

Messtechnische Ermittlung von Rohrleitungsparametern unter Berücksichtigung von Erdern

Diplomarbeit



Institut für Elektrische Anlagen
Technische Universität Graz

Vorgelegt von:
Mario Ölz

Betreut von:
Dipl.-Ing. Dr.techn. Ernst Schmautzer
Dipl.-Ing. René Braunstein

Institutsleiter: Univ.-Prof. DI Dr.techn. Lothar Fickert

A - 8010 Graz, Inffeldgasse 18-I
Telefon: (+43 316) 873 – 7551
Telefax: (+43 316) 873 – 7553
<http://www.ifea.tugraz.at>
<http://www.tugraz.at>

Graz / Oktober – 2011

Danksagung

Während der Jahre meines Studiums und der Mitarbeit am Institut für Elektrische Anlagen waren mir wertvolle Einblicke in die Welt der Energietechnik aus universitärer Sicht möglich. Mit dem Erstellen dieser Diplomarbeit endet nun ein Lebensabschnitt, und ein neuer beginnt. Die gesammelten Erfahrungen werden mich mein ganzes zukünftiges Berufsleben begleiten.

Aus diesem Grund bedanke ich mich bei

- meinen Diplomarbeitbetreuern Dipl.-Ing. Dr. Ernst Schmutzer und Dipl.-Ing. René Braunstein für die umfassende Unterstützung in Form von wissenschaftlichen Vorschlägen und Anregungen. Die lehrreichen Vorlesungen und spannenden Dienstreisen mit Dr. Schmutzer werden mir stets in Erinnerung bleiben.
- Dipl. Ing. Braunstein auch als Arbeitskollege für die gemeinsame Zeit der konstruktiven Zusammenarbeit am Institut und als Freund für jeglichen Beistand im Studium.
- Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Lothar Fickert als Institutsleiter für die Ermöglichung der Mitarbeit am Institut für Elektrische Anlagen und auch für das vermittelte Wissen in seinen umfangreichen Vorlesungen der elektrischen Energietechnik.
- allen Kolleginnen und Kollegen am Institut für Elektrische Anlagen. Unsere Messtrupps und die zahlreichen Messungen in ganz Österreich werden mir ebenfalls immer in äußerst angenehmer Erinnerung bleiben.
- allen meinen Angehörigen, die mich in meinem Studium unterstützt haben.

Ein besonderer Dank gilt der EVN Netz GmbH für die Ermöglichung der Messungen.

**Diese Arbeit sei meiner Familie, vor allem meiner Mutter Jolanda Gmeiner gewidmet,
die mir mein Studium ermöglicht hat.**

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am 28.10.2011

Mario Ölz

GENDER

In der vorliegenden Arbeit werden personenbezogene Bezeichnungen häufig in männlicher Form angeführt, sie beziehen sich jedoch auf Frauen und Männer in gleicher Weise. Wird auf bestimmte Personen Bezug genommen, wird die zutreffende geschlechtsspezifische Form verwendet.

Kurzfassung

Titel: Messtechnische Ermittlung von Rohrleitungsparametern unter Berücksichtigung von Erdern

Schlüsselwörter: Metallische Rohrleitungen; Elektromagnetische Beeinflussung; Rohrleitungsimpedanz; Pi-Ersatzschaltbild; Wechselstromkorrosion; Kathodischer Korrosionsschutz; Erdungsanlagen; Kompensationsleiter

Bei der Planung und im Betrieb von Rohrleitungsnetzen welche dem Transport von flüssigen Brennstoffen, Gasen oder Fernwärme dienen, müssen aus unterschiedlichsten Gründen zahlreiche elektrotechnische Aspekte berücksichtigt werden. Zum einen lässt es sich nicht vermeiden, dass die Trassenführung der Rohrleitungsnetze oft über weite Strecken gemeinsam mit elektrischen Netzen und elektrifizierten Bahnstrecken erfolgt und somit von diesen ohmsch, induktiv und kapazitiv beeinflusst werden. Zum anderen müssen die