



# TE1

Deckblatt

## **Anleitung zur Berechnung der in Telekommunikations- (TK-) Leitungen durch Starkstromleitungen induzierten Spannungen**

Juni 2006 (ersetzt die Ausgabe April 1987)

# **TECHNISCHE EMPFEHLUNG NR. 1**

## **der Schiedsstelle für Beeinflussungsfragen**

Anleitung zur Berechnung der in Telekommunikations-(TK-)Leitungen durch Starkstromleitungen induzierten Spannungen

Juni 2006 (ersetzt die Ausgabe April 1987)

## Vorwort

Die Technische Empfehlung Nr. 1 (TE 1) "Anleitung zur Berechnung der in TK-Leitungen durch Starkstromleitungen induzierten Spannungen" wurde erstmals im Januar 1959 herausgegeben. Überarbeitete Ausgaben erschienen im November 1971 und im April 1987.

Die nachfolgend beschriebenen Hilfsmittel zum Ermitteln von Beeinflussungsspannungen können für alle Arten von Kommunikationskabel und sinngemäß auch für beeinflusste Rohrleitungen angewendet werden.

Wesentliche Änderungen in der vorliegenden, redaktionell grundlegend überarbeiteten Ausgabe gegenüber der letzten Fassung sind:

- modifizierte Gliederung mit klarer Trennung zwischen der Beschreibung von Einflussgrößen und der Beeinflussungsberechnung, sowie zwischen Fehlerfall und Normalbetrieb als Quelle von Beeinflussungen
- für einpoligen (Fehler-)Fall (bisher „Kurzzeitbeeinflussung“) werden aktuell gebräuchliche Näherungsformeln nach ITU-T 1999 statt Haberland-Formeln angegeben
- für Normalbetrieb (bisher „Langzeitbeeinflussung“) ist eine allgemeine Berechnungsformel nach ITU-T angegeben, die insbesondere auch zur Berechnung von engen Näherungen zu Starkstromkabeln geeignet ist
- der international nicht gebräuchliche „Erwartungsfaktor“  $w$  wird nicht mehr verwendet

Weiterhin wurden verschiedene Beiträge ergänzt, insbesondere

- eine Übersichtstabelle über Formeln, Grafiken, Tabellen (im Vorwort)
- Tabellen zur Ablesung normierter Rechenwerte (im Anhang 4)
- die Beschreibung eines Messverfahrens für den spezifischen Erdbodenwiderstand (im Anhang 7)
- ein zusätzlicher Abschnitt mit Begriffsdefinitionen sowie eine Liste der verwendeten Formelzeichen im Anhang

Entfallen ist die detaillierte Beschreibung eines Berechnungsbeispiels. Stattdessen wird im Anhang 6 auf ein neu entwickeltes, auf der SfB-Website abrufbares Beispiel

verwiesen, das einen Ergebnisvergleich verschiedener Rechenprogramme ermöglichen soll.

**Übersicht über die in der TE 1 dargestellten Hilfsmittel  
(rechnerische Formeln/Grafiken/Tabellen) zur Ermittlung von  $E_i'$  bzw.  $Z'$  oder  $M'$**

Beeinflussungsart	Fehlerfall unsymmetrischer Erdkurzschluss im Drehstromsystem oder einphasiger Wechselstromkreis			Normalbetrieb eines Drehstromsystems	
	allgemein	50 Hz/50 $\Omega$ m 16,7 Hz/30 $\Omega$ m		Näherung mit mittlerem Abstand $a = f(a_1, a_2)$	
	Näherung mit mittlerem Abstand $a = f(a_1, a_2)$	Näherung mit mittlerem Abstand $a = f(a_1, a_2)$	Näherung mit $a_1 \neq a_2$	allgemein, jedoch ohne Erdseil oder Schirm	Freileitung
rechnerisch	Formel (16a, b, c), Abschn. 4: $M' = f(x)$ $x = f(a, \omega, \rho)$			Formel (17a-e), Abschn. 5: $Z_{3p}' = f(a_{D1}, a_{D2}, a_s, f)$	Formel (18a-d), Abschn. 5: $E_i' = f(x_{0123}, y_{0123}, a, \rho)$
Anwendung eingeschränkt	nein			Erdseil- bzw. Schirmstrom = 0	$a < 400$ m
grafisch		$M' = f(a); a = f(a_1, a_2)$ Kurven im Anhang 1 und 2			
Anwendung eingeschränkt		nein			
Tabelle			Tabelle A4-1 und A4-2: $E_i' = f(a_1, a_2)$ für $I = 1$ kA und $k = 1$	Tabelle A4-3: $E_i' = f(a_D, a_s)$ für $f = 50$ Hz, $I = 100$ A und $k = 1$	
Anwendung eingeschränkt			$a_1, a_2 \leq 5$ m	$a_s = 0,1 \dots 2$ m $a_D = 2 \dots 10$ cm	

# Inhalt

Seite

<b>1</b>	<b>Allgemeines.....</b>	<b>7</b>
1.1	Begriffe .....	7
1.2	Längs-EMK in TK-Leitungen .....	8
<b>2</b>	<b>Einflussgrößen .....</b>	<b>9</b>
2.1	Gegeninduktivität M, Koppelimpedanz Z.....	9
2.1.1	Näherung .....	10
2.1.2	Kreuzung .....	11
2.1.3	Ungleichmäßige Näherung .....	12
2.1.4	Grenzabstand .....	12
2.1.5	Spezifischer Erdbodenwiderstand .....	14
2.2	Induzierender Strom.....	15
2.2.1	Kurzschlussstrom $I_k$ von Drehstromleitungen und 110-kV-Bahnstromleitungen .....	15
2.2.2	Beeinflussungsströme im 15-kV-Oberleitungssystem der Deutschen Bahn .....	20
2.3	Reduktionsfaktoren r.....	30
2.3.1	Richtwerte für den Umweltreduktionsfaktor $r_x$ .....	31
2.3.2	Richtwerte für den Schienenreduktionsfaktor $r_s$ .....	32
2.3.3	Richtwerte für den Erdseilreduktionsfaktor $r_E$ .....	33
2.3.4	Richtwerte von Reduktionsfaktoren für TK-Kabel .....	36
2.3.5	Richtwerte von Kabelmantelreduktionsfaktoren für Starkstromkabel .....	37
<b>3</b>	<b>Rechenverfahren .....</b>	<b>41</b>
3.1	Abschnittsweise Berechnung .....	41
3.2	Digitale Berechnung .....	42
<b>4</b>	<b>Berechnung von Beeinflussungen durch Fehlerströme in Drehstromsystemen oder durch einphasige Wechselstromkreise .....</b>	<b>43</b>
<b>5</b>	<b>Berechnung von Beeinflussungen durch Drehstromsysteme im Normalbetrieb.....</b>	<b>44</b>
5.1	Beeinflussung durch Drehstromfreileitungen im Normalbetrieb.....	47
5.2	Beeinflussung durch Drehstromkabel im Normalbetrieb ....	49
<b>Anhang 1 Gegeninduktivitätsbelag <math>M'</math> für 50 Hz .....</b>		<b>53</b>
<b>Anhang 2 Gegeninduktivitätsbelag <math>M'</math> für 16,7 Hz .....</b>		<b>55</b>

<b>Anhang 3 Leitertafel zur Bestimmung des mittleren, induktionsgleichen Abstandes von Kreuzungsabschnitten .....</b>	<b>57</b>
<b>Anhang 4 Tabellen für normierte Beeinflussungsspannungen .....</b>	<b>58</b>
<b>Anhang 5 Aufstellung und Ablesen von Kurzschlussdiagrammen.....</b>	<b>61</b>
<b>Anhang 6 Beispiel für eine digitale Beeinflussungsberechnung .....</b>	<b>65</b>
<b>Anhang 7 Messen des spezifischen Erdbodenwiderstands .....</b>	<b>66</b>
<b>Anhang 8 Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen.....</b>	<b>71</b>

# 1 Allgemeines

## 1.1 Begriffe

### **Telekommunikationsanlagen (TK-Anlagen)**

technische Einrichtungen oder Systeme, die als Nachrichten identifizierbare elektrische, elektromagnetische oder optische Signale senden, übertragen, vermitteln, empfangen, steuern oder kontrollieren können.

### **sinngemäß:**

**TK-Leitung, TK-Leiter, TK-Kabel**

### **Längs-EMK**

hier: durch magnetische Kopplung mit einer Starkstromleitung in einer TK-Leitung induzierte Längsspannung (= „Beeinflussungsspannung“)

### **Normalbetrieb**

Betrieb eines elektrischen Energiesystems, das als fehlerfrei angesehen wird. Transiente Vorgänge als Folge von Schaltungen werden als normal betrachtet.

### **Fehlerfall**

Isolationsfehler zwischen einem oder mehreren Außenleitern und Erde; unbeabsichtigte Verbindung eines Leiters eines Betriebsstromkreises mit Erde oder einem geerdeten Gegenstand durch Berührung oder Lichtbogen (Erdkurzschluss)

### **Erdkurzschluss**

Isolationsfehler zwischen einem Außenleiter und Erde. Erdkurzschluss setzt eine niederohmige Sternpunktterdung voraus.

### **Erdschluss**

Isolationsfehler zwischen einem Außenleiter und Erde in einem kompensierten oder isolierten Netz.

### **Zweipoliger Kurzschluss (mit Erdberührung)**

Isolationsfehler zwischen zwei Außenleitern und Erde an einem Punkt eines Stromkreises.

### **Doppelerdschluss**

Bei einem Doppelerdschluss haben gleichzeitig zwei Leiter eines Drehstromsystems an räumlich auseinander liegenden Punkten eines Stromkreises (= „Fußpunkte“) Erdberührung. Dieser Fehlerfall tritt vorwiegend oder fast ausschließlich in Netzen mit freiem Sternpunkt oder mit Erdschlusskompensation bzw. vorübergehender niederohmigen Erdung auf.

### **Dreipoliger (symmetrischer) Kurzschluss**

Fehler an einem Punkt eines Stromkreises bei der die Isolation zwischen den drei Außenleitern untereinander und üblicherweise die Isolation gegen Erde betroffen ist.

## **1.2 Längs-EMK in TK-Leitungen**

Die in einer TK-Leitung induzierte Längs-EMK ist mit folgender Formel zu berechnen:

$$E_i = I \cdot 2\pi f \cdot M' \cdot \ell \cdot r \quad (1)$$

- $E_i$  Effektivwert der induzierten Längs-EMK
- $I$  Effektivwert des beeinflussenden Stroms (z. B. Fahrstrom  $I_F$ , Kurzschlussstrom  $I_k$ )
- $f$  Nennfrequenz der Starkstromleitung
- $M'$  längenbezogene Gegeninduktivität zwischen den Schleifen Starkstromleitung - Erde und TK-Leitung - Erde
- $\ell$  Länge der wirksamen Näherung
- $r$  Reduktionsfaktor, der die Schutzwirkung benachbarter geerdeter Leiter einschließlich metallener Kabelmäntel berücksichtigt (Kompensationsleiter)

Der früher für den Fehlerfall verwendete Erwartungsfaktor  $w = 0,7$  ist in Gleichung (1) nicht mehr enthalten, sondern wird nur noch in der TE 2 /9/ verwendet. Dieser Faktor berücksichtigt die Tatsache, dass ein Zusammentreffen aller ungünstigen Umstände praktisch nicht vorkommt.

$M'$  und  $r$  sind frequenzabhängig. Die Frequenzabhängigkeit von  $r$  wird im Allgemeinen nur bei  $r_K$  berücksichtigt.

Wenn mehrere geerdete Leiter vorhanden sind, kann der resultierende Gesamtreduktionsfaktor  $r$  verschiedener Anlagen aus den einzelnen Reduktionsfaktoren der Leiter berechnet werden, siehe Abschnitt 2.3.

## 2 Einflussgrößen

### 2.1 Gegeninduktivität M, Koppelimpedanz Z

Die Gegeninduktivität M zwischen Starkstromleitung und TK-Leitung ist abhängig von der Frequenz, vom spezifischen Erdbodenwiderstand bis in tiefe Schichten und vom Abstand zwischen den Leitungen. Die Frequenzabhängigkeit rührt daher, dass die Erdströme bei niedriger Frequenz tiefer in den Boden eindringen als bei hoher Frequenz.

Den Koppelimpedanzbelag Z' erhält man aus dem Gegeninduktivitätsbelag M' und der Frequenz f

$$Z' = 2 \pi f \cdot M' \quad (2)$$

Die induzierte Längs-EMK ergibt sich zu

$$E_i = Z' \cdot r \cdot I \cdot \ell \quad (3)$$

Der Gegeninduktivitätsbelag M' bzw. der Koppelimpedanzbelag Z' lassen sich für

- einpolige Fehlerströme in Drehstromsystemen oder einphasige Wechselstromkreise
- den Normalbetrieb eines symmetrischen Drehstromsystems

abhängig von den Einflussgrößen Abstand, spezifischer Erdbodenwiderstand und Frequenz mit verschiedenen Gleichungen bestimmen (Abschnitte 4 und 5).

Für einpolige Fehlerströme in Drehstromsystemen oder einphasige Wechselstromkreise können M' bzw. Z' näherungsweise grafisch ermittelt werden (Anhänge 1 bis 3). Alternativ können normierte Beeinflussungsspannungen näherungsweise aus Tabellen abgelesen werden (Anhang 4).

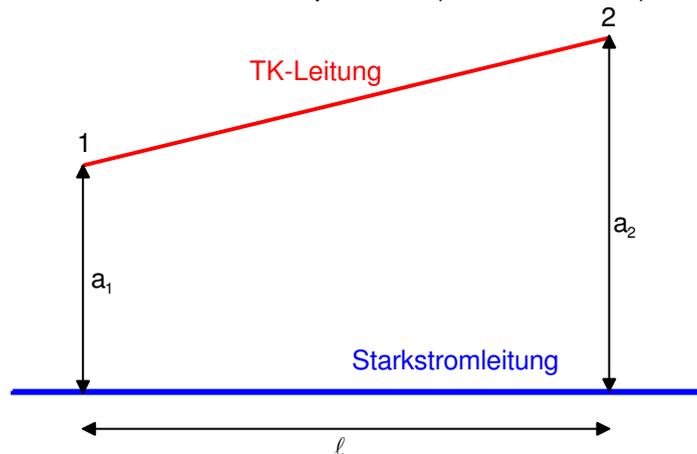
Im Anhang 1 ist M' in Abhängigkeit vom Abstand a für f = 50 Hz und einen spezifischen Erdbodenwiderstand von 50 Ωm aufgetragen, wie er für die Flachländer Mitteleuropas durchschnittlich angenommen werden kann /3/ /4/ /5/.

Anhang 2 zeigt die entsprechende Kurve für f = 16,7 Hz und einen spezifischen Erdbodenwiderstand von 30 Ωm. Der niedrigere spezifische Erdbodenwiderstand berücksichtigt, dass die 16,7-Hz-Ströme tiefer in den Boden ein-

dringen und daher im Mittel einen geringeren Erdbodenwiderstand antreffen /4/.

### 2.1.1 Näherung

Als Länge einer Näherung gilt die Projektion der TK-Leitung auf die Starkstromleitung. Es wird mit einem mittleren (horizontalen) Abstand  $a$  gerechnet, der von den Abständen  $a_1$  und  $a_2$  an den Enden der Näherung abhängt. Im Allgemeinen genügt es, diese Abstände z. B. einer topografischer Karte zu entnehmen. Als Maßstab sind 1 : 10.000 zu empfehlen (1 mm  $\hat{=}$  10 m).



**Bild 2-1** Länge einer Näherung

Für den allgemeinen Fall, in dem das Verhältnis  $a_2/a_1$  beliebige Werte annimmt, ergeben sich Werte für den mittleren Abstand  $a$  aus den Kurvenscharen der Anhänge 1 und 2, in den Leitertafeln des Anhangs 3 sowie aus den Tabellen des Anhangs 4.

Wenn das Verhältnis  $a_2/a_1$  nicht größer ist als 3, kann der mittlere Abstand auch einfach berechnet werden:

$$a = \sqrt{a_1 \cdot a_2} \quad \text{für } a_2/a_1 \leq 3 \quad (4)$$

Im Fall  $a_2/a_1 > 3$  kann die Näherungslänge  $\ell$  in kleinere Abschnitte unterteilt werden, in denen die Bedingung  $a_2/a_1 \leq 3$  wieder erfüllt ist.

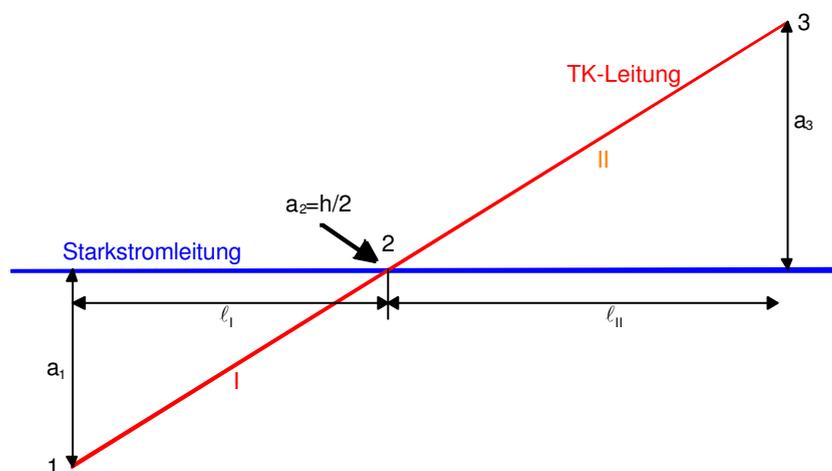
Die Kurven in den Anhängen 1 und 2 wurden durch Integration der Gegeninduktivität über die Länge  $\ell$  zwischen den Punkten 1 und 2 ermittelt.

## 2.1.2 Kreuzung

Die Kreuzung wird als Folge zweier schräger Näherungen betrachtet, die am Kreuzungspunkt zusammenstoßen. Der Abstand zwischen den Leitungen am Kreuzungspunkt ( $=a_2$  in Bild 2-2) wird gleich dem halben Höhenunterschied  $h$  zwischen beeinflussender und beeinflusster Leitung gesetzt. Bei Kreuzungen mit Starkstromfreileitungen oder Oberleitungen von Wechselstrombahnen kann  $a_2=6\text{ m}$  gesetzt werden, auch wenn der wirkliche Abstand etwas größer oder kleiner ist.

An den Enden der Kreuzung können im Allgemeinen die aus den Plänen abgelesenen horizontalen Abstände zwischen den Leitungen benützt werden. Diese Abstände  $a_1$  bzw.  $a_3$  dürfen allerdings nicht größer als 10 m sein. Die Länge  $\ell_1$  bzw.  $\ell_{II}$  des Kreuzungsabschnittes nach Bild 2-2 soll nicht länger als 50 m sein. Bei Überschreitung der genannten Werte muss der Kreuzungsabschnitt beendet und in einen Näherungsabschnitt übergegangen werden.

Die induzierten Spannungen sind in den Teilabschnitten beiderseits des Kreuzungspunktes gleich gerichtet.



**Bild 2-2** Kreuzung, als Summe der Näherung I und der Näherung II

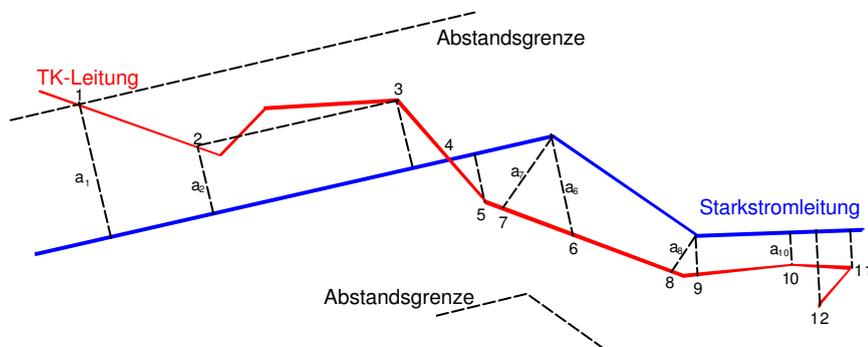
Mittlere induktionsgleiche Näherungsabstände bei Kreuzungsabschnitten können auch dem Anhang 3 entnommen werden.

### 2.1.3 Ungleichmäßige Näherung

Die ungleichmäßige Näherung stellt den allgemeinen und praktisch häufigsten Fall dar und wird für das Ermitteln der induzierten Spannung in eine Folge von je nach Bedarf parallelen und schrägen Näherungsabschnitten sowie Kreuzungen zerlegt. In diesen Abschnitten können – außer den Abständen und Längen – die Einflussgrößen (induzierender Strom, Reduktionsfaktoren, spezifischer Erdbodenwiderstand) als konstant angenommen werden. Jeder dieser Abschnitte wird für sich berechnet; die einzelnen Ergebnisse werden addiert.

Die Unterteilung wird bestimmt durch die Eckpunkte der Starkstromleitung und der TK-Leitung. Gekrümmte Leitungen oder Leitungen mit häufigen kurzen Richtungswechseln werden durch mittlere geradlinige Führungen ersetzt (siehe Bild 2-3).

Wenn im Zuge der Näherung die TK-Leitung bezogen auf den Verlauf der Starkstromleitung zurück läuft, d. h. wenn der Richtungswinkel zwischen den Leitungen  $90^\circ$  übersteigt, so wird in diesem Abschnitt eine Spannung induziert, die den Spannungen in den anderen Abschnitten entgegengesetzt ist. In Bild 2-3 entsteht deshalb die höchste Spannung nicht zwischen den Punkten 1 und 12, sondern zwischen 1 und 11.



