



TE7

Deckblatt

„Maßnahmen beim Bau und Betrieb von Rohrleitungen im Einflussbereich von Hochspannungs-Drehstromanlagen und Wechselstrom-Bahnanlagen“

vom Februar 2014

Diese Empfehlung ist textgleich mit DVGW-Arbeitsblatt GW 22 und
der AfK-Empfehlung Nr. 3, herausgegeben von der
Arbeitsgemeinschaft DVGW/VDE für Korrosionsfragen (AfK)
Geschäftsstelle beim
DVGW Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V.
53123 Köln, Josef-Wirmer-Strasse 1-3



AfK-Empfehlung Nr. 3

Februar 2014
Ersatz für Ausgabe November 2007

**Maßnahmen beim Bau und Betrieb von Rohrleitungen im
Einflussbereich von Hochspannungs-Drehstromanlagen
und Wechselstrom-Bahnanlage;
textgleich mit DVGW-Arbeitsblatt GW 22 und der Technischen
Empfehlung Nr. 7 der Schiedsstelle für Beeinflussungsfragen**

Herausgegeben
von der Arbeitsgemeinschaft DVGW/VDE für Korrosionsfragen (AfK)

Geschäftsstelle beim
DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.,
Technisch-wissenschaftlicher Verein
53123 Bonn, Josef-Wirmer-Str. 1–3
Tel.: +49 228 9188-5 · Fax: +49 228 9188-990
E-Mail: info@dvgw.de · Internet: www.dvgw.de

Zu beziehen durch
Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH
53123 Bonn, Josef-Wirmer-Str. 3
Tel.: +49 228 9191-40 · Fax: +49 228 9191-499
E-Mail: info@wvgw.de · Internet: www.wvgw.de

© 2014 DVGW, Bonn

Nachdruck und
fotomechanische Wiedergabe,
auch auszugsweise, nur mit Genehmigung
des DVGW Deutscher Verein
des Gas- und Wasserfaches e.V., Bonn, gestattet.

Inhalt

Vorwort	10
1	Anwendungsbereich	14
2	Normative Verweisungen	14
3	Begriffe, Symbole, Einheiten und Abkürzungen	16
3.1	Abgrenzeinheit (AE)	16
3.2	Ansprechspannung (U_A)	16
3.3	Beeinflussung	16
3.3.1	Beeinflussungsspannung	16
3.3.2	Kurzzeitbeeinflussung	17
3.3.3	Langzeitbeeinflussung	17
3.4	Berührungsspannung U_T	17
3.5	Betriebsstrom I_B	17
3.6	Bezugserde	17
3.7	Erderspannungstrichter	17
3.8	Erdfehlerstrom	17
3.9	Erdungsspannung U_E	18
3.10	Erdungsstrom I_E	18
3.11	Erdungswiderstand einer Rohrleitung R_R	18
3.12	Erdung	18
3.13	Erwartungsfaktor w	18
3.14	Freileitungsmast	18
3.15	Gastechnische Anlage	18
3.16	Grenzabstand	18
3.17	Grenzlänge	19
3.18	Hochspannungsfreileitung	19
3.19	Hochspannungsanlage	19
3.20	Hochspannungsstationen	19
3.21	Isolierstelle	19
3.22	Kathodischer Korrosionsschutz (KKS)	19
3.23	Näherungslänge L_R	19
3.24	Nennweite DN	19
3.25	Reduktionsfaktor r	19
3.26	Rohrleitungsanlage	20
3.27	Rohrleitungspotential U_R	20
3.28	Resonanzüberhöhung	20
3.29	Resonanzlänge	20
3.30	Resonanzort	20
3.31	Spezifischer Umhüllungswiderstand r_u	20

3.32	Umhüllung	20
4	Verwendete Kurzzeichen	20
5	Hinweise für die Planung von Rohrleitungsanlagen und Hochspannungsanlagen	24
5.1	Grundsätze	24
5.2	Abstände zwischen Rohrleitungen und Hochspannungsfreileitungen sowie Hochspannungskabeln	24
5.2.1	Allgemeines	24
5.2.2	Parallelführungen	24
5.2.3	Kreuzungen	25
5.3	Erdungsanlagen von Kraftwerken, Schalt- und Umspannanlagen	27
5.3.1	Allgemeines	27
5.3.2	Näherungen	27
5.3.3	Einführungen	28
5.3.4	Rohrleitungen innerhalb von Werksanlagen	28
5.3.5	Rohrleitungen mit kathodischem Korrosionsschutz	28
5.4	Rohrleitungsstationen	28
5.5	Oberirdisch zugängliche Armaturen	29
5.5.1	Allgemeines	29
5.5.2	Entleerungsstutzen	29
5.5.3	Einrichtungen ohne relevanten Gasaustritt im Betriebsfall	29
5.5.4	Einrichtungen mit temporär relevanten Gasaustritt	29
5.6	Kathodische Korrosionsschutzanlagen	30
6	Grenzwerte des Rohrleitungspotentials und der Berührungsspannung	31
6.1	Allgemeines	31
6.2	Spannungsgrenzwert für Teilkompensation	31
7	Prüfung der Beeinflussungsmöglichkeiten	32
7.1	Allgemeines	32
7.2	Keine Beeinflussung zu erwarten	34
7.2.1	Allgemeines	34
7.2.2	50-Hz-Hochspannungs-Drehstromanlagen	34
7.2.3	16,7-Hz-Wechselstrom-Bahnanlagen	35
7.3	Grenzlängen und Grenzwinkel bei induktiver Beeinflussung	35
7.3.1	Allgemeines	35
7.3.2	Grenzlängen bei Parallelführungen mit Hochspannungs-Drehstromfreileitungen	35
7.3.3	Grenzwinkel bei Kreuzungen mit Drehstrom-Hochspannungsfreileitungen	39
7.4	Beeinflussung durch 16,7-Hz-Fahr- und Speiseleitungen	43
8	Grenzabstände bei ohmscher Beeinflussung	43
8.1	Allgemeines	43
8.2	Grenzabstände von Erdungsanlagen	43
8.3	Grenzabstände von Freileitungsmasten	44
9	Konstruktive Maßnahmen zur Herabsetzung des Rohrleitungspotentials und der Berührungsspannung	44
9.1	Allgemeines	44
9.2	Maßnahmen an der Rohrleitung	45

9.2.1	Allgemeines	45
9.2.2	Erder und Abgrenzeinheiten	45
9.2.2.1	Allgemeines	45
9.2.2.2	Projektierung von Erdern an Rohrleitungen.....	46
9.2.2.3	Bau von Erderanlagen an Rohrleitungen.....	47
9.2.2.4	Anschluss von Erdern an die Rohrleitung	49
9.2.2.5	Anforderungen an Abgrenzeinheiten für Kurzzeitbeeinflussung	49
9.2.2.6	Anforderungen an Abgrenzeinheiten für Langzeitbeeinflussung	50
9.2.2.7	Spannungsgesteuerte Abgrenzeinheiten für Langzeitbeeinflussung	50
9.2.2.8	Dioden-Abgrenzeinheiten	51
9.2.2.9	Polarisationszellen	51
9.2.2.10	Kondensator-Abgrenzeinheiten	51
9.2.2.11	Reihenschwingkreise	52
9.2.2.12	Parallelschaltung von Abgrenzeinheiten	53
9.2.2.13	Kompensationsanlagen/aktive Erdungsgeräte.....	54
9.2.3	Betrieb und Prüfungen von Erderanlagen an Rohrleitungen	54
9.2.4	Isolierstellen	56
9.2.5	Kathodische Korrosionsschutzanlagen	56
9.2.6	Messstellen	57
9.2.7	Mantelrohre	57
9.3	Maßnahmen an Rohrleitungsstationen.....	57
9.3.1	Allgemeines	57
9.3.2	Durch Isolierstücke von der Rohrleitung getrennte Stationen.....	58
9.3.3	Unmittelbar mit der Rohrleitung verbundene Stationen.....	58
9.4	Maßnahmen an Armaturen und Leitungszubehör	59
9.4.1	Allgemeines	59
9.4.2	Straßenkappen, Ausblasestutzen, Wassertöpfe und ähnliches Rohrleitungszubehör.....	59
9.4.3	Mantelrohre	59
9.4.4	Schieber und Schieberantriebe	60
9.4.5	Freiliegende Rohrleitungen	60
9.5	Potentialsteuerung und Isolierung des Standortes	60
9.6	Maßnahmen an Fernmeldeanlagen	61
9.7	Maßnahmen im Bereich von Erdungsanlagen und Freileitungsmasten.....	61
9.7.1	Allgemeines	61
9.7.2	Näherungen.....	61
9.7.3	Einführungen in Kraftwerke, Schalt- und Umspannanlagen	62
10	Maßnahmen beim Bau und Betrieb von Rohrleitungen.....	62
10.1	Allgemeines	62
10.2	Generelle Maßnahmen.....	63
10.2.1	Gegenseitige Verständigung	63
10.2.2	Berühren einer unter Spannung stehenden Leitung.....	63
10.2.3	Trennung.....	64
10.2.4	Gewitter.....	64
10.2.5	Fühlbare Berührungsspannungen bei Langzeitbeeinflussung	64
10.3	Maßnahmen beim Überschreiten der Grenzwerte	64
10.3.1	Rohrleitungspotential bei Kurzzeitbeeinflussung zwischen 1 000 V und 2 000 V	64
10.3.2	Rohrleitungspotential bei Kurzzeitbeeinflussung über 2 000 V oder Langzeitbeeinflussung über 60 V.....	65
10.4	Maßnahmen an noch nicht erdverlegten Rohrsträngen.....	65
10.4.1	Allgemeines	65

10.4.2	Grenzlängen.....	65
10.4.3	Maßnahmen gegen kapazitive und induktive Beeinflussung beim Überschreiten der Grenzlänge.....	66
10.5	Maßnahmen an teilweise oder ganz erdverlegten Rohrsträngen.....	66
10.5.1	Maßnahmen gegen induktive Beeinflussung beim Überschreiten der Grenzlänge.....	66
10.5.2	Maßnahmen gegen gefährlich hohe Berührungsspannungen zwischen zwei Rohrsträngenden.....	66
10.5.3	Maßnahmen beim Verbinden mit einer im Rohrgraben liegenden Rohrleitung.....	66
10.5.4	Maßnahmen bei räumlich begrenzten Umlegungen von Rohrleitungen.....	67
11	Messtechnische Ermittlung des Rohrleitungspotentials und der Berührungsspannung.....	70
11.1	Allgemeines.....	70
11.2	Messtechnische Ermittlung der induzierten Dauerbeeinflussungsspannung.....	71
11.3	Messtechnische Ermittlung der induktiven Kurzzeitbeeinflussung.....	72
12	Berechnungsverfahren.....	72
12.1	Induktive Beeinflussung.....	72
12.1.1	Allgemeines.....	72
12.1.2	Mathematischer Zusammenhang.....	73
12.1.3	Berechnung der Kenngrößen erdverlegter Rohrleitungen.....	75
12.1.4	Induzierte Längsfeldstärken in ideal isolierten Leitern bei Parallelführungen.....	77
12.1.4.1	Allgemeines.....	77
12.1.4.2	Beeinflussung durch Erdkurzschlussströme in Drehstrom-Hochspannungsfreileitungen.....	77
12.1.4.3	Beeinflussung durch Kurzschlussströme in Fahr- und Speiseleitungen.....	78
12.1.4.4	Dauerbeeinflussung durch Betriebs- und Fahrströme.....	78
12.1.4.5	Ermittlung durch Messungen.....	78
12.1.5	Induzierte Längsfeldstärken in ideal isolierten Leitern bei schrägen Näherungen.....	79
12.1.6	Ermittlung des Rohrleitungspotentials.....	79
12.2	Ohmsche Beeinflussung.....	90
12.2.1	Allgemeines.....	90
12.2.2	Spannungstrichter von Erdungsanlagen und Freileitungsmasten.....	90
12.2.3	Rohrleitungspotential von mit Erdungsanlagen verbundenen Rohrleitungen.....	90
12.2.4	Ohmsche Beeinflussung durch einphasige Wechselstrom-Bahnsysteme (15-kV-Oberleitungen).....	90
12.3	Rohrleitungsresonanz.....	91
12.3.1	Allgemeines.....	91
12.3.2	Die Rohrleitung als elektrisch schwingungsfähiges Gebilde.....	91
12.3.3	Resonanzlängen von Rohrleitungen.....	92
12.3.4	Spannungsüberhöhung bei Resonanz.....	92
12.4	Erder an Rohrleitungen.....	93
12.4.1	Allgemeines.....	93
12.4.2	Gleichmäßige Verteilung der Erder.....	94
12.4.3	Konzentrierte Erder an den Enden einer Näherungslänge.....	97
12.4.4	Potentialsteuernde Erder.....	98
12.4.5	Erdung der Rohrleitung bei Resonanz.....	99
13	Eigenschaften des beeinflussenden und des beeinflussten Systems.....	99
13.1	Allgemeines.....	99
13.2	Rohrleitungen.....	99
13.3	Hochspannungs-Drehstromfreileitung.....	100

14	Beispiele für Diagrammauswertungen und Berechnungen	101
14.1	Grenzlänge bei Parallelführung (7.3.2)	101
14.2	Berechnung des Rohrleitungspotentials	102
14.2.1	Induzierte Längsfeldstärke in einem ideal isolierten Leiter bei schräger Näherung (12.1.5).....	102
14.2.2	Vereinfachte Methode zur Ermittlung des Rohrleitungspotentials (12.1.6)	104
14.3	Beispiel für verteilt angeordnete Erder (12.4.2)	110
14.4	Beispiel für konzentrierte Erder an den Enden einer Näherungslänge (12.4.3)	110
	Literaturhinweise.....	112

Vorwort

Diese Empfehlung wurde von der Arbeitsgemeinschaft DVGW/VDE für Korrosionsfragen (AfK), in der außer Mitgliedern des DVGW (Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.) und des VDE (Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.) auch Vertreter der Deutschen Bahn AG, der Telekom Deutschland GmbH, des Verbandes Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV), der Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke (VDEW), des Mineralölwirtschaftsverbandes (MWV) und des Wirtschaftsverbandes Erdöl und Gas (WEG) mitarbeiten, im Einvernehmen mit anderen Fachgremien und unter Beachtung bereits bestehender Bestimmungen erarbeitet.

Als erste Technische Regel zum Themenbereich „Hochspannungsbeeinflussung“ erschien im Januar 1966 die Empfehlung „Maßnahmen beim Bau und Betrieb von Rohrleitungen im Einflussbereich von Hochspannungsfreileitungen (Richtlinien für hochspannungsbeeinflusste Rohrleitungen)“, welche nach intensiven Beratungen eines Arbeitskreises erstellt und textgleich als Technische Empfehlung Nr. 7 (TE 7) der Schiedsstelle für Beeinflussungsfragen (SfB) und als Empfehlung Nr. 3 (AfK-3) der Arbeitsgemeinschaft für Korrosionsfragen (AfK) veröffentlicht wurde.

Diese erste Ausgabe der Empfehlung stützte sich überwiegend auf theoretische Überlegungen, Berechnungen und Feldversuche. Praktische Erfahrungen lagen nur im begrenzten Umfang vor.

In den folgenden Jahren kam es zu einer fortschreitenden Bündelung der Trassen von Hochspannungs- und Rohrleitungen. Die stärkere Vermaschung der Netze führte zu einem Anstieg der Kurzschlussleistungen. Neue, hoch isolierende Werkstoffe für die Rohrleitungsumhüllung (Polyethylen) ergaben zusätzliche Beeinflussungsfälle, da allein schon durch die Betriebsströme der Hochspannungsfreileitungen eine relevante Dauerbeeinflussungsspannung auf Rohrleitungen induziert werden konnte. Diese Gegebenheiten führten zu einer ersten Überarbeitung der TE 7/AfK-3, welche im Herbst des Jahres 1971 begann und mit der Veröffentlichung der Neufassungen im Mai 1982 abgeschlossen wurde.

Im Rahmen dieser ersten Überarbeitung flossen weitere – theoretische und durch Versuche ermittelte – Erkenntnisse ein. Es wurden abstandsabhängige Grenzlängen definiert und so Hinweise gegeben, in welchen Beeinflussungsfällen die Höhe der Beeinflussungsspannungen eine genauere Betrachtung erfordert. Des Weiteren wurde die Abhängigkeit der Dauerbeeinflussungsspannung von der Geometrie der Freileitung (Anordnung der Leiter- und Erdseile und deren Variation an Verdrillungsmasten) erkannt und beschrieben. Mit der ersten Überarbeitung der TE 7/AfK-3 stand ab Mitte 1982 eine Technische Empfehlung zur Verfügung, welche ein sicheres Handling der Beeinflussungssituationen und Schutzmaßnahmen gegen gefährlich hohe Beeinflussungsspannungen ermöglichte. Grundlagen der Betrachtungen waren dabei die in den 80er Jahren eingesetzten Rohrleitungsumhüllungssysteme.

Fünfzehn Jahre nach Veröffentlichung der ersten Neubearbeitung im Mai 1982 hat sich der Arbeitskreis im Sinn einer Anpassung an den aktuellen Stand der Technik zum Ziel gesetzt,

die Gültigkeit der in der Ausgabe vom Mai 1982 zuletzt definierten Grenzwerte für die maximal zulässigen Berührungsspannungen vor dem Stand der aktuellen europäischen Normen zu überprüfen

- die Tabellen um die Daten neuer, nahezu fehlerstellenfreier Rohrleitungsumhüllungen zu erweitern
- bei den empfohlenen Maßnahmen auch die teilweise auftretenden Unterschiede von erdfühligem und nahezu fehlerstellenfreien Rohrsystemen herauszustellen
- die Möglichkeiten der Anschlusstechnik von Rohrleitungserdern vorzustellen, welche sich von den Alternativen „direkter Anschluss oder über Gasentladungsableiter“ aus der 82er-Empfehlung zu einer breiten Palette von Geräten unterschiedlicher Funktionsweisen weiterentwickelt haben, etwa Dioden- und Kondensator-Abgrenzeinheiten, welche die früher eingesetzten Polarisationszellen teilweise verdrängt haben sowie spannungsgesteuerte Halbleiter-Abgrenzeinheiten
- die Anforderungen an Korrosionsschutz-Gleichrichter zu aktualisieren, welche an hochspannungsbeeinflussten Rohrleitungen eingesetzt werden
- neue Erkenntnisse und Praxiswissen für Themenbereiche einzubringen, z. B.
 - Bau von Rohrleitungen mit hervorragender Umhüllungsqualität im Einflussbereich von Hochspannungsanlagen
 - Einsatz moderner Messtechniken und -geräte
 - Berechnung von induzierten Beeinflussungsspannungen mit Hilfe von DV-Programmen sowie
- die Empfehlung noch themenbezogener zu strukturieren

Die in den Empfehlungen vom 1966 und 1982 formulierten mathematischen Gesetzmäßigkeiten der Beeinflussung von Rohrleitungen im Nahbereich von Drehstrom-Hochspannungsfreileitungen und Wechselstrom-Bahnanlagen besitzen nach wie vor Gültigkeit und wurden nicht von der Nachüberarbeitung berührt.

Aufgrund neuer Veröffentlichungen, insbesondere der Überarbeitung der Empfehlungen der ITU-T [14] hinsichtlich der Personengefährdung bei beeinflussten Telekommunikationsleitungen, wurde das Grenzwertkonzept überprüft. Für den praktischen Anwendungsfall ergaben sich nach dieser Prüfung keine Änderungen, da im Fehlerfall die zur Einhaltung der 1 000-V-Beeinflussungsspannung geforderte Beschränkung der Einwirkzeit von den Hochspannungsanlagen aufgrund der bestehenden Schutzkonzepte eingehalten wird. Für den Fall des Normalbetriebs wurde eine Anpassung an den international für Beeinflussungen geltenden, einheitlichen Wert von 60 V (früher 65 V) vorgenommen.

In den folgenden Abschnitten dieser Empfehlung werden erprobte Maßnahmen aufgezählt, mit denen eine wirkungsvolle Reduzierung der eingekoppelten Beeinflussungsspannung erreicht werden kann – falls die Möglichkeit einer gefährlich hohen Berührungsspannung zwischen Rohrleitung und Erde im ungünstigen Beeinflussungsfall besteht. Auch in diesem Themenkomplex stand das Bemühen im Vordergrund, dem Anspruch einer „gültigen Technischen Regel“ gerecht zu werden – d. h. die verschiedenen Techniken darzustellen und neben den Möglichkeiten einzelner Verfahren auch deren Grenzen aufzuzeigen.

Damit sollten Betreibern von Rohrleitungen, Hochspannungsnetzen und elektrifizierten Wechselstrom-Bahnanlagen Lösungen für eventuelle Beeinflussungsprobleme aufgezeigt werden. Dem Anwender auf der Rohrleitungsseite sollte auch ermöglicht werden, ein Rohrnetz unter dem Gesichtspunkt „Hochspannungsbeeinflussung“ sicher zu errichten und zu betreiben. Den Herstellern von Einrichtungen für den

kathodischen Korrosionsschutz bzw. Einrichtungen zur Begrenzung von Beeinflussungsspannungen werden hier praxisgerechte und allgemeingültige Anforderungen an die Komponenten an die Hand gegeben.

Der im Themenbereich „Hochspannungsbeeinflussung“ Sachkundige wird stets bemüht sein, ein funktionierendes Schutzsystem gegen Hochspannungsbeeinflussung zu definieren und umzusetzen. Bei der Erarbeitung des Schutzkonzeptes ist aber zu beachten, dass – bei einem so umfangreichen Gewerk wie einer Rohrleitung – auch die Maßnahmen anderer Fachbereiche (welchen oft die Problematik „Hochspannungsbeeinflussung“ fremd ist) berücksichtigt werden müssen. Diese Anforderung gilt sowohl für die Bauphase (z. B. elektrische Verbindung von Rohrleitungsteilstücken im Rahmen von Druckproben über wassereinspeisende Rohrleitungen und stahlarmierte Schläuche) als auch für die Betriebsphase, wo es

- z. B. durch Blitzschutzmaßnahmen (z. B. Trennfunkstrecken mit niedrigen Ansprechspannungen) sowie
- durch Maßnahmen des kathodischen Korrosionsschutzes (Potentialverbindungen zu anderen Rohrleitungssystemen, Wechselstromableitung über Anoden von KKS-Anlagen)

zu weiteren Verbindungen der Rohrleitung mit erdfühligem Objekten kommen kann.

Nicht zu vernachlässigen sind auch gezielt durchgeführte, spannungsreduzierende Maßnahmen im Hinblick auf mögliche Wechselstromkorrosion (siehe auch AfK-Empfehlung Nr. 11, textgleich mit DVGW-Arbeitsblatt GW 28). Diese Einrichtungen (Erder und deren Anschaltgeräte) spielen z. B. auch im Falle einer kurzzeitigen Beeinflussung in Folge eines Erdfehlers im Hochspannungsnetz eine nicht zu unterschätzende Rolle bei der Verteilung der Höhe der Beeinflussungsspannung entlang der Rohrleitung.

Ein sicherer Betrieb von Rohrleitungen ist nur möglich, wenn die verschiedenen Aspekte (Hochspannungsbeeinflussung – Blitzschutz – Korrosionsschutz) als komplexes Gesamtsystem gesehen werden, in dem einzelne Maßnahmen mit Einfluss auf die Erdfähigkeit auch Auswirkungen auf die Wirksamkeit der anderen zu berücksichtigenden Schutzaspekte haben können. Daher ist eine Einbeziehung aller relevanten Maßnahmen in das Schutzkonzept „Hochspannungsbeeinflussung“ möglichst früh erforderlich.

Im Beeinflussungsfall sollte bei Festlegung der Schutzmaßnahmen die jeweils bestmögliche Gesamtlösung erreicht werden, die das technisch Erforderliche mit der geringsten wirtschaftlichen Belastung gewährleistet.

Die Kosten für Schutzmaßnahmen zur Vermeidung, Reduzierung oder Beseitigung von Beeinflussungen im Rahmen der Festlegungen dieser Empfehlung hat der Betreiber der beeinflussenden Anlage zu tragen, soweit seine Anlage die spätere ist. Hiervon abweichende vertragliche Vereinbarungen oder zwingende gesetzliche Vorschriften bleiben unberührt. Eine spätere beeinflussungserhebliche Änderung einer Anlage ist wie eine spätere Errichtung der Anlage zu behandeln.

Die vorliegende Fassung dieser Empfehlung stellt eine Nachüberarbeitung der Ausgabe vom November 2007 dar. Hauptgrund der Nachüberarbeitung war der entfallene Erwartungsfaktor w für die Kurzzeitbeeinflussung in den (der) Bezugsnorm(en). Dies hat zur Folge, dass aus einer Nachberechnung von bisher (unter dem Gesichtspunkt „Berührungsschutz“) unkritischen Beeinflussungsabschnitten auch bei unveränderter Beeinflussungssituation eine kritisch hohe Kurzzeitbeeinflussung resultieren kann. Aufgrund der bisher auch sicherheitstechnisch nur positiven Betriebserfahrungen mit der Anwendung des Erwartungsfaktors von $w = 0,7$ (und der uneingeschränkten Gültigkeit bei Beeinflussung durch Bahnanlagen) wird dieser Faktor zur Anwendung bei Personenschutzbetrachtungen in der Betriebsphase von Rohrleitungen wieder eingeführt. Im Einflussbereich von Drehstrom-Hochspannungsfreileitungen ist

bezüglich des Geräteschutzes und der Bauphase von Rohrleitungen weiterhin ein Erwartungsfaktor von $w = 1$ anzusetzen. Des Weiteren wurde die Aufstellung der Abgrenzeinheiten um den jetzt häufiger eingesetzten Reihenschwingkreis ergänzt.

Eine weitere Änderung zur vorherigen Ausgabe der AfK-Empfehlung Nr. 3 ergab sich bezüglich der erforderlichen Sicherheitsabstände von Hochspannungsanlagen zu Ausblaseeinrichtungen von Rohrleitungen – bzw. Anlagen – für brennbare Gase.

Zeitgleich mit der Nachüberarbeitung der AfK-Empfehlung Nr. 3 lag auf europäischer Ebene die – mittlerweile verabschiedete – Norm DIN EN 50443 (VDE 0845-8) zum Thema „Hochspannungsbeeinflussung“ vor. Es bestehen keine fachspezifischen Widersprüche zwischen den Inhalten dieser beiden Dokumente.

Diese Empfehlung ist textgleich mit DVGW-Arbeitsblatt GW 22 und der Technischen Empfehlung Nr. 7 der Schiedsstelle für Beeinflussungsfragen (SfB) der Deutschen Bahn AG, der Deutschen Telekom und des Bundesverbandes der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. Die AfK-Empfehlung Nr. 3 erscheint textgleich mit DVGW-Arbeitsblatt GW 22.

Änderungen

Gegenüber der AfK-Empfehlung Nr. 3:2007-11 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Redaktionelle Überarbeitung
- b) Notwendige Anpassung zur textgleichen Herausgabe der AfK-Empfehlung Nr. 3 und DVGW-Regelwerk

Frühere Ausgaben

AfK-Empfehlung Nr. 3:2007-11

AfK-Empfehlung Nr. 3:1982-05

AfK-Empfehlung Nr. 3:1966-01

1 Anwendungsbereich

Diese Empfehlung behandelt allgemeine Richtlinien und Maßnahmen bei Beeinflussungen infolge Näherungen und Kreuzungen von durchgehend elektrisch leitenden Rohrleitungen mit Hochspannungs-Drehstromanlagen und Wechselstrom-Bahnanlagen. Betrachtet werden hier ausschließlich Fragen des Berührungsschutzes, jedoch nur unter Berücksichtigung der Grundschiwingung der beeinflussenden Systeme; Beeinflussungen durch Oberschwingungen sind nicht von praktischer Relevanz. Nicht betrachtet wird die Wechselstromkorrosion, da dieser Themenbereich durch die AfK-Empfehlung Nr. 11, textgleich mit DVGW-Arbeitsblatt GW 28, abgedeckt wird.

Nach DIN VDE 0845-6 Teile 1 und 2 gehören zu den

- Hochspannungs-Drehstromanlagen (50 Hz)
Freileitungen einschließlich der Maste, Kabel, Kraftwerke, Umspan- und Schaltanlagen
- Wechselstrom-Bahnanlagen (16,7 Hz)
15-kV-Fahr- und Speiseleitungen mit den Fahrschienen als Rückleiter sowie Bahnstromleitungen einschließlich der Maste, Kabel, Kraft-, Umformer-, Unterwerke und Schaltposten

ANMERKUNG: Die in Deutschland selten anzutreffenden 50-Hz-Bahnanlagen sind analog zu den 16,7-Hz-Bahnanlagen zu behandeln.

Für Hochspannungs-Drehstromanlagen mit Nennspannungen von $U < 110$ kV können sich die Betrachtungen aufgrund der Erfahrungen in Deutschland auf die Mindestabstände und die ohmsche Beeinflussung beschränken.

Diese Empfehlung gilt nicht für Gleichstrombahnen und HGÜ-Anlagen.

Es gilt bezüglich der formulierten Spannungsgrenzwerte für den Berührungsschutz für neue und rückwirkend auch für bestehende Näherungen; dieses Vorgehen sollte auch bezüglich der Mindestabstände von Ausbläsern zu Hochspannungsfreileitungen angewandt werden. Weitere, von den bisherigen Ausgaben abweichende konstruktive Maßnahmen gelten in erster Linie für neue Näherungsabschnitte.

Die an hochspannungsbeeinflussten Rohrleitungen eingesetzten Geräte sind so auszulegen, dass die für den Berührungsschutz zulässigen Werte – zumindest aber die am Einsatzort des Gerätes zu erwartenden maximalen Beeinflussungsspannungen – als Nenngrößen für die Wechselspannungsbelastung anzunehmen sind; Beeinflussungen durch Oberschwingungen sind auch hier nicht von praktischer Relevanz.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden zitierten Dokumente sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Anwender dieses Teils des AfK-Regelwerkes werden jedoch gebeten, die jeweils neuesten Ausgaben der nachfolgend angegebenen normativen Dokumente anzuwenden. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen). Aufgeführte DIN-Normen können Bestandteil des AfK-Regelwerkes sein.

DVGW G 442 (M), *Explosionsgefährdete Bereiche an Ausblaseöffnungen von Leitungen zur Atmosphäre an Gasanlagen*

DVGW GW 309 (A), *Elektrische Überbrückung bei Rohrtrennungen*

DIN 57680-1 (VDE 0680-1), *Körperschutzmittel, Schutzvorrichtungen und Geräte zum Arbeiten an unter Spannung stehenden Teilen bis 1 000 V; Isolierende Körperschutzmittel und Isolierende Schutzvorrichtungen [VDE-Bestimmung]*

DIN EN 12954, *Kathodischer Korrosionsschutz von metallischen Anlagen in Böden und Wässern – Grundlagen und Anwendung für Rohrleitungen*

DIN EN 14505, *Kathodischer Korrosionsschutz komplexer Anlagen*

DIN EN 41003 (VDE 0804-100), *Besondere Sicherheitsanforderungen an Geräte zum Anschluss an Telekommunikationsnetze und/oder Kabelverteilersysteme*

DIN EN 50122-2 (VDE 0115-4), *Bahnanwendungen – Ortsfeste Anlagen – Elektrische Sicherheit, Erdung und Rückleitung – Teil 2: Schutzmaßnahmen gegen Streustromwirkungen durch Gleichstrombahnen*

DIN EN 50162 (VDE 0150), *Schutz gegen Korrosion durch Streuströme aus Gleichstromanlagen*

DIN EN 50182, *Leiter für Freileitungen – Leiter aus konzentrisch verseilten runden Drähten*

DIN EN 50443 (VDE 0845-8), *Auswirkungen elektromagnetischer Beeinflussungen von Hochspannungswechselstrombahnen und/oder Hochspannungsanlagen auf Rohrleitungen*

DIN EN 50522 (VDE 0101-2), *Erdung von Starkstromanlagen mit Nennwechselspannungen über 1 kV*

DIN EN 60900 (VDE 0682-201), *Arbeiten unter Spannung – Handwerkzeuge zum Gebrauch bis AC 1 000 V und DC 1 500 V*

DIN EN 61936-1 (VDE 0101-1), *Starkstromanlagen mit Nennwechselspannungen über 1 kV – Teil 1: Allgemeine Bestimmungen*

DIN VDE 0845-6-1, *Maßnahmen bei Beeinflussung von Telekommunikationsanlagen durch Starkstromanlagen – Teil 1: Grundlagen, Grenzwerte, Berechnungs- und Messverfahren*

DIN VDE 0845-6-2, *Maßnahmen bei Beeinflussung von Telekommunikationsanlagen durch Starkstromanlagen – Teil 2: Beeinflussung durch Drehstromanlagen*

DIN IEC/TS 60479-1 (VDE V 0140-479-1), *Wirkungen des elektrischen Stromes auf Menschen und Nutztiere – Teil 1: Allgemeine Aspekte*

AfK-Empfehlung Nr. 5, *Kathodischer Korrosionsschutz in Verbindung mit explosionsgefährdeten Bereichen –textgleich mit DVGW GW 24 (A)*

AfK-Empfehlung Nr. 6, *Maßnahmen zur Verhütung von zu hohen Berührungsspannungen bei der Errichtung von Fremdstromanlagen für den kathodischen Korrosionsschutz und Bauhinweise*

AfK-Empfehlung Nr. 8, *Kathodischer Korrosionsschutz für Stahlrohre von Hochspannungskabeln*

AfK-Empfehlung Nr. 11, *Beurteilung der Korrosionsgefährdung durch Wechselstrom bei kathodisch geschützten Stahlrohrleitungen und Schutzmaßnahmen – textgleich mit DVGW GW 28 (A)*

Gas- und Wasserleitungskreuzungsrichtlinien DB/BDEW (GWKR 2012, Ril 877)

SfB Technische Empfehlung Nr. 1 (TE 1), *Anleitung zur Berechnung der in TK-Leitungen durch Starkstromleitungen induzierten Spannungen*

SfB Technische Empfehlung Nr. 2 (TE 2), *Richtlinie über hochspannungsbeeinflusste Nachrichtenanlagen (außer Blockleitungen) für den Bahnbetrieb*

SfB Technische Empfehlung Nr. 3 (TE 3), *Richtlinie für Schutzmaßnahmen an TK-Anlagen gegen Beeinflussung durch Netze der elektrischen Energieübertragung, -verteilung sowie Wechselstrombahnen*

SfB Technische Empfehlung Nr. 8 (TE 8), *Anleitung zur rechnerischen und messtechnischen Ermittlung der Reduktionswirkung von Kompensationsleitern*

BGV C 22, *Bauarbeiten*

BGV A3, *Elektrische Anlagen- und Betriebsmittelprüfung nach BetrSichV, TRBS, DIN VDE 0701-0702*

3 Begriffe, Symbole, Einheiten und Abkürzungen

3.1 Abgrenzeinheit (AE)

Gerät oder Baugruppe mit niedrigem Wechselstromwiderstand und hohem Gleichstromwiderstand, welches in die Verbindung zwischen einer kathodisch geschützten, hochspannungsbeeinflussten Rohrleitung und einem erdfühli- gen Objekt (z. B. einem Erder) geschaltet wird

Spannungsgesteuerte AE (z. B. Trennfunk- kenstrecken oder elektronische Leistungshalbleiterschalter) stellen diese Verbindung bei einer definierten Höhe der Beeinflussungsspannung her; ebenso ist (z. B. durch Reihenschwingkreise, Dioden- oder Kondensator-Abgrenzeinheiten sowie Polarisationszellen) eine Minimierung des in den Erder eintretenden Gleichstromes möglich.

3.2 Ansprechspannung (U_A)

Höhe der Beeinflussungsspannung, ab der eine Wechselstromableitung zu einem Erder über eine spannungsgesteuerte Abgrenzeinheit geschaltet wird. Sie ist nach Ansprechen der Abgrenzeinheiten nicht identisch mit der Beeinflussungsspannung am Erderort, da diese in erster Linie vom Spannungsfall über den Erder bestimmt wird.

3.3 Beeinflussung

Elektrische Einwirkung einer Hochspannungsanlage auf eine benachbarte Rohrleitung durch induktive, ohmsche oder kapazitive Kopplung

3.3.1 Beeinflussungsspannung

Die zwischen Rohrleitung und der fernen Erde (Bezugserde), aufgrund von induktiven, ohmschen und kapazitiven Einkopplungen auftretende Spannung

3.3.2 Kurzzeitbeeinflussung

Seltene Einwirkung von sehr kurzer Dauer im Fehlerfall z. B. bei Erdkurzschlüssen; der fehlerbehaftete Teil wird in Hochspannungsnetzen mit starrer Sternpunktterdung und einer Nennspannung von $U_N \geq 110$ kV innerhalb von $t < 0,20$ Sekunden abgeschaltet.

3.3.3 Langzeitbeeinflussung

Die Langzeitbeeinflussung ist

- eine dauernd auftretende Einwirkung im Normalbetrieb, z. B. durch Betriebsströme in 50-Hz-Drehstromfreileitungen
- eine häufig auftretende Einwirkung längerer Dauer im Normalbetrieb, die in Abhängigkeit vom Ort und von der Zeit veränderlich ist, z. B. durch Betriebsströme in Bahnoberleitungen
- eine vorübergehende Einwirkung längerer, jedoch begrenzter Dauer im Fehlerfall, z. B. bei Einfach-erdschluss in Netzen mit Erdschlusskompensation

3.4 Berührungsspannung U_T

Der Teil der Spannung, der vom Menschen überbrückt werden kann, wobei der Stromweg über den menschlichen Körper von Hand zu Fuß oder von Hand zu Hand verläuft. Die Berührungsspannung kann sowohl allein durch induktiv, ohmsch oder kapazitiv eingekoppelte Spannungen hervorgerufen werden als auch aus der Überlagerung einer ohmschen und einer induktiven Beeinflussung resultieren.

3.5 Betriebsstrom I_B

Der im Normalbetrieb eines elektrischen Netzes fließende Strom

3.6 Bezugserde

Das Potential der Bezugserde ist identisch mit dem Potential der unbeeinflussten, „fernen Erde“.

3.7 Erderspannungstrichter

An der Erdoberfläche gegen ferne Erde bestehende Teilspannung der Erdungsspannung, welche mit zunehmendem Abstand vom Erder nichtlinear abnimmt und als Schritt- oder Berührungsspannung abgreifbar ist

3.8 Erdfehlerstrom

Strom, der bei Vorhandensein nur eines Erdschlusspunktes an der Fehlerstelle (Erdschlussstelle) vom Betriebsstromkreis zur Erde oder zu geerdeten Teilen übertritt

Dies ist in Drehstromnetzen und 110 kV-Bahnstromleitungen

- mit isoliertem Sternpunkt der kapazitive Erdschlussstrom
- mit Erdschlusskompensation der Erdschlussreststrom

- mit niederohmiger Sternpunktterdung der Erdkurzschlussstrom I_K

In Fahr- und Speiseleitungen von Wechselstrombahnen fließt im Fehlerfall der Kurzschlussstrom I_K .

3.9 Erdungsspannung U_E

Die Erdungsspannung U_E ist die zwischen einer Erdungsanlage und der fernen Erde (Bezugserde) auftretende Spannung. Die Erdungsspannung stellt die ohmsche Komponente der Beeinflussung dar.

3.10 Erdungsstrom I_E

Der Erdungsstrom ist der von einem beeinflussten Objekt über einen Erder gegen Erde abgeleitete (Wechsel-)Strom. Die Höhe des maximal zu erwartenden Erdungsstromes bestimmt auch die Ableitfähigkeit der Kabel und der Abgrenzeinheit. Des Weiteren gibt der Erdungsstrom – zusammen mit der Erderimpedanz und dem Spannungsfall über der Abgrenzeinheit und auf den Kabelverbindungen – die verbleibende Restspannung des beeinflussten Objektes gegen das Potential der Bezugserde vor.

3.11 Erdungswiderstand einer Rohrleitung R_R

Der durch den Umhüllungswiderstand bedingte Widerstand zwischen der Rohrleitung und der fernen Erde (Bezugserde)

3.12 Erdung

Die Erdung ist die niederohmige und stromtragfähige Ableitung von einer erdfühligen, hochspannungsbeeinflussten Rohrleitung über ein erdfühliges Objekt (Erder). Bei der passiven Erdung wird der Erdungsstrom durch die Höhe der Beeinflussungsspannung und die Summe der Widerstände zwischen dem Rohrleitungsanschluss und der fernen Erde bestimmt. Bei der aktiven Erdung bzw. Kompensation wird der Erdungsstrom durch einen Leistungsverstärker erhöht.

3.13 Erwartungsfaktor w

Wahrscheinlichkeitsfaktor, der für den bei Kurzzeitbeeinflussungsuntersuchungen zugrunde zu legenden Strom anzuwenden ist (siehe 12.1.4.2 und 12.1.4.3)

3.14 Freileitungsmast

Der Freileitungsmast ist im Sinne dieser Empfehlung ein Oberbegriff für Maste von Hochspannungs-Drehstromfreileitungen sowie von Bahnstrom-, Fahr- und Speiseleitungen.

3.15 Gastechische Anlage

Die gastechische Anlage im Sinne dieser Empfehlung ist der Oberbegriff für Rohrleitungssysteme zum Transport brennbarer Gase mit den dazugehörigen Leitungen, Stationen und Armaturen – sowohl im Stations- als auch im Trassenbereich.

3.16 Grenzabstand

Der Grenzabstand ist der größte Abstand zwischen einer Hochspannungsanlage und einer Rohrleitungsanlage, innerhalb dessen Beeinflussungen in Betracht zu ziehen ist.

3.17 Grenzlänge

Die Grenzlänge L_{Gr} ist die größte Länge einer Parallelführung oder Näherung, bei der Beeinflussungen außer Betracht bleiben.

3.18 Hochspannungsfreileitung

Die Hochspannungsfreileitung im Sinne dieser Empfehlung ist der Oberbegriff für Hochspannungs-Drehstromfreileitungen, Bahnstromleitungen, Fahr- und Speiseleitungen.

3.19 Hochspannungsanlage

Die Hochspannungsanlage im Sinne dieser AfK-Empfehlung ist der Oberbegriff für Hochspannungs-Drehstromanlagen und für Wechselstrom-Bahnanlagen.

3.20 Hochspannungsstationen

Hochspannungsstationen im Sinne dieser Empfehlung sind Kraftwerke, Schalt- und Umspannanlagen einschließlich Netz- und Abnehmerstationen in Hochspannungs-Drehstromnetzen sowie Bahnkraftwerke und Unterwerke.

3.21 Isolierstelle

Eine Isolierstelle ist ein Bauteil zur elektrischen Trennung von Rohrleitungsabschnitten. Bauartbedingt unterscheidet man Isolierkupplungen und Isolierflansche.

3.22 Kathodischer Korrosionsschutz (KKS)

Der kathodische Korrosionsschutz ist ein Schutzverfahren zur Vermeidung von Korrosionsschäden, bei dem der zu schützende Werkstoff zur Kathode gemacht wird, z. B. durch den Anschluss von galvanische Anoden, Fremdstromanlagen, Streustromableitungen oder Streustromabsaugungen.

3.23 Näherungslänge L_R

Die Näherungslänge L_R ist der innerhalb eine Beeinflussungsabschnittes liegende Teil einer Rohrleitung, bei dem der Abstand zwischen dem beeinflussten System und der Hochspannungsleitung kleiner oder gleich dem Grenzabstand ist.

3.24 Nennweite DN

Mit der Nennweite wird der Durchmesser einer Rohrleitung beschrieben. Die Maßeinheit des Durchmessers wird bei einer Angabe in Millimetern nicht ergänzt, d. h. eine Rohrleitung mit $D = 600$ mm Durchmesser kann auch größtmäßig mit „DN 600“ benannt werden.

3.25 Reduktionsfaktor r

Der Reduktionsfaktor r gibt an, wie stark bei induktiver und/oder ohmscher Beeinflussung die in eine beeinflusste Anlage übertragene Spannung durch die Kompensationswirkung von Strömen verringert wird, welche durch Kopplung über induktive und/oder ohmsche Widerstände in den reduzierenden Leitern fließen.

3.26 Rohrleitungsanlage

Die Rohrleitungsanlage ist die Gesamtheit der Einrichtungen, die zum Transport eines Mediums durch eine Rohrleitung benötigt werden.

3.27 Rohrleitungspotential U_R

Das Rohrleitungspotential U_R ist die zwischen einer Rohrleitung und der fernen Erde (Bezugserde) auftretende Wechselspannung.

3.28 Resonanzüberhöhung

Aufgrund der Längsinduktivität des Rohrleitungsstahles und der Kapazität der Rohrleitung gegen Erde kann es bei ausreichender Länge der Rohrleitung zu einer relevanten Spannungsüberhöhung (Resonanzüberhöhung) durch elektrische Serienresonanz des Rohres mit der Frequenz der beeinflussenden Wechselspannung kommen.

3.29 Resonanzlänge

Die Resonanzlänge ist die Länge auf der Rohrleitung außerhalb des Beeinflussungsabschnittes, bei der sich aufgrund der kapazitiven und induktiven Rohrleitungsbeläge eine Resonanz (ein Spannungsmaximum) einstellt.

3.30 Resonanzort

Der Resonanzort ist der Punkt auf der Rohrleitung, der sich im Abstand der Resonanzlänge vom Ende des Beeinflussungsabschnittes ergibt.

3.31 Spezifischer Umhüllungswiderstand r_u

Der Umhüllungswiderstand ist der durch Fehlstellen in einer Umhüllung bedingte elektrische Widerstand der Umhüllung. Der spezifische Umhüllungswiderstand r_u wird auf die gesamte umhüllte Metalloberfläche bezogen.

3.32 Umhüllung

Die Umhüllung einer Rohrleitung, eines Kabels, Lagerbehälters oder einer anderen Anlage aus Metall ist ein meist einige Millimeter dicker, elektrisch isolierender Überzug auf der Metalloberfläche zum passiven Schutz gegen Außenkorrosion.

