Zürich, 15.11.04

Elektrische Verträglichkeit von elektrischen Energieversorgungsanlagen mit anderen Infrastrukturen

Reinhold Bräunlich

FKH Fachkommission für Hochspannungsfragen, Voltastrasse 9, 8044 Zürich

Das breite, interdisziplinär ausgerichtete Arbeitsgebiet des Cigré-Studienkomitees C4, „System Technical Performance" wird vorgestellt. Aus dem Schwerpunktthema der „Elektromagnetischen Verträglichkeit" wird auf zwei Beispiele aus einer der Arbeitsgruppen (C4.02.2) näher eingegangen:

1. Ein Bericht über die Probleme des Potentialausgleichs bei Mobilfunkantennen auf Hochspannungsmasten, welcher die Arbeitsgruppe in Zusammenarbeit mit der ITU erarbeitet hat, wurde kürzlich veröffentlicht.

2. Eine weitere Arbeit, deren Veröffentlichung im nächsten Jahr eingeplant ist, behandelt das erst vor wenigen Jahren erkannte Problem der Wechselstromkorrosion an kathodisch geschützten Rohrleitungsanlagen.

1 Zielsetzung, Aufgabenbereich und Strategie des Studienkomitees C4

Das Cigré-Studienkomitee C4: "Technische Systemeigenschaften" bearbeitet die technischen Wechselwirkungen innerhalb der elektrischen Energieübertragungsnetze und jene zu deren Nutzern. Die Arbeiten beziehen sich auf folgende Teilsysteme: Höchstspannungsverbundnetze und Verteilnetze, Energieerzeuger, Energieverbraucher, Industrienetze sowie auch externe Systeme, wie Telekom-Netzwerke, Bahnen, Rohrleitungen etc.

Das Studienkomitee C4 betrachtet sich als verbindendes Glied unter den anderen Cigré-Gruppierungen und auch zu externen Gremien wie CIRED, IEC, Eurelectric und IEEE. Die behandelten Fragen werden deshalb in vielen Fällen von anderen Studienkomitees eingebracht bzw. von anderen Gremien her akquiriert. Für die Lösung der vielfältigen Aufgaben müssen Spezialisten sowohl für Systemfragen als auch für die Eigenschaften der Netzkomponenten eingesetzt werden, wozu eine enge Kooperation mit den Studienkomitee-Bereichen A und C nötig ist. Im Gegenzug sollen die Ergebnisse des SC C4 einen breiten Kreis von Fachleuten in und ausserhalb der Cigré bei der Lösung ihrer Probleme unterstützen.

Die Aktivität des Studienkomitees C4 umfasst 5 Themenbereiche (siehe Tabelle 1):

1. Netzqualität (in Zusammenarbeit mit CIRED und UIE)

Die behandelten Themenbereiche beinhalten: die Versorgungssicherheit, die Spannungsqualität (netzgebundene Störungen ≤ 9 kHz), die Spezifikation der Kundenschnittstellen, Simulationsmethoden, Qualitätsmerkmale, Netzüberwachungstechniken, Emissionsverhalten, Beeinflussungsmechanismen und Massnahmen gegen Beeinflussungen.

