Fassung abgeglichen ist, ist die englische Originalfassung des Schluss-Entwurfs prEN 50351 beigefügt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den mitaufgenommenen englischen Text.

Der „Schluss-Entwurf“ prEN 50351:2000-10 „Basic standard for the calculation and measurement methods relating to the influence of electric power supply and traction systems on telecommunication systems Basic standard for the calculation and measurement methods relating to the influence of electric power supply and traction systems on telecommunication systems“ wurde vom TC 210 „EMV“ des Europäischen Komitees für Elektrotechnische Normung (CENELEC) erarbeitet und von CENELEC den Nationalen Komitees zur Stellungnahme vorgelegt.

Der vorliegende Schluss-Entwurf beschreibt die entsprechenden Berechnungs- und Messverfahren, die für die Beurteilung der Beeinflussung von Telekommunikationssystemen durch elektrische Energieversorgungs- und Bahnstromsysteme bezüglich der Einhaltung der in dem Europäischen Norm-Entwurf prEN 50352:2000 festgelegten Grenzwerte anwendbar sind. Die Deutsche Fassung des Schluss-Entwurfs prEN 50352:2000 wurde zeitgleich mit dem vorliegenden Entwurf als E DIN EN 50352 (VDE 0845 Teil 6-2):2000-05 veröffentlicht.

Es ist nicht vorgesehen, die Fundstelle der späteren Europäischen Norm EN 50351 im Europäischen Amtsblatt (en: OJEC) zu veröffentlichen.

Aufgrund der für die Normung im Bereich des Beeinflussungs- und Überspannungsschutzes von Telekommunikationseinrichtungen und –systemen vorgesehenen Umstrukturierung wurde dem vorliegenden Entwurf die VDE-Klassifikation VDE 0845 zugeordnet.

Änderungen

Gegenüber DIN VDE 0228-1 (VDE 0228 Teil 1):1987-12, DIN VDE 0228-2 (VDE 0228 Teil 2):1987-12 und DIN VDE 0228-3 (VDE 0228 Teil 3):1988-09 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Nummer und Titel der Norm geändert;
- b) als Ergebnis der europäischen Normung wurde der Inhalt der vorgenannten Normen neu strukturiert, neu bearbeitet, gekürzt und redaktionell überarbeitet; hierbei wurden u.a.:
- c) die Festlegungen bezüglich Grenzwerte und Mess- und Berechnungsverfahren auf zwei Europäische Normen aufgeteilt;
- d) in die vorliegende Norm wurden die Festlegungen zu den Messverfahren bezogen auf den Schutz von Telekommunikationssystemen und –anlagen gegen Beeinflussungen von Wechselstrom-, Gleichstrom- und Bahnstromversorgungs-Energieversorgungsanlagen aufgenommen und damit in einer Norm zusammengefasst.

Nationaler Anhang NA (informativ)

Zusammenhang mit Europäischen und Internationalen Normen

Für den Fall einer undatierten Verweisung im normativen Text (Verweisung auf eine Norm ohne Angabe des Ausgabedatums und ohne Hinweis auf eine Abschnitsnummer, eine Tabelle, ein Bild usw.) bezieht sich die Verweisung auf die jeweils neueste gültige Ausgabe der in Bezug genommenen Norm.

Für den Fall einer datierten Verweisung im normativen Text bezieht sich die Verweisung immer auf die in Bezug genommene Ausgabe der Norm.

Der Zusammenhang der in diesem Norm-Entwurf zitierten Normen mit den entsprechenden Deutschen Normen ist nachstehend wiedergegeben. Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieser Norm waren die angegebenen Ausgaben gültig.

IEC hat 1997 die Benummerung der IEC-Publikationen geändert. Zu den bisher verwendeten Normnummern wird jeweils 60000 addiert. So ist zum Beispiel aus IEC 68 nun IEC 60068 geworden.

Tabelle NA.1

Europäische Norm	Internationale Norm	Deutsche Norm	Klassifikation im VDE-Vorschriftenwerk
prEN 50352:2000	-	E DIN EN 50352 (VDE 0845 Teil 6-2):2000-05	VDE 0845 Teil 6-2
-	IEC 60050 (161):1990 + A1:1997 + A2:1998	Deutsche Ausgabe des Internationalen Elektrotechnischen Wörterbuchs - Kapitel 161: Elektromagnetische Verträglichkeit:1999	-

Nationaler Anhang NB (informativ) **Literaturhinweise**

E DIN EN 50352 (VDE 0845 Teil 6-2), *Grenzwerte bezogen auf die Beeinflussung von Telekommunikationssystemen durch elektrische Energieversorgungs- und Bahnsysteme; Deutsche Fassung prEN 50352:2000*

Deutsche Ausgabe des Internationalen Elektrotechnischen Wörterbuchs - Kapitel 161: Elektromagnetische Verträglichkeit, *Deutsche Ausgabe des Internationalen Elektrotechnischen Wörterbuchs - Kapitel 161: Elektromagnetische Verträglichkeit; Konsolidierte Fassung aus IEC 60050-161:1990-08, Änderung 1:1997-10 und Änderung 2:1998-04*

– Leerseite –

Deutsche Fassung

**Grundnorm für die Berechnungs- und Messverfahren bezogen auf die
Beeinflussung von Telekommunikationssystemen durch elektrische
Energieversorgungs- und Bahnstromsysteme**

Basic standard for the calculation and
measurement methods relating to the
influence of electric power supply and
traction systems on telecommunication
systems

Dieser Europäische Norm-Entwurf wird den CENELEC-Mitgliedern zur CENELEC-Umfrage vorgelegt.

Er wurde vom Technischen Komitee CENELEC TC 210 erstellt.

Wenn aus diesem Norm-Entwurf eine Europäische Norm wird, sind die CENELEC-Mitglieder gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäischen Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist.

Dieser Europäische Norm-Entwurf wurde von CENELEC in drei offiziellen Fassungen (Deutsch, Englisch, Französisch) erstellt. Eine Fassung in einer anderen Sprache, die von einem CENELEC-Mitglied in eigener Verantwortung durch Übersetzung in seine Landessprache gemacht und dem Zentralsekretariat mitgeteilt worden ist, hat den gleichen Status wie die offiziellen Fassungen.

CENELEC-Mitglieder sind die nationalen elektrotechnischen Komitees von Belgien, Dänemark, Deutschland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Luxemburg, Niederlande, Norwegen, Österreich, Portugal, Schweden, Schweiz, Spanien, Tschechische Republik und dem Vereinigten Königreich.

Warnvermerk: Dieses Schriftstück hat noch nicht den Status einer Europäischen Norm. Es wird zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt. Es kann sich noch ohne Ankündigung ändern und darf nicht als Europäische Norm in Bezug genommen werden.