4 Verwendete Kurzzeichen

A Querschnitt, Fläche

a Abstand zwischen den Achsen einer Rohrleitung und einer Hochspannungsfreileitung bei Parallelführung

C' Kapazitätsbelag einer Rohrleitung (auf die Länge bezogene Kapazität)

D	Durchmesser einer Rohrleitung
DBE	Dauerbeeinflussung
d_E	Durchmesser eines Erders
E	allgemeine induzierte Längsfeldstärke im ideal isolierten Leiter (Spannung pro Längeneinheit)
E_B	induzierte Längsfeldstärke im ideal isolierten Leiter durch den Betriebsstrom in 50-Hz-Drehstromfreileitungen
E_F	induzierte Längsfeldstärke im ideal isolierten Leiter durch den Fahrstrom in Fahrleitungen von Wechselstrombahnen
E_K	induzierte Längsfeldstärke im ideal isolierten Leiter durch den Erdkurzschlussstrom in 50-Hz-Netzen mit niederohmiger Sternpunktterdung und durch den Kurzschlussstrom in Fahrleitungen von Wechselstrombahnen
f	Grundfrequenz des beeinflussenden Systems
G'	Ableitungsbelag einer Rohrleitung (auf die Länge bezogene Ableitung)
I	induzierender Strom
I_B	Betriebsstrom in 50-Hz-Drehstromfreileitungen (Strom je System)
I_E	Erdungsstrom
I_{Ezul}	zulässiger Erdungsstrom
I_{EK}	Kurzzeiterdungsstrom
I_{ED}	Dauererdungsstrom
I_F	Fahrstrom bei Wechselstrombahnen
I_K	Erdkurzschlussstrom in 50-Hz-Netzen mit niederohmiger Sternpunktterdung und Kurzschlussstrom in Fahr- und Speiseleitungen von Wechselstrombahnen
I_{K0}	Erdkurzschlussstrom am Einspeisepunkt (z. B. der Umspannanlage)
I_{KL}	Erdkurzschlussstrom am zu betrachtenden Erdkurzschlussort
I_R	Strom in einer Rohrleitung
J	Gleichstromdichte
K_L	Kenngroße einer Hochspannungs-Drehstromfreileitung
KZB	Kurzzeitbeeinflussung

L	Länge einer Parallelführung
L_E	wirksame Länge eines Band- oder Tiefenerders
L_{Gr}	Grenzlänge
L_H	Länge der induzierenden Hochspannungsfreileitung bei einer schrägen Näherung
L_K	Kennlänge (charakteristische Länge) einer Rohrleitung
L_M	Länge der Messleitung
L_R	Näherungslänge
M'	auf die Längeneinheit bezogene Gegeninduktivität zwischen den Schleifen Hochspannungsfreileitung – Erde und Rohrleitung – Erde
M	Gegeninduktivität zwischen den Schleifen Hochspannungsfreileitung – Erde und Rohrleitung – Erde
n	Anzahl der an eine Rohrleitung angeschlossenen Erder
n'	Anzahl der an eine Rohrleitung angeschlossenen Erder, bezogen auf einen Längenabschnitt der Rohrleitung
R_E	Erdungswiderstand, allgemein
R_R	Erdungswiderstand einer Rohrleitung (=Umhüllungswiderstand)
R'_L	ohmscher Widerstandsbelag einer Rohrleitung (auf die Länge bezogene ohmsche Komponente des Wechselstromwiderstandes)
r	Reduktionsfaktor, allgemein
r_E	Erdseilreduktionsfaktor
r_S	Schienenreduktionsfaktor
r_e	äquivalente Verringerung des spezifischen Umhüllungswiderstandes durch Anschluss von Erdern an eine Rohrleitung
r_u	durch Fehlstellen in der Umhüllung bedingter spezifischer Umhüllungswiderstand einer Rohrleitung (auf die Fläche bezogener Umhüllungswiderstand)
r_{UG}	äquivalenter spezifischer Umhüllungswiderstand mit an eine Rohrleitung angeschlossenen Erdern
t_A	Abschaltzeit, Zeit bis zur Abschaltung des Fehlerstromes gemäß Schutzkonzept
U_E	Erdungsspannung

U_{BM}	gemessene Dauerbeeinflussungsspannung zwischen der beeinflussten Rohrleitung und dem Potential der Bezugserde
U_{KM}	Beeinflussungsspannung zwischen der beeinflussten Rohrleitung und dem Potential der Bezugserde, gemessen im Rahmen einer entsprechend DIN EN 50522 (VDE 0101-2), Anhang L, Abschnitt L3 und L4 durchgeführten Messung für Erdungsanlagen (Simulation Kurzzeitbeeinflussungsfall)
U_L	induzierte Längsspannung im ideal isolierten Leiter
U_N	Nennspannung des beeinflussenden Hochspannungssystems
U_R	Rohrleitungspotential
U_{Rmax}	größter Wert des Rohrleitungspotentials
\ddot{U}_{Res}	Resonanzüberhöhung
U_T	Berührungsspannung
U_{Tmax}	größter Wert der Berührungsspannung an einer Rohrleitung
w	Erwartungsfaktor
x	Entfernung von der Mitte einer Parallelführung in Trassenrichtung
x_K	Entfernung des Erdkurzschlussortes vom Einspeisepunkt
y	Entfernung vom Ende einer Näherungslänge nach außen
Z_w	Wellenwiderstand einer Rohrleitung
δ	Stärke der Rohrumhüllung
γ	Übertragungsmaß einer Rohrleitung
φ_γ	Phasenwinkel des Übertragungsmaßes einer Rohrleitung
φ_{Zw}	Phasenwinkel des Wellenwiderstandes einer Rohrleitung
ρ	spezifischer elektrischer Widerstand, allgemein
ρ_E	spezifischer elektrischer Widerstand des Erdreiches
ϵ_0	Elektrische Feldkonstante ($8,85942 \times 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$)
ϵ_r	(relative) Dielektrizitätszahl
μ_0	Permeabilitätskonstante ($1,26 \times 10^{-6} \text{ VsA}^{-1}\text{m}^{-1}$)
μ_r	relative Permeabilitätszahl

μ	Gesamtpermeabilität
ω	Kreisfrequenz ($\omega = 2 \pi f$)
$\omega L'$	induktiver Widerstandsbelag einer Rohrleitung
$\omega C'$	Kehrwert des kapazitiven Widerstandsbelages einer Rohrleitung

5 Hinweise für die Planung von Rohrleitungsanlagen und Hochspannungsanlagen

5.1 Grundsätze

Um die Beeinflussung zwischen Hochspannungsanlagen und Rohrleitungsanlagen sowie Behinderungen beim Bau klein zu halten, sollten enge Näherungen nach Möglichkeit vermieden werden.

Falls dies nicht möglich ist, sind im Einvernehmen mit den Beteiligten diejenigen Maßnahmen zu treffen, die technisch-wirtschaftlich die beste Gesamtlösung ergeben.

In den nachfolgenden Abschnitten sind Hinweise gegeben, die dabei zu beachten sind.

5.2 Abstände zwischen Rohrleitungen und Hochspannungsfreileitungen sowie Hochspannungskabeln

5.2.1 Allgemeines

Mindestabstände zwischen Rohrleitungen und Hochspannungsfreileitungen werden gefordert, um ein sicheres Arbeiten bei der Errichtung und Wartung der Rohrleitungen sowie die Standsicherheit der Maste zu gewährleisten.

Mindestabstände zwischen Rohrleitungen und Erdern oder Hochspannungskabeln sind erforderlich, um Lichtbogenüberschläge zwischen Erder bzw. Kabel und Rohrleitung im Fall einer Störung zu vermeiden.

Bei Parallelführungen und Kreuzungen von Rohrleitungen mit Wechselstrom-Bahnanlagen sind die Gas- und Wasserleitungskreuzungsrichtlinien zu beachten.

5.2.2 Parallelführungen

Bei Parallelführungen von Rohrleitungen zu Hochspannungsfreileitungen sollte ein Mindestabstand eingehalten werden von

- 20 m zwischen der Rohrleitung und Masterdungen – einschließlich verbundener Potentialsteuerungen – von Hochspannungsfreileitungen mit Nennspannungen von 110 kV und darüber sowie einer niederohmigen Sternpunktterdung aufgrund der ohmschen Beeinflussung im Bereich der Masterdung
- 10 m zwischen der Rohrleitungsachse und der vertikalen Projektion des äußeren Leiterseiles der Hochspannungsfreileitung mit einer Nennspannung von 110 kV und darüber
- 4 m zwischen der Rohrleitungsachse und der vertikalen Projektion des äußeren Leiterseiles der Hochspannungsfreileitung mit einer Nennspannung unter 110 kV

- 6 m zwischen der Rohrleitungsachse und der vertikalen Projektion der Fahrleitung
- 4 m zwischen der Rohrleitungsachse und der vertikalen Projektion der Speiseleitung

Für Mindestabstände zwischen Rohrleitungen und Masten gelten die Werte nach 5.2.3.

Bei diesen Abständen ist in der Regel eine Überschneidung der Schutzstreifen zu erwarten, so dass Vereinbarungen zwischen den Partnern über die Mitbenutzung des Schutzstreifens zu treffen sind.

Bei Parallelführungen von Rohrleitungen und Hochspannungskabeln ist ein Mindestabstand entsprechend Tabelle 1 einzuhalten. Falls dieser Abstand nicht eingehalten werden kann, ist entweder eines der beiden Systeme im Schutzrohr zu verlegen, oder durch das Zwischenlegen isolierender Schalen oder Platten aus z. B. PVC oder PE eine Berührung zwischen Kabelanlage und Rohrleitung zu verhindern. Die Beschaffenheit und Form dieser Zwischenlagen sind im gegenseitigen Einvernehmen festzulegen und müssen den Anforderungen genügen, dass das jeweils andere System im Fehlerfall nicht beschädigt wird.

Tabelle 1 – Mindestabstände (lichte Weite) zwischen Hochspannungskabel- und Rohranlagen bei Parallelführungen

Spannungsebene des Kabelsystems	Mindestabstand zur Rohrleitung
< 110 kV	1 m
≥ 110 kV	5 m
≥ 380 kV	10 m

Falls geringere Abstände notwendig werden, sind technische Vereinbarungen zu treffen.

5.2.3 Kreuzungen

Zwischen Rohrleitungsachse und Mast (Mastfundament bzw. Mastestiel) einer mit Erdseil(en) ausgestatteten Drehstrom-Hochspannungsfreileitung ist entsprechend DIN EN 50443 (VDE 0845-8) ein Mindestabstand einzuhalten von:

- 20 m bei Höchstspannungsfreileitungen mit starrer Sternpunktterdung und einer Nennspannung von gleich oder mehr als 110 kV (sofern sichergestellt ist, dass die Umhüllung der Rohrleitung in einem 20 m-Bereich um den Mast eine Durchschlagfestigkeit von mindestens 5 kV besitzt, kann der zulässige Abstand auf 10 m verringert werden)
- 10 m bei einer Hochspannungsfreileitung mit einer Nennspannung von 110 kV und Erdschlusskompensation
- 5 m bei einer Hochspannungsfreileitung mit einer Nennspannung unter 110 kV (einschließlich einer 15-kV-Fahr- oder Speiseleitung)

Falls geringere Abstände notwendig werden, sind technische Vereinbarungen zu treffen; ein lichter Mindestabstand von 2 m ist jedoch in jedem Fall einzuhalten.

Die Verlegung von Rohrleitungserdern sollte innerhalb der vorgenannten Bereiche – wegen der sonst relevanten Potentialverschleppungen – unbedingt vermieden werden.

Bei der Errichtung von Korrosionsschutz-Messstellen und KKS-Rohrkontakten sowie bei der Verlegung von KKS-Messstellenkabeln sind bei der Auswahl der Materialien deren Isolationsbeanspruchung sowie für die Messstelle die zu erwartenden Berührungsspannungen zu berücksichtigen.

Bei Masten mit potentialsteuernden Erdern ist die Ausdehnung der Erderanlage zu ermitteln und gemeinsam mit dem Netzbetreiber ein geeigneter Abstand zu vereinbaren.

Bei Kreuzungen zwischen Rohrleitungen und Hochspannungskabeln ist ein Mindestabstand entsprechend Tabelle 2 einzuhalten. Falls dieser Abstand nicht eingehalten werden kann, ist entweder eines der beiden Systeme im Schutzrohr zu verlegen, oder durch das Zwischenlegen isolierender Schalen oder Platten aus z. B. PVC oder PE eine Berührung zwischen Kabelanlage und Rohrleitung zu verhindern. Die Beschaffenheit und Form dieser Zwischenlagen sind im gegenseitigen Einvernehmen festzulegen und müssen der Anforderung genügen, dass das jeweils andere System im Fehlerfall nicht beschädigt wird.

Tabelle 2 – Mindestabstände (lichte Weite) zwischen Hochspannungskabel- und Rohranlagen bei Kreuzungen

Spannungsebene des Kabelsystems	Mindestabstand zur Rohrleitung
< 110 kV	0,5 m
≥ 110 kV	1 m (mit isolierenden Zwischenlagen)

Zu Erderanlagen von Hochspannungskabeln mit Nennspannungen von $U_N > 50$ kV ist entsprechend DIN EN 50443 (VDE 0845-8) ein Mindestabstand von 20 m vorgegeben.

Sofern diese Mindestabstände nicht eingehalten werden können, sind zwischen den Beteiligten gesonderte Vereinbarungen zu treffen.

Zwischen Masterder und Rohrleitung ist ein lichter Abstand größer als 2 m anzustreben. Sofern kein Masterder vorhanden ist, gilt dieser Abstand vom Mastfundament bzw. Masteckstiel.

Werden Gleise von Wechselstrombahnen unterirdisch gekreuzt, ist zwischen Rohrleitung und Schwellenoberkante ein lichter Abstand von 1,5 m einzuhalten.

Eine gemeinsame Verlegung von Rohrleitungen und Energiekabeln in einem Mantelrohr/Schutzrohr zur Kreuzung von Gewässern, Bahnanlagen oder Straßen ist nicht zu empfehlen, da bei einem Kabelfehler innerhalb des Ringraumes

- zumindest eine Beschädigung der Rohrumhüllung nicht auszuschließen ist bzw.
- es bei dem Vorhandensein von „Faulgasen“ im Ringraum zu einer Verpuffung kommen kann.

Die beiden vorgenannten Gefährdungspotentiale können im Grunde nur durch die „Verdämmung“ – d. h. die vollständige Ausfüllung des verbleibenden Ringraumes mit Füllmassen auf Beton- oder Bitumenbasis – beseitigt werden. Eine solche Maßnahme verhindert aber die Zugänglichkeit des Kabels, d. h. ein Herausziehen des Kabels bzw. eine Neuverlegung zu Reparaturzwecken.

Zu bedenken ist auch die Möglichkeit gefährlich hoher Berührungsspannungen durch die Verschleppung von Fehlerspannungen vom Energiekabel auf die Rohrleitung.

Innerhalb von Schutzrohren/Mantelrohren werden Rohrleitungen in der Regel durch so genannte „Abstandshalter“ geführt. Bei einem möglichen Bruch dieser Abstandshalter – wie auch durch (mechanische) Spannungen bedingte Biegungen der Rohrleitung – kann es zu einer dauerhaften mechanischen Belastung und Schädigung des Kabelmantels kommen.

5.3 Erdungsanlagen von Kraftwerken, Schalt- und Umspannanlagen

5.3.1 Allgemeines

Hochspannungsstationen besitzen Erdungsanlagen, die bei Freiluftanlagen im Allgemeinen als innerhalb der Anlagenumzäunung liegende Maschenerder und bei Innenraumanlagen im Allgemeinen als äußere Ringerder, gegebenenfalls zusätzlich mit Tiefen- und Strahlenerdern, ausgebildet sind. Im Erdfehlerfall werden das Potential der Erdungsanlage sowie das des Erdreiches der näheren Umgebung angehoben. An der Erdungsanlage entsteht – gemessen gegen ferne Erde (Bezugserde) – die Erdungsspannung und im Erdreich der Umgebung das nach außen abfallende Erdoberflächenpotential (Spannungstrichter) DIN EN 61936-1 (VDE 0101-1), DIN EN 50522 (VDE 0101-2).

Erdungsspannungen sind beim Elektrizitätsversorgungsunternehmen (EVU) bzw. bei der Deutschen Bahn AG (DB AG) zu erfragen. In Hochspannungsnetzen mit niederohmiger Sternpunktterdung ist der Verlauf des Erdoberflächenpotentials ebenfalls zu erfragen.

Die Errichtung von Rohrleitungserdern entsprechend 9.2.2 im Spannungstrichter von Erdungsanlagen, welche Hochspannungsanlagen bzw. -masten von Netzen mit starrer Sternpunktterdung zuzuordnen sind, sollte wegen der Verschleppung von Fehlerströmen (ohmsche Beeinflussung) auf das Rohrleitungssystem vermieden werden.

5.3.2 Näherungen

In der Regel sollte ein Mindestabstand von 2 m (lichte Weite) zwischen Rohrleitung und äußerem Rand der Erdungsanlage eingehalten werden.

Dieser Abstand kann aufgrund technischer Vereinbarungen der Beteiligten bis auf 0,5 m bzw. bei Engpässen bis auf 0,2 m verringert werden, wenn eine der folgenden Voraussetzungen gegeben ist:

- Die Hochspannungsanlage ist an ein globales Erdungssystem angebunden. Ein globales Erdungssystem ist nach DIN EN 50522 (VDE 0101-2) „Ein durch die Verbindung von örtlichen Erdungsanlagen hergestelltes Erdungssystem, das sicherstellt, dass durch den geringen gegenseitigen Abstand dieser Erdungsanlagen keine gefährlichen Berührungsspannungen auftreten“.
- Die Hochspannungsanlage gehört zu einem Netz mit isoliertem Sternpunkt oder mit Erdschlusskompensation und die Erdungsspannung beträgt im Fehlerfall nicht mehr als 75 V. (Diese Bedingung kann als gegeben unterstellt werden, wenn die Erdungsanlage für die Hochspannungs-Schutzterdung und für die Niederspannungs-Betriebserdung zusammengeschlossen sind und im Niederspannungsnetz die Schutzmaßnahme Nullung zugelassen ist.)
- Die Hochspannungsstation gehört zu einem Netz mit niederohmiger Sternpunktterdung und die Erdungsspannung beträgt nicht mehr als 1 000 V.

Ist keine dieser Voraussetzungen erfüllt, sind Maßnahmen nach 9.6 zu treffen.

5.3.3 Einführungen

Bei Einführungen von Rohrleitungen in Hochspannungsstationen sind keine Maßnahmen erforderlich, wenn eine der folgenden Voraussetzungen gegeben ist:

- Die Hochspannungsstation gehört zu einem Netz mit isoliertem Sternpunkt oder mit Erdschlusskompensation und die Erdungsspannung beträgt im Fehlerfall nicht mehr als 75 V.
- Die Hochspannungsstation gehört zu einem Netz mit niederohmiger Sternpunktterdung und die Erdungsspannung überschreitet nicht die Werte der zulässigen Berührungsspannung nach DIN EN 61936-1 (VDE 0101-1), DIN EN 50522 (VDE 0101-2).

Ist keine dieser Voraussetzungen erfüllt, sind Maßnahmen nach 9.6 zu treffen.

5.3.4 Rohrleitungen innerhalb von Werksanlagen

Wenn Hochspannungsanlagen und Rohrleitungen innerhalb einer geschlossenen Werksanlage liegen, sind Maßnahmen, die über DIN EN 50522 (VDE 0101-2) hinausgehen, nicht erforderlich. Bei Anwendung des lokalen kathodischen Korrosionsschutzes ist die DIN EN 14505 zu beachten.

5.3.5 Rohrleitungen mit kathodischem Korrosionsschutz

Ist eine Rohrleitung wegen des kathodischen Korrosionsschutzes von der Erdungsanlage elektrisch getrennt, ist im Erdreich ein lichter Abstand von mindestens 0,2 m zwischen Rohrleitung und Erdern und damit verbundenen metallenen Leitern einzuhalten. Bei Abständen unter 0,2 m ist eine gegenseitige Berührung durch geeignete Isolierung auszuschließen, z. B. durch Zwischenlegen von Schalen bzw. Platten aus elektrisch isolierendem Werkstoff oder durch eine elektrisch isolierende Umhüllung des Erders im Bereich der Kreuzungsstellen.

5.4 Rohrleitungsstationen

Druckerhöhungsstationen (Pump-, Kompressorstationen) sowie Schieber-Druckreduzierer- und Verteilerstationen (Abzweig-, Übergabestationen) sind Bestandteile von Rohrleitungsanlagen. Sie werden auch als Freiluftanlagen mit einer Zugangsbegrenzung (Zaun) errichtet. Es ist zulässig, dass der Zaun einer solchen Station unmittelbar an die Schutzstreifengrenze der Hochspannungsfreileitung anschließt. Liegt die Station im Schutzstreifen der Hochspannungsfreileitung, sind Vereinbarungen zwischen den Betreibern zu treffen.

Enthalten Rohrleitungsstationen Ausblaseeinrichtungen oder Anlagenteile, aus denen unter Betriebsbedingungen brennbare Gase oder Flüssigkeiten in solchen Mengen austreten können, dass ein Zünden durch die Hochspannungsfreileitung möglich ist oder eine Gefährdung der Hochspannungsfreileitung bei anderweitiger Zündung des Stoffes eintreten kann, sind die Mindestabstände zwischen Ausblaseöffnungen und benachbarten Leiterseilen oder anderen unter Spannung stehende Anlagenteilen gemäß 5.5, einzuhalten. Gegebenenfalls können Ausblaseeinrichtungen mittels Verbindungsrohrleitungen in entsprechenden Abständen angeordnet werden.

5.5 Oberirdisch zugängliche Armaturen

5.5.1 Allgemeines

Bei austretenden Gasmengen, bei denen (volumen- und gemischbedingt) keine Zündung durch eine im Nahbereich befindliche Hochspannungsfreileitung zu erwarten ist, können die beteiligten Unternehmen Vereinbarungen über geringere – als die im Folgenden beschriebenen – Mindestabstände treffen. Gleiches gilt im Bereich von Hochspannungsfreileitungen, bei denen auf Grund der Spannungsebene oder des Aufbaus keine Zündung des Gas-Luft-Gemisches zu erwarten ist.

Servicefahrzeuge zur Entleerung von Wassertöpfen und Kondensatsammlern sind entsprechend der im Entleerungsvorgang zu erwartenden Gasfreisetzungsmenge zu bewerten.

5.5.2 Entleerungsstutzen

Entleerungsstutzen von Rohrleitungen mit brennbaren Flüssigkeiten müssen mindestens 30 m von der vertikalen Projektion des äußeren Leiterseiles einer Hochspannungsfreileitung mit einer Nennspannung von $U_N \geq 110$ kV und darüber entfernt sein. Bei Hochspannungsfreileitungen mit einer Nennspannung unter 110 kV reichen 10 m Abstand aus. Gegebenenfalls können sich verfahrens- oder produktbedingt andere Mindestabstände ergeben, deren Erkennung und Ermittlung im Verantwortungsbereich des Anlagenbetreibers liegt. Unterschreitungen der in 5.5.2 genannten Mindestabstände bedürfen einer Vereinbarung zwischen den Beteiligten.

5.5.3 Einrichtungen ohne relevanten Gasaustritt im Betriebsfall

Oberirdisch zugängliche Armaturen von Rohrleitungen für brennbare Gase, z. B. Schieber, Wassertöpfe, Hydranten, sollten möglichst einen Abstand von mehr als

- 20 m von der Außenkante von Masten bei Hochspannungsfreileitungen mit Nennspannungen von $U_N \geq 110$ kV und niederohmiger Sternpunktterdung sowie von mehr als
- 10 m bei Hochspannungsfreileitungen mit Nennspannungen von $U_N = 110$ kV und Erdschlusskompensation sowie
- 5 m bei Hochspannungsfreileitungen mit Nennspannungen von $U_N < 110$ kV (einschließlich Fahr- und Speiseleitungen) haben.

Bei Unterschreitung dieser Mindestabstände sind gesonderte Vereinbarungen zwischen den Beteiligten zu treffen.

5.5.4 Einrichtungen mit temporär relevanten Gasaustritt

Ausbläser zum Entspannen von Erdgasleitungen stellen Einrichtungen mit der Möglichkeit eines definiert eingeleiteten, relevanten Gasaustritts dar. Dabei können diese Ausbläser sowohl in Stationsbereichen als auch entlang des Trassenverlaufs einer Gastransportleitung platziert sein.

Im Rahmen des Ausblasevorgangs entsteht oberhalb des Ausbläserters ein zündfähiges Gas-Luft-Gemisch, dessen Ausdehnung u. a. von der Gasaustrittsgeschwindigkeit, der Windgeschwindigkeit und -richtung sowie weiteren anlagenspezifischen und topografischen Gegebenheiten abhängt.

Es ist davon auszugehen, dass die Möglichkeit des Zündens eines Gas-Luft-Gemischs durch den Betrieb einer im Nahbereich befindlichen

- Bahnstrecke mit Sicherheit anzunehmen ist und an einer
- oberirdischen Hochspannungsanlage nicht ausgeschlossen werden kann.

Aufgrund des Gefährdungspotenzials sowohl für das Rohrleitungs-Betriebspersonal als auch (durch die thermische Einwirkung) für die oberirdische Hochspannungsanlage ist dieser Zündvorgang unbedingt zu vermeiden.

Bedingt durch die Vielzahl der beeinflussenden Parameter ist es nicht möglich, einen (für Ausblaseeinrichtungen an Rohrleitungen für brennbare Gase) generell gültigen Mindestabstand zu nennen. Es ist vielmehr notwendig, bei Ausbläsern im Einflussbereich von Hochspannungsanlagen anhand von Strömungsberechnungen – welche entsprechend DVGW G 442 (M) (u. a. unter Berücksichtigung der relevanten technischen, topografischen und meteorologischen Parameter) durchgeführt werden können – die erforderlichen horizontalen und vertikalen Mindestabstände zu ermitteln, welche eine gefahrlose Durchführung des Entspannungsvorgangs gewährleisten.

Zur Sicherheit sowohl der Bediener der gastechnischen Anlage als auch der Hochspannungsanlage ist es für bestehende Näherungen – welche entsprechend den in DVGW G 442 (M) ermittelten Mindestabstand unterschreiten – erforderlich, die notwendigen Maßnahmen an der gastechnischen Anlage und/oder der Hochspannungsanlage zu definieren und umzusetzen. Hinweise zu einigen der möglichen Maßnahmen sind ebenfalls DVGW G 442 (M) zu entnehmen.

Bei zukünftigen, geplanten Annäherungen zwischen Ausblaseeinrichtungen mit relevantem Gasaustritt und Hochspannungsanlagen sollte – auch unter Berücksichtigung der ggf. kurzfristig auftretenden Notwendigkeit einer Schnellentspannung der gastechnischen Anlage – ein als ausreichend ermittelter horizontaler bzw. vertikaler Sicherheitsabstand bevorzugt vor anderen konstruktiven Maßnahmen umgesetzt werden.

5.6 Kathodische Korrosionsschutzanlagen

Kathodische Korrosionsschutzanlagen sind möglichst außerhalb des Beeinflussungsbereiches von Hochspannungsfreileitungen (einschließlich Fahr- und Speiseleitungen) zu errichten. Ist das nicht möglich, müssen die Schutzstromgeräte entsprechend 9.2.5 ausgerüstet sein.

Bei Langzeitbeeinflussung sollten Schutzstromgeräte nicht im Bereich mit hohem Rohrleitungspotential angeordnet werden, bei Parallelführungen z. B. also nicht an den Enden der Näherung.

Fremdstromschutzanoden müssen bei Freileitungsmasten mit Erdseil mindestens 30 m vom Mastfundament und dessen Erdern entfernt sein. Bezüglich der Gleichstrombeeinflussung ist DIN EN 50162 (VDE 0150) zu beachten.

Bei kathodischen Korrosionsschutzanlagen, die allein zum Schutz von Rohrleitungen innerhalb eines Werksgeländes dienen, sind auch die Anoden innerhalb des Werksgeländes anzuordnen.

6 Grenzwerte des Rohrleitungspotentials und der Berührungsspannung

6.1 Allgemeines

Die Grenzwerte für Rohrleitungspotentiale und Berührungsspannungen sowie gegebenenfalls erforderliche Schutzmaßnahmen können der Tabelle 3 entnommen werden. Als höchstmögliche Berührungsspannung ist das Rohrleitungspotential einzusetzen – mit Ausnahme in Bereichen, in denen Isolierung des Standortes oder Potentialsteuerung angewendet wird.

Tabelle 3 – Grenzwerte für das Rohrleitungspotential bei 16,7 Hz und 50 Hz [1] und Maßnahmen zum Schutz gegen den Abgriff von unzulässigen Berührungsspannungen

Zeile	Grenzwerte für das Rohrleitungspotential	Art der Beeinflussung	Maßnahmen zum Schutz gegen unzulässige Berührungsspannungen
1	$U_R \leq 60 \text{ V}$	Langzeit	Keine
2	$U_R > 60 \text{ V}$	Langzeit	Anschluss von Erdern nach 9.2.2 zur Herabsetzung des Rohrleitungspotentials unter 60 V bzw. Potentialsteuerung nach 9.6 zur Verminderung der Berührungsspannung unter 60 V
3	$U_R \leq 1\,000 \text{ V}$	Kurzzeit	Keine
4	$U_R > 1\,000 \text{ V}$ und $U_R \leq 2\,000 \text{ V}^*$	Kurzzeit	Maßnahmen nach 9.4.4, 9.3, 9.4, 10.2 und 10.3 oder Anschluss von Erdern nach 9.2.2 zur Herabsetzung des Rohrleitungspotentials unter 1 000 V oder Potentialsteuerung bzw. Isolierung des Standortes nach 9.6 zur Verminderung der Berührungsspannung unter 1 000 V
5	$U_R > 2\,000 \text{ V}^*$	Kurzzeit	Anschluss von Erdern nach 9.2.2 zur Herabsetzung des Rohrleitungspotential unter 2 000 V <u>und</u> Maßnahmen nach 9.4.4, 9.4, 10.2 und 10.3 oder Anschluss von Erdern nach 7.2.2 zur Herabsetzung des Rohrleitungspotentials unter 1 000 V

* Je nach Zustand der Umhüllung kann bei bitumenummüllten Rohrleitungen eine natürliche Begrenzung des Rohrleitungspotentials bei 1 500 V eintreten, so dass – nach Einzelfallprüfung – in diesem Fall bei Kurzzeitbeeinflussung (unter Beachtung der Auflagen entsprechend der Tabelle 3, Zeile 4) auf den Anschluss von Erdern verzichtet werden kann (siehe Abschnitt 9).

6.2 Spannungsgrenzwert für Teilkompensation

Auslöser für den Einsatz von Teilkompensationsanlagen an hochspannungsbeeinflussten Rohrleitungen ist in der Regel das Ziel, einer Wechselstromkorrosionsgefährdung durch die Unterdrückung der anodischen Halbwelle der induzierten Dauerbeeinflussungsspannung entgegenzuwirken.

Der Betrieb dieser Anlagen führt zu einer Spannung auf der Rohrleitung, die als pulsierende Gleichspannung zu beschreiben ist. Entsprechend aktuellen Erkenntnissen der Elektropathologie besteht aufgrund der periodischen Änderung des Momentanwertes der abzugreifenden Berührungsspannung zwischen der Rohrleitung und Erde analog zum Abgriff einer Wechselspannung die Gefahr des Herzkammerflimmerns. Die Gefährdung ist bei den technischen Wechselspannungen eher amplitudenbezogen und weitgehend frequenzunabhängig. In Anlehnung an die DIN IEC/TS 60479-1 (VDE V 0140-479-1) ist festzustellen, dass aus Berührungsschutzgründen der Scheitelwert der pulsierenden Gleichspannung auf einen Maximalwert entsprechend $\sqrt{2 \times 60 \text{ V}}$ beschränkt werden muss.

7 Prüfung der Beeinflussungsmöglichkeiten

7.1 Allgemeines

Eine Prüfung der induktiven Beeinflussungsmöglichkeit auf unzulässig hohe Berührungsspannungen an erdverlegten Rohrleitungen ist bei Hochspannungsanlagen ab einer Nennspannung von 110 kV sowie bei Fahr- und Speiseleitungen von Bahnen erforderlich. Das gleichzeitige Auftreten von zwei oder mehreren voneinander unabhängigen Fehlern sowie Erdschlüsse und Doppelerdschlüsse in Netzen mit Erdschlusskompensation werden nicht berücksichtigt (DIN EN 61936-1 (VDE 0101-1), DIN EN 50522 (VDE 0101-2), DIN VDE 0845-6), Grenzabstände sind hinsichtlich ohmscher Beeinflussung auch in Hochspannungsnetzen mit Nennspannungen unter 110 kV zu beachten.

Bei Hochspannungskabeln sind die Leiter verdreht, gebündelt oder mit geringem gegenseitigem Abstand nebeneinander verlegt. Die geerdeten metallenen Kabelmäntel ergeben bei diesen Kabeln einen günstigen Reduktionsfaktor. Da Kabel in erster Linie in bebauten Gebieten eingesetzt werden, kommt ggf. noch eine reduzierende Wirkung durch andere benachbarte Leitungen hinzu. Durch den Betriebsstrom von Hochspannungskabeln ist nicht mit einer unzulässigen induktiven Beeinflussung der benachbarten Rohrleitung zu rechnen.

Ohmsche Beeinflussung infolge des Schienenpotentials von Wechselstrombahnen bleibt außer Betracht, weil die zulässigen Grenzen der Berührungsspannung nicht überschritten werden.

Die kapazitive Beeinflussung ist praktisch nur in der Bauphase von Rohrleitungen relevant und wird daher separat in 10.3 behandelt.

Die folgenden Auswahlkriterien geben einen Überblick, unter welchen Bedingungen keine unzulässig hohen Berührungsspannungen an Rohrleitungen zu erwarten sind und in welchen Fällen eine besondere Prüfung des Beeinflussungsfalles erforderlich ist.

Weiter setzen die aufgeführten Kriterien voraus, dass nur ein beeinflusster Abschnitt vorliegt bzw. der Abstand zwischen zwei Beeinflussungsabschnitten größer als die doppelte Kennlänge der Rohrleitung ist. Bei Parallelführungsabschnitten, die in einem engeren Abstand als der doppelten Kennlänge L_K aufeinander folgen sowie im Falle von Näherungen zu Freileitungs-Trassenbündeln ist die Überlagerung der einzelnen Einflüsse zu berücksichtigen. Dies gilt auch für die Verwendung des Bildes 1.

Zunächst wird anhand der Grenzwertdiagramme für induktive Beeinflussung nach 7.3 geprüft, ob die Länge der Näherung unter der Grenzlänge liegt oder ob bei Kreuzungen der Grenzwinkel eingehalten ist. Ist dies der Fall, sind keine Maßnahmen gegen Beeinflussung erforderlich. Analog ist bei der Prüfung der ohmschen Beeinflussung zu verfahren, siehe Abschnitt 8.

Die benötigten Unterlagen sind in den Tabellen 4 und 5 zusammengestellt.

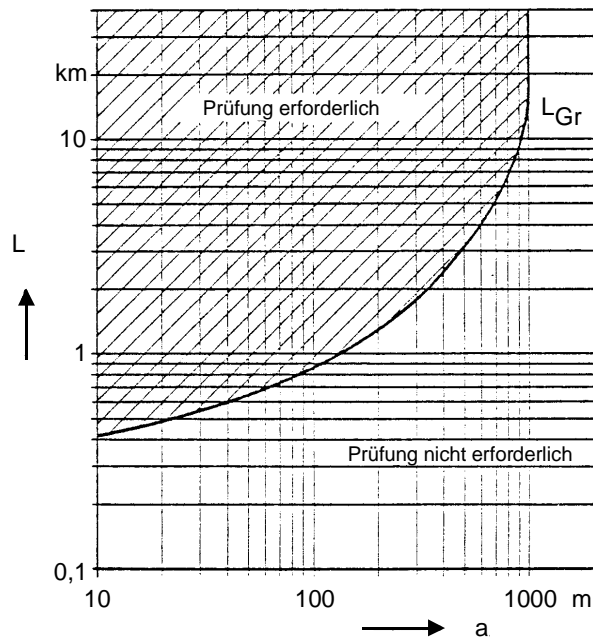


Bild 1 – Grenzlänge L_{Gr} bzw. Abstand a einer Rohrleitung bei Parallelführung mit 50-Hz-Hochspannungs-Drehstromfreileitungen und 16,7-Hz-Hochspannungsbahnstromleitungen

Tabelle 4 – Erforderliche Angaben für die Prüfung auf Beeinflussung durch 50-Hz-Drehstromanlagen

Zeile	Für Prüfung	Erforderliche Angaben
1	nach 7.1.1	Pläne über die Trassenführung der Hochspannungsfreileitungen und der Rohrleitung mit Angabe der Standorte von Kraftwerken, Schalt- und Umspannanlagen, Freileitungsmasten und Rohrleitungsstationen
2	mit Anwendung der Grenzwertdiagramme nach 7.2 (induktive Beeinflussung)	Zusätzlich zur Zeile 1: Nennspannung und Betriebsweise des Hochspannungsnetzes (Sternpunktbehandlung), Kenngröße der Hochspannungsfreileitung K_L (siehe 7.3.2), Erdkurzschlussstrom I_K , größter zu berücksichtigender Betriebsstrom I_B (siehe 12.1.5), spezifischer Umhüllungswiderstand der Rohrleitung r_u Beachtung von 12.3 (Rohrleitungsresonanz)
3	mit Anwendung der Grenzwerte nach Abschnitt 8 (ohmsche Beeinflussung)	Zusätzlich zur Zeile 1: Nennspannung und Betriebsweise des Hochspannungsnetzes (Sternpunktbehandlung)
4	nach 12.1 (induktive Beeinflussung)	Zusätzlich zu den Zeilen 1 und 2: Mastform, Leiterseilbelegung, Reduktionsfaktor der Hochspannungsfreileitung r_E und ggf. anderer reduzierender Leiter r , Durchmesser der Rohrleitung D
5	nach 12.2 (ohmsche Beeinflussung)	Zusätzlich zu den Zeilen 1 und 3: Erdungsspannung und ggf. Potentialverlauf an der Erdoberfläche im Bereich
6	nach 12.4	Wert des spezifischen Umhüllungswiderstandes r_u

Tabelle 5 – Erforderliche Angaben für die Prüfung auf Beeinflussung durch 16,7-Hz-Wechselstrom-Bahnanlagen

Zeile	Für Prüfung	Erforderliche Angaben
1	nach 7.1.2	Pläne über die Trassenführung der Bahnstromleitung, der Fahr- und Speiseleitung und der Rohrleitung mit Angabe der Standorte von Bahnkraft-, Umformer-, Umrichter- und Unterwerken, Schaltposten, Kuppelstellen, Masten und Rohrleitungsstationen; Kurzschlussstrom I_K und Fahrstrom I_F des jeweiligen Streckenspeiseabschnittes
2	mit Anwendung der Grenzwertdiagramme nach 7.3 (induktive Beeinflussung)	Zusätzlich zur Zeile 1: spezifischer Umhüllungswiderstand der Rohrleitung r_u , Reduktionsfaktor der Schienen r_S und ggf. anderer reduzierender Leiter r Beachtung von 12.3 (Rohrleitungsresonanz)
3	mit Anwendung der Grenzwerte nach Abschnitt 8 (ohmsche Beeinflussung)	Hinweis: 110-kV-Bahnstromnetze der DB Energie sind aufgrund des Betriebes mit Erdschlusskompensation nur in Einzelfällen relevant
4	nach 12.1 (induktive Beeinflussung)	Zusätzlich zu den Zeilen 1 und 2: Durchmesser der Rohrleitung D
5	nach 12.2 (ohmsche Beeinflussung)	Zusätzlich zur Zeile 1: Erdungsspannung und ggf. Potentialverlauf an der Erdoberfläche im Bereich der Erdungsanlagen (ausgenommen Fahrschienen)

7.2 Keine Beeinflussung zu erwarten

7.2.1 Allgemeines

In nachstehend genannten Fällen sind an erdverlegten Rohrleitungen keine unzulässigen Berührungsspannungen zu erwarten, so dass gezielte Untersuchungen entfallen können. Für die Prüfung reichen Unterlagen nach Zeile 1 der Tabellen 4 und 5 aus.

7.2.2 50-Hz-Hochspannungs-Drehstromanlagen

a) Näherungen mit Hochspannungs-Drehstromfreileitungen

- bei Abständen größer als 1000 m ohne Längenbegrenzung
- in Abhängigkeit vom Abstand a nach Bild 1, wenn die Näherungslänge kleiner als die Grenzlänge L_G ist

b) Näherungen mit Hochspannungs-Drehstromkabeln

- bei lichten Abständen von 0,4 m und Parallelführungslängen von kleiner 2 km, wenn der Erdkurzschlussstrom weniger als 5 kA beträgt

c) Kreuzungen mit Hochspannungs-Drehstromfreileitungen im Winkel größer als 55° (siehe Bild 6). Abstände siehe 7.2.2 d)

d) Näherungen zu Hochspannungsstationen und Masten bei Abständen größer

- 300 m zu Umgrenzungen von Kraftwerken, Schalt- und Umspannanlagen

- 20 m bei Höchstspannungsfreileitungen mit starrer Sternpunktterdung und einer Nennspannung von gleich oder mehr als $U_N = 110 \text{ kV}$ (sofern sichergestellt ist, dass die Umhüllung der Rohrleitung in einem 20 m-Bereich um den Mast eine Durchschlagfestigkeit von mindestens 5 kV besitzt, kann der zulässige Abstand auf $a = 10 \text{ m}$ verringert werden)
- 10 m bei Hochspannungsfreileitungen von $U_N = 110 \text{ kV}$ und Erdschlusskompensation

a) Rohrleitungsresonanzen sind nicht zu erwarten für Werte des spezifischen Umhüllungswiderstandes $r_u < 0,5 \text{ M}\Omega \text{ m}^2$ (siehe 12.3)

7.2.3 16,7-Hz-Wechselstrom-Bahnanlagen

a) Näherungen mit 110-kV-Bahnstromleitungen ohne Abstands- und Längenbegrenzung, jedoch unter Beachtung nach 5.2.2 und 7.2.3 c)

b) In Abhängigkeit vom Abstand a nach Bild 1, wenn die Näherungslänge kleiner ist als die Grenzlänge L_{Gr}

c) Näherungen zu Hochspannungsstationen und Masten bei Abständen größer

- 50 m bei Umgrenzungen von Bahnkraft-, Umformer-, Umrichter- und Unterwerken
- 10 m bei Freileitungsmasten (Mastfundamenten bzw. Masteckstielen) von 110-kV-Bahnstromleitungen
- 3 m bei Fahrleitungs- und Speiseleitungsmasten (Mastfundamenten bzw. Masteckstielen)

7.3 Grenzlängen und Grenzwinkel bei induktiver Beeinflussung

7.3.1 Allgemeines

Die folgenden Diagramme gelten nur bei Parallelführungen mit etwa gleich bleibendem Abstand zwischen Hochspannungsfreileitung und Rohrleitung oder bei Kreuzungen unter einem bestimmten Winkel. Andere schräge Näherungen können für eine grobe Abschätzung der Verhältnisse ersatzweise in eine dieser beiden Näherungsformeln überführt werden. Gegebenenfalls ist eine Berechnung nach 12.1 durchzuführen.

7.3.2 Grenzlängen bei Parallelführungen mit Hochspannungs-Drehstromfreileitungen

Der mögliche Erdkurzschlussstrom hängt von der Kurzschlussleistung der Hochspannungsstation, der Freileitungs-Ausführung und dem Fehlerort ab. Bei einem Fehler in unmittelbarer Nähe der Station ($x = 0$) fließt der größte Erdkurzschlussstrom I_{KO} , mit größerem Abstand x_K wird er kleiner und erreicht bei $x_K = L_K$ schließlich einen Wert I_{KL} .

Für ein System, bestehend aus Hochspannungsstation und Freileitung, kann eine Kenngröße K_L definiert werden:

$$K_L = \frac{\left(\frac{I_{KO}}{I_{KL}}\right) - 1}{L} \quad (1)$$

wobei der Wert I_{KO} für $x = 0$ und der Wert I_{KL} für einen beliebigen Abstand $x = L$ aus dem Erdkurzschlussdiagramm z. B. in einer Darstellung nach Bild 2 oder 2-7 der TE 1 der SfB entnommen werden kann, siehe auch [10].

Mit den Bezeichnungen nach 12.1.2 bzw. 12.1.4.2 und der Beziehung

$$M \leq |U_{R \max}| \times \frac{|\gamma|}{\pi f w r} \times \frac{1 + I_{KL}}{I_{K0}} \times \frac{1}{\left|1 - e^{-\gamma L}\right|} \quad (2)$$

sind für $|U_{R \max}| = 1\,000\text{ V}$ die Diagramme der Bilder 2 und 3 errechnet worden, aus denen die Grenzlänge der Parallelführung L_{Gr} in Abhängigkeit vom Abstand a zwischen Drehstromfreileitung und Rohrleitung und der Kenngröße K_L entnommen werden kann. Die Werte gelten für eine Rohrleitung DN 500 mit einer elektrisch isolierenden Umhüllung $r_u = 100\text{ k}\Omega\text{m}^2$. Sie können näherungsweise auch für Rohrleitungen mit anderen Durchmessern verwendet werden. Bei kleineren Werten für r_u ergeben sich entsprechend größere Werte für L_{Gr} .

Bild 2 ist berechnet für $I_{K0} = 10\text{ kA}$ mit $w = 0,7$ und kann zu einer Abschätzung bei sehr langen Parallelführungen mit 110-kV-Freileitungen dienen. Das Bild 3 ist für $I_{K0} = 40\text{ kA}$ und mit $w = 0,7$ berechnet worden; es gilt für Parallelführungen mit 220-kV- und 380-kV-Freileitungen.

Das Bild 4 kann zu einer groben Abschätzung der Grenzlänge einer Parallelführung bei Beeinflussung durch Betriebsströme dienen. Im Allgemeinen liegen die spezifischen Umhüllungswiderstände wesentlich über $10\text{ k}\Omega\text{m}^2$, so dass die zu erwartenden Werte für L_{Gr} zwischen beiden Kurvenscharen liegen.