**Bild 2-3** Ungleichmäßige Näherung – Unterteilung in Abschnitte

### 2.1.4 Grenzabstand

Für 50 Hz ergeben sich die Grenzabstände, bis zu denen Berechnungen durchgeführt werden sollen, aus nachstehender Tabelle.

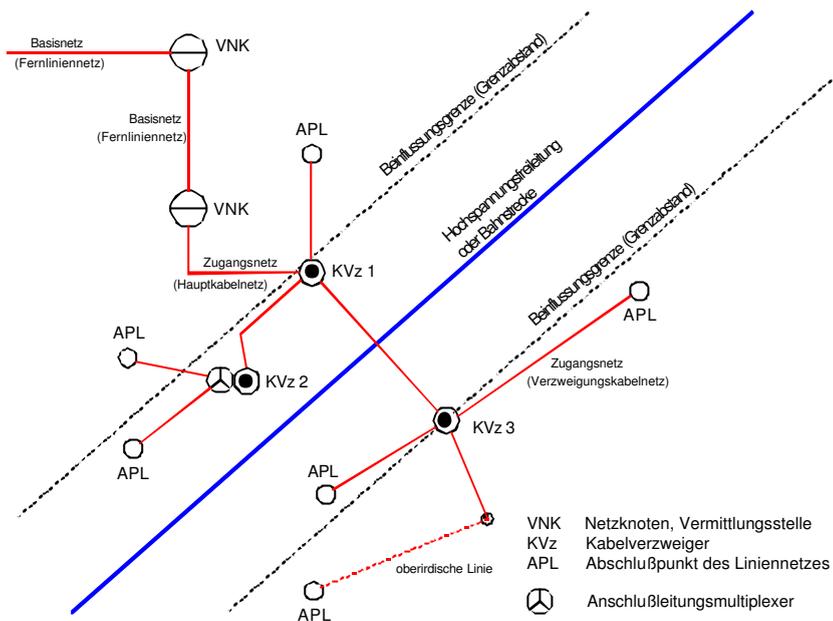
	<b>Mitteleuropäisches Flachland</b>	<b>dicht besiedeltes Ge- biet (Städte)</b>
Ortsleitungen	1.000 m	250 m
Weitverkehrsleitungen Eisenbahnsignalleitungen	2.000 m	500 m

**Tabelle 2-1: Grenzabstände für Beeinflussungsrechnungen**

Obwohl für 16,7 Hz bezogen auf gleiche Werte der Kopp-  
lungsimpedanz kleinere Grenzabstände ermittelt werden  
können, empfiehlt es sich auch hier, die genannten Ab-  
stände für 50 Hz zu Grunde zu legen.

Nach DIN VDE 0228, Teil 1 /1/ ist jedoch zu beachten,  
dass insbesondere bei Näherungen über längere Strecken  
auch Abschnitte mit größeren Abständen zwischen der  
Starkstromleitung und der TK-Leitung nennenswert zur  
induzierten Spannung beitragen können. Wenn nach den  
örtlichen Verhältnissen zu befürchten ist, dass dadurch die  
zulässigen Werte der induzierten Längs-EMK überschrit-  
ten werden, ist der Einfluss dieser Abschnitte rechnerisch  
abzuschätzen und nötigenfalls genau zu berechnen. Im  
Allgemeinen kann auf eine genauere Berechnung verzich-  
tet werden, wenn die Rechnung ohne diese Abschnitte  
einen Wert ergibt, der 50% der zulässigen Spannung nicht  
überschreitet.

DV-Programme zur Berechnung der induzierten Längs-  
EMK ermitteln die Gegeninduktivität  $M$  bzw. die Kopp-  
lungsimpedanz  $Z$  bis zu den entsprechenden Grenzab-  
ständen.



**Bild 2-4** Beeinflusstes TK-Kabelnetz

### 2.1.5 Spezifischer Erdbodenwiderstand

Im mitteleuropäischen Flachland können folgende Richtwerte für den spezifischen Erdbodenwiderstand benutzt werden:

- bei 16,7 Hz 30  $\Omega\text{m}$
- bei 50 Hz 50  $\Omega\text{m}$

Abhängig von der Bodenart kann ein zutreffender Erdbodenwiderstand auch aus der Tabelle 2-2 bestimmt werden. Die dort angegebenen Werte sind zu verwenden, wenn der Boden bis zu einer unter der jeweiligen Frequenz angegebenen Tiefe nahezu homogen ist.

Geologische Eigenschaften	Bereich des spezifischen Erdbodenwiderstands $\Omega\text{m}$	Tiefe des homogenen Erdbodens in m bei den ausgewählten Frequenzen		
		16,7 Hz	50 Hz	800 Hz
Kohleschicht, Mineralienschicht	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, Lehmboden (ohne Schwemmland)	20 bis 100	700 bis 1.600	400 bis 900	100 bis 200
Quarze, Kalkstein,	100 bis 1.000	1.600 bis	900 bis	200 bis

Geologische Eigenschaften	Bereich des spezifischen Erdbodenwiderstands $\Omega\text{m}$	Tiefe des homogenen Erdbodens in m bei den ausgewählten Frequenzen		
		16,7 Hz	50 Hz	800 Hz
Sandstein, Tonschiefer		5.000	3.000	700
Urgestein, Schiefer, Granit, Kies	1.000 bis 10.000	5.000 bis 16.000	3.000 bis 9.000	700 bis 2.000

**Tabelle 2-2: Typische Werte spezifischer Erdbodenwiderstände**

Der für Beeinflussungsrechnungen relevante Erdbodenwiderstand bezieht sich auf eine Tiefe von mehreren hundert Metern bis zu einigen Kilometern und kann nicht mit dem Verfahren nach Wenner ermittelt werden. Im freien Gelände ohne Bebauung kann der spezifische Erdbodenwiderstand mit dem im Anhang 7 beschriebenen Verfahren gemessen werden.

## 2.2 Induzierender Strom

### 2.2.1 Kurzschlussstrom $I_k$ von Drehstromleitungen und 110-kV-Bahnstromleitungen

Der Kurzschlussstrom (Dauerkurzschlussstrom) ist vom Betreiber der Starkstromanlage für den ungünstigsten Fall zu ermitteln (siehe DIN VDE 0228 sowie DIN VDE 0102 /7/). Transiente Anteile der Kurzschlussströme werden nicht berücksichtigt.

#### 2.2.1.1 Genaue Berechnung und überschlägige Ermittlung

Der Erdkurzschlussstrom in Drehstromnetzen mit niederohmiger Sternpunktterdung oder der Doppelerdschlussstrom in allen übrigen Drehstromnetzen muss mittels symmetrischer Komponenten berechnet werden, da es sich um unsymmetrische Belastungen des Drehstromnetzes handelt. Maßgebend für die Beeinflussung der TK-Leitungen ist die über Erde fließende Nullkomponente des Kurzschluss- bzw. Teilkurzschlussstromes, und zwar des Dauerkurzschlussstromes (siehe DIN VDE 0228 und DIN EN 60909 / VDE 0102).

Wenn Berechnungen oder Messungen nicht vorliegen (insbesondere bei kleinen Netzen), kann  $I_k$  aus dem leichter zu berechnenden dreipoligen symmetrischen Kurzschlussstrom  $I''_{k3p}$  bestimmt werden.

Für den Erdkurzschluss im Drehstromnetz gilt im Mittel bei einem Verhältnis Nullimpedanz / Mitimpedanz von 2,5:

$$I_k \approx 0,7 \cdot I''_{k3p} \quad (5)$$

Für den Doppelerdschlussstrom in Drehstromnetzen mit Erdschlusskompensation oder isoliertem Sternpunkt kann  $I_k$  näherungsweise dem zweipoligen Kurzschlussstrom gleich gesetzt werden, d. h.

$$I_k \approx I''_{k2p} \approx \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I''_{k3p} \approx 0,86 \cdot I''_{k3p} \quad (6)$$

Für den Doppelerdschlussstrom einer 16,7-Hz-Bahnstromleitung gilt entsprechend näherungsweise

$$I_k \approx I''_{k2p} \quad (7)$$

Wenn gemessene Werte des Kurzschlussstromes zur Verfügung stehen, können diese der Berechnung zu Grunde gelegt werden.

Für das Abschätzen des symmetrischen Kurzschlussstromes können Werte der Mit- und Gegenimpedanzen je Leiter einer Einfachleitung bei großen Querschnitten gemäß Tabelle 2-3 verwendet werden.

Betriebsfrequenz	Leitungstyp	Mit- und Gegenimpedanz je Leiter	
50 Hz	Drehstromfreileitung	Einfachseil	0,40 Ω/km
		2er-Bündel	0,30 Ω/km
		4er-Bündel	0,26 Ω/km
	Dreileiterkabel	0,11 Ω/km	
	Einleiterkabel (3-Leiter)	0,17 Ω/km	
16,7 Hz	Hochspannungsfreileitung	0,16 Ω/km	
	Fahrleitung	nach DIN VDE 0228, Teil 3	

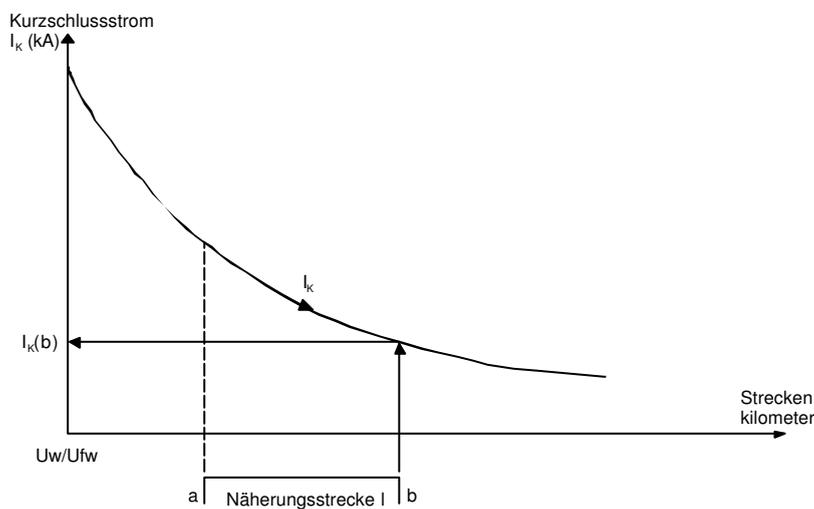
**Tabelle 2-3 Mit- und Gegenimpedanzen verschiedener Leitungsarten**

## 2.2.1.2 Ungünstigste Lage des Kurzschlusspunktes

### 2.2.1.2.1 Erdkurzschluss

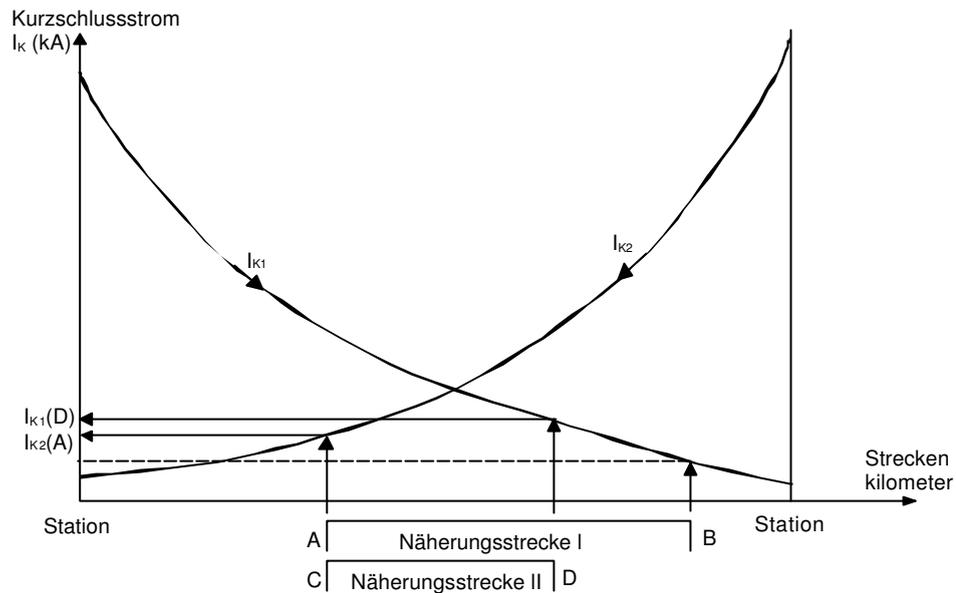
Um in Netzen mit niederohmiger Sternpunktterdung die ungünstigste Lage des Kurzschlusspunktes für eine Näherung längs einer zweiseitig gespeisten Hochspannungsleitung zu bestimmen, müssen die beiderseits dem Kurzschlusspunkt zufließenden Teil-Nullströme (bzw. ersatzweise die symmetrischen Kurzschlussströme) in Abhängigkeit von der Lage des Erdschlusspunktes längs der Näherung bekannt sein. Die hierzu nötigen Kurven (Erdkurzschlussdiagramme) sind vom Netzbetreiber zu erstellen.

Bild 2-5 zeigt ein Beispiel für ein Erdkurzschlussdiagramm für eine einseitig gespeiste Hochspannungsleitung. Der Kurzschlussstrom  $I_k$  fließt von der Station längs der Hochspannungsleitung von links nach rechts. Die für die größtmögliche Beeinflussung der Näherungsstrecke  $\ell$  maßgebende Stromstärke ist als  $I_k(b)$  abzulesen. Ggf. tritt dieser Strom am Kurzschlussort  $b$  in die Erde über und fließt dort längs der gesamten Strecke  $\ell$  von rechts nach links zur Quelle zurück.



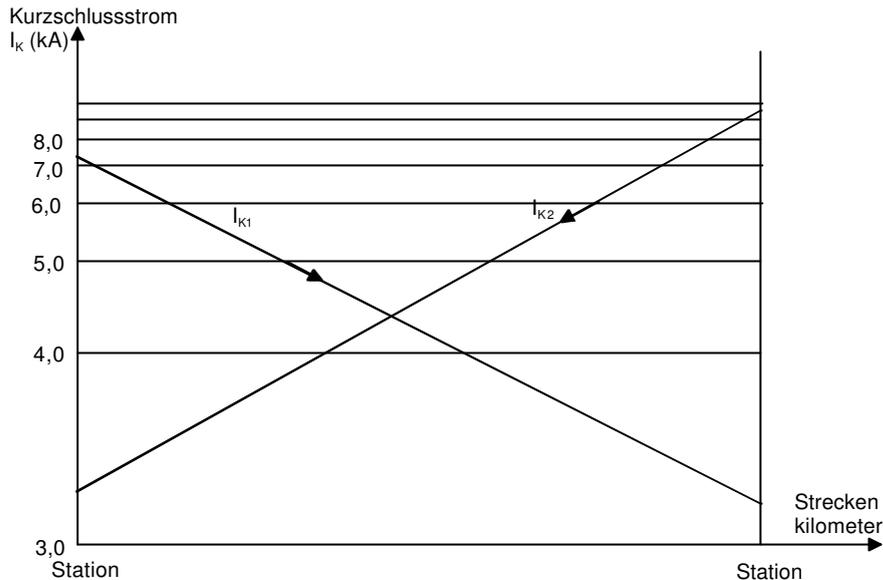
**Bild 2-5 Erdkurzschlussdiagramm**

Im Beispiel nach Bild 2-6 ergibt sich für die Näherungsstrecke I zwischen A und B der ungünstigste Punkt A mit dem von rechts zufließenden Kurzschlussstrom und für die Näherungsstrecke II zwischen C und D der Punkt D mit dem von links zufließenden Kurzschlussstrom. Bei Näherungen mit sehr ungleichen Abständen kann der ungünstigste Punkt u. U. innerhalb der Näherung liegen.



**Bild 2-6 Erdkurzschlussdiagramm mit Ordinatenachse in linearer Skalenteilung**

Durch Verwendung eines Reziprokmaßstabes lassen sich die Kurven strecken (Bild 2-7). Damit wird das Aufzeichnen der Diagramme insbesondere dann wesentlich erleichtert, wenn nur die Kurzschlussströme in beiden Endstationen bekannt sind /8/, Näheres siehe Anhang 5.



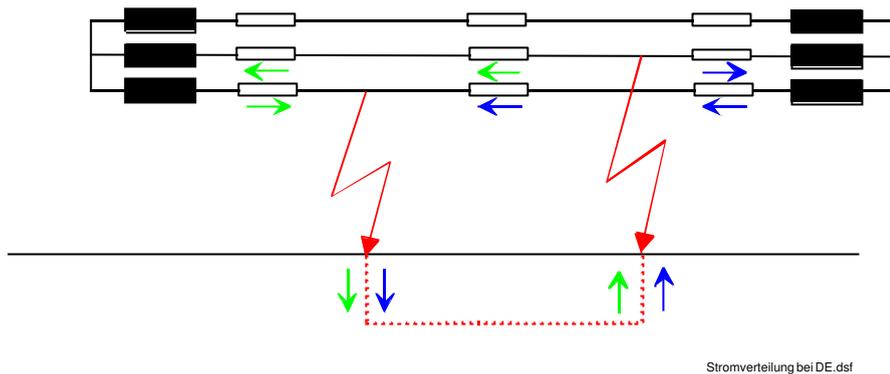
**Bild 2-7 Erdkurzschlussdiagramm  
Ordinatenachse in Reziprokteilung**

### 2.2.1.2.2 Doppelerdschluss

Der ungünstigste Beeinflussungsfall durch Doppelerdschluss ergibt sich in der Regel bei Lage der beiden Erdschlusspunkte beiderseits außerhalb der Näherung, nahe an deren Enden. Besitzt eine TK-Leitung zwei oder mehr Näherungen mit einer Hochspannungsleitung, so ist die Lage der Erdschlusspunkte beiderseits der gesamten Näherungsstrecke in Betracht zu ziehen.

Bei Ersatz des Doppelerdschlussstroms durch den zweipoligen Kurzschlussstrom liegt der ungünstigste Kurzschlusspunkt ungefähr im „Schwerpunkt“ der Näherung, d. h. je nach Abstandsverlauf über der Näherungslänge z. B. im Bereich des kleinsten Näherungsabstands.

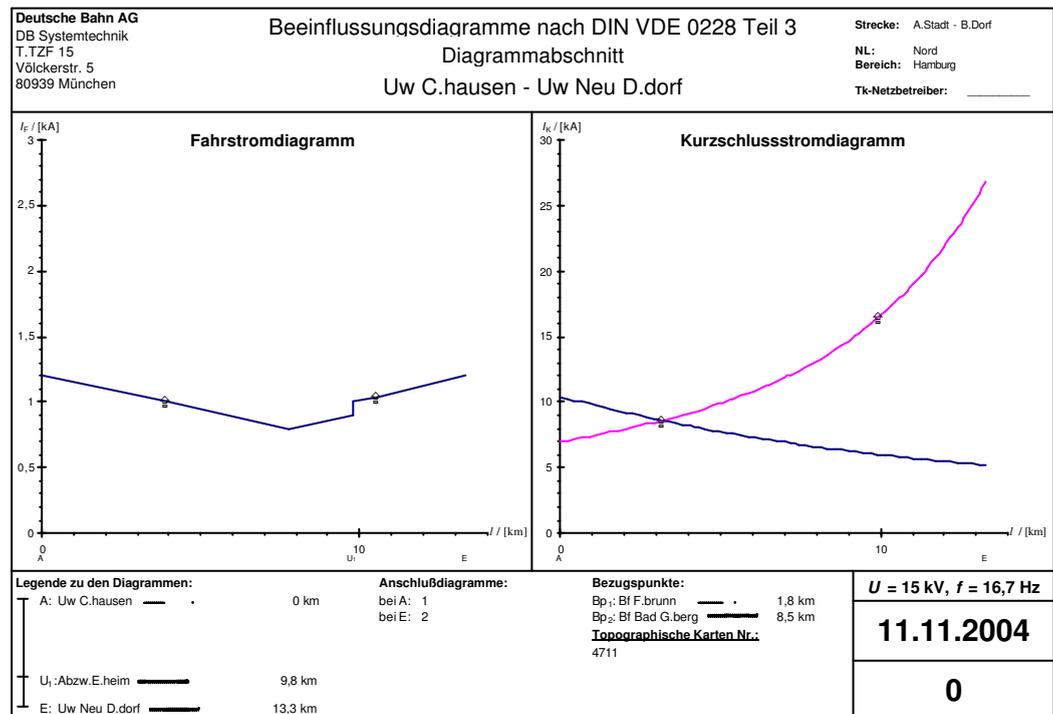
Bei zweiseitiger Speisung des Doppelerdschlusses (auch bei Ersatz durch den zweipoligen Kurzschlussstrom) ist stets die Summe der beiderseits zufließenden Ströme zu bilden, weil zwischen den Erdschlusspunkten alle Ströme in gleicher Richtung über Erde fließen und sich addieren (siehe Bild 2-8). Außerhalb des Erdschlussabschnitts fließen die Kurzschlussströme in den Außenleitern zurück und induzieren deshalb hier keine Spannungen mehr.