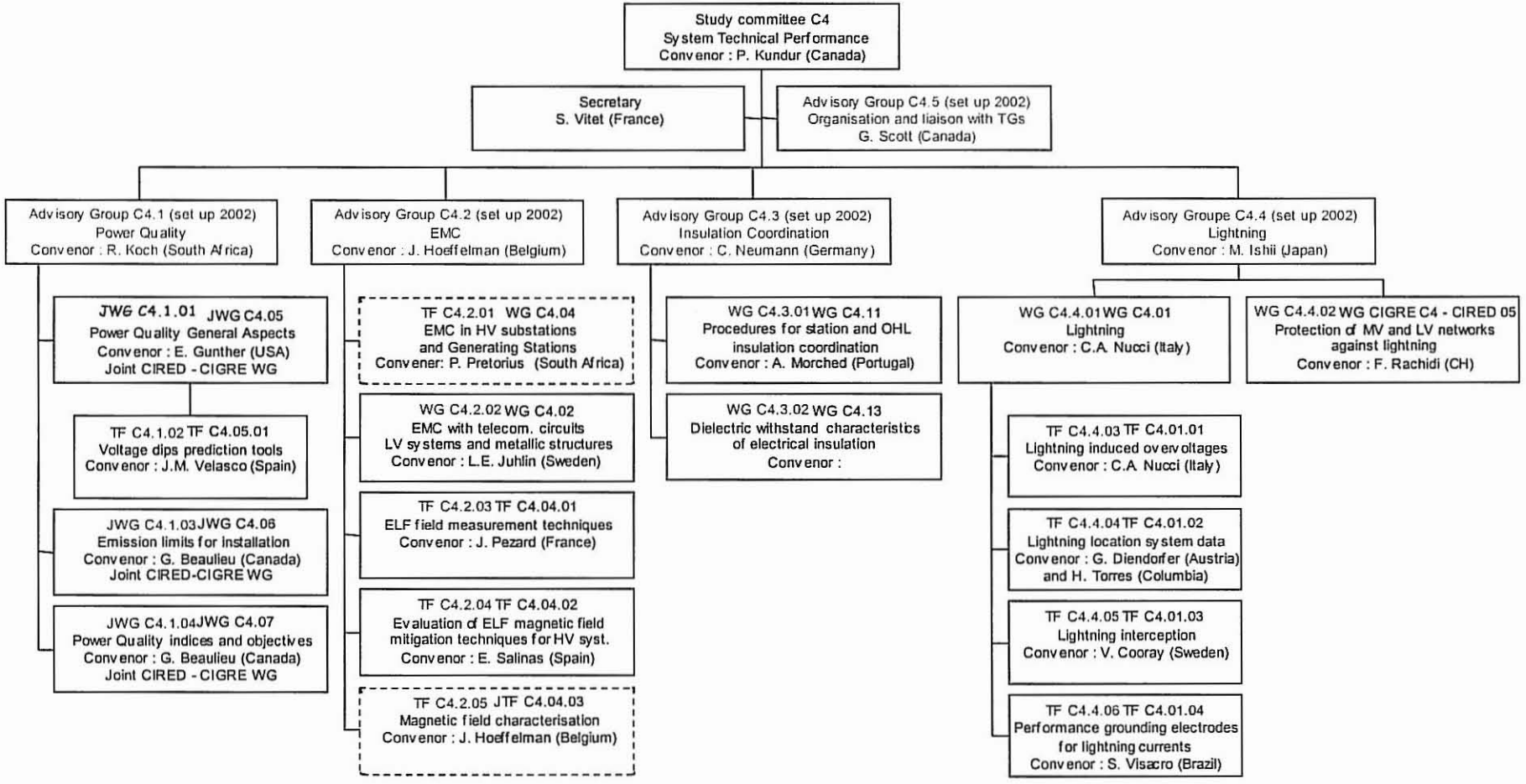

Tabelle 1 Gliederung des Cigré-Studienkomitees C4

Das entsprechende Beratungskomitee (Advisory Group, AG) setzt die Schwerpunkte auf Verfahren zur Erhebung der Netzqualität sowie auf die Quantifizierung und die Ermittlung der Netzqualität (praktisch und theoretisch). Es existiert auch eine Arbeitsgruppe, welche die wirtschaftlichen Aspekte beleuchtet.

2. *Elektromagnetische Verträglichkeit EMV (in Zusammenarbeit mit CIRED)*

Die „Elektromagnetische Verträglichkeit" versteht sich hier im klassischen Sinn: Es werden Hochfrequenz- und Niederfrequenzbeeinflussungen und Abhilfemassnahmen zwischen energietechnischen Anlagen und Sekundär- bzw. Drittanlagen betrachtet. Einbezogen werden auch Erdungsfragen und Beeinflussungsfragen betreffend die Personensicherheit.

Drei Task-Forces befassen sich mit niederfrequenten elektrischen und magnetischen Feldern EMF von Energieversorgungsanlagen, namentlich mit Messverfahren, mit Massnahmen zur Reduktion der Felder und mit der technischen Charakterisierung der magnetischen Felder. Gesundheitliche Wirkungen von elektromagnetischen Emissionen werden allerdings ausgeschlossen. Eine spezifische Arbeitsgruppe über dieses Thema wird neu im Studienkomitee C3 weitergeführt.

Die Aufgabe einer anderen Untergruppe besteht in einer Revision des Cigré-Berichts Nr. 124. („EMC in Power Plants").

Eine weitere Task-Force befasst sich mit Niederfrequenzbeeinflussung von Kommunikationsnetzen, Niederspannungssystemen und anderen metallischen Strukturen. Die folgenden beiden Beispiele in den Abschnitten 2 und 3 stammen aus diesem Themenbereich.

3. *Sicherheit in elektrischen Energiesystemen (im Aufbau begriffen)*

Diese Arbeitsgruppe konzentriert sich auf die Untersuchung der Personen- und Betriebssicherheit im stationären Betrieb und auch bei dynamischen Zustandsänderungen. Im Vordergrund stehen Risikoanalysen, Stabilitätsanalysen, Methoden der Systemüberwachung und das Studium des Verhaltens von Hilfssystemen.