Wenn Parallelführungen eine Länge haben, die nach den Bildern 2 bis 4 die Grenzlängen überschreiten, kann eine weitere, genauere Abschätzung mittels Bild 5 erfolgen.

Der mathematische Zusammenhang ergibt sich aus den Gleichungen (7) und (17) in 12.1. Das Diagramm wurde für eine Rohrleitung DN 500 errechnet und gilt sowohl für Beeinflussungen durch Erdkurzschlussströme als auch durch Betriebsströme in Drehstromleitungen.

Für einen gegebenen Abstand a zwischen Rohrleitung und Freileitungsachse kann die Längsfeldstärke in einem ideal isolierten Leiter bei einer Beeinflussung durch den Erdkurzschlussstrom $|E_K|$ zu $|I_K|$ und bei einer Beeinflussung durch den Betriebsstrom $|E_B|$ zu $|I_B|$ z. B. nach Bild 18 abgeschätzt werden. Eine genauere Ermittlung der Werte ist möglich für

$|E_K|$ zu $|I_K|$ nach der TE 1 der SfB, auch für andere wirksame spezifische Erdwiderstände und andere Reduktionsfaktoren

$|E_B|$ zu $|I_B|$ für verschiedene Mastformen und Leiteranordnungen nach den Bildern 19 und 20 oder aufgrund einer Berechnung [5] oder durch Messung der induzierten Spannung in einem parallel zur Hochspannungsfreileitungen im Abstand a ausgelegten isolierten Leiter nach 12.3.3

Mit Hilfe des Erdkurzschlussstromes $|I_K|$ sowie des größtmöglichen Betriebsstromes $|I_B|$ nach 12.1.5 können die im ideal isolierten Leiter induzierten Feldstärken $|E_K|$ und $|E_B|$ errechnet werden. Der Zahlenwert für die Ordinate ergibt sich dann für eine Beeinflussung durch den Erdkurzschlussstrom $2 \times |U_{R \max}|$ zu $|E_K|$ mit $|U_{R \max}| = 2\,000\text{ V}$ bzw. $1\,000\text{ V}$ und

- durch den Betriebsstrom $2 \times |U_{R \max}|$ zu $|E_B|$ mit $|U_{R \max}| = 60\text{ V}$

Die jeweilige Grenzlänge bei Parallelführung kann nunmehr in Abhängigkeit vom spezifischen Umhüllungswiderstand aus Bild 5 entnommen werden. Einen beispielhaften Ablauf zeigt 14.1.

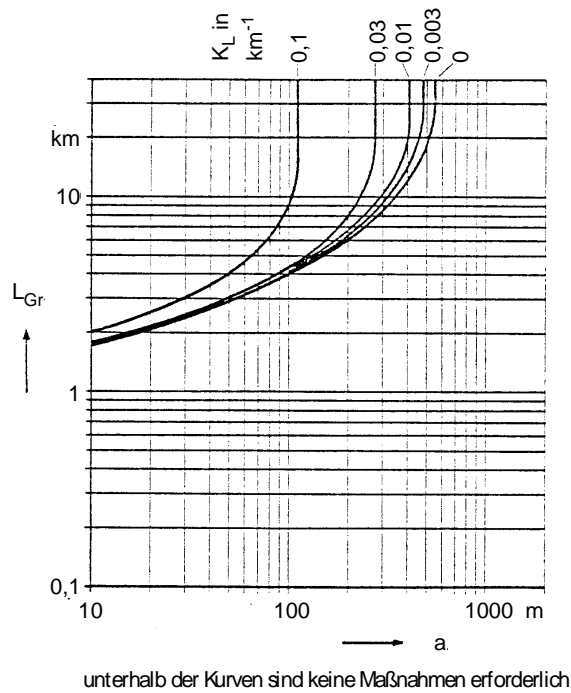


Bild 2 – Grenzlänge L_{Gr} für eine Rohrleitung DN 500 mit $r_u = 100 \text{ k}\Omega\text{m}^2$, $|\gamma| = 0,1 \text{ km}^{-1}$ und $U_{R \text{ max}} = 1\,000 \text{ V}$ bei Parallelführung und Beeinflussung durch Erdkurzschlussströme in 110-kV-Drehstromfreileitungen mit $f = 50 \text{ Hz}$ sowie $I_{K0} = 10 \text{ kA}$, $w = 0,7$, $\rho_E = 50 \text{ }\Omega\text{m}$, $r_E = 0,65$ und K_L als Kenngröße der Freileitung

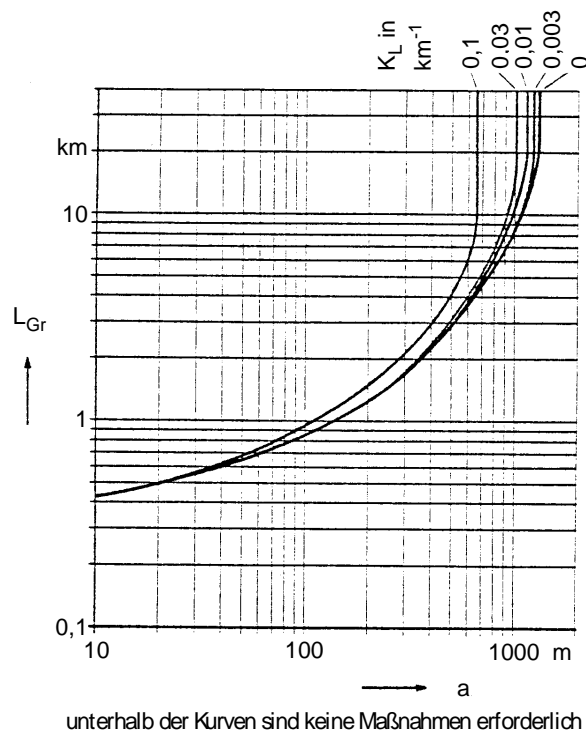


Bild 3 – Grenzlänge L_{Gr} für eine Rohrleitung DN 500 mit $r_u = 100 \text{ k}\Omega\text{m}^2$, $|\gamma| = 0,1 \text{ km}^{-1}$ und $U_{R \text{ max}} = 1\,000 \text{ V}$ bei Parallelführung und Beeinflussung durch Erdkurzschlussströme in 220 kV- und 380 kV-Drehstromfreileitungen mit $f = 50 \text{ Hz}$ sowie $I_{K0} = 40 \text{ kA}$, $w = 0,7$, $\rho_E = 50 \text{ }\Omega\text{m}$, $r_E = 0,65$ und K_L als Kenngröße der Freileitung

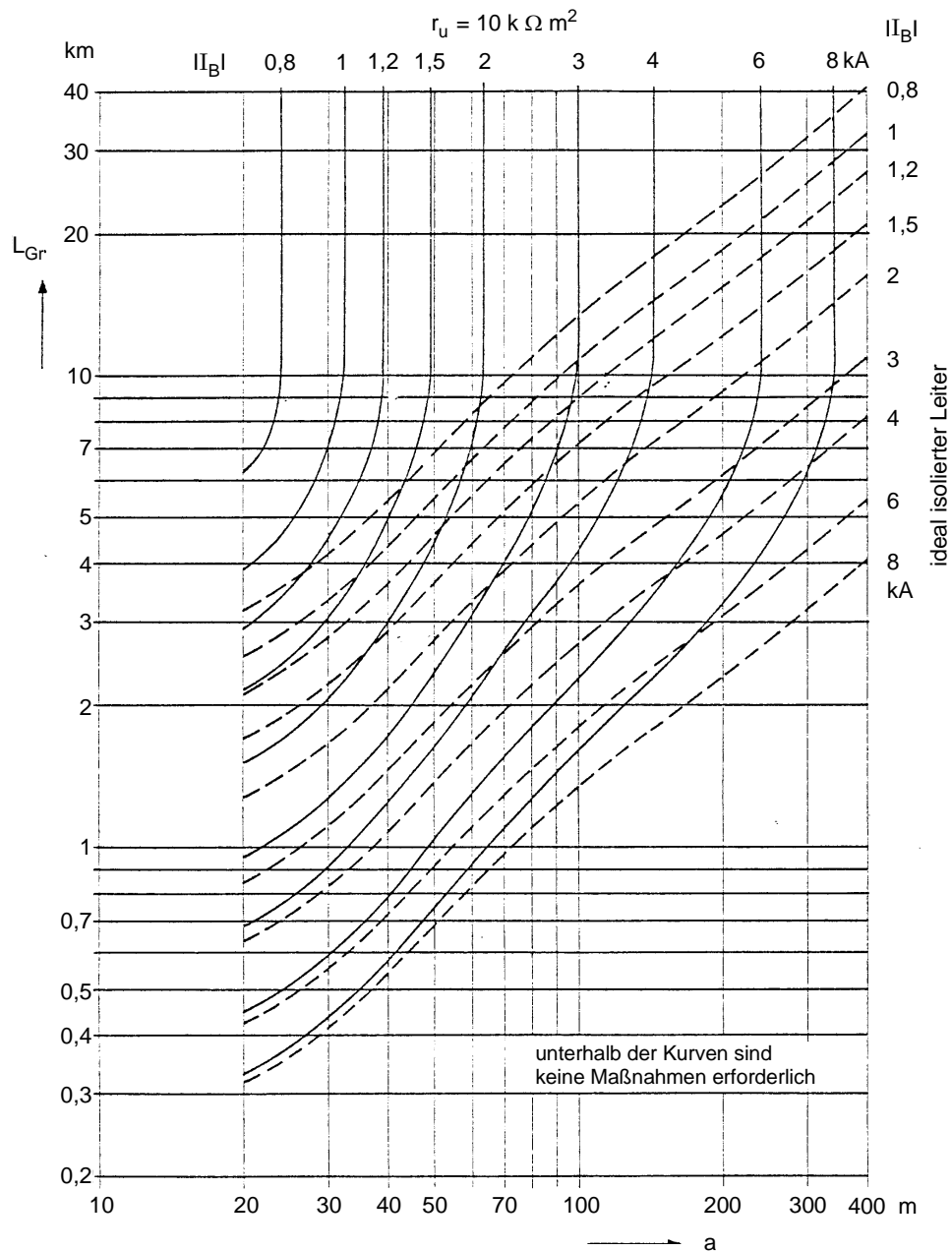


Bild 4 – Grenzlänge L_{Gr} für eine Rohrleitung DN 500 mit $r_u = 10 \text{ k}\Omega \text{ m}^2$ bzw. für einen ideal isolierten Leiter $U_{R \max} = 60 \text{ V}$ bei Parallelführung und Beeinflussung durch Betriebsströme in einer 380 kV-Drehstrom-Doppelleitung mit $f = 50 \text{ Hz}$, Donau-Mastform mit Seilbelegung nach Bild 11.9 a, $\rho_E = 100 \Omega \text{ m}$, $r_E = 0,65$ (Erdseil Al/St 240/40)

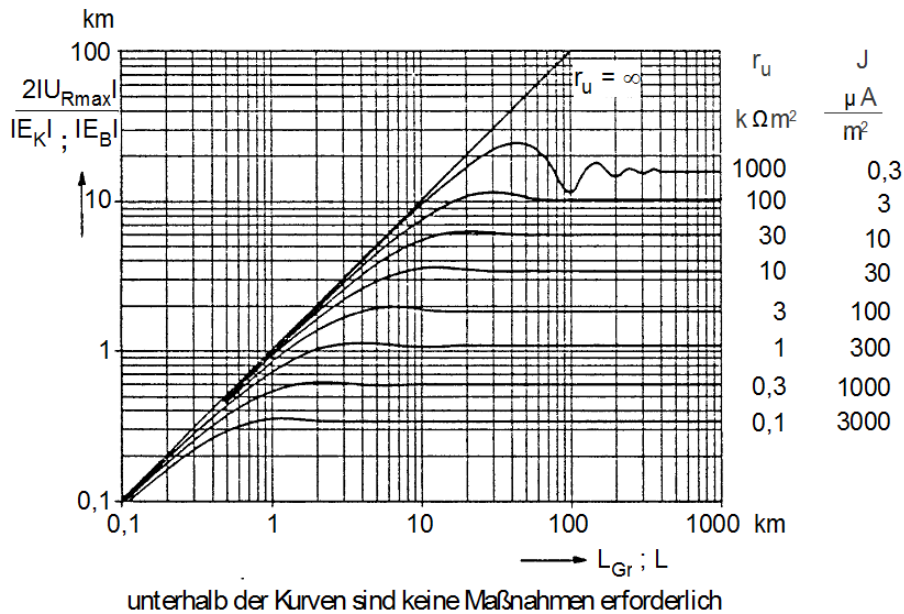


Bild 5 – Parallelführung einer Rohrleitung DN 500 mit Hochspannungs-Drehstromfreileitungen mit Nennspannungen von 110 kV und darüber $f = 50$ Hz, $\rho_E = 100 \Omega m$

7.3.3 Grenzwinkel bei Kreuzungen mit Drehstrom-Hochspannungsfreileitungen

Das Bild 6 wurde durch Umwandlung der schrägen Näherung in entsprechende Parallelführungsabschnitte unter Benutzung des Rechenverfahrens nach 12.1.4 ermittelt. Es gilt für eine 380-kV-Doppelleitung mit einem Erdseil Al/St 240/40 ($r_E = 0,65$), Rohrleitung DN 500, Frequenz $f = 50$ Hz, spezifischer Erdwiderstand $\rho_E = 100 \Omega m$.

Die ausgezogenen Kurven gelten für Beeinflussungen durch Erdkurzschlussströme in Drehstromfreileitungen mit Betriebsspannungen zwischen 100 kV und 380 kV, unabhängig von der Mastform und der Seilbelegung.

Die strichpunktierten Kurven für Beeinflussungen durch Betriebsströme gelten dagegen nur für eine 380-kV-Doppelleitung mit einer Seilbelegung nach Bild 19 a). Da sich nach diesem Bild eine relativ hohe in einem ideal isolierten Leiter induzierte Längsfeldstärke $|E_B|$ zu $|I_B|$ ergibt, kann das Diagramm für eine grobe Abschätzung und Aussonderung von nicht zu berücksichtigenden Fällen auch bei Doppelleitungen mit anderen Betriebsspannungen, Mastformen und Seilbelegungen verwendet werden. Gegebenenfalls ist eine Berechnung nach 13.2 erforderlich.

Bei vorgegebenem Rohrleitungspotential $|U_{Rmax}|$ und Größe der Beeinflussungsströme $|I_K|$ und $|I_B|$ kann der noch zulässige Kreuzungswinkel α in Abhängigkeit vom spezifischen Umhüllungswiderstand ermittelt werden. Bei einem vorliegenden kleineren Kreuzungswinkel ist der erforderliche Wert für den spezifischen Umhüllungswiderstand zu entnehmen. Die in diesem Fall gegebenenfalls erforderlichen zusätzlichen Erder zur Verringerung des spezifischen Umhüllungswiderstandes können entsprechend den Beispielen im Abschnitt 14 bestimmt werden.

Umgekehrt ist bei vorgegebenem Kreuzungswinkel und spezifischem Umhüllungswiderstand das zu erwartende Rohrleitungspotential für verschiedene Beeinflussungsströme bestimmbar.

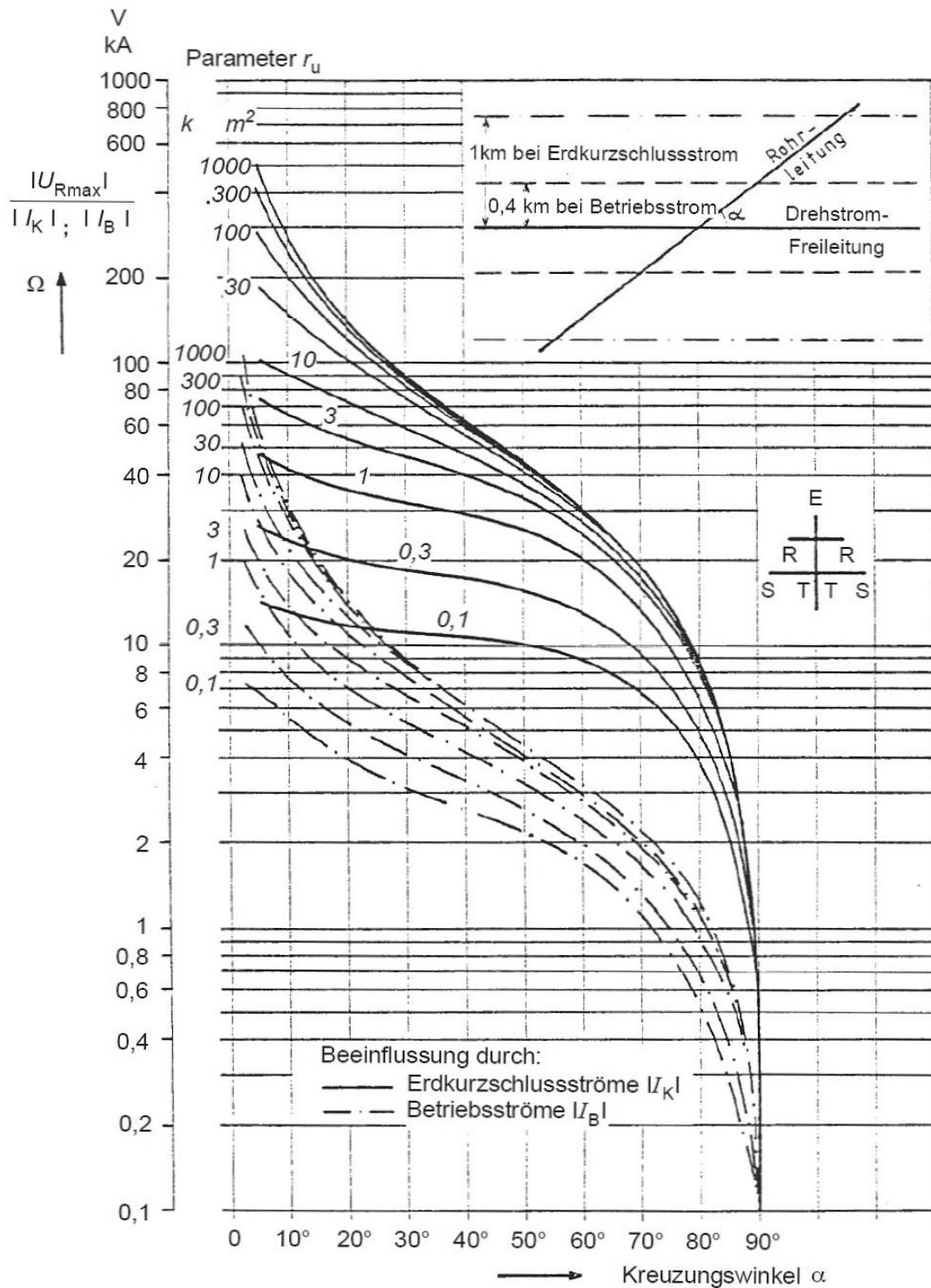
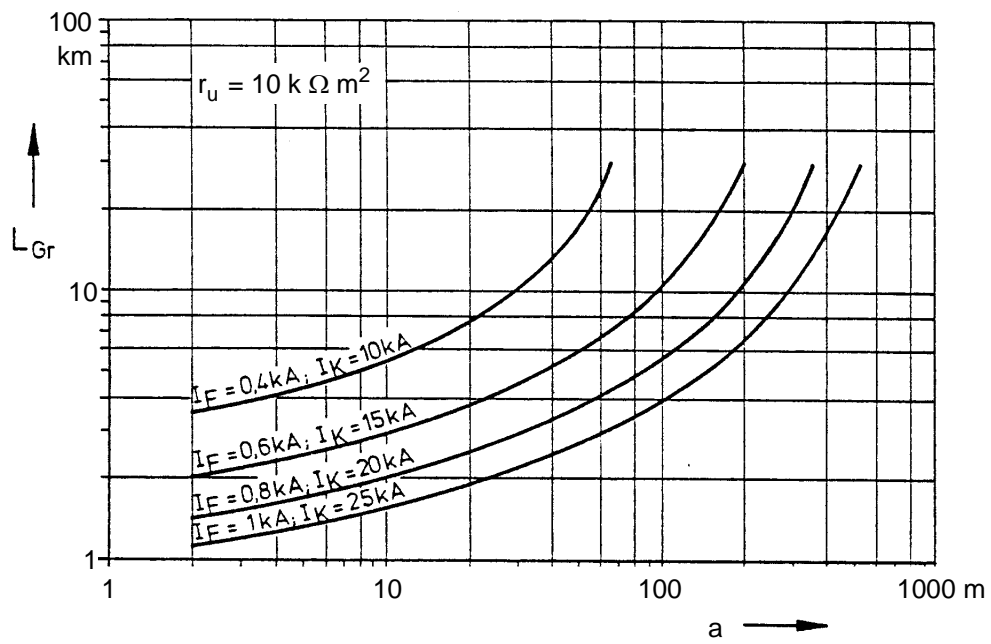
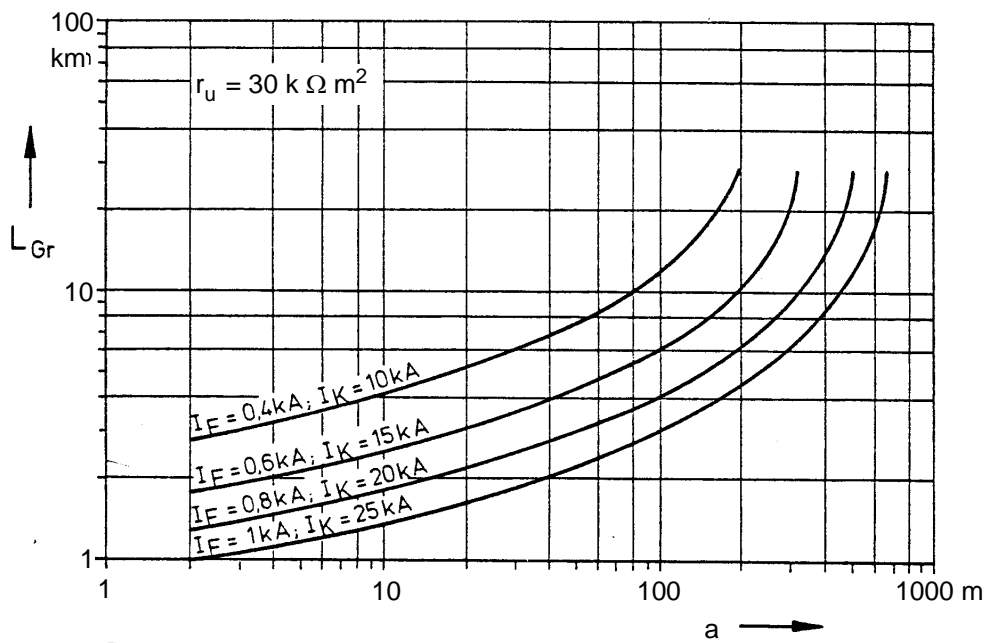


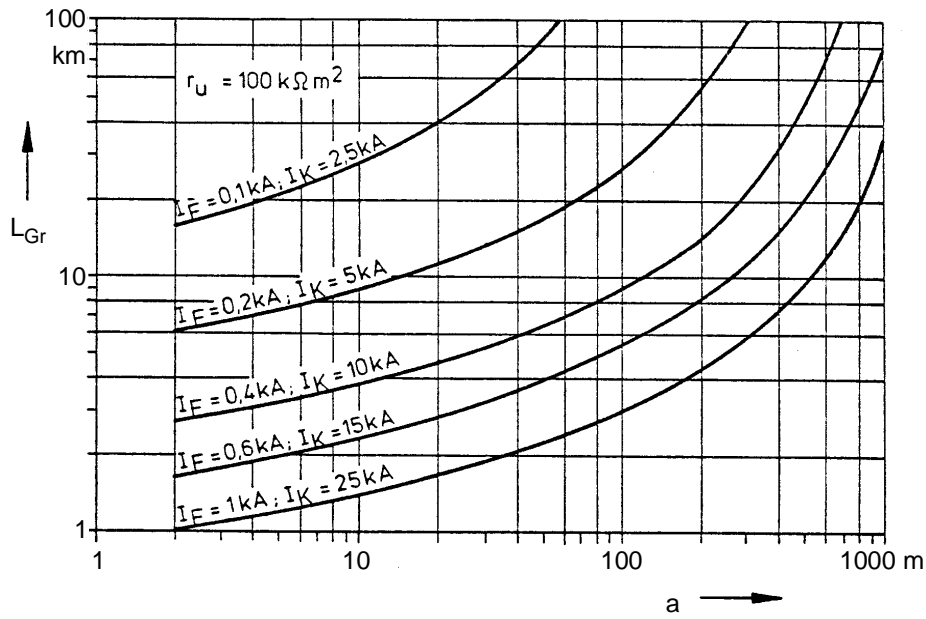
Bild 6 – Rohrleitungspotential einer Rohrleitung DN 500 mit r_u als Parameter bei schräger Näherung und Beeinflussung durch Erdkurzschluss- und Betriebsströme in 380-kV-Drehstrom-Doppelleitungen 50 Hz, Donau-Mastform mit Seilbelegung nach Bild 7 a, $\rho_E = 100 \Omega m$, $r_E = 0,65$



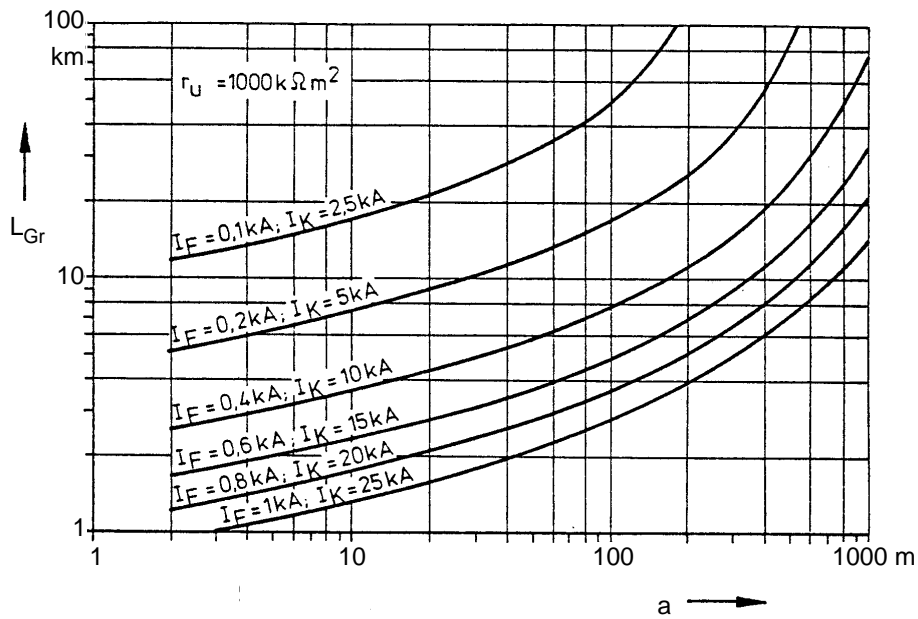
a) für $r_u = 10 \text{ k}\Omega \text{ m}^2$



b) für $r_u = 30 \text{ k}\Omega \text{ m}^2$



c) für $r_u = 100 \text{ k}\Omega \text{ m}^2$



d) für $r_u = 1000 \text{ k}\Omega \text{ m}^2$

Bild 7 – Grenzlängen L_{Gr} bei Parallelführung und Beeinflussung durch Fahrströme I_F und Kurzschlussströme I_K in 15-kV-Fahr- und Speiseleitungen mit $f = 16,7 \text{ Hz}$, für $\rho_E = 30 \Omega \text{ m}$ einer Rohrleitung DN 500 für $|U_{R \max}| = 60 \text{ V}$ bzw. $|U_{R \max}| = 1\,000 \text{ V}$

ANMERKUNG: In diesen Diagrammen ist bei den Kurzschlussströmen der Wahrscheinlichkeitsfaktor $w = 0,7$ bereits eingearbeitet. Der aus den Fahr- und Kurzschlussstromdiagrammen zu entnehmende Strom ist hier daher lediglich mit dem vorhandenen Gesamtreduktionsfaktor zu multiplizieren.

Beispiel: $I_K = 20 \text{ kA}$, $r_S = 0,5$, $r_X = 1,0$, $w = 0,7$

Einzusetzender Wert: $20 \text{ kA} \times 0,5 \times 1,0 = 10 \text{ kA}$

7.4 Beeinflussung durch 16,7-Hz-Fahr- und Speiseleitungen

Induktive Beeinflussungen entstehen vorwiegend bei Näherungen mit Fahr- und Speiseleitungen. Näherungen mit Bahnstromfreileitungen sind hinsichtlich induktiver Beeinflussung unkritisch, da bei diesen Leitungen der Nachweis der Löschfähigkeit im Erdschlussfall erbracht ist und im Normalfall die Betriebsströme keine unzulässige induktive Beeinflussung erwarten lassen.

Bei Parallelführungen mit Fahrleitungen ist mittels des Bildes 7 unter Beachtung 7.2.3 zu prüfen, ob die Rohrleitungslänge kleiner ist als die Grenzlänge und deshalb die zulässigen Rohrleitungspotentiale von 60 V bzw. 1 000 V nicht überschritten werden. Dem Bild liegen u. a. folgende Daten zugrunde: DN 500 und $\rho_E = 30 \Omega\text{m}$. Unter Anwendung dieser Parameter ist keine Grenzwertüberschreitung zu erwarten. Sofern die Näherungslänge – bezogen auf die Fahrleitung – weniger als 3 000 m beträgt und die den Fahrstromdiagrammen zu entnehmenden Fahrströme im Normalbetrieb 400 A bzw. die Kurzschlussströme 10 kA nicht überschreiten, ist – jedoch unter Beachtung von 5.2.2 und 7.2.3 c) – nicht mit Grenzwertüberschreitungen zu rechnen.

Erbringt die o. a. Prüfung für andere Beeinflussungsfälle Ergebnisse oberhalb der Grenzwerte, so kann das Rohrleitungspotential entsprechend den Ausführungen in 12.1.2 bis 12.1.6 unter Berücksichtigung der Frequenz von 16,7 Hz und einem mittleren spezifischen Erdwiderstand von $30 \Omega\text{m}$ errechnet werden. Die Rohrleitungskenngrößen lassen sich den Bildern 15 und 16 entnehmen.

8 Grenzabstände bei ohmscher Beeinflussung

8.1 Allgemeines

Eine gut umhüllte lange Rohrleitung führt im räumlich begrenzten Spannungstrichter eines Kraftwerkes, einer Schalt- oder Umspann- oder eines Freileitungsmastes das Potential der fernen Erde. Zwischen der Rohrleitung und dem umgebenden Erdboden kann als Berührungsspannung die Differenz des Potentials des Erdbodens an dieser Stelle und des Potentials der fernen Erde abgegriffen werden. Die zu erwartende Berührungsspannung kann aus dem Verlauf des Spannungstrichters abgeschätzt werden. Der Verlauf des Erdoberflächenpotentials kann vom zuständigen Hochspannungsnetzbetreiber, bzw. von der Deutschen Bahn AG, erfragt werden.

Der Verlauf des Spannungstrichters ist bei Wechselströmen mit 16,7 Hz und 50 Hz praktisch gleich, ferner ist er bei homogenem Erdreich unabhängig vom spezifischen Erdwiderstand. Inhomogenes Erdreich im Bereich des Spannungstrichters führt zu einer Verzerrung der Potentiallinien, die im Allgemeinen jedoch vernachlässigt werden kann [2].

8.2 Grenzabstände von Erdungsanlagen

Eine Prüfung auf Beeinflussung ist nur erforderlich bei Abständen der Rohrleitungsachse vom äußeren Rand der Erdungsanlage (Umzäunung) unter:

- 300 m in 220-kV- und 380-kV-Netzen
- 100 m in 110-kV-Netzen mit niederohmiger Sternpunktterdung
- 50 m in 110-kV-Netzen mit isoliertem Sternpunkt oder Erdschlusskompensation und in 110-kV-Bahnstromnetzen

- 10 m in Hochspannungsnetzen unter 110 kV

8.3 Grenzabstände von Freileitungsmasten

Folgendes ist zu beachten:

Eine Prüfung auf Beeinflussung ist nur erforderlich bei Abständen der Rohrleitungsachse vom Mastfundament bzw. Masteckstiel unter:

- 20 m zwischen der Rohrleitung und Masterdungen – einschließlich verbundener Potentialsteuerungen – von Hochspannungsfreileitungen mit Nennspannungen von 110 kV und darüber sowie einer niederohmigen Sternpunktterdung
- 10 m bei einer Hochspannungsfreileitung mit Erdschlusskompensation und einer Nennspannung von 110 kV und darüber (einschließlich Bahnstromleitung)
- 5 m bei einer Hochspannungsfreileitung mit einer Nennspannung unter 110 kV (einschließlich 15-kV-Fahr- oder Speiseleitung)

9 Konstruktive Maßnahmen zur Herabsetzung des Rohrleitungspotentials und der Berührungsspannung

9.1 Allgemeines

Der spezifische Umhüllungswiderstand einer erdverlegten, induktiv beeinflussten Rohrleitung bestimmt bei gegebenem Betriebsstrom und gegebener geometrischer Anordnung der Näherung maßgeblich die Höhe des Rohrleitungspotentials. Die Abmessungen der Rohrleitung (Durchmesser, Wandstärke) sind von vergleichsweise geringem Einfluss (siehe Abschnitt 12). Die Durchschlagfestigkeit, und damit eine spannungsabhängige Isolierfähigkeit der Rohrleitungsumhüllung, sind im Bereich der eingekoppelten, technischen Wechselspannungen vom Werkstoff abhängig.

Je nach dem Zustand von Bitumenumhüllungen kann die Isolierfähigkeit mit steigender Spannung zwischen Rohrleitung und Erde sehr stark abnehmen. In diesem Fall tritt bei Kurzzeitbeeinflussung eine natürliche Begrenzung des Rohrleitungspotentials auf etwa 1 500 V ein [14].

Bei Polyethylenumhüllungen liegt die Durchschlagfestigkeit oberhalb einer Spannung von 5000 V, so dass hier keine für den Berührungsschutz relevante „natürliche“ Erdung vorliegt. Darüber hinaus wird bei Neubauleitungen durch qualitätssichernde Maßnahmen beim Leitungsbau sowie hochwertige Nachumhüllungssysteme immer häufiger eine nahezu fehlerstellenfreie Rohrleitungsumhüllung erreicht – mit der Folge, dass auch bei längeren Rohrleitungsabschnitten die Kennlänge der Leitung oft nicht erreicht, bzw. überschritten, wird.

Je kleiner der spezifische Umhüllungswiderstand einer Rohrleitung und je besser die Rohrleitung an ihren Enden geerdet ist, desto größer ist der in der Rohrleitung fließende Strom und desto kleiner ist das Rohrleitungspotential und die Berührungsspannung an der Rohrleitung. Der hohe spezifische Umhüllungswiderstand der Rohrleitung, der aus Korrosionsschutzgründen zweckmäßig ist, kann durch an die Rohrleitung angeschlossene Erder herabgesetzt werden. Wegen des negativen Potentials von verzinktem Band- und Rundstahl für Oberflächen- bzw. Tiefenerder ist die zusätzliche Stromaufnahme der Erder bei kathodischem Korrosionsschutz relativ gering. Wegen der Verschiebung ihres Potentials in positive

Richtung sind Magnesiumanoden für den Einsatz an hochspannungsbeeinflussten Rohrleitungen ungeeignet.

Bei Rohrleitungen mit hohem spezifischem Umhüllungswiderstand wurde bereits festgestellt, dass u. U. der überwiegende Teil des eingespeisten Schutzstromes in die Erder eintritt. Eine Reduzierung dieses Stromes ist durch den Einsatz von Abgrenzeinheiten möglich, welche zwischen Rohrleitung und Erder geschaltet werden.

Inwieweit eine elektrische Unterteilung der Nährungsabschnittes mittels Isolierstücken eine sinnvolle Alternative bzw. Ergänzung zu Erdungsmaßnahmen darstellt, ist für den konkreten Fall zu prüfen.

Abhängig von der Art der Beeinflussung (Lang- oder Kurzzeitbeeinflussung) können konstruktive Maßnahmen gegen Berührungsspannungen auch darin bestehen, dass der Abgriff von kritisch hohen Berührungsspannungen verhindert wird, d. h. die berührbaren Teile isoliert werden, oder die Schutzmaßnahme Standortisolierung oder die Potentialsteuerung angewendet wird.

Zur Verminderung des Rohrleitungspotentials können auch konstruktive Maßnahmen an der Hochspannungsfreileitung durchgeführt werden, z. B. durch Verlegung zusätzlicher Reduktionsleiter (Erd- oder Bodenseile). Die Ausnutzung einer günstigen Phasenordnung der Leiterseile bei Langzeitbeeinflussung durch Betriebsströme in Drehstromfreileitungen ist problematisch, da bei Ausfall eines Systems das Rohrleitungspotential wesentlich höher werden kann. Im Vergleich zu Maßnahmen an der Rohrleitung sind die Kosten für konstruktive Maßnahmen an der Hochspannungsfreileitung vergleichsweise hoch.

9.2 Maßnahmen an der Rohrleitung

9.2.1 Allgemeines

Durch die im Folgenden beschriebenen Maßnahmen sollte das Rohrleitungspotential herabgesetzt bzw. der Abgriff unzulässig hoher Berührungsspannungen verhindert werden.

9.2.2 Erder und Abgrenzeinheiten

9.2.2.1 Allgemeines

Der Anschluss von Erdern an eine Rohrleitung stellt eine definierte, lokale Herabsetzung des Umhüllungswiderstandes der Rohrleitung dar. Die reduzierende Wirkung eines Erders auf die Höhe der Beeinflussungsspannung ist umso größer, je näher der Erder an den Spannungsmaxima auf der Rohrleitung (z. B. Enden der Näherung) platziert wird und je kleiner sein Ausbreitungswiderstand ist. Die möglichen Auswirkungen auf die Höhe der Beeinflussungsspannung bei Lang- und Kurzzeitbeeinflussung an anderen Orten des Beeinflussungsabschnittes, welche sich gerade bei einem Erdungskonzept mit wenigen, „konzentrierten“ Erdern ergeben, sind zu berücksichtigen.

Spannungsüberhöhungen, die aus Resonanz resultieren, können nur durch gleichmäßig über die Resonanzlänge verteilte Erder herabgesetzt werden (siehe 12.4.5).

Neben Erdersystemen zur Sicherstellung des Personenschutzes werden auch zunehmend Erdungsmaßnahmen zum Schutz gegen Wechselstromkorrosion durchgeführt, z. B. durch zusätzliche Erder bzw. die wechselstrommäßige Kopplung von Produktrohren und Mantelrohren. Hier ist auf die „Verträglichkeit“ der Maßnahmen des Berührungsschutzes und der zusätzlichen (Erdungs-)Maßnahmen zu achten; d. h. dass unabhängig vom Betriebszustand dieser zusätzlichen Erdungsmaßnahmen keine unter dem Gesichtspunkt „Berührungsschutz“ kritische Erhöhung der Beeinflussungsspannungen auftreten darf.

9.2.2.2 Projektierung von Erdern an Rohrleitungen

Verfahren zur Berechnung der erforderlichen Erderlängen sowie zu deren Anordnung im Beeinflussungsabschnitt werden in 12.4 beschrieben. Grundlage dieser Berechnungen ist neben dem geforderten Erderausbreitungswiderstand auch der Bodenwiderstand am Standort des Erders. Die Ermittlung des Bodenwiderstandes erfolgt zweckmäßigerweise nach dem „Schlumberger- oder Wenner-Verfahren“ [3].

Zu beachten ist, dass

- die Bodenwiderstandsmessungen die vorgesehene Verlegetiefe des Erders berücksichtigen
- bei Sandböden mit stark schwankenden Oberflächenwasserständen es zu witterungs- und jahreszeitlich bedingten Schwankungen des spezifischen Bodenwiderstands kommen kann
- bei Standorten von ausgedehnten Horizontalerdern die Homogenität des Bodenwiderstandes durch mehrere Bodenwiderstandsmessungen entlang der Trasse überprüft werden sollte und
- bei einer Verlegung eines Horizontalerders im Rohrgraben die errechneten Erderlängen nur noch bedingt verwendbar sind, wenn das Füllmaterial an der Rohrleitung einen anderen spezifischen Bodenwiderstand besitzt wie der „gewachsene“ Boden, in dem die Projektierungsmessungen durchgeführt wurden (dies kann z. B. beim „Einsanden“ einer Rohrleitung der Fall sein).

In Anlehnung an DIN EN 61936-1 (VDE 0101-1), DIN EN 50522 (VDE 0101-2) entspricht die Erdungsspannung U_E (gegen das Potential der Bezugs Erde) dem Produkt aus Erdungswiderstand R_E und Erdungsstrom I_E . Sofern der Rohrleitungserder mit der hochspannungsbeeinflussten Rohrleitung verbunden ist, entspricht dessen Erderspannung – unter Vernachlässigung der Spannungsabfälle auf den Anschlusskabeln bzw. der Spannung über der Abgrenzeinheit – der Beeinflussungswchselspannung auf der Rohrleitung. Die Erderspannung führt zur Ausprägung eines Erderspannungstrichters, in dem eine Teilspannung der Erderspannung als Schritt- bzw. Berührungsspannung gegen das Potential der Bezugs Erde abgegriffen werden kann.

Die Erder an Rohrleitungen werden im Regelfall in deren Trassenbereich (auch außerhalb zugangsbeschränkter Einrichtungen des Rohrleitungsbetreibers) errichtet. Zum Schutz Dritter wird empfohlen, zumindest an Erderstandorten mit mittlerer und höherer Personenaufenthaltswahrscheinlichkeit und der Möglichkeit des Heranführens / Berührens von metallischen Einrichtungen, die mit der Bezugs Erde verbunden sind (z. B. Licht- oder Ampelmasten) den Anteil der Erderspannung an (zugänglichen) Punkten der Erdoberfläche zu ermitteln.

Es wird die Anwendung der folgenden Grenzwerte für die Anteile der Erderspannungen an der Erdoberfläche empfohlen, wobei die Auswirkung auch auf „nicht unterwiesene“ Personen berücksichtigt wird.

Tabelle 6 – Empfohlene Grenzwerte für Schritt- und Berührungsspannungen

Gefährdung	Schrittspannung		Berührungsspannung (gegen Bezugserde)	
	Dauerbeeinflussung	Kurzzeitbeeinflussung	Dauerbeeinflussung	Kurzzeitbeeinflussung
Personen	(nicht relevant)		60 V ^a	537 V ^b

^a Nach DIN EN 50443 (VDE 0845-8)

^b Nach Tabelle B3 in DIN EN 61936-1 (VDE 0101-1), DIN EN 50522 (VDE 0101-2) als zulässige Berührungsspannung bei einer Fehlerdauer von 0,2 s, Werte für andere Abschaltzeiten können hier entnommen werden.

Sofern sich in den betrachteten Bereichen eine Grenzwertüberschreitung ergibt, kann erfahrungsgemäß durch konstruktive Maßnahmen beim Erderbau – z. B. Errichtung von Tiefenerdern mit oberem, „inaktiven“ Bereich – eine ausreichende Reduzierung der oberflächennahen Erderspannung erreicht werden.

9.2.2.3 Bau von Erderanlagen an Rohrleitungen

Erder und Erdungsleitungen (Verbindungsleitungen zwischen Rohrleitungen und Erder) müssen eine ausreichende Strombelastbarkeit besitzen. Der über den Erder fließende Strom kann mit hinreichender Genauigkeit aus der Wechsellspannung am Standort des Erders und dessen Ausbreitungswiderstand ermittelt werden.

Die zulässige Strombelastbarkeit für verschiedene Werkstoffe kann den Tabellen 7 und 8 entnommen werden. Als Endtemperatur für verzinkten Stahl wurde für Kurzzeit- und Langzeitbeeinflussung 100 °C zugrunde gelegt. Für kunststoffisolierte Kupferleitungen wurden 100 °C bei Kurzzeitbeeinflussung und 70 °C bei Langzeitbeeinflussung zugrunde gelegt.

Die zulässige Stromdichte im Erder und in der Verbindungsleitung bei Kurzzeitbeeinflussung wird im Allgemeinen für eine kurze Dauer ($t_A' = 1$ Sekunde) angegeben. Sie beträgt für

verzinkten Stahl $G(1s) = 50 \text{ A/mm}^2$

kunststoffisolierte Kupferleitung $G(1s) = 120 \text{ A/mm}^2$

Für die bei Kurzzeitbeeinflussung auftretende kürzere Abschaltzeit t_A kann die zulässige Stromdichte berechnet werden aus der Beziehung

$$G = G(1s) \sqrt{\frac{t_A'}{t_A}}, \quad (3)$$

Der zulässige Strom $I_{E \text{ zul}}$ ergibt sich aus der zulässigen Stromdichte und dem Querschnitt A des Erders bzw. der Verbindungsleitung.

$$I_{E \text{ zul}} = G \times A \quad (4)$$

Als Erderwerkstoff ist vorzugsweise feuerverzinkter Stahl mit einer Zinkauflage von mindestens 70 μm einzusetzen. Die Verwendung von inerten (Anoden-)Materialien, wie sie auch beim Bau von KKS-Anodenanlagen Verwendung finden, bedingt den Einsatz einer geeigneten Abgrenzeinheit. Aluminium-Erdseile sind als Erdermaterialien aufgrund der zu erwartenden Korrosionsschäden ungeeignet. Bei Bandstahl für Oberflächenerder wird ein Mindestquerschnitt von 100 mm^2 mit einer Mindeststärke von 3 mm gefordert, Rundstahl für zusammengesetzte Tiefenerder sollte einen Mindestdurchmesser von 20 mm haben. Falls der Erder in eine Tiefenbohrung eingebracht wird (ähnlich einer Tiefenanode), sollte das Erdungsmaterial einen Mindestquerschnitt von $A = 100 \text{ mm}^2$ sowie stromtragfähige und kraftschlüssige Segmentverbindungen besitzen, die durch geeignete Umhüllungen gegen das Eindringen von Wasser geschützt sind.

