

FKH - / VSE – Fachtagung

9. November 2011

Berechnungsmethoden für Auslegung, Betrieb und Sicherheit von elektrischen Energieversorgungssystemen

Computersimulation der Beeinflussungsspannungen auf Rohrleitungen und Kommunikationskabeln durch Starkstromleitungen

Dr. Reinhold Bräunlich

FKH Fachkommission für Hochspannungsfragen, Zürich

Angaben zum Lebenslauf

1982 / 1993	Diplom als Elektroingenieur und Dissertation an der ETH Zürich
1982 bis 1983	Versuchingenieur bei Brown Boveri & Cie in Baden
1983 bis 1990	Assistent und wiss. Mitarbeiter in der Fachgruppe für Hochspannungstechnik der ETH Zürich
seit 1990	Ingenieur bei der FKH, Fachkommission für Hochspannungsfragen in Zürich
seit 2000	Geschäftsleiter der FKH

Gremienarbeit

- Einsitz im Technischen Komitee "Erdungen" des CES
- Einsitz im Technischen Komitee TK 42 „Hochspannungsprüftechnik“ des CES
- 2001 – 2009 Schweizerischer Vertreter im CIGRE-Studienkomitee SC 4: (Power Systems Performance).
- Mitarbeit im der TK 38, AG 42, Ferroresonanzvorgänge

Computersimulation der Beeinflussungsspannungen auf Rohrleitungen und Kommunikationskabeln durch Starkstromleitungen

Reinhold Bräunlich

FKH Fachkommission für Hochspannungsfragen, Zürich

1 Einleitung

Obwohl die Problematik der Beeinflussung von Kabel- und Rohrleitungen durch Hochspannungsfreileitungen sowie diesbezügliche Schutzmassnahmen in der Fachliteratur gut dokumentiert sind, befasst sich nur ein kleiner Kreis von Fachpersonen mit den Fragestellungen in der Praxis.

Im Jahr 2011 sind zwei wichtige technische Regeln über die Thematik erschienen, die sich an einen erweiterten Personenkreis wenden:

- FprEN 50443 (2011)
„Auswirkungen elektromagnetischer Beeinflussungen von Hochspannungswechselstrombahnen und/oder Hochspannungsanlagen auf Rohrleitungen“
Annahme durch das technische CENELEC Komitee TC 9XC (Bahneinrichtungen) und das TC 210: (Elektromagnetische Verträglichkeit) im **September 2011** [1]
- CES/TK Erdungen: „Erläuterungen für den Schwachstrom-Netzbau“
Electrosuisse, Ausgabe 1.0, **Oktober 2011** [2]

Die genannte **EN-Vornorm** setzt Grenzwerte für Beeinflussungsspannungen fest und verlangt neu (Abschnitt 11), dass die Einhaltung durch Messung oder Rechnung abzuklären ist und die Ermittlung der Resultate sowie allfällige Gegenmassnahmen zwischen den Betreibern der Starkstromanlagen und Rohranlagen zu koordinieren sind.

In den neuen **Electrosuisse-Erläuterungen** über den Schwachstromnetzbau wird der Beeinflussung von Kommunikationsleitungen durch Starkstromanlagen ein hoher Stellenwert zugeschrieben (Kapitel 3). Die Wegleitung geht auf die Ermittlung des Ausmasses der Beeinflussung ein und erklärt die Schutzmassnahmen sowie die einzuhaltenden Abstände entsprechend der Leitungsverordnung (LeV [3]). Diese sind mit erklärenden Abbildungen in separaten Anhängen (Abschnitte 11 und 12) in der neuen Schrift zusammengestellt.

Die Herausgabe dieser neuen Richtlinien wird im Folgenden zum Anlass genommen, auf die Methoden zur Berechnung von Beeinflussungen bei Netzfrequenz einzugehen und ein Computerwerkzeug hierzu vorzustellen.

2 Durch Freileitungen verursachte induzierte Spannungen

2.1 Elektromagnetische Beeinflussung von Kabel- und Rohrleitungen

Beim Betrieb von Starkstromleitungen und Bahnen werden auf benachbarten Kabel- und Rohrleitungen Fremdspannungen und -ströme durch **induktive** oder **ohmsche** Kopplung erzeugt.

Bei Beeinflussung durch Starkstromleitungen der Elektrizitätsversorgung handelt es sich in erster Linie um induktive Kopplungsmechanismen. Wegen der Erdseil- und Mastübergangsströme können allerdings indirekt auch ohmsche Kopplungen mitwirken. Bei der Beeinflussung durch Bahnanlagen sind grundsätzlich beide Kopplungsarten beteiligt.

Bei der Frage nach den netzfrequenten Beeinflussung durch elektrische Energieversorgungssysteme und Bahnen müssen insbesondere zwei Situationen unterschieden werden: der **Normalbetrieb** (Abbildung 1) und der **Fehlerfall** (insb. der Erdfehler, Abbildung 2).

Im Normalbetrieb stehen Störungen von Signalleitungen (Brummspannungen) und bei Rohrleitungen Gefährdung durch Wechselstromkorrosion im Vordergrund.

Im Erdfehlerfall treten auf der beeinträchtigten Leitung wesentlich höhere eingekoppelte Spannungen auf. Diese können Werte bis in den Kilovoltbereich erreichen, wobei in erster Linie eine Gefährdung von Personen (Berührungsspannungen) und von Kommunikationsanlagen (Endgeräte) resultiert.

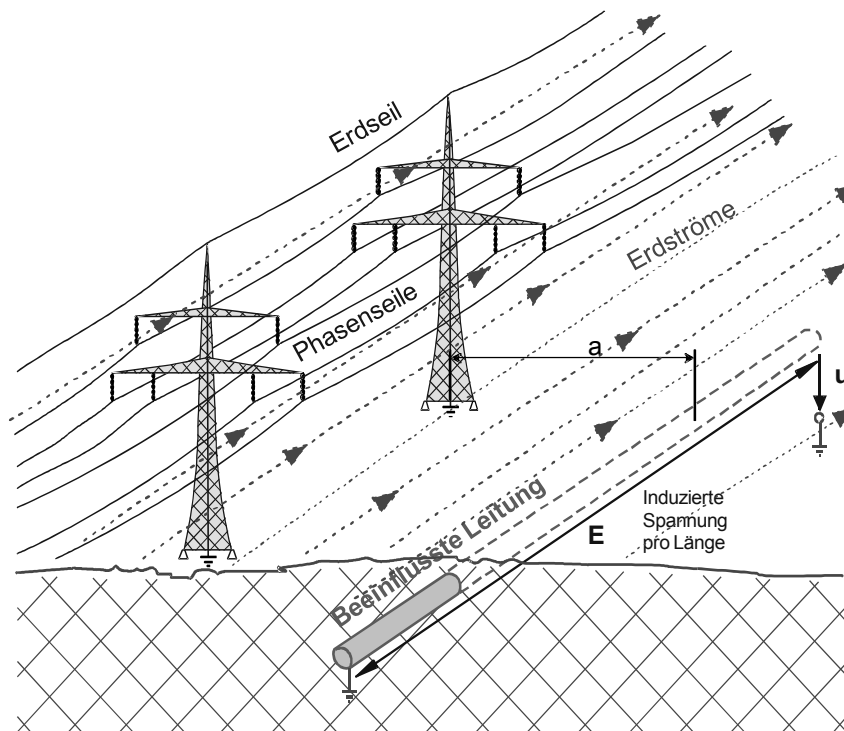


Abbildung 1 Übersichtsskizze zur Erläuterung der Beeinflussung einer unterirdischen Leitung im Nahbereich einer Hochspannungsfreileitung im Normalbetrieb