4. *Anlagenblitzschutz*

Die Fragestellung dieser Arbeitsgruppe bezieht sich in erster Linie auf die Charakterisierung der elektrischen Vorgänge beim Blitzschlag in elektrischen Energieversorgungsanlagen. Dabei werden die Einflüsse auf Hoch- und Niederspannungsnetze (in Kooperation mit der CIRED) sowie geeignete Schutzmassnahmen studiert, welche später die Normung ergänzen können.

5. *Isolationskoordination*

Die Aktivitäten des Beratungskomitees (AG) „Isolationskoordination" konzentriert sich generell auf folgende drei Fragestellungen:

1. Feststellung der Isolationsbeanspruchungen
2. Ermittlung der Isolationsfestigkeit
3. Untersuchung des Isolationsverhaltens und des Fehlerrisikos

Behandelt wird die Isolationskoordination von Systemen, aber auch von einzelnen Hochspannungsapparaten. Die eingesetzten Mittel sind die Sammlung von Erfahrungswerten und die theoretische Modellierung. Schliesslich werden dielektrische Tests diskutiert, welche eine Beurteilung der Isolationskoordination zulassen sollen und welche an folgenden Betriebsmitteln durchgeführt werden können: Transformatoren,

Messwandler, Kabel, Isolatoren, Überspannungsableiter, GIS, DC-Systeme, Freileitungen, Funkenstrecken. Ein wichtiges Kriterium ist in vielen Fällen die Koordination der externen Isolationsstrecken gegenüber der internen Isolation.

2 EMV-Beispiel 1: Beherrschung von Erdungsspannungen bei Mobilfunk-Antennen auf Masten von Hochspannungsfreileitungen

Seit dem Aufbau der Mobiltelefonnetze werden als Aufstellungsort für die Antennen seit mehreren Jahren unter anderem die Masten bestehender Hochspannungsfreileitungen verwendet.

Vorteile für den Betrieb der Antennen auf Hochspannungsmasten ergeben sich aus folgenden Überlegungen:

- Landschaftsschutz (unauffällige Zusatzinstallationen)
- Nutzung eines bereits bestehenden Masts
- Übersichtliche Grundstückverhältnisse
- Aufgrund der Leitungsverordnung bereits gewährleisteter Abstand von bewohnten und bebaubaren Flächen
- Ev. funktechnisch günstiger Standort

Als Preis für diese Vorteile ist in Kauf zu nehmen, dass bei Erdfehlern auf der Freileitung hohe Potentialdifferenzen zwischen der neutralen Erde der Umgebung und dem Erdpotential der Maststruktur entstehen können, auf welchen die Telekomeinrichtungen montiert sind. Diese Potentialunterschiede müssen sowohl für die elektrische Speisung der Sendeanlage, wie auch für die Signalverbindung zum kabelgebundenen Telefonnetz beherrscht werden.

Die Cigré-Arbeitsgruppe C4.2.02 hat sich an den Abklärungen der Studiengruppe 5 der ITU-T[1] beteiligt, welche im vergangenen Jahr eine Richtlinie zur Lösung dieser Probleme ausgearbeitet und herausgegeben hat [1].

Im Rahmen dieser Arbeit wurde von der Cigré eine internationale Umfrage gestartet und ausgewertet [3].

Es wurden drei bewährte Vorschläge für die Potentialtrennung des Niederspannungsnetzes vom Erdungspotential der Masten vorgestellt. Kernstück der notwendigen Einrichtungen ist ein Isoliertransformator, welcher die möglichen Erdungsspannungen in Fehlerfällen aufnimmt.

Darüber hinaus beinhaltet die Richtlinie Angaben über die der Ermittlung der Isolationsspannungen (Tabelle 2), die Dimensionierung der Kabellängen (Tabelle 3) und Isolierabstände und die Auslegung der Überspannungsableiter.

---

1 ITU-T International Telecommunication Union, Telecommunication Standardization Sector of ITU

Abbildung 1
Freileitungsmast mit GSM-Antennenanlage auf einem Podest. Die Mobilfunkantennen befinden sich am Ort der Ausleger. Auf der Mastspitze ist eine Richtstrahlantenne für die Einbindung in das übergeordnete Netz angebracht