Bei Erderlängen von mehr als 100 m ab dem Anschlusspunkt zur Rohrleitung (Verbindungskabel) ist der Längsspannungsfall auf dem Erder, bedingt durch dessen Längswiderstand, nicht mehr zu vernachlässigen. Hier bieten parallel verlegte Erdungsbänder bzw. Parallelkabel mit zusätzlichen Einspeisepunkten die Möglichkeit, den Längswiderstand des Erders herabzusetzen.

Wenn Oberflächenerder unmittelbar im Rohrgraben verlegt werden, sollte ein Abstand zur Rohrleitung von 0,2 m nicht unterschritten werden.

Beim Neubau von Rohrleitungen bietet die Verlegung des Erders in einem separaten Graben (neben dem Rohrgraben) den Vorteil der schnelleren Verfügbarkeit des Erders, unabhängig vom Fortschritt der Rohrgrabenverfüllung und dem Ausschluss ungenügender Erderausbreitungswiderstände durch Verfüllmaterialien mit anderen spezifischen Widerständen. In jedem Fall sollte eine Anpassung der Verlegetiefe des Erders an die örtlichen Gegebenheiten erfolgen, um so

- einen stabilen Erderausbreitungswiderstand zu erreichen und
- eine Beschädigung des Erders z. B. beim „Tiefpflügen“ auf landwirtschaftlich genutzten Flächen zu vermeiden.

Bei der Erderverlegung im Rohrgraben ist die Möglichkeit der Einbettung in einen hochohmigen Boden z. B. durch das „Einsanden“ der Leitung zu beachten. Ohne eine Anpassung der Erderlängen kann sich daraus eine erhebliche Abweichung des erreichten Erderausbreitungswiderstandes von dem projektierten Wert ergeben.

Bei Verwendung von niederohmigen Einbettungsmaterialien (z. B. Koks, Bentonit...) ist die Möglichkeit einer Korrosionsgefährdung durch Elementbildung zu berücksichtigen; ggf. ist auf inerte Erdermaterialien zurückzugreifen.

Für Verbindungsleitungen zwischen Rohrleitung und Erder sind kunststoffisolierte Kupferleiter (z. B. Kabel NYY) zu verwenden.

Am Anschlusspunkt des Verbindungskabels am Erder besteht die Gefahr der Bildung eines Korrosionselementes; daher ist hier eine sorgfältige und beständige Isolierung des Anschlussbereiches mit geeigneten Materialien erforderlich.

Bei entlang einer beeinflussten Rohrleitung verteilt angeordneten Erdern sind die in der Tabelle 7 angegebenen Querschnitte für verzinkten Stahl immer ausreichend. Für die Verbindungsleitungen zwischen Rohrleitung und Erder genügt dann im Regelfall ein Kupferquerschnitt von 4 mm². Aus mechanischen Gründen sollte dieser Querschnitt nicht unterschritten werden. Bei nicht verteilt angeordneten Erdern, z. B. bei Anschluss von konzentrierten Erdern an den Enden einer Näherungslänge, sollte die Verbindungsleitung einen Querschnitt von mindestens 16 mm² Kupfer haben.

Tabelle 7 – Zulässige Ströme für übliche feuerverzinkte Erder

Erdermaterial	Querschnitt	Kurzzeiterdungsstrom I_{EK} für $t_A = 1$ s in kA	Dauererdungsstrom I_D in A
Bandstahl	30 mm ² × 3,5 mm ²	5,2	200
Rundstahl	20 mm Durchmesser	15	320

Es zeigt sich, dass unter Berücksichtigung realistischer Erderausbreitungswiderstände ($R_E > 0,5\Omega$) und den maximal zulässigen Beeinflussungsspannungen aus der Tabelle 3, Zeile 1 bis 3 bei den üblicherweise verwendeten Erdermaterialien eine Überlastung des Erders auszuschließen ist.

Tabelle 8 – Zulässige Ströme für kunststoffisolierte Kupferleitungen

Cu-Querschnitt	mm²	4	10	16	25	50
Kurzzeiterdungsstrom I_{EK} für $t_A = 1$ s	kA	0,5	1,2	1,9	3,0	6,0

9.2.2.4 Anschluss von Erdern an die Rohrleitung

Die Verbindung zwischen der Rohrleitung und dem Erder sollte so eingerichtet sein, dass sie für Messzwecke aufgetrennt werden kann.

Bei Kurzzeitbeeinflussung müssen die Erder nicht ständig unmittelbar mit der Rohrleitung verbunden sein. Der Anschluss kann auch über geeignete Abgrenzeinheiten erfolgen. Abgrenzeinheiten für Langzeitbeeinflussung stellen zur Vermeidung einer gemäß Tabelle 3 gefährlich hohen Beeinflussungsspannung zwischen der Rohrleitung und dem Erdreich eine dauerhafte niederohmige Verbindung zwischen der Rohrleitung und einem definierten Erder sicher. Auf einer hochspannungsbeeinflussten Rohrleitung sind häufig Schwankungen der Beeinflussungsspannung zu beobachten, hervorgerufen durch zyklische oder spontane Veränderungen der Betriebs- bzw. Fahrströme auf den beeinflussenden Hochspannungsleitungen. Die für die Dimensionierung der Berührungsschutzmaßnahmen zugrunde gelegten maximalen Betriebsströme werden in der Regel nur selten erreicht; abhängig von der Beeinflussungssituation ist u. U. in Schwachlastzeiten keine permanente Erdung der Rohrleitung notwendig. Eine Aufhebung der permanenten Erdung zu Messzwecken ist aber nur dann gefahrlos möglich, wenn durch die Funktionsweise der Abgrenzeinheit für Dauerbeeinflussung eine automatische Wiederanschaltung des Erders noch vor dem Erreichen gefährlich hoher Beeinflussungsspannungen sichergestellt werden kann.

Für die nach dem Überschreiten der Ansprechspannung der Abgrenzeinheit noch zwischen der Rohrleitung und der fernen Erde verbleibende Wechselfspannung ist dann in erster Linie nur noch der Ausbreitungswiderstand des Erders und der über den Erder abgeleitete Strom maßgebend.

9.2.2.5 Anforderungen an Abgrenzeinheiten für Kurzzeitbeeinflussung

Im Falle einer induktiven Beeinflussung durch einen einphasigen Erdkurzschlussstrom einer mit starrer Sternpunktterdung betriebenen Hochspannungsfreileitung haben Abgrenzeinheiten für Kurzzeitbeeinflussung die Aufgabe, noch vor dem Erreichen gefährlich hoher Spannungen zwischen der Rohrleitung und dem Erdreich automatisch eine niederohmige, stromtragfähige Verbindung zwischen der Rohrleitung und einem definierten Erder herzustellen. Als Abgrenzeinheiten für Kurzzeitbeeinflussung werden in der Regel geeignete Trennfunkstrecken und Leistungshalbleiterschaltungen eingesetzt.

Bei niederohmigen Erdern und hohen Beeinflussungsspannungen am Erderort sind die Spannungsabfälle über der Abgrenzeinheit (u. U. mehrere 10 V) zu berücksichtigen.

Zur Sicherstellung der Funktionsfähigkeit sollten diese Abgrenzeinheiten folgenden Anforderungen genügen:

- Bei der Auslegung bzw. der Auswahl der Abgrenzeinheit sind der maximal abzuleitende technische Wechselstrom und die Einwirkdauer (max. Abschaltzeit) maßgebend.
- Bei entsprechend Tabelle 3 zulässigen Langzeitbeeinflussungsspannungen muss die Abgrenzeinheit im hochohmigen Zustand verbleiben.

- Nach Abschaltung des Erdkurzschlusses muss die Abgrenzeinheit – ungeachtet der verbleibenden Langzeitbeeinflussungsspannung auf der Rohrleitung – wieder in den hochohmigen Zustand übergehen.
- Ortsübliche Temperatur- und Witterungseinflüsse dürfen nicht zu Fehlfunktionen führen und sind bei der Auswahl bzw. der Schutzart der Abgrenzeinheit zu berücksichtigen.
- Bei einer Überlastung sollte die Abgrenzeinheit in einen sicheren Zustand übergehen.

Je nach Gerätetyp ist ein Schutz gegen transiente Überspannungen, z. B. hervorgerufen durch indirekte Blitzbeeinflussung, zu empfehlen.

9.2.2.6 Anforderungen an Abgrenzeinheiten für Langzeitbeeinflussung

Zur Sicherstellung der Funktionsfähigkeit sollten diese Abgrenzeinheiten für Langzeitbeeinflussung folgenden Anforderungen genügen:

- Bei der Auslegung bzw. der Auswahl der Abgrenzeinheit ist der maximal abzuleitende technische Wechselstrom für Langzeitbeeinflussung maßgebend; sollten darüber hinaus auch induktive Kurzzeitbeeinflussungen aufgrund der Betriebsweise der beeinflussenden Hochspannungsleitungen möglich sein, ist auch diese Belastung – wie auch die Tatsache der verminderten Leistungsfähigkeit durch die Vorstrombelastung (aufgrund der permanent abgeleiteten Langzeitbeeinflussungen) – bei der Auswahl und der Dimensionierung zu berücksichtigen.
- Ortsübliche Temperatur- und Witterungseinflüsse dürfen nicht zu Fehlfunktionen führen und sind bei der Auswahl bzw. der Schutzart des Gerätes zu berücksichtigen.
- Bei einer Überlastung des Gerätes sollte dieses in einen definierten Zustand übergehen, welcher weiterhin den Berührungsschutz auf der Rohrleitung sicherstellt.
- Die Abgrenzeinheit darf sowohl im Normalbetrieb wie auch im Fehlerfall keine gravierenden Beeinträchtigungen des kathodischen Korrosionsschutzes hervorrufen.
- Die Funktionsfähigkeit des Gerätes darf nicht von der permanenten Verfügbarkeit einer ungesicherten, externen Hilfsenergie (z. B. 230-V-Niederspannungsversorgung) abhängen.
- Permanente Erdungen an kathodisch geschützten Rohrleitungen bedürfen im Regelfall des Einsatzes von Abgrenzeinheiten, welche neben den Betrieb des kathodischen Korrosionsschutzes auch Messungen zu dessen sicheren Nachweis nicht in relevanter Weise beeinflussen.

Je nach Gerätetyp ist ein Schutz gegen transiente Überspannungen, z. B. hervorgerufen durch indirekte Blitzbeeinflussung, zu empfehlen.

Verschiedene Arten von Abgrenzeinheiten für Dauerbeeinflussung werden in den folgenden Abschnitten – ohne Anspruch auf eine vollständige Auflistung aller geeigneten Gerätekonzepte – beispielhaft beschrieben.

9.2.2.7 Spannungsgesteuerte Abgrenzeinheiten für Langzeitbeeinflussung

Sollte die Möglichkeit einer Aufhebung der permanenten Erdung für die Zeiten von ungefährlich hohen Beeinflussungsspannungen auf dem Rohr (bei nicht geerdeter Leitung) zu Messzwecken, z. B. zur

Durchführung von Ausschaltpotentialmessungen oder Fehlstellenortungen, angestrebt werden, ist der Einsatz von geeigneten (Halbleiter-) Schaltern (z. B. Leistungs-Thyristorschaltungen) zu empfehlen. In diesem Fall werden diese Abgrenzeinheiten auch als „Thyristor-Abgrenzeinheiten (für Lang- und Kurzzeitbeeinflussung)“ bezeichnet. Kombinationen mit anderen Abgrenzeinheiten – siehe 9.2.2.12 – sind möglich.

Die Wechselspannung zwischen der Rohrleitung und dem Erdreich muss durch die Abgrenzeinheit permanent erfasst werden. Noch bevor für einen beliebigen Punkt der Rohrleitung (durch eine Erhöhung der eingekoppelten Beeinflussungsspannung) die Gefahr einer entsprechend Tabelle 3 gefährlich hohen Wechselspannung Rohrleitung – Erde besteht, muss eine automatische Wiederanschaltung des Erders zur wirkungsvollen Begrenzung der Beeinflussungsspannung realisiert werden.

9.2.2.8 Dioden-Abgrenzeinheiten

Die Funktion von Dioden-Abgrenzeinheiten beruht darauf, dass ein – durch eine unsymmetrische Antiparallelschaltung von Leistungsdioden – fließender Wechselstrom durch die unterschiedlichen Summen der Schleusenspannungen je Zweig eine resultierende Gleichspannung über der Abgrenzeinheit hervorruft. Diese resultierende Gleichspannung addiert sich zum Ruhepotential des Erders und verringert so die – für die Höhe des in den Erder eintretenden KKS-Schutzstromes – bestimmende Spannungsdifferenz zwischen der Erderanlage und der kathodisch geschützten Rohrleitung.

Zu berücksichtigen ist,

- dass dieser Effekt erst bei Wechselspannungen auftritt, die deutlich über der Summe der Schleusenspannungen im kathodischen Zweig der Abgrenzeinheit liegen und
- dass bei KKS-Ausschaltpotentialmessungen eine Verfälschung der Messergebnisse durch anodische Erdergleichströme in der Ausschaltphase der KKS-Anlage zu erwarten ist.

9.2.2.9 Polarisationszellen

Die Wirkungsweise der Polarisationszelle beruht auf einem elektrochemischen Effekt (Gleichstromwiderstand von einigen 10Ω entsprechend dem Polarisationswiderstand passiver Systeme in redoxsystemfreien Medien [3]). Polarisationszellen besitzen zwar einen sehr kleinen Wechselstromwiderstand (im Bereich einiger $m\Omega$), die Vermeidung einer Elektrolyse führt aber zu einer starken Einschränkung des zulässigen Dauerwechselstromes (max. 0,1 % des Kurzzeitstromes IEK von 5 kA bis 50 kA) und der maximal zulässigen Gleichstromdifferenz von $U < 1,23 \text{ V}$ – und damit kleiner als die Wasserzersetzungs- spannung.

Eine Beeinträchtigung beim Nachweis und bei der Fernüberwachung des KKS kann sich gerade bei gut umhüllten Rohrleitungssystemen durch den begrenzten Gleichstromwiderstand und Umladungseffekte bei getakteten Schutzstromsystemen ergeben. Des Weiteren bedarf die Handhabung der mit mehreren Litern konzentrierter Kalilauge gefüllten Gefäße einer besonderen Einweisung.

Als vorteilhaft sind die hohe Kurzzeitstrombelastung der Polarisationszellen und deren einfacher Aufbau anzusehen.

9.2.2.10 Kondensator-Abgrenzeinheiten

Durch die Verbindung einer hochspannungsbeeinflussten Rohrleitung mit einem erdfühli- gen Objekt über eine Kapazität (Kondensator) lässt sich eine gleichstrommäßige Trennung erreichen, wobei im Gegen-

satz zur Dioden-Abgrenzeinheit eine stufenlose Gleichspannungsanpassung möglich ist (AfK-Empfehlung Nr. 8). Der Vorteil gegenüber der Polarisationszelle ist eine Möglichkeit, auch Gleichspannungsdifferenzen von mehreren Volt zu überbrücken.

Kondensator-Abgrenzeinheiten bestehen in der Regel aus gepolten Elektrolytkondensatoren mit hoher Kapazität (im Bereich einiger 10 mF bis 100 mF).

Bei gepolten Elektrolytkondensatoren mit hoher Kapazität ist der induktive Blindwiderstand sehr gering (im Bereich einiger 10 mΩ), damit liegt der Spannungsfall über den Kondensator bei Ableitung des induzierten Langzeitwechselstromes (z. B. bei $I_{ED} = 10 \text{ A} \dots 20 \text{ A}$) in einer Größe, welche den Kondensator nicht zerstört. Im Falle einer induktiven Kurzzeitbeeinflussung muss die Kondensator-Abgrenzeinheit u. U. Ableitströme (Kurzzeit-Erderströme I_{EK}) von einigen 100 A führen können.

Zum Schutz des gepolten Kondensators vor einer Zerstörung durch eine anliegende Spannung von wenigen Volt in einer Polarität, die der Betriebsrichtung des Kondensators entgegengerichtet ist, werden gepolte Elektrolytkondensatoren mit einer Schutzbeschaltung (in der Regel einer Dioden-Abgrenzeinheit) kombiniert.

Sollte der Betriebszustand der Kondensator-Abgrenzeinheit von entscheidender Bedeutung für das Berührungsschutzkonzept der Rohrleitung sein, gelten für die Diodenschutzbeschaltung der Kondensator-Abgrenzeinheit die Anforderungen entsprechend 9.2.2.6.

Zu beachten ist weiter die Einschränkung der Lebensdauer von Kondensatoren bei hoher Belastung.

Durch Umladungen des Kondensators bei Taktung des KKS-Systems kann sich eine starke Verfälschung des gemessenen KKS-Ausschaltpotentials ergeben.

9.2.2.11 Reihenschwingkreise

Reihenschwingkreise bestehen aus einer Reihenschaltung einer Kapazität (Kondensator) mit einer Induktivität (Drosselspule). Sofern eine Spannung entsprechend der Resonanzfrequenz des Schwingkreises anliegt, heben sich die dann vom Betrag gleich großen – aber um 180° phasenverschobenen kapazitiven und induktiven Reaktanzen auf (wodurch sich ein theoretischer Widerstand von $R_{\sim} = 0 \Omega$ für den Schwingkreis ergibt).

Durch diesen Umstand ist es möglich, für die eine definierte Resonanzfrequenz

- bei entsprechend hoher Güte der Kapazität im Kapazitätsbereich von $C < 1\,000 \mu\text{F}$ und
- einer auf die Resonanzfrequenz entsprechend der Frequenz der Beeinflussungswchselspannung ausgelegten Einphasen-Drosselspule (mit weitgehend lastunabhängigen Induktivitätswert)

einen Schwingkreis aufzubauen, der bei einer ausreichend kleinen Restimpedanz (realistisch ist $Z_{ges} < 0,5 \Omega$ bei $f = f_{res}$) bis zu seinem Nenn-Wechselstrom keine relevante Beeinflussung für den Betrieb und Nachweis des kathodischen Korrosionsschutzes verursacht.

Die begrenzte Spannungsfestigkeit von Kondensatoren führt dazu,

- dass der Reihenschwingkreis eine Überstrom-Schutzbeschaltung als Geräteschutzeinrichtung benötigt und

- die Ableitung hoher Dauer- und Kurzzeitwechselströme zur Sicherstellung des Berührungsschutzes auf der Rohrleitung einer parallel zum Schwingkreis geschalteten, hochstromtragfähigen Abgrenzeinheit bedarf.

Weitere Hinweise sind 9.2.2.12 zu entnehmen.

9.2.2.12 Parallelschaltung von Abgrenzeinheiten

Zur Erweiterung des Einsatzbereiches bzw. zur Sicherstellung des Berührungsschutzes auf der Rohrleitung kann es von Vorteil sein, verschiedene Typen von Abgrenzeinheiten miteinander zu kombinieren. Die Tabelle 9 gibt hierfür einige Beispiele.

Tabelle 9 – Kombinationen von Abgrenzeinheiten (AE)

AE 1	Zweck	mit AE 2	Vorteil der Kombination
Kondensator-Abgrenzeinheit (CAE) mit gepolten, hochkapazitivem Elektrolytkondensator	Z. B. zum Ausgleich der Wechselspannung zwischen unbeeinflusstem Mantelrohr- und Produktrohr	Parallelgeschaltete, entsprechend leistungsfähige Dioden-Abgrenzeinheit	Geräteschutz (Überstromschutz) der CAE, auch Redundanz bei der Wechselstromableitung bei Zerstörung des Kondensators
Thyristor-Abgrenzeinheit für Dauer- und Kurzzeitbeeinflussung	Ableitung von Beeinflussungswchselspannungen gegen Erde ab einer definierten Schaltschwelle	Reihenschaltung mit entsprechend leistungsfähiger Dioden-Abgrenzeinheit	Reduzierung des in den Erder eintretenden KKS-Gleichstromes bei Dauerstromableitung
Thyristor-Abgrenzeinheit für Dauer- und Kurzzeitbeeinflussung	Ableitung von Beeinflussungswchselspannungen gegen Erde ab einer definierten Schaltschwelle	Reihenschaltung mit Kondensator-Abgrenzeinheit – incl. Dioden-Schutzbeschaltung	Unterdrückung des in den Erder eintretenden KKS-Gleichstromes bei Dauerstromableitung und stationärem KKS-System
Thyristor-Abgrenzeinheit für Dauer- und Kurzzeitbeeinflussung	Ableitung von Beeinflussungswchselspannungen gegen Erde ab einer definierten Schaltschwelle	Parallelschaltung mit stromtragfähigem Reihenschwingkreis (RSK)	Sicherstellung des Berührungsschutzes auf der Rohrleitung sowie Geräteschutzfunktion für den RSK durch die Thyristor-Abgrenzeinheit. Der RSK reduziert bei inaktiver TA die Beeinflussungsspannung und ermöglicht so unbeeinflusste KKS-Messungen
Trennfunkstrecke oder Thyristor-AE für Kurzzeitbeeinflussung	Ableitung von Kurzzeitbeeinflussungen	Kondensator-Abgrenzeinheit	Nutzung von Kurzzeit-Erderanlagen zur weiteren Dauerwechselspannungsreduzierung
Thyristor-Abgrenzeinheit ohne Gleichstromunterdrückung mit niedriger Ansprechspannung	Ableitung von Kurzzeitbeeinflussungen	Parallelschaltung mit stromtragfähigem Reihenschwingkreis	Sicherstellung des Berührungsschutzes auf der Rohrleitung sowie Geräteschutzfunktion bei Kurzzeitbeeinflussung für den RSK. Sinnvoll, wenn der max. Dauererdgungsstrom = I_{ED} des RSK bei max. Dauerbeeinflussungsspannung den Nennstrom des RSK weder erreicht noch überschreitet.

9.2.2.13 Kompensationsanlagen/aktive Erdungsgeräte

Von ihrer Funktionsweise her sind diese technisch aufwendigen Geräte auf die Verfügbarkeit einer leistungsfähigen Energieversorgung (Niederspannungsanschluss) angewiesen. Aus diesem Grund sind diese Geräte nicht geeignet, den Schutz vor gefährlich hohen eingekoppelten Beeinflussungsspannungen zwischen der Rohrleitung und dem Erdreich in jedem Falle sicherzustellen. Vielmehr ist darauf zu achten, dass diese in der Regel zur Vermeidung von Wechselstromkorrosion eingesetzten Geräte die Maßnahmen zur Sicherstellung des Personenschutzes weder im Normalbetrieb noch

- bei Ausfall eines von mehreren, örtlich verteilt in einem Parallelführungsabschnitt an einer Rohrleitung eingesetzten Geräten sowie
- bei Kurzzeitbeeinflussung z. B. durch die Verbindung der Rohrleitung mit einem zusätzlichen, niederohmigen Erder/Anode

beeinträchtigen.

9.2.3 Betrieb und Prüfungen von Erderanlagen an Rohrleitungen

Konzentriert angeordnete Erdersysteme an Rohrleitungen haben die Aufgabe, durch entsprechend ihrem Standort und ihrem Ausbreitungswiderstand definierte Erder eine wirkungsvolle Begrenzung der eingekoppelten Wechselspannung zwischen der Rohrleitung und dem Erdreich auf entsprechend der Tabelle 3 zulässige Spannungswerte zu erreichen. Die Ausbreitungswiderstände der Erder liegen in einem zulässigen Toleranzbereich, weil beispielsweise ein niederohmiger Erder an einem Näherungsende zu einem Anstieg der Beeinflussungsspannung am anderen Ende führen kann.

Im Falle einer anodischen Belastung des Erders ist nicht auszuschließen, dass es zu korrosiv bedingten Unterbrechungen des Erders kommt. Bei einem Erder zur Sicherstellung des Berührungsschutzes auf Rohrleitungen ist eine anodische Belastung nur dann zu tolerieren, wenn

- der Erder aus inerten Materialien errichtet wurde oder
- aufgrund des Erderaufbaus (z. B. Maschenerder) es auch im Falle einer Erderunterbrechung nicht zu einer relevanten Erhöhung des Erderausbreitungswiderstandes kommen kann oder
- der Erder von vornherein als Anodenanlage errichtet wurde.

Darüber hinaus werden die Erder in der Regel nicht als redundante Systeme ausgelegt, so dass oft schon bei gravierenden Änderungen des Ausbreitungswiderstandes bzw. einer Kabelunterbrechung in den Verbindungen Rohrleitung/Messgehäuse und/oder Messgehäuse/Erder (z. B. durch Baumaßnahmen Dritter oder „Tiefpflügen“ in der Landwirtschaft) der Berührungsschutz auf der Rohrleitung abschnittsweise nicht mehr sichergestellt ist.

Daher sind regelmäßige Überprüfungen der Erderausbreitungswiderstände, der Verbindungskabel zwischen Rohrleitung und Erder sowie der Abgrenzeinheit notwendig.

Prüffristen für Abgrenzeinheiten und Erderanlagen von Rohrleitungen können DIN EN 12954 entnommen werden.

Im Falle eines direkten Anschlusses des Erders an eine kathodisch geschützte Rohrleitung findet ein relevanter Eintritt des kathodischen Schutzstromes in die Erder statt. Es sind Fälle bekannt, bei denen

sich auf der Oberfläche des Erders – analog zu den elektrochemischen Prozessen an Umhüllungsfehlstellen – eine (hochohmige) Deckschicht ausbildete. Die daraus resultierende Erhöhung des Erderausbreitungswiderstandes (ggf. auf ein Vielfaches des Ausgangswertes) kann zumindest örtlich zu einer Überschreitung der Grenzwerte entsprechend Tabelle 3 führen.

Daraus kann sich die Notwendigkeit eines Austausches des Erders zwecks Wiedereinhaltung der Berührungsschutzkriterien entsprechend Tabelle 3 ergeben. Der Effekt der Deckschichtbildung auf dem Erder kann sich – auch in Abhängigkeit von der Höhe des Schutzpotentials und der Konzentration von deckschichtbildenden Erdalkaliverbindungen im Boden – schon nach Betriebszeiten von zwei Jahren signifikant ausbilden.

Zur richtigen Auslegung der Erderanlagen sind neben ausreichend dimensionierten Erdermaterialien und Kabelquerschnitten (siehe 9.2.2.3) auch – unter Berücksichtigung der möglichen Dauer- und Kurzzeitbeeinflussungsspannungen im ungünstigsten Erdkurzschlussfall am Standort der Erderanlage – entsprechend leistungsfähige Abgrenzeinheiten einzusetzen.

Die gültige Bezugsnorm zur Hochspannungsbeeinflussung – DIN EN 50443 (VDE 0845-8) – beinhaltet keine expliziten Hinweise zur Durchführung von Prüfungen an Erdern und Abgrenzeinheiten; in der DIN EN 12954 werden lediglich Prüffristen für Erder und Abgrenzeinheiten vorgegeben. Daher werden im Folgenden Hinweise für die praktische Durchführung von Prüfungen/Messungen an Rohrleitungs-Erderanlagen aufgeführt.

Neben den allgemeingültigen Prüfungen/Messungen zur Beurteilung der Erdung und deren Verträglichkeit mit dem kathodischen Korrosionsschutz, wie z. B.

- der Feststellung der unversehrten Kabelverbindungen und Anschlusspunkte – oft durchgeführt in Form einer Schleifenwiderstandsmessung zwischen Rohrleitung und Erder
- der Prüfung eines korrekten, innerhalb zulässiger Toleranzen liegenden Erderausbreitungswiderstandes
- der wirkungsvollen Reduzierung der Beeinflussungsspannung (Wechselspannung mit/ohne Erder, Wechselstromableitung) und
- dem Ausschluss eines nicht mehr tolerierbaren Einflusses der Erderanlage auf den kathodischen Korrosionsschutz der Rohrleitung (z. B. bei Veränderung des Einschaltpotentials bei aktiver Abgrenzeinheit für Dauerbeeinflussung)

sind zumindest bei spannungsgesteuerten Abgrenzeinheiten mit Halbleiter-Leistungsschaltern Prüfungen des Schalt- und Ableitverhaltens auch im Rahmen von Revisionsmessungen zu empfehlen. Hinweise dazu (z. B. mögliche Prüfschaltungen und Hinweise zur Fehlererkennung) sollten den verfügbaren technischen Unterlagen – z. B. den Gerätebeschreibungen der jeweiligen Abgrenzeinheit – zu entnehmen sein.

Es ist hierbei zu bedenken, dass durch diese Geräteprüfungen (zumindest temporär) die Abgrenzeinheit nicht zur Ableitung von induzierten Wechselspannungen auf der Rohrleitung zur Verfügung steht. Eine temporäre Überbrückung der Abgrenzeinheit durch geeignete Einrichtungen mit stromtragfähiger Kontaktierung – beispielsweise

- eine Kabelbrücke zwischen Rohrleitungs- und Erderanschlussklemme bei Abgrenzeinheiten für Dauerbeeinflussung oder

- eine Trennfunkstrecke mit ausreichend niedriger Ansprechspannung bei Abgrenzeinheiten für Kurzzeitbeeinflussung

ist zur Sicherstellung des Berührungsschutzes unerlässlich.

Diese temporären Überbrückungsmaßnahmen sollten auch bei nicht tolerierbaren Fehlfunktionen der Abgrenzeinheit bzw. bei deren Beschädigung oder Zerstörung durchgeführt werden. Freiliegende Kabelanschlüsse bzw. Kabelverbindungen sollten dann umgehend isolierend umhüllt werden. Situationsabhängig kann auch temporär (bis zum Abschluss der Reparaturarbeiten) die Notwendigkeit der Schutzmaßnahme „Standortisolierung“ erforderlich sein.

9.2.4 Isolierstellen

In bestimmten Beeinflussungssituationen kann es von Vorteil sein, den Beeinflussungsabschnitt durch den Einsatz von Isolierstellen

- elektrisch zu unterteilen bzw.
- von anderen Rohrleitungen elektrisch zu trennen.

Sollte eine gleichstrommäßige Überbrückung mit dem Ziel der Sicherstellung des kathodischen Korrosionsschutzes ohne den Bau einer separaten Korrosionsschutzanlage für jeden Rohrleitungsabschnitt vorgesehen sein, so muss bei der Dimensionierung der dazu notwendigen, über dem Isolierstück anzuschließenden Verbindungselemente neben dem maximal zu erwartenden Dauergleichstrom (KKS-Schutzstrom) auch die im ungünstigsten Langzeitbeeinflussungs- und Erdfehlerfall über der Isolierstelle zu erwartenden Beeinflussungsspannungen berücksichtigt werden.

Ist die Isolierstelle betriebsmäßig dauernd niederohmig überbrückt, muss der Leiterquerschnitt der Überbrückung der zu erwartenden Strombelastung nach Höhe und Dauer angepasst sein und sollte wenigstens 16 mm² betragen.

9.2.5 Kathodische Korrosionsschutzanlagen

Die eingekoppelte Wechsellspannung Rohrleitung – Erde steht bei den für den kathodischen Schutz eingesetzten Schutzstromgeräten zwischen den Anschlussklemmen für das Rohr (–) und die Anodenanlage (+) an – es sei denn die Wechsellspannung wird durch einen geeigneten, vor dem Schutzstromgerät platzierten Schutzvorsatz abgeblockt.

Die Bestandteile der kathodischen Korrosionsschutzanlage, welche mit der Beeinflussungswechsellspannung beaufschlagt werden (Schutzvorsatz und/oder Schutzstromgerät) müssen von ihrer Isolationsfähigkeit und ihrer Stromtragfähigkeit mindestens den zu erwartenden Beanspruchungen vor Ort (Dauerbeeinflussung, Kurzzeitbeeinflussung und transiente Überspannungen) entsprechen.

Es ist durch geeignete Maßnahmen (Isolationsfähigkeit/ausreichende hohe Ansprechwechsellspannung von Überspannungsableitern) sicherzustellen, dass die Beeinflussungswechsellspannung nicht über den Niederspannungsteil der Korrosionsschutzanlage in das öffentliche Niederspannungsnetz übertragen wird.

Bei vollständiger bzw. teilweiser Ableitung der Beeinflussungswechsellspannung gegen die Anode ist diese Erderwirkung in den Beeinflussungsrechnungen entsprechend zu berücksichtigen. Auf mögliche Probleme bei der Einstellung des KKS-Potentials durch die Teilgleichrichtung von variierenden Dauer-

wechselspannungen sei an dieser Stelle hingewiesen – eine ausreichende Entkopplung der Dauerbeeinflussungswechselspannung vom Schutzstromgerät wird daher empfohlen.

Weitere Informationen zum Aufbau der kathodischen Korrosionsschutzanlage sind der DIN EN 12954 zu entnehmen.

Dient die Schutzanlage dem kathodischen Korrosionsschutz eines Rohrleitungssystems auf dem Gelände einer Hochspannungsstation, so ist die notwendige Anode innerhalb des Stationsgeländes zu platzieren.

9.2.6 Messstellen

Gehäuse von Korrosionsschutzmessstellen an beeinflussten Rohrleitungen sollten außen aus elektrisch isolierendem Werkstoff, z. B. Kunststoff, bestehen. Sie sollten verschließbar und nicht ohne Werkzeug zu öffnen sein. Es genügt ein Dreikantverschluss.

Bei den Messstellen der Isolierstücke, welche zur Unterteilung der Beeinflussungsabschnitte eingerichtet wurden, ist zu beachten, dass auch bei zulässigen Beeinflussungsspannungen zwischen dem jeweiligen Rohrleitungsabschnitt und dem Erdreich die Spannung über dem Isolierflansch sich aus der Summe der beiden einzelnen Beeinflussungsspannungen ergibt. Daraus kann die Möglichkeit einer gefährlich hohen Berührungsspannung Hand – Hand ergeben. Wegen der Möglichkeit des Abgreifens gefährlich hoher Berührungsspannungen im Erdfehlerfall sollte auf das Aufstellen von Messgehäusen (z. B. Schilderpfähle und Schränke) im Nahbereich von Freileitungsmasten und Hochspannungsstationen mit starrer Sternpunktterdung und Nennspannungen von $U_N > 110$ kV verzichtet werden; zu berücksichtigende Grenzabstände sind dem Abschnitt 9 zu entnehmen.

Bei nicht zu umgehenden Einzelfällen sind unter Berücksichtigung der möglichen Spannungsdifferenz zwischen dem Potential des Erdbodens an der Messstelle gegen „ferne Erde“ und dem Potential der berührbaren, elektrisch mit der Rohrleitung verbundenen Einrichtungen (Messbuchsen und Zusatzinstallationen wie z. B. Abgrenzeinheiten) standortbezogene bauliche und organisatorische Schutzmaßnahmen zu definieren.

Bauliche Schutzmaßnahmen können sich dabei auch auf die Messstellenkabel und ggf. auch auf die – in der Regel baustellenseitig ausgeführte – Nachisolation des Anschlusspunktes des Messkabels an die Rohrleitung durch besondere Anforderungen an die Spannungsfestigkeit der Außenisolation ausdehnen.

9.2.7 Mantelrohre

Unter elektrifizierten Bahnstrecken durchgeführte, erdfühligte Mantelrohre sollten wegen der Möglichkeit einer ohmschen Beeinflussung nicht zu Erdungszwecken des Produktrohrs herangezogen werden.

9.3 Maßnahmen an Rohrleitungsstationen

9.3.1 Allgemeines

Liegt das Rohrleitungspotential bei Kurzzeitbeeinflussung im Bereich von 1 000 V bis 2 000 V, sind nachstehende Maßnahmen anzuwenden, damit keine unzulässig hohe Berührungsspannung abgegriffen werden kann.

9.3.2 Durch Isolierstücke von der Rohrleitung getrennte Stationen

In der Regel sind die oberirdischen Anlagenteile der Rohrleitungsstation von den ein- und ausgehenden Rohrleitungen durch Isolierstücke elektrisch abgetrennt. Hierfür eignen sich isolierende Flanschverbindungen oder einbaufertige Isolierkupplungen. Diese Isolierstücke verhindern das Verschleppen des Rohrleitungspotentials auf Anlagenteile der Station. Der Einsatz von Funkenstrecken über Isolierstücken kann aus den Anforderungen des Explosionsschutzes oder außerhalb von Ex-Bereichen aus den internen Richtlinien des Betreibers folgen. Bei der Auswahl der Trennfunknestrecken ist zu beachten, dass das Bauteil neben den Anforderungen des Explosionsschutzes auch den Bedürfnissen des Schutzkonzeptes gegen Hochspannungsbeeinflussung genügen muss. Wichtig ist hierbei, dass die Zündung der Trennfunknestrecke nicht durch die induktiv eingekoppelten Wechselspannungen erfolgen darf, da daraus eine relevante zusätzliche (niederohmige) einseitige Erdung des beeinflussten Rohrstranges resultieren kann. Ausgenommen hiervon sind nur die Fälle, in denen die Nutzung des Stationserders Bestandteil des Schutzkonzeptes gegen Hochspannungsbeeinflussung ist. In diesem Fall muss die verwendete Trennfunknestrecke zusätzlich zu ggf. am Einbauort zu beachtenden Explosionsschutzrichtlinien auch den Anforderungen entsprechend 9.2.2.5 entsprechen.

In explosionsgefährdeten Bereichen müssen Isolierstücke mit Funkenstrecken in explosionsgeschützter Ausführung versehen sein (siehe AfK-Empfehlung Nr. 5, textgleich mit DVGW-Arbeitsblatt GW 24).

Zugängliche Bereiche (rohrseitig vor den Isolierstücken gelegen) der ein- und ausgehenden hochspannungsbeeinflussten Rohrleitungen sollten zum Schutz gegen den Abgriff von Berührungsspannungen eine ausreichende Rohr- oder Standortisolierung besitzen.

Durch eine elektrische Verbindung der ein- und der ausgehenden Rohrleitungen ist ggf. eine Reduzierung der Beeinflussungsspannungen möglich. Ebenso kann sich aber auch eine zusätzliche einseitige Erdung (abhängig von der Umhüllungsqualität der Rohrleitungsabschnitte) oder eine Verlängerung der Beeinflussungsabschnitte ergeben. Daher ist vor der Durchführung einer solchen elektrischen Verbindung die Auswirkung dieser Maßnahme auf die Höhe der Beeinflussungsspannungen und die Maßnahmen gegen induzierte Beeinflussungsspannung auf den Rohrleitungen zu überprüfen. Sollte eine Verbindung durchzuführen sein, so ist ein Kabel NYY mit ausreichender Strombelastbarkeit zu verwenden. Zur Berücksichtigung der Kabellänge ist die Auslegung des Leiterquerschnittes des Verbindungskabels entsprechend dem DVGW GW 309 (A) durchzuführen.

9.3.3 Unmittelbar mit der Rohrleitung verbundene Stationen

Sind oberirdische Anlagen oder Teile davon nicht durch Isolierstücke von den ein- und ausgehenden Rohrleitungen elektrisch getrennt, so ist sicherzustellen, dass keine unzulässig hohe Berührungsspannung abgegriffen werden kann.

Folgende Maßnahmen sind wahlweise anzuwenden:

- Beschichtung oder Umhüllung der blanken Anlagenteile mit Isolierstoff
- Isolierung des Standortes
- Potentialsteuerung

9.4 Maßnahmen an Armaturen und Leitungszubehör

9.4.1 Allgemeines

Liegt das Rohrleitungspotential bei Kurzzeitbeeinflussung im Bereich von 1 000 V bis 2 000 V, sind folgende Abschnitte zu beachten.

9.4.2 Straßenkappen, Ausblasestutzen, Wassertöpfe und ähnliches Rohrleitungszubehör

Sofern sichergestellt ist, dass die v. g. Einrichtungen soweit sicher abgeschränkt bzw. abgedeckt sind, dass außerhalb der Wartungs- und Bedienungsarbeiten keine gefährlich hohen Berührungsspannungen abgegriffen werden können, ist ein Verzicht auf weitere konstruktive Maßnahmen möglich.

Bei der Wartung und Bedienung dieser Einrichtungen ist es erforderlich,

- unterwiesenes Fachpersonal einzusetzen sowie
- betriebliche Schutzmaßnahmen (Arbeitsmittel zur Standortisolierung, siehe 10.3.1) einzusetzen und
- bei der Möglichkeit des Auftretens explosionsfähiger Gemische Potentialausgleichmaßnahmen durchzuführen.

Die Potentialausgleichmaßnahmen sind in jedem Fall über ausreichend dimensionierte Kabel und nicht über armierte Schlauchverbindungen durchzuführen. Zur Vermeidung einer Funkenbildung ist stets ein Potentialausgleich zwischen der Armatur/dem Leitungszubehör des hochspannungsbeeinflussten Rohrleitungsabschnittes und der heranzuführenden/zu verbindenden Einrichtung (z. B. im Rahmen des Aufsetzens eines Lüfters bzw. des Entleeren eines Kondensatsammlers) erforderlich. Diese Potentialverbindung ist außerhalb des explosionsgefährdeten Bereiches für die Dauer der Arbeiten herzustellen. Bei zusätzlichen Erdungsmaßnahmen sind bei der Auswahl des Leitungsquerschnittes auch mögliche Wechselstromableitungen zu berücksichtigen.

Die vorgenannten Maßnahmen zum Potentialausgleich aus Explosionsschutzgründen sind auch bei Beeinflussungswechselspannungen zu treffen, welche nach Tabelle 3, Zeile 1 und 3 aus Berührungsschutzgründen unkritisch hoch sind.

9.4.3 Mantelrohre

In manchen Fällen werden Mantelrohre zur Feststellung eines Produktaustritts im Ringraum mit metallischen, oberirdisch leicht zugänglichen Riechrohren versehen. Hier kann bei Kurzzeitbeeinflussungsspannungen in einem Bereich von $1\,000\text{ V} < U_{k\text{ max}} < 2\,000\text{ V}$ nur auf Maßnahmen verzichtet werden, wenn

- weder durch einen ungewollten (metallischen oder elektrolytischen) Kontakt
- noch eine definierte Wechselstromableitung (z. B. zum Schutz vor Wechselstromkorrosionsgefährdung) über eine Abgrenzeinheit

eine elektrische Verbindung zwischen der hochspannungsbeeinflussten Transportleitung und dem Mantelrohr besteht. Andernfalls ist eine ausreichende elektrische Isolierung des Riechrohres bzw. eine Potentialsteuerung vorzusehen.

9.4.4 Schieber und Schieberantriebe

Bei handbetätigten Schiebern besteht durchaus die Möglichkeit, dass diese im Falle einer betrieblichen Störung unverzüglich bedient werden müssen; aus dieser Ausnahmesituation heraus ist eine Vernachlässigung der Schutzmaßnahme „Standortisolierung“ durchaus vorstellbar. Daher ist im Bereich von handbetätigten Schiebern eine stationäre Isolierung des Standortes entsprechend 9.5 zu empfehlen.

Sind elektrische Schieberantriebe vorhanden und diese von der Rohrleitung isoliert eingebaut, so sind keine Schutzmaßnahmen erforderlich.

Sind Schieberantriebe und andere elektrische Anlagen oder Bauteile dieser Anlagen mit der beeinflussten Rohrleitung metallisch leitend verbunden, muss die Stromversorgung nach AfK-Empfehlung Nr. 6, 6.2, über Trenn- oder Isoliertransformatoren erfolgen. Mittelpunktleiter und Schutzleiter eines Niederspannungsanschlusses dürfen nicht mit der Rohrleitung verbunden werden. Für Steuerleitungen ist eine galvanische Trennung vorzusehen. Es wird empfohlen, Schaltschränke oder Gehäuse aus Isolierstoff zu verwenden. Eine isolierende Beschichtung von metallischen Einrichtungen – welche das Potential der hochspannungsbeeinflussten Rohrleitung führen – wird empfohlen, wenn diese Einrichtungen konstruktionsbedingt (z. B. aufgrund der räumlichen Nähe) gleichzeitig mit metallischen Gehäusen elektrischer Betriebsmittel (z. B. Motorgehäuse) berührt werden können und die maximal zu erwartende Dauerbeeinflussungsspannung am Standort dem Wert von $U_{L,max} = 50 \text{ V}$ überschreitet. Eine – selbst bei Einsatz einer Abgrenzeinheit nur wechselstrommäßige – Kopplung der hochspannungsbeeinflussten Rohrleitung mit dem Schutzleitersystem setzt voraus, dass

- durch diese (Erdungs-)Maßnahme die Einhaltung der Berührungsschutzkriterien entsprechend Abschnitt 6 auch an allen übrigen Punkten der beeinflussten Rohrleitung nicht beeinträchtigt wird und
- es zu keiner relevanten Verschleppung von Beeinflussungswechselspannungen in das öffentliche Stromversorgungsnetz kommt.

9.4.5 Freiliegende Rohrleitungen

Liegt das Rohrleitungspotential bei Kurzzeitbeeinflussung im Bereich von 1 000 V bis 2 000 V, müssen freiliegende, nicht eingezäunte Rohrleitungen und damit leitend verbundene Anlagenteile – die z. B. von Brücken oder vom Erdboden aus berührbar sind – eine isolierende Umhüllung erhalten oder es ist die Isolierung des Standortes oder eine Potentialsteuerung anzuwenden.

9.5 Potentialsteuerung und Isolierung des Standortes

Für die örtliche Potentialsteuerung – z. B. an Armaturen – dienen Steuererder, die mit dem zu schützenden Objekt verbunden sind. Die potentialsteuernde Wirkung der Erder kann durch den Sachkundigen z. B. nach [2, 3] ermittelt werden. Zur Herabsetzung der Berührungsspannung an erdverlegten Rohrleitungen, z. B. an den Enden einer Näherungslänge, kann im Bereich eines Oberflächenerders dessen potentialsteuernde Wirkung ausgenutzt werden. Abzuschätzen ist diese Wirkung durch die Berechnung des Erderspannungstrichters nach [2] bzw. [3]. Es ist hierbei zu beachten, dass bei Kreuzungen und Näherungen mit anderen unterirdischen Anlagen, die das Potential der fernen Erde führen, eine Berührungsspannung entsprechend der Ausprägung des Erderspannungstrichters abgegriffen werden kann.