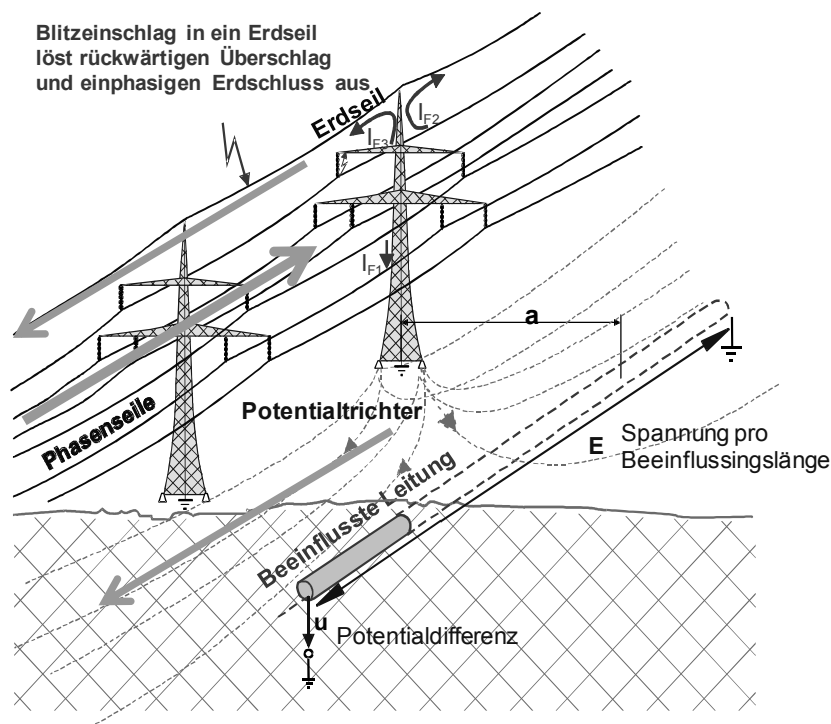


Abbildung 2 Übersichtsskizze zur Erläuterung der Beeinflussung einer unterirdischen Leitung im Nahbereich einer Hochspannungsfreileitung im Erdfehlerfall

3 Wechselstromkorrosion an Stahlrohrleitungen

Bis Anfang der achtziger Jahre wurde eine durch Wechselströme ausgelöste Korrosion erdverlegter Gasleitungen unter normalen Bedingungen ausgeschlossen. Damals waren die meisten Rohrleitungen mit einem nur unvollständig isolierenden Mantel aus Bitumen geschützt. Nachdem in zunehmendem Masse hochisolierende Polymerisierungen eingesetzt wurden, häuften sich in den letzten Jahrzehnten Korrosionsangriffe auf Rohrleitungen, welche eindeutig der Wechselstromkorrosion zugeschrieben werden konnten. Die Angriffe erfolgen jeweils an kleinen Perforationsstellen der Isolation, die grundsätzlich nicht ausgeschlossen werden können. Die Vermeidung der Korrosion durch Makroelementbildung an den Perforationsstellen macht einen aktiven kathodischen Korrosionsschutz notwendig. Dabei wird die unvollständig isolierte Rohrleitung auf ein negatives Gleichspannungspotential von typisch 850 ... 950 mV angehoben.

Induzierte Dauerwechselspannungen überschreiten oft die chemischen Potentiale, sowie das Schutzpotential bei weitem, wodurch unter Umständen dennoch Korrosionsangriffe auftreten können.

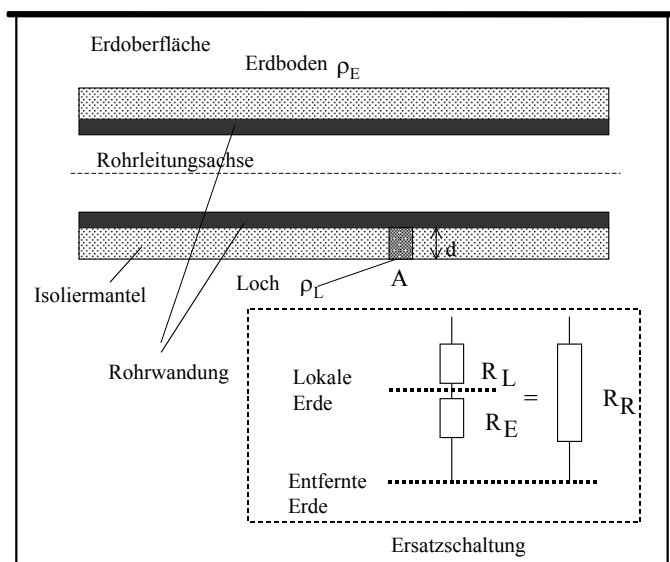
Die Vorgänge, die beim Durchgang des Wechselstroms durch die Phasengrenze Metall-Erdboden ablaufen, sind Prozesse, die sich in der elektrolytischen Doppelschicht abspielen. Bei kleinen Wechselstromdichten laufen am Übergang Metall-Erdboden nur reversible Prozesse ab, die mit der Ladung oder Entladung der elektrolytischen Doppelschicht verbunden sind [6], [7].

Bei grösseren Wechselspannungen und bei Überschreitung einer kritischen Stromdichte von typisch 3 mA/cm² können zusätzlich auch irreversible Prozesse ablaufen.

Dabei kann während der anodischen Halbwelle Metallauflösung (Korrosion) stattfinden. Bei der kathodischen Halbwelle wird in der Regel Wasserstoff produziert.

Die an den unvermeidlichen Isolationsfehlerstellen auftretende Stromdichte ist abhängig von der auf der Rohrleitung induzierten Spannung, aber auch von der Geometrie der Isolationsfehlerstelle und von den chemischen und physikalischen Eigenschaften der Rohreinbettung.

Die physikalischen Einflussgrößen, das heisst der Zusammenhang zwischen der Stromdichte j , der Lochgrösse (A , d), der Wechselspannung U , dem spez. Boden- und Fehlerstellenmaterialwiderstand ρ_E und ρ_L , können durch folgende Beziehung beschrieben werden (siehe auch Abbildung 3).



$$j = \frac{U}{R_R \cdot A} \quad \left[\frac{\text{A}}{\text{m}^2} \right]$$

dabei ist

$$R_R = \frac{\rho_L d}{A} + \frac{\rho_E}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}}$$

Abbildung 3
Elektrisches Ersatzschaltbild eines Lochs
durch Verletzung eines Isoliermantels an
einer isolierten, kathodisch geschützten
Rohrleitung

4 Mathematische Modelle für die induktiv-ohmsche Beeinflussung

Trotz der umfassenden Literatur über die Mechanismen und Berechnungsmethoden der Wechselstrombeeinflussung von Kommunikationskabeln und Rohrleitungen wird in der Praxis auf eine Berechnung der Beeinflussungsspannungen oft verzichtet. Grund sind die komplexen Wechselwirkungen des magnetischen Felds von Starkstromleitungen mit den benachbarten Leitungen und dem Erdboden unter Bildung von Wirbelströmen. Eine exakte mathematische Lösung des Beeinflussungsproblems lässt sich nicht in geschlossener Form ausdrücken. In der Praxis beinhalten die vorgeschlagenen Methoden deshalb Näherungsformeln, die einen beschränkten Gültigkeitsbereich besitzen.

Eine vereinfachte Darstellung der gebräuchlichsten Berechnungsmethode wird in diesem Abschnitt wiedergegeben.