Stromverteilung bei DE.dsf

**Bild 2-8** Beeinflussung durch Doppelerdschluss

## 2.2.2 Beeinflussungsströme im 15-kV-Oberleitungssystem der Deutschen Bahn



**Bild 2-9** Fahrstrom- und Kurzschlussstromdiagramm nach VDE 0228 Teil 3

Bild 2-9 zeigt das Beispiel eines Fahrstrom- und Kurzschlussstromdiagramms bei zweiseitiger Speisung (Standardfall). Diagramme werden in der Regel begrenzt durch Unterwerke (Uw), Umformerwerke (Ufw), Schaltposten (Sp) oder Kuppelstellen (KS). Die angegebenen Ströme sind Summenwerte der Ströme in Fahr-, Speise- und Ver-

stärkungsleitungen längs einer Bahnstrecke bzw. Trasse. Im Folgenden werden alle diese Leitungen als Oberleitungssystem bezeichnet. Die Diagramme werden nach VDE 0228 Teil 3 erstellt.

### 2.2.2.1 Fahrstrom $I_F$ (Fahrstromdiagramm)

Der  $I_F$ -Verlauf umhüllt die Summenwerte der typischen Belastungsspitzen. Dabei werden nach VDE 0228 Teil 3 u. a. folgende Parameter berücksichtigt:

- höchste fahrplanmäßige Streckenbelastung
- gleichzeitige Anfahrten.

Bei neu zu elektrifizierenden Strecken wird das Fahrstromdiagramm mit Hilfe von Lastflussberechnungen erstellt. Danach werden die Summenströme in regelmäßigen Abständen durch Messungen überprüft.

Der Beeinflussungsstrom ist der Strom  $I_F$  im Oberleitungssystem. Er wird aus den vorhandenen Stromdiagrammen bestimmt.

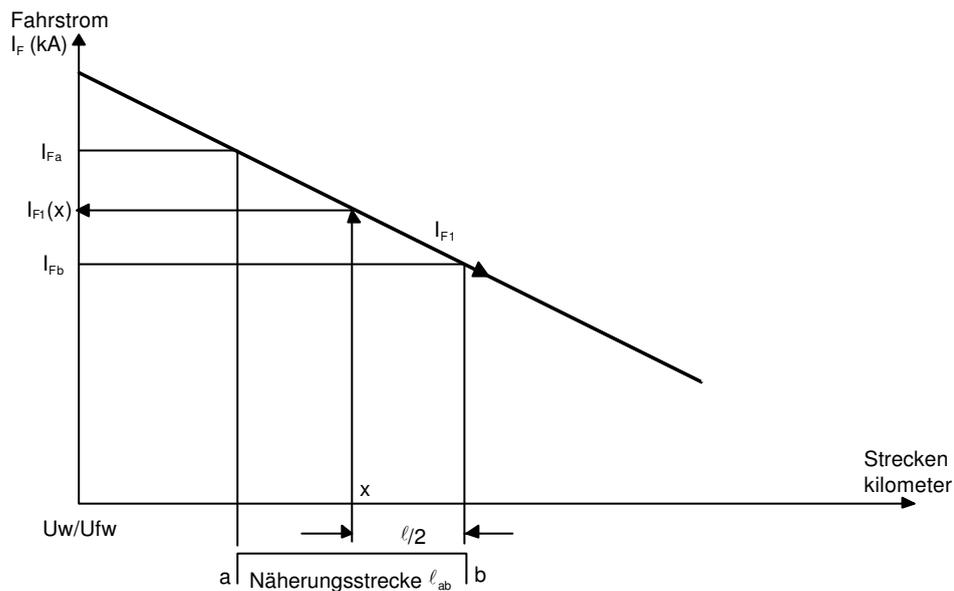
Die für Beeinflussungsrechnungen maßgeblichen Fahrstromwerte sind nach folgendem Arbeitsablauf zu ermitteln:

- Die Näherung ist an jeder Unstetigkeitsstelle des Fahrstroms  $I_F$  in Abschnitte zu unterteilen (siehe Bild 2-11, Bild 2-13 bis 2-15)
- Soweit mehrere Abschnitte im Verlauf eines Stromdiagramms liegen, so ist der höchste mittlere Fahrstrom  $I_F$  bezogen auf die Näherungslänge  $\ell$  zu ermitteln. Wenn mehrere Diagramme betroffen sind, dann ist je Diagramm ein mittlerer Fahrstrom zu bilden, siehe Bilder 2-14 und 2-15. Bei unterschiedlichen Speiserichtungen sind die Vorzeichen der Ströme zu beachten.
- Die induzierte Längs-EMK ist für jeden Abschnitt getrennt unter Beachtung des Vorzeichens zu berechnen.
- Die induzierte Längs-EMK für die gesamte Näherungslänge errechnet sich aus der arithmetischen Addition der Teilspannungen unter Beachtung des Vorzeichens. Eine arithmetische Addition ist be-

gründet, weil die Unterwerke und Umformerwerke in der Regel in Phasenlage und Frequenz synchronisiert sind.

(a) Bei stetigem Verlauf der Stromkurve wird der Strom  $I_{Fab}$  als arithmetischer Mittelwert aus den Strömen am Beginn ( $I_{Fa}$ ) und am Ende ( $I_{Fb}$ ) der Näherungsstrecke  $\ell_{ab}$  berechnet.

$$I_{Fab} = I_{F1}(x) = \frac{I_{Fa} + I_{Fb}}{2} \quad (8)$$



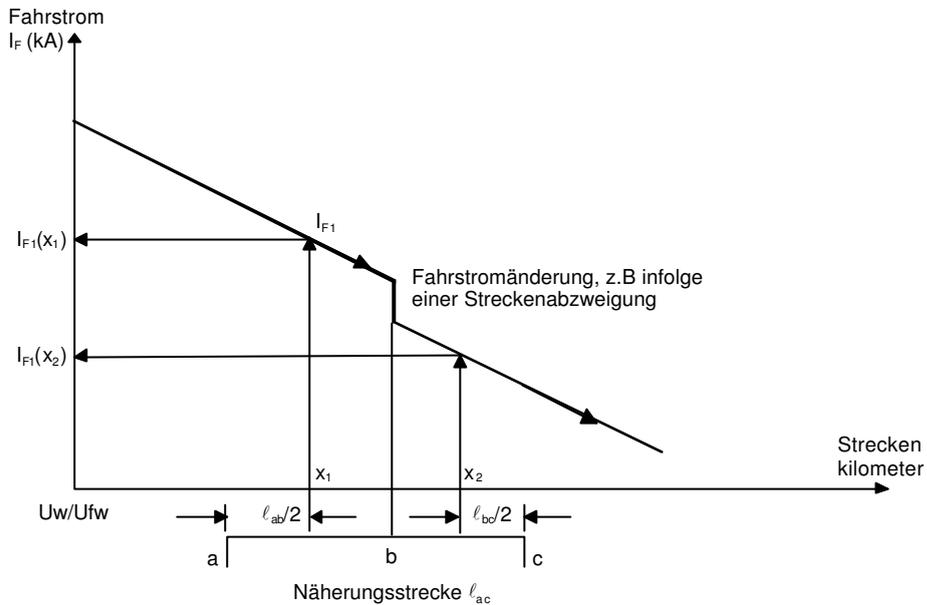
**Bild 2-10 Ermittlung des beeinflussenden Stroms bei einseitiger Speisung**

(b) Sind Unstetigkeitsstellen im Fahrstromdiagramm vorhanden (z.B. senkrechte Sprünge), wird die Näherungsstrecke  $\ell_{ac}$  an dieser Stelle in Abschnitte unterteilt und der beeinflussende Strom für jeden Abschnitt separat bestimmt (Bild 2-11).

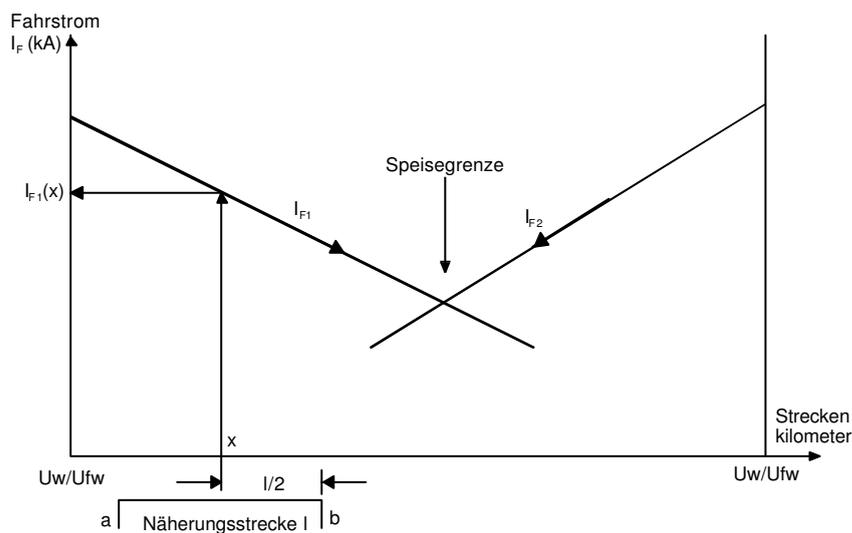
(c) Bei zweiseitiger Speisung gilt diese Berechnung nur, soweit die Näherungsstrecke nicht über die Speisegrenze hinausgeht (Bild 2-12).

(d) Liegt die Speisegrenze innerhalb der Näherungsstrecke, ist nach Bild 2-13 zu verfahren, da durch die entgegengesetzte Richtung der Ströme eine Kompensationswirkung vorhanden ist:

Dabei wird angenommen, dass die Kompensationswirkung des in der Mitte der Näherungsstrecke kleineren Diagrammstroms 25 % beträgt. Zur Berechnung ist die Formel (9) für Bild 2-13 sinngemäß anzuwenden. Der kleinere Diagrammstrom ist hierzu über den Schnittpunkt der Speisegrenze hinaus zu verlängern.



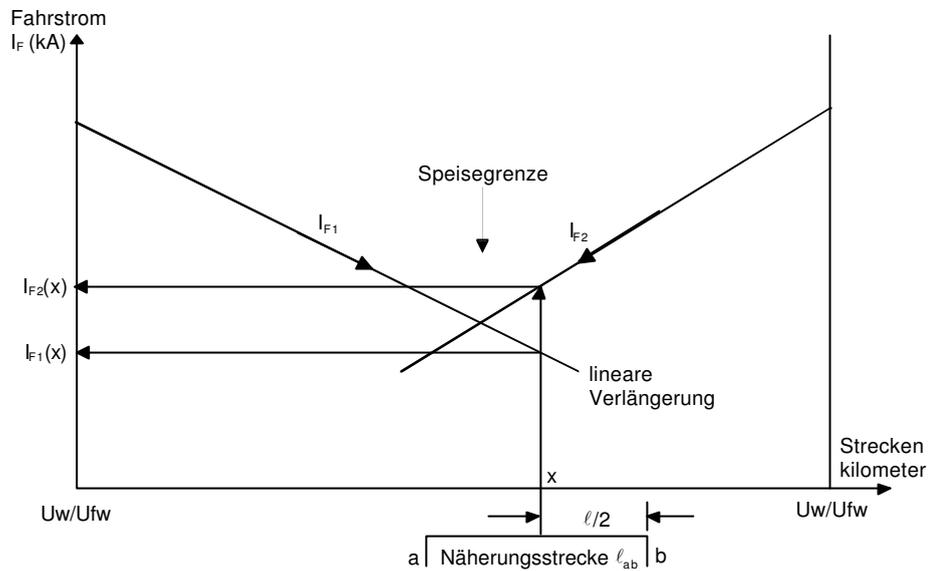
**Bild 2-11** Ermittlung des beeinflussenden Stroms bei einseitiger Speisung und Unstetigkeit im Fahrstromverlauf



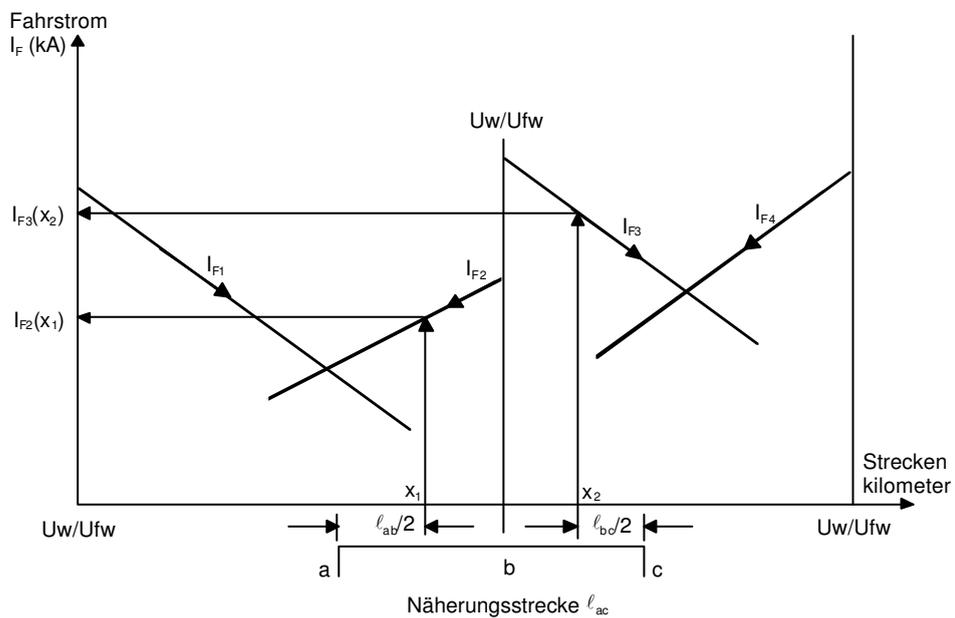
**Bild 2-12** Ermittlung des beeinflussenden Stroms bei zweiseitiger Speisung

Für  $I_{F2}(x) \geq I_{F1}(x)$  gilt:

$$I_{Fab} = I_{F2}(x) - 0,25 \cdot I_{F1}(x) \quad (9)$$



**Bild 2-13** Ermittlung des beeinflussenden Stroms bei zweiseitiger Speisung und Speisegrenze innerhalb der Näherungsstrecke

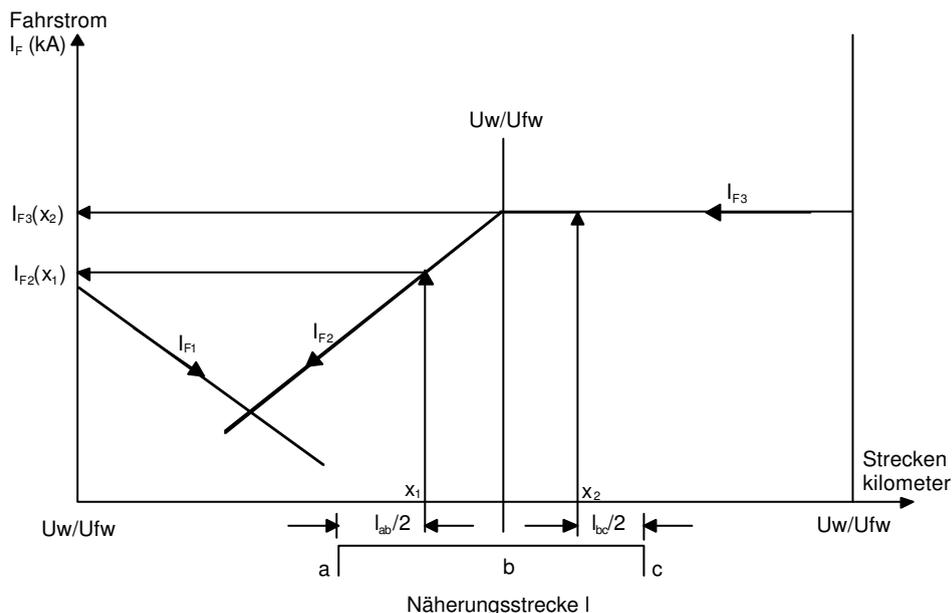


**Bild 2-14** Ermittlung des beeinflussenden Stroms bei Unterwerk innerhalb der Näherungsstrecke und zweiseitiger Speisung

Ist die Speisegrenze ausnahmsweise kein Stromschnittpunkt, sondern ein senkrechter Stromsprung, so tritt keine Kompensation auf.

(e) Für den Teilabschnitt  $\ell_{ab}$  der Nährungsstrecke mit dem Fahrstrom  $I_{F2}(x_1)$  und für den Teilabschnitt  $\ell_{bc}$  der Nährungsstrecke mit dem Fahrstrom  $I_{F3}(x_2)$  (siehe Bild 2-14) werden die Beeinflussungsspannungen berechnet. Die größere von beiden wird als gültige Beeinflussungsspannung für die Nährungsstrecke  $\ell_{ac}$  verwendet. Eine Kompensation durch entgegengesetzte Stromrichtungen wird nicht berücksichtigt, da eine Speiserichtung ausfallen kann.

(f) Befindet sich innerhalb der Nährungsstrecke eine Einspeisung in die Oberleitung und ist die Stromrichtung in beiden Speiseabschnitten gleich, so werden die in den Teilabschnitten der Nährungsstrecke induzierten Spannungen arithmetisch addiert.



**Bild 2-15** Ermittlung des beeinflussenden Stroms wenn eine Einspeisestelle innerhalb der Nährungsstrecke liegt

Die abschnittsweise berechneten Teilspannungen mit jeweils gleichem Vorzeichen sind arithmetisch zu addieren (siehe Bild 2-15).

### 2.2.2.2 Kurzschlussstrom $I_K$ (Kurzschlussstromdiagramm)

Der  $I_K$ -Verlauf berücksichtigt die volle Unterwerksleistung sowie die Streckenimpedanz aller betriebsmäßig parallel geschalteten Leitungen des Oberleitungssystems.

Die für Beeinflussungsrechnungen maßgeblichen Kurzschlussstromwerte sind nach folgendem Arbeitsablauf zu ermitteln:

- Die Näherung ist an jeder Unstetigkeitsstelle des Kurzschlussstroms  $I_K$  in Abschnitte zu unterteilen (siehe Bild 2-18).
- Für jeden Abschnitt muss der bezogen auf die Abschnittslänge ungünstigste Kurzschlussort bzw. Kurzschlussstrom ermittelt werden. Bei annähernd homogenen Näherungen ist dies – soweit nur ein Kurzschlussdiagramm betroffen ist – stets der höchste auf die gesamte Abschnittslänge einwirkende Stromwert an einem der beiden Enden des Näherungsabschnitts.
- Bei Näherung über eine Unstetigkeitsstelle, z. B. ein Unterwerk oder ein Umformerwerk hinaus (siehe Bild 2-18) ist zunächst die Berechnung der induzierten Spannung für den Abschnitt mit der höchsten Beeinflussung durchzuführen. Da nur ein Kurzschlussort als wahrscheinlich angenommen wird, darf die in dem anderen Abschnitt induzierte Spannung nur mit einem entsprechend der durchgeschalteten Oberleitungslänge reduzierten Kurzschlussstromwert  $I_{KX}$  berechnet werden. Mit Hilfe der Beziehung (10) kann  $I_{Kax}$  nach Bild 2-18 mit ausreichender Genauigkeit bestimmt werden.

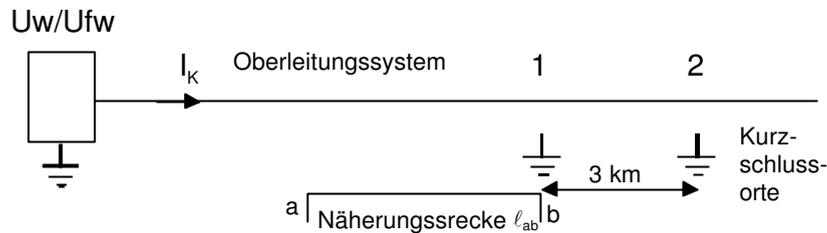
(a) Bezogen auf das beeinflussende System ist der Kurzschlussort zu bestimmen, der in der Näherungsstrecke die höchste Beeinflussungsspannung erzeugt.

Aus folgenden zwei Varianten lässt sich in der Regel der ungünstigste Kurzschlussort (höchste Beeinflussungsspannung) ermitteln:

1. Der Kurzschlussort liegt direkt am Ende der Näherungsstrecke. Die Näherungsstrecke liegt zumi-

dest teilweise im Nahbereich des Kurzschlusses.

2. Der Kurzschlussort liegt 3 Kilometer vom Ende der Näherungsstrecke entfernt. Die Näherungsstrecke liegt außerhalb des Nahbereiches des Kurzschlusses.



**Bild 2-16** Ermittlung des ungünstigsten Kurzschlussorts

Der Kurzschlussort 1 liegt näher am Uw bzw. Ufw und hat somit in der Regel den höheren Kurzschlussstrom, jedoch kann bis zum Abstand von 3 Kilometern der günstigere Schienenreduktionsfaktor verwendet werden.

Der Kurzschlussort 2 weist den niedrigeren Kurzschlussstrom auf, jedoch kann nicht der günstigere Schienenreduktionsfaktor verwendet werden.

Der ungünstigste Kurzschlussort kann vor der Berechnung durch eine Abschätzung festgelegt werden oder beide Varianten werden separat berechnet. Der Ort mit der höheren Beeinflussungsspannung ist zu verwenden.

Es ist zunächst der Kurzschlussort mit dem höheren Strom zu wählen (Ort a oder b). Danach ist die ungünstigste Variante wie oben beschrieben zu ermitteln.

(b) Die zweiseitig gespeiste Fahrleitung wird zur Ermittlung der maximalen Beeinflussung als einseitig gespeist betrachtet. Der jeweils größte Betrag des ermittelten Stroms wird als beeinflussend angenommen (Bild 2-17); hier  $I_{k1}(b)$ .