Bei einer Isolierung des Standortes wird der Widerstand zwischen dem Standort eines Menschen und dem Erdreich durch eine isolierende Zwischenlage derart erhöht, dass eine unzulässige Berührungsspannung nicht abgegriffen werden kann. Die isolierende Zwischenlage muss eine solche Ausdehnung

haben, dass ein Berühren der Rohrleitung sowie mit dieser elektrisch leitfähig verbundenen Teile (z. B. Armaturen) von einem Standort außerhalb des isolierten Bereiches nicht möglich ist.

Für eine Isolierung des Standortes ist nach DIN EN 61936-1 (VDE 0101-1), DIN EN 50522 (VDE 0101-2) eine sedimentfreie Schotterschicht aus geeignetem, hochohmigem Material von mindestens 10 cm Dicke oder eine Asphaltschicht von mindestens 1 cm Stärke oder eine Gummi- oder Kunststoffunterlage von mindestens 2,5 mm Stärke ausreichend.

9.6 Maßnahmen an Fernmeldeanlagen

In parallel zur Rohrleitung verlegten Fernmeldekabeln (Kupferkabel) können ebenfalls durch Beeinflussung Spannungen induziert werden. Berechnungsverfahren und Grenzwerte können DIN VDE 0845-6-1 sowie der TE 3 der SfB entnommen werden, siehe auch DIN EN 41003 (VDE 0804-100).

Die reduzierende Wirkung der Rohrleitung ist abhängig vom induzierten Rohrleitungsstrom, d. h. von der Umhüllungsqualität und dem Betriebszustand von evtl. an der Rohrleitung errichteten Erderanlagen. Berechnungsverfahren über die reduzierende Wirkung von Rohrleitungen, Kabelmänteln, Erdseile und Schienen können der TE 8 der SfB entnommen werden.

9.7 Maßnahmen im Bereich von Erdungsanlagen und Freileitungsmasten

9.7.1 Allgemeines

Im Bereich von Erdungsanlagen tritt eine Anhebung des Erdoberflächenpotentials auf, wenn der Erder vom Strom durchflossen wird.

Kreuzt eine Rohrleitung diesen Bereich, so tritt zwischen Erde und Rohrleitung eine Potentialdifferenz auf, welche bei Arbeiten an der Rohrleitung als Berührungsspannung Hand – Fuß abgegriffen werden kann.

Unterliegt die Rohrleitung keiner induktiven Hochspannungsbeeinflussung, so führt die Rohrleitung das Potential der fernen Erde heran und die Spannungsdifferenz entspricht der ohmschen Beeinflussung durch den Erderspannungstrichter.

Wird die Rohrleitung auch induktiv beeinflusst, ergibt sich die bei Arbeiten an der Rohrleitung als Berührungsspannung Hand – Fuß abgreifbare Potentialdifferenz aus der vektoriellen Addition der ohmschen und der induktiven Komponente. Weitere Erläuterungen dazu sind in 5.3 „Erdungsanlagen von Kraftwerken, Schalt- und Umspannanlagen“ bzw. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** „Ohmsche Beeinflussung“ zu entnehmen.

9.7.2 Näherungen

Führt eine Rohrleitung in einem lichten Abstand von weniger als 2 m an einem Freileitungsmast oder einer Erdungsanlage vorbei und ist keine der Voraussetzungen nach 5.3.2 gegeben, ist – unabhängig von den Maßnahmen, die sich aus der Prüfung entsprechend Abschnitt 8 ableiten – durch technische Vereinbarungen der Beteiligten die Durchführung folgender Maßnahmen sicherzustellen:

- Ein gleichzeitiges Berühren der Rohrleitung und eines freigelegten Erders ist zu verhindern, z. B. durch Abdeckung des Erders durch isolierendes Material oder in Sonderfällen auch durch vorübergehendes Heraustrennen des Erders im Bereich der Näherungen durch die Hochspannungsnetzbetreiber oder die Deutsche Bahn AG.

- Bei Kreuzungen sind Erder oder mit der Erdungsanlage verbundene und als Erder wirkende Leitungen (z. B. Kabel mit Metallmantel und Erderwirkung, metallenes Wasserrohr) auf einer Länge von beiderseits 2 m zu isolieren.

Überschreitet aufgrund des Erdoberflächenpotentials die Berührungsspannung an der Rohrleitung bei Langzeitbeeinflussung 60 V oder bei Kurzzeitbeeinflussung 1 000 V, sind Maßnahmen nach 10.3.1 zu treffen.

9.7.3 Einführungen in Kraftwerke, Schalt- und Umspannanlagen

Eine in eine Hochspannungsstation eingeführte Rohrleitung ist von der Erdungsanlage durch den Einbau eines Isolierstückes elektrisch zu trennen, wenn bei einem Erdfehler in der Station die Erdungsspannung U_E die zulässigen Grenzwerte der Berührungsspannung nach DIN EN 61936-1 (VDE 0101-1), DIN EN 50522 (VDE 0101-2) überschreitet. Die Prüfspannung des Isolierstückes muss höher sein als die größtmögliche Erdungsspannung.

Das Isolierstück sollte außerhalb des Bereiches der Erdungsanlage, mindestens 2 m vom äußersten Erder entfernt, eingebaut werden und ist gegen zufälliges Berühren der Rohrleitung auf beiden Seiten des Isolierstückes zu schützen. Bei Arbeiten am Isolierstück sind Maßnahmen nach 10.3.1 notwendig. Durch entsprechende organisatorische Maßnahmen oder Hinweisschilder ist auf die Einhaltung der Schutzmaßnahmen hinzuwirken. Ebenfalls sind Maßnahmen nach 10.3.1 bei Arbeiten an dem Rohrleitungsabschnitt innerhalb des berührungsschutzkritischen Teils des Erderspannungstrichters der Anlage erforderlich. Bei Arbeiten an der Rohrleitung innerhalb der Erdungsanlage können Erdungsanlage und Rohrleitung miteinander zum Zweck des Potentialausgleichs verbunden werden.

Wenn das Isolierstück im Bereich der Erdungsanlage angeordnet wird, bestehen zusätzlich besondere Gefahren auf dem Rohrleitungsabschnitt zwischen dem Rand der Erdungsanlage und dem Isolierstück. Es darf keine Zufallsverbindung zwischen diesem Rohrleitungsabschnitt und der Erdungsanlage bzw. damit verbundenen Metallteilen entstehen können, da sonst die Erdungsspannung auf die nach außen führende Rohrleitung verschleppt würde. Bei Arbeiten an der Rohrleitung oder der Erdungsanlage in diesem Bereich sind Maßnahmen nach 10.3.1 und zusätzliche Maßnahmen zum Verhindern des gleichzeitigen Berührens beider Anlagenteile erforderlich. Ein Verbinden der Erdungsanlage mit der Rohrleitung zum Zwecke des Potentialausgleichs ist unzulässig.

Sollte das Isolierstück mit einer Trennfunkensecke versehen sein, so muss die 50-Hz-Ansprechspannung der Funkenstrecke größer als die maximale Spannungsdifferenz im ungünstigsten Erdkurzschlussfall sein.

10 Maßnahmen beim Bau und Betrieb von Rohrleitungen

10.1 Allgemeines

Durch konstruktive Maßnahmen allein können nicht alle Gefährdungen ausgeschlossen werden. Es müssen deshalb weitere Maßnahmen zum Schutz des Personals während der Bauzeit und bei Reparaturen angewendet werden, durch die Unfälle vermieden bzw. die Auswirkung von Unfällen begrenzt werden.

Für alle mit den Arbeiten vor Ort betrauten bzw. verantwortlichen Personen ist noch vor Beginn der ersten Tätigkeit auf der Baustelle eine Unterweisung über die möglichen Gefahren durch Hochspannungsbeeinflussung und über notwendige Schutzmaßnahmen erforderlich.

Es ist zu beachten, dass die Festsetzung der Grenzwerte für die maximal zulässigen Berührungsspannungen entsprechend Abschnitt 5 auf der Annahme einer Durchströmung Hand – Füße beruht. Bei Tätigkeiten, bei denen eine andere Durchströmung (z. B. Hand – Hand bzw. Hand – Rücken nicht auszu-schließen ist, sind zusätzliche Maßnahmen nach 10.3.1, 1. Absatz, zu treffen).

10.2 Generelle Maßnahmen

10.2.1 Gegenseitige Verständigung

Rechtzeitig vor Beginn der Arbeiten im Parallelführungs- bzw. Kreuzungsbereich ist der zuständige Betreiber

- der Hochspannungsfreileitung/des Hochspannungskabels (Netzbetreiber der Drehstrom-Hochspannungsleitung oder örtlich zuständige Niederlassung der DB Energie) bzw.
- der elektrifizierten Bahnstrecke (örtlich zuständige Niederlassung der DB Netz)

nochmals zu informieren.

Um unverzüglich auf Unfälle reagieren zu können, ist eine gegenseitige Verständigungsmöglichkeit für die Zeit der Bauphase zu vereinbaren.

10.2.2 Berühren einer unter Spannung stehenden Leitung

Unabhängig von Spannungsebene und Sternpunktbehandlung des Hochspannungsnetzes tritt die größte Gefahr für Personen bei Berührung eines unter Spannung stehenden Leiters auf. Als vordringlichste Sicherheitsmaßnahme muss deshalb das Berühren eines unter Spannung stehenden Leiters durch Baumaschinen und Geräte vermieden werden.

Informationen über die einzuhaltenden Mindestabstände zu Hochspannungsfreileitungen geben die BGV A3, Tabelle 4 der Durchführungsanweisung zu § 7 sowie die Vorgaben und Merkblätter der zuständigen Berufsgenossenschaft. Derzeit sei u. a. auf die folgenden BG-Unterlagen verwiesen:

- BGV C 22 „Bauarbeiten“
- BGI 759 (Erdarbeiten in der Nähe erdverlegter Kabel)
- Bausteine D 55 „Arbeiten in der Nähe elektrischer Freileitungen“ und B 72 „Bagger“ der BG BAU

Sollte die Spannungsebene der Freileitung nicht zweifelsfrei feststehen, ist ein Mindestabstand von 5 m einzuhalten. Eine Unterschreitung dieser Mindestabstände ist nur in Abstimmung mit dem zuständigen Hochspannungsnetzbetreiber bzw. des entsprechend 10.2.1 zuständigen Bereiches der Deutschen Bahn AG möglich.

Bei Energiekabeln ist der einzuhaltende Mindestabstand für den Einsatz von Maschinen sowie die Sicherungsmaßnahmen des Kabels vom Betreiber zu erfragen.

Die im Falle einer Berührung eines unter Spannung stehenden Leiters durch eine Maschine oder ein Baufahrzeug zu treffenden Maßnahmen sind den genannten Informationen der zuständigen BG zu entnehmen; diese Maßnahmen müssen auch Gegenstand der eingangs genannten Sicherheitsinformation sein.

Bei Energieversorgungsleitungen kann abhängig von der Betriebsweise des Netzes ein Erdkurzschluss bis zur Abschaltung der Leitung längere Zeit bestehen bleiben.

10.2.3 Trennung

Zwischen Rohrleitungen und Teilen von Hochspannungsanlagen (Gerüste, Zäune, Masten, Erder und Schienen) darf während der Bauphase auch kurzfristig keine leitende Verbindung hergestellt werden.

Es sei darauf hingewiesen, dass bei gleichzeitiger Berührung der Rohrleitung und einem der vorgenannten Bestandteile einer Hochspannungsanlage oder einer anderen Rohrleitung die Möglichkeit des Abgreifens einer kritischen Berührungsspannung bestehen kann.

Neben ihrem Einsatz an Hochspannungsanlagen können Erder auch ein Bestandteil von bereits verlegten, hochspannungsbeeinflussten Rohrleitungen sein. Beim unbeabsichtigten/ungeplanten Freilegen dieser Erder bei Tiefbauarbeiten ist der Eigentümer der Erderanlage zur Durchführung von Sicherungsmaßnahmen unverzüglich zu benachrichtigen.

Bevor eine Rohrleitung zusätzlich an das Erdersystem einer anderen Rohrleitung angeschlossen wird (z. B. bei einer neu errichteten Parallelleitung) sollte eine Überprüfung der Auswirkung dieser Maßnahme auf die Höhe der Beeinflussungsspannung des entstehenden, querverbundenen Leitungssystems erfolgen.

10.2.4 Gewitter

Bei einem Gewitter im Baustellenbereich besteht bei Arbeiten an metallenen Gegenständen eine erhöhte Gefährdung. Die Erdungsmaßnahmen zur Begrenzung der kapazitiven und induktiven Beeinflussung bieten keinen Schutz bei Gewittern. Daher sind für diese Zeit die Arbeiten an der Rohrleitung bzw. Rohrleitungseinrichtungen einzustellen.

10.2.5 Fühlbare Berührungsspannungen bei Langzeitbeeinflussung

Fühlbare Berührungsspannungen können u. U. an oberirdisch zugänglichen Einrichtungen (Schieber, Molchschleusen, ...) einer Rohrleitungsstation auftreten, falls die elektrische Trennung zwischen der Fernleitung und den Stationsrohrleitungen durch Isolierstellen in den Querabzweigen sichergestellt wird. Um bei für den Menschen unkritisch hohen, aber fühlbaren Berührungsspannungen von kleiner 60 V das Auftreten von Sekundärnfällen zu vermeiden, können Maßnahmen nach 10.3.1 ergriffen werden. Der Hinweis auf die Gefahr durch Warnschilder ist ebenfalls möglich.

Der Einsatz von Warnschildern erscheint insbesondere dort sinnvoll, wo Personal eingesetzt wird, welches mit der Problematik „Hochspannungsbeeinflussung“ nicht vertraut ist oder man nicht mit einer Hochspannungsbeeinflussung rechnet.

10.3 Maßnahmen beim Überschreiten der Grenzwerte

10.3.1 Rohrleitungspotential bei Kurzzeitbeeinflussung zwischen 1 000 V und 2 000 V

Es ist – abhängig von der Art der Tätigkeit und den örtlichen Gegebenheiten – die Schutzmaßnahme „Standortisolierung“ durch den Einsatz von

- persönlicher Schutzausrüstung (Bekleidung) entsprechend DIN 57680-1 (VDE 0680-1), (z. B. Gummistiefel und wasserabweisende Schutzbekleidung in feuchten Baugruben, ansonsten isolierende Handschuhe) sowie
- zusätzlich Unterlagen aus nichtleitendem Material bei Arbeiten im Sitzen und Liegen, welche die Kriterien der DIN 57680-1 (VDE 0680-1), erfüllen (z. B. Gummi- oder Kunststoffschutzmatten von mindestens 2,5 mm Stärke) bzw.
- isoliertem Werkzeug entsprechend DIN EN 60900 (VDE 0682-201) (z. B. isolierte Schlüssel, isolierte Schraubendreher) anzuwenden.

Bei der Auswahl der elektrisch isolierenden Schutzbekleidung sind für das Arbeiten an bereits in Betrieb befindlichen Rohrleitungen, die brennbare Medien transportieren, die Erfordernisse bezüglich Entflammbarkeit der Schutzausrüstungen sowie die Möglichkeit elektrostatischer Entladungen zu berücksichtigen.

Ist an der Arbeitsstelle bereits eine Standortisolierung (durch den Bodenbelag) oder eine Potentialsteuerung vorhanden, kann auf die elektrisch wirksamen Maßnahmen einer persönlichen, isolierenden Schutzausrüstung verzichtet werden.

10.3.2 Rohrleitungspotential bei Kurzzeitbeeinflussung über 2 000 V oder Langzeitbeeinflussung über 60 V

Erdungsmaßnahmen und/oder definierte Rohrstrangunterbrechungen sind zur Vermeidung gefährlich hoher Beeinflussungsspannungen entsprechend dem Baufortschritt vorzunehmen. Das Verbindungskabel Rohrleitung-Erder ist zuerst an den Erder und dann an die Rohrleitung anzuschließen. Gegebenenfalls sind auch Maßnahmen nach 10.3.1 anzuwenden. Falls erforderlich ist für die Baustelle ein Schutzkonzept (z. B. potentialsteuernde Erder) durch einen Sachkundigen zu erstellen.

10.4 Maßnahmen an noch nicht erdverlegten Rohrsträngen

10.4.1 Allgemeines

Noch nicht erdverlegte Rohrstränge sind als ideal isolierte Leiter anzusehen und werden im Nahbereich von Hochspannungsfreileitungen sowohl kapazitiv als auch induktiv beeinflusst.

Nach dem Verfüllen des Rohrgrabens entfällt die kapazitive Beeinflussung, jedoch nicht die induktive Beeinflussung.

10.4.2 Grenzlängen

Für Abstände von mehr als 10 m zwischen der Rohrleitung und der senkrechten Projektion des äußersten Leiterseils können die Grenzlängen

- für kapazitive Beeinflussung aus Bild 8 und
- für induktive Beeinflussung aus Bild 9

entnommen werden.

Bei kleineren Abständen als 10 m ist von einer Grenzlänge von

- 200 m für 50-Hz-Freileitungen mit UN > 110 kV und
- 1 000 m für 16,7-Hz -Freileitungen auszugehen.

Bei kapazitiver Beeinflussung durch 110-kV-Bahnstromleitungen erhöhen sich die Längen nach Bild 8 um den Faktor 5. Bei 15-kV-Fahr- und Speiseleitungen bleibt die kapazitive Beeinflussung außer Betracht.

10.4.3 Maßnahmen gegen kapazitive und induktive Beeinflussung beim Überschreiten der Grenzlänge

An Rohrsträngen, die länger als die Grenzlänge sind, sind zur Herabsetzung der kapazitiven und induktiven Beeinflussung an beiden Enden Erder mit der Rohrleitung zu verbinden. Diese Erder sollten mindestens 1 m tief in den Boden eingeschlagen werden.

10.5 Maßnahmen an teilweise oder ganz erdverlegten Rohrsträngen

10.5.1 Maßnahmen gegen induktive Beeinflussung beim Überschreiten der Grenzlänge

An Rohrsträngen, welche die Grenzlänge für induktive Beeinflussung überschreiten, sind Erder zu errichten und mit der Rohrleitung zu verbinden. Ein allgemein gültiges Erderkonzept kann in dieser Empfehlung nicht genannt werden, da jeder Fall separat betrachtet werden muss.

Die Festlegung der Standorte und Ausbreitungswiderstände der Erder (in der Regel $R_E < 10 \Omega$) kann zweckmäßigerweise durch einen Sachkundigen anhand von Berechnungen und Abschätzungen erfolgen. Ziel ist die Einhaltung der Grenzwerte für das Rohrleitungspotential nach Tabelle 3. Das für den Betriebszustand einer Rohrleitung erarbeitete Erderkonzept stellt in der Bauphase der Leitungen nicht in jedem Fall den Berührungsschutz sicher.

Definierte Rohrstrangunterbrechungen können in der Bauphase eine wirksame Alternative zu Zusatzerdern darstellen.

Die Möglichkeit von zeitweisen elektrischen Potentialverbindungen im Rahmen der Durchführung von Druckproben ist zu berücksichtigen.

10.5.2 Maßnahmen gegen gefährlich hohe Berührungsspannungen zwischen zwei Rohrsträngenden

Mit zunehmender Länge der zu verbindenden Rohrleitungsabschnitte steigt auch in der Regel die Spannungsdifferenz zwischen den Rohrsträngenden.

Auch bei unkritisch hohen Spannungen zwischen Rohrleitung und Erde kann zwischen zwei Rohrsträngenden eine gefährlich hohe Berührungsspannung bestehen. Daher ist die gleichzeitige Berührung beider Enden zu verhindern; ggf. ist mindestens ein Rohrstrangende isolierend abzudecken (z. B. durch eine Schweißerschutzmatte oder eine geeignete Kappe) und abzuschränken.

10.5.3 Maßnahmen beim Verbinden mit einer im Rohrgraben liegenden Rohrleitung

Vor dem Einbringen in den Rohrgraben ist der Rohrstrang mit der im Rohrgraben liegenden Rohrleitung elektrisch leitend durch ein Kabel mit isolierendem Mantel zu verbinden. Der Leiterquerschnitt ist gemäß DVGW GW 309 (A) zu bestimmen.

Das Herstellen des Potentialausgleichs zwischen zwei Rohrstrangenden kann bei überschaubaren Abschnitten durchaus von dem vor Ort arbeitenden Personal durchgeführt werden. Bei längeren Abschnitten (z. B. Druckprobenabschnitte bzw. Baulose von mehreren km Länge) und einer Gefährdung nach 10.5.2 kann der Einsatz einer Elektrofachkraft zur Herstellung der Kabelüberbrückung in Erwägung gezogen werden.

Eine Möglichkeit zur Vermeidung gefährlich hoher Wechselspannungen entsprechend 10.5.2 beim Aufbringen des Potentialverbindungskabels ist eine Trennstelle innerhalb des Kabels (z. B. NH-Sicherungslasttrenner).

Eine mechanisch belastbare, niederohmige Kontaktierung des Überbrückungskabels mit der Rohrleitung ist erforderlich, wobei das Zusammenfügen der Rohre und der Schweißvorgang nicht behindert werden darf. Dies ist beispielsweise möglich durch Schellen, die aus zwei Halbkreissegmenten bestehen und deren Größe an die Nennweite der Rohrleitung angepasst ist. Zur besseren Kontaktierung sollten sie mit einer „Kontaktschraube“ versehen sein. Weiter haben sich Kontaktierungen durch geeignete Schweißverfahren bewährt; von einem Einsatz von Haftmagneten ist aber in jedem Fall abzusehen.

Nach dem Setzen der Zentriereinrichtung kann die Potentialverbindung wieder entfernt werden.

10.5.4 Maßnahmen bei räumlich begrenzten Umlegungen von Rohrleitungen

Bei räumlich begrenzten Umlegungen sind die Trennstellen vor dem Schneiden der Rohrleitung durch geeignete Kabelverbindungen zu überbrücken (siehe Bild 10). Ziel ist die Sicherstellung einer ununterbrochenen elektrischen Längsleitfähigkeit der Rohrleitung, und damit einer unveränderten Beeinflussungssituation, unabhängig vom Fortschritt der Baumaßnahme. Der Leiterquerschnitt ist gemäß DVGW GW 309 (A) zu bestimmen; eine ausreichende mechanische Festigkeit der Kabelanschlüsse, sowie eine gesicherte Verlegung des Kabels, ist erforderlich. Nach dem Einbinden des Umlegungsabschnittes können die Kabelüberbrückungen wieder entfernt werden.

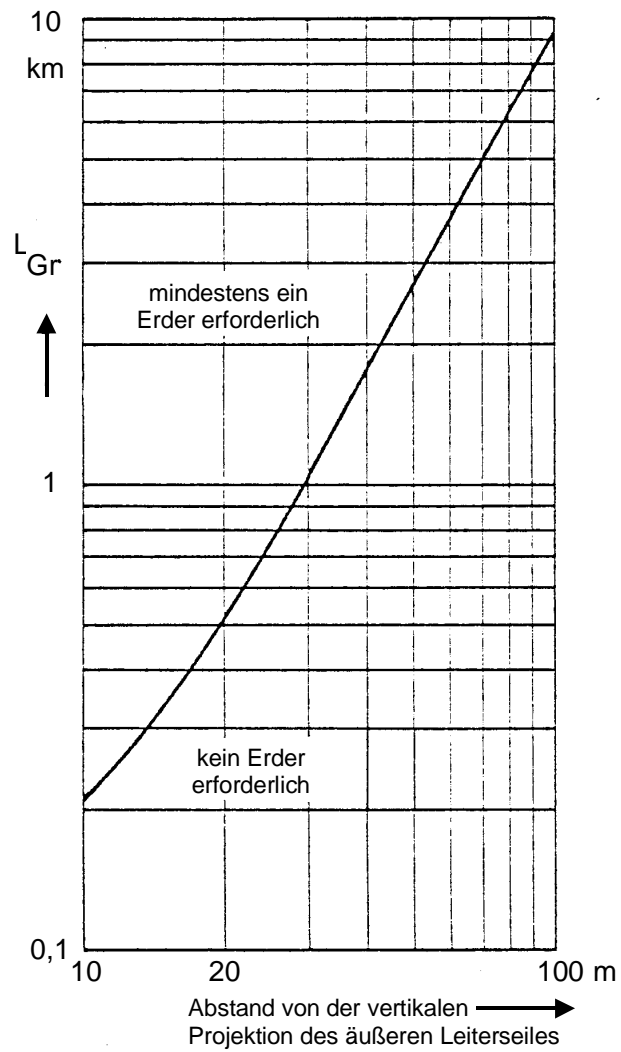
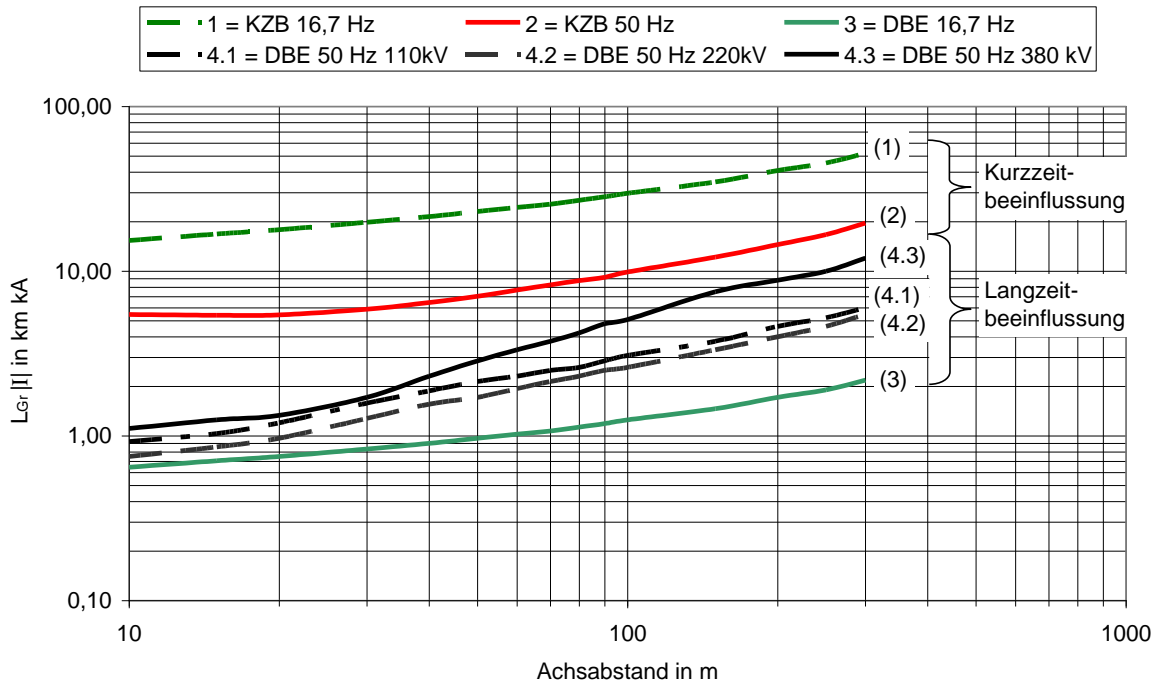


Bild 8 – Grenzlänge L_{GR} eines isoliert gelagerten Rohrstranges bei kapazitiver Beeinflussung durch 50-Hz-Drehstromfreileitungen mit Nennspannungen von 110 kV und darüber

ANMERKUNG: Bei zusätzlicher induktiver Beeinflussung ist an jedem Näherungsende mindestens ein Erder erforderlich.



- (1) 16,7 Hz-Erdkurzschlussstrom $|I_K|$
mit $w = 0,7$ und $r_S = 0,5$
- (2) 50 Hz-Erdkurzschlussstrom $|I_K|$
mit $w = 1,0$, Donau-Mastform, 1 Al/St-Erdseil (265/35)
- (3) 16,7 Hz-Fahrstrom $|I_F|$
mit $w = 1,0$ und $r_S = 0,5$
- (4.1) 50 Hz-Betriebsstrom $|I_B|$
mit $w = 1,0$, 110 kV-Mast, Tannen-Mastform, 1 Al/St-Erdseil (265/35)
- (4.2) 50 Hz-Betriebsstrom $|I_B|$
mit $w = 1,0$, 220 kV-Mast, Tannen-Mastform, 1 Al/St-Erdseil (265/35)
- (4.3) 50 Hz-Betriebsstrom $|I_B|$
mit $w = 1,0$, 380 kV-Mast, Donau-Mastform, 1 Al/St-Erdseil (265/35)

Bild 9 – Auf den Betriebs- bzw. Erdkurzschlussstrom bezogene Grenzlänge L_{Gr} eines isoliert gelagerten Rohrstranges bei induktiver Beeinflussung

Neben dem Abstand sind auch die Dauer- und Erdkurzschlussströme des beeinflussenden Systems zu berücksichtigen. Solange das Produkt aus ermittelter Grenzlänge und dem beeinflussenden Strom unterhalb der relevanten Kurven liegt, sind keine zusätzlichen Maßnahmen gegen induktive Beeinflussung des isoliert gelagerten Rohrstranges notwendig.

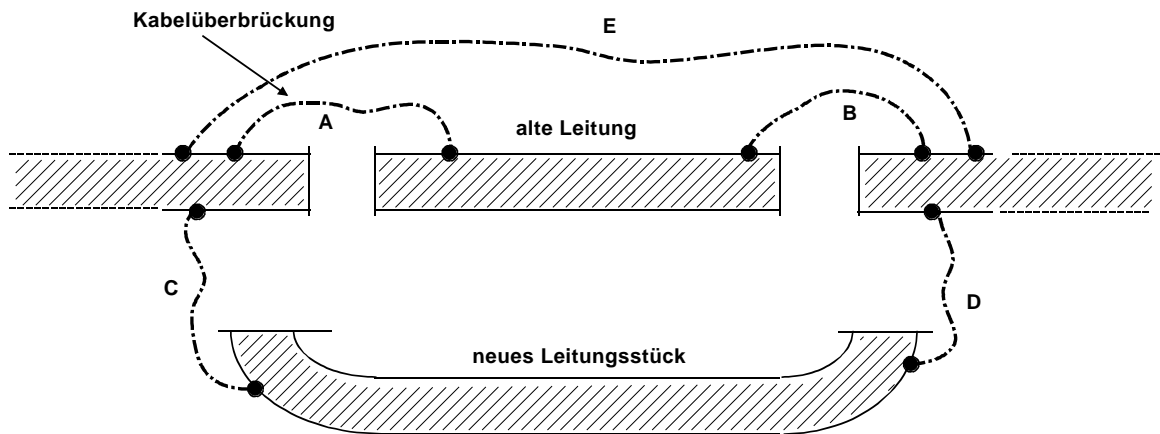


Bild 10 – Maßnahmen bei räumlich begrenzten Umlegungen von Rohrleitungen
 Abhängig vom Baufortschritt muss die elektrische Längsleitfähigkeit der Rohrleitungen sichergestellt werden. Dies kann entweder über die Kabelbrücken „A“ und „B“ oder über die Kabelbrücken „C“ und „D“ oder über die Kabelbrücke E erfolgen.

11 Messtechnische Ermittlung des Rohrleitungspotentials und der Berührungsspannung

11.1 Allgemeines

Ergibt die Prüfung anhand der Auswahlkriterien nach 7.2 und oder der Grenzwerte nach 7.3 und Abschnitt 8, dass höhere Rohrleitungspotentiale bzw. Berührungsspannungen an Rohrleitungen zu erwarten sind als nach Abschnitt 6 zugelassen ist, kann die Höhe des Rohrleitungspotentials gemäß 12.1 bzw. 12.2 bestimmt werden.

Zeigt das Ergebnis der Berechnungen, dass Schutzmaßnahmen größeren Umfangs notwendig werden können, empfiehlt es sich, die Werte des Rohrleitungspotentials oder der Berührungsspannung unter Beteiligung des zuständigen Hochspannungs-Netzbetreibers bzw. der DB-Systemtechnik zu messen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Berührungsspannung kleiner oder gleich dem Rohrleitungspotential ist.

Unter Verwendung der heute üblichen Messgeräte mit einem Eingangswiderstand von $R \geq 1 \text{ M}\Omega$ kann das Rohrleitungspotential einer Rohrleitung mit guter Umhüllungsqualität gegen eine Elektrode (Erdspeiß oder eine Bezugs elektrode) gemessen werden, welche sich schon in unmittelbarer Nähe (Abstand ca. 1 m zum Rohr) auf dem Potential der unbeeinflussten „Fernen Erde“ befinden kann. Voraussetzung dafür ist allerdings, dass am Messort keine größere „natürliche“ oder „künstliche“ Fehlstelle in der Rohrumhüllung (Umhüllungsfehlstelle, Messprobe oder Probeblech) oder ein Rohrleitungserder einen Wechselspannungstrichter hervorruft. Andernfalls sollte sich die Messelektrode in einem geeigneten Abstand (z. B. bei Rohrleitungserdern in einem Abstand von $a > 40 \text{ m}$ von der Rohrleitung bzw. dem Rohrleitungserder) befinden. Um Fehlmessungen durch eine induktive Beeinflussung der Messleitung zu vermeiden, sollte darauf geachtet werden, dass die Messleitung nahezu rechtwinklig zu den beeinflussenden Systemen ausgelegt werden.

- Bei Anwendung der Potentialsteuerung ist die Berührungsspannung mit einem Spannungsmesser von $1 \text{ k}\Omega$ Eingangswiderstand oder mit einem hochohmigen Messgerät über einen $1\text{-k}\Omega$ -Lastwiderstand zu messen. Soweit es sich um eine Berührungsspannung zwischen Hand und Fuß handelt, ist zur Nachbildung der Füße eine Erdelektrode von 400 cm^2 , die mit einer Mindestkraft von 500 N be-

lastet wird, erforderlich. Ersatzweise darf auch ein mindestens 20 cm tief eingetriebener Erdspieß verwendet werden.

- Bei Anwendung der Isolierung des Standortes ist nach DIN EN 61936-1 (VDE 0101-1), DIN EN 50522 (VDE 0101-2) eine messtechnische Prüfung nicht erforderlich, wenn die Maßnahme nach den Absätzen 2 und 3 des Abschnittes 9.5 ausgeführt ist.
- Bezüglich der Beeinflussungsmessungen, die der Ermittlung der maximalen Beeinflussung im ungünstigsten Fall oder des Umweltreduktionsfaktors (jeweils als Zwischenschritt) dienen, sollten die Hinweise in 11.2 und 11.3 beachtet werden.

11.2 Messtechnische Ermittlung der induzierten Dauerbeeinflussungsspannung

Eine häufige Anwendung von Messungen zur Ermittlung der maximalen Dauerbeeinflussung ergibt sich bei Rohrleitungen, welche durch eine oder mehrere elektrifizierte Wechselstrom-Bahnanlagen beeinflusst werden.

Die maximalen Fahrströme von elektrifizierten Bahnstrecken werden oft in Form von so genannten „Fahrstromdiagrammen“ zur Verfügung gestellt. Diese Diagramme stellen die Hüllkurve der maximal möglichen Fahrstromspitzen, ermittelt unter Berücksichtigung von Anfahrvorgängen entsprechend den Regelfahrplänen, dar. Sollte es zu einer Überschneidung von Beeinflussungsabschnitten zweier unterschiedlicher Bahnstrecken auf einer Rohrleitung kommen, wird eine Berechnung der Hochspannungsbeflussung in der Regel ein zu ungünstiges Ergebnis zeigen, da meist nicht davon auszugehen ist, dass auf beiden Bahnstrecken Anfahr- und Beschleunigungsvorgänge absolut zeitsynchron stattfinden.

Die Ermittlung aussagefähiger Messwerte setzt dabei voraus, dass zusammen mit der Messung der Wechselspannung Rohrleitung gegen ferne Erde auch der im entsprechenden Abschnitt eingespeiste Oberleitungsstrom (Abzweigstrom des entsprechenden Unterwerkes) registriert werden muss, um einerseits auch das Auftreten von Belastungen zu erfassen, deren Höhe den Werten des Fahrstromdiagramms entspricht, bzw. um die ermittelten Maximalwerte auf die Spitzenbelastungen des Fahrstromdiagramms hochzurechnen. Auch sollten die relevanten – fahrplanabhängigen – Zeiträume der Messungen mit dem Betreiber der Bahnanlage abgestimmt werden.

Falls Datenlogger zur Erfassung der Beeinflussungsspannung verwendet werden, sollte aufgrund der Möglichkeit kurzer Anstiegs- und Abfallzeiten von der Grundlast auf die Maximallast bei den durch Anfahrvorgänge hervorgerufenen Spannungsspitzen das gewählte Messintervall $t_m < 1$ Sekunde sein.

Auch bei der messtechnischen Ermittlung der Dauerbeeinflussung durch Betriebsströme auf Drehstrom-Hochspannungsfreileitungen sollte zeitgleich mit den Messungen der Wechselspannung zwischen der Rohrleitung und dem Potential der fernen Erde auch eine Registrierung der Betriebsströme (oder der Übertragungsleistung) durch den zuständigen Netzbetreiber erfolgen.

Im einfachsten Fall – der Beeinflussung nur durch die Näherung zu einer Hochspannungsfreileitung mit nur einem Stromkreis – kann die maximal zu erwartende Beeinflussungsspannung auf der Rohrleitung aus dem Verhältnis des maximal zu erwartenden Betriebsstromes zum aktuellen Betriebsstrom ermittelt werden.

Bei der Überlagerung einzelner Beeinflussungsspannungen entspricht die gemessene resultierende Beeinflussungsspannung nicht der Summe der Beträge der Einzelkomponenten, da es in Abhängigkeit der Phasenauflegung auf den Masten sowie der Lastflussrichtung sowohl zu verstärkenden wie auch zu abschwächenden Effekten auf die Höhe der Beeinflussungsspannung kommen kann. Daher ist, sofern

eine induktive Beeinflussung durch eine oder mehrere Hochspannungsfreileitungen mit mehreren Drehstromsystemen vorliegt, zur korrekten Auswertung der Messung neben der Höhe der Betriebsströme auch die Lastflussrichtung von Bedeutung.

11.3 Messtechnische Ermittlung der induktiven Kurzzeitbeeinflussung

In Hochspannungsnetzen mit starrer Sternpunktterdung ergibt sich eine Berührungsspannung Rohrleitung – Erde im Nahbereich der Hochspannungsanlage aus der vektoriellen Addition der ohmschen Komponente (Spannungstrichter der Hochspannungsanlage) und der induktiv in die Rohrleitung eingekoppelten Wechselspannung. Eine messtechnische Ermittlung der Berührungsspannung ist zu empfehlen, wenn die betragsmäßige Addition der ohmschen und der induktiven Komponente deutlich mehr als der Grenzwert von $U_{K \max} < 1\,000\text{ V}$ beträgt.

Die Messungen auf der Rohrleitung werden zweckmäßigerweise im Rahmen einer Erdungsmessung – einschließlich der Maßnahmen zur Störspannungseliminierung entsprechend der DIN EN 61936-1 (VDE 0101-1), DIN EN 50522 (VDE 0101-2) – durchgeführt. Die Art der Einspeisemethode (z. B. Umpolungsmethode, Schwebungsmethode oder Digitales Messverfahren) bestimmt die Auswahl der Messgeräte für die Aufnahme der Beeinflussungsspannungen auf der Rohrleitung.

Für den Nahbereich der Umspannanlage ergibt sich die Höhe der Berührungsspannung aus der Multiplikation der Messwerte mit dem Verhältnis zwischen dem realen Erdkurzschlussstrom und dem eingespeisten Versuchsstrom.

Sofern auf der Rohrleitung eine relevante Beeinflussungsspannung durch Hochspannungsanlagen mit unterschiedlicher Netzfrequenz auftritt, sind frequenzselektive Messungen – z. B. durch ein selektives Filter – notwendig.

12 Berechnungsverfahren

12.1 Induktive Beeinflussung

12.1.1 Allgemeines

Es werden die mathematischen Zusammenhänge der Beeinflussung angegeben. Aus den aufgeführten Gleichungen und den zugehörigen Diagrammen ist eine Abschätzung der Beeinflussung möglich. In der Praxis werden üblicherweise Computerprogramme eingesetzt, die auf den hier beschriebenen mathematischen Zusammenhängen basieren [7, 8, 13].

Eine nennenswerte induktive Beeinflussung von Rohrleitungen ist im Allgemeinen nur bei längeren, engen Näherungen oder Parallelführungen mit Drehstromfreileitungen von $U_N > 110\text{ kV}$ oder Fahr- und Speiseleitungen von Wechselstrombahnen zu erwarten. Das Problem gewinnt mit steigenden Betriebs- und Kurzschlussströmen in elektrischen Anlagen und der Verbesserung der Rohrumhüllungen an Bedeutung. Durch die Magnetfelder der in elektrischen Leitungen fließenden Wechselströme werden in benachbarten Leitern aus Metall unabhängig von deren Anordnung über der Erdoberfläche oder im Erdreich Spannungen induziert, die bei einer elektrisch durchverbundenen Rohrleitung Ströme in der Rohrleitung und Spannungen zwischen der Rohrleitung und dem umgebenden Erdboden zur Folge haben.

Es sei darauf hingewiesen, dass die Ergebnisse der Berechnungen zu induktiven Beeinflussung sowie die aus ggf. vorhandenen Grenzwertüberschreitungen (Tabelle 3) resultierenden Schutzmaßnahmen aus definierten Beeinflussungssituationen resultieren. Durch beeinflussungsrelevante Änderungen sowohl an

der Hochspannungsfreileitung als auch an der beeinflussten Rohrleitung können sich deutliche Veränderungen der maximalen Dauer- und Kurzzeitbeeinflussungsspannungen ergeben. Daher ist es erforderlich, im Rahmen solcher Systemänderungen Nachberechnungen zur induktiven Hochspannungsbeeinflussung durchzuführen – und damit die weitere Einhaltung der Berührungsschutzkriterien sicherzustellen bzw. Grenzwertüberschreitungen rechtzeitig zu erkennen und durch gezielte Gegenmaßnahmen zu beseitigen.

Aufgrund der üblicherweise vorhandenen Komplexität der Beeinflussungssysteme sollte auch ohne bauliche Veränderungen im Beeinflussungsabschnitt in regelmäßigen Zeitabständen – mindestens jedoch alle zehn Jahre – geprüft werden, inwieweit die seinerzeit durchgeführten Prüfungen/Berechnungen noch Gültigkeit besitzen, da sich z. B.

- durch entferntere Umbaumaßnahmen im Hochspannungsnetz zumindest Änderungen in der Erdkurzschlussleistung ergeben können und
- bei Erdern mit der Zeit (durch Korrosionen oder Deckschichtbildungen bedingt) Erhöhungen des Ausbreitungswiderstandes ergeben können.

12.1.2 Mathematischer Zusammenhang

Verfahren für die Ermittlung der bei induktiver Beeinflussung entstehenden Spannung zwischen einer erdverlegten Rohrleitung und dem Erdboden sind in der Literatur angegeben, z. B. [4, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 15] und [16]. Wegen der sehr gut elektrisch isolierenden Rohrumhüllung liegt diese Spannung zwischen der Rohrleitung und dem unmittelbar umgebenden Erdboden an. Fehlstellen in der Umhüllung sind im Allgemeinen sehr klein; die hier entstehenden Spannungstrichter haben eine Ausdehnung von nur wenigen Dezimetern.

Eine Abschätzung der an einer beeinflussten Rohrleitung auftretenden Spannung gegen ferne Erde (Rohrleitungspotential genannt) erfolgt zweckmäßig aus der in einen ideal isolierten Leiter induzierten Längsfeldstärke E (Spannung pro Längeneinheit) und den elektrischen Kenngrößen der Rohrleitung mit Hilfe der Leitungstheorie.

Für die Berechnung werden folgende Annahmen getroffen:

- die Rohrleitung verläuft parallel zur beeinflussenden Leitung
- die Koordinatenbezeichnung für die Mitte der Parallelführung $x = 0$ und für deren Enden $x = \pm L / 2$
- die Rohrleitung ist auf beiden Seiten mit dem Wellenwiderstand abgeschlossen (das ist der Fall, wenn die Kennlänge der Rohrleitung erreicht wird, siehe Bild 15 e) bzw. 16 e))
- die Rohrleitung ist kontinuierlich geerdet, d. h. sie hat einen gleichmäßigen spezifischen Umhüllungswiderstand
- der spezifische Bodenwiderstand entlang der Parallelführung ist gleich bleibend
- bei Kurzzeitbeeinflussung tritt der Erdkurzschluss außerhalb der Parallelführung auf

Mit diesen Annahmen ergibt sich entsprechend dem elektrischen Ersatzschaltbild für eine Rohrleitung (Bild 11) aus der Leitungstheorie innerhalb der Parallelführung für das Rohrleitungspotential:

$$|U_R| = \frac{|E|}{2 \times |\gamma|} \times \frac{|e^{\gamma x}|}{|e^{\gamma L/2}|} \times \left(1 - e^{-2\gamma x}\right) \quad (5)$$

und für den Strom in der Rohrleitung:

$$|I_R| = \frac{|E|}{|Z_W| \times |\gamma|} \times \left(1 - \frac{\cosh(\gamma x)}{e^{\gamma L/2}}\right) \quad (6)$$

Dabei ist

$|E|$ Betrag der induzierten Längsfeldstärke im ideal isolierten Leiter (Spannung je Längeneinheit)

$|\gamma|$ Betrag des Übertragungsmaßes der Rohrleitung

γ komplexer Wert des Übertragungsmaßes der Rohrleitung

$|Z_W|$ Betrag des Wellenwiderstandes der Rohrleitung und

L Länge der Parallelführung

Das maximale Rohrleitungspotential (siehe Bild 12) tritt bei homogenen Verhältnissen an den Enden der Parallelführung bei $x = \pm L / 2$ auf:

$$|U_{Rmax}| = \frac{|E|}{2 \times |\gamma|} \times \left(1 - e^{-\gamma L}\right) \quad (7)$$

Innerhalb der Parallelführung kann das Rohrleitungspotential auch aus $|U_{Rmax}|$ und der Kennlänge (charakteristische Länge) L_K der Rohrleitung ermittelt werden:

$$\frac{|U_R|}{|U_{Rmax}|} = e^{\frac{L}{L_K} \times \left(\frac{x}{L} - \frac{1}{2}\right)} \times \frac{\left(1 - e^{-2\gamma x}\right)}{\left(1 - e^{-\gamma L}\right)} \quad (8)$$

Der Verlauf dieser Funktion ist im Bild 13 dargestellt. Für Rohrleitungen mit $L/L_K \leq 2$ ergibt sich praktisch eine lineare Abhängigkeit von x .