Der Mechanismus der induktiven Beeinflussung wird in Abbildung 4 illustriert. Ein Teil des magnetischen Felds eines stromdurchflossenen Leiters (z.B. eine Phase einer Freileitung) umschliesst die Schleife zwischen dem beeinflussten Leiter und dem Erdboden. Da der Erdboden keinen konzentrierten Leiter darstellt, wird unter Zuhilfenahme der Wirbelstromtheorie eine Ersatzstromtiefe definiert, die vom Erdbodenwiderstand und der Frequenz abhängt.

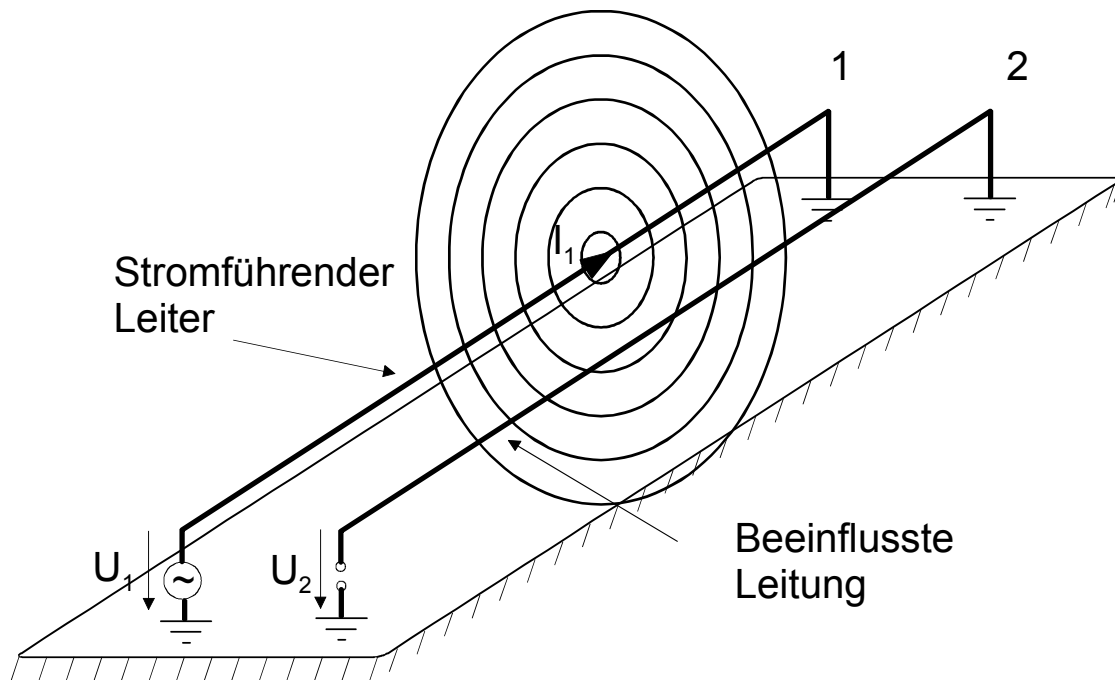


Abbildung 4 Induktion zwischen parallelen metallischen Leitern

Ein nach dieser Modellvorstellung entworfenes elektrisches Ersatzschaltbild für einen Ausschnitt der parallelen Leitungen wird in Abbildung 5 wiedergegeben. Für die praktische Anwendung bei variablen Abständen der Trassen der Freileitung und der beeinflussten Leitung werden kurze Teilstücke der Länge dx betrachtet.

In einem **ersten Schritt** werden die elektrischen Eigenschaften des Kommunikationskabels oder der Rohrleitung ausser Acht gelassen. Es wird zunächst nur die induzierte Spannung ermittelt, wobei angenommen wird, dass die betroffene Leitung gegenüber dem Erdboden ideal isoliert ist. Diese Annahme gilt in gewisser Näherung nur für kurze, von der Erde isolierte Leitungen einer Länge von etwa 10 km und kann in diesen Fällen für eine erste Abschätzung der induzierten Spannung dienen. Näherungsbeziehungen hierfür sind im Anhang angegeben. Eine vollständige Lösung hierfür in Form einer Reihenentwicklung ist z.B. in [5] zu finden.

Für die Berechnung der Spannungsverteilung in realistischen Fällen müssen **in einem zweiten Schritt** die elektrischen Leitungsgleichungen der beeinflussten Leitung asymmetrisch gegen Erde unter Verwendung des elektrischen Ersatzschaltbilds nach Abbildung 5 gelöst werden.

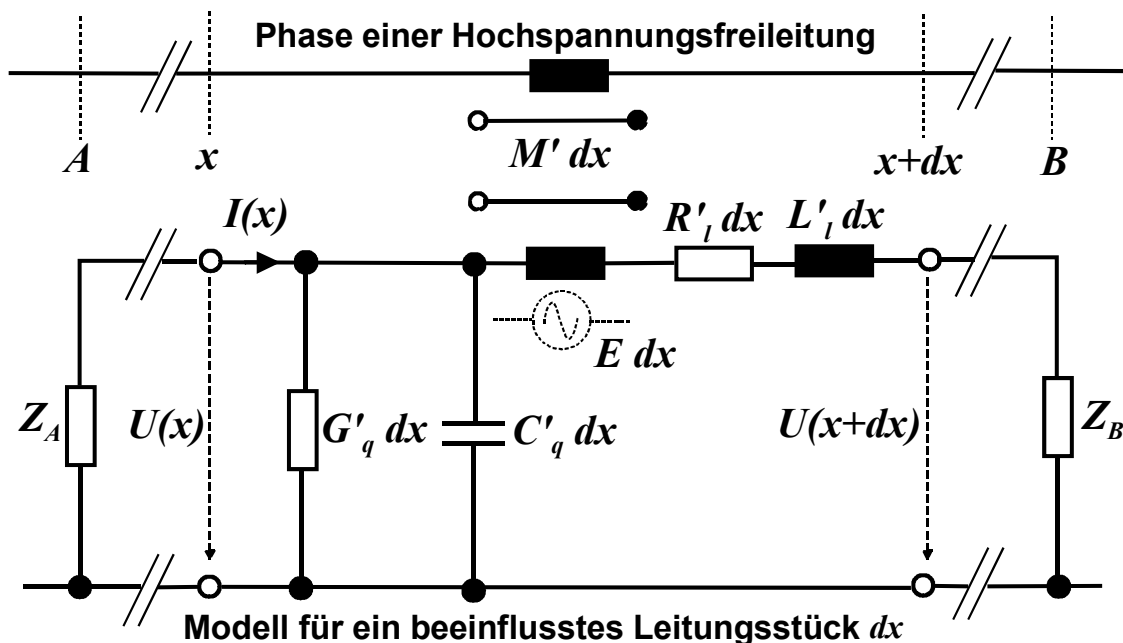


Abbildung 5 Elektrisches Ersatzschema für eine Starkstromphase und eine induktiv beeinflusste Leitung der Länge dx

Die Längsimpedanzen und Queradmittanzen der beeinflussten Leitung mit Erdrückleitung können durch folgende Ausdrücke vereinfacht werden. Bei Rohrleitungen ist in der Praxis die Längsimpedanz stark von dem im Rohr fließenden Strom und auch von der Frequenz abhängig. Die Queradmittanz hängt in analoger Weise von der Spannung und der Frequenz ab (Symbole: siehe Abbildung 5):

$$\text{Längsimpedanz pro Weglänge: } R'_l + j\omega L'_l = z$$

$$\text{Queradmittanz pro Weglänge: } G'_q + j\omega C'_q = y$$

Die Differentialgleichung für die Spannungs- und Stromänderungen entlang der beeinflussten Leitung können wie folgt geschrieben werden:

$$\frac{dU(x)}{dx} + z \cdot I(x) - E = 0$$

$$\frac{dI(x)}{dx} + y \cdot U(x) = 0$$

E ist die eingekoppelte Spannung pro Wegstrecke.