(c) Liegt im Verlauf der Näherungsstrecke ein Uw bzw. Ufw, ist folgendes Verfahren anzuwenden:

Kurzschlussort b: Die Verbindung muss in zwei Abschnitte aufgeteilt werden. Für den Abschnitt xb wird der Kurzschlussstrom  $I_{k3}(b)$  oder  $I_{k3}(b+3\text{km})$  für die Berechnung

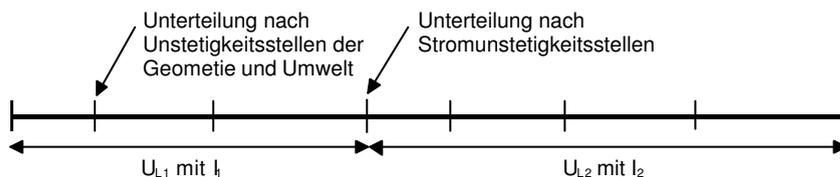


Dasselbe Verfahren wird sinngemäß für die andere Seite der Näherungsstrecke (Kurzschlussort a) angewendet. Die höchste der vier Summenspannungen für Kurzschlussorte an den Punkten a und b der Näherungsstrecke bzw. 3 km vor und nach den Punkten a und b (siehe (a)) ist Grundlage für die Addition der Teilspannungen.

### 2.2.2.3 Besondere Hinweise

Die in den Bildern 2-10 bis 2-18 dargestellten Näherungsmöglichkeiten sind auf die überwiegende Zahl aller Beeinflussungsfälle sinngemäß anwendbar. Der richtige Stromwert kann mit Hilfe der Beispiele ermittelt werden.

Werden TK-Kabel von zwei oder mehreren Streckenabschnitten (unstetiger Stromverlauf) beeinflusst, so ist vorab grob abzuschätzen, wie hoch die durch jeden Abschnitt erzeugte Längs-EMK sein wird.



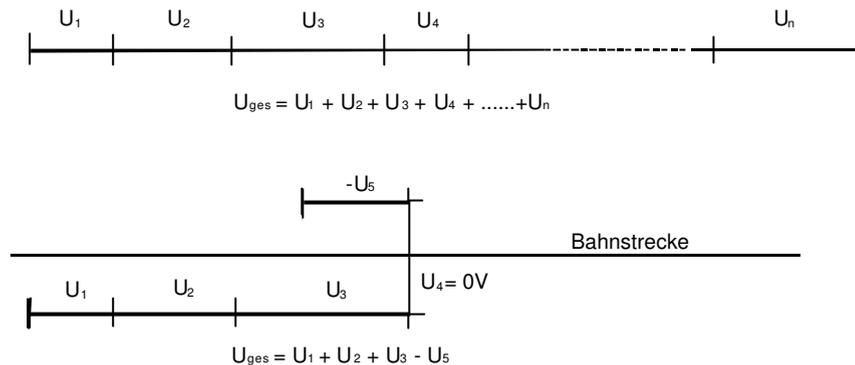
**Bild 2-19** Verschiedene Beeinflussungsabschnitte für eine Näherungsstrecke

Ist bei parallel beeinflussenden Streckenabschnitten mit jeweils unterschiedlichen Stromdiagrammen das Verhältnis des jeweils kleinsten zum größten Spannungswert kleiner als 1 : 10 im Fehlerfall bzw. kleiner als 1 : 3 im Normalbetrieb, darf der kleinere Wert vernachlässigt werden, sofern der größere nach genauer Berechnung nicht mehr als 90 % des zulässigen Grenzwerts beträgt.

Bei einer längeren Näherungsstrecke mit seriell anzusetzenden Stromdiagrammen gilt diese Regel nicht, sondern es sind die in den Abschnitten 2.2.2.1 und 2.2.2.2 beschriebenen Verfahren anzuwenden.

Wenn die zu berechnende Näherungsstrecke in mehrere Abschnitte aufgeteilt wurde, werden die Beeinflussungsspannungen der einzelnen Berechnungsabschnitte arithmetisch addiert und ergeben die Gesamtspannung für die betrachtete Näherungsstrecke.

Verläuft ein einzelner Abschnitt einer Näherungsstrecke entgegen der Hauptrichtung, wird die berechnete Abschnittsspannung bei der Addition mit einem negativen Vorzeichen berücksichtigt.



**Bild 2-20** Gesamte Beeinflussungsspannung einer Näherungsstrecke

### 2.3 Reduktionsfaktoren r

Die durch den Strom I einer Starkstromleitung in TK-Leitungen induzierte Längs-EMK wird durch die Reduktionwirkung so genannter Kompensationsleiter verringert. Darunter versteht man sowohl beidseitig als auch kontinuierlich geerdete Leiter, die sich in der Nähe der beeinflussenden oder der beeinflussten Leitung befinden.

Wenn mehrere schirmende bzw. geerdete Leiter vorhanden sind, wird der resultierende Reduktionsfaktor r als Produkt der einzelnen Reduktionsfaktoren (11a) oder als Kehrwert der Summe der Kehrwerte der einzelnen Reduktionsfaktoren (11b) ermittelt. Der höhere Wert von beiden wird für die Berechnung verwendet.

$$r = r_K \cdot r_S \cdot r_E \cdot r_X \quad (11a)$$

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_K} + \frac{1}{r_S} + \frac{1}{r_E} + \frac{1}{r_X} \quad (11b)$$

r resultierender Reduktionsfaktor

$r_K$	Reduktionsfaktor des Kabelmantels
$r_S$	Reduktionsfaktor der Schienen
$r_E$	Reduktionsfaktor des Erdseils
$r_X$	Reduktionsfaktor benachbarter Rohrleitungen und anderer metallener Leiter („Umweltreduktionsfaktor“).

Eine ausführliche Beschreibung der Funktionsweise und Anleitungen zur Berechnung der Reduktionswirkungen enthält die TE 8 /2/.

In den meisten Fällen führt jedoch die Benutzung von Richtwerten für den Reduktionsfaktor  $r$  zu ausreichend genauen Ergebnissen.

### 2.3.1 Richtwerte für den Umweltreduktionsfaktor $r_X$

Der Umweltreduktionsfaktor  $r_X$  beschreibt die Wirkung aller unbekannt metallenen Leiter im Erdreich, z.B. Gas- und Wasserrohre, Starkstromkabel, Bewehrungen, Bandender usw. Der Reduktionsfaktor  $r_X$  lässt sich somit nur mit Hilfe einer Messung genau bestimmen. Mit für die Praxis ausreichender Genauigkeit gilt:

$$r_X = \frac{U_{\text{Messwert}}}{U_{\text{Rechenwert}}} \quad (12)$$

Da beide Spannungswerte auf den gleichen beeinflussten Strom bezogen werden müssen, ist ein erheblicher Aufwand für die notwendigen definierten Messbedingungen erforderlich. Der berechnete Wert ist dabei für  $r_X = 1$  zu ermitteln.

Da der spezifische Bodenwiderstand meist unbekannt ist und die Berechnung der Längs-EMK deshalb in der Regel mit dem empfohlenen Normalwert des spezifischen Bodenwiderstands durchgeführt wird, berücksichtigt der so ermittelte Umweltreduktionsfaktor auch den tatsächlichen, vom Normalwert abweichenden Bodenwiderstand.

Für die Standardwerte des spezifischen Bodenwiderstands (50 bzw. 30  $\Omega\text{m}$ ) können erfahrungsgemäß folgende Richtwerte für  $r_X$  angenommen werden:

Art des Geländes bzw. der Bebauung	Umweltreduktionsfaktor $r_x$
Bereich von S- oder U-Bahnen in Tunnelstrecken im Stadtbereich	$\leq 0,05$
Stadtkern	$\leq 0,15$
engerer Stadtbereich	$\leq 0,25$
weiterer Stadtbereich	$\leq 0,35$
Vororte	$\leq 0,40$
Stadtrand (halboffene Bebauung)	$\leq 0,50$
Stadtrand (offene Bebauung)	$\leq 0,60$
freies Gelände mit Straßen	$\leq 0,80$
freies Gelände ohne Straßen	$\leq 1,00$

**Tabelle 2-4 Richtwerte für Umweltreduktionsfaktoren**

### 2.3.2 Richtwerte für den Schienenreduktionsfaktor $r_s$

Die in der Tabelle 2-5 angegebenen Richtwerte für den Schienenreduktionsfaktor  $r_s$  gelten sowohl bei Beeinflussungen durch 16,7-Hz- als auch 50-Hz-Anlagen, jedoch nur für einen Bezugsabstand der Schiene von ca. 6 m zur Oberleitung oder zur TK-Leitung. Diese Bedingungen werden deshalb – bezogen auf dieselbe Bahnstrecke – als gegeben angesehen

- a) bei Beeinflussung durch Fahr- und Kurzschlussströme in den Oberleitungen der Bahn
- b) bei Beeinflussung von Signal- und TK-Kabeln der Bahn.

In anderen Fällen müssen bei stark abweichendem Bezugsabstand (die Schutzwirkung verringert sich deutlich bei Verdopplung des Bezugsabstandes) die Reduktionsfaktoren nach der TE 8 exakt ermittelt werden.

	Gleiszahl	Schienenreduktionsfaktor $r_s$
Nicht elektrifizierte Bahnstrecken*	1 bis 6	0,8
	große Bahnhöfe	0,6
elektrifizierte Bahnstrecken	1 bis 2	0,5 (0,25)**
	3 bis 6	0,35 (0,15)**
	große Bahnhöfe	0,2

**Tabelle 2-5 Richtwerte für Schienenreduktionsfaktoren**

\* jedoch mit leitend durchverbundenen Schienen  
 ()\*\* Die eingeklammerten Werte sind nur gültig bei Beeinflussung durch Fahr- und Kurzschlussströme der Bahn in einem Bereich bis zu 3 km Entfernung vom speisenden Unterwerk sowie bei Beeinflussung durch Kurzschlussströme der Bahn in einem Bereich bis zu 3 km Entfernung vom Kurzschlussort.

Zur Bestimmung der Richtwerte für  $r_S$  wird im Allgemeinen die Gleiszahl der freien Strecke ermittelt. Kleinere und mittlere Bahnhöfe werden dabei nicht berücksichtigt.

**2.3.3 Richtwerte für den Erdseilreduktionsfaktor  $r_E$**

Der Erdseilreduktionsfaktor von Hochspannungsfreileitungen ist abhängig vom Wirkwiderstand des Erdseils, vom Erdbodenwiderstand und der Gegeninduktivität Erdseil - Leiterseil, also der Mastgeometrie. Die Werte schwanken in Abhängigkeit von diesen Größen um  $\pm 10\%$  bei hoch leitfähigen Erdseilen bzw. um  $\pm 2 - 3\%$  bei Stahlseilen.

Die nachfolgenden Beispielwerte für  $r_E$  gelten sowohl für 16,7 Hz (nur 110-kV-Bahnstromleitungen) als auch für 50 Hz für einen Bezugsabstand zwischen Leiterseil und Erdseil von ca. 10 m.

Art des Erdseils	Al/St-Seile		Bronzeseile		Stahlseile		Stahl-Kupfer (40%)	
Querschnitt in mm <sup>2</sup>	300/50 265/35 240/40 185/35	44/32 (95/55) 105/75)	50	70	50	70	50	70
Reduktionsfaktor $r_E$	0,62	0,77 (0,70)	0,75	0,69	0,99	0,98	0,84	0,78

**Tabelle 2-6 Beispielwerte für Reduktionsfaktoren von Freileitungs-Erdseilen**

In der Nähe größerer Umspannwerke und Speisepunkte kann der Erdseilreduktionsfaktor günstiger sein als auf freier Strecke (Endeneffekt). In diesem Fall fließt ein größerer Teil des Erdkurzschlussstroms über das Erdseil in die Station zurück, als es der induktiven Kopplung zwischen Außenleiter und Erdseil entspricht.

Liegt der Fehlerort weniger als ca. 3 km vom Kraftwerk oder der Station entfernt, verringern sich die Erdseilreduk-

tionsfaktoren wegen des Endeneffektes auf etwa 80 % der ursprünglichen Werte.

### **Einfluss parallel verlaufender zusätzlicher Hochspannungsleitungen**

Durch die Erdseile einer zweiten Hochspannungsleitung, die parallel zur beeinflussenden ersten Hochspannungsleitung verläuft und dieselben Stationen verbindet, kann sich die Situation im Hinblick auf Beeinflussungen verbessern. Die Wirkung einer solchen – in bis zu 50 m Abstand zur beeinflussenden Leitung verlaufenden – zusätzlichen Leitung kann annähernd durch einen resultierenden Erdseilreduktionsfaktor bestimmt werden:

$$r_E = r_{E1} \cdot \sqrt{r_{E2}} \quad (13)$$

$r_E$  resultierender Erdseilreduktionsfaktor  
 $r_{E1}$  Erdseilreduktionsfaktor der beeinflussenden Leitung  
 $r_{E2}$  Erdseilreduktionsfaktor der zusätzlichen Leitung

### **Zusätzlicher Reduktionsfaktor für Endeneffekt beim Doppelerdschluss**

Der in der Nähe des Fehlerorts auftretende Endeneffekt hat bei Doppelerdschlüssen wegen des an beiden Fußpunkten auftretenden Ausgleichsvorgangs eine erheblich bessere Reduktionswirkung als der einseitige Endeneffekt bei einem Erdkurzschluss. Voraussetzung hierbei ist jedoch, dass die Fußpunkte des Doppelerdschlusses nicht in den zugehörigen Hochspannungsstationen liegen.

Liegen die Fußpunkte eines Doppelerdschlusses nahe zusammen, fließt praktisch der gesamte Doppelerdschlussstrom im Erdseil und hat somit fast keine induktive Beeinflussung von TK-Leitungen zur Folge.

Bei unendlich weit auseinander liegenden Fußpunkten ergibt sich eine ausgeglichene Stromverteilung. Der kompensierende Strom im Erdseil kann dann mit dem Erdseilreduktionsfaktor allein erfasst werden. Der Endeneffekt lässt sich dabei durch einen zusätzlichen Reduktionsfaktor  $r_{EE}$  beschreiben, der mit dem Erdseilreduktionsfaktor multipliziert wird.

In der Tabelle 2-7 sind für unterschiedliche Freileitungstypen Richtwerte für den zusätzlichen Reduktionsfaktor bei

Doppelerdschlüssen angegeben, falls der Fußpunkt-  
abstand und die Näherungslänge bis zu 5 km betragen. In  
allen anderen Fällen ist von den Reduktionsfaktoren bei  
ausgeglichener Stromverteilung auszugehen.

Art der Hochspannungsleitung	$r_{EE}$ bei Abstand der Fußpunkte von $\leq 5$ km
Leitung mit 1 Erdseil 5 $\Omega$ Masterdungswiderstand	0,74
Leitung mit 1 Erdseil 10 $\Omega$ Masterdungswiderstand	0,64
Leitung mit 2 Erdseilen 10 $\Omega$ Masterdungswiderstand	0,54

**Tabelle 2-7 Richtwerte für den zusätzlichen Reduktionsfaktor  
von Freileitungen bei Doppelerdschluss**

### **Rückleiterseile bei 16,7-Hz-Bahn-Oberleitungen**

Ein zusätzlicher Rückleiter (Erdseil) am Oberleitungsmast,  
der in bestimmten Abständen mit den Schienen verbun-  
den wird, verbessert die Leitfähigkeit und damit die Re-  
duktionswirkung des Rückleitungssystems entlang einer  
Bahnstrecke.

Der Strom im Rückleiterseil reduziert die Beeinflussungs-  
spannung. Bei der Berechnung kann dieser Reduktions-  
faktor nur außerhalb des Nahbereiches von 3 km vom Un-  
terwerk/Umformerwerk bzw. Kurzschluss berücksichtigt  
werden.

Der Reduktionsfaktor  $r_E$  kann mit den Werten nach Tabelle  
2-8 nur dann angewendet werden, wenn der Schienenre-  
duktionsfaktor  $r_S$  nach Tabelle 2-5 festgelegt und berück-  
sichtigt worden ist. Um beiden Einflussfaktoren gerecht zu  
werden sind beide Reduktionsfaktoren  $r_S$  und  $r_E$  zu kombi-  
nieren (multiplizieren).

Die in der Tabelle 2-8 angegebenen Werte gelten für  
Rückleiterseile, die (außer bei eingleisigen Strecken) beid-  
seitig der Oberleitung und ungefähr in deren Höhe ange-  
bracht sind.

Anzahl Gleise	Abstand Gleis - Kabel $\leq 10\text{m}$	Abstand Gleis - Kabel $> 10\text{m}$
1 - 2	0,40	0,50
3 - 6	0,60	0,70
$\geq 7$	1,00	1,00

**Tabelle 2-8 Richtwerte für Reduktionsfaktoren eines Rücklei-  
terseils**

### 2.3.4 Richtwerte von Reduktionsfaktoren für TK- Kabel

Kabelmantelreduktionsfaktoren können der TE 2, TE 3  
sowie DIN VDE 0891 /12/ entnommen werden.

Ein Beispiel für TK-Kabel mit 30 mm Außendurchmesser  
zeigt die nachfolgende Tabelle .

Mäntel von TK-Kabeln	Reduktionsfaktor $r_K$ (Richtwerte)		
	50 Hz	16,7 Hz	
Schichtenmantelkabel	0,92	1,0	
Bleimantelkabel	0,62	1,0	
Stahlwellmantel (bis $E'_m = 30 \text{ V/km}$ )	0,97	1,0	
Aluminiummantelkabel nach DIN VDE 0891	glatter Mantel	0,41	0,77
	gewellter Mantel	0,50	0,86

**Tabelle 2-9 Richtwerte für Reduktionsfaktoren von TK-Kabeln**

Die Kabelmantelreduktionsfaktoren von stahlbandbewehr-  
ten Kabeln und von Kabeln mit Stahlmänteln sind jeweils  
wegen der magnetischen Eigenschaften dieser Materialien  
vom Mantelstrom und damit indirekt von der induzierten  
Mantelspannung  $E'_m$  abhängig.

$$E'_m = \frac{Z' \ell r_{\text{res}(X,S,E)} \cdot I}{\ell_m} \quad (14)$$

$r_{\text{res}(X,S,E)}$  resultierender Reduktionsfaktor nach Gleichung (11a) oder (11b)

$\ell_m$  Länge des (TK-)Kabelmantels

Die in einer Ader induzierte Längs-EMK erhält man unter Berücksichtigung des Kabelmantelreduktionsfaktors  $r_K = f(E'_m)$  und der Länge des Kabelmantels  $\ell_m$  mit Hilfe nachstehender Beziehung:

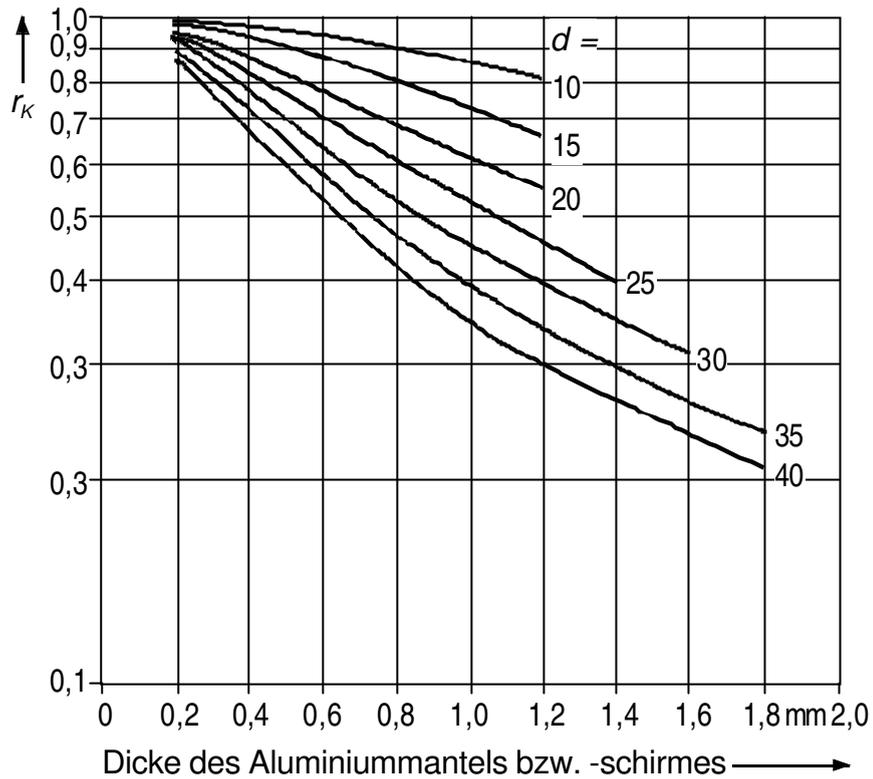
$$E_i = E'_m \cdot \ell_m r_K \quad (15)$$

Für TK-Kabel mit Stahlbandbewehrung sind Reduktionsfaktoren als Funktion der Kabelmantellängsspannung aus Diagrammen abzulesen (z. B. TE 3, Anhang 1).