Außerhalb der Parallelführung klingen das Rohrleitungspotential und der Rohrstrom nach Exponential-Funktionen ab (siehe Bild 12):

$$|U_R| = |U_{Rmax}| \times e^{-y/L_K} \quad (9)$$

$$|I_R| = |I_R|_{L/2} \times e^{-y/L_K} \quad (10)$$

Der Verlauf des Rohrleitungspotentials außerhalb der Parallelführung nach Gleichung (9) ist im Bild 14 mit dem spezifischen Umhüllungswiderstand als Parameter dargestellt (hier jedoch mit logarithmisch geteilter Abszisse y).

ANMERKUNG: Bei gleichzeitiger Beeinflussung einer Rohrleitung durch 50-Hz- und 16,7-Hz-Systeme, wird die resultierende Spannung U_R an jedem Punkt der Rohrleitung durch quadratische Summation der jeweiligen einzelnen Teilbeträge ermittelt.

12.1.3 Berechnung der Kenngrößen erdverlegter Rohrleitungen

Das Übertragungsmaß γ ist nach den Gleichungen im vorherigen Abschnitt die entscheidende Kenngröße einer Rohrleitung

$$\gamma = \sqrt{(R'_L + j\omega \times L') \times (G' + j\omega \times C')} \quad (11)$$

wobei der Phasenwinkel des Übertragungsmaßes eine wesentliche Rolle spielt:

$$\varphi_\gamma = \frac{1}{2} \times \left[\arctan \frac{\omega \times L'}{R'_L} + \arctan \frac{\omega \times C'}{G'} \right] \quad (12)$$

Für den Wellenwiderstand einer Rohrleitung gilt:

$$Z_{W} = \sqrt{(R'_L + j\omega \times L') / (G' + j\omega \times C')} \quad (13)$$

$$\varphi_{Z_W} = \frac{1}{2} \times \left[\arctan \frac{\omega \times L'}{R'_L} - \arctan \frac{\omega \times C'}{G'} \right] \quad (14)$$

Für eine Abschätzung des Rohrleitungspotentials kann mit den Beträgen der Kenngrößen gerechnet werden:

$$|\gamma| = \sqrt[4]{(R'^2_L + \omega^2 L'^2) \times (G'^2 + \omega^2 C'^2)} \quad (15)$$

$$|Z_W| = \sqrt[4]{(R'^2_L + \omega^2 L'^2) / (G'^2 + \omega^2 C'^2)} \quad (16)$$

$$\left(1 - e^{-\gamma L}\right) = \sqrt{\left[1 - \frac{\cos(|\gamma| \times L \times \sin \varphi_\gamma)}{e^{|\gamma| \times L \times \cos \varphi_\gamma}}\right]^2 + \left[\frac{\sin(|\gamma| \times L \times \sin \varphi_\gamma)}{e^{|\gamma| \times L \times \cos \varphi_\gamma}}\right]^2} \quad (17)$$

$$L_K = \frac{1}{\gamma \times \cos \varphi_\gamma} \quad (18)$$

Die Kenngrößen einer Rohrleitung sind von der Frequenz des beeinflussenden Stromes abhängig. In den Bildern 15 a) bis 15 e) sind sie für 50 Hz und in den Bildern 16 a) bis 16 e) für 16,7 Hz dargestellt. Das Bild 17 gilt für beide Frequenzen.

Für die Darstellung der Gleichungen wurde eingesetzt:

$$R'_L = \frac{\sqrt{\rho_{St} \times \mu_0 \times \mu_r \times \omega}}{\pi \times d_R \times \sqrt{2}} + \frac{\mu_0 \times \omega}{8} \quad (19)$$

$$\omega \times L' = \frac{\mu_0 \times \omega}{4\pi} \times 2 \ln \frac{3,7 \times \sqrt{\rho_E}}{d_R \times \sqrt{\mu_0 \times \omega}} + \frac{\sqrt{\rho_{St} \times \mu_0 \times \mu_r \times \omega}}{\pi \times d_R \times \sqrt{2}} \quad (20)$$

$$G' = \frac{\pi \times d_R}{r_u} = \frac{\pi \times D \times J}{0,3 \times V} \quad (21)$$

$$\omega \times C' = \frac{\omega \times \pi \times D \times \varepsilon_0 \times \varepsilon_r}{\delta} \quad (22)$$

Dabei ist

- D Außendurchmesser der Rohrleitung
- ρ_E spezifischer Bodenwiderstand, z. B. 100 Ωm
- ρ_{St} spezifischer Gleichstromwiderstand von Stahl, z. B. 0,16 $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$
- μ_r relative Permeabilitätszahl von Stahl, z. B. 200
- ε_r relative Dielektrizitätszahl der Rohrumhüllung, z. B. 5 für Bitumen und 2,3...2,4 für PE
- δ Stärke der Rohrumhüllung, z. B. 3 mm
- r_u durch Fehlstellen in der Umhüllung bedingter spezifischer Umhüllungswiderstand (auf die Fläche bezogener Umhüllungswiderstand), der z. B. durch einen beim kathodischen Korrosionsschutz üblichen Gleichstrom-Einspeiseversuch aus $r_u = (\Delta U / \Delta I) \times \pi \times D \times \Delta L$ für einen Rohrabschnitt mit der Länge ΔL bestimmt werden kann für $\Delta U = 0,3 \text{ V}$ (Anhaltswerte siehe Tabelle 11)
- J Gleichstromdichte, bezogen auf eine Änderung des Rohr/Bodenpotentials um $\Delta U = 0,3 \text{ V}$ bei ein- bzw. ausgeschaltetem Schutzstrom

Die Werte für den spezifischen Widerstand des Erdreichs und die Permeabilitätszahl können in Einzelfällen stark wechseln; sie gehen jedoch nur wenig in die Ergebnisse ein; die Annahme von konstanten Werten ist deshalb im Rahmen der sonstigen Unsicherheiten gerechtfertigt, siehe z. B. [14] und [16].

Der spezifische Umhüllungswiderstand r_u bestimmt wesentlich die Kenngrößen einer Rohrleitung. Nach Gleichung (21) ist er mit dem ohmschen Ableitungsbelag G' und über $R_R = r_u / (\pi \times D \times L)$ auch mit dem Erdungswiderstand R_R der Rohrleitung verknüpft. Für ältere Rohrleitungen mit Bitumenumhüllung haben umfangreiche Untersuchungen [14] gezeigt, dass der Erdungswiderstand einer Rohrleitung mit Bitumenumhüllung sehr stark von der Höhe der Spannung zwischen Rohr und Erdboden abhängt. Bei Werten ab wenigen hundert Volt traten an den Fehlstellen Glimmentladungen auf, die zu einer Verringerung des Erdungswiderstandes führen, ab etwa 1 kV oder wenig darüber kam es zur Ausbildung von Lichtbögen zwischen Rohr und Erdreich, die den Erdungswiderstand um mehrere Zehnerpotenzen zusammenbrechen lassen. Außerdem traten an Schwachstellen in der Umhüllung zusätzlich Durchschläge auf, die den Erdungswiderstand noch weiter herabsetzen.

Abhängig vom Zustand der Bitumenumhüllung und der Ausprägung von – durch den kathodischen Korrosionsschutz begründeten – Deckschichten kann durch die beschriebenen Ableitungseffekte das Rohrleitungspotential auf etwa 1 500 V begrenzt werden.

Bei Polyethylenumhüllungen ergibt sich eine höhere Durchschlagfestigkeit und eine wesentlich geringere Anzahl von Fehlstellen in der Umhüllung. Daher ist bei der Höhe der durch elektromagnetische Einkopplung hervorgerufenen Spannungen zwischen der Rohrleitung und dem Erdreich nicht von nennenswerten Entladungen an Poren bzw. Fehlstellen auszugehen. Die Möglichkeit einer natürlichen Spannungsbegrenzung ist bei PE-umhüllten Rohrleitungen aus diesem Grund nicht gegeben.

12.1.4 Induzierte Längsfeldstärken in ideal isolierten Leitern bei Parallelführungen

12.1.4.1 Allgemeines

Nennenswerte induzierte Längsfeldstärken (Spannungen je Längeneinheit) sind im Allgemeinen nur durch Ströme in Drehstromfreileitungen mit Nennspannungen von 110 kV und darüber sowie durch Ströme in Fahr- und Speiseleitungen zu erwarten. Die Höhe der induzierten Feldstärke hängt ab

- von der Größe und Frequenz des beeinflussenden Stromes
- von der auf die Längeneinheit bezogenen Gegeninduktivität zwischen dem stromführenden und dem beeinflussten Leiter, d. h. also von deren Abstand und vom spezifischen elektrischen Widerstand des Erdreiches
- vom Reduktionsfaktor, der die Schutzwirkung benachbarter geerdeter Leiter berücksichtigt

Nach Bild 18 sind die bei Parallelführungen mit Drehstromfreileitungen durch Betriebsströme $|I_B|$ induzierten Längsfeldstärken $|E_B|$ zu $|I_B|$ erheblich geringer als die durch Erdkurzschlussströme $|I_K|$ induzierten Werte $|E_K|$ zu $|I_K|$, außerdem werden die ersteren mit zunehmendem Abstand a schneller kleiner.

Die induzierte Längsfeldstärke E kann nach der TE1 der SfB ermittelt werden aus der Gleichung

$$E = 2\pi \times f \times M' \times I \times r \quad (23)$$

Die TE1 der SfB enthält auch Tabellen und Diagramme für die Reduktionsfaktoren r sowie für die längenbezogene Gegeninduktivität M' bei $f = 50$ Hz und $f = 16,7$ Hz.

Der Strom I ist abhängig vom zu betrachtenden Beeinflussungsfall zu wählen. Dabei ist $I = I_B$ bzw. I_F im normalen Betrieb und $I = I_K \times w$ im Kurzschlussfall. Der Erwartungsfaktor w ist ein Wahrscheinlichkeitsfaktor, der für den bei Kurzzeitbeeinflussungsuntersuchungen zugrunde zu legenden Strom anzuwenden ist (siehe 12.1.4.2 und 12.1.4.3).

12.1.4.2 Beeinflussung durch Erdkurzschlussströme in Drehstrom-Hochspannungsfreileitungen

Der Erwartungsfaktor w berücksichtigt (auf statistischer Basis) das unwahrscheinliche Zusammentreffen eines ungünstigen Erdkurzschlusses (z. B. am Ende des Näherungsabschnittes) im Drehstrom-Freileitungsnetz zeitgleich mit einer Berührung des beeinflussten Objektes (Rohrleitung). Zu begründen ist dies u. a. mit Anwendung der organisatorischen Maßnahmen entsprechend Abschnitt 10.

Des Weiteren liegt bei Drehstrom-Hochspannungsfreileitungen mit hoher Zuverlässigkeit die Abschaltzeit bei $t_A \leq 0,2$ s; daraus resultieren eigentlich höhere als nach Tabelle 3, Zeile 3 beschriebene, zulässige Beeinflussungsspannungen.

Als Wert für den Erwartungsfaktor w ist

- im Höchstspannungsnetz (z. B. 220 kV und 380 kV-Netz) mit $t_A < 0,2$ s
 - $w = 1,0$ für Betrachtungen zum Berührungsschutz in der Bauphase der Rohrleitung
 - $w = 0,7$ für Betrachtungen zum Berührungsschutz in der Betriebsphase der Rohrleitung
 - $w = 1,0$ für Betrachtungen zur Gerätebeanspruchung

- in allen Drehstromnetzen mit $U_N \geq 110 \text{ kV}$ bei Abschaltzeiten von $t_A > 0,2 \text{ s}$ ist
 - $w = 1,0$

anzunehmen.

12.1.4.3 Beeinflussung durch Kurzschlussströme in Fahr- und Speiseleitungen

Bei der Berechnung der Beeinflussungsspannung durch Kurzschlussströme (Fehlerfall) von Wechselstrom-Bahnanlagen ist der induzierende Kurzschlussstrom I_K mit dem Erwartungsfaktor $w = 0,7$ zu multiplizieren.

Durch diesen Faktor wird die Tatsache berücksichtigt, dass bei der Berechnung des Kurzschlussstromes das gleichzeitige Auftreten aller ungünstigsten Verhältnisse (u. a. volle Kraftwerks- und Unterwerksleistung, geringster Streckenwiderstandsbelag aller betriebsmäßig parallelschaltbarer Oberleitungen, (siehe auch DIN VDE 0845-6) zugrunde gelegt wurden und dass das Zusammentreffen dieser ungünstigsten Verhältnisse sehr unwahrscheinlich ist.

12.1.4.4 Dauerbeeinflussung durch Betriebs- und Fahrströme

Im Nahbereich von Drehstromfreileitungen ist das durch die Betriebsströme verursachte Magnetfeld nicht gleich Null, obwohl in einem Drehstromsystem die Summe der Ströme gleich Null ist.

Ein Weg für die Berechnung des resultierenden Magnetfeldes ist in [6] aufgezeigt. Mit Hilfe des dort entwickelten Rechenprogramms wurden als Beispiele für die induzierte Längsfeldstärke die Werte der Bilder 19 und 20 ermittelt, siehe [15]. Die Diagramme gelten für Freileitungen mit einem Erdseil Al/St 240/40; in jedem System fließt der Betriebsstrom $|I_B|$, beide Systeme sind parallel geschaltet. Angenommen ist ein spezifischer Erdwiderstand $\rho = 100 \Omega\text{m}$. Bei anderen spezifischen Erdwiderständen ergeben sich geringfügig abweichende Längsfeldstärken.

Bei Beeinflussung durch mehr als zwei Hochspannungssysteme ergibt die phasengerechte Summierung der induzierten Teilfeldstärken die resultierende Längsfeldstärke im ideal isolierten Leiter.

Bei der Dauerbeeinflussung durch Fahrströme entspricht der zu berücksichtigende Strom I dem Fahrstrom I_F .

12.1.4.5 Ermittlung durch Messungen

Die in einem ideal isolierten Leiter induzierte Längsfeldstärke kann gegebenenfalls durch Messung ermittelt werden. Dazu wird eine isolierte Messleitung parallel zur Hochspannungsfreileitung oder Fahrleitung in einem Abstand a – entsprechend der geplanten Rohrleitungstrasse – ausgelegt.

Die Länge der Messleitung L_M muss mindestens einer Spannfeldlänge oder einem ganzzahligen Vielfachen davon entsprechen. Die Messleitung wird an einem Ende über einen Erdspeiß geerdet, am anderen Ende wird die Spannung zwischen der Messleitung und einem weiteren Erdspeiß mit einem Voltmeter mit ausreichend hohem Innenwiderstand gemessen. Während der Messzeit muss die Höhe des eingespeisten Messstromes I_{KM} bzw. des Betriebsstromes I_{BM} bekannt sein. Aus den hierbei gemessenen Spannungen U_{KM} bzw. U_{BM} ergeben sich die für die weiteren Berechnungen maßgebenden Längsfeldstärken für Kurzzeitbeeinflussung:

$$|E_K| = \frac{U_{KM}}{L_M} \times \frac{I_K}{I_{KM}} \times w \quad (24)$$

und für Langzeitbeeinflussung:

$$|E_B| = \frac{U_{BM}}{L_M} \times \frac{I_B}{I_{BM}} \quad (25)$$

Bei einer Verfälschung der Messwerte U_{KM} durch Fremd- und Störspannungen können Messverfahren nach DIN EN 61936-1 (VDE 0101-1), DIN EN 50522 (VDE 0101-2) angewendet werden. Bei der Messung von U_{BM} ist bei Mehrfachbeeinflussung die Phasenlage zwischen den einzelnen Systemen der Hochspannungsleitung zu berücksichtigen.

12.1.5 Induzierte Längsfeldstärken in ideal isolierten Leitern bei schrägen Näherungen

Die Gleichungen in 12.1.2 gelten für Rohrleitungen bzw. Rohrleitungsabschnitte, in denen die induzierte Längsfeldstärke gleichbleibend ist. Schräge Näherungen müssen deshalb in entsprechende Abschnitte unterteilt werden. Diese Unterteilung kann in Anlehnung an die TE 1 der SfB erfolgen.

Benötigt wird ein Lageplan, z. B. ein Messtischblatt M 1:25 000, in dem die beeinflussende Hochspannungsfreileitung bzw. die elektrifizierte Bahnstrecke und die beeinflusste Rohrleitung eingetragen sind.

Leicht gekrümmte Leitungstrassen und Trassen mit häufigen kurzen Richtungswechseln können durch mittlere geradlinige Führungen ersetzt werden. Ein Umzeichnen in eine vereinfachte Darstellung mit geradlinig gestreckter Hochspannungsfreileitung bzw. Bahnstrecke kann zweckmäßig sein (TE 1).

In der Regel, d. h. für spezifische Erdwiderstände von $50 \Omega\text{m}$ bei Beeinflussung durch 50-Hz-Ströme bzw. $30 \Omega\text{m}$ bei Beeinflussung durch 16,7-Hz-Ströme, gelten als Grenzabstände der Rohrleitung nach jeder Seite von der Trassenmitte der beeinflussenden Hochspannungsfreileitung, innerhalb denen die Beeinflussung zu ermitteln ist:

- 1 000 m bei Beeinflussung durch Erdkurzschlussströme in Drehstromfreileitungen bzw. Betriebs- und Kurzschlussströme in Fahr- und Speiseleitungen
- 400 m bei Beeinflussung durch Betriebsströme in Drehstromfreileitungen

ANMERKUNG: Bei Rohrleitungen mit mehreren Beeinflussungsabschnitten müssen auch die Abschnitte außerhalb der 1 000 m bzw. 400 m berücksichtigt werden, es sei denn, die Abschnitte sind so weit voneinander entfernt, dass der Wellenwiderstand erreicht ist.

12.1.6 Ermittlung des Rohrleitungspotentials

Eine Berechnung nach 12.1.2 bis 12.1.5 ist nur erforderlich, wenn aufgrund einer Abschätzung nach 8.2 mit einer Überschreitung der im Abschnitt 6 angegebenen Grenzwerte für das Rohrleitungspotential bzw. die Berührungsspannung zu rechnen ist.

Für die Berechnungen sind folgende Ströme zugrunde zu legen:

- Bei Kurzzeitbeeinflussung durch Hochspannungs-Drehstromfreileitungen werden die induzierenden Erdkurzschlussströme I_K nach der TE 1 der SfB für die Näherung ermittelt.

- Bei Langzeitbeeinflussung durch Hochspannungs-Drehstromfreileitungen sind die größtmöglichen Betriebsströme $I_{B \max}$ einzusetzen (siehe 13.3).
- Bei Beeinflussung durch Fahrleitungsströme sind die Betriebs- und Kurzschlussströme anhand der Fahrstrom- und Kurzschlussstromdiagramme der DB zu ermitteln. Für Strecken der Deutschen Bahn AG werden diese Diagramme bei der DB-Systemtechnik in München erstellt. Sofern eine Parallelführung mit einer elektrifizierten Bahnstrecke über einen Unterwerksabschnitt hinaus besteht, sollte die sich aus den unterschiedlichen Lastflussrichtungen ergebene Auswirkung auf die induktiv eingekoppelte Beeinflussungsspannung berücksichtigt werden.

Bei einem Erdkurzschluss außerhalb einer Näherung tritt das höchste Rohrleitungspotential auf. Dieses Rohrleitungspotential wird auch bei zweiseitiger Speisung eines Erdkurzschlusses innerhalb der Näherung nicht überschritten.

Bei einer Berechnung mittels EDV erhält man genauere Ergebnisse durch eine weitgehende Unterteilung z. B. bei schrägen Näherungen nach 12.1.5, wenn das Abstandsverhältnis $a_2/a_1 \leq 2$ und die Abstandsdifferenz $a_2 - a_1 \leq 100$ m gewählt wird. Dabei kann durch die Berechnung mit komplexen Größen der Phasenwinkel der Teilergebnisse durch vektorielle Addition exakt berücksichtigt werden, was zu etwas kleineren Längsfeldstärken führt als die Addition der Beträge der Teilspannungen. Rechenprogramme liegen vor [7, 8, 9] und [13].

Die Diagramme über den Verlauf des Rohrleitungspotentials innerhalb und außerhalb einer Parallelführung sowie die Kenngrößen der Rohrleitungen sind im Folgenden zusammengefasst. 14.2 zeigt Lösungswege zur Berechnung des Rohrleitungspotentials anhand von Beispielrechnungen auf.

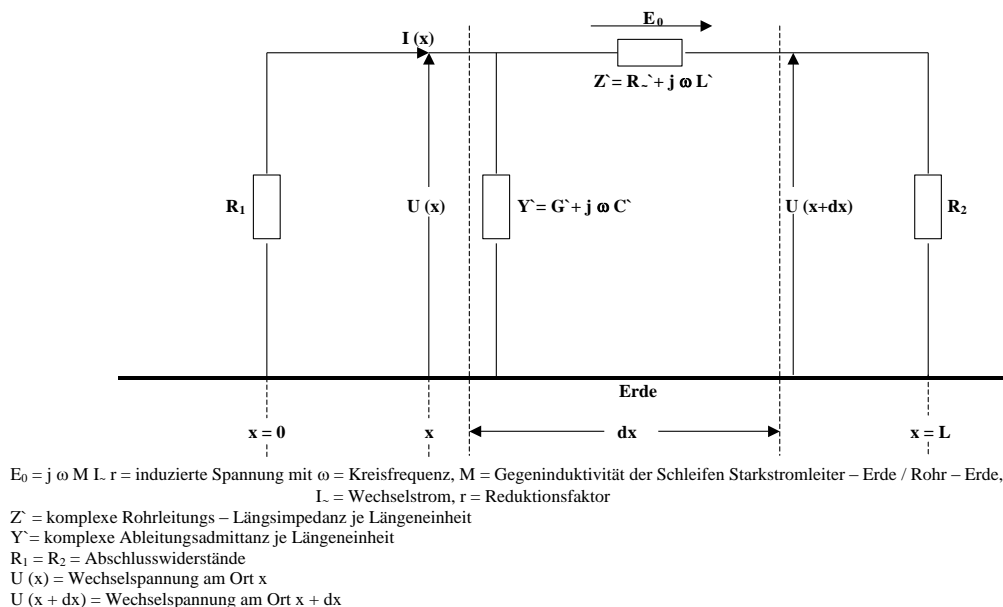


Bild 11 – Elektrisches Ersatzschaltbild einer Rohrleitung

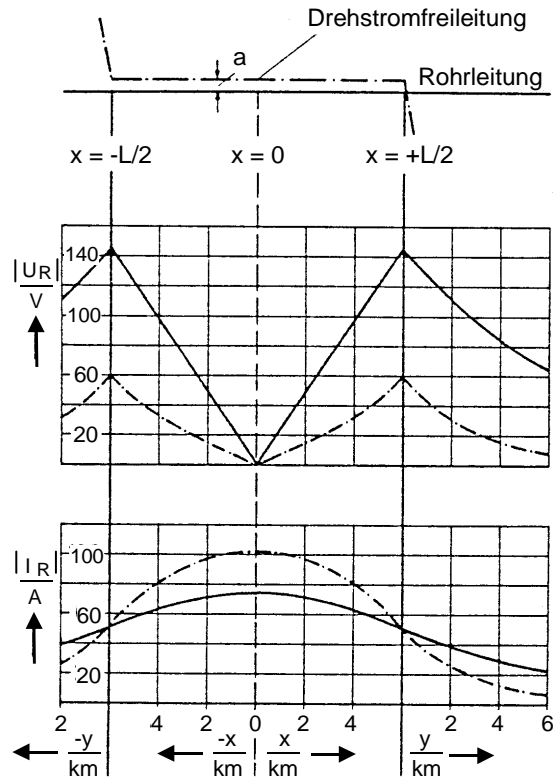


Bild 12 – Rohrleitungspotential $|U_R|$ und Rohrstrom $|I_R|$

Berechnungsbeispiel für Beeinflussung durch Betriebsströme $|I_B|$ in einer 380-kV-Doppelleitung, Donau-Mastform, $r_E = 0,65$ (ein Erdseil Al/St 240/40), $\rho_E = 100 \Omega \text{ m}$, $|I_B|=1,2 \text{ kA}$, $|E_B|=53,3 \text{ V/km}$ bei Parallelführung mit einer Rohrleitung DN 600, $L = 12 \text{ km}$, $a = 26 \text{ m}$.

Innerhalb der Parallelführung: $|U_R|$ nach Gl. (5), $|I_R|$ nach Gleichung (6),
 außerhalb der Parallelführung: $|U_R|$ nach Gl. (9), $|I_R|$ nach Gleichung (10),
 $r_u = 30 \text{ k}\Omega \text{ m}^2$, $r_i = 5 \text{ k}\Omega \text{ m}^2$.

ANMERKUNG: Für $r_u > 500 \text{ k}\Omega \text{ m}^2$ Resonanz beachten!

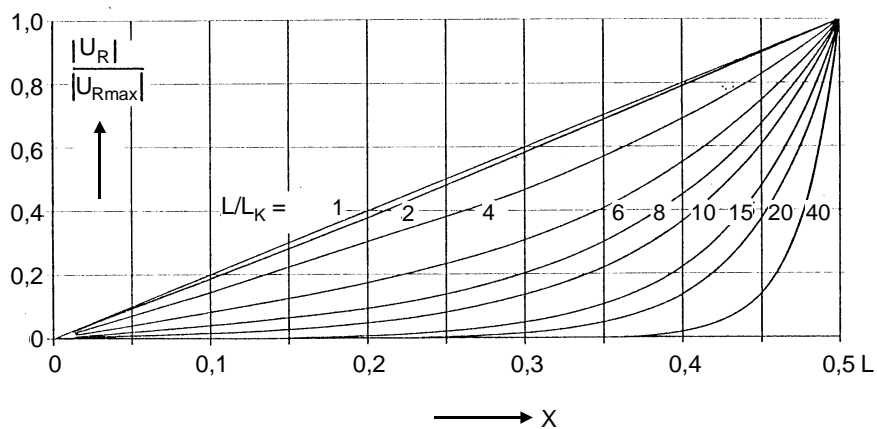


Bild 13 – Verlauf des Rohrleitungspotentials $|U_R|/|U_{R \text{ max}}|$ innerhalb einer Parallelführung nach Gleichung (8)

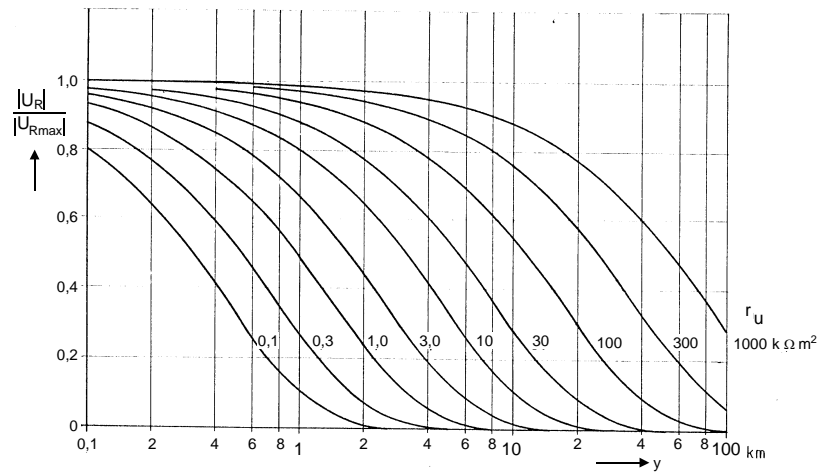
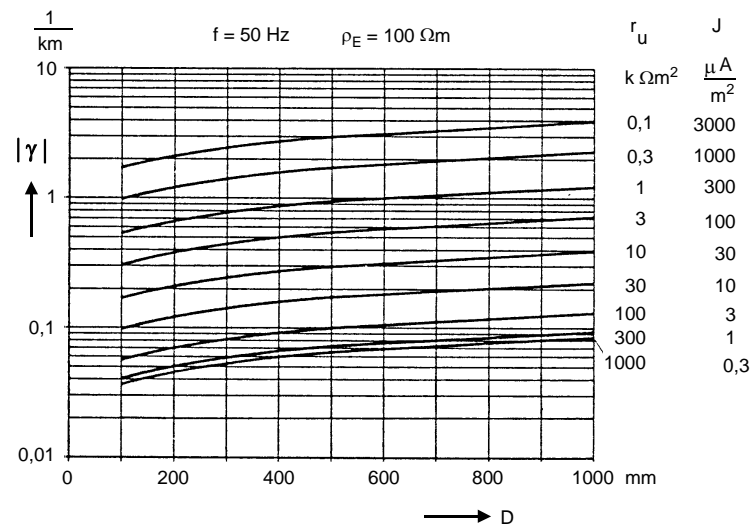
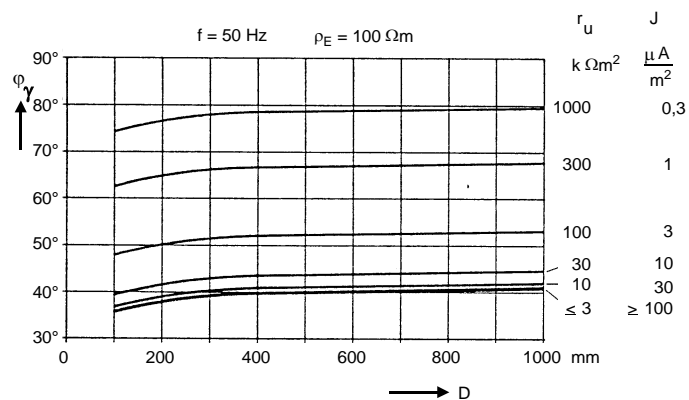


Bild 14 – Verlauf des Rohrleitungspotentials $|U_R|/|U_{R \max}|$ außerhalb einer Näherung nach Gleichung (9)

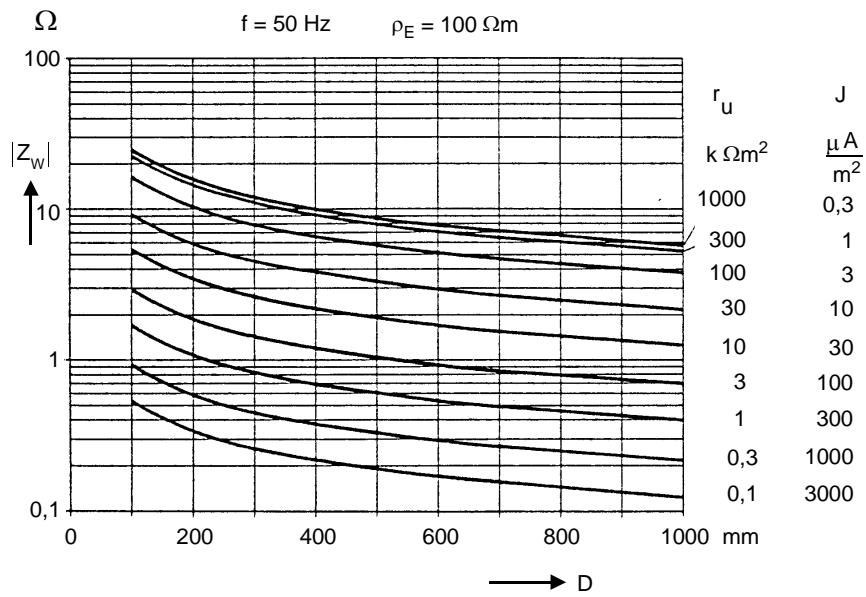


a) Übertragungsmaß nach Gleichung (15)

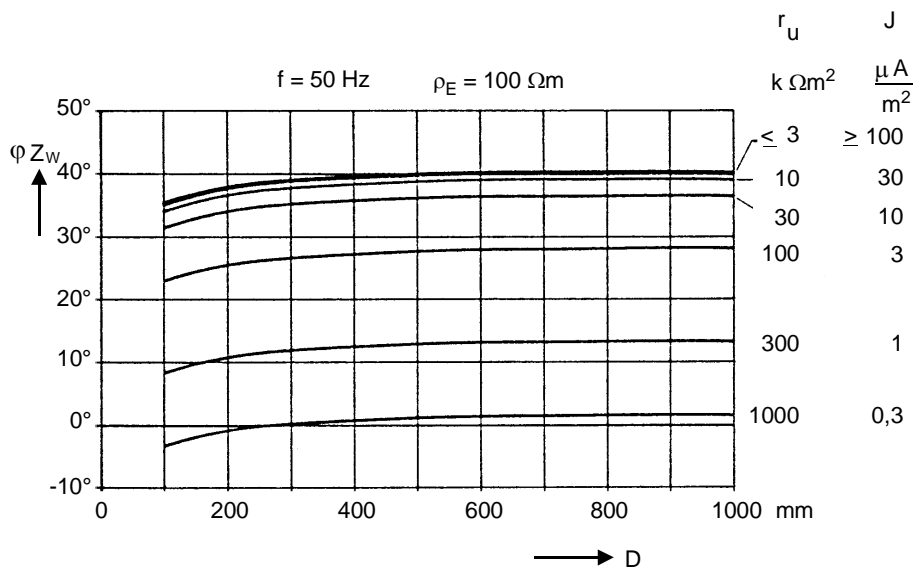


b) Winkel des Übertragungsmaßes nach Gleichung (1)

Bild 15 – Kenngrößen für Rohrleitungen als Funktion des Rohrleitungsdurchmessers, $f = 50 \text{ Hz}$, $\rho_E = 100 \Omega\text{m}$

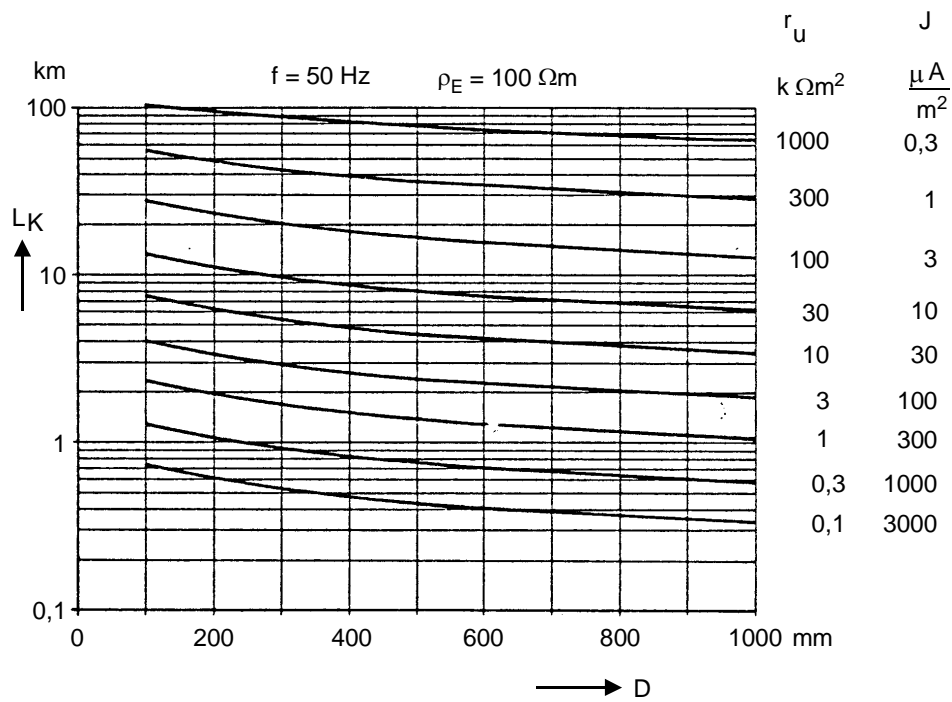


c) Wellenwiderstand nach Gleichung (16)



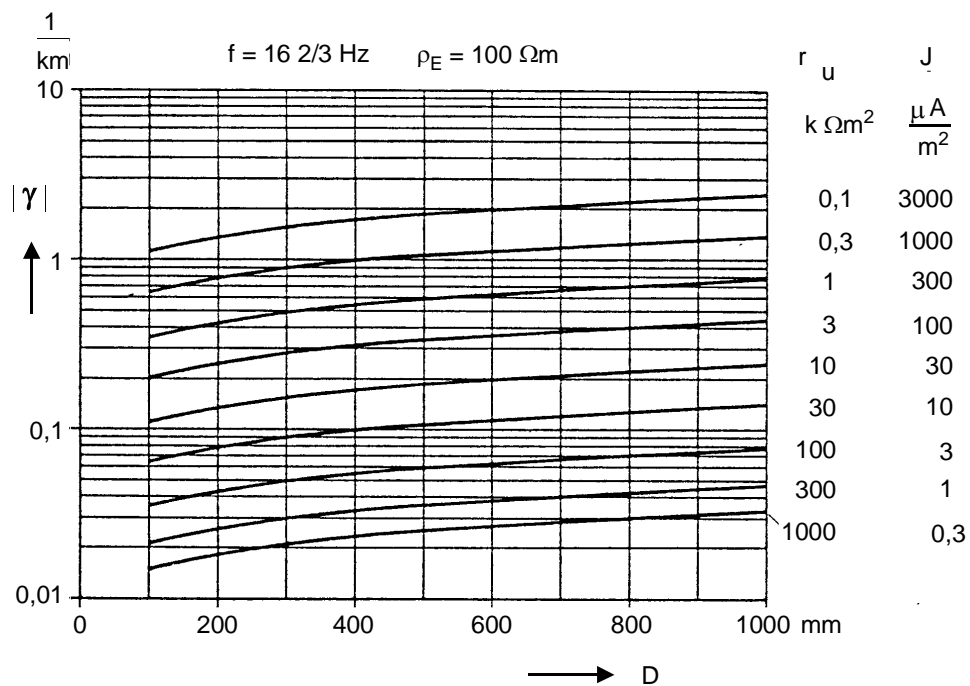
d) Winkel des Wellenwiderstandes nach Gleichung (14)

Bild 15 (Fortsetzung) – Kenngrößen für Rohrleitungen als Funktion des Rohrleitungsdurchmessers, $f = 50 \text{ Hz}$, $\rho_E = 100 \text{ } \Omega\text{m}$



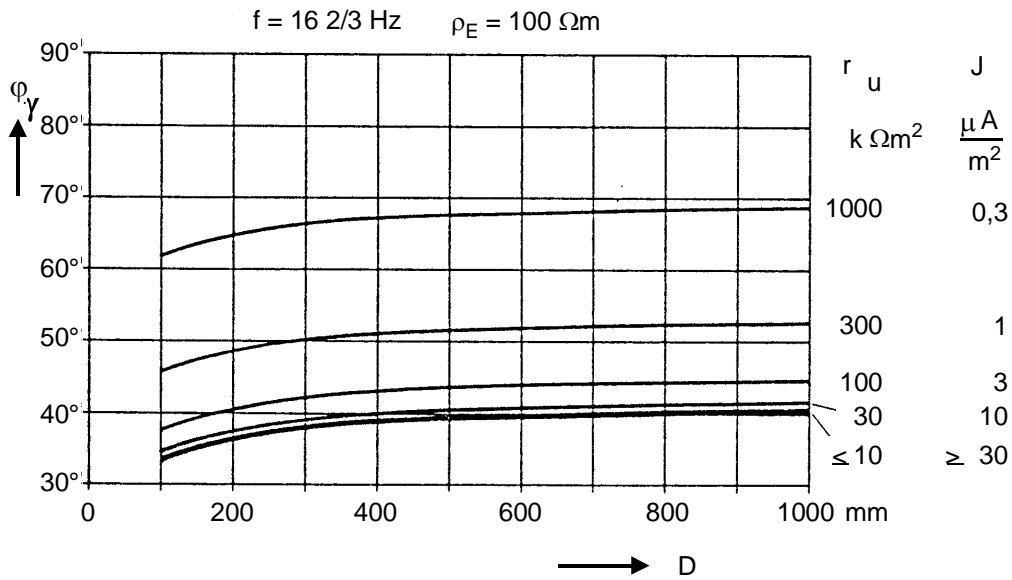
e) Kennlänge nach Gleichung (18)

Bild 15 (Fortsetzung) – Kenngrößen für Rohrleitungen als Funktion des Rohrleitungsdurchmessers, $f = 50 \text{ Hz}$, $\rho_E = 100 \Omega\text{m}$

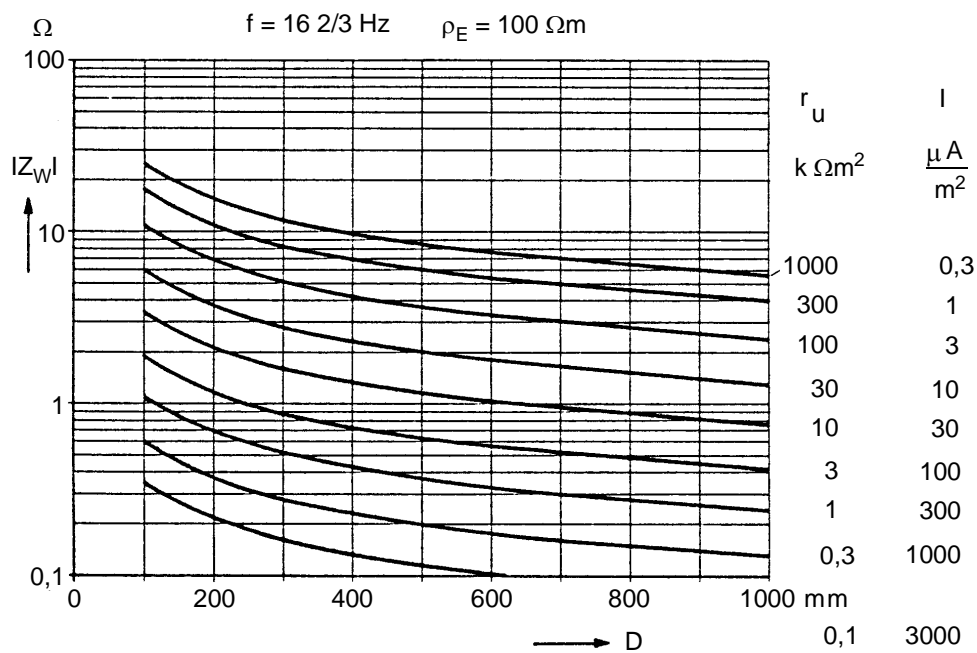


a) Übertragungsmaß nach Gleichung (15)

Bild 16 – Kenngrößen für Rohrleitungen als Funktion des Rohrleitungsdurchmessers, $f = 16,7 \text{ Hz}$, $\rho_E = 100 \Omega\text{m}$

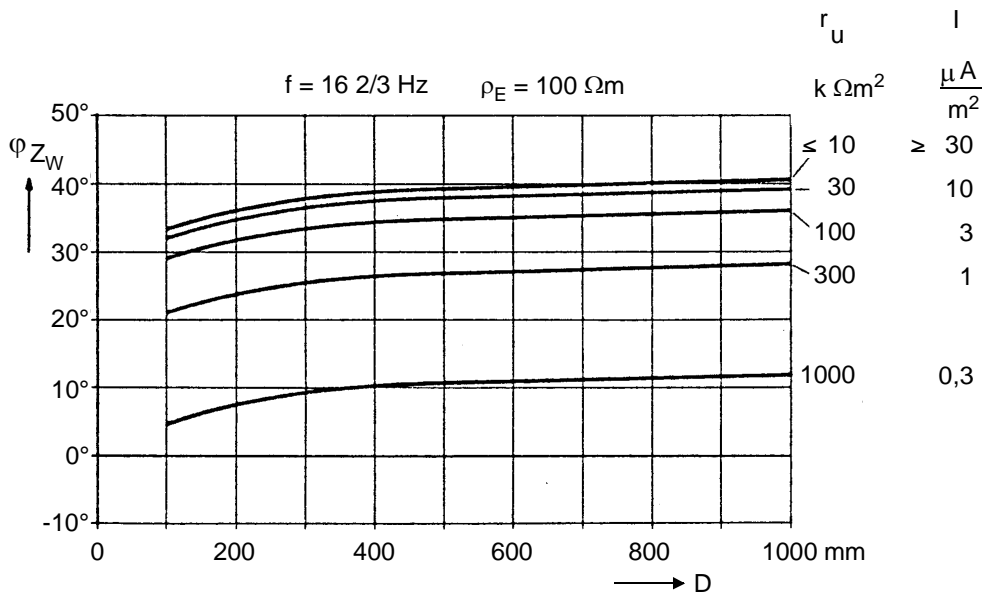


b) Winkel des Übertragungsmaßes nach Gleichung (12)

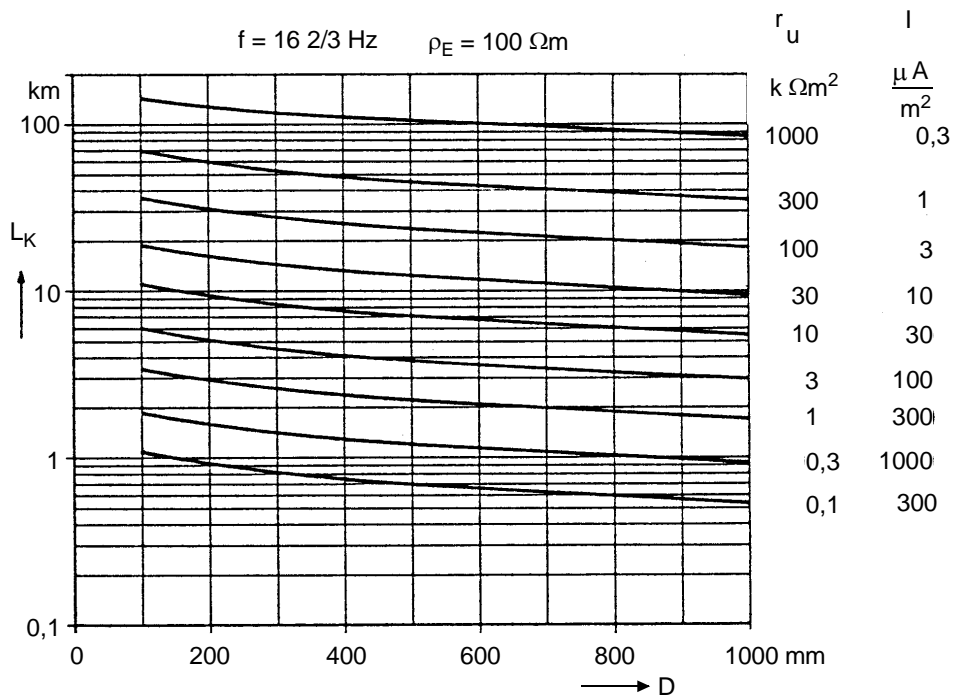


c) Wellenwiderstand nach Gleichung (16)