Unter realen Verhältnissen variieren die Geometrie entlang der Parallelführung der Starkstromleitung zur beeinflussten Leitung und damit die induzierte Spannung pro Wegstrecke E entlang der beeinflussten Leitung. Die resultierende Beeinflussungsspannung U gegen Erde ist deshalb stückweise zu ermitteln, wozu sich eine diskrete Berechnung mit Computerprogrammen anbietet.

Ein entsprechendes Verfahren ist in Abschnitt 5 beschrieben.

Für konstante parallele Näherungen lassen sich aber auch einfache analytische Lösungen angeben. Für eine parallele Annäherung und daran anschließenden weiterlaufenden Leitungen ergibt sich eine Spannungsverteilung entsprechend Abbildung 6 (unten), wenn die beeinflusste Leitung beidseitig ausreichend weit fortgesetzt wird:

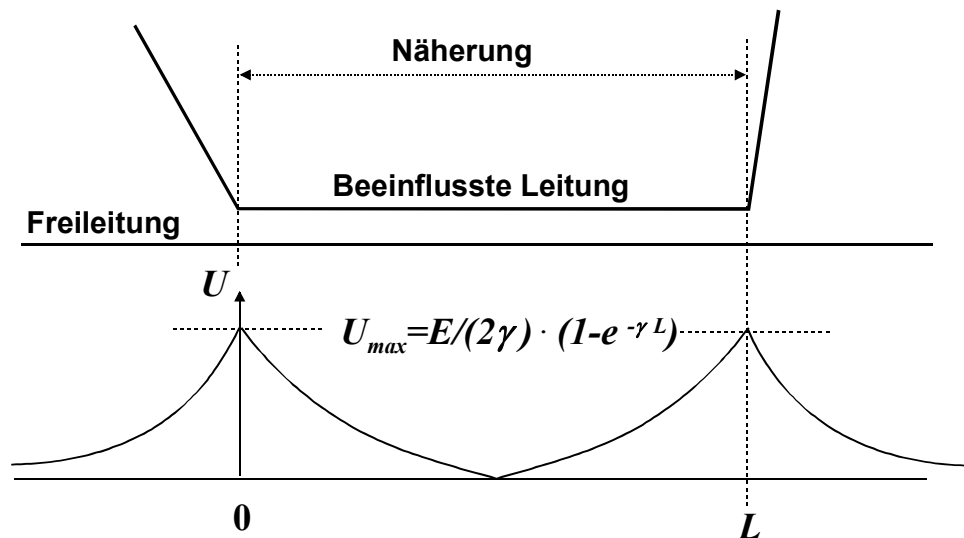


Abbildung 6 Einfacher Fall für eine parallele Näherung an eine Freileitung mit beidseitig unendlich fortgesetzter Rohr- oder Kommunikationsleitung mit Erdberührung [4]

Spannungs- und Stromverlauf im Bereich $0 < x < L$ entsprechend Abbildung 6 nach [4]:

$$U(x) = \frac{E}{2 \cdot \gamma} \cdot \left(e^{-\gamma \cdot (L-x)} - e^{-\gamma \cdot x} \right)$$

$$I(x) = \frac{E}{2 \cdot z} \cdot \left(2 - e^{-\gamma \cdot (L-x)} - e^{-\gamma \cdot x} \right)$$

Dabei bedeuten:

E : Induzierte Spannung auf der beeinflussten Leitung pro Weglänge in V/m

L : Länge des betrachteten Wegabschnitts in m

$\gamma = \sqrt{z \cdot y}$ Ausbreitungskonstante in m^{-1} , welche sich aus der Längsimpedanz z und der Queradmittanz y der beeinflussten Leitung berechnet.

5 Computersimulation induktiv-ohmscher Beeinflussung

5.1 Beispiel: FKH-Berechnungsprogramm LFIP (Low Frequency Interference Program)

Die Berechnungsschritte mit dem Computerprogramm der FKH umfassen folgende Schritte:

1. Skalierung der digitalen bzw. eingescannten Vorlagekarten (Abbildung 7)
2. Eingabe des geometrischen Aufbaus und der Materialdaten für die Leitungen (Abbildung 8)
3. Eingaben der Trassenverläufe für die beeinflussende und die beeinflusste Leitung (Abbildung 9)
4. Diskretisierung der Leitungen und Berechnung der Beeinflussungskoeffizienten und der induzierten Spannungen und Aufintegration der Spannungen (Abbildung 10)
5. Lösung der Netzwerkgleichungen für die Induktionsspannungen unter Berücksichtigung der Ausgleichströme entlang der beeinflussten Leitungen und der Erdübergangsströme (Abbildung 11).

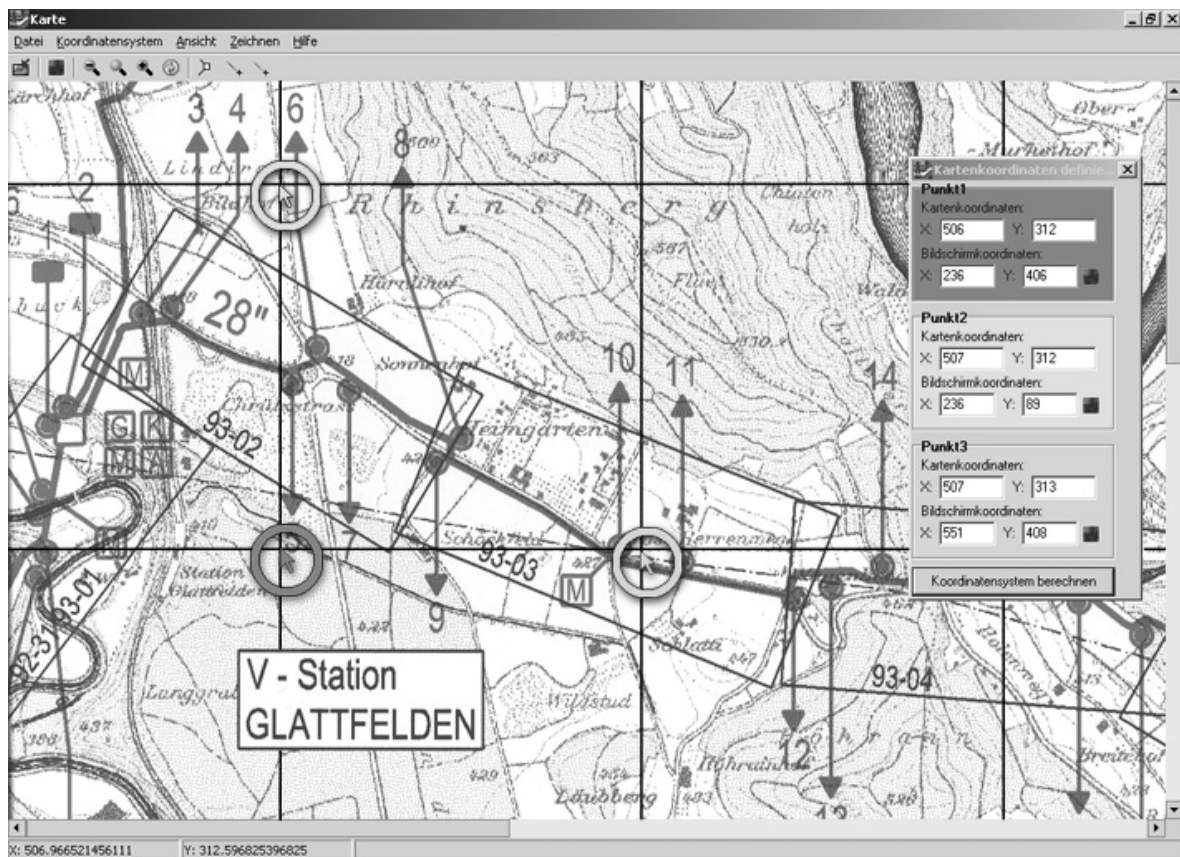


Abbildung 7 Skalierung der Kartenkoordinaten umgesetzt im selbst erstellten Computerprogramm: LFIP