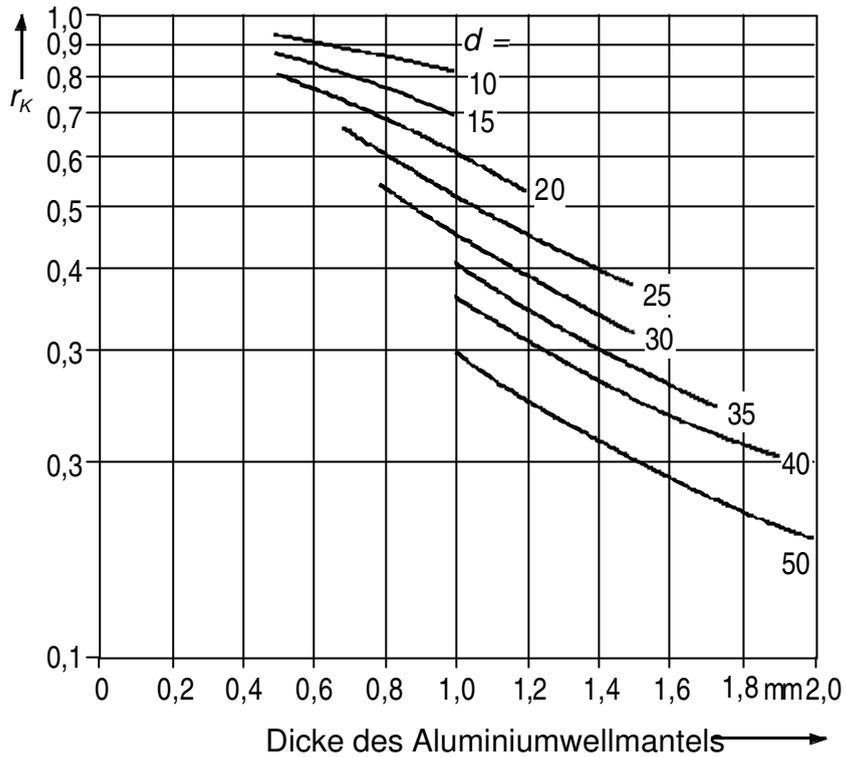
Die Abhängigkeit des Reduktionsfaktors von der Mantelspannung kann an einem Probestück von 1,5 m Länge entsprechend DIN VDE 0472 Teil 507 /11/ gemessen werden.

### **2.3.5 Richtwerte von Kabelmantelreduktionsfaktoren für Starkstromkabel**

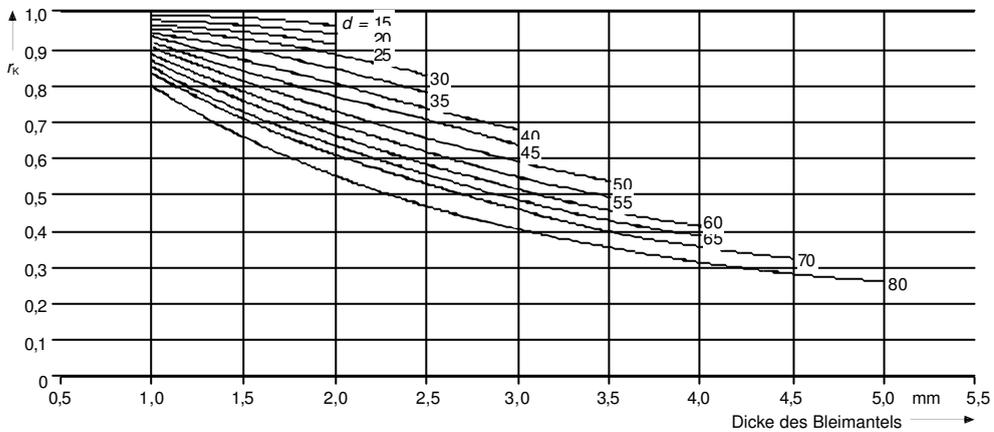
Ebenso wie bei einer Hochspannungsfreileitung mit Erdseil teilt sich auch bei einem Starkstromkabel mit metallener Kabelhülle bei einem Erdschluss der Erdfehlerstrom in zwei Teilströme auf, von dem der eine über die metallene Kabelhülle und der andere über die Erde fließt. Der Teilstrom in der metallenen Kabelhülle erzeugt ein magnetisches Feld, das dem magnetischen Feld, das vom Gesamtfehlerstrom in dem jeweiligen Außenleiter erzeugt wird, entgegengerichtet ist. Die reduzierende Wirkung des in der Kabelhülle fließenden Stroms wird durch den Kabelmantelreduktionsfaktor ausgedrückt. Richtwerte von Kabelmantelreduktionsfaktoren für Starkstromkabel sind in den Bildern 2-21 bis 2-24 dargestellt.



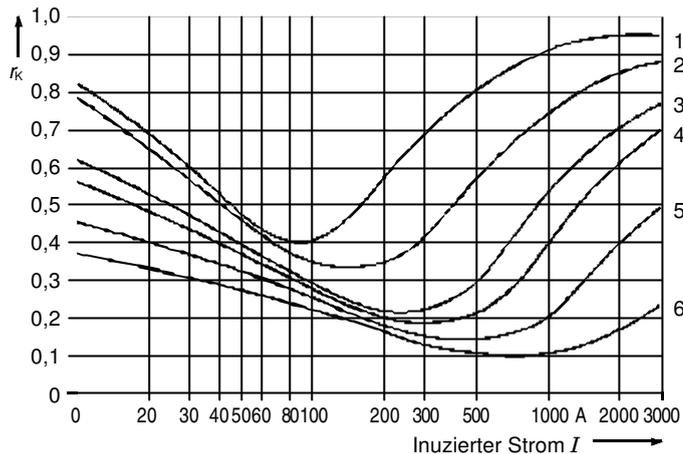
**Bild 2-21** Kabelmantelreduktionsfaktoren  $r_K$  von Starkstromkabeln: unbewehrt, mit (glattem) Aluminiummantel oder -schirm bei  $f = 50$  Hz;  $d$  = Kabeldurchmesser über Al-Mantel in mm



**Bild 2-22** Kabelmantelreduktionsfaktoren  $r_K$  von Starkstromkabeln: unbewehrt, mit gewelltem Aluminiummantel bei  $f = 50$  Hz;  $d$  = Kabeldurchmesser über Al-Mantel in mm



**Bild 2-23** Kabelmantelreduktionsfaktoren  $r_K$  von Starkstromkabeln: unbewehrt, mit Bleimantel bei  $f = 50$  Hz;  $d$  = Kabeldurchmesser über Bleimantel in mm



Kurve Nr.	d	k	b
1	20	1,3	0,5
2	30	1,5	0,5
3	35	1,6	0,8
4	40	1,8	0,8
5	50	2,2	0,8
6	60	2,8	1,0

d      Kabeldurchmesser  
          über Bleimantel  
          in mm  
 k      Dicke des Bleimantels  
          in mm  
 b      Dicke eines Stahlbands  
          in mm

**Bild 2-24      Kabelmantelreduktionsfaktoren  $r_K$  von Starkstromkabeln: mit Bleimantel, zweilagige Stahlbandbewehrung bei  $f = 50$  Hz**

Der bei Hochspannungsfreileitungen mit Erdseil bei einem Erdkurzschluss in der Nähe des Fehlerorts auftretende Endeneffekt tritt auch bei Kabel Fehlern auf.

Liegen die Fußpunkte eines Doppelerdschlusses nahe zusammen, fließt praktisch der gesamte Doppelerdschlussstrom im Kabelmantel des Hochspannungskabels und hat somit fast keine induktive Beeinflussung von TK-Leitungen zur Folge.

Bei unendlich weit voneinander entfernten Fußpunkten ergibt sich eine ausgeglichene Stromverteilung. Der kompensierende Strom im Kabelmantel wird dann mit dem vom Kabelhersteller angegebenen Kabelmantelreduktionsfaktor angegeben.

Der Endeneffekt lässt sich durch einen zusätzlichen Reduktionsfaktor  $r_{EE}$  beschreiben, der mit dem Kabelmantelreduktionsfaktor  $r_K$  bei ausgeglichener Stromverteilung multipliziert wird.

In der nachstehenden Tabelle sind Richtwerte für verschiedene Hochspannungskabel bei unterschiedlichen Abständen der Fußpunkte des Doppelerdschlusses angegeben.

Art des Hochspannungskabels		$r_{EE}$ bei Abstand der Fußpunkte von				
		1 km	2 km	3 km	5 km	10 km
110-kV-Kabel im Stahlrohr	Glasvlies-Bitumenummhüllung	0,12	0,22	0,31	0,45	0,68
	PE-Umhüllung	0,02	0,04	0,07	0,11	0,21
MS-Kabel	NAKBA-Kabel	0,06	0,11	0,16	0,25	0,43
	Kunststoffkabel	0,03	0,06	0,11	0,16	0,30

**Tabelle 2-10 Mittelwerte des zusätzlichen Kabelmantelreduktionsfaktors  $r_{EE}$  bei Doppelerdschluss**

Ist die beeinflussende Leitung länger als die Näherungslänge, ist bei Drehstromkabeln zur Ermittlung des zusätzlichen Reduktionsfaktors von der Länge des Kabels als Fußpunkt Abstand auszugehen.

### 3 Rechenverfahren

#### 3.1 Abschnittsweise Berechnung

Für die abschnittsweise Berechnung ist folgendes Schema zu empfehlen:

Ab-schnitt	Werte z. B. nach Anhang 4			$\ell$ km	Reduktionsfaktoren						Spalte 4 · 5 · 11	
	$a_1$ m	$a_2$ m	$E_i'$ V / km <sup>2</sup> kA		Erdseil/ Schiene $r_E / r_S$	TK- Mantel $r_K$	Umwelt $r_X$	Produkt $r_E \cdot r_K \cdot r_X$ $r$	Kehrwert $1/r = 1/r_E + \dots$ $r$	verwendet $r$	$E_i$ V / kA	$\Sigma E_i$ V / kA
	1	2	3		4	5	6	7	8	9	10	11
1 - 2	10	40	208	0,4	0,5	0,9	0,3	0,135	0,156	0,156	13,0	13,0
2 - 3	40	50	176	1,0	0,5	0,9	0,5	0,225	0,196	0,225	39,6	52,6
3 - 4	50	90	150	0,35	0,5	0,9	0,5	0,225	0,196	0,225	11,8	64,4
4 - 5	90	150	118	0,115	0,25	0,9	0,4	0,09	0,131	0,131	1,8	66,2
5 - 6	150	60	127	0,4	0,25	0,9	0,7	0,158	0,153	0,158	8,0	74,2
1 - 6	Gesamte Längs-EMK										74,2	74,2

**Tabelle 3-1 Abschnittsweise Berechnung der Längs-EMK**

Für Abschnitte mit stahlbandbewehrten TK-Kabeln und solchen mit Stahlmänteln wird mit Hilfe der Gleichung (14) zunächst die Mantelspannung  $E'_m$  und danach anhand von Gleichung (15) die in eine Ader induzierte Längs-EMK  $E_i$  errechnet.

Zur Beachtung:

Die Reduktionsfaktoren können in den einzelnen Abschnitten verschiedene Werte haben. Bei erdfühligen Kabeln mit Stahlbandbewehrung oder Stahlwellmantel gilt dies auch für den Kabelmantelreduktionsfaktor  $r_K$ . Sofern ein genaueres Ergebnis erforderlich wird empfiehlt es sich, die Beeinflussungsberechnungen DV-gestützt auszuführen. Entsprechende Programme erlauben dabei die abschnittsweise Berechnung der Mantelspannung einschließlich der Ermittlung des jeweiligen Kabelreduktionsfaktors.

### 3.2 Digitale Berechnung

Die Anwendung von Digital-Rechnern bietet ohne wesentlichen Mehraufwand die Möglichkeit, verschiedene Einflüsse, wie den Phasenwinkel der Gegeninduktivität oder die Abhängigkeit des Kabelreduktionsfaktors von der Mantelspannung zu berücksichtigen.

Mit derartigen Programmen (z.B. /14/) sollten Beeinflussungsfälle dann berechnet werden, wenn auf Grund der nach 3.1 ermittelten induzierten Spannungen aufwändige Schutzvorkehrungen erforderlich würden. Mit Beeinflussungsprogrammen können berechnet werden:

- Induzierte Längsfeldstärken im Normalbetrieb von Hochspannungsleitungen durch Betriebsströme von z.B. sechs Stromkreisen
- Induktionsspannungen in einseitig geerdeten TK-Kabeln bei induktiver Beeinflussung durch Betriebsströme und durch Erdfehlerströme.

Die Berechnung wird zweckmäßigerweise in folgenden Schritten vorgenommen:

- Aufnahme der Geometrie und Zerlegung in Teilabschnitte
- Berechnung der Koppelimpedanzen nach ITU-T Directives [18]
- abschnittsweise Berechnung der Längsfeldstärken und Induktionsspannungen
- Berechnung des Ersatzschaltbildes der TK-Leitung
- Berechnung der induzierten Längs-EMK

- Berechnung der Leiter-Erd-Spannungen (common-mode-Spannungen)

Für eine Prüfung derartiger Programme bzw. einen Vergleich der Ergebnisse können Testbeispiele herangezogen werden, die direkt aus der SfB-Website oder aus der TE 7 /13/ (Beeinflussung von Rohrleitungen bei Normalbetrieb und durch Fehlerströme) zu entnehmen sind.

#### 4 Berechnung von Beeinflussungen durch Fehlerströme in Drehstromsystemen oder durch einphasige Wechselstromkreise

Bei der Berechnung in diesem Abschnitt wird davon ausgegangen, dass die einpoligen Fehlerströme im Erdkurzschlussfall immer wesentlich größer als die Betriebsströme sind und letztere deshalb vernachlässigt werden können.

Der Betrag des Gegeninduktivitätsbelags  $M'$  bzw. des Koppelimpedanzbelags  $Z'$  für einpolige Fehlerströme in Drehstromsystemen oder für einphasige Wechselstromkreise lässt sich – sowohl für Näherungen an Starkstromfreileitungen als auch -kabeln – mit ausreichender Genauigkeit mit der Gleichung /5/ bestimmen.

für  $x \leq 10$ :

$$M' = 142,5 + 45,96 x - 1,413 x^2 - 198,4 \cdot \ln x \text{ in } \frac{\mu\text{H}}{\text{km}} \quad (16a)$$

für  $x > 10$ :

$$M' = \frac{400}{x^2} \frac{\mu\text{H}}{\text{km}} \quad (16b)$$

mit

$$x = a \sqrt{\frac{\mu_0 \cdot \omega}{\rho}} \quad \text{mit} \quad \mu_0 = 0,4 \cdot \pi \cdot 10^{-6} \frac{\text{H}}{\text{m}} \quad (16c)$$

und  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$

(Quelle: ITU-T Directives, Volume II, Chapter 2.3.2)

f      Nennfrequenz der Starkstromleitung in Hz  
 ρ      spezifischer Bodenwiderstand in  $\Omega\text{m}$

a Abstand in m

Wenn eine Näherung aus Abschnitten mit stark unterschiedlichen Abständen besteht und der errechnete Wert einer Beeinflussungsspannung zu aufwändigen Schutzmaßnahmen führen würde, empfiehlt sich ggf. eine genauere Rechnung unter Benutzung der komplexen Gegeninduktivität.

## **5 Berechnung von Beeinflussungen durch Drehstromsysteme im Normalbetrieb**

Beeinflussung im Normalbetrieb eines Drehstromsystems entsteht dadurch, dass sich die durch die Betriebsströme hervorgerufenen Magnetfelder am Ort eines TK-Leiters – bedingt durch die Anordnung der Hochspannungsleiter – nicht vollständig zu Null ergänzen. Unzulässige Beeinflussungsspannungen können vor allem dann entstehen, wenn der Abstand zwischen dem Drehstromsystem und der TK-Leitung in der gleichen Größenordnung wie der Abstand zwischen den einzelnen Leitern des Drehstromsystems liegt.

Dies gilt insbesondere bei TK-Leitungen in der Nähe von Kabelsystemen, deren einzelne Adern mit größerem Abstand zueinander verlegt sind und besonders dann, wenn in diesen Systemen kein Nullstrom (z. B. kein beidseitig geerdeter leitfähiger Schirm) vorhanden ist.

Auch im Nahbereich einer Drehstromfreileitung, d.h. bis zu Abständen von ca. 400 m von der Freileitungsachse, können in TK-Leitungen nennenswerte Beeinflussungsspannungen im Normalbetrieb auftreten.

Das Erdseil einer beeinflussenden Freileitung kann sich auf die im Normalbetrieb in einem TK-Leiter erzeugte Spannung ungünstig auswirken. Durch das magnetische Restfeld im Nahbereich der Drehstromfreileitung wird auch im Erdseil ein Dauerstrom hervorgerufen. Im Gegensatz zum Erdseilstrom bei einem Erdkurzschluss reduziert dieser Erdseilstrom die in einem TK-Leiter induzierte Spannung nicht immer, sondern erhöht diese sogar in den meisten Fällen. Eine Erhöhung der bezogenen induzierten Längsfeldstärken durch das Erdseil tritt dann ein, wenn der dominierende Einfluss der magnetischen Felder der Außenleiter auf das Erdseil und den beeinflussten TK-Leiter von jeweils unterschiedlichen Außenleitern herrührt.

Wirkt überwiegend derselbe Außenleiter sowohl auf das Erdseil als auch auf den beeinflussten Leiter ein, verringern sich die bezogenen induzierten Längsfeldstärken /15/.

Beeinflussungen im Normalbetrieb führen zu dauernd anstehenden Spannungen, die jedoch wegen der begrenzten Beeinflussungsströme wesentlich geringer als durch Fehlerströme erzeugte Beeinflussungsspannungen sind. Auch liegt bei der Fehlerstrombeeinflussung ein anderer Beeinflussungsmechanismus zu Grunde.

Einige 10 Volt Beeinflussungsspannungen während längerer, allerdings begrenzter Dauer können andererseits auch im Fehlerfall, z.B. bei Einfacherdschluss in Hochspannungsnetzen mit Erdschlusskompensation entstehen.

Ausgangsgröße für die im Normalbetrieb eines Drehstromsystems erzeugte Beeinflussungsspannung  $E_i$  ist die Koppelimpedanz  $Z_{3p}'$ . Im allgemeinen Fall berechnet sich die komplexe Impedanz  $Z_{3p}'$  aus der Geometrie und der Netzkreisfrequenz  $\omega$  zu:

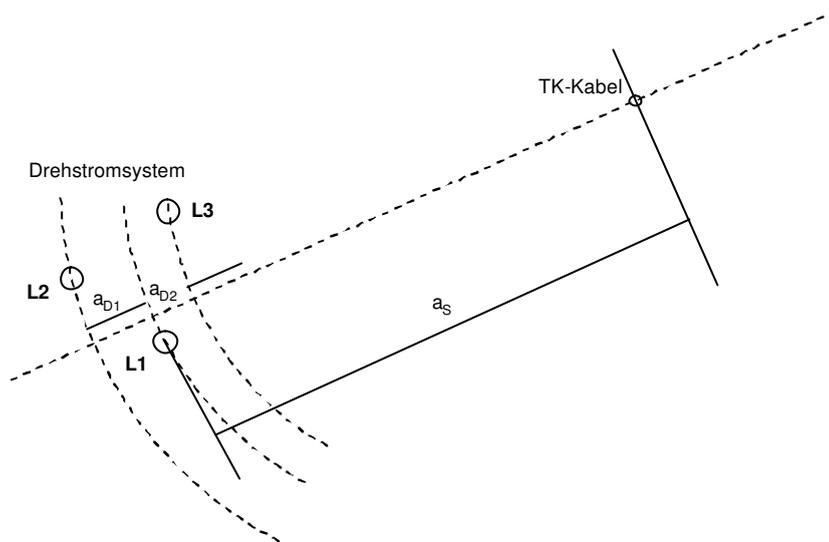
$$\underline{Z}'_{3p} = j\omega \cdot \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \left( \ln \frac{(a_S + a_{D1})(a_S - a_{D2})}{a_S^2} - j\sqrt{3} \cdot \ln \frac{a_S - a_{D2}}{a_S + a_{D1}} \right) \quad (17a)$$

(Quelle: ITU-T Directives, Volume II, Chapter 4.2)

Der Betrag  $Z_{3p}'$  ergibt sich zu:

$$Z_{3p}' = \frac{f \cdot \mu_0}{2} \sqrt{3 \left( \ln \frac{a_S - a_{D2}}{a_S + a_{D1}} \right)^2 + \left( \ln \frac{(a_S + a_{D1})(a_S - a_{D2})}{a_S^2} \right)^2} \quad (17b)$$

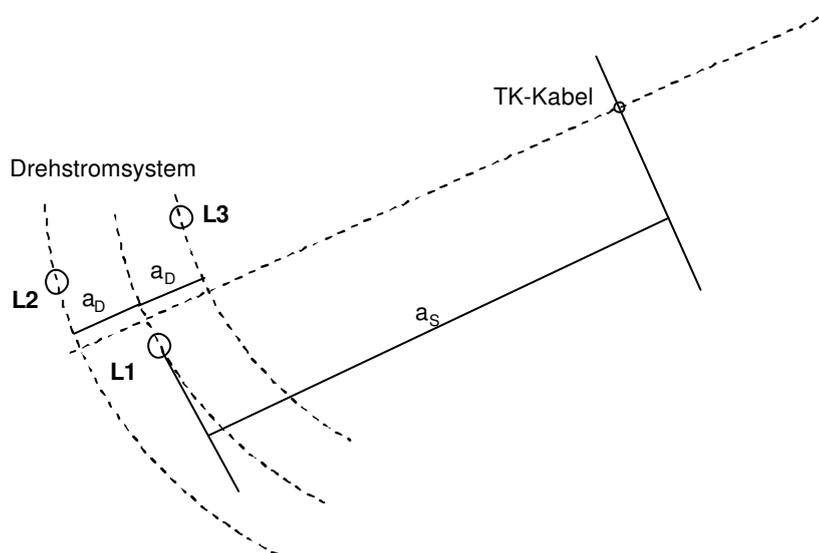
$a_S$	Abstand zwischen dem Drehstromsystem und der TK-Leitung
$a_{D1}, a_{D2}$	Differenzabstände zwischen den Außenleitern des Drehstromsystems nach Bild 5-1
$\mu_0$	Permeabilitätskonstante ( $= 0,4 \cdot \pi \cdot 10^{-6}$ H/m)
$f$	Frequenz



**Bild 5-1** Abstände zwischen den Leitern eines Drehstromsystems und einem TK-Kabel

Wenn der Leiter L1 als Referenzleiter zum Bemessen des Abstands  $a_s$  betrachtet wird und der Abstand  $a_{D1} = a_{D2} = a_D$  ist (siehe Bild 5-2), wird

$$Z'_{3p} = \frac{f \cdot \mu_0}{2} \cdot \sqrt{3 \left( \ln \frac{a_s - a_D}{a_s + a_D} \right)^2 + \left( \ln \frac{(a_s + a_D)(a_s - a_D)}{a_s^2} \right)^2} \quad (17c)$$



**Bild 5-2** Abstände zwischen den Leitern eines Drehstromsystems und einem TK-Kabel, Sonderfall

In den meisten praktischen Anwendungen ist  $a_D$  deutlich kleiner als  $a_S$ . In diesen Fällen können folgende Vereinfachungen verwendet werden:

Für  $a_D/a_S \leq 0,9$ :

$$Z'_{3p} = \frac{\sqrt{3} \cdot f \cdot \mu_0}{2} \cdot \ln \frac{1 - \frac{a_D}{a_S}}{1 + \frac{a_D}{a_S}} \quad (17d)$$

Für  $a_D/a_S \leq 0,3$ :

$$Z'_{3p} = \sqrt{3} \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \frac{a_D}{a_S} \quad (17e)$$

## 5.1 Beeinflussung durch Drehstromfreileitungen im Normalbetrieb

Eine Beeinflussung im Normalbetrieb wird nur berücksichtigt, sofern ein TK-Kabel in enger Näherung zu einer Hochspannungsfreileitung geführt ist. Bei einem Abstand  $a$  des TK-Kabels von der Leitungsachse und einer Näherungslänge  $\ell$  ist unter Zugrundelegung eines Betriebsstromes von 1000 A im Allgemeinen keine unzulässige Beeinflussung im Normalbetrieb zu erwarten, wenn das Verhältnis  $\ell/a < 35$  beträgt.