Bild 16 (Fortsetzung) – Kenngrößen für Rohrleitungen als Funktion des Rohrleitungsdurchmessers, $f = 16,7 \text{ Hz}$, $\rho_E = 100 \text{ } \Omega\text{m}$



d) Winkel des Wellenwiderstandes nach Gleichung (14)



e) Kennlängen nach Gleichung (18)

Bild 16 (Fortsetzung) – Kenngrößen für Rohrleitungen als Funktion des Rohrleitungsdurchmessers, $f = 16,7 \text{ Hz}$, $\rho_E = 100 \text{ } \Omega\text{m}$

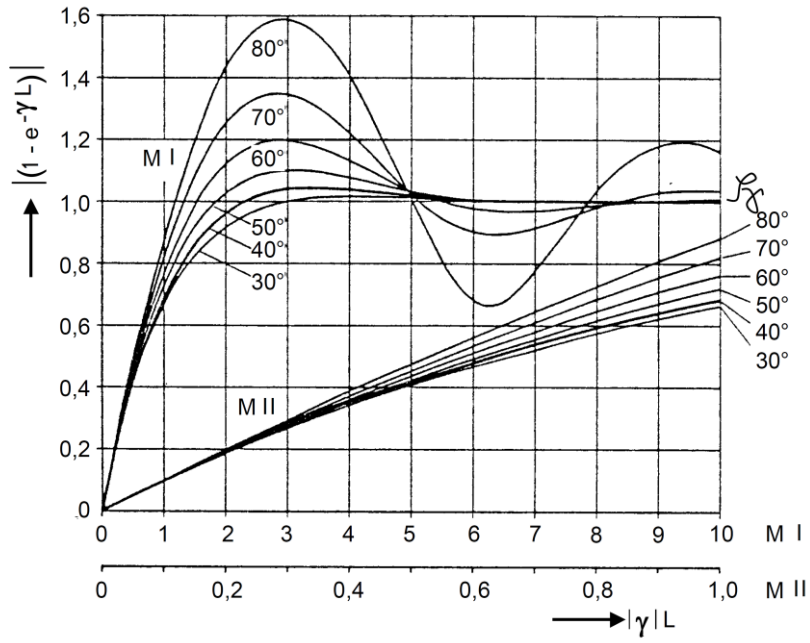


Bild 17 – Hilfsgröße nach Gleichung (17)

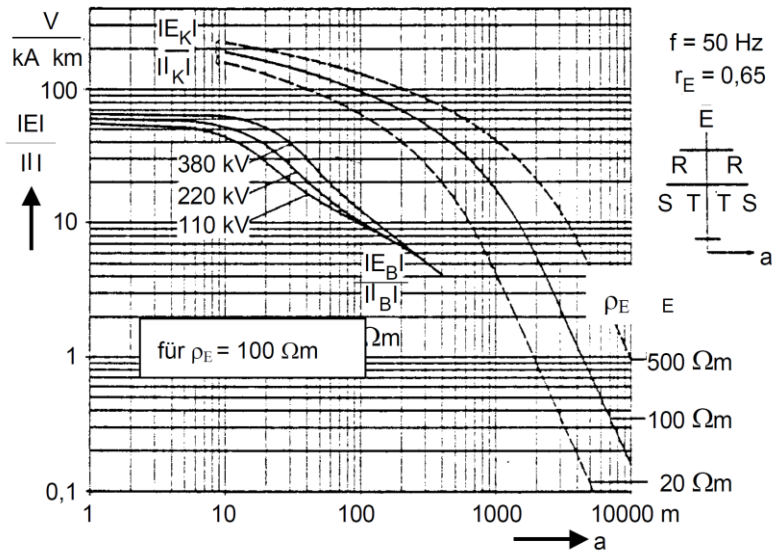


Bild 18 – Berechnete induzierte Längsfeldstärke in einem ideal isolierten Leiter bei Parallelführung mit Hochspannungs-Drehstromfreileitungen, Donaustastform

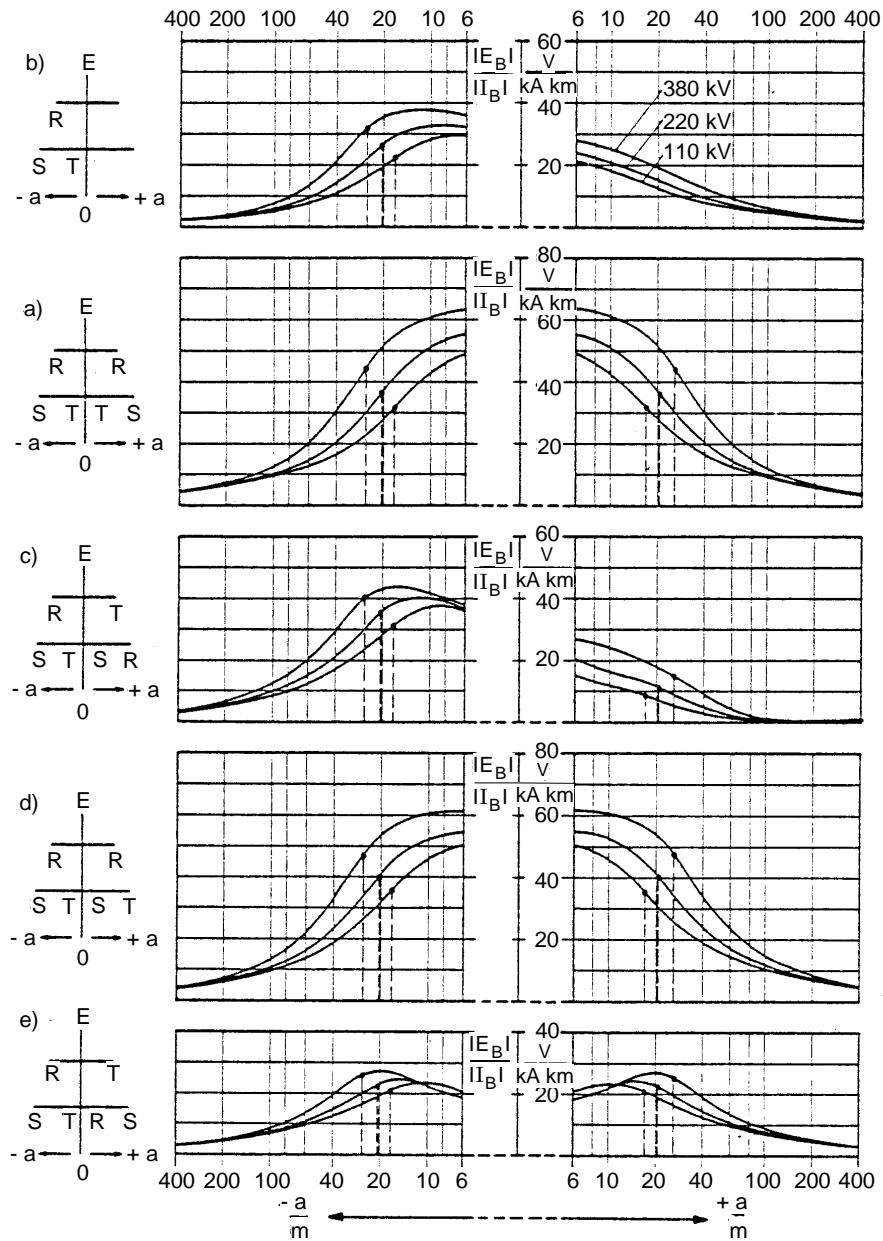


Bild 19 – Be-

rechnete induzierte Längsfeldstärke in einem ideal isolierten Leiter durch Betriebsströme bei Donaumastform $f = 50 \text{ Hz}$, $\rho_E = 100 \Omega\text{m}$

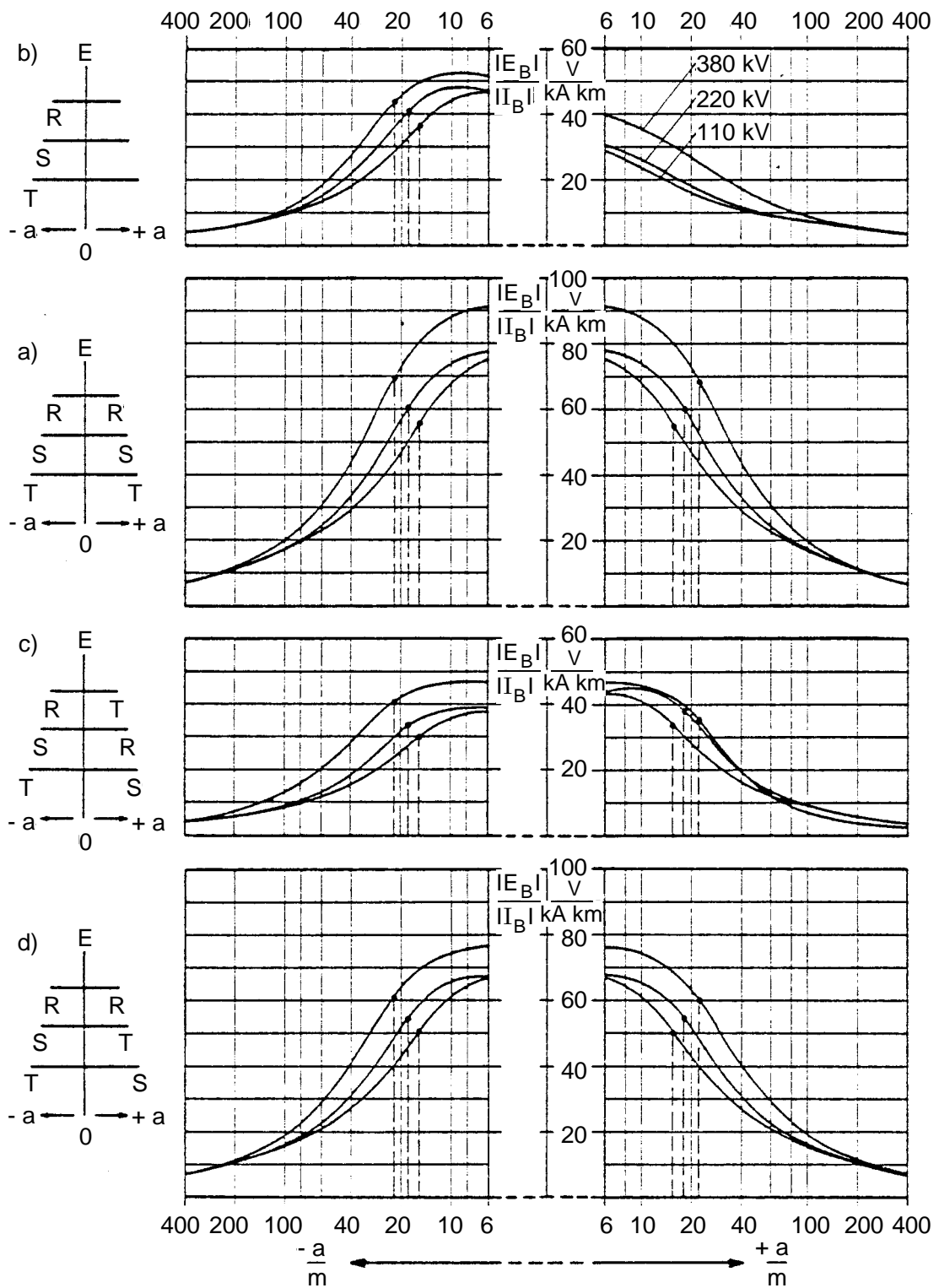


Bild 20 – Berechnete induzierte Längsfeldstärke in einem ideal isolierten Leiter durch Betriebsströme bei Tannenbaum-(Tonnen-)mastform $f = 50 \text{ Hz}$, $\rho_E = 100 \Omega\text{m}$

12.2 Ohmsche Beeinflussung

12.2.1 Allgemeines

Die ohmsche Beeinflussung hat im Vergleich zur induktiven Beeinflussung eine geringere Bedeutung, weil die Potentialanhebung nur in der näheren Umgebung von Erdern auftritt und deshalb auf vergleichsweise kurze Rohrleitungsabschnitte begrenzt ist. Die ohmsche Beeinflussung kann jedoch im Näherungsbereich von elektrifizierten Bahnen Bedeutung erlangen (siehe 12.2.4).

12.2.2 Spannungstrichter von Erdungsanlagen und Freileitungsmasten

Eine Beeinflussung der Rohrleitung erfolgt nur im räumlich begrenzten Spannungstrichter. Dabei wird das Potential des Erdreichs durch den Erdungsstrom angehoben, während eine Rohrleitung, die deutlich über die Ausdehnung des Spannungstrichters hinaus geführt wird, das Potential der fernen Erde (das Bezugspotential) beibehält.

Der Spannungstrichter kann nach dem in DIN EN 61936-1 (VDE 0101-1), DIN EN 50522 (VDE 0101-2) angegebenen Verfahren gemessen werden.

Berechnungsverfahren können der Literatur [2], [5] entnommen werden. Bezüglich des Spannungstrichters von Verdrillungsmasten siehe [18].

12.2.3 Rohrleitungspotential von mit Erdungsanlagen verbundenen Rohrleitungen

Wenn die Rohrleitung mit der Erdungsanlage z. B. eines Kraftwerkes, einer Schalt- oder Umspannungsanlage verbunden ist, wird die Erdungsspannung U_E auf die Rohrleitung verschleppt. Die Rohrleitung wirkt dann wie ein langer Horizontalerder, dessen Potential mit zunehmender Entfernung von der Erdungsanlage abnimmt.

Bei sehr langen Rohrleitungen (deren Länge mehr als doppelt so groß ist wie die Kennlänge) gilt für das Rohrleitungspotential Gleichung (9) und Bild 14, wobei das maximale Rohrleitungspotential durch die Erdungsspannung und y durch die Entfernung vom Rand der Erdungsanlage zu ersetzen ist.

Bei kürzeren Rohrleitungen ($L \leq 2 L_k$) gilt für das Rohrleitungspotential

$$|U_R| = |U_E| \times \left| \frac{\cosh \gamma(L-y)}{\cosh(\gamma L)} \right| = |U_E| \times e^{-y/L_k} \times \left| \frac{(1 + e^{-2\gamma(L-y)})}{(1 + e^{-2\gamma L})} \right| \quad (26)$$

12.2.4 Ohmsche Beeinflussung durch einphasige Wechselstrom-Bahnsysteme (15-kV-Oberleitungen)

Einphasige Wechselstrom-Bahnsysteme benutzen die Schienen als Rückleiter. Durch den Spannungsfall, den der Traktionsrückstrom an der Impedanz der Fahrschienen und an den Ableitwiderständen zum Erdreich erzeugt, entsteht ein Schienenpotential gegen ferne Erde. Die das Schienenpotential direkt beeinflussende Stromstärke und die Ableitwiderstände werden von einer Vielzahl unterschiedlicher Parameter, wie z. B. der Position des beeinflussenden Triebfahrzeuges, der Entfernung zum speisenden Unterwerk, den streckenspezifischen Faktoren (u. a. Gleisvermaschung, verlegte Rückleiter, Oberbaueigenschaften), aber auch der Witterung bestimmt. Die Maximalwerte des Schienenpotentials werden grundsätzlich im Bereich des Triebfahrzeuges und des Unterwerkes erreicht. Richtwerte für das Schienenpotential können der DIN EN 50122-2 (VDE 0115-4) entnommen werden.

Den größten Einfluss auf Höhe und Verlauf des Schienenpotentials längs einer Strecke übt der Ableitungsbelag des Gleisrostes aus. Dieser Begriff beschreibt die spezifische Leitfähigkeit, gemessen in s/km, die durch die Erdung der Schienen entsteht. Je größer der Ableitungsbelag wird, desto kleiner wird das Schienenpotential. Aufgrund der Erdung der Schienen fließt vom Belastungspunkt (Position des Triebfahrzeugs) ausgehend bis zu 50 % des Schienenrückstromes durch das Erdreich zurück zum Unterwerk. Dieser durch das Erdreich fließende Stromanteil erzeugt einen Spannungstrichter, der sich in Abhängigkeit von der Entfernung zur Gleisanlage dem Betrage nach abbaut.

Metallene Leiter, z. B. erdfühige Mantelrohre, die durch den Spannungstrichter einer Gleisanlage führen, greifen entsprechend Tabelle 10 den prozentualen Anteil des Schienenpotentials in Abhängigkeit vom Abstand der Rohrleitung von der Schiene ab. In Bild 21 wird dieses noch einmal graphisch verdeutlicht.

Tabelle 10 – Prozentualer Anteil des Schienenpotentials

Abstand der Rohrleitung von der Schiene	2 m	5 m	10 m	50 m	100 m
Prozentualer Anteil vom Schienenpotential (am Belastungspunkt mit Höchstwert 100 % angesetzt)	50 %	30 %	20 %	5 %	0 %

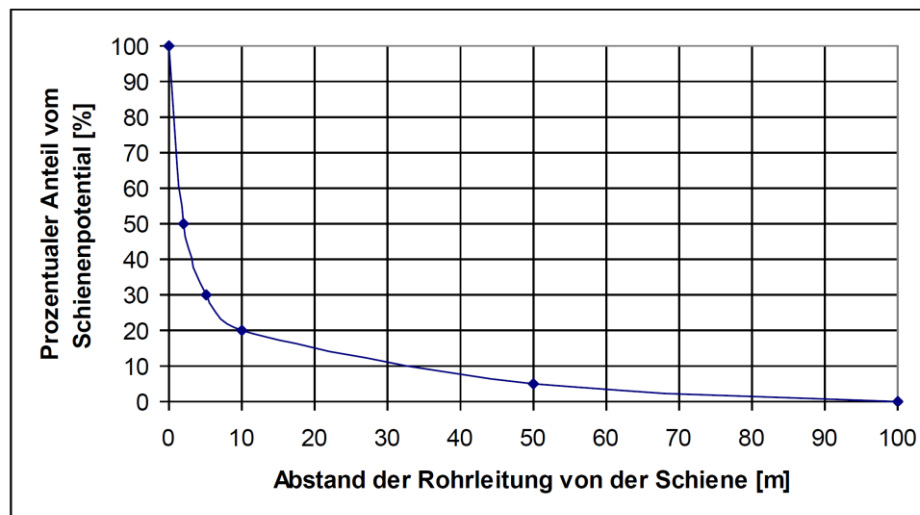


Bild 21 – Anteil des Rohrleitungspotentials am Schienenpotential in %

12.3 Rohrleitungsresonanz

12.3.1 Allgemeines

Maximale Wechselspannungen Rohrleitung-Erde treten normalerweise an den Enden der Beeinflussungsstrecke auf.

In Abhängigkeit von der Größe des Umhüllungswiderstandes (siehe Gleichung 27) und den Abmessungen der Rohrleitung (Länge, Nennweite) können weitere Spannungmaxima außerhalb der Beeinflussungsstrecke auftreten. Der Grund für diese Erscheinung ist eine Serienresonanz der Rohrleitung mit der Frequenz der beeinflussenden Wechselspannung.

12.3.2 Die Rohrleitung als elektrisch schwingungsfähiges Gebilde

Im elektrischen Sinne ist die Rohrleitung aufgebaut wie in Bild 11 dargestellt.

Die Zusammenschaltung von Induktivität und Kapazität stellt allgemein einen Schwingkreis dar. Sind diese parallel geschaltet, wird ein Parallelschwingkreis gebildet, liegen die beiden Schwingkreiselemente hintereinander, handelt es sich um einen Serienresonanzkreis.

Bei einem Serienresonanzkreis wird im Resonanzfall die Spannung an den einzelnen Bauelementen durch deren Güte (Verluste) bestimmt.

12.3.3 Resonanzlängen von Rohrleitungen

Mit den bezogenen Größen L' und C' lässt sich die Resonanzlänge l ausrechnen zu

$$l = \frac{1}{2\pi f \times \sqrt{L' \times C'}} \quad (27)$$

Mit den Werten für $\omega \times L'$ aus Bild 27 und Berechnung der Werte für $\omega \times C'$ nach Gleichung 22 ergibt sich die in Bild 22 dargestellte Abhängigkeit der Resonanzlänge von der Nennweite im Bereich von DN 100 bis DN 1 000.

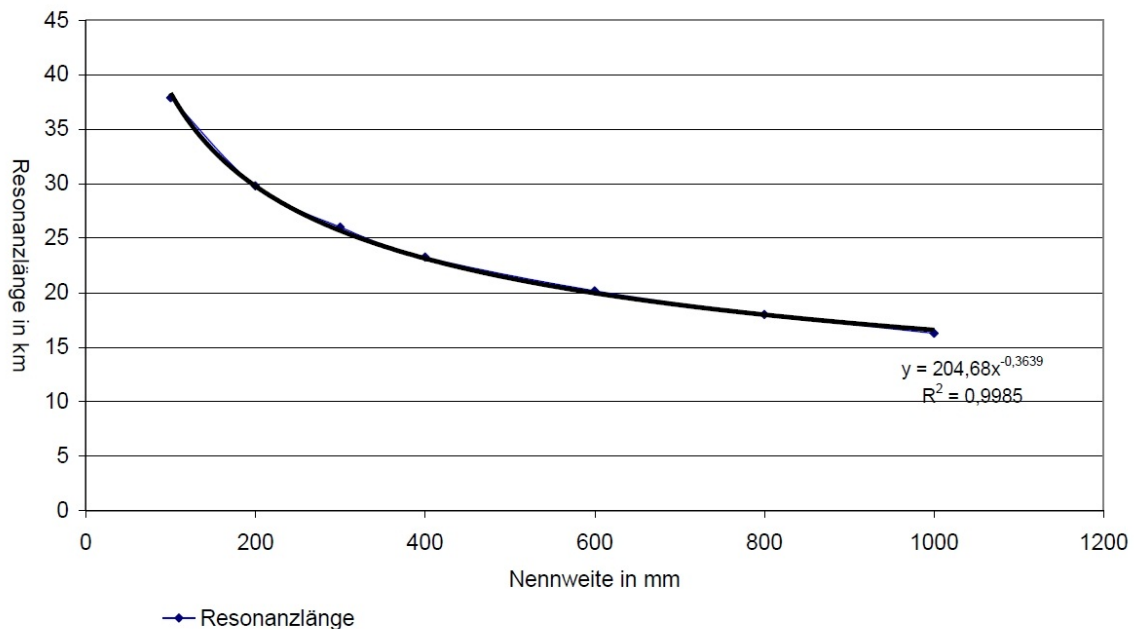


Bild 22 – Resonanzlänge für 50 Hz

Parameter:

$\epsilon_0 = 8,85 \text{ pF / m}$; $\epsilon_r = 2,3$; Stärke der Umhüllung $\delta = 2,5 \text{ mm}$; Frequenz = 50 Hz

12.3.4 Spannungsüberhöhung bei Resonanz

Für Serienresonanz werden die Spannungen an der Induktivität und der Kapazität entgegengesetzt gleich groß, sodass die Höhe des Stromes, der den Resonanzkreis durchfließt, durch die Größe des Verlustwiderstandes (Serienwiderstand) bestimmt wird. Die an den Schwingkreiselementen L und C sich einstellenden Spannungen sind dann das Produkt aus Strom und Wechselstromwiderstand.

Für eine Rohrleitung lässt sich die Resonanzüberhöhung \ddot{U}_{Res} ausrechnen zu:

$$\ddot{U}_{\text{Res}} = 2 \times r_U \times f \times \pi \times \varepsilon_0 \times \varepsilon_r \times \frac{1}{\delta} \quad (28)$$

Die Resonanzüberhöhung ist der Faktor, mit dem die an den Enden des Beeinflussungsabschnittes anstehende Wechselspannung Rohrleitung – Erde multipliziert werden muss, um den Wert der Spannung am Resonanzort zu erhalten.

Mit den Werten für:

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$\varepsilon_0 = 8,85 \text{ pF/m}$$

$$\varepsilon_r = 2,3$$

$\delta = 1 \text{ mm}, 2 \text{ mm}, 2,5 \text{ mm}$ und 3 mm ergeben sich die in Bild 23 dargestellten Abhängigkeiten

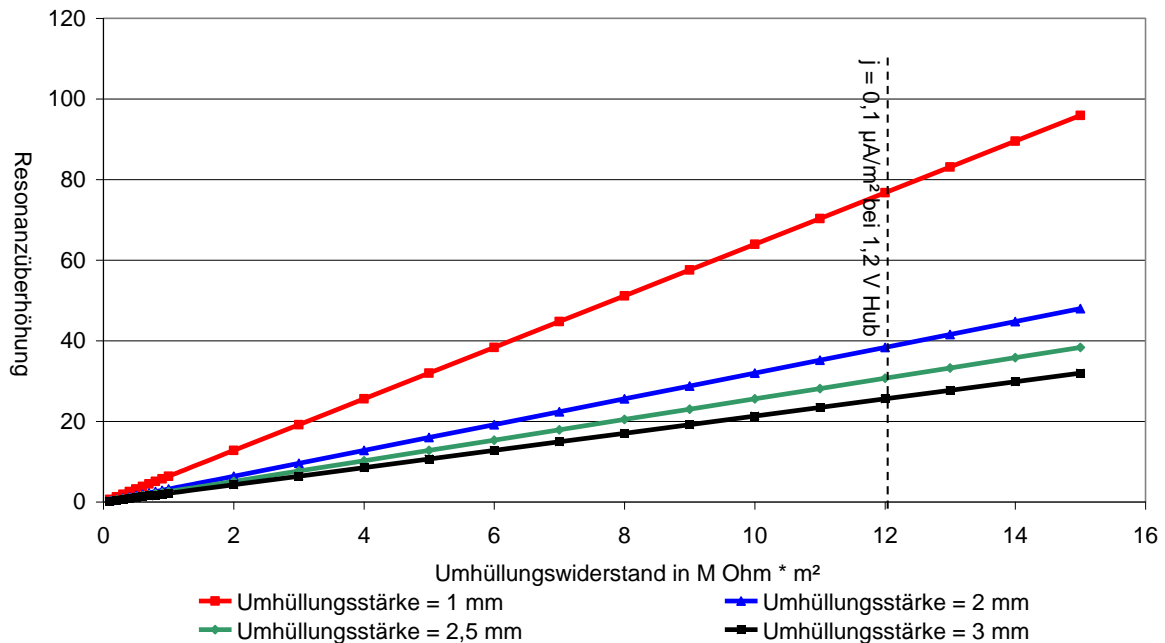


Bild 23 – Resonanzüberhöhung nach Gleichung 28

Mit einer Resonanzüberhöhung von $\ddot{U}_{\text{Res}} > 1$ muss gerechnet werden, wenn der Umhüllungswiderstand einen Wert von $0,5 \text{ M}\Omega\text{m}^2$ überschreitet und die Weiterführung der Rohrleitung über den Beeinflussungsabschnitt hinaus eine Länge in der Größenordnung der Resonanzlänge (siehe Bild 22) besitzt.

12.4 Erder an Rohrleitungen

12.4.1 Allgemeines

Bei einer induktiven Beeinflussung kann das Rohrleitungspotential und die Berührungsspannung durch den Anschluss von Erdern an die Rohrleitung nach 9.2.2 verringert werden.

12.4.2 Gleichmäßige Verteilung der Erder

Der Anschluss von Erdern entspricht einer Herabsetzung des ohmschen Umhüllungswiderstandes der Rohrleitung. Bei einer gleichmäßigen Verteilung der Erder entlang der beeinflussten Rohrleitung nach Bild 24 kann die erforderliche Erderzahl und deren Erdungswiderstand näherungsweise aus der Parallelschaltung aller Erder mit dem natürlichen Erdungswiderstand der Rohrleitung $R_R = r_u/(\pi \times D)$ ermittelt werden.

Besitzt eine Rohrleitung einen spezifischen Umhüllungswiderstand r_u und sollte dieser Wert durch den Anschluss von Erdern um r_e auf einen Endwert r_{uG} gesenkt werden, so bestehen folgende Zusammenhänge:

$$\frac{1}{r_{uG}} = \frac{1}{r_u} + \frac{1}{r_e} \quad (29)$$

$$r_e = \frac{r_u \times r_{uG}}{r_u - r_{uG}} \quad (30)$$

$$r_{uG} = \frac{r_u \times r_e}{r_u + r_e} \quad (31)$$

Mit dem Erdungswiderstand R_E jedes einzelnen Erders und der auf die Rohrleitungslänge bezogenen Anzahl der Erder n' ergibt sich für einen Rohrdurchmesser D :

$$r_e = \pi \times D \times \frac{R_E}{n'} \quad (32)$$

Ein bestimmtes r_e kann je nach den örtlichen Gegebenheiten durch geeignete Wahl von R_E und n' nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten erreicht werden.

Beim Verlegen einer Rohrleitung kann es zweckmäßig sein, Oberflächenerder sofort im Rohrgraben mitzuverlegen. Tiefenerder sind sinnvoll, wenn der spezifische Erdwiderstand mit der Tiefe abnimmt; sie haben ferner den Vorteil eines geringen Platzbedarfes und sind insbesondere für nachträgliche Einbringung geeignet. Es ist besonders bei nicht homogenem Erdreich zweckmäßig, den Erdungswiderstand beim Einschlagen des Erders nach jeder weiteren Stablänge zu messen.

Es sollte mindestens ein Erder je Kilometer Rohrleitungslänge angeordnet werden. Hierbei ist darauf zu achten, dass bei einer ungefähr symmetrischen Beeinflussung die Erdungswiderstände der einzelnen Erder und deren Abstände entlang der Rohrleitung einen möglichst gleichmäßigen äquivalenten spezifischen Umhüllungswiderstand ergeben. Bei einer stark unsymmetrischen Beeinflussung können die Erdungswiderstände der Erder und deren Abstände so gewählt werden, dass sich ein möglichst geringes Rohrleitungspotential ergibt.

Der Zusammenhang zwischen dem spezifischen Umhüllungswiderstand und dem Übertragungsmaß einer Rohrleitung ergibt sich aus den Gleichungen in 12.1.3; er kann auch in Abhängigkeit vom Rohrdurchmesser dem Bild 15 a) für 50 Hz und dem Bild 16 a) für 16,7 Hz entnommen werden. Für eine Bitumenumhüllung mit einer Stärke von 3 mm bis 4 mm und einer Dielektrizitätszahl $\epsilon_r = 5$ kann für

$$r_u \leq 10 \text{ k}\Omega\text{m}^2 \text{ bei einer Frequenz 50 Hz und}$$

$$r_u \leq 30 \text{ k}\Omega \text{ m}^2 \text{ bei einer Frequenz 16,7 Hz}$$

der kapazitive Umhüllungswiderstand gegenüber dem ohmschen Umhüllungswiderstand vernachlässigt werden. Es gilt für diese relativ niedrigen Werte die vereinfachte Beziehung

$$\frac{r_{u2}}{r_{u1}} = \left(\frac{|\gamma_1|}{|\gamma_2|} \right)^2 \quad (33)$$

Dies bedeutet, dass z. B. bei einer gewünschten Verdoppelung des Übertragungsmaßes der spezifische Umhüllungswiderstand auf ein Viertel verringert werden muss und dementsprechend bei sonst gleichen Verhältnissen eine Vervierfachung der Erderzahl erforderlich ist.

Im Beeinflussungsabschnitt, dessen Ausdehnung durch die in 12.1.5 festgelegten Grenzabstände von der Hochspannungsfreileitung bestimmt ist, ist der Anschluss von Erdern an die Rohrleitung notwendig. Außerhalb dieses Beeinflussungsabschnittes ist der Anschluss weiterer Erder an die Rohrleitung – wegen des erforderlichen Abschlusses der Rohrleitung mit etwa dem Wellenwiderstand – auf beiden Seiten auf eine Länge, die der Kennlänge L_K entspricht, erforderlich. Die Werte für die Kennlänge L_K können für 50 Hz dem Bild 15 e) und für 16,7 Hz dem Bild 16 e) entnommen werden; hierbei ist der spezifische Umhüllungswiderstand maßgebend, der nach dem Anschluss der Erder an die Rohrleitung wirksam ist. Es ergibt sich demnach die erforderliche Gesamtzahl der Erder aus

$$n = n' \times (L_R + 2 L_K) \quad (34)$$

Endet eine Rohrleitung innerhalb einer Näherungslänge oder ist die Rohrleitung durch ein Isolierstück in der Längsrichtung elektrisch unterbrochen, so ist an dieser Stelle ein Erder an die Rohrleitung anzuschließen, dessen Erdungswiderstand etwa dem Wellenwiderstand der Rohrleitung entspricht. Werte hierfür können für 50 Hz dem Bild 15 c) und für 16,7 Hz dem Bild 16 c) entnommen werden.

Anstelle einer Ausrüstung der Rohrleitung mit verteilten Erdern auf beiden Seiten außerhalb der Näherung jeweils auf die Kennlänge L_K (nach Gleichung 34) kann auch an den Enden der Näherung je ein Erder angeordnet werden, dessen Erdungswiderstand so zu bemessen ist, dass sich ein Abschluss der Näherungslänge mit dem Wellenwiderstand ergibt.

Der Erdungswiderstand eines Erders ist wesentlich abhängig vom örtlichen spezifischen Erderwiderstand. Mit einer Länge L_E und einem Durchmesser d_E (bei Bändern wird d entsprechend der halben Bandbreite gesetzt) ist ohne Berücksichtigung des Erderlängswiderstandes der Erdungswiderstand eines Oberflächenerders:

$$R_E = \frac{\rho_E}{\pi L_E} \times \ln \frac{2 \times L_E}{d_E} \quad (35)$$

für Tiefenerder:

$$R_E = \frac{\rho_E}{2\pi L_E} \times \ln \frac{4 \times L_E}{d_E} \quad (36)$$

Mit den in 10.1.1.2 genannten üblichen Erderquerschnitten kann auch mit folgenden Näherungsgleichungen gerechnet werden:

für Oberflächenerder:

$$R_E = \frac{2 \times \rho_E}{L_E} \quad (37)$$

für Tiefenerder:

$$R_E = \frac{\rho_E}{L_E} \quad (38)$$

Aus Gleichung (32) folgt für den Erdungswiderstandsbelag (in Ohm \times Längeneinheit), der sich ausschließlich durch die angeschlossenen Erder ergibt

$$\frac{R_E}{n'} = \frac{r_e}{\pi \times d_e} \quad (39)$$

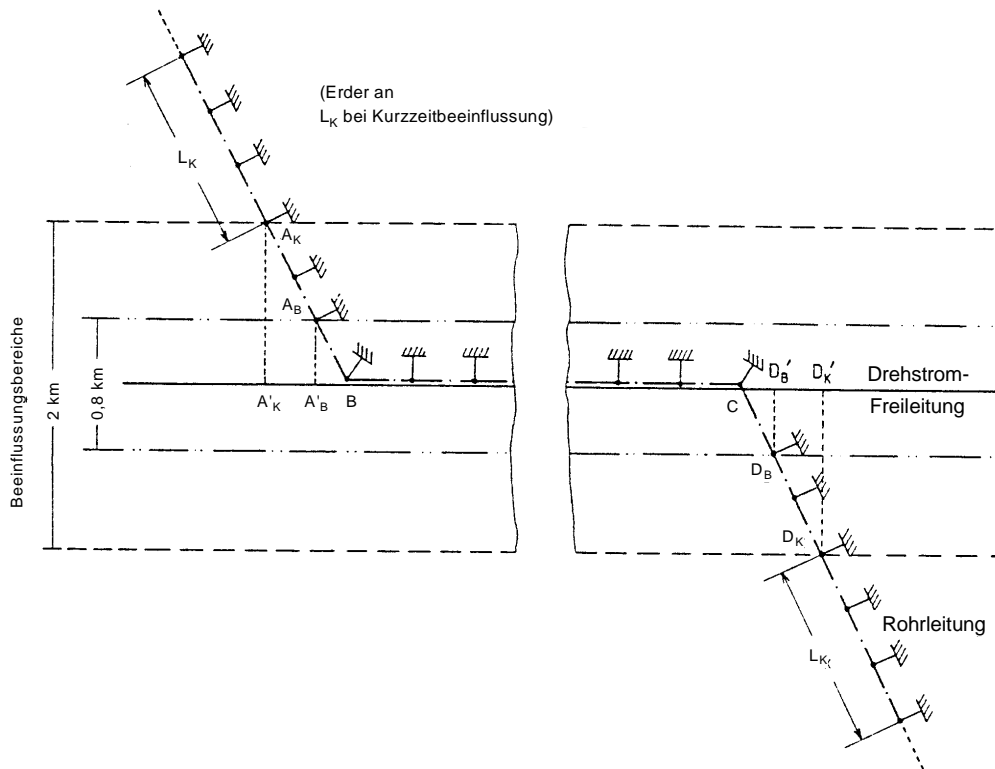


Bild 24 – Anschluss von Erdern an eine Rohrleitung zur Verringerung des Rohrleitungspotentials bei induktiver Beeinflussung nach 12.4.2

Bei gleichmäßiger Verteilung der Erder entlang der Rohrleitung sind Erder an der Näherungslänge L_R und anschließend auf jeder Seite auf eine Länge L_K erforderlich.

bei Kurzzeitbeeinflussung: $L_R + 2 L_K = (A_K - B - C - D_K) + 2 L_K$

bei Langzeitbeeinflussung: $L_R + 2 L_K = (A_B - B - C - D_B) + 2 L_K$

Anstelle der verteilten Erder an den Rohrleitungsabschnitten L_K kann jeweils an den Enden der Näherungslänge L_R ein Erder angeordnet werden, dessen Erdungswiderstand etwa dem Wellenwiderstand der Rohrleitung mit angeschlossenen Erdern an der Näherungslänge entspricht:

- bei Kurzzeitbeeinflussung etwa an den Stellen A_K und D_K
- bei Langzeitbeeinflussung etwa an den Stellen A_B und D_B

12.4.3 Konzentrierte Erder an den Enden einer Näherungslänge

Anstelle der verteilten Erder nach 12.4.2 können auch je ein konzentrierter Erder an den Enden der Näherungslänge an die Rohrleitung angeschlossen werden, nach Bild 24 z. B. an den Stellen A_B und D_B oder A_K und D_K . Unter Vernachlässigung des Erdungswiderstandes der Rohrleitung durch Fehlstellen in der Umhüllung kann eine Abschätzung dieser Erder nach Bild 25 erfolgen. Dabei sind die Kenngrößen für die Rohrleitung den Bildern 27 und 28 (Abschnitt 13) zu entnehmen. Für die Bemessung der Erder ist der ohmsche Längswiderstand $R' \sim \times L_R$ und der induktive Längswiderstand $\omega L' \times L_R$ der Rohrleitung von entscheidender Bedeutung.

Mit U_L als induzierte Längsspannung im ideal isolierten Leiter folgt aus Bild 25:

$$U_L = I_R \times (R' \sim \times L_R + j\omega L' \times L_R + R_A + R_B) \quad (40)$$

Für die Erdungsspannungen gilt: $U_A = I_R \times R_A$ und $U_B = I_R \times R_B$.

Im Falle einer symmetrischen Beeinflussung ergibt sich mit

$$R_A = R_B = R_E \text{ auch } U_A = U_B = U_E \text{ und}$$

$$\frac{U_E}{U_L} = \frac{R_E}{R' \sim \times L_R + j\omega L' \times L_R + 2R_E} \quad (41)$$

$$\left| \frac{U_E}{U_L} \right| = \frac{R_E}{\sqrt{(R' \sim \times L_R + 2R_E)^2 + (\omega L' \times L_R)^2}} \quad (42)$$

Aus Bild 26 kann bei Beeinflussung durch 50-Hz-Ströme die zu erwartende Erderspannung $|U_E|$, die dem größten Wert des Rohrleitungspotentials und damit auch dem höchstmöglichen Wert der Berührungsspannung an der Rohrleitung entspricht, bei Anschluss von je einem Erder mit dem Erdungswiderstand R_E für einen Rohrleitungsdurchmesser DN 500 entnommen werden.

Zu beachten ist, dass für lange Oberflächenerder (L_E größer als etwa 100 m) die Gleichungen (35) bis (38) wegen der dann zu berücksichtigenden Längswiderstände der Erder nicht mehr gelten, siehe hierzu 12.4.4.

Konzentrierte Erder müssen nicht genau an den Enden einer Näherungslänge angeschlossen sein, sie können auch etwas außerhalb der Näherungslänge (also außerhalb des Beeinflussungsbereiches der Hochspannungsfreileitung) angeordnet werden. Als Länge der Rohrleitung L_R in Gleichung (42) ist dann die Rohrleitungslänge zwischen den konzentrierten Erdern einzusetzen, für die Ermittlung von $|U_L|$ gilt dann wieder $|U_L| = |E| \times |L_R|$.

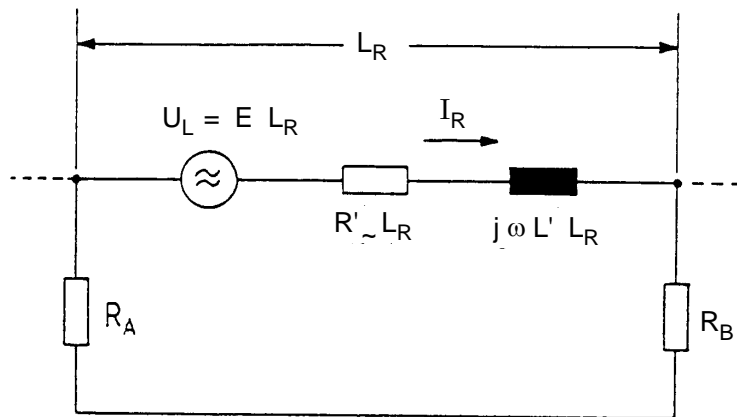


Bild 25 – Ersatzschaltbild zur Berechnung von Erdern bei konzentrierter Anordnung nach 12.4.3

U_L induzierte Längsspannung im ideal isolierten Leiter, bei schräger Näherung $|U_L| = \Sigma |\Delta U_L|$, Werte für R'_L und $\omega L'$ können für 50 Hz Bild 27 und für 16,7 Hz Bild 28 entnommen werden.

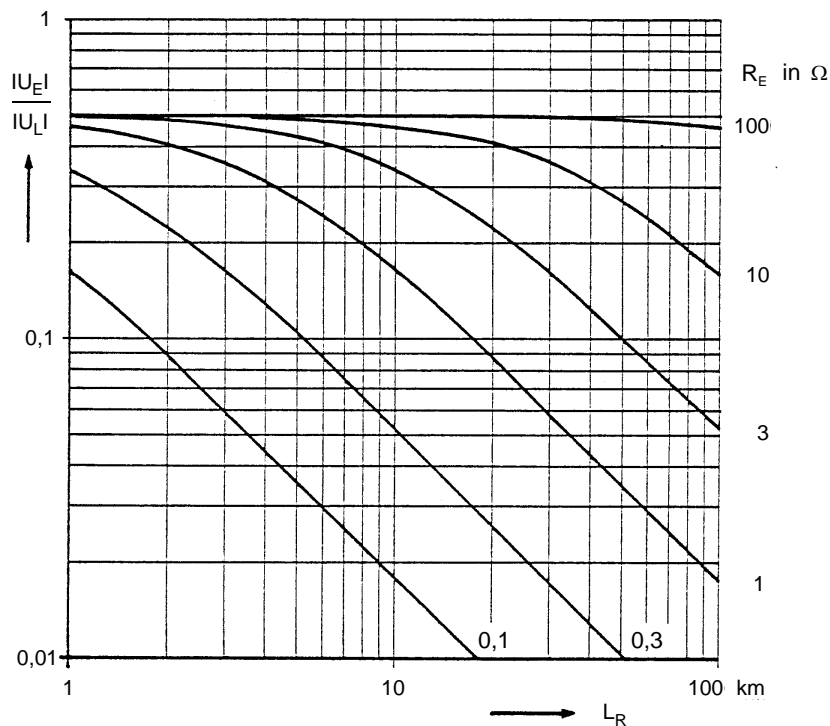


Bild 26 – $|U_E|/|U_L| = f(L_R)$ für je einen Erder R_E an den Enden der Näherungslänge L_R für Rohrleitung DN 500, $f = 50$ Hz, $\mu_r = 200$, $\rho_E = 100 \Omega\text{m}$

12.4.4 Potentialsteuernde Erder

Beim Anschluss von konzentrierten Erdern, z. B. an den Enden einer Näherungslänge nach 12.4.3 kann deren potentialsteuernde Wirkung ausgenutzt werden. Hierzu sind längere Oberflächenerder parallel zur Rohrleitung erforderlich. Wegen ihres Längswiderstandes tritt am Erder bereits ein Spannungsfall auf.

Deswegen sollte die Länge eines Erders bei einseitigem Anschluss an die Rohrleitung etwa 100 m und bei mittigem Anschluss etwa 200 m nicht überschreiten.

Der Spannungstrichter eines Erders und die damit erzielbare Verringerung der Berührungsspannung kann nach DIN EN 14505, [2] und [3] berechnet werden.

12.4.5 Erdung der Rohrleitung bei Resonanz

Wenn ein Rohrleitungsabschnitt in Resonanz gerät und sich durch Resonanzüberhöhung ein weiteres Wechselspannungsmaximum ergibt, kann durch die Anordnung von konzentrierten Erdern an den Enden des Beeinflussungsabschnittes eine wirksame Einflussnahme auf die Höhe des Maximums am Resonanzort nicht erzielt werden. Gemäß Gleichung (28) ist die Resonanzüberhöhung \ddot{U}_{Res} direkt proportional zu dem spezifischen Umhüllungswiderstand r_u . Für eine Verkleinerung der Resonanzüberhöhung auf Werte von $\ddot{U}_{Res} < 1$ müssen daher Erder gemäß 12.4.2 gleichmäßig über der Resonanzlänge verteilt werden. Die Dimensionierung kann nach den Ausführungen in 12.4.2 erfolgen.