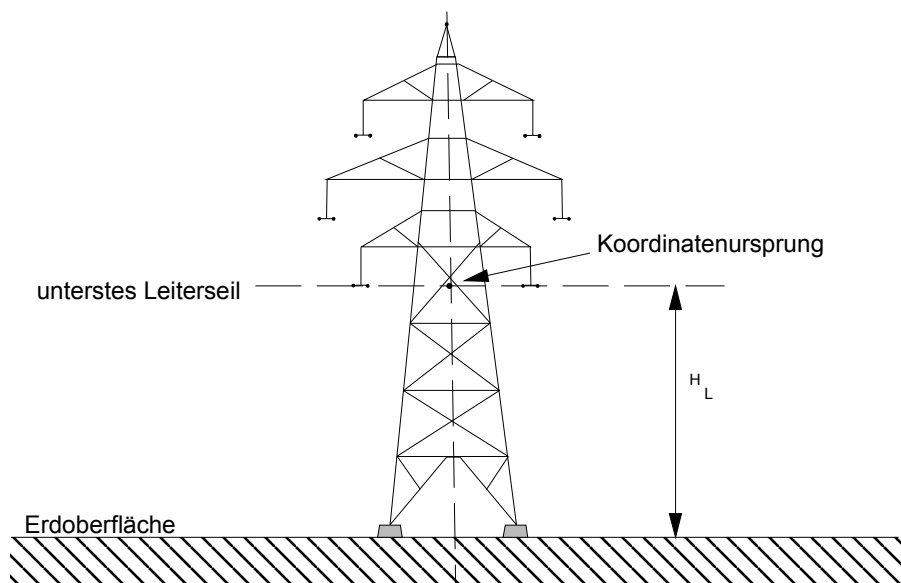


Abbildung 8 Eingabe der Leiterseil- und der Erdseilpositionen sowie der Masthöhe für die Hochspannungsfreileitung

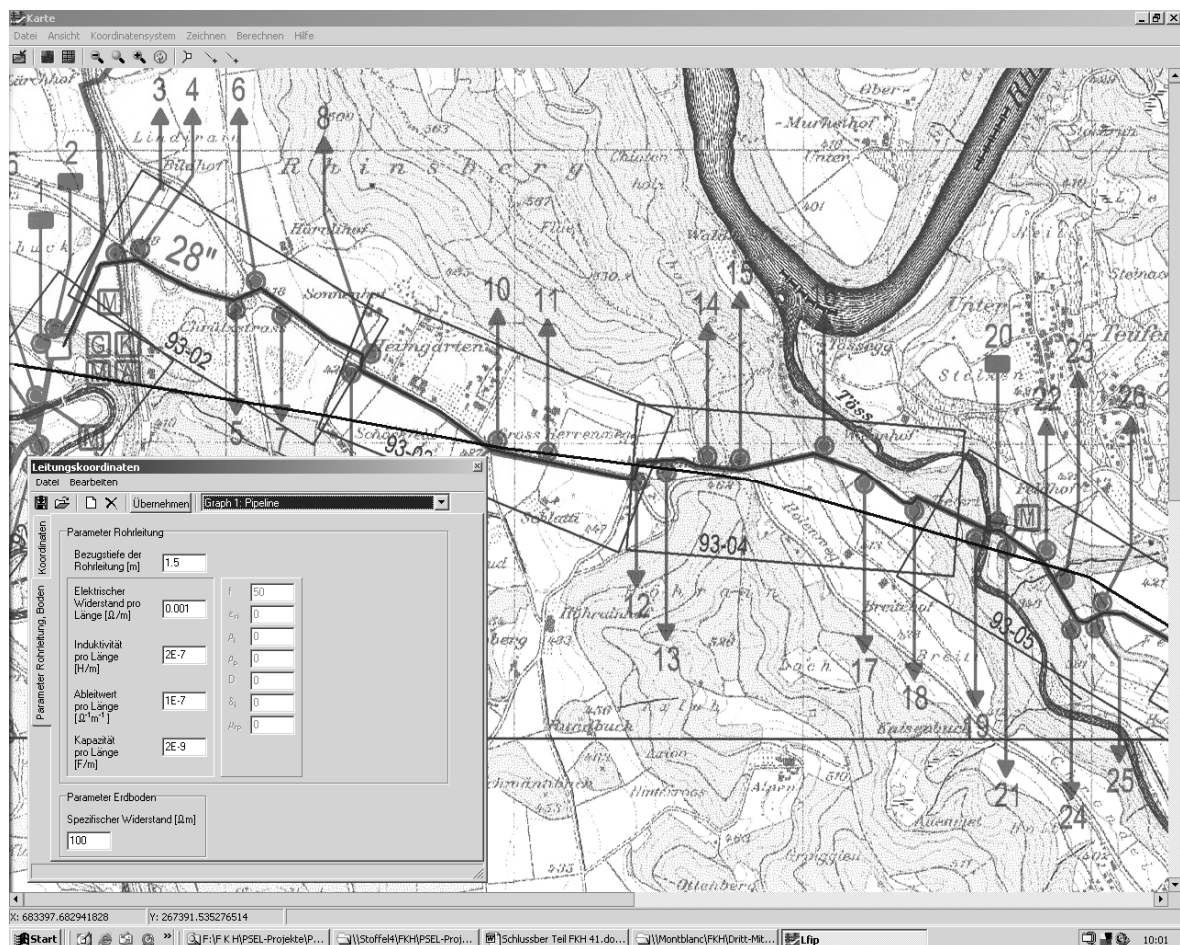


Abbildung 9 Eingabe der Leitungstrassen auf der Karte für die beeinflussende und die beeinflusste Leitung durch die Positionierung der Leitungsknickpunkte mit der Maus