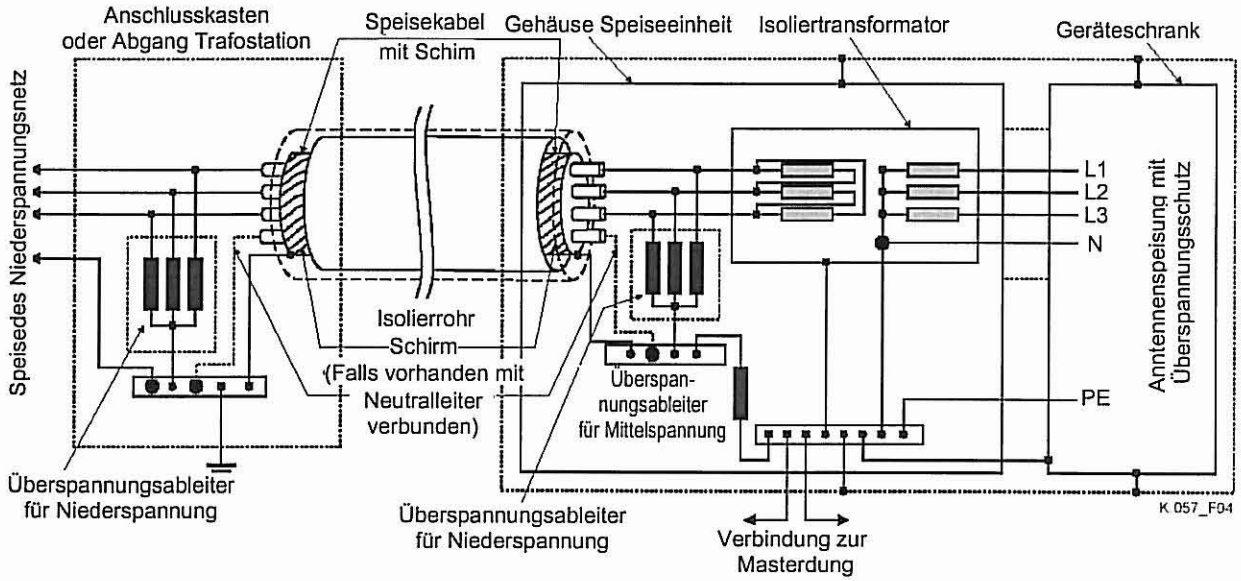

Abbildung 2 **Schema für Massnahmen zur Beherrschung von Erdpotentialdifferenzen zwischen dem Hochspannungsmast und dem Niederspannungsnetz bei Erdfehlern und bei Blitzeinwirkung (Variante 3 gemäss [1])**

Erdungs-widerstand Mast [Ω]	*Erdseilkonfiguration*		
	1 Erdseil	*2 Erdseil*	*1 Erdseil + Kupferband*
8	4.663	3.237	0.872
25	8.208	5.589	2.290
50	11.41	7.432	4.316

Tabelle 2 **Masterdungsspannung im Erdschlussfall in kV pro 10 kA Erdschlussstrom**

Isolations-niveau	*Minimallänge einer Lichtleiter Kabelverbindung bis zum Umsetzer auf Kupferkabel [m]*			
	Zulässige Erdungsspannung am Ort des Umsetzers			
[kV]	*650 V*	*1 kV*	*1.5 kV*	*2 kV*
10	*44*	*29*	*19*	*14*
15	*67*	*43*	*29*	*22*
20	*28*	*58*	*39*	*29*
50	*221*	*144*	*96*	*72*

Tabelle 3 **Minimale Länge einer isolierenden Lichtwellenleiterverbindung in Metern für die Signalübertragung aus dem Potentialtrichter der Masterdung im Fehlerfall in Abhängigkeit der maximal erwarteten Erdungspotentialanhebung und der zulässigen Differenzspannung am LWL-Umsetzer**

Literaturstellen zum ersten EMV-Beispiel:

[1] ITU „ Protection measures for radio base stations sited on power line towers"; ITU Recommendation, Series K: Protection against interference K.57 (09/2003)

[2] ESTI „Konzepte für die Stromversorgung von Antennenanlagen auf Hochspannungsmasten" Eidgenössisches Starkstrominspektorat, STI Nr. 243.0702 d, 1. Juli 2002

[3] Electra, voraussichtlich November/Dezember 2004

[4] G. Diendorfer, J. Groiss, St. Pack; „Österreichische Richtlinie für die Stromversorgung von Mobilfunk-Antennen auf Hochspannungsmasten", 4. VDE/ABB-Blitzschutztagung, Neu-Ulm, November 2001

3 EMV-Beispiel 2: Wechselstromkorrosion an Erdgasleitungen infolge induzierter Spannungen von Freileitungen

3.1 Mechanismus der Wechselstromkorrosion

Bis vor 20 Jahren 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 heute in zunehmendem Masse hochisolierende Polymerisolierungen eingesetzt werden, häuften sich in den letzten 15 Jahren Korrosionsangriffe auf Rohrleitungen, welche eindeutig der Wechselstromkorrosion zugeschrieben werden können.