Die durch die Betriebsströme von Drehstromkreisen im Normalbetrieb induzierte Längs-EMK kann mit DV-Programmen berechnet werden. Für einen beeinflussten Stromkreis kann die induzierte Längs-EMK auch mit nachstehender Formel bis zu Abständen von 400 m von der Freileitungsachse bestimmt werden /16/.

$$E_i' [V / kA \cdot km] = 1,4 \cdot \sqrt{A^2 + B^2 - AB} \quad (18a)$$

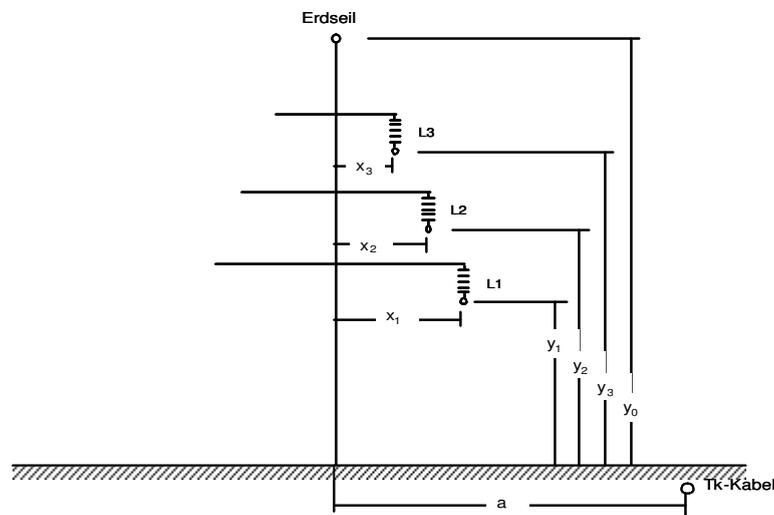
$$A = \ln \frac{\delta^2}{y_0^2 + a^2} \ln \frac{(y_0 - y_2)^2 + x_2^2}{(y_0 - y_1)^2 + x_1^2} + 22 \ln \frac{y_2^2 + (a - x_2)^2}{y_1^2 + (a - x_1)^2} \quad (18b)$$

$$B = \ln \frac{\delta^2}{y_0^2 + a^2} \ln \frac{(y_0 - y_3)^2 + x_3^2}{(y_0 - y_1)^2 + x_1^2} + \ln \frac{y_3^2 + (a - x_3)^2}{y_1^2 + (a - x_1)^2} \quad (18c)$$

$y_1, y_2, y_3, y_0$  mittlere Abstände der Außenleiter und des Erdseils vom Erdboden  
 $x_1, x_2, x_3$  Abstände der Außenleiter von der Mastmitte  
 $a$  Abstand des beeinflussten Leiters von der Leitungssachse  
 $\delta$  Eindringtiefe in das Erdreich

$$\delta[\text{m}] = 658 \sqrt{\frac{\rho[\Omega\text{m}]}{f[\text{Hz}]}} \quad (18\text{d})$$

mit  
 $\rho$  spezifischer Erdbodenwiderstand  
 $f$  Frequenz



**Bild 5-3: Beispiel zu Abständen bei einer Freileitung**  
**Bezeichnungen gemäß Gl. (18b) und (18c)**

Befinden sich mehrere Stromkreise auf einem Gestänge, so werden für jeden Stromkreis einzeln die Werte für die bezogenen induzierten Längsfeldstärken bestimmt. Diese können dann z. B. nach dem Verfahren gemäß DIN VDE 0228 Teil 1, Abschnitt 5.1.1.5 – Wurzel aus der Summe der Quadrate der Teilfeldstärken – zu einer resultierenden Längsfeldstärke überlagert werden. Sind die beeinflussenden Stromkreise parallel geschaltet (z.B. bei Doppelleitungen) oder weisen diese in der überwiegenden Zeit einen Lastfluss in gleicher Richtung auf (z.B. Kraftwerksanschlussleitungen), sind die Beträge der Teilspannungen zu addieren.

## 5.2 Beeinflussung durch Drehstromkabel im Normalbetrieb

Auch bei Drehstromkabeln kann eine merkbare Beeinflussung im Normalbetrieb auftreten, wenn drei Einzeladern mit größerem Abstand zueinander, z. B. in Einebenenanordnung verlegt sind.

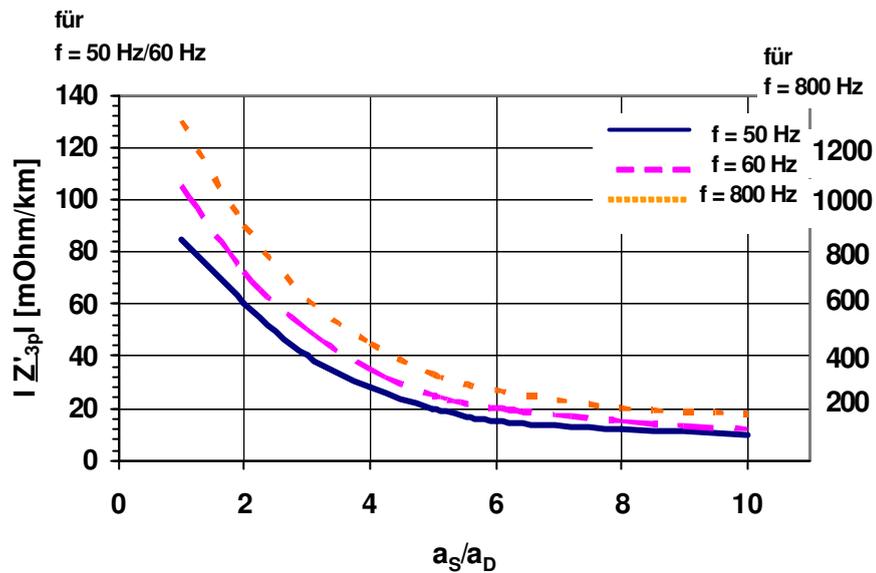


Bild 5-4 Gegenimpedanz eines Drehstromkabels im Erdkreis

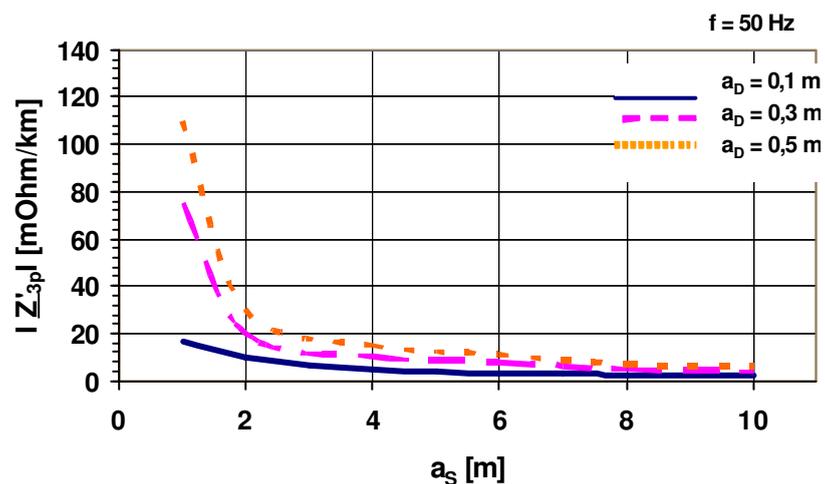
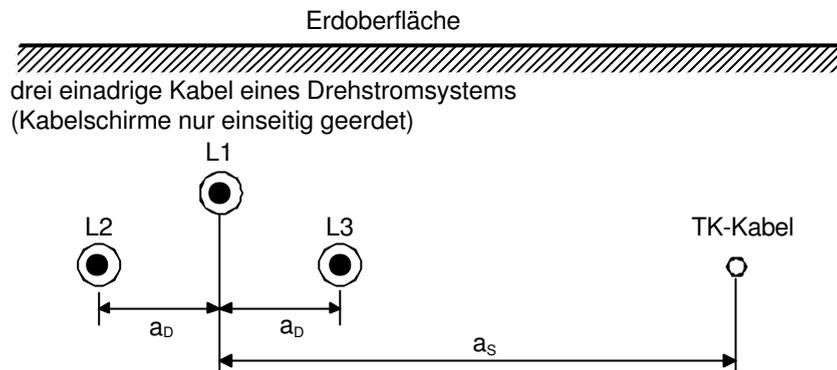


Bild 5-5 Gegenimpedanz eines Drehstromkabels im Erdkreis für unterschiedliche Werte von  $a_D$

Für eine Anordnung nach Bild 5-6 ist im Anhang 4 die induzierte Längs-EMK für verschiedene Abstände  $a_D$  und  $a_S$  aus einer Tabelle zu entnehmen.



**Bild 5-6: Beeinflussung durch ein Starkstromkabel im Normalbetrieb**

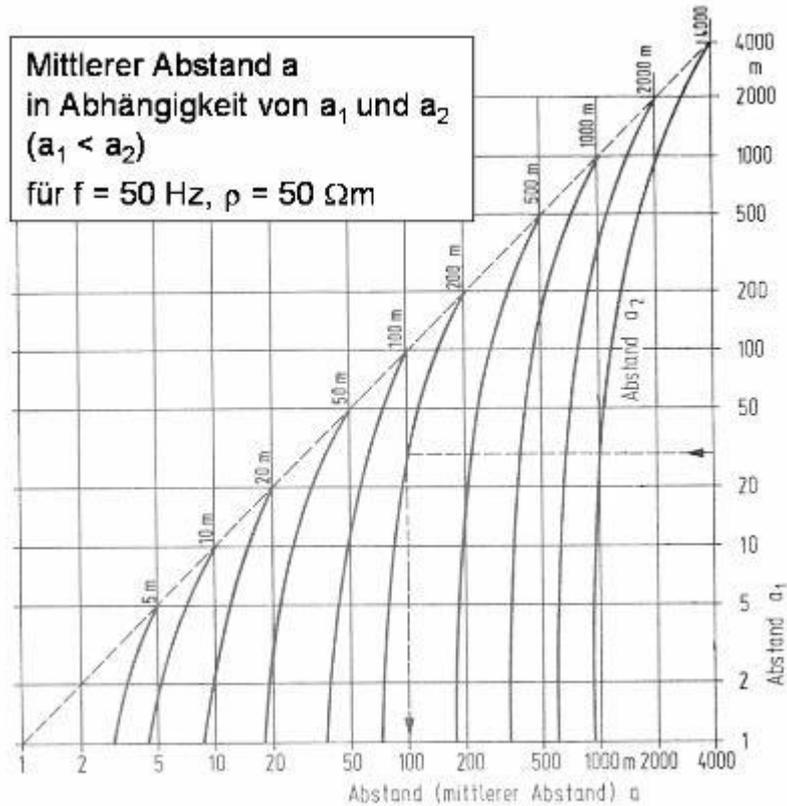
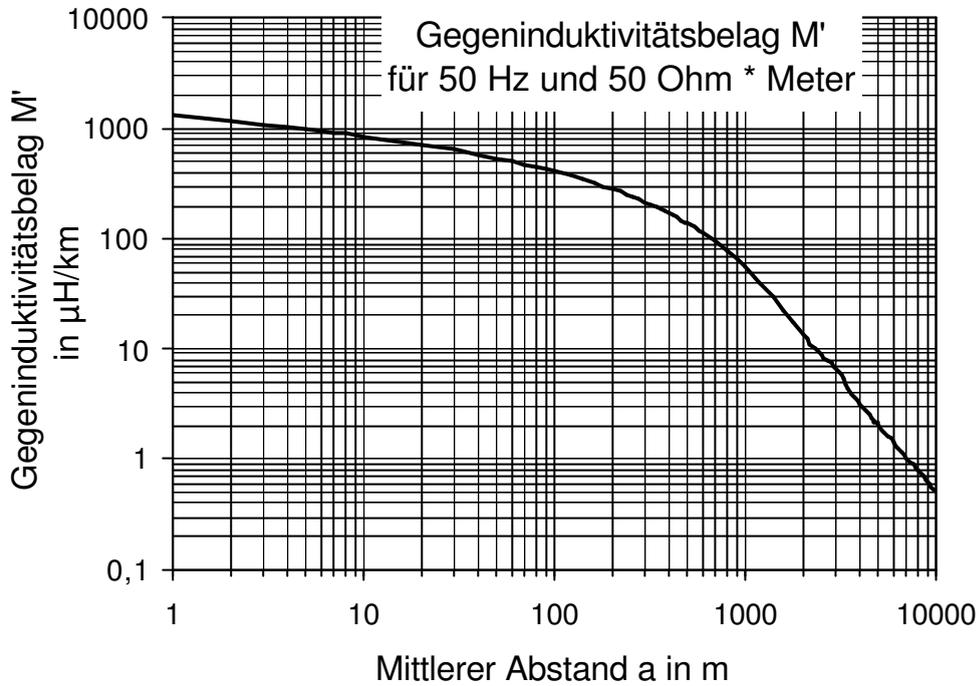
Bei beidseitiger Erdung der Kabelmäntel der Einzelkabel fließen in den Kabelmänteln Ströme, die den zugehörigen Strömen in den jeweiligen Außenleitern entgegengerichtet sind. Hierdurch ergibt sich eine weitgehende Kompensation der von den Außenleitern ausgehenden magnetischen Felder.

## Literaturverzeichnis

- /1/ DIN VDE 0228, Teile 1-4: Maßnahmen bei Beeinflussung von Fernmeldeanlagen durch Starkstromanlagen
- /2/ Technische Empfehlung Nr. 8: Anleitung zur rechnerischen und meßtechnischen Ermittlung der Reduktionswirkung von Kompensationsleitern
- /3/ Pollaczek, F: Über die Induktionswirkung einer Wechselstromeinfachleitung, ENT Bd. 4 (1927) CCIF 1952
- /4/ Klewe: Gegeninduktionsmessungen an Leitungen mit Erdrückleitungen, ENT, Bd. 6 (1929)
- /5/ Rüdenberg: Elektrische Schaltvorgänge, Bd. 1, Springer-Verlag 1953
- /6/ ITU-T, Directives concerning the Protection of telecommunication lines against harmful effects from electric power and electrified railway lines, Vol. II Calculating induced voltages and currents in practical cases, Geneva 1999  
(zu beziehen über die International Telecommunications Union, Genf, Rue de Varambe)
- /7/ DIN VDE 0102, Teil 1: Kurzschlussströme in Drehstromnetzen - Teil 0: Berechnung der Ströme (IEC 60909-0: 2001) Deutsche Fassung EN 60909-0: 2001
- /8/ Lappe, F., Neumann, W.: Erdkurzschlußdiagramme mit linearem Verlauf, Elektrizitätswirtschaft, Jahrgang 72 (1973), S. 769
- /9/ Technische Empfehlung Nr. 2: Richtlinie über hochspannungsbeeinflusste Nachrichtenanlagen (außer Blockleitungen) für den Bahnbetrieb
- /10/ Technische Empfehlung Nr. 3: Richtlinie für Schutzmaßnahmen an TK-Anlagen gegen Beeinflussung durch Netze der elektrischen Energieübertragung, -verteilung sowie Wechselstrombahnen (Ausgabe 2003)

- /11/ DIN VDE 0472, Teil 507, Prüfung an Kabeln und isolierten Leitungen, Reduktionsfaktor
- /12/ DIN VDE 0891 Verwendung von Kabeln und isolierten Leitungen für Fernmeldeanlagen und Informationsverarbeitungsanlagen
- /13/ Technische Empfehlung Nr. 7: Maßnahmen beim Bau und Betrieb von Rohrleitungen im Einflussbereich von Hochspannungs-Drehstromanlagen und Wechselstrom-Bahnanlagen
- /14/ Pestka, J.; Knoche, B.: DV-Programm zur Bestimmung von Berührungsspannungen an Rohrleitungen bei induktiver Beeinflussung durch Betriebs- und Erdfehlerströme von 16 2/3 und 50-Hz-Hochspannungsleitungen, Elektrizitätswirtschaft, Jg. 81 (1982), H. 16, S. 518 - 523
- /15/ Paul, H.-U.: Besonderheiten bei Langzeitbeeinflussung, Elektrizitätswirtschaft, Jg. 1985 (1986), H. 3, S. 98-100
- /16/ Baeckmann, W. v., Paul, H.-U., Feist, K.-H.: Contribution to the interference an conductor acting as earth electrodes, CIGRE-Bericht 36-02, 1982
- /17/ Kuhnert/Latzel: Die Berechnung von Beeinflussungsspannungen mit Digitalrechnern, Elektron. Datenverarbeitung 1967, U. 9, S. 389-396

## Anhang 1 Gegeninduktivitätsbelag M' für 50 Hz



Mit den vorstehenden Diagrammen können folgende Größen ermittelt werden:

- **Gegeninduktivitätsbelag  $M'$**  (in mH/km) in Abhängigkeit vom Abstand (mittlerer Abstand) zwischen 2 Einzelleitungen bei  $f = 50$  Hz und  $\rho = 50 \Omega\text{m}$
- **Mittlerer Abstand  $a$**  in m mit gleicher Gegeninduktivität wie diejenige für eine schräge Näherungsstrecke mit den Abständen  $a_1$  und  $a_2$  an den Enden, wobei  $a_1 < a_2$

#### **Anleitung zur Anwendung des Diagramms:**

Ermitteln des – im Hinblick auf die Gegeninduktivität äquivalenten – mittleren Abstands  $a$  aus den Abständen  $a_1$  und  $a_2$  an den Enden einer schrägen Näherung, zum Beispiel  $a_1 = 30$  m,  $a_2 = 200$  m:

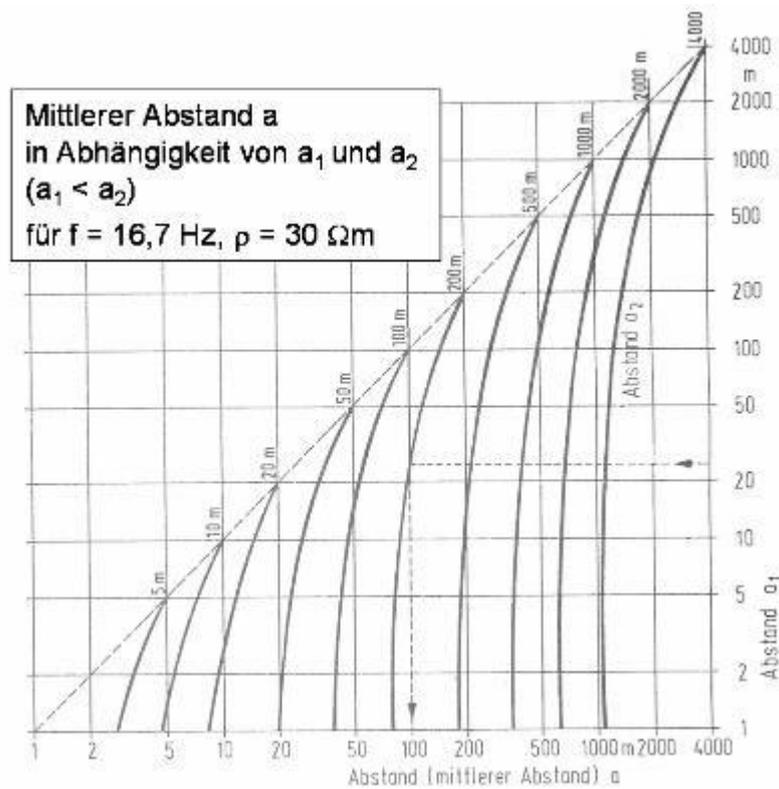
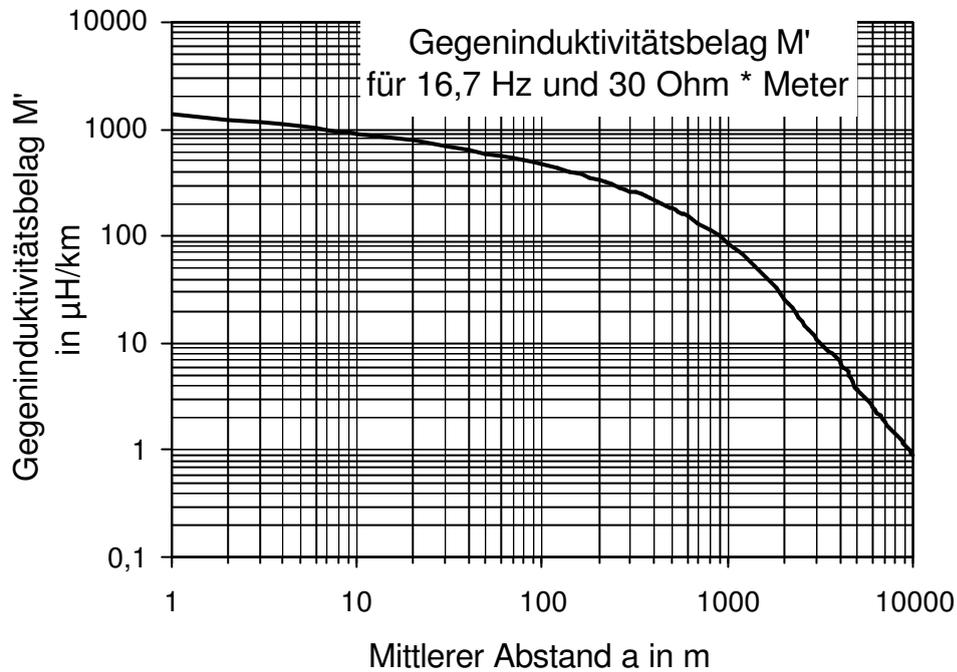
Den kleineren der beiden Abstandswerte ( $a_1$ ) auf der rechten Ordinate suchen:  $a_1 = 30$  m.

Auf dieser Höhe waagrecht nach links bis zum Schnittpunkt mit dem „200-m“-Zweig der „Bananen“-Kurvenschar (=  $a_2$ )

Beim Loten nach unten ergibt sich auf der Abszisse der Wert des „mittleren Abstands“  $a = 100$  m.

Bei anderen Werten für  $a_2$  ist eine gedachte, interpolierte „Bananenkurve“ zu verwenden.

## Anhang 2 Gegeninduktivitätsbelag M' für 16,7 Hz



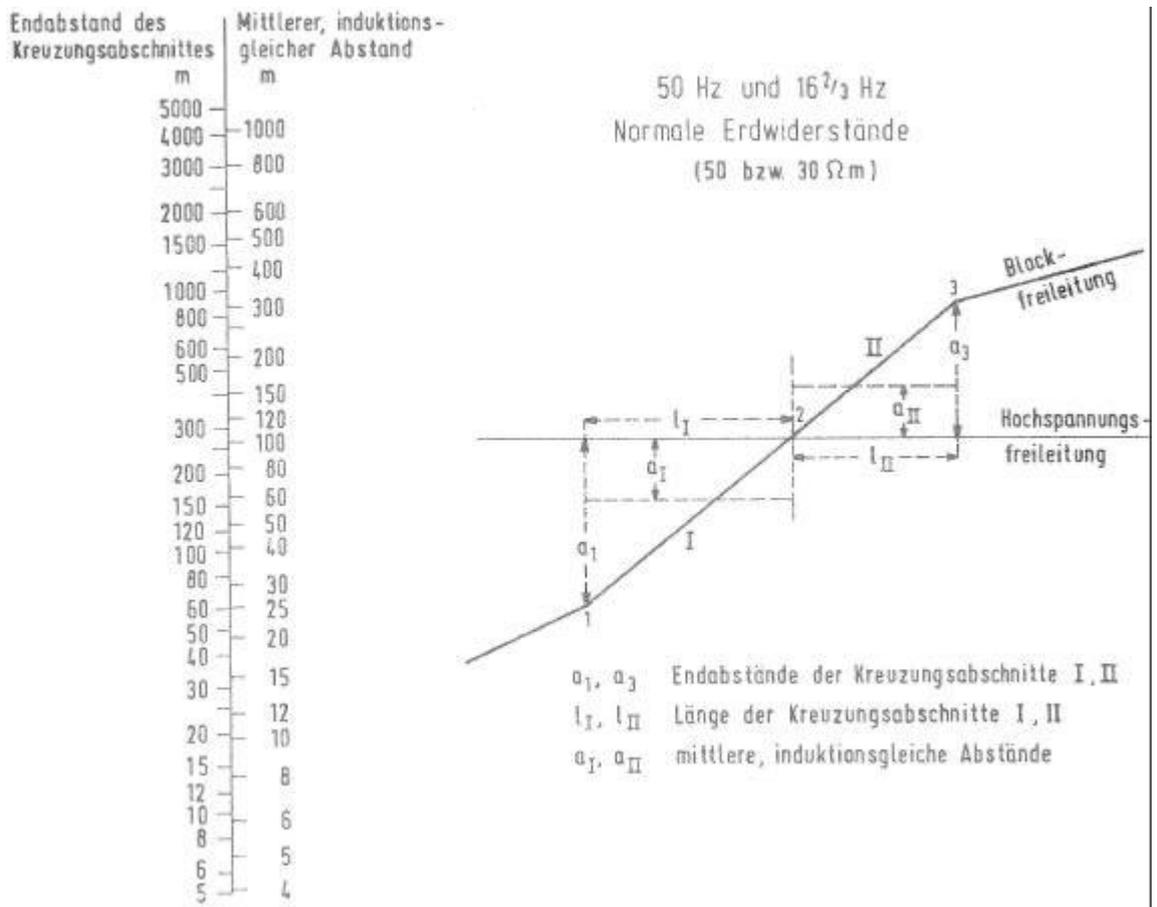
Mit den vorstehenden Diagrammen können folgende Größen ermittelt werden:

- **Gegeninduktivitätsbelag  $M'$**  (in mH/km) in Abhängigkeit vom Abstand (mittlerer Abstand) zwischen 2 Einzelleitungen bei  $f = 16,7$  Hz und  $\rho = 30 \Omega\text{m}$ .
- **Mittlerer Abstand  $a$**  in m mit gleicher Gegeninduktivität wie diejenige für eine schräge Näherungsstrecke mit den Abständen  $a_1$  und  $a_2$  an den Enden, wobei  $a_1 < a_2$

**Anleitung zur Anwendung des Diagramms:**

analog Anhang 1

### Anhang 3 Leitertafel zur Bestimmung des mittleren, induktionsgleichen Abstandes von Kreuzungsabschnitten



# Anhang 4 Tabellen für normierte Beeinflussungsspannungen

## Beeinflussung durch Fehlerströme in Drehstromsystemen oder durch einphasige Wechselstromkreise

Induzierte Längsspannung (normiert) $\left[ \frac{V}{kA \cdot km} \right]$		Abstand $a_2$ [m]																							
		2000	1800	1600	1400	1200	1000	800	600	500	400	300	200	150	100	80	60	50	40	30	20	15	10	5	
Abstand $a_1$ [m]	2000	34,4	33,8	33,1	32,7	31,9	31,0	30,2	29,8	29,3	27,2	24,8	22,8	19,6	17,2	15,1	13,5	10,9	8,8	7,4	6,3	5,5	4,8	4,2	
	1800	37,7	37,0	36,4	35,8	34,9	34,0	33,2	32,4	31,1	29,6	27,6	25,1	21,6	19,0	16,7	14,9	12,1	9,9	8,3	7,0	6,2	5,3		
	1600	41,7	40,9	40,2	39,6	38,5	37,5	36,6	34,3	33,0	30,2	27,8	24,0	21,1	18,6	16,7	13,6	11,2	9,3	7,8	6,9				
	1400	46,5	45,6	45,0	44,2	43,0	42,0	40,9	40,0	38,3	38,9	33,7	31,1	26,9	23,7	21,0	18,9	15,6	12,9	10,8	9,2				
	1200	52,5	51,5	50,7	49,9	48,5	47,3	46,2	45,1	43,3	41,6	38,1	35,1	30,5	27,0	24,0	21,8	18,0	14,9	12,4					
	1000	60,1	59,0	57,9	57,0	55,4	54,0	52,7	51,6	49,4	47,5	43,6	40,2	35,0	31,0	27,6	24,9	21,0	17,2						
	800	69,9	68,5	67,3	66,2	64,4	62,7	61,2	59,8	57,3	55,1	50,5	46,6	40,6	36,0	32,0	28,8	24,2							
	600	83,7	81,9	80,4	79,2	76,6	74,8	73,0	71,3	68,3	65,7	60,1	55,5	48,4	43,2	38,3	35,0								
	500	92,8	90,8	89,2	87,7	85,0	82,7	80,7	78,8	75,4	72,5	66,4	61,2	53,4	46,0	42,7									
	400	104,2	101,8	99,9	98,1	95,0	92,4	90,0	87,6	84,0	80,6	73,7	67,8	58,9	52,9										
	300	119,5	116,8	114,3	112,1	108,4	105,3	102,4	99,9	95,4	91,5	83,5	76,8	67,2											
	200	141,4	137,6	134,5	131,7	127,0	123,0	119,6	116,4	110,9	106,2	98,6	89,8												
	150	156,4	151,9	148,2	144,9	139,5	134,8	130,8	127,2	120,9	115,6	104,8													
	100	178,5	172,5	167,8	163,6	156,5	151,0	146,1	141,8	134,4	128,2														
	80	190,2	183,4	178,0	173,3	165,7	159,4	154,0	149,2	141,3															
	60	205,1	197,0	190,7	185,4	176,6	169,5	163,5	155,4																
	50	214,4	205,4	198,5	192,7	183,2	175,6	169,3																	
	40	225,5	215,4	207,7	201,2	190,8	182,8																		
	30	239,4	227,6	218,9	211,6	200,1																			
20	257,9	243,6	233,4	225,1																					
15	270,6	254,5	242,8																						
10	286,4	267,7																							
5	310,6																								

**Tabelle A4-1** Tabelle zur Ermittlung induzierter Längsspannungen in TK-Leitungen mit parallelem oder schrägem Näherungsverlauf  
 $f = 50 \text{ Hz}$ ,  $\rho = 50 \text{ } \Omega \text{ m}$ ,  $I = 1 \text{ kA}$ ,  $\ell = 1 \text{ km}$ ,  $r = 1$

Induzierte Längsspannung (normiert) $\left[ \frac{\text{V}}{\text{kA} \cdot \text{km}} \right]$		Abstand $a_1$ [m]																						
		5	10	15	20	30	40	50	60	80	100	150	200	300	400	500	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
Abstand $a_2$ [m]	2000	14,8	14,6	14,4	14,2	13,9	13,6	13,4	13,1	12,7	12,3	11,4	10,7	9,5	8,5	7,7	7,1	6,0	5,1	4,4	3,8	3,4	3,0	2,6
	1800	16,1	15,9	15,9	15,5	15,2	14,8	14,5	14,3	13,8	13,4	12,6	11,8	10,3	9,3	8,5	7,7	6,8	5,8	4,9	4,2	3,7	3,2	
1600	17,7	17,4	17,2	17,0	16,6	16,3	15,9	15,6	15,1	14,7	13,6	12,8	11,4	10,2	9,3	8,5	7,3	6,3	5,4	4,7	4,0			
1400	19,5	19,2	19,0	18,8	18,4	18,0	17,6	17,3	16,7	16,2	15,1	14,1	12,6	11,4	10,4	9,5	8,1	7,1	6,1	5,1				
1200	21,8	21,5	21,2	20,9	20,4	20,0	19,6	19,3	18,6	18,0	16,8	15,7	14,0	12,7	11,6	10,6	9,1	8,1	6,6					
1000	24,5	24,2	23,8	23,5	23,0	22,5	22,0	21,6	20,9	20,2	18,8	17,6	15,7	14,2	13,0	11,9	10,2	8,6						
800	28,2	27,7	27,3	26,9	26,3	25,7	25,2	24,7	23,9	23,1	21,5	20,1	17,9	16,2	14,9	13,6	11,4							
600	33,0	32,5	32,0	31,5	30,8	30,0	29,4	28,8	27,8	26,9	25,0	23,4	20,8	18,8	17,5	15,5								
500	36,4	35,5	35,0	34,5	33,6	32,8	32,1	31,4	30,3	29,3	27,1	25,3	22,5	20,2	18,4									
400	40,2	39,5	38,4	38,2	37,2	36,3	35,5	34,7	33,4	32,3	29,9	27,9	24,8	22,1										
300	45,3	44,5	43,7	43,0	41,9	40,7	39,7	38,9	37,3	36,0	33,3	31,0	27,1											
200	52,9	51,6	50,6	49,7	48,2	46,7	45,5	44,5	42,6	41,1	37,8	34,6												
150	58,0	56,5	55,2	54,1	52,3	50,7	49,4	48,2	46,0	44,2	40,6													
100	65,4	63,4	61,8	60,6	58,5	56,2	54,5	53,1	50,6	48,0														
80	69,4	67,1	65,3	63,9	61,7	59,0	57,2	55,6	52,4															
60	74,4	71,6	69,6	68,1	65,7	62,4	60,4	58,2																
50	77,5	74,5	72,2	70,6	68,4	64,5	61,9																	
40	81,2	77,8	75,4	73,7	71,3	66,4																		
30	84,7	80,5	77,3	75,2	72,2																			
20	91,1	85,9	81,9	80,5																				
15	96,2	90,8	87,0																					
10	101,6	94,8																						
5	109,1																							

**Tabelle A4-2**      **Tabelle zur Ermittlung induzierter Längsspannungen in TK-Leitungen mit parallelem oder schrägem Näherungsverlauf**  
**f = 16,7 Hz,  $\rho = 30 \Omega\text{m}$ , I = 1 kA,  $\ell = 1 \text{ km}$ , r = 1**

Abstand $a_S$ in m	Induzierte Längs-EMK in Volt für Abstand $a_D$ in cm			
	10	7	5	2
0,1	--	9,67	6,04	2,21
0,2	6,04	4,00	2,79	1,09
0,3	3,79	2,59	1,83	0,73
0,4	2,79	1,93	1,37	0,54
0,5	2,21	1,53	1,09	0,44
0,75	1,46	1,02	0,73	0,29
1,0	1,09	0,76	0,54	0,22
1,5	0,73	0,51	0,36	0,15
2,0	0,54	0,38	0,27	0,11

**Tabelle A4-3: Beeinflussungsspannung durch ein Starkstromkabel im Normalbetrieb**  
 **$f = 50 \text{ Hz}$ ,  $I = 100 \text{ A}$ ,  $\ell = 1 \text{ km}$ ,  $r = 1$ , Abstände  $a_S$ ,  $a_D$  siehe Bild 5-6**

## Anhang 5 Aufstellung und Ablesen von Kurzschlussdiagrammen

### 1. Allgemeines

Ein Erdkurzschlussdiagramm gibt an, mit welchem maximalen Kurzschlussstrom  $I_k$  im Hinblick auf eine Beeinflussung zu rechnen ist, wenn der angenommene Kurzschlussort entlang einer Hochspannungsleitung variiert wird. Die grafische Darstellung dieser Abhängigkeit ergibt bei linearer Skalenteilung der Stromachse (Ordinate) einen hyperbelförmigen Verlauf (Bild A5-2).

Bei Anwendung einer speziell für diesen Zweck geeigneten Ordinatenenteilung lassen sich die hyperbelförmig verlaufenden Kurven strecken und die Aufstellung solcher Diagramme wird ganz wesentlich vereinfacht. Es genügt dann, die Anfangs- und Endwerte durch Anlegen eines Lineals zu verbinden (Bild 5-3).

Der linearisierte Verlauf bei Kurzschlussdiagrammen ergibt sich aus folgender Überlegung:

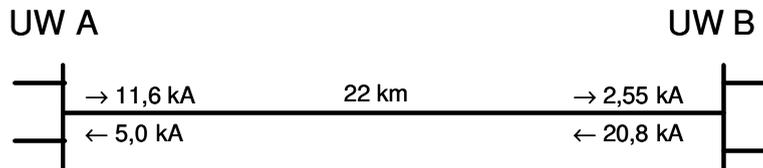
Der Kurzschlussstrom wird berechnet, indem man die Betriebsspannung durch die Impedanz bzw. Reaktanz der Kurzschlussbahn dividiert. Letztere besteht aus einer festen Vorreaktanz entsprechend der anstehenden Kurzschlussleistung und aus einem entfernungsproportionalen Anteil. Der Kehrwert des Kurzschlussstromes hat also einen linearen Verlauf. Ein hierfür geeignetes (im Handel leider nicht erhältliches) Koordinatenpapier hat dementsprechend eine reziprok geteilte Ordinate (für den Kurzschlussstrom) und eine linear geteilte Abszissenachse (für die Leitungslänge). Die Maßstäbe beider Achsen können auch mit einfachen Faktoren (z. B. 2) multipliziert werden, soweit das der besseren Ablesbarkeit bei einem vorgegebenen Skalenbereich dient.

### 2. Anwendungsbeispiel

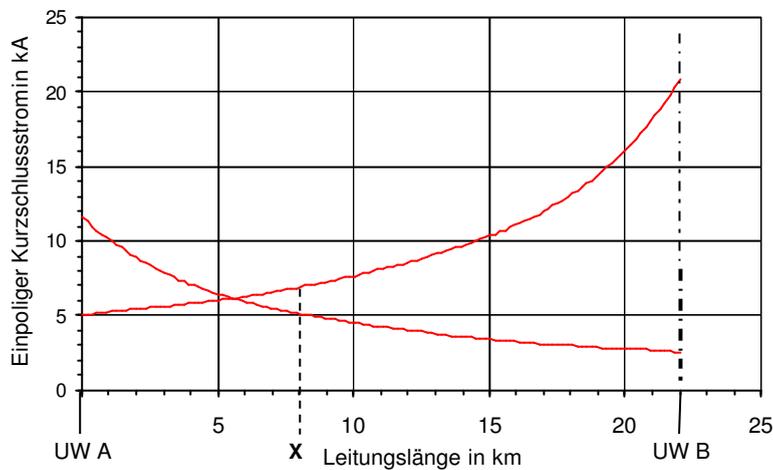
#### 2.1 Einfachleitung

Die maximalen Ströme, die von links und rechts (UW A bzw. B) auf einen angenommenen Kurzschlussort auf der 22 km langen Leitung zufließen können, sind aus den Ergebnissen einer Netzberechnung zu entnehmen (Bild A5-1). Im Beispiel würden von Sammelschiene A in Rich-

tung B maximal 11,6 kA, von Sammelschiene B in Richtung A maximal 20,8 kA einen Kurzschluss auf der Leitung speisen. Diese Werte verringern sich, je weiter der Kurzschlussort von der speisenden Seite entfernt ist. Dies ist an den beiden Kurven der Diagramme in Bild A5-2 und Bild A5-3 abzulesen.



**Bild A5-1 Beispiele berechneter Kurzschlussströme**

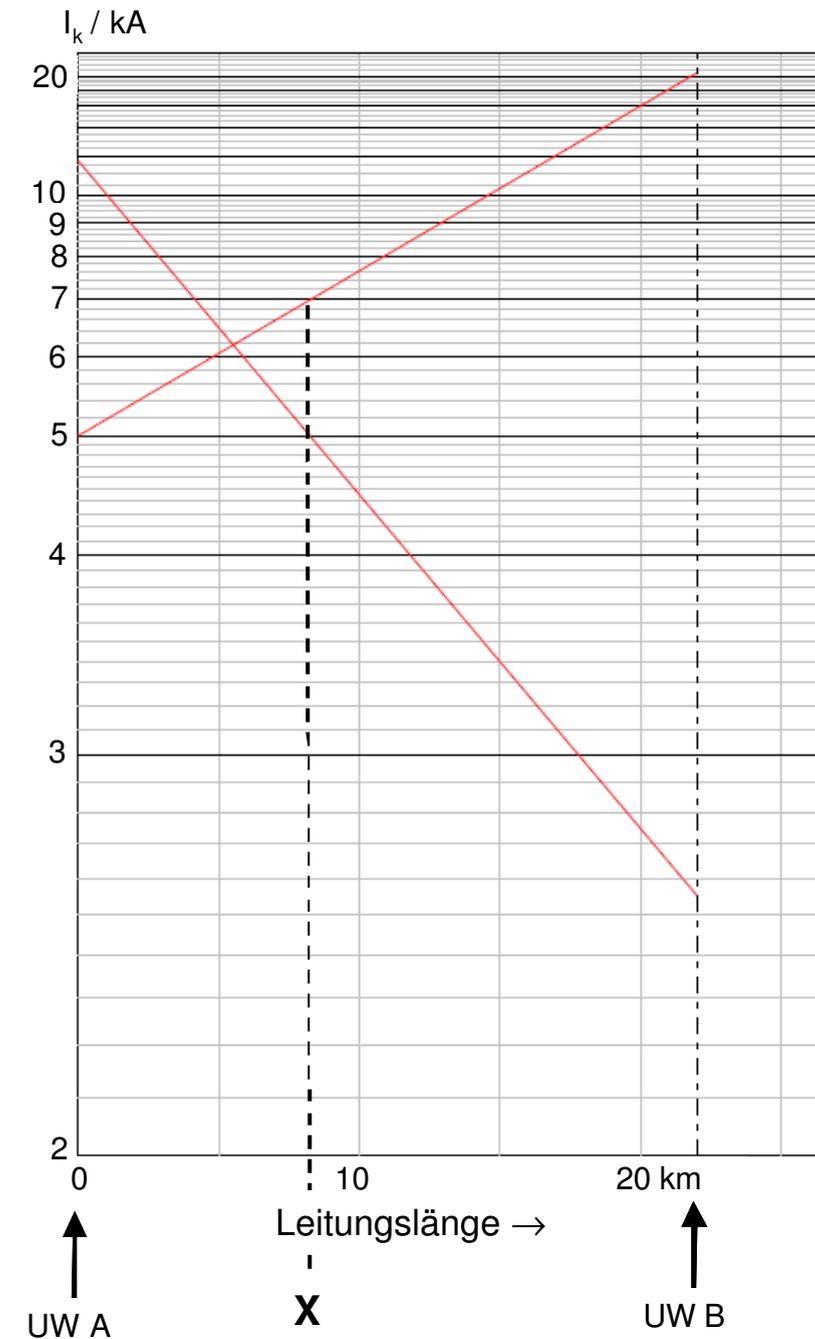


**Bild A5-2 Erdkurzschlussdiagramm der Strecke A-B nach Bild A5-1 mit linearer Ordinatenenteilung**

Gesucht seien Ströme an einem Ort X in 8 km Entfernung von A. Sie betragen

- ca. 5 kA aus Richtung A
- ca. 7 kA aus Richtung B

Für Näherungen, die sich links vom Ort X erstrecken, ist  $I = 5 \text{ kA}$  maßgebend, weil dieser Strom im Kurzschlussfall über den Erdboden nach links zu seiner Quelle zurück fließt. Analog muss für eine Näherungslänge, die rechts vom angenommenen Kurzschlussort X liegt, mit  $I = 7 \text{ kA}$  gerechnet werden.



**Bild A5-3 Erdkurzschlussdiagramm nach Bild A5-1 mit Reziprokskala**

## 2.2 Mehrfachleitung

Für eine Beeinflussungsrechnung mit einer Leitung oder Leitungstrasse, die aus zwei oder mehr parallel geführten Stromkreisen besteht, sind die höchsten Werte aus den entsprechenden Kurzschlussdiagrammen zu Grunde zu legen.

### 3. Genauigkeit

Bei beiderseitiger Einspeisung von Leitungen können, wie eine nähere Untersuchung zeigt, in einem linearisierten Kurzschlussdiagramm Abweichungen von den geradlinigen Verläufen auftreten. Die wirklich zutreffenden Kurvenverläufe sind dann nach oben (+ Fehler) oder nach unten (- Fehler) leicht durchgebogen je nachdem, ob das Verhältnis  $X_0/X_1$  der Leitung kleiner oder größer als das der anstehenden Kurzschlussreaktanzen ist. Besonders bei Doppelleitungen trifft meist Letzteres (- Fehler) zu. Das Ergebnis einer geradlinigen Interpolation liegt dann auf der sicheren Seite. In jedem Fall sind die Abweichungen klein (2 - 3 %).

## **Anhang 6 Beispiel für eine digitale Beeinflussungsberechnung**

Ein Berechnungsbeispiel für Beeinflussungen durch Hochspannungsfreileitungen sowie Bahnanlagen im Normalbetrieb und im Fehlerfall ist zur Information auf dem SfB-Server abgelegt.

In diesem Beispiel sind alle erforderlichen Daten für die Berechnung von Beeinflussungsspannungen enthalten, wie

- Lagepläne mit den Trassen der Hochspannungsfreileitung, der Bahnstrecke sowie der TK-Anlage
- die erforderlichen Stromdiagramme mit den im Näherungsbereich fließenden Strömen
- die Reduktionsfaktoren der Erdseile, der Schienen und der TK-Kabel
- die Umweltreduktionsfaktoren, an den einzelnen Teilabschnitten anzusetzen sind.

Als Ergebnis der Berechnungen sind die Beeinflussungsspannungen der verschiedenen beeinflussenden Anlagen in den entsprechenden Teilabschnitten sowie die Gesamtbeeinflussungsspannung dargelegt.

Ziel dieser Darstellung ist es, anhand realistischer Beispieldaten die Ergebnisse unterschiedlicher Berechnungsmethoden und -programme einschätzen und vergleichen zu können.

## **Anhang 7 Messen des spezifischen Erdbodenwiderstands**

### **Allgemeines**

Die Höhe der induktiven Beeinflussungsspannung einer TK-Leitung ist unter anderem vom spezifischen Erdbodenwiderstand abhängig. Während alle anderen Größen zur Abschätzung der auftretenden Längs-EMK relativ genau zu ermitteln sind, stößt die Bestimmung des spezifischen Erdbodenwiderstands auf Probleme, weil die Struktur des Erdreichs inhomogen ist und der Erdstrom sich bis in Tiefen von mehreren Kilometern ausbreitet.

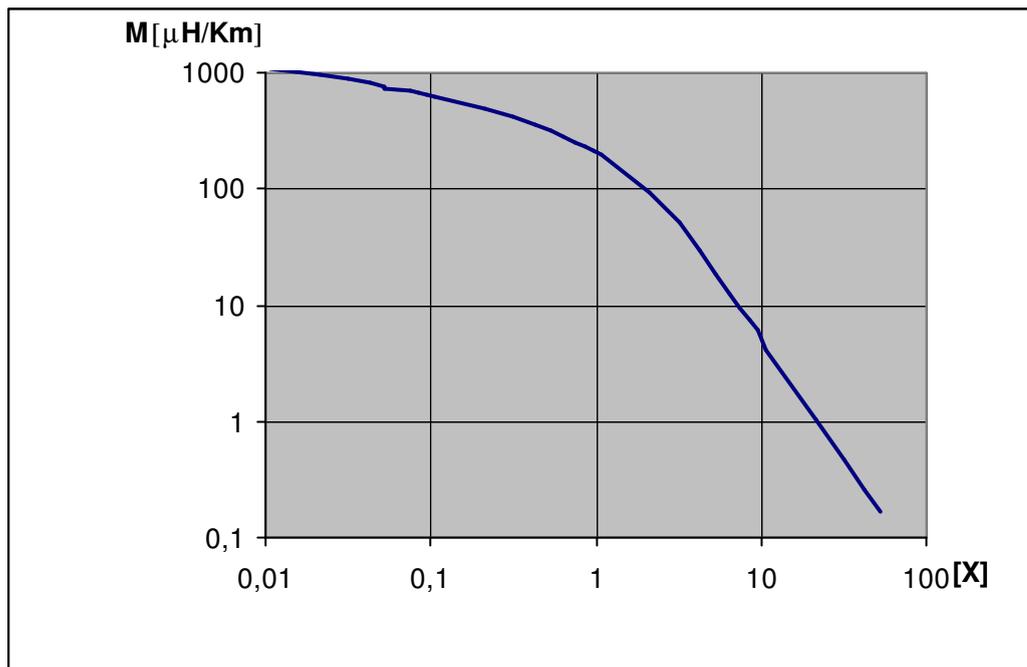
Weil die berechnete Beeinflussungsspannung maßgeblich den Aufwand für Schutzmaßnahmen bestimmt, ist eine möglichst genaue Bestimmung des spezifischen Erdbodenwiderstands eine wichtige Voraussetzung für sicheren und wirtschaftlichen Schutz.

### **Mathematisch-physikalische Zusammenhänge**

Die Messung des spezifischen Erdbodenwiderstands wird im Allgemeinen auf die Bestimmung der Gegeninduktivität zurückgeführt. Hierzu werden die Größen  $U$ ,  $I$ ,  $\omega$  und  $l$  gemessen und die Gegeninduktivität  $M$  errechnet:

$$M = \frac{U}{\omega \cdot I \cdot l} \quad (1)$$

Die Gegeninduktivität  $M$  ist hierbei eine komplexe Funktion von Abstand, Erdbodenwiderstand und Frequenz, so dass der spezifische Erdbodenwiderstand nicht aus den unmittelbar gemessenen Größen abgeleitet werden kann. Die Gegeninduktivität  $M$  und der Wert  $x$ , der diese Abhängigkeit repräsentiert, sind aus den Formeln (2) und (3) berechnet und in nachfolgendem Diagramm grafisch dargestellt.



**Bild A7-1** Gegeninduktivitätsbelag  $M'$  in Abhängigkeit von  $x$

$$M = 142,5 + 45,96x - 1,413x^2 - 198,4 \cdot \ln x \quad \text{in } \frac{\mu\text{H}}{\text{km}} \quad (2)$$

mit 
$$x = a \sqrt{\frac{\mu_0 \cdot \omega}{\rho}} \quad (3)$$

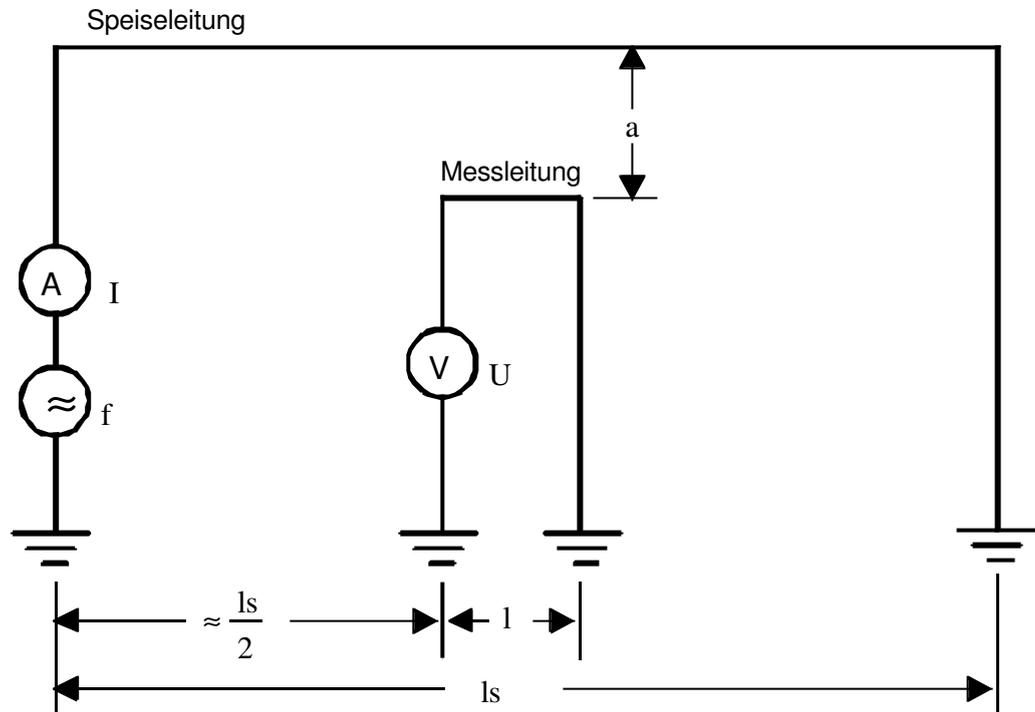
dabei bedeuten:

- $a$  Abstand zwischen TK-Leitung und Starkstromleitung in m
- $\mu_0$  Permeabilität des Vakuums =  $0,4 \cdot \pi \cdot 10^{-6}$  H/m
- $\rho$  spezifischer Erdbodenwiderstand in  $\Omega\text{m}$
- $\omega$  Betriebs-(kreis-)frequenz der Starkstromleitung, mit  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$

Der spezifische Erdbodenwiderstand ergibt sich dann zu:

$$\rho = \frac{x^2}{a^2 \cdot \omega \cdot \mu_0} \quad (4)$$

## Prinzip des Messverfahrens



**Bild A7-2 Messverfahren zur Ermittlung des spezifischen Bodenwiderstands**

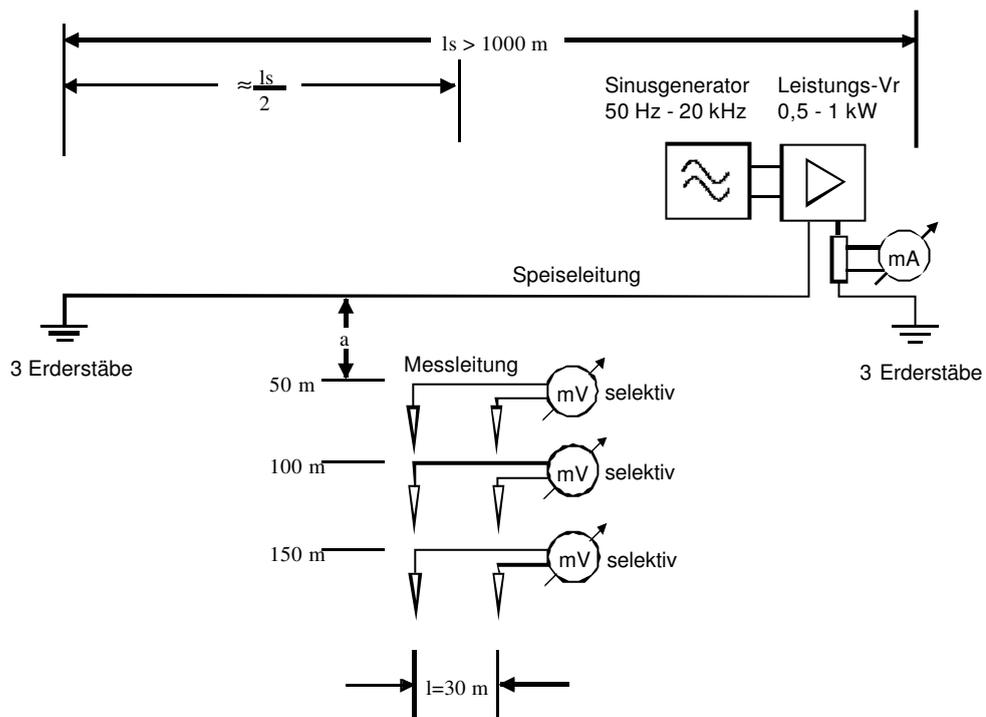
Die Auswertung der Messergebnisse und die Umrechnung der Messgrößen in den spezifischen Erdbodenwiderstand durch ein Tabellenkalkulationsprogramm durchführen zu lassen wird die Auswertung deutlich erleichtert (siehe Abschnitt Auswertung dieser Anlage).

Bei den interessierenden niedrigen technischen Frequenzen 16,7 und 50 Hz sind wegen der großen Eindringtiefe des Speisestromes nur recht niedrige Messspannungen zu erwarten. Es ist deshalb angebracht, die Messungen bei höheren Frequenzen durchzuführen und die Werte für den spezifischen Erdbodenwiderstand bei den technischen Grundfrequenzen zu extrapolieren.

### Praktischer Messaufbau

Für die praktischen Messungen müssen einige Umgebungsparameter berücksichtigt werden:

- Die Länge der Speiseleitung muss mindestens 1000 m betragen
- Die Speiseleitung muss völlig geradlinig verlegt sein
- Es dürfen sich keine anderen metallischen Leiter entlang der Speiseleitung, an den Speisepunkten oder zwischen den Messleitungen und der Speiseleitung befinden
- Es dürfen keine induktiven oder kapazitiven Einkopplungen aus benachbarten Freileitungen oder elektrifizierten Bahnen vorhanden sein
- Die Erdübergangswiderstände der Speisepunkte sollen möglichst klein sein ( $< 50 \Omega$ )
- Die Speiseleitung sollte einen Querschnitt von  $1,0 \text{ mm}^2$  Cu haben und gut isoliert sein
- Es ist ein Speisestrom von 1 - 2 A anzustreben (Achtung Berührungsspannungen!)



**Bild A7-3 Praktischer Messaufbau zur Ermittlung des spezifischen Bodenwiderstands**

### Auswertung der Messergebnisse

Die Auswertung erfolgt über ein Auswertetool einer Tabellenkalkulation, da die ermittelten Werte für

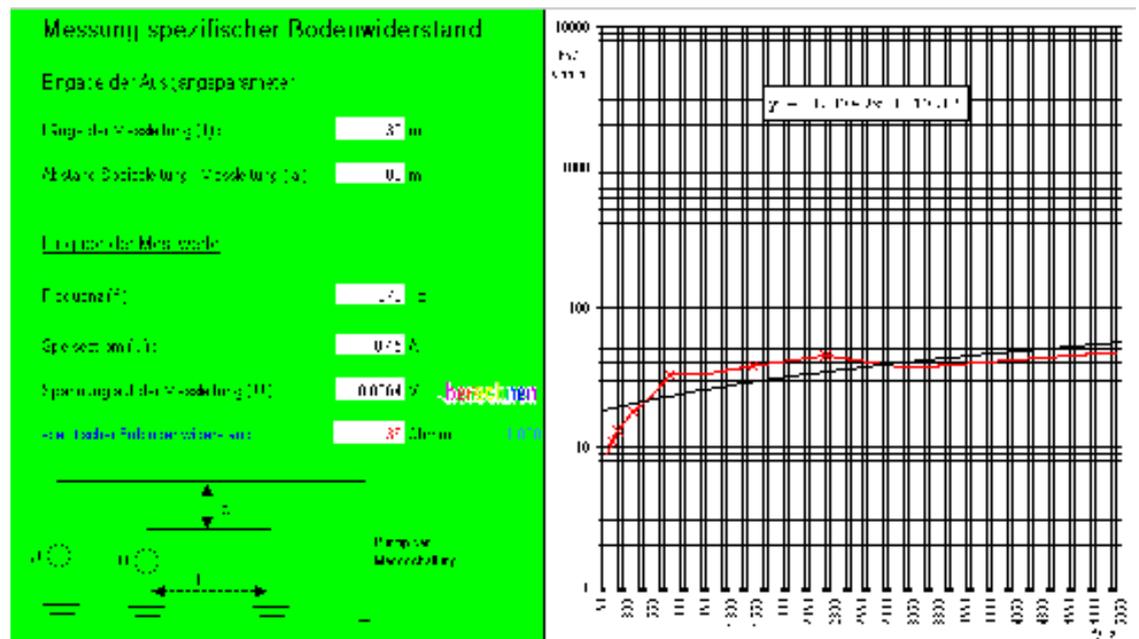
- Länge der Messleitung

- Abstand Speiseleitung - Messleitung
- Frequenz
- Speisestrom
- selektive Spannung auf der Messleitung

über die Gleichungen (1) bis (4) miteinander verkoppelt sind (siehe auch Bild A 9-1) und der spezifische Erdbodenwiderstand daraus nicht direkt abgelesen oder berechnet werden kann.

Dabei wird für jeden Frequenzpunkt der spezifische Erdbodenwiderstand nach den Formeln (2), (3) und (4) errechnet und die Messspannung mit der errechneten Spannung U verglichen. Der richtige spezifische Erdbodenwiderstand ist dann gegeben, wenn Messspannung und berechnete Spannung übereinstimmen.

Werden die errechneten Widerstandswerte über der Frequenz aufgetragen, so kann der spezifische Erdbodenwiderstand bis hinunter zu den technischen Frequenzen 16,7 und 50 Hz extrapoliert werden.



## Anhang 8 Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen

Kurzzeichen	Bedeutung
$a, a_1, a_2, a_S$	Näherungsabstände zwischen Starkstrom- und TK-Leitung
$a_D$	Differenzabstände zwischen den Außenleitern des Drehstromsystems
$h$	Höhenunterschied zwischen Starkstrom(frei-)leitung und TK-Leitung
$x_{0,1,2,3}, y_{0,1,2,3}$	Koordinaten von Erdseil und Außenleitern einer Hochspannungsfreileitung
$l$	Länge einer Näherung
$I$	beeinflussender Strom (Effektivwert)
$I_K$	Kurzschlussstrom
$I_K''$	Anfangskurzschluss-Wechselstrom
$I_{K2p}, I_{K3p}$	zwei-/dreipoliger Kurzschlussstrom
$I_F$	Fahrstrom
$f$	Frequenz (des beeinflussenden Stroms)
$\omega$	Kreisfrequenz: $\omega = 2\pi f$
$M'$	Längenbezogene Gegeninduktivität (Gegeninduktivitätsbelag) zwischen den Schleifen Starkstromleitung - Erde und TK-Leitung - Erde
$Z', Z_{3p}'$	Koppelimpedanzbelag
$U$	Spannung (allgemein)
$E_i$	Längs-EMK
$E_m$	induzierte Mantelspannung (bei stahlbandbewehrten TK-Kabeln)
$l_m$	Länge des Kabelmantels
$\rho$	spezifischer Erdbodenwiderstand
$\mu_0$	Permeabilitätskonstante
$\delta$	Eindringtiefe (des Stroms im Erdboden)
$x$	1) Parameter zur Berechnung von $M'$ 2) Ort entlang einer Beeinflussungsstrecke
$r$	Reduktionsfaktor allgemein, resultierend
$r_K$	Reduktionsfaktor des Kabelmantels
$r_S$	Reduktionsfaktor der Schienen
$r_E$	Reduktionsfaktor des Erdseils
$r_x$	Umweltreduktionsfaktor = Reduktionsfaktor benachbarter Rohrleitungen und anderer metallener Leiter
$r_{EE}$	Reduktionsfaktor infolge des Endeneffekts bei Näherungen $l \leq 5 \text{ km}$