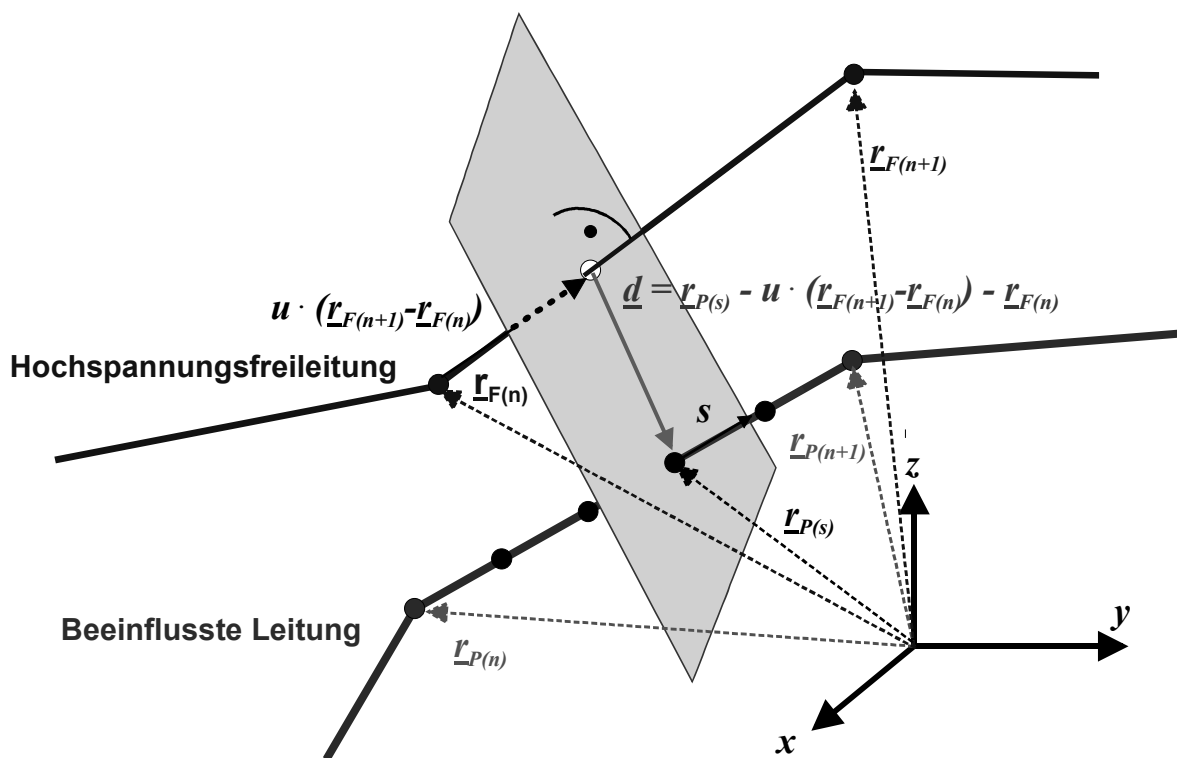


Abbildung 10 Skizze zur Erklärung der Diskretisierung der Leitungen und der Berechnung der Abstände für die Ermittlung der geometrischen Beeinflussungskoeffizienten

Abbildung 11 oben zeigt ein Berechnungsbeispiel für eine Rohrleitung, welche durch drei parallelverlaufende Freileitungen beeinflusst wird. Die obere Graphik zeigt den Verlauf der induzierten Spannung pro Weglänge (dünne zackige Kurve) und die längsintegrierte Spannung (ausgezogene Linie), für den Fall, dass die beeinflusste Leitung nur am Leitungsanfang geerdet ist. Die dicke graue Linie zeigt schliesslich die Spannungsverteilung, welche sich bei einseitiger Erdung aber bei Berücksichtigung der Längs- und Querimpedanzbeläge der beeinflussten Leitung ergibt. Die zusätzliche Spannung gegenüber der einfachen Spannungsaufsummierung ist eine Folge der Resonanzüberhöhung, die sich aufgrund des Induktivitätsbelags und des sehr grossen Kapazitätsbelags der in diesem Fall vorliegenden Rohrleitung (Grössenordnung $100 \mu\text{F/km}$) einstellt.

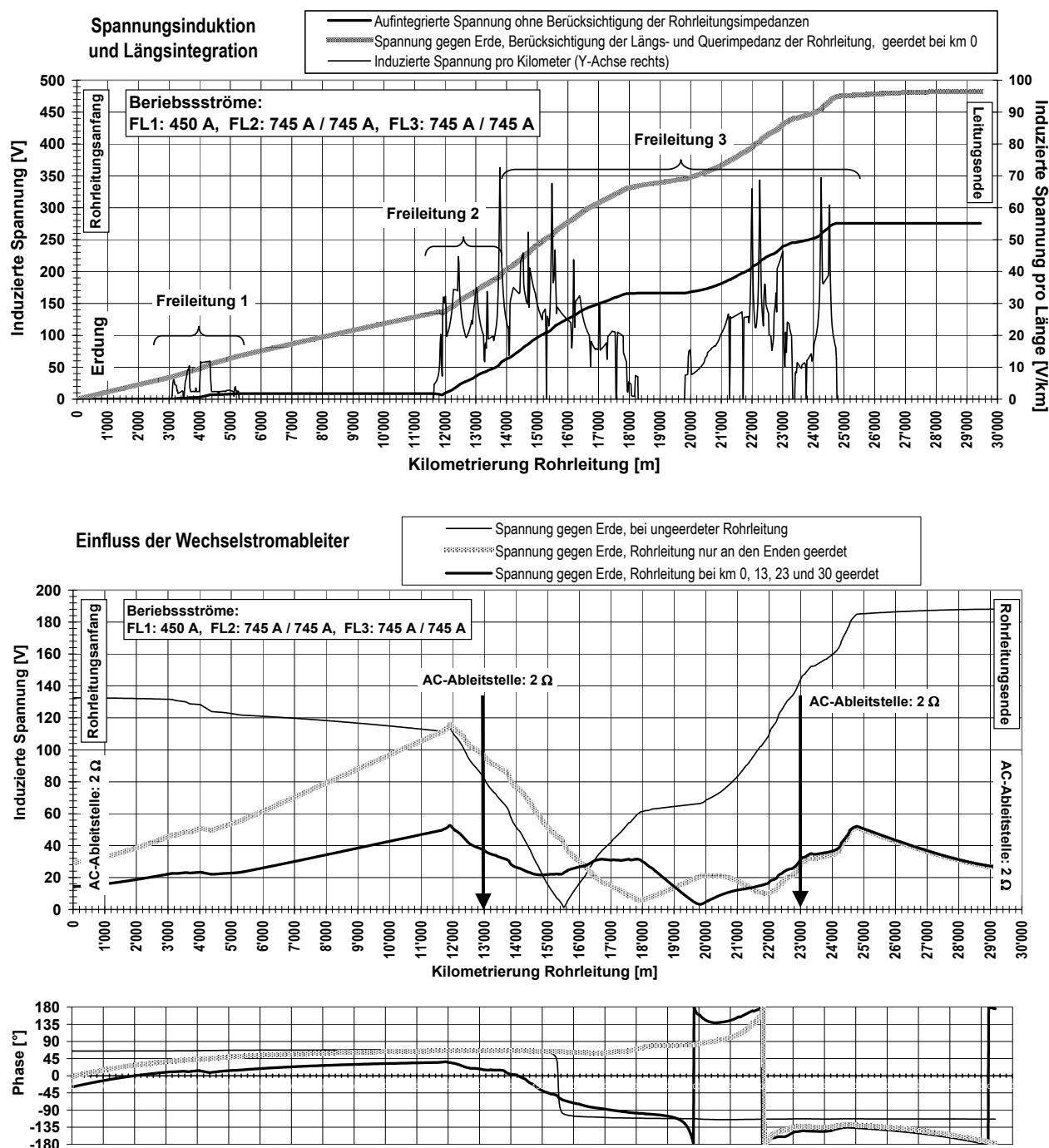


Abbildung 11 Beispiel einer berechneten Wechselspannungsverteilung auf einer isolierten, kathodisch geschützten Rohrleitung aufgrund Induktion durch den Betrieb von Hochspannungsfreileitungen

Der untere Teil der Abbildung 11 zeigt Spannungsverteilungen bei verschiedenen Varianten der Positionierung von Wechselstromableitern zur Reduktion der Rohrleitungsspannung gegen Erde. Wechselstromableiter sind Abgrenzeinheiten, welche den Wechselstromanteil niederohmig gegen Erde ableiten, das kathodische Schutzpotential aber durch eine Gleichspannungsisolierung nicht beeinträchtigen.

5.2 Vergleich von Messresultate mit den Berechnungen von induzierten Spannungen an einer Rohrleitung

Für eine ausgesuchte Parallelführung einer zweisträngigen 220-kV-Freileitung und einer Gasrohrleitung wurden Messungen durchgeführt um diese mit berechneten Werten zu vergleichen.