Die Vorgänge, die beim Durchgang des Wechselstromes durch die Phasengrenze Metall-Erdboden ablaufen, sind primär rasche 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.

Bei grösseren Wechselspannungen können ab einer kritischen Stromdichte von typisch 30 A/m^2 zusätzlich auch irreversible Prozesse ablaufen. Dabei kann während der anodischen Halbwelle Metallauflösung (Korrosion) stattfinden. Bei der kathodischen Halbwelle wird in der Regel Wasserstoff produziert (Abbildung 3).

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

Die physikalischen Einflussgrössen, das heisst der Zusammenhang zwischen Stromdichte j, Lochgrösse (A, d) der Wechselspannung U, den spez. Boden- und Fehlerstellenmaterialwiderstand ρ_E und ρ_L, können durch folgende Beziehung beschrieben werden (siehe auch Abbildung 4).

$$j = \frac{U}{R_R \cdot A} \qquad [\mathrm{A/m^2}] \qquad \text{dabei ist} \qquad R_R = \frac{\rho_L d}{A} + \frac{\rho_E}{4}\sqrt{\frac{\pi}{A}}$$

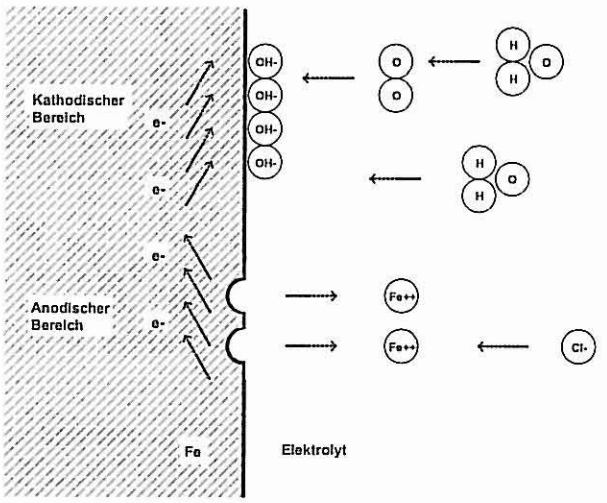

Abbildung 3 Schematische Darstellung der Vorgänge bei der Oberflächenkorrosion eines erdverlegten Stahlrohrs

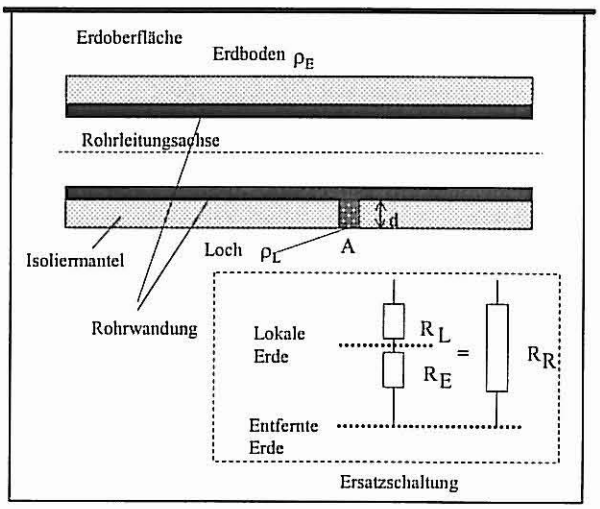

Abbildung 4 Elektrisches Ersatzschaltbild eines Lochs durch Verletzung eines Isoliermantels an einer isolierten, kathodisch geschützten Rohrleitung

3.2 Elektromagnetische Beeinflussung, Bestimmung der Rohrleitungsspannung

Fremdspannungen und -ströme auf Rohrleitungen infolge des Betriebs von Starkstromleitungen und Bahnen werden durch ***induktive*** oder ***ohmsche*** Kopplung erzeugt.

Es müssen insbesondere zwei Situationen unterschieden werden: der ***Normalbetrieb*** und der ***Fehlerfall*** der elektrischen Leitungen und Bahnen.

Entscheidend für Korrosionsfragen sind die Beeinflussungen im Normalbetrieb, da die kurze Dauer der Fehlerzustände keine wesentlichen elektrochemischen Stoffumsätze zulassen. Bei Freileitungen handelt es sich in erster Linie um induktive Kopplungsmechanismen. Wegen der Erdseilströme können allerdings indirekt ohmsche Kopplungen dominant sein. Bei der Beeinflussung durch Bahnanlagen sind grundsätzlich beide Kopplungsarten beteiligt.

Abbildung 5 zeigt eine Illustration der Beeinflussungssituation durch eine Hochspannungsfreileitung im Normalbetrieb.