13 Eigenschaften des beeinflussenden und des beeinflussten Systems

13.1 Allgemeines

Nachfolgende Angaben sollten ein Hilfsmittel für überschlägige Beeinflussungsbetrachtungen sein. Bei genaueren Untersuchungen müssen die Werte entsprechend den Tabellen 4 und 5 vom jeweiligen Partner angegeben werden.

13.2 Rohrleitungen

Bei Rohrleitungen ist in erster Linie der spezifische Umhüllungswiderstand von Interesse. Je nach Alter, Verlegungsart, spezifischem Bodenwiderstand und Nachumhüllung der Schweißnähte liegen bei erdverlegten Leitungen sehr unterschiedliche Werte vor. Es lassen sich an dieser Stelle daher lediglich Angaben über die jeweilige Größenordnung machen, siehe Tabelle 11.

Tabelle 11 – Größenordnung spezifischer Umhüllungswiderstände von erdverlegten Rohrleitungen

Umhüllungsart	Schichtdicke nach DIN in mm	Umhüllungswiderstand		Relative Dielektrizitätskonstante μ_r
		Werksprüfung	Erfahrungswerte für verlegte Leitungen	
Bitumen	3,5 ... 5,5	1 M Ω m ²	2 k Ω m ² ...40 k Ω m ²	2,7
Polyethylen	2 ... 3	100 M Ω m ²	50 k Ω m ² ...10 M Ω m ²	2,3
Polypropylen	1,8 ... 2,5	100 M Ω m ²	*	2,25
Epoxidharz*	0,35	100 k Ω m ² ... 100 M Ω m ²	*	3,2
Polyurethan*	0,8 ... 1,5	100 k Ω m ² ... 100 M Ω m ²	*	3,1 ... 4

* Der Einsatz dieser Umhüllungsmaterialien beschränkt sich in der Regel auf räumlich begrenzte Sonderbauwerke (z. B. Pressungen, Bögen, Horizontal-Bohrverfahren), sodass hier der Umhüllungswiderstand des übrigen Teils der Rohrleitung dominiert.

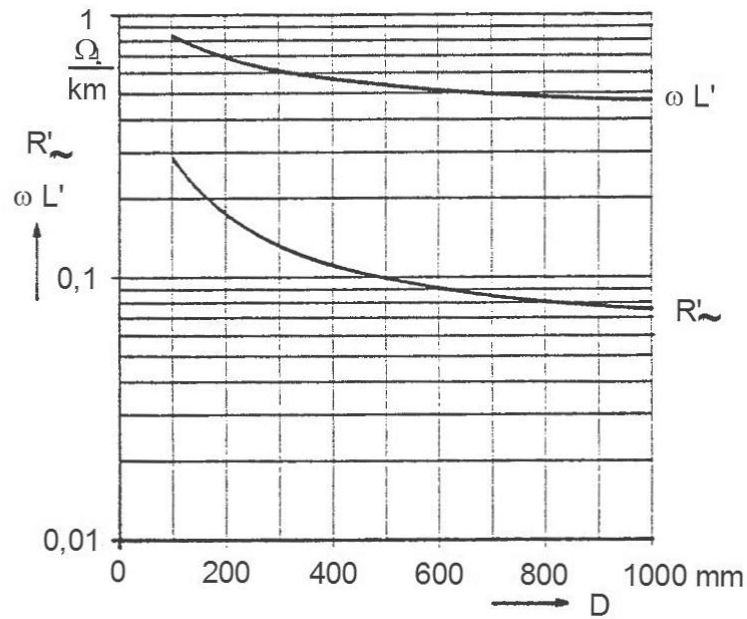


Bild 27 – Kenngrößen für Rohrleitungen als Funktion des Rohrleitungsdurchmessers nach Gleichungen (19) und (20); $f = 50$ Hz, $\mu_r = 200$, $\rho_E = 100$ Ωm

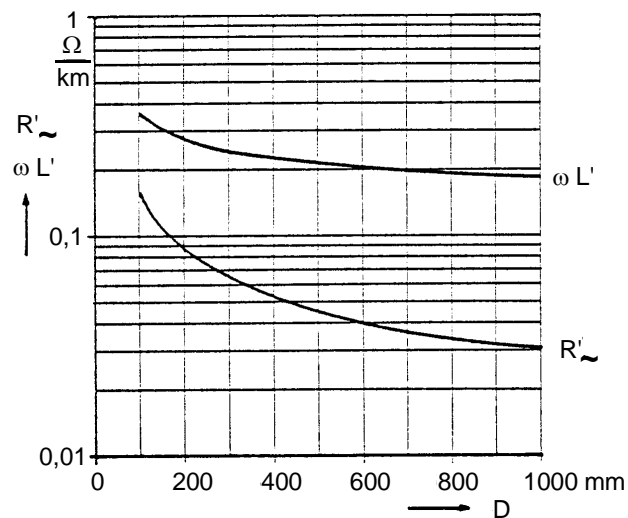


Bild 28 – Kenngrößen für Rohrleitungen als Funktion des Rohrleitungsdurchmessers nach Gleichungen (19) und (20); $f = 16,7$ Hz, $\mu_r = 200$, $\rho_E = 100$ Ωm

13.3 Hochspannungs-Drehstromfreileitung

Der größtmögliche Betriebsstrom ist von dem zuständigen Hochspannungsnetzbetreiber zu nennen. Den obersten Wert stellt dabei der thermische Grenzstrom des Leiterseiles dar, der nur unter bestimmten Voraussetzungen erreicht werden kann. In Tabelle 12 sind diese Werte für einige genormte Leiterseile zusammengestellt.

Der thermische Grenzstrom eines Bündelleiters ergibt sich aus dem thermischen Grenzstrom des Teilleiters multipliziert mit der Teilleiterzahl, z. B. Viererbündel $4 \times 240/40$ mm² Al/St: $645 \text{ A} \times 4 = 2580 \text{ A}$.

Tabelle 12 – Thermischer Grenzstrom von Leiterseilen aus Aluminium-Stahl nach DIN EN 50182

Nennquerschnitt mm ²	Thermischer Grenzstrom A
120/20	410
150/25	470
185/30	535
240/40	645
265/35	680
300/30	740
340/30	790
380/50	840
550/70	920
560/50	1 020
	1 040

14 Beispiele für Diagrammauswertungen und Berechnungen

14.1 Grenzlänge bei Parallelführung (7.3.2)

An einem Beispiel ist die Verfahrensweise in der Tabelle 13 näher erläutert. Angenommene Daten:

- Parallelführung einer Rohrleitung DN 500 mit einer 380-kV-Doppelleitung, ausgerüstet mit einem Erdseil Al/St 240/40 ($r_E = 0,65$), mit einer Seilbelegung entsprechend Bild 19 a)
- Abstand $a = 30$ m
- Frequenz $f = 50$ Hz, spezifischer Erdwiderstand $\rho_E = 100 \Omega\text{m}$

Aus den Werten R_E/n' in den in den letzten beiden Zeilen der Tabelle 13 können die erforderlichen Erdungswiderstände R_E und die auf die Rohrleitungslänge bezogene Anzahl der Erder n' nach 12.4 ermittelt werden.

Mit Hilfe des Bildes 5 können aber auch umgekehrt für vorgegebene Werte $|U_{R \max}|$, der Länge einer Parallelführung L und des spezifischen Umhüllungswiderstandes r_u die zulässigen in einem ideal isolierten Leiter induzierten Feldstärken $|E_K|$ und $|E_B|$ ermittelt werden. Bei Kenntnis der beeinflussenden Ströme $|I_K|$ und $|I_B|$ lassen sich dann, z. B. aus Bild 18, die erforderlichen Abstände a bezüglich der Kurzzeit- und Langzeitbeeinflussung feststellen.

Tabelle 13 – Beispiel für eine Abschätzung von zulässigen Parallelführungslängen (Daten im Text)

Beeinflussung durch	Erdkurzschlussstrom		Betriebsstrom	
Aus Bild 18 folgt für Beispiel im Text mit den angenommenen Strömen ergibt sich damit	$ E_K / I_K = 150 \text{ V}/(\text{kA km})$ $ I_K = 30 \text{ kA}$ $ E_K = 3 \text{ 150 V/km}$ (mit $w = 0,7$)		$ E_B / I_B = 40 \text{ V}/(\text{kA km})$ $ I_B = 1,2 \text{ kA}$ $ I_B = 2,4 \text{ kA}$ $ E_B = 48 \text{ V/km}$ $ E_B = 96 \text{ V/km}$	
Für ein Rohrleitungspotential $U_{R \text{ max}}$ in V wird der Ordinatenwert im Bild 5 in km als Grenzlänge der Parallelführung folgt für a) $r_u = 30 \text{ k}\Omega \text{ m}^2$ L_{Gr} in km für b) $r_u = 3 \text{ k}\Omega \text{ m}^2$ L_{Gr} in km	2 000 1,27	1 000 0,636	60 2,5	60 1,25
Für beliebiges L_{Gr} wäre erforderlich r_{uG} in $\text{k}\Omega \text{ m}^2$ Hierfür ist eine Verringerung von r_u um r_e erforderlich nach Gl. (30) für Fall a) r_e in $\text{k}\Omega \text{ m}^2$ für Fall b) r_e in $\text{k}\Omega \text{ m}^2$ dies entspricht nach Gl. (32) für Fall a) R_E/n' in $\text{k}\Omega \text{ m}$ für Fall b) R_E/n' in $\text{k}\Omega \text{ m}$	2,0 2,14 6,00	0,3 0,30 0,33	5,0 6,00 keine	2,0 2,14 6,00
	1,36 3,82	0,20 0,21	3,82 keine Erder	1,36 3,82

14.2 Berechnung des Rohrleitungspotentials

14.2.1 Induzierte Längsfeldstärke in einem ideal isolierten Leiter bei schräger Näherung (12.1.5)

Bild 29 a) zeigt als Beispiel einen Lageplan für eine Näherung mit einer 380-kV-Doppelleitung. Die Rohrleitung wird auf die beeinflussende Hochspannungsleitung projiziert, wobei sich zunächst eine Unterteilung durch Grenzabstände, Eckpunkte der Hochspannungsfreileitung und der Rohrleitung sowie durch deren Kreuzungspunkte ergibt. Bei größeren Inhomogenitäten kann eine weitergehende Unterteilung, z. B. bei Änderung des induzierten Stromes, der Reduktionsfaktoren, des spezifischen Erdwiderstandes und der Kenngrößen der Rohrleitung (Übergang auf andere Rohrdurchmesser oder andere spezifische Umhüllungswiderstände) notwendig werden. Von besonderer Bedeutung ist eine weitergehende Unterteilung von schrägen Näherungen in Abschnitte, für die mit ausreichender Genauigkeit eine gleich bleibende induzierte Längsfeldstärke ermittelt werden kann. Je feiner die Unterteilung ist, umso größer ist die Genauigkeit, dies bedeutet aber gleichzeitig eine erhebliche Erhöhung des Rechenaufwandes. Unter Berücksichtigung der Unsicherheiten für die sonstigen Einflussgrößen ist die in der TE 1 der SfB vorgesehene Unterteilung auch für die Ermittlung von Rohrleitungsbeeinflussungen als ausreichend anzusehen. Hiernach darf für die Ermittlung des rechnerischen Abstandes $a = \sqrt{a_1 \times a_2}$ das Verhältnis der Abstände am Anfang und am Ende einer schrägen Näherung a_2/a_1 nicht größer als 3 sein. Dagegen sollten die ebenfalls in der Technischen Empfehlung Nr. 1 (TE 1) enthaltenen Diagramme zur Bestimmung des rechnerischen Abstandes für schräge Näherungen mit Abstandsverhältnissen a_2/a_1 größer als 3 hier nicht verwendet werden, da größere Fehler zu erwarten sind.

Eine entsprechende Unterteilung zur Überführung einer schrägen Näherung in einzelne parallele Abschnitte wurde in den Bildern 29 b) und 29 c) für die Beeinflussung einer Rohrleitung nach Bild 29 a) vorgenommen. Die zugehörigen Zahlenwerte sind in den Tabellen 14 und 15 zusammengestellt. Dargestellt sind für die Kurz- und Langzeitbeeinflussung die sich ergebenden mittleren Längsfeldstärken $\frac{|E|}{|I|}$

für die einzelnen Rohrleitungsabschnitte und $\sum \frac{|U_L|}{|I|} = f(\sum \Delta L_R)$ bezogen auf die Rohrleitungslänge. Mit der Unterteilung der Näherung in einzelne Abschnitte wird zweckmäßigerweise an einer Kreuzungsstelle begonnen.

Für die Tabellen 14 und 15 gilt

- Spalte 4: rechnerischer Abstand des Teilabschnittes $a = \sqrt{a_1 \times a_2}$
- Spalte 5: die induzierte Längsfeldstärke ist auf die Länge der Hochspannungsleitung bezogen
- Spalten 6 und 7: die Teillängen ΔL_H und ΔL_R sind auf die Länge der Hochspannungsleitung bzw. der Rohrleitung bezogen
- Spalte 9: die induzierte Längsfeldstärke ist auf die Länge der Rohrleitung bezogen

$$\frac{|E_{K|R}|}{|I_K|} = \frac{|E_{K|H}|}{|I_K|} \times K \quad \text{mit } K = \frac{\Delta L_H}{\Delta L_R} \text{ oder } K = \frac{\Delta L_H}{\sqrt{(a_2 - a_1)^2 + \Delta L_H^2}} \text{ oder } K = \cos \alpha \text{ als Winkel zwischen}$$
Hochspannungsleitung und Rohrleitung
- Spalte 10: Produkt aus Spalte 7 und Spalte 9

Die Berechnung des Rohrleitungspotentials nach 12.1.6 kann wahlweise mit Hilfe der Werte aus Spalte 9 oder Spalte 11 erfolgen. Bei Verwendung der Werte aus Spalte 11 ergeben sich für die einzelnen Leitungsabschnitte dieselben Längsfeldstärken wie nach Spalte 9, wenn die Einzelwerte $\sum \frac{|U_L|}{|I|} = f(\sum \Delta L_R)$ geradlinig verbunden werden, siehe Bilder 29 b) und 29 c).

Tabelle 14 – Zahlenwerte für Bild 29 b) Kurve (5) in Bild 33

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Abschnitt	a_1 m	a_2 m	a m	$ E_{K H} / I_K $ V/(km kA)	ΔL_H km	ΔL_R km	$\Sigma \Delta L_R$ km	$ E_{K R} / I_K $ V/(km kA)	$ \Delta U_R / I_K $ V/kA	$3(\Delta U_R / I_K)$ V/kA
1–2	1 000	675	822	14,6	1,213	1,256	1,26	14,1	17,7	17,7
2–3	675	225	390	35	1,680	1,739	3,00	33,8	58,8	76,5
3–4	225	75	130	70	0,560	0,580	3,58	67,6	39,2	115,7
4–5	75	25	43	113	0,187	0,193	3,77	109,5	21,1	136,8
5–6	25	25	25	135	3,000	3,000	6,77	135,0	405,0	541,8
6–7	25	6*	12	165	0,052	0,056	6,82	153,2	8,6	550,4
7–8	6*	25	12	165	0,052	0,056	6,88	153,2	8,6	559,0
8–9	25	75	43	113	0,137	0,146	7,03	106,0	15,5	574,5
9–10	75	225	130	70	0,412	0,439	7,47	65,7	28,8	603,3
10–11	225	675	390	35	1,236	1,316	8,78	32,9	43,3	646,6
11–12	675	1 000	822	14,6	0,892	0,950	9,73	13,7	13,0	659,6

* Für die Berechnung nach TE 1 der SfB ist für den Abstand am Kreuzungspunkt die Leiterhöhe (6 m) einzusetzen.

Tabelle 15 – Zahlenwerte für Bild 29 c)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Abschnitt	a_1 m	a_2 m	a m	$ E_{K H /I_B }$ V/(km kA)	ΔL_H km	ΔL_R km	$\Sigma \Delta L_R$ km	$ E_{K R /I_B }$ V/(km kA)	$ \Delta U_R /I_B $ V/kA	$3(\Delta U_R /I_B)$ V/kA
A _B -3	400	225	300	5,2	0,653	0,676	0,68	5,0	3,4	3,4
3-4	225	75	130	10	0,560	0,580	1,25	9,7	5,6	9,0
4-5	75	25	43	28	0,187	0,193	1,45	27,1	5,2	14,2
5-6	25	25	25	46	3,000	3,000	4,45	46	138,0	152,2
6-7	25	6*	12	60	0,052	0,056	4,51	55,7	3,1	155,3
7-8	6*	25	12	60	0,052	0,056	4,57	55,7	3,1	158,4
8-9	25	75	43	28	0,137	0,146	4,72	26,3	3,8	162,2
9-10	75	225	130	10	0,412	0,439	5,16	9,4	4,1	166,3
10-D _B	225	400	300	5,2	0,481	0,512	5,67	4,9	2,5	168,8

* Für die Berechnung nach TE 1 der SfB ist für den Abstand am Kreuzungspunkt die Leiterhöhe (6 m) einzusetzen.

14.2.2 Vereinfachte Methode zur Ermittlung des Rohrleitungspotentials (12.1.6)

Unter Berücksichtigung der Unsicherheit, die durch die Annahme einiger Einflussgrößen gegeben ist, kann jedoch auch die im Folgenden beschriebene einfachere Methode angewendet werden, zumal sich hierbei im Allgemeinen etwas größere Längsfeldstärken ergeben, die Ergebnisse also auf der sicheren Seite liegen.

Für jeden einzelnen der nach 12.1.5 gebildeten Teilabschnitte der Rohrleitung muss der Verlauf des Rohrleitungspotentials innerhalb des Teilabschnittes nach Gleichung (5) und außerhalb des Teilabschnittes nach Gleichung (9) ermittelt werden. Für die Bestimmung dieser Werte können die Bilder 13 und 14 verwendet werden. Eine Addition aller Teilspannungen ergibt den Verlauf des Rohrleitungspotentials innerhalb und außerhalb der Näherung. Nach den Bildern 29 b) und 29 c) ergeben sich für das dortige Beispiel insgesamt 11 bzw. 9 Teilabschnitte mit unterschiedlichen Längsfeldstärken, die einen entsprechend großen Rechenaufwand durch Bildung von weniger Rohrleitungsabschnitten mit entsprechend korrigierten Längsfeldstärken erheblich verringert werden. Hierzu bieten sich zwei Möglichkeiten an, die anhand des Bildes 29 b) im Folgenden erläutert werden.

- Aus den Werten von $|E_{K|R|/|I_K|} = f(\Sigma \Delta L_R)$ können vier sich überlagernde neue Teilabschnitte mit jeweils etwa gleich bleibenden Längsfeldstärken gebildet werden (Bild 30), deren Werte in der Tabelle 16 zusammengestellt sind. Hierbei sind die neuen Teilabschnitte so zu wählen, dass die Fehlergrenze für die Längsfeldstärke jeweils kleiner als $\pm 10\%$ bleibt. Eine Abschätzung ist durch Ausgleichen der Flächeninhalte innerhalb der einzelnen Teilabschnitte möglich
- Aus dem Verlauf von $\Sigma(|\Delta U_L|/|I_K|) = f(\Sigma \Delta L_R)$ können drei neue nebeneinander befindliche Teilabschnitte gebildet werden (Bild 31), deren Werte in den Tabellen 17 d) bzw. 17 e) zusammengestellt sind. Die Längsfeldstärken ergeben sich jeweils aus der Neigung der Geraden dieser neuen Teilabschnitte

In beiden Fällen sind für jeden einzelnen neuen Teilabschnitt die Rohrleitungspotentiale innerhalb des Teilabschnittes nach Gleichung (5) und außerhalb des Teilabschnittes nach Gleichung (9) oder mit Hilfe der Bilder 13 und 14 zu ermitteln. Eine Addition aller Teilspannungen ergibt den Verlauf des Rohrlei-

tungspotentials innerhalb und außerhalb der Näherung. Für das Beispiel Bild 29 b) sind nach Bildung von drei nebeneinander liegenden Teilabschnitten (siehe Bild 31) und Tabelle 17 d) die Ergebnisse im Bild 32 dargestellt.

Zum Vergleich sind im Bild 33 die Ergebnisse nach verschiedenen Berechnungsverfahren zusammengestellt. Mit Ausnahme der Kurve (1) ergibt sich eine ausreichende Übereinstimmung.

Tabelle 16 – Zahlenwerte für vier sich überlagernde Teilabschnitte mit korrigierten Längsfeldstärken nach Bild 31; Kurve (4) in Bild 32

1	2	3
Abschnitt	ΔL_R km	$\frac{ E_{K R} / I_K }{V/(km \text{ kA})}$
1–12	9,73	14,0
2–12	7,52	19,4
3–10	4,46	33,4
4–9	3,44	66,2

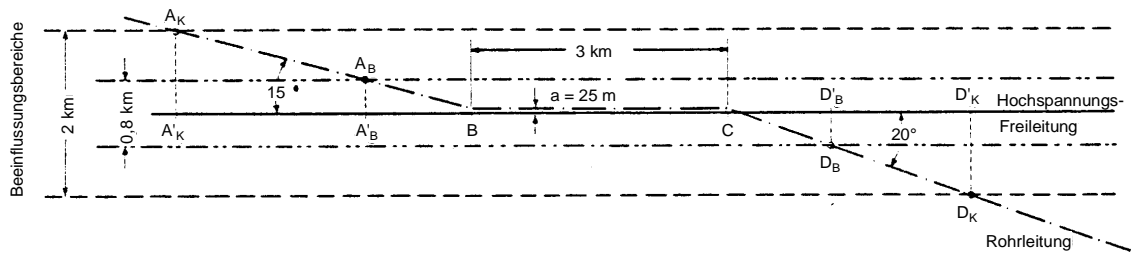
Tabelle 17 d) und 17 e) – Zahlenwerte für drei nebeneinander befindlicher Teilabschnitte mit korrigierten Längsfeldstärken nach Bild 31

für Verlauf Kurve (2) in Bild 33

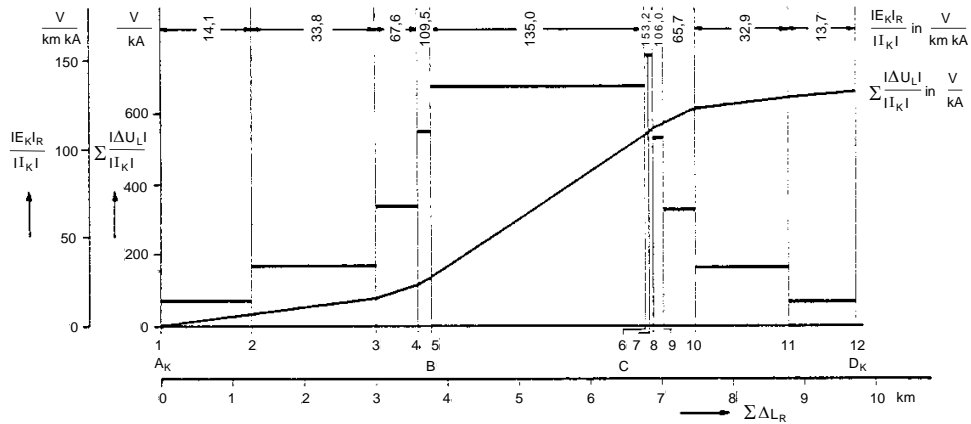
1	2	3
Abschnitt	ΔL_R km	$\frac{ E_{K R} / I_K }{V/(km \text{ kA})}$
1 - 4	3,58	32,3
4 - 9	3,44	133,0
9 - 12	2,71	31,5

für Verlauf Kurve (3) Bild 33

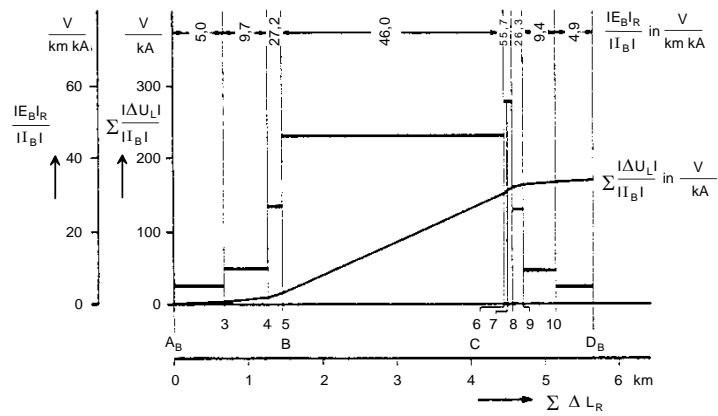
1	2	3
Abschnitt	ΔL_R km	$\frac{ E_{K R} / I_K }{V/(km \text{ kA})}$
1–4	3,58	32,3
4–10	3,89	134,8
10–12	2,27	24,8



a) Vereinfachter Lageplan



b) Kurzzeitbeeinflussung durch Erdkurzschlussstrom; $\rho_E = 50 \Omega \text{m}$



c) Langzeitbeeinflussung durch Betriebsströme, $\rho_E = 50 \Omega \text{m}$

Bild 29 – Induzierte Längsfeldstärke und Längsspannung in einem ideal isolierten Leiter bei Beeinflussung durch eine 380-kV-Doppelleitung, Donaumasform, mit Seilbelegung nach Bild 20, $r_E = 0,65$ (1 Erdseil Al/St 240/40)

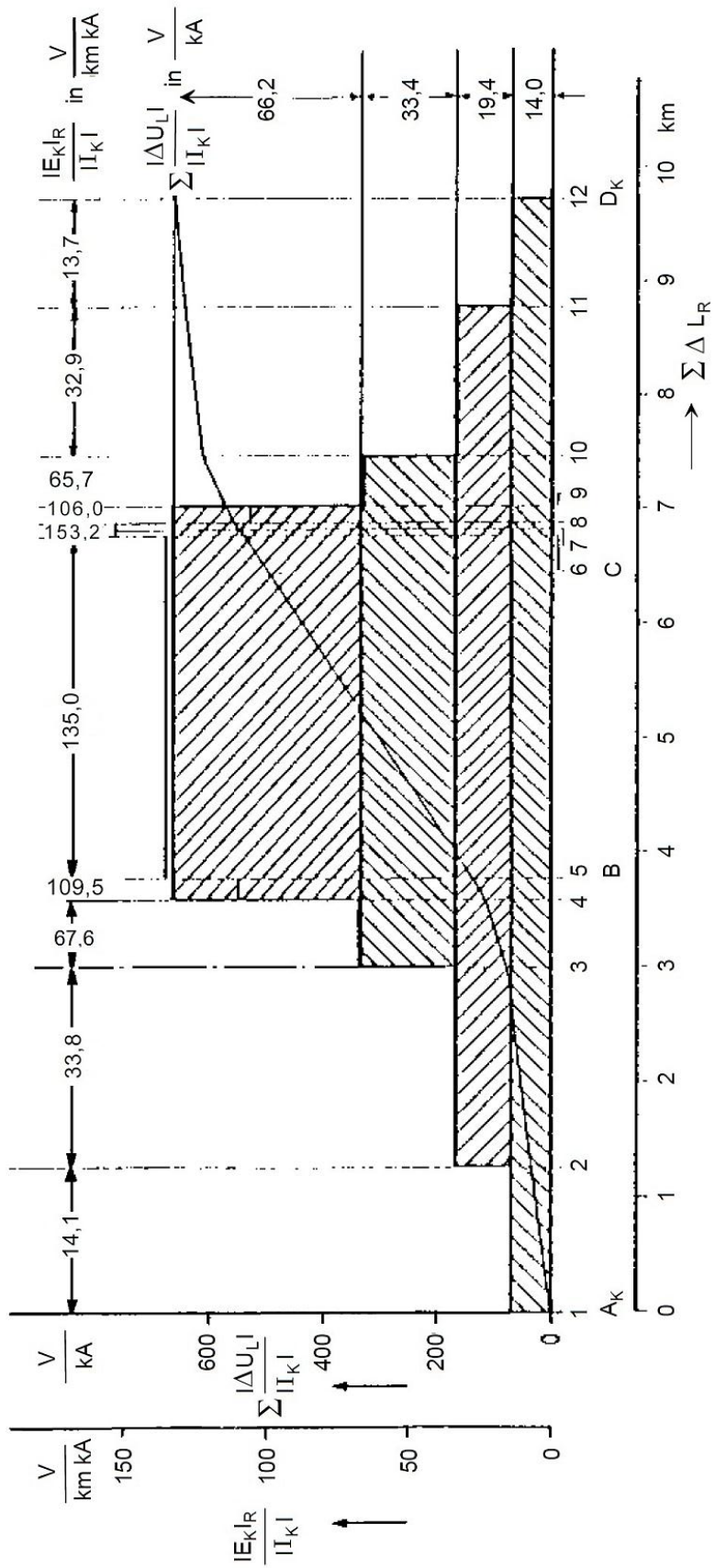


Bild 30 – Induzierte Längsfeldstärke und Längsspannung bei Bildung von vier sich überlagernden Teilabschnitten nach Bild 29 b) und Tabelle 29 c)

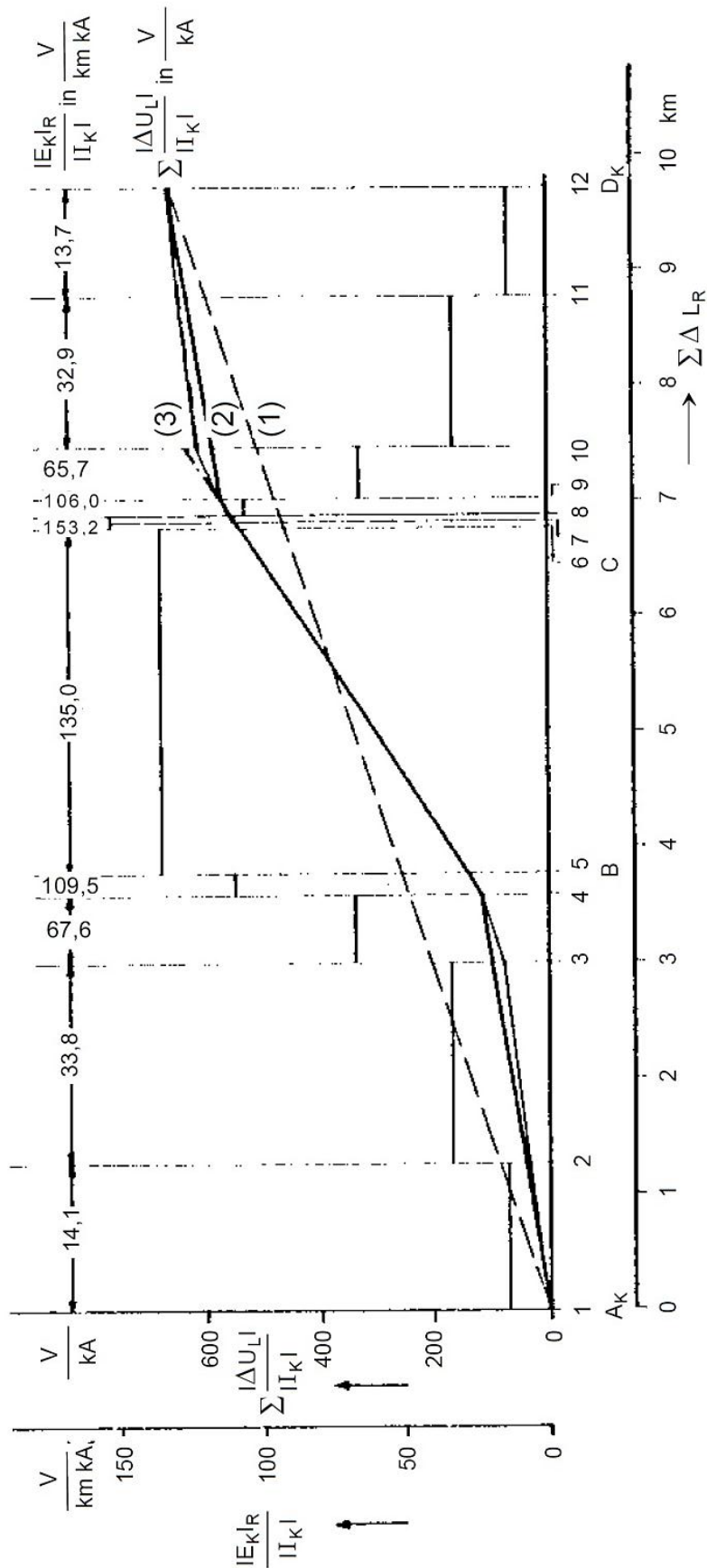


Bild 31 – Induzierte Längsfeldstärke und Längsspannung bei Bildung von drei nebeneinander liegenden Teilabschnitten nach Bild 30 und Tabelle 17 d)

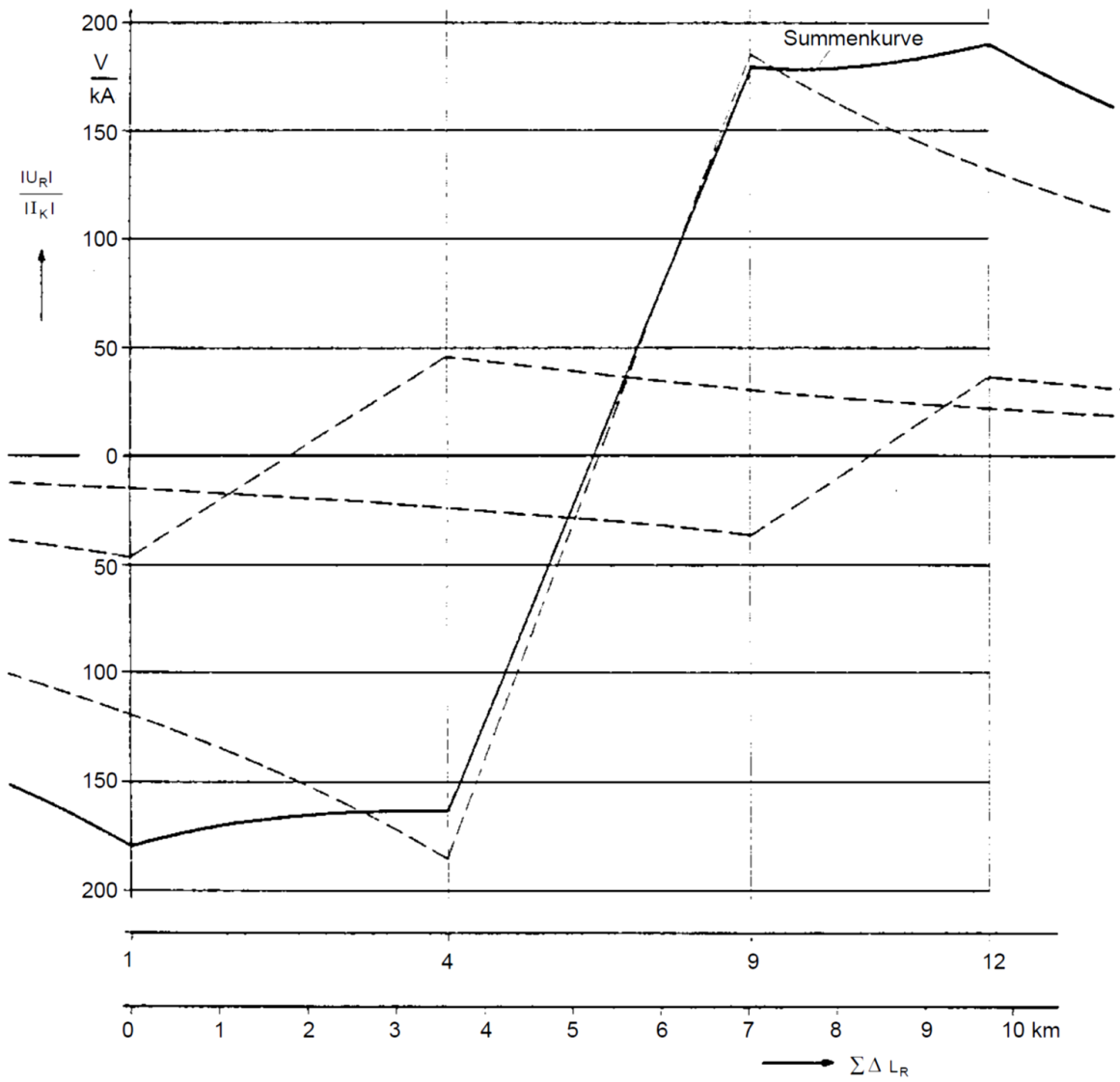
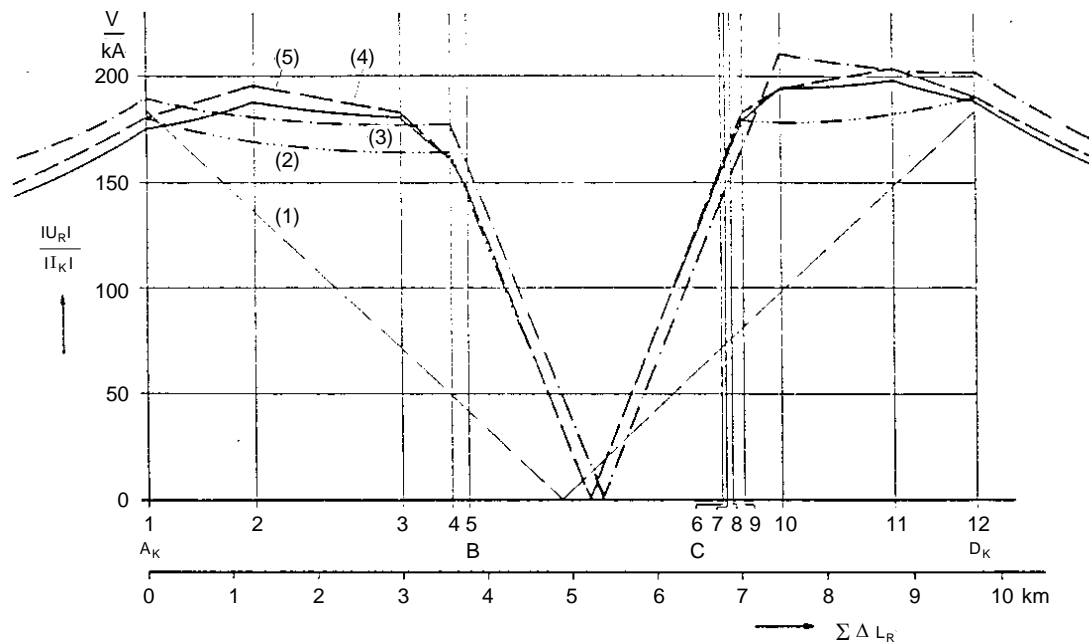


Bild 32 – Ermittlung des Rohrleitungspotentials aus drei nebeneinander liegenden Teilabschnitten nach Bild 31 und Tabelle 17 d)



- (1) Anfang und Ende von $\Sigma(|\Delta U_L|/|I_K|) = f(\Sigma \Delta L_R)$ nach Bild 31 verbunden
- (2) aus 3 nebeneinander liegenden Teilabschnitten 1–4, 4–9 und 9–12
 $\Sigma(|\Delta U_L|/|I_K|) = f(\Sigma \Delta L_R)$ nach Bild 31 und Tabelle 17 d)
- (3) wie (2), jedoch mit geänderter Unterteilung: 1–4, 4–10 und 10–12 nach Bild 31 und Tabelle 17 e)
- (4) aus 4 überlagerten Teilabschnitten $|E_{K|R}|/|I_K| = f(\Sigma \Delta L_R)$ nach Bild 31 und Tabelle 16
- (5) aus 11 nebeneinander liegenden Teilabschnitten nach Bild 31 und Tabelle 14

Bild 33 – Rohrleitungspotentiale bei einer Näherung nach Bild 29 b)

14.3 Beispiel für verteilt angeordnete Erder (12.4.2)

Sollte im Beispiel nach Bild 12 der spezifische Umhüllungswiderstand einer Rohrleitung DN 600 mit $r_u = 30 \text{ k}\Omega \text{ m}^2$ auf einen äquivalenten spezifischen Umhüllungswiderstand $5 \text{ k}\Omega \text{ m}^2$ herabgesetzt werden, ergibt sich auch Gleichung (30) $r_{uG} = 5 \text{ k}\Omega \text{ km}^2$ für $r_e = 6 \text{ k}\Omega \text{ m}^2$.

Aus Gleichung (39) folgt dann:

$$R_E/n' = 3,2 \text{ }\Omega \text{ km}$$

Je nach Größe des spezifischen Erdwiderstandes kann eine größere Erderlänge mit einer kleineren Anzahl der Erder je km zweckmäßig sein oder umgekehrt. Für $\rho_E = 100 \text{ }\Omega \text{ m}$ und bei Verwendung von Tiefenerdern mit einer Länge von 10 m beträgt $R_E = 10 \text{ }\Omega$, es wären dann $n' = 3,14$ Erder je km erforderlich. Bei $n' = 4$ Erder je km wird nur ein Erdungswiderstand $R_E = 12,5 \text{ }\Omega$ benötigt; dies entspricht einer Erderlänge von etwa 8 m.

14.4 Beispiel für konzentrierte Erder an den Enden einer Näherungslänge (12.4.3)

Für das Beispiel nach Bild 12 (bei der dort angenommenen Parallelführung ist $L = L_R$) wird

$$|U_L| = |E_B| \cdot L_R = 53 \text{ V/km} \times 12 \text{ km} = 640 \text{ V}$$

Da $|U_E| \leq 60 \text{ V}$ sein muss, ergibt sich für $\frac{|U_E|}{|U_L|} \approx 0,1$

Mit $R_L' = 0,09 \text{ } \Omega/\text{km}$ und $\omega L' = 0,51 \text{ } \Omega/\text{km}$ für $D = 600 \text{ mm}$ aus Bild 11 folgt entsprechend Gleichung (42):

$$\frac{|U_E|}{|U_L|} = \frac{R_E}{\sqrt{(1,08 \Omega + 2 R_E)^2 + (6,12 \Omega)^2}} = 0,1$$

Aus der Auflösung dieser Gleichung ergibt sich $R_E = 0,65 \text{ } \Omega$.

Solch niederohmige Erdungswiderstände werden in der Praxis nur durch mehrere Erder erreichbar sein.

Literaturhinweise

- [1] Directives Concerning the Protection of Telecommunication Lines against Harmful Effects from Electric Power and Electrified Railway Lines, ITU-T, Genf
Volume I: Design, construction and operational principles of telecommunication, power and electrified railway facilities, 1989
Volume II: Calculating induced voltages and currents in practical cases, 1999
Volume III: Capacitive, inductive and conductive coupling: physical theory and calculation methods, 1989
Volume IV: Inducing currents and voltages in electrified railway systems, 1989
Volume V: Inducing currents and voltages in power transmission and distribution systems, 1999
Volume VI: Danger and disturbance, 1989
Volume VII: Protective measures and safety precautions, 1989
- [2] VDEW (Hrsg.) Erdungen in Starkstromnetzen, VDEW Frankfurt/M. (1992)
- [3] Baeckmann, v. W., Schwenk, W.: Handbuch des kathodischen Korrosionsschutzes, 4. Auflage, Wiley VCH (1999)
- [4] Böcker, H., Oeding, D.: Induktionsspannung an Pipelines in Trassen von Hochspannungsleitungen, Elektrizitätswirtschaft 65 (1966), Heft 5, S. 157 bis 170
- [5] Feist, K.-H.: Zone of Influence of Earth Potential Rise (Zone der Anhebung des Erdpotentials), Electra, Oktober 1978, No. 60, S. 57–68
- [6] Haubrich, H. J.: Das Magnetfeld im Nahbereich von Drehstrom-Freileitungen, Elektrizitätswirtschaft 73 (1974), Heft 18, S. 511–517
- [7] Haubrich, H.-J.: New ways for interference computation and Monte-Carlo optimization to guarantee the compatibility of inductively coupled systems, 6th EMC- symposium, pp. 263–267, Zürich (1985)
- [8] Haubrich, H.J.: Beeinflussung, Hütte Taschenbücher der Technik: Elektrische Energietechnik, Bd. 3 Netze, S. 234–252 Springer Verlag, Berlin (2000)
- [9] Hogrefe, F., Kramer, P.: Elektronische Berechnung der induzierten Spannungen Rohrleitung – Erde, Elektro-Anzeiger 28 (1975), Heft 14, S. 363–366
- [10] Kaiser, G.: Die elektrischen Konstanten von Rohrleitungen und ihre Messung, ETZ-A 87 (1966), S. 792–796
- [11] Lappe, F., Neumann, W.: Erdkurzschluss-Diagramme mit linearem Verlauf, Elektrizitätswirtschaft 72 (1973), Heft 22, S. 769 – 775
- [12] Menememlis, Ch.: Induktive Beeinflussung einer Rohrleitung und ihres Steuerkabels durch eine parallellaufende Hochspannungsleitung, Bull. SEV 57 (1966), Heft 8, S. 366 – 376
- [13] Pestka, J., Knoche, B.: Berechnungsprogramme, Elektrizitätswirtschaft 81 (Jg. 1982)
- [14] Pohl, J.: Beeinflussung von umhüllten Rohrleitungen durch Hochspannungsfreileitungen, CIGRE-Conference 1966, Bericht Nr. 326
- [15] Pohl, J.: Induktive Beeinflussung von Rohrleitungen durch Erdkurzschluss- und Betriebsströme in 50-Hz-Hochspannungsfreileitungen, Elektrizitätswirtschaft 75 (1976), Heft 19, S. 593 – 599
- [16] Röhl, G.: Berechnung der induzierten Längsspannungen an hochspannungsbeeinflussten Rohrleitungen, Elektrische Bahnen 38 (1967), Heft 1, S. 19 – 22 und Heft 2, S. 38 – 40

- [17] Sowade, H. J.: Untersuchung der Gefährdung von Rohrleitungen durch Erder von Hochspannungsfreileitungen und -anlagen, Elektrizitätswirtschaft 75 (1976), Heft 19, S. 603 – 610
- [18] Spickmann, H.: Über die Mast-Erderspannungen von Drehstrom-Hochspannungsleitungen bei normalem Betrieb, ETZ-A 1969, Band 90, Heft 11, S. 261 – 264