Nach Ausserbetriebsetzung eines der 220-kV-Dreiphasensysteme wurde gemäss Prinzipschema Abbildung 12 im einen Unterwerk ein Versuchsstrom auf die parallelgeschalteten Phasen des freigeschalteten Systems eingespeist. Am Leitungsende im anderen Unterwerk wurden alle drei Phasen geerdet. Abbildung 13 zeigt die frequenzvariable Versuchsstromquelle im Anhänger der FKH. Um selektiv nur die Induktion der eingespeisten Ströme erfassen zu können, wurden in Abweichung von dem mit 50 Hz betriebenen Drehstromsystem beim Versuchs-System Frequenzen von 35 Hz und 70 Hz verwendet. Damit konnte auch der Frequenzeinfluss des Versuchsstroms quantifiziert werden.

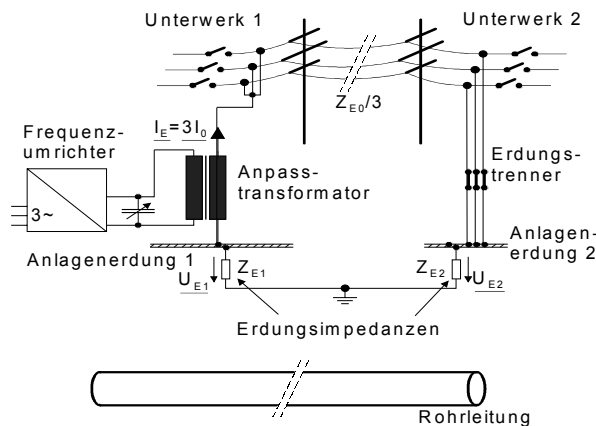


Abbildung 12 Prinzipschema für die Einspeisung eines definierten, konstanten Beeinflussungsstroms in eine Freileitung (Simulation eines Erdschlussfalls)

Abbildung 13 Stromquelle für die Einspeisung eines künstlichen Erdschlussstroms im Unterwerk

Tabelle 1 zeigt an vier Messstellen entlang der Rohrleitung die gemessenen und die berechneten Induktionsspannungen.

Zeit	Eingespeister Erdschlussstrom	Frequenz	Erdung Ableiter	Mess-stelle	Gemessene Spannung	Berechnete Spannung	Verhältnis der Koppelimpedanzen bei 70 Hz und 35 Hz
10 ⁴⁰	176 A	35 Hz	Abl. aus	93-37	61.53	101	Gemessen: 1.995
11 ⁰⁹	120 A	70 Hz	Abl. aus		83.70	136	Berechnet: 1.98
11 ³⁸	120 A	70 Hz	Abl. aus	93-30	54.10	73	Gemessen: 2.39
11 ⁵⁰	176 A	35 Hz	Abl. aus		33.20	57	Berechnet: 1.88

Tabelle 1 Vergleich der gemessenen und der berechneten induzierten Spannungen auf der Rohrleitung bei vier Messpunkten bei Einspeisung von experimentellen Erdschlussströmen in das Drehstromsystem in ein 220-kV-Freileitungssystem im Unterwerk

Die berechneten Spannungen auf der Rohrleitung liegen im Mittel um etwa 60% über den gemessenen Werten. Angesichts der bei der Simulation nicht berücksichtigten Niveau-Unterschiede zwischen Freileitung und Rohrleitung und auch angesichts der Unsicherheit des Erdbodenwiderstands, der durchwegs zu 70 Ωm angenommen wurde, sowie weiterer Einflüsse auf die Erdungsströme liegt diese Abweichung im erwarteten Bereich.

Trotz geringer nichtlinearer Einflüsse der Wirbelströme kann festgestellt werden, dass die Koppelimpedanzen nahezu proportional zur Frequenz ansteigen.

6 Schlussfolgerungen

Obgleich die Berechnung von Beeinflussungsspannungen mehrere Rechenschritte erfordert, sind verhältnismässig einfache Berechnungswerkzeuge verfügbar. Ein gewisses Problem stellen die Unsicherheiten in den Umgebungsbedingungen (Bodenleitfähigkeiten, benachbarte Leitungen etc.) dar. Da diese Parameter aber im Wesentlichen nur proportional zu ihrer Quadratwurzel in das Resultat eingehen, können die Berechnungen dennoch brauchbare Beeinflussungsdaten für die Praxis liefern.

Die verfügbaren Methoden sind besonders aussagekräftig und zuverlässig bei vergleichenden Berechnungen und bieten deshalb eine praktische Hilfe bei der Optimierung der Abhilfemassnahmen in Problemfällen.

Literaturstellen

- [1] FprEN 50443:2011; "Effects of electromagnetic interference on pipelines caused by high voltage a.c. electric traction systems and/or high voltage a.c. power supply systems"; deutscher Titel: "Auswirkungen elektromagnetischer Beeinflussungen von Hochspannungswechselstrombahnen und/oder Hochspannungsanlagen auf Rohrleitungen"
- [2] CES/TK Erdungen; „Erläuterungen für den Schwachstrom-Netzbau“, Version: 1.0, Electrosuisse, Fehraltorf, Oktober 2011
- [3] SR 734.31, „Verordnung über elektrische Leitungen (Leitungsverordnung, LeV)“ vom 30. März 1994 (Stand am 1. September 2009)
- [4] Cigré Working Group 36.02, "Guide on the Influence of High Voltage AC Power Systems on Metallic Pipelines", Cigré Document No 95, Paris 1995.
- [5] CCITT: "Calculating induced voltages and currents in practical cases", International Telecommunication Union, the International Telegraph and Telephone Consultative Committee ISBN 92-61-04031-4, Geneva 1989.
- [6] CEOCOR guide: "AC corrosion on cathodically protected pipelines, Guidelines for risk assessment and mitigation measures", Comité d'Etude de la Corrosion et de la Protection des Canalisations, Brussels 2000 (new revision in process)
- [7] PSEL-Bericht Nr. 195 „Wechselstromkorrosion an Pipelines, Beeinflussung durch elektrische Energieübertragungsleitungen“, Schweizerische Gesellschaft für Korrosionsschutz, PSEL Projekt und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft, Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen VSE, Hintere Bahnhofstrasse 10, Postfach, 5001 Aarau.
- [8] Oeding D., Oswald B.R. „Elektrische Kraftwerke und Netze“, Springer, 2004, 6. Auflage

Anhang

Näherungen für die Berechnung der induzierten Spannungen auf einer Leitung parallel zu einer beeinflussenden Starkstromleitung

Bestimmung der induzierten Spannung gegen Erde pro Wegstrecke E

Die induzierte Spannung pro Weglänge E bei berechnet sich durch Multiplikation der Gegenimpedanz zwischen dem beeinflussten Leiter und dem beeinflussenden Leiter mit dessen Leiterstrom wie folgt:

$$E = Z' \cdot I_p \quad \text{Induzierte Spannung pro Weglänge:} \quad (1)$$

Je nach Art der beeinflussenden Leitung und je nach Betriebssituation werden folgende Kopplungsimpedanzen eingesetzt.