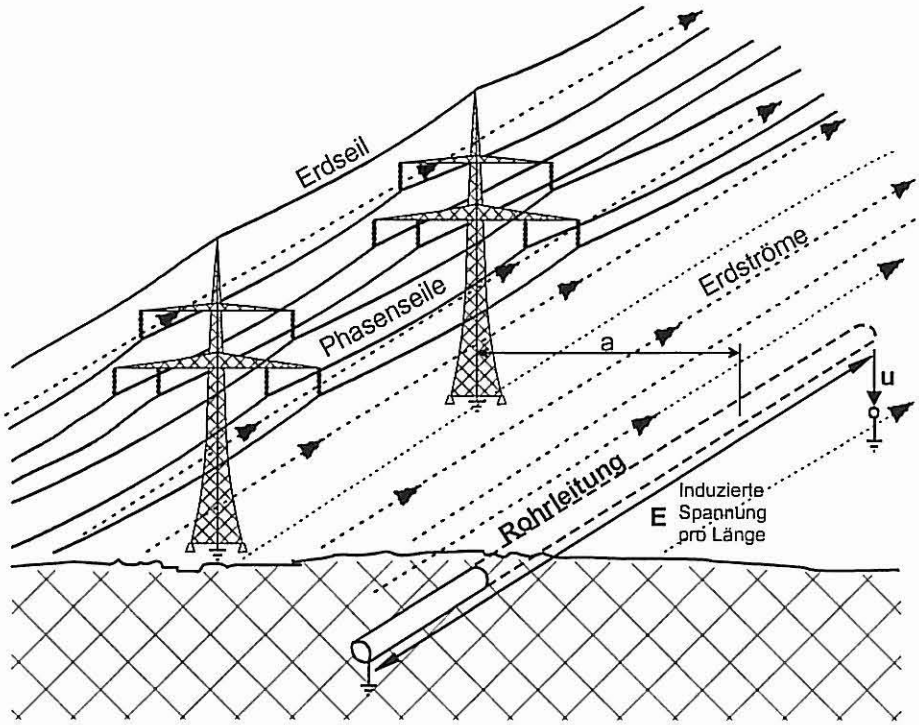

Abbildung 5 **Übersichtsskizze zur Erläuterung der Beeinflussung einer Rohrleitung im Nahbereich einer Hochspannungsfreileitung im Normalbetrieb**

3.3 Mathematische Modelle für die induktiv-ohmsche Beeinflussung

Der Mechanismus der induktiven Beeinflussung wird in Abbildung 6 illustriert. Ein Teil des magnetischen Felds eines stromdurchflossenen Leiters (z.B. eine Phase einer Freileitung) umschliesst einen Teil der Schleife zwischen Rohrleitung und dem Erdboden. Da der Erdboden keinen konzentrierten Leiter bildet, wird unter Zuhilfenahme der Wirbelstromtheorie eine Ersatzstromtiefe definiert, die vom Erdbodenwiderstand und von der Frequenz abhängt.