CENELEC

Europäisches Komitee für Elektrotechnische Normung
European Committee for Electrotechnical Standardization
Comité Européen de Normalisation Electrotechnique

Zentralsekretariat: rue de Stassart 35, B-1050 Brüssel

© 2000 CENELEC – Alle Rechte der Verwertung, gleich in welcher Form und in welchem Verfahren, sind weltweit den Mitgliedern von CENELEC vorbehalten.

Ref. Nr. prEN 50351:2000 D



Documents

Document Sharing Hub

Vorwort

Dieser Entwurf wurde von der WG 3 des Technischen Komitees CENELEC TC 210, Electromagnetic compatibility (EMC), in Übereinstimmung mit den Beschlüssen der 21. Sitzung des CLC TC 210 ausgearbeitet.

Er wurde dem Einstufigen Annahmeverfahren (UAP) unterworfen.

Nachstehende Daten werden vorgeschlagen:

- spätestes Datum, zu dem die EN auf nationaler Ebene angekündigt werden muss (doa): 2002-02-01
- spätestes Datum, zu dem die EN auf nationaler Ebene durch Veröffentlichung einer identischen nationalen Norm oder durch Anerkennung übernommen werden muss (dop): 2002-08-01
- spätestes Datum, zu dem nationale Normen, die der EN entgegenstehen, zurückgezogen werden müssen (dow): 2004-08-01

Diese Norm beschreibt die entsprechenden Berechnungs- und Messverfahren, die für die Beurteilung der Beeinflussung von Telekommunikationssystemen durch elektrische Energieversorgungs- und Bahnstromsysteme bezüglich der in EN 50352 festgelegten Grenzwerte anwendbar sind.

Diese Norm wird als eine prEN herausgegeben und ihre Fundstelle wird nicht im Europäischen Amtsblatt (en: OJEC) veröffentlicht werden.

Inhalt

Seite

Vorwort.....	2
1 Anwendungsbereich.....	4
2 Normative Verweisungen	4
3 Definitionen	4
4 Berechnungsverfahren.....	8
4.1 Grundlegende Parameter und Faktoren	8
4.1.1 Frequenz	8
4.1.2 Äquivalenter spezifischer Erdbodenwiderstand (ρ_e)	8
4.1.3 Reduktionsfaktoren (k)	11
4.2 Induktive Kopplung	14
4.2.1 Näherungsabstände im Fehlerfall	14
4.2.2 Näherungsabstände im Normalbetrieb	15
4.2.3 Berechnung der induzierten Spannungen	16
4.2.4 Berechnung der Gegenimpedanz	19
4.2.5 Induzierender Strom	22
4.3 Kapazitive Kopplung	27
4.4 Ohmsche Kopplung	27
4.5 Gleichzeitiges Auftreten verschiedener Kopplungsarten	28
5 Messverfahren.....	28
5.1 Messungen der asymmetrischen Spannung (Längsspannung)	28
5.2 Messungen der Geräuschspannung (psophometrischen Spannung)	28
5.3 Messung des kapazitiven Stroms	29
5.4 Notwendige Bedingungen der Wechselstrom-Starkstromanlagen bei der Durchführung von Messungen an Telekommunikationsleitungen.....	29
5.4.1 Simulierter Fehlerfall	29
5.4.2 Normalbetrieb	30
5.5 Notwendige Bedingungen bei der Durchführung von Messungen von induzierenden Strömen in Drehstromversorgungsleitungen	31
5.6 Notwendige Bedingungen bei der Durchführung von Messungen an Fahrstromleitungen	32
Anhang A (informativ) – Beispiel für eine komplexe Anordnung mit schrägen, kreuzenden und Doppelbeeinflussungs-Komponenten.....	33
Anhang B (informativ) – Werte für die Gewichtungsfaktoren bei der Frequenz f.....	35

1 Anwendungsbereich

Diese Grundnorm legt die Verfahren zur Berechnung und Messung von Strömen und Spannungen, die für die Beurteilung der Beeinflussung von Telekommunikationssystemen durch elektrische Energieversorgungs- und Bahnstromsysteme anwendbar sind, fest.

Zweck dieser Norm ist die Festlegung konsistenter Berechnungs- und Messverfahren für die Spannungen und/oder Ströme, die in einem Telekommunikationssystem durch ein oder mehrere Starkstromsysteme erzeugt werden.

Der Frequenzbereich für das in dieser Norm behandelte Phänomen umfasst 0 Hz bis 9 kHz. Die Grundfrequenzen für die berücksichtigten Wechselstrom-Starkstromsysteme betragen 50 Hz bei Energieversorgungssystemen und 16 2/3 Hz und 50 Hz bei Bahnstromsystemen. Gleichstrom-Starkstromsysteme werden in dieser Norm ebenfalls betrachtet.

Diese Norm gilt nicht für Wechselstrom-Starkstromsysteme mit Effektivwerten der Betriebsspannungen unter 1000 V.

Wenn bei der Beurteilung der Beeinflussung die beteiligten Parteien eine Vereinbarung treffen können bezüglich der Kriterien, die die zu überprüfende Situation kennzeichnen, und bezüglich der entsprechenden Berechnungs- und/oder Messverfahren für die Beeinflussungsergebnisse, dürfen sie diese vereinbarten Verfahren benutzen. Wenn die zwei Parteien keine Übereinstimmung erzielen können, müssen die in dieser Norm angegebenen Berechnungs- und Messverfahren angewandt werden.

2 Normative Verweisungen

Diese Europäische Norm enthält durch datierte oder undatierte Verweisungen Festlegungen aus anderen Publikationen. Diese normativen Verweisungen sind an den jeweiligen Stellen im Text zitiert, und die Publikationen sind nachstehend aufgeführt. Bei datierten Verweisungen gehören spätere Änderungen oder Überarbeitungen dieser Publikationen nur zu dieser Europäischen Norm, falls sie durch Änderung oder Überarbeitung eingearbeitet sind. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe der in Bezug genommenen Publikation (einschließlich Änderungen).

EN 50352^{*}, *Limits relating to the influence of electric power supply and traction systems on telecommunication systems*

IEC 60050-161 *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Chapter 161: Electromagnetic Compatibility*

ITU-T Recommendation K.10:1993-03, *Directives concerning the protection of telecommunication lines against harmful effects from electric power and electrified railway lines – Low-frequency interference due to unbalance about earth of telecommunication equipment*

3 Definitionen

Für die Anwendung dieser Norm gelten die nachstehenden Definitionen zusammen mit den Definitionen aus IEC 60050-161.

^{*} z. Z. im Entwurfsstadium

3.1

kapazitive Kopplung

Vorgang, bei dem das durch einen unter Spannung stehenden Leiter erzeugte elektrische Feld einen anderen Leiter beeinflusst; die Kopplung wird durch Kapazitäten zwischen den Leitern und dem beeinflussten Leiter gegen Erde bemessen.

3.2

Gleichtaktspannung; asymmetrische Spannung (Längsspannung), U_{common}

Spannung zwischen einem Telekommunikationssystem oder -anschluss (oder einem verdrehten Adernpaar innerhalb eines Telekommunikationskabels) und Erde (siehe Bild 1).

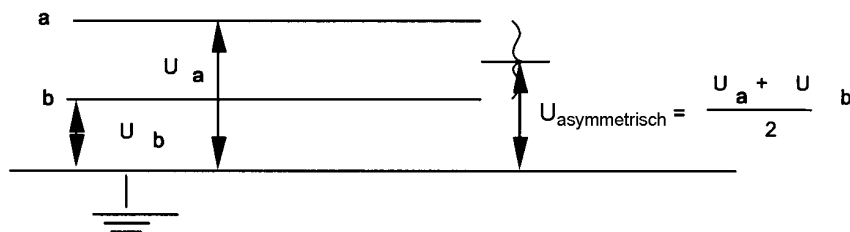


Bild 1- Gleichtaktspannung

3.3

ohmsche Beeinflussung (galvanische Kopplung)

Ohmsche Beeinflussung tritt auf, wenn ein Teil des Stroms eines Starkstromsystems zur Systemerde über das Telekommunikationssystem zurückfließt.

3.4

Näherungsabstand

Der maximal zu berücksichtigende Abstand zwischen einem Starkstromsystem und einem der Beeinflussung unterliegenden Telekommunikationssystem.

3.5

Gegentaktspannung; symmetrische Spannung (Querspannung), $U_{differential}$

Die Spannung zwischen zwei Leitern eines verdrehten Adernpaares innerhalb eines Telekommunikationskabels (siehe Bild 2).

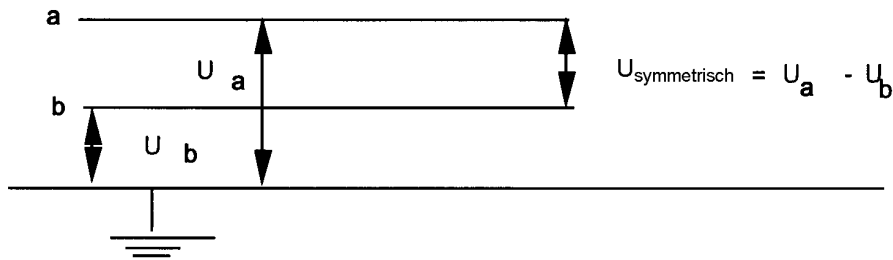


Bild 2- Gegentaktspannung

3.6

äquivalenter spezifischer Erdbodenwiderstand, ρ_e

Widerstand des homogenen Erdbodens, der die verschiedenen Arten des geschichteten Erdbodens an einer bestimmten Stelle repräsentiert.

3.7

Näherungslänge

Abstand zwischen dem Punkt, an dem die zu berücksichtigende Energieversorgungs- oder Bahnstromleitung in den Näherungsabstand der zu betrachtenden Telekommunikationsleitung kommt, und dem nächsten Punkt, an dem die Energieversorgungs- oder Bahnstromleitung den Näherungsabstand verlässt.

3.8

Fehlerfall

Unbeabsichtigte Verbindung von stromdurchflossenen Leitern zu Erde oder zu irgendeinem geerdeten metallenen Gegenstand.

3.9

induktive Kopplung

Vorgang, bei dem ein durch einen stromdurchflossenen Leiter erzeugtes magnetisches Feld einen anderen Leiter beeinflusst; die Kopplung wird durch die Gegeninduktivität der beiden Leiter bemessen.

3.10

Unsymmetriedämpfung (en: longitudinal conversation loss, LCL)

Der logarithmische Wert der Längsspannung, bezogen auf den Eingang eines Telekommunikationssystems, dividiert durch die dadurch hervorgerufene Querspannung.

$$LCL = 20 \log \frac{U_{common}}{U_{differential}} \quad \text{dB}$$

3.11

Normalbetrieb

Als Normalbetrieb irgendeines Systems wird der fehlerfreie Betrieb angenommen. Transiente (kurzzeitige) Vorgänge aufgrund von Schaltvorgängen in Starkstromsystemen werden als normal betrachtet.

3.12

Starkstromsystem

Allgemeine Bezeichnung, die elektrische Energieversorgungssysteme und Bahnstromsysteme umfasst.

3.13

Wechselstrom-Energieversorgungssystem

Zur elektrischen Energieübertragung bestimmtes elektrisches Wechselstromsystem, das Freileitungen, Kabel, Netzstationen (Schaltstationen) und alle Anlagen bzw. Einrichtungen, die mit ihm verbunden sind, umfasst.

ANMERKUNG 2-Phasen-Energieversorgungssysteme mit einer Betriebsfrequenz von $16 \frac{2}{3}$ Hz oder bestimmt zur Versorgung von Wechselstrom-Bahnssystemen müssen bei Berechnungen für den Fehlerfall wie Drehstromsysteme betrachtet werden.

3.14

Gleichstrom-Energieversorgungssystem

Zur elektrischen Energieübertragung bestimmtes elektrisches Gleichstromsystem, das Freileitungen, Kabel, Netzstationen (Schaltstationen) und alle Anlagen bzw. Einrichtungen, die mit ihm verbunden sind, umfasst.

3.15

Wechselstrom-Bahnstromsystem

Elektrisches Wechselstromsystem einer Bahn einschließlich elektrischer Zugantriebe und Schienen.

ANMERKUNG 2-Phasen-Bahnstromsysteme mit einer Betriebsfrequenz von $16 \frac{2}{3}$ Hz müssen als Wechselstrom-Energieversorgungssystem behandelt werden.

3.16

Gleichstrom-Bahnstromsystem

Elektrisches Gleichstromsystem einer Bahn einschließlich elektrischer Zugantriebe und Schienen.

3.17

Geräuschspannung

Gewichtete Spannung zur Nachbildung der Empfindlichkeit des menschlichen Ohrs in Abhängigkeit von der Frequenz.

3.18

Reduktionsfaktor k

Faktor kleiner als 1, der die Reduktion von Feldern stromdurchflossener Leiter von Starkstromsystemen durch vorhandene Schirme oder andere metallene Objekte beinhaltet.

3.19

Telekommunikationssystem

System das in der Lage ist, Information zwischen zwei oder mehreren Punkten mit Hilfe physikalischer Verbindungen zu übertragen. Die in dieser Norm berücksichtigten Telekommunikationssysteme sind solche mit metallenen Elementen (z. B. metallene Adern, Kabelmantel, verstärkter Lichtwellenleiter usw.).

4 Berechnungsverfahren

4.1 Grundlegende Parameter und Faktoren

4.1.1 Frequenz

Die zu betrachtenden Frequenzen sind:

- die Grundfrequenzen der Starkstromsysteme von 16 2/3 Hz (nur in einigen Ländern gebräuchlich) und 50 Hz, wenn Personengefährdung und Schäden am Telekommunikationssystem betrachtet werden.
- das Frequenzspektrum im Bereich von 0 bis 9 kHz der Beeinflussungsquelle bei der Bewertung von Störung und Fehlfunktion.

4.1.2 Äquivalenter spezifischer Erdbodenwiderstand (ρ_e)

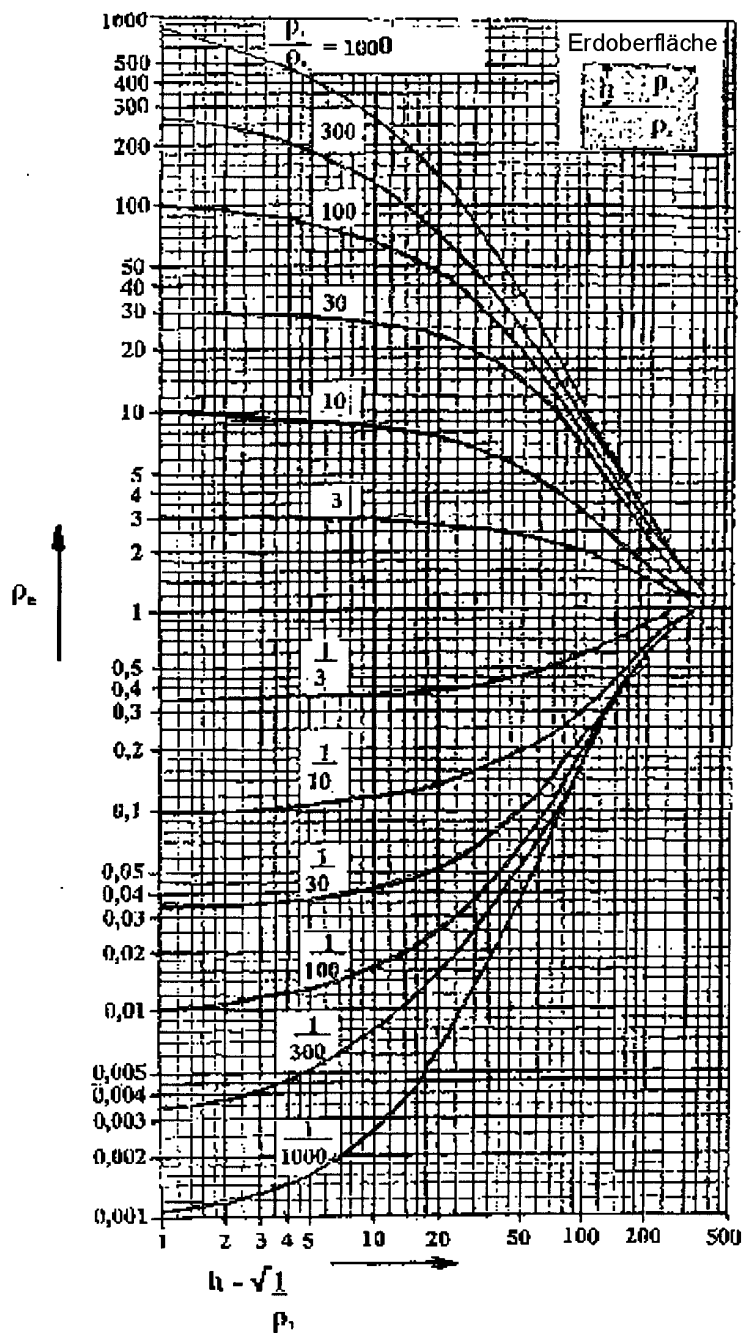
Der äquivalente spezifische Erdbodenwiderstand muss in allen entsprechenden Berechnungen verwendet werden, bei denen der spezifische Erdbodenwiderstand einbezogen ist.

Wenn der Erdboden nahezu homogen ist bis zu der Tiefe, die in Tabelle 1 angegeben ist, können die Widerstandswerte aus der Tabelle 1 verwendet werden. Wenn keine bekannten oder gemessenen Werte des spezifischen Erdbodenwiderstandes vorhanden sind, muss der größte Wert aus der Tabelle 1 für die Durchführung der Berechnung genommen werden.

Tabelle 1 - Näherungswerte des spezifischen Erdbodenwiderstandes

Geologische Eigenschaften	Bereich des spezifischen Erdbodenwiderstands (Ω m)	Tiefe des homogenen Erdbodens in m bei		
		16 2/3 Hz	50 Hz	800 Hz
Kohleschicht, Mineraliensicht	0,1 bis 5	50 bis 350	30 bis 200	10 bis 50
Leichter Ton, Schwemmland	5 bis 20	350 bis 700	200 bis 400	50 bis 100
Kreide, Mergel, Lehm Boden	20 bis 100	700 bis 1600	400 bis 900	100 bis 200
Quarze, Kalkstein, Sandstein, Tonschiefer	100 bis 1000	1600 bis 5000	900 bis 3000	200 bis 700
Urgestein, Schiefer, Granit, Kies	1000 bis 10000	5000 bis 16000	3000 bis 9000	700 bis 2000

Wenn der Erdboden aus bekannten zwei Lagen geschichtet ist, kann der äquivalente spezifische Erdbodenwiderstand aus Bild 3 bestimmt werden.



Darin sind:

- h (m) Tiefe der Trennungsfäche unter der Erdoberfläche
- f (Hz) die Frequenz des Systems, für das die Beeinflussung berechnet werden muss
- ρ_e (Ω m) der äquivalente spezifische Erdbodenwiderstand
- ρ_1 (Ω m) der äquivalente spezifische Erdbodenwiderstand der oberen Schicht
- ρ_2 (Ω m) der äquivalente spezifische Erdbodenwiderstand der unteren Schicht

Bild 3 - Äquivalenter spezifischer Erdbodenwiderstand für eine Erdstruktur mit zwei horizontalen Schichten

Mit der Kenntnis von h , f , ρ_1 und ρ_2 ist es möglich, ρ_e aus Bild 3 zu bestimmen.

4.1.3 Reduktionsfaktoren (k)

Die Verwendung von Reduktionsfaktoren drückt in praktischer Weise die Abschwächung der Beeinflussungswirkung durch metallene Objekte und Schirme aus.

Wenn mehrere schirmende Leiter vorhanden sind, wird der gesamte Reduktionsfaktor als Produkt der einzelnen Reduktionsfaktoren oder als Kehrwert der Summe der Kehrwerte der einzelnen Reduktionsfaktoren ermittelt. Der höhere Wert von beiden wird für die Berechnung verwendet.

4.1.3.1 Umweltreduktionsfaktor (k_c)

Ein Reduktionsfaktor k_c wird für die Berechnung der Längs-EMK verwendet, um Wirkungen örtlich vorhandener leitender Strukturen zu berücksichtigen.

k_c hat den Wert 1, außer in dicht besiedelten städtischen Gebieten, in denen ein kleinerer Wert nach Vereinbarung der interessierten Parteien benutzt werden darf.