Kopplungsimpedanz zwischen zwei Leiterschleifen mit Rückleitung über den Erdboden (entspricht der induktiven Beeinflussung durch Erdschlüsse oder durch Erdrückströme von Bahnen ohne reduzierende Wirkung eines Erdseils)

Für diesen Fall ergibt sich folgende Näherungsbeziehung aus den ersten Reihengliedern der Lösungen von J.R. Carson bzw. F. Pollaczek (Literatur: siehe [5] und [8])

$$Z'_{LP}(\text{Leiter})[\Omega/m] = \frac{\mu_0 \cdot \omega}{8} + j \cdot \omega \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \frac{\delta_E}{d} \quad (2a)$$

Gegenimpedanz pro Längeneinheit zwischen dem Leiter (L) mit Erdrückleitung und einem beeinflussten Leiter (P) Näherung für kleine Abstände zwischen der beeinflussenden und der beeinflussten Leitung (siehe Definition von d)

Dabei gelten folgende Abkürzungen und Symbole:

$$\delta_E = \frac{1.8514}{\sqrt{\omega \cdot \mu_0 / \rho}} \quad \text{Erdstromtiefe}$$

$$d \leq 0.25 \delta_E \quad \text{Abstand des stromführenden Leiters zum beeinflussten Leiter (Begrenzung des Gültigkeitsbereichs)}$$

$$\rho \quad \text{Spezifischer Erdbodenwiderstand}$$

$$\mu_0 \quad \text{Permeabilität des Vakuums: } 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am}$$

$$f, \omega \quad \text{Frequenz, Kreisfrequenz.}$$

Induktionsspannung erzeugt durch ein symmetrisches Dreiphasensystem ohne Erdrückleiter (Normalbetriebsfall)

Gegenimpedanz pro Längeneinheit zwischen einem Dreiphasensystem und der beeinflussten Leitung nach [4]

$$Z'_{LP}(3ph)[\Omega/m] = j \cdot \frac{\mu_0 \cdot \omega}{4\pi} \left\{ \ln \frac{d_{2P} \cdot d_{3P}}{d_{1P}^2} + j \cdot \sqrt{3} \cdot \ln \frac{d_{2P}}{d_{3P}} \right\} \quad (2b)$$

Dabei sind:

d_{1P}, d_{2P}, d_{3P} die rechtwinklig zur Leitungsachse gemessenen Abstände der Phasenleiter (L1, L2, L3) bzw. der Phasenbündelschwerpunkte zur Achse der beeinflussten Leitung.

Bei mehr als einem Dreiphasensystem werden die komplexen induzierten Spannungen auf der beeinflussten Leitung addiert.

Induktionsspannung erzeugt durch ein symmetrisches Zweiphasensystem ohne Erdrückleiter (Bahnstromübertragungssystem, Normalbetriebsfall)

Gegenimpedanz pro Längeneinheit zwischen einem Zweiphasensystem und der beeinflussten Leitung nach [4]:

$$Z'_{LP}(2ph)[\Omega/m] = j \cdot \mu_0 \cdot \frac{\omega}{2\pi} \cdot \ln \frac{d_{2P}}{d_{1P}} \quad (2c)$$

Dabei sind:

d_{1P}, d_{2P} die rechtwinklig zur Leitungsachse gemessenen Abstände der Phasenleiter (L1, L2) zur Achse der beeinflussten Leitung.

Induzierte Spannung bei Vorhandensein eines Erdseils

Wird auf einer Freileitung ein Erdseil mitgeführt, oder wird ein Erdband parallel zur beeinflussten Leitung verlegt, so wird in diesem Erdleiter ein Strom induziert, der ein magnetisches Gegenfeld erzeugt und damit die Beeinflussungsspannung auf der beeinflussten Leitung reduziert (Abbildung 14). Bei der Berechnung dieser reduzierten Beeinflussungsspannung wird zunächst die Selbstimpedanz der zusätzlichen Erdschleife berechnet:

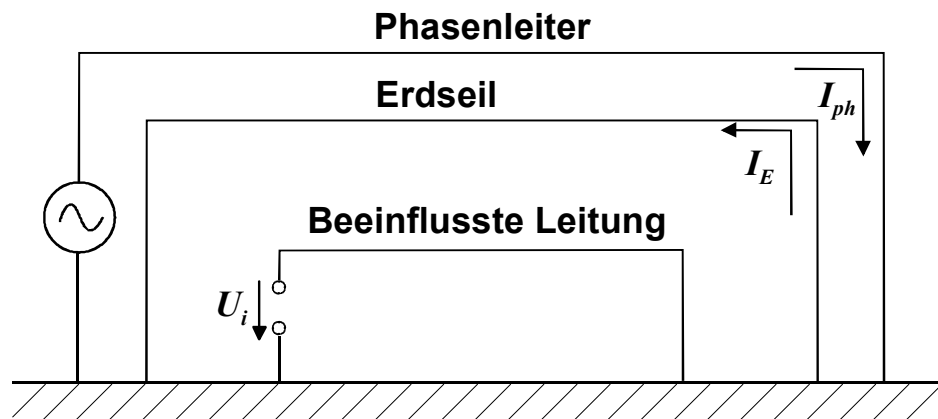


Abbildung 14 Induktion zwischen parallelen metallischen Leitern mit Schirmleiter

Selbstimpedanz (komplexe Selbstinduktivität) pro Längeneinheit der Schleife zwischen einem stromführenden Leiter und Erde (hier Schleife Erdseil-Erde). Der Abstand zum Erdboden wird hier gegenüber der Stromeindringtiefe im Erdboden vernachlässigt [8].

$$Z'_{EE} [\Omega / m] = R' + \frac{\omega \cdot \mu_0}{8} + j \cdot \frac{\omega \cdot \mu_0}{2\pi} \cdot \left(\ln \frac{\delta_E}{r} + \frac{1}{4} \right) \quad (3)$$

Dabei ist:

R' der ohmsche Widerstand des Erdseils pro Längeneinheit
 r der Radius des Erdseils.

Die induzierte Spannung pro Weglänge E reduziert sich aufgrund der Schirmwirkung des Erdseils. Die Beziehung (1) wird wie folgt modifiziert:

$$E = Z'_{LP} \cdot I_L \cdot \left(1 - \frac{Z'_{EL} \cdot Z'_{PE}}{Z'_{EE} \cdot Z'_{LP}} \right) \quad (1a)$$

Induzierte Spannung pro Weglänge bei Vorhandensein eines beidseitig geerdeten Leiters (z.B. Erdseil)

Dabei ist:

Z'_{EL} die Gegenimpedanz zwischen den stromführenden Leitern (L) und dem Erdleiter (E) gemäss Beziehung (2a,b oder c)
 Z'_{PE} die Gegenimpedanz zwischen der beeinflussten Leitung (P) und dem Erdleiter (E) gemäss Beziehung (2a)
 Z'_{LP} die Gegenimpedanz zwischen den stromführenden Leitern (L) und der beeinflussten Leitung (P) gemäss Beziehung (2a,b oder c)
 Z'_{EE} die Selbstimpedanz des Erdleiters (EE) gemäss Beziehung (3).

Alle Impedanzen beziehen sich auf die Längeneinheit.

Der Klammerausdruck in der Beziehung (1a) wird als Reduktionsfaktor k_r des Erdseils für die induzierte Spannung auf der beeinflussten Leitung bezeichnet:

$$k_r = 1 - \frac{Z'_{EL} \cdot Z'_{PE}}{Z'_{EE} \cdot Z'_{LP}} \cdot$$

Für den normalen Betriebsfall muss nun diese Berechnung für alle stromführenden Leiter bzw. Übertragungssysteme, einer Freileitung oder einer Bahnleitung vorgenommen werden, wonach die Beiträge der erhaltenen Spannungen pro Weglänge als komplexe Zahl für alle Leiter bzw. Übertragungssysteme addiert werden. Schliesslich werden die berechneten Spannungen über den Wegstücke über die untersuchte Gesamtstrecke aufintegriert. Wie bereits erwähnt, berücksichtigt diese vereinfachte Berechnung keine Längsimpedanz der beeinflussten Leitung, keinen Ableitwiderstand und keine Kapazität der beeinflussten Leitung gegen Erde.