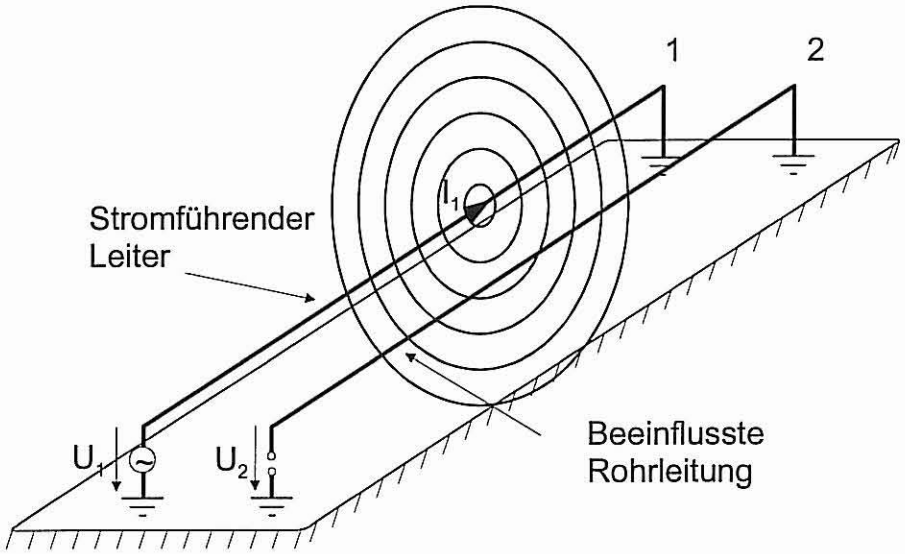

Abbildung 6 Induktion zwischen parallelen metallischen Leitern mit Schirmleiter

Ein nach dieser Modellvorstellung entworfenes elektrisches Ersatzschaltbild wird in Abbildung 7 wiedergegeben. Für die praktische Anwendung bei variablen Abständen der Freileitungs- und Rohrleitungstrassen werden kurze Teilstücke *dx* betrachtet. In einem ersten Schritt werden die elektrischen Eigenschaften der Rohrleitung zunächst ausser Acht gelassen. Es wird zunächst nur die induzierte Spannung ermittelt, wobei angenommen wird, dass die Rohrleitung gegenüber dem Erdboden ideal isoliert ist. Diese Annahme gilt in gewisser Näherung nur für kurze, thermoplastisolierte Pipelines unter einer Länge von etwa 10 km und kann in diesen Fällen für eine erste Abschätzung der induzierten Spannung dienen. Für die Berechnung der Spannungsverteilung in realistischen Fällen müssen die elektrischen Leitungsgleichungen der Rohrleitung unter Verwendung des elektrischen Ersatzschaltbilds nach Abbildung 7 unten gelöst werden.

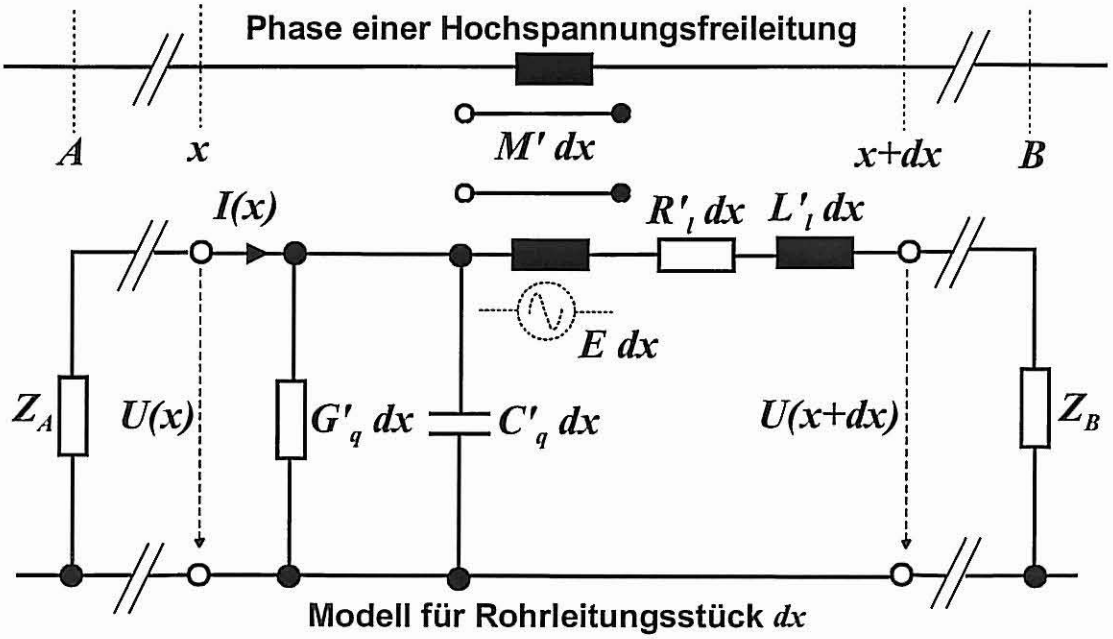

Abbildung 7 Elektrisches Ersatzschema für ein induktiv beeinflusstes Rohrleitungsstück *dx*

Abbildung 8 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 das Rohr nur am Leitungsanfang geerdet ist. Die dicke graue Linie zeigt schliesslich die Spannungsverteilung, welche sich unter dieser Bedingung aber bei Berücksichtigung der Längs- und Querimpedanzbeläge der Rohrleitung ergibt. Die zusätzliche Spannung gegenüber der einfachen Spannungsaufsummierung ist eine Folge der Resonanzüberhöhung, die sich aufgrund des Induktivitätsbelags und des sehr grossen Kapazitätsbelags der Rohrleitung (Grössenordnung 100 µF/km) einstellt.

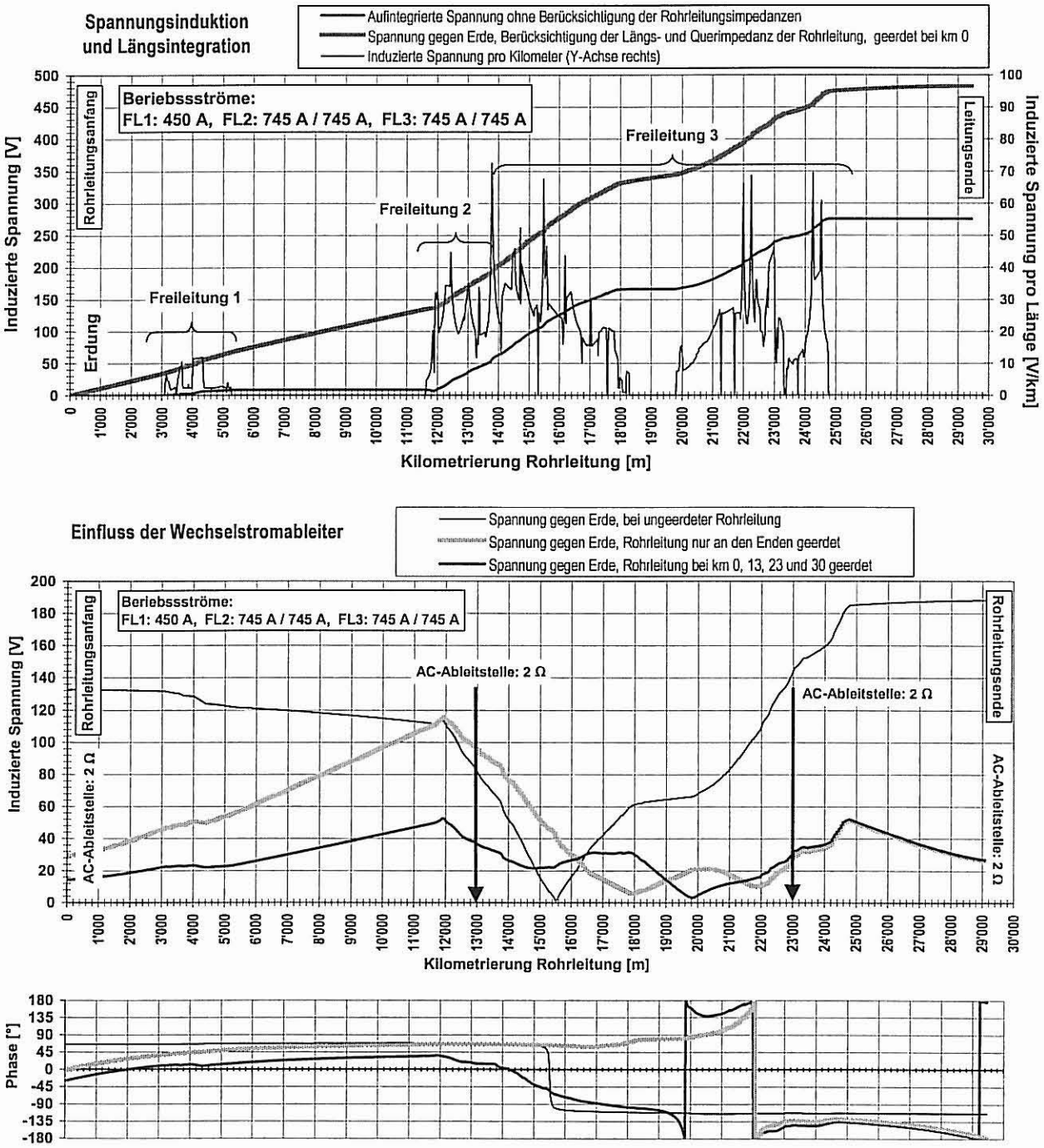

Abbildung 8 **Beispiel einer berechneten Wechselspannungsverteilung auf einer isolierten kathodisch geschützten Rohrleitung aufgrund Induktion durch den Betrieb von Hochspannungsfreileitungen**

Der untere Teil der Abbildung 8 zeigt Spannungsverteilungen bei verschiedenen Varianten der Positionierung von Wechselstromableitern zur Reduktion der Rohr-

leitungsspannung gegen Erde. Wechselstromableiter sind Abgrenzeinheiten, welche den Wechselstromanteil niederohmig gegen Erde ableiten, das kathodische Schutzpotential aber durch eine Gleichspannungsisolierung nicht beeinträchtigen.

Mit der Messung und Berechnung der beeinflussenden Spannungen und den neuen Erkenntnissen der Korrosionschemie wird ein Mittel geschaffen, das die Risikoabschätzung für die Wechselstromkorrosion erlaubt und auch eine Überprüfung der Wirkung von Schutzmassnahmen ermöglicht.

Literaturstellen zum zweiten EMV-Beispiel:

[5] Cigré Working Group 36.02, "Guide on the Influence of High Voltage AC Power Systems on Metallic Pipelines", Cigré Document No 95, Paris 1995.

[6] 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.

[7] 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)

[8] 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.