Wenn entsprechende Messwerte von ρ für die Berechnungen verwendet werden, wurde die örtliche leitende Struktur durch die Messung erfasst, und k_c hat den Wert 1. Siehe 4.2.3.1 für Einzelheiten der Anwendung von k_c .

4.1.3.2 Reduktionsfaktor des beeinflussten Systems (k_t)

Dieser Reduktionsfaktor berücksichtigt den Effekt, dass der Aufbau eines Telekommunikationskabels eine Längs-EMK trägt, die durch einen stromdurchflossenen Leiter induziert wurde. Der Wert von k_t muss für Kabelaufbauten und Erdungsanordnungen in Übereinstimmung mit folgenden Abschnitten berechnet oder bestimmt werden.

4.1.3.2.1 Nicht-bewehrtes Kabel mit durchgängig geerdetem Schirm

Der Reduktionsfaktor für ein nicht-bewehrtes Kabel mit einem ständigen Kontakt des Schirms zur Erde muss mit nachfolgender Gleichung berechnet werden:

$$k_t = \frac{R_g}{R_g + j\omega L_g}$$

Darin sind:

R_g der Widerstand des Kabelschirms in Ω/km und L_g dessen Induktivität in H/km , die gleich $2\text{mH}/\text{km}$ angenommen werden kann, ungeachtet des Durchmessers des Schirms und des spezifischen Erdbodenwiderstandes.

4.1.3.2.2 Nicht-bewehrtes Kabel mit nur an den Enden geerdetem Schirm

Der Reduktionsfaktor für ein nicht-bewehrtes Kabel, dessen Schirm nur an den Enden geerdet ist, muss mit nachfolgender Gleichung berechnet werden:

$$k_t = \frac{R_g l_t + R_t}{(R_g + j\omega L_g) l_t + R_t}$$

Darin sind:

R_t die Summe der Widerstände der Schirmerdung an den Enden des Kabels gegen Erde und l_t die gesamte Länge des Kabels.

4.1.3.2.3 Bewehrtes Kabel mit durchgängig geerdetem Schirm

Werte der Reduktionsfaktoren oder Kurven, die die Reduktionsfaktoren als eine Funktion der induzierten EMK je Längeneinheit des Schirms beschreiben und die vom Kabelhersteller angegeben werden, sind anzuwenden.

Wenn die Faktoren beim Kabelhersteller nicht verfügbar sind, müssen die Reduktionsfaktoren für bewehrtes Kabel mit ständigem Kontakt des Schirms zur Erde mit nachfolgender Formel berechnet werden:

$$k_t = \frac{R_g}{(R_g + R_a) + j\omega(L_g + L_a)}$$

Darin sind:

R_a der Widerstand der Bewehrung in Ω/km und L_a die Induktivität in H/km .

Werte der Reduktionsfaktoren oder Kurven, die die Reduktionsfaktoren als eine Funktion der induzierten EMK je Längeneinheit des Schirms beschreiben und die vom Kabelhersteller angegeben werden, sind anstelle der berechneten Werte anzuwenden.

4.1.3.2.4 Bewehrtes Kabel mit nur an den Enden geerdetem Schirm

Der Reduktionsfaktor für ein bewehrtes Kabel, dessen Schirm nur an den Enden geerdet ist, muss mit nachfolgender Formel berechnet werden:

$$k_t = \frac{R_g I_t + R_t}{(R_g + j\omega L_g) I_t + j\omega(L_g + L_a) I_t + R_t}$$

4.1.3.2.5 Ungeschirmte Kabel

Für ungeschirmte Kabel muss in Berechnungen ein Reduktionsfaktor k_t von 1,0 verwendet werden.

4.1.3.3 Reduktionsfaktor des beeinflussenden Systems (k_e)

Dieser Reduktionsfaktor berücksichtigt den abschwächenden Effekt, dass der Aufbau eines Starkstromsystems das durch stromführende Leiter erzeugte magnetische Feld und dadurch die Längs-EMK abschwächt, die in das Telekommunikationskabel induziert wird. Die in Berechnungen zu verwendenden Werte von k_e müssen entweder von den Herstellern zur Verfügung gestellt oder aus den in den nachfolgenden Abschnitten enthaltenen Tabellen übernommen werden.

4.1.3.3.1 Freileitungs-Energieversorgungssysteme

Die allgemeinen Reduktionsfaktoren für Freileitungs-Energieversorgungssysteme, die in nachfolgender Tabelle enthalten sind, beziehen sich auf den 50-Hz-Fehlerstrom im Energieversorgungssystem; in der Praxis können sie abhängig von dem Aufbau und der Konfiguration des Stromkreises um 20 % niedriger sein.

Für Berechnungen bei Normalbetrieb ist für k_e der Wert 1,0 anzunehmen.

System-Beschreibung	Reduktionsfaktor für 50 Hz
---------------------	----------------------------

Erdseile von Hochspannungsleitungen	
a) einfaches Erdseil	
- Gleichstromwiderstand < 0,1 Ω /km	0,7
- Gleichstromwiderstand < 0,5 Ω /km	0,75
- Gleichstromwiderstand < 1,0 Ω /km	0,9
b) doppeltes Erdseil	
(Die hier gegebenen Werte des Gleichstromwiderstandswerte beziehen sich auf den resultierenden Wert zweier paralleler Seile)	
- Gleichstromwiderstand < 0,1 Ω /km	0,5
- Gleichstromwiderstand < 0,5 Ω /km	0,75
- Gleichstromwiderstand < 1,0 Ω /km	0,9

4.1.3.3.2 Erdkabel-Energieversorgungssystem

Die allgemeinen Reduktionsfaktoren für Hochspannungs-Energieversorgungskabel, die in folgender Tabelle von Beispielen enthalten sind, beziehen sich auf den 50-Hz-Fehlerstrom im Energieversorgungssystem; in der Praxis können sie abhängig von dem Aufbau und der Konfiguration des Stromkreises um 50 % niedriger sein.

Für Berechnungen bei Normalbetrieb ist für k_e der Wert 1,0 anzunehmen.

System-Beschreibung	Reduktionsfaktor für 50 Hz
Hochspannungskabel	
a) Kabel mit Bleimantel	
- 30 kV bis 70 kV, 240 mm ²	0,4
- 110 kV bis 150 kV, 240 mm ²	0,3
- 275 kV, 600 mm ²	0,25
- 400 kV bis 70 kV, 1000 mm ²	< 0,2
b) Kabel mit Aluminiummantel	
- 30 kV bis 70 kV, 240 mm ²	0,2
- 110 kV bis 150 kV, 240 mm ²	0,15
- 275 kV, 600 mm ²	0,1
400 kV bis 70 kV, 1000 mm ²	< 0,05

4.1.3.3.3 50-Hz-Bahnstromsysteme

Die Reduktionsfaktoren für 50-Hz-Bahnstromsysteme im Fehlerfall und im Normalbetrieb sind in der nachfolgenden Tabelle angegeben.

Bahnsystem-Beschreibung		Reduktionsfaktor bei 50 Hz
Anzahl der Gleise	Anzahl der Schienen, durch die die induzierten Ströme zurückfließen	
1	1	0,61
1	2	0,44
2	die zwei äußeren Schienen	0,44
2	4	0,28

4.1.3.3.4 16 2/3-Hz-Bahnstromsysteme

Die Reduktionsfaktoren für 16 2/3-Hz-Bahnstromsysteme im Fehlerfall und im Normalbetrieb sind in der nachfolgenden Tabelle angegeben.

Bahnstromsystem-Beschreibung	Reduktionsfaktor bei 16 2/3 Hz	
	Bahnabschnitt mehr als 3 km vom versorgenden Unterwerk entfernt	Bahnabschnitt innerhalb 3 km vom versorgenden Unterwerk entfernt
2 bis 4	0,5	0,25
6 bis 12	0,35	0,15
> 12	0,2	

4.2 Induktive Kopplung

4.2.1 Näherungsabstände im Fehlerfall

4.2.1.1 Wechselstrom-Energieversorgungssysteme

In ländlichen Gebieten muss für Wechselstrom-Energieversorgungssysteme im Fehlerfall ein Näherungsabstand von 3000 m angewendet werden, wenn die beeinflussende Wechselstrom-Freileitung starr oder niederohmig geerdet betrieben wird. Wenn der äquivalente spezifische Erdbodenwiderstand größer als 3000 Ωm ist, muss in ländlichen Gebieten ein Näherungsabstand von 10 000 m angewendet werden.

Für beeinflussende Wechselstrom-Freileitungen in oder nahe städtischen Gebieten kann der Wert des Näherungsabstandes für ländliche Gebiete durch 10 dividiert werden. Diese Verringerung basiert auf dem umfassenden Schirmeffekt von typisch städtischen Gebieten.

Für Wechselstrom-Erdkabel in ländlichen Gebieten mit einem Erdbodenwiderstand $\rho > 3000 \Omega\text{m}$ beträgt der Wert des Näherungsabstandes 100 m, für Gebiete mit einem niedrigeren spezifischen Erdbodenwiderstand beträgt der Wert 10 m. Der Wert des Näherungsabstandes für alle städtischen Gebiete beträgt 1 m.

4.2.1.2 Gleichstrom-Starkstromsysteme

In ländlichen Gebieten muss für Gleichstrom-Energieversorgungssysteme im Fehlerfall ein Näherungsabstand von 400 m angewendet werden. Wenn der äquivalente spezifische Erdbodenwiderstand größer als 3000 Ωm ist, muss in ländlichen Gebieten ein Näherungsabstand von 700 m angewendet werden.

Für beeinflussende Gleichstrom-Freileitungen und Bahnlinien in und nahe städtischen Gebieten ist der Wert des Näherungsabstandes für ländliche Gebiete durch 10 zu dividieren.

Für Gleichstrom-Erdkabel und Bahnlinien in ländlichen Gebieten mit einem Erdbodenwiderstand $\rho > 3000 \Omega\text{m}$ beträgt der Wert des Näherungsabstandes 100 m, für Gebiete mit einem niedrigeren spezifischen Erdbodenwiderstand beträgt der Wert 10 m. Der Wert des Näherungsabstandes für alle städtischen Gebiete beträgt 1 m.

4.2.2 Näherungsabstände im Normalbetrieb

4.2.2.1 Wechselstrom-Energieversorgungssysteme

Wenn die Energieversorgungssysteme im Normalbetrieb symmetrisch betrieben werden, muss der Näherungsabstand dem in 4.2.1.1 angegebenen entsprechen.

Wenn der äquivalente spezifische Erdbodenwiderstand kleiner oder gleich 100 Ω ist, muss für Freileitungen die nachfolgende Gleichung verwendet werden.

Im Normalbetrieb ist der Näherungsabstand „a“ (in m) zwischen einer Telekommunikationsleitung mit einer Gesamt-Näherungslänge l (in m) und der Mitte der Starkstromleitung gegeben durch:

$$a = \frac{k_t \cdot l \cdot I}{35}$$

Darin sind:

I der Betriebsstrom in kA und k_t der Reduktionsfaktor der Komponenten des Energieversorgungssystems.

4.2.2.2 Gleichstrom-Energieversorgungssysteme

In ländlichen Gebieten muss für Gleichstrom-Energieversorgungssysteme ohne Filter zur Verminderung der Oberschwingungsströme im Normalbetrieb ein Näherungsabstand von 700 m angewendet werden. Wenn der äquivalente spezifische Erdbodenwiderstand größer als 3000 Ωm ist, muss in ländlichen Gebieten ein Näherungsabstand von 1000 m angewendet werden.

Für beeinflussende Gleichstrom-Freileitungen in und nahe städtischen Gebieten kann der Wert des Näherungsabstandes für ländliche Gebiete durch 10 dividiert werden.

Für Gleichstrom-Erdkabel in den entsprechenden Gebieten kann der zutreffende Wert des Näherungsabstandes durch 100 dividiert werden.

4.2.2.3 Wechselstrom-Bahnssysteme

Im Normalbetrieb ist der Näherungsabstand für 50 Hz- und 16 2/3-Hz-Bahnstromsysteme der gleiche wie der in 4.2.1.1 gegebene Wert für Wechselstrom-Energieversorgungssysteme im Fehlerfall.

4.2.2.4 Gleichstrom-Bahnsysteme

In Gebieten mit $\rho_e \leq 300 \Omega\text{m}$ ist es nicht erforderlich, die Beeinflussung durch Gleichstrom-Bahnsysteme zu betrachten.

In ländlichen Gebieten muss für Gleichstrom-Energieversorgungssysteme, die mit Filtern zur Verminderung der Oberschwingungsströme ausgerüstet sind, im Normalbetrieb ein Näherungsabstand von 200 m angewendet werden. Wenn der äquivalente spezifische Erdbodenwiderstand größer als 3000 Ωm ist, muss in ländlichen Gebieten ein Näherungsabstand von 350 m angewendet werden.

In ländlichen Gebieten muss für Gleichstrom-Energieversorgungssysteme ohne Filter zur Verminderung der Oberschwingungsströme im Normalbetrieb ein Näherungsabstand von 700 m angewendet werden. Wenn der äquivalente spezifische Erdbodenwiderstand größer als 3000 Ωm ist, muss in ländlichen Gebieten ein Näherungsabstand von 1000 m angewendet werden.

4.2.3 Berechnung der induzierten Spannungen

4.2.3.1 Längs-EMK (Elektromotorische Kraft)

Zur Berechnung der Längs-EMK ist folgendes Verfahren Schritt für Schritt durchzuführen:

- Festlegen der Schleifen sowohl im beeinflussenden als auch beeinflussten System, die zusammen die Systeme bilden, die durch die Störeinwirkung gekoppelt sind;
- Ermitteln der Eigenschaften der Störquelle, die üblicherweise die Impedanzkurve und Spannungs-/Stromkurve in Abhängigkeit von der Frequenz beinhaltet, sowie Ermitteln der Eigenschaften des gestörten Systems, insbesondere die Dämpfung und die Impedanz in Abhängigkeit von der Frequenz;
- Durchführen der Berechnung der Stromverteilung über das System in Abhängigkeit von der Frequenz aus den vorher angegebenen Daten;
- Berechnen des frequenzabhängigen Koppelfaktors zwischen beeinflussendem und beeinflusstem System;
- Berechnen der induzierten Längs-EMK für jede interessierende Frequenz in jedem Telekommunikationsleiter.

4.2.3.1.1 Grund- und Oberschwingungsströme in Wechselstrom-Starkstromsystemen und die Welligkeit in Gleichstromsystemen

Die Längs-EMK muss für jede interessierende Frequenz berechnet werden, und zwar sowohl für die Grund- als auch für Oberschwingungsanteile in Wechselstrom-Energieversorgungssystemen sowie für die Welligkeit in Gleichstrom-Energieversorgungssystemen. Der allgemeine Ausdruck für die induzierte Längs-EMK E je Längeneinheit ist die Summe der EMK, die von jedem Leiter hervorgerufen wird, summiert über alle Leiter einschließlich der induzierenden und schirmenden Leiter, und ist gegeben durch:

$$E = \sum_i Z_{ai} \cdot I_i$$

Z_{ai} ist die Gegenimpedanz mit Erdrückleitung je Längeneinheit zwischen dem beeinflussten Leiter a und dem i-ten Leiter.

I_i ist der Strom im i-ten Leiter mit Erdrückleitung (induzierend oder schirmend).

Schirmende Leiter, deren Ströme bereits in der Berechnung berücksichtigt wurden, sollten nicht mehr in die Summation eingeschlossen werden.

Im Prinzip ist es möglich, einen Schirmfaktor aus solchen allgemeinen Angaben zu berechnen. Jedoch ist dies weniger von praktischer Bedeutung, da dies nur für eine einzelne besondere Anordnung gilt.

Für Fehlerfälle in Energieversorgungssystemen kann das beeinflussende System unabhängig vom beeinflussten System betrachtet werden. In einem solchen Fall kann der gesamte Schirmeffekt durch zwei Reduktionsfaktoren ausgedrückt werden, und zwar durch einen für das beeinflussende System und einen für die Senke.

Der Reduktionsfaktor für das beeinflussende System wird eine Funktion des Näherungsabstandes zwischen beeinflussendem und beeinflusstem System sein, wenn der einzelne Wert (Nennreduktionsfaktor) angegeben werden kann.

Der üblicherweise verwendete Ausdruck für die induzierte EMK je Längeneinheit ist

$$E = k_c k_t k_e Z_e i_e$$

Darin sind:

Z_e die in Ω/m ausgedrückte Gegenimpedanz mit Erdrückleitung je Längeneinheit zwischen beeinflussendem und beeinflusstem Leiter;

i_e der äquivalente beeinflussende Strom in A, der gleich dem Dreifachen des Nulldurchgangsstroms ist. Bedingungen für die Auswahl eines Wertes sind in 4.2.5 gegeben.

4.2.3.1.2 *Stromänderungen in Gleichstrom-Energieversorgungssystemen*

Für Gleichstrom-Energieversorgungssysteme ist der Augenblickswert der induzierten Längs-EMK je Längeneinheit, der durch Stromänderungen verursacht wird, gegeben durch:

$$E = k_c \cdot k_e \cdot Z_{20} \cdot \frac{dI}{dt}$$

Darin sind:

Z_{20} Gegenimpedanz je Längeneinheit bei 20 Hz (von ITU-T übernommener Wert aufgrund der Erfahrung);

dI/dt Änderungsgeschwindigkeit des im Energieversorgungssystem fließenden Stromes.

4.2.3.2 *Spannung gegen Erde*

U_x ist der Wert der in der Telekommunikationsleitung induzierten Spannung gegen Erde an der Stelle „x“ entlang der Leitung, der mit nachfolgender Gleichung berechnet wird

$$U_x = U(0) + \int_0^x E(\alpha) d\alpha$$

Darin sind:

$E(x)$ die in der Telekommunikationsleitung induzierte Längs-EMK je Längeneinheit an der Stelle „x“.

ANMERKUNG In der Praxis ist $Y(x)$ niemals nahezu Null wegen der Kapazität, nichtsdestotrotz gibt diese Gleichung einen guten (brauchbaren) Wert für die maximale Spannung gegen Erde.

Für Telekommunikationsleiter, die nur am Ende A ($x = 0$, $U(0) = 0$) geerdet sind, siehe die Gerade (b) in Bild 4.

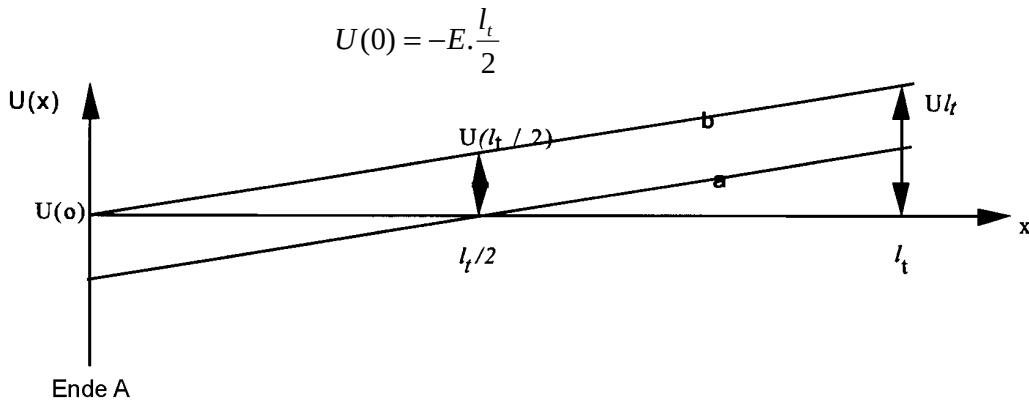
Für Telekommunikationsleiter ohne Erdung ist $U(0)$ gegeben durch

$$\int_0^{l_t} Y(x).U(x)dx = 0$$

Darin sind:

Y die Admittanz zwischen Leiter und Erde und l die gesamte Länge der Telekommunikationsleitung.

Für den speziellen Fall der Gerade (a) in Bild 4 ist die Länge der Parallelführung gleich der Gesamtlänge der Telekommunikationsleitung, die Admittanz $Y(x)$ ist konstant ungefähr gleich Null und $E(x)$ ist ein konstanter EMK-Wert E .



Darin sind:

- a* nicht geerdete Telekommunikationsleitung
b am Ende A geerdete Telekommunikationsleitung.

Bild 4 - Induzierte Spannung entlang einer Telekommunikationsleitung im Falle von parallelen Leitungen und homogenen Bedingungen

Für Telekommunikationsleiter, die an einem oder beiden Enden mit Überspannungsbegrenzern beschaltet sind, können die Kreisströme in Leitern, Schirmen und Erdwiderständen durch die Kirchhoffschen Gesetze berechnet werden, wenn die Begrenzer durch die induzierte Spannung aktiviert werden. Die entsprechende Spannung gegen ferne Erde und die Berührungsspannung über dem lokalen Widerstand können dann durch das Ohmsche Gesetz berechnet werden.

Dieses Berechnungsverfahren ist für Gleichstrom-Starkstromsysteme nicht anwendbar.

4.2.3.3 Bestimmung der Geräuschspannung

Zur Berechnung der Geräuschspannung U_{ps} muss die folgende Gleichung angewendet werden:

$$U_{ps} = \frac{1}{P_{ref}} \sqrt{\sum P_f^2 U_f^2}$$

Darin sind:

P_f der Gewichtungsfaktor bei der Frequenz f und P_{ref} ist der Gewichtungsfaktor bei 800 Hz

U_f die unbewertete Spannung bei der Frequenz f .

Werte für P_i sind in Anhang B zu finden.

4.2.4 Berechnung der Gegenimpedanz

In diesem Abschnitt sind die numerischen Gleichungen zur Durchführung der Berechnungen angegeben. Die Symbole haben die nachfolgende Bedeutung.

Es muss angemerkt werden, dass sich die Indizes i und j auf die jeweils betrachteten einzelnen Leiter beziehen.

Elektrische Parameter

R_i	Widerstand je Längeneinheit des Leiters i
ΔR_{ij} und ΔX_{cij}	Korrekturterme je Längeneinheit der Real- und Imaginärkomponenten des äußeren Teils der Gegenimpedanz zwischen den Stromkreisen i und j mit Erdrückleitung
Z_{ij}	Gegenimpedanz je Längeneinheit der Stromkreise, die aus jedem der Leiter i und j und Erde zusammensetzt sind.

Geometrische Parameter

a_{ij}	horizontaler Näherungsabstand zwischen Leiter i und j
h_i und h_j	Leiterhöhe von i bzw. j über Erdoberfläche (Wenn sich der Leiter unter der Erdoberfläche befindet, besitzt die Höhe einen negativen Wert)
d_{ij}	Abstand zwischen Leiter i und j :

$$d_{ij} = \sqrt{a_{ij}^2 + (h_i - h_j)^2} \dots \dots \dots (1)$$

D_{ij} Abstand zwischen Leiter i und dem Spiegelbild von Leiter j oder umgekehrt

$$D_{ij} = \sqrt{a_{ij}^2 + (h_i + h_j)^2} \dots \dots \dots (2)$$

ϕ_{ij} Winkel zwischen der geraden gezeichneten Linien durch $i-i'$ und $j-j'$, wobei i' und j' die jeweiligen Spiegelbilder der Leiter sind.

$$\cos \phi_{ij} = \frac{h_i + h_j}{D_{ij}} \qquad \sin \phi_{ij} = \frac{a_{ij}}{D_{ij}}$$

r_i	Radius des Leiters i
ρ_e	äquivalenter spezifischer Erdbodenwiderstand
μ_0	Permeabilität des freien Raums ($4\pi \times 10^{-7}$ H/m)
μ_r	relative Permeabilität eines Leiters
$j=\sqrt{-1}$	mathematischer Operator (imaginär)
f	Frequenz des induzierten Stromes
$\omega=2\pi f$	Kreisfrequenz des induzierten Stromes
α	$=(\omega \mu_0 / \rho_e) = 2,8099 \times 10^{-3} (f/\rho_e)$
p	Parameter, um die Berechnung der Gegenimpedanz, gegeben durch (αD_{ij}) , zu erleichtern, wobei D der komplexe Spiegelbild-Abstand ist, definiert in den ITU-T-Direktiven, Band II – Kapitel 4.

Bei Anwendung dieser Gleichungen müssen die SI-Einheiten ohne Benennungen in den Grundeinheiten benutzt werden, außer bei den nachfolgenden Größen:

Entlang des Systems gemessene Länge	km
Impedanz und dessen Komponenten je Längeneinheit des Systems	Ω/km

Die Gegenimpedanz zwischen zwei langen parallelen Leitern jeweils mit Erdrückleitung ist definiert durch Z_{ij} , wobei

$$Z_{ij} = j\omega 2 \cdot 10^{-4} \ln(D_{ij} / d_{ij}) + 2(\Delta R_{ij} + j\Delta X_{ij}) \cdot \Omega / \text{km} \dots \dots \dots (3)$$

Die Korrekturterme, ΔR_{ij} , ΔX_{ij} oder mit den Kurzsymbolen ΔR bzw. ΔX , berücksichtigen den Erdrückleitungseffekt und sind Funktionen von p , das durch αD für die Gegenimpedanz gegeben ist, und des Winkels ϕ .

Die Ausdrücke für ΔR und ΔX sind für die Computerberechnungen folgendermaßen geändert worden:

Wenn $p \leq 4$ ist, dann gelten folgende unendlichen Reihen:

$$\Delta R(\Omega / \text{km}) = 2 \cdot 10^{-4} \omega (\pi / 8 - b_1 p \cos \phi + b_2 p^2 [(c_2 - \ln p) \cos 2\phi + \phi \sin 2\phi] + b_3 p^3 \cos 3\phi - d_4 p^4 \cos 4\phi - b_5 p^5 \cos 5\phi + b_6 p^6 [(c_6 - \ln p) \cos 6\phi + \phi \sin 6\phi] + b_7 p^7 \cos 7\phi - d_8 p^8 \cos 8\phi - \dots)$$

$$\Delta X(\Omega / \text{km}) = 2 \cdot 10^{-4} \omega (0.5(0.6159315 - \ln p) + b_1 p \cos \phi - d_2 p^2 \cos 2\phi + b_3 p^3 \cos 3\phi - b_4 p^4 [(c_4 - \ln p) \cos 4\phi + \phi \sin 4\phi] + b_5 p^5 \cos 5\phi - d_6 p^6 \cos 6\phi + b_7 p^7 \cos 7\phi + b_8 p^8 [(c_8 - \ln p) \cos 8\phi + \phi \sin 8\phi] + \dots)$$

Jeweils 4 aufeinanderfolgende Terme bilden ein sich wiederholendes Muster. Die Koeffizienten b_i , c_i und d_i sind Konstanten, die vorberechnet und gespeichert werden können. Sie wurden aus der Rekursionsgleichung mit den folgenden Anfangswerten erhalten:

Für ungeraden Index:

$$b_1 = 1/6 \cdot \sqrt{2}$$

Für geraden Index:

$$b_2 = 1/16$$

Die nachfolgenden Werte berechnen sich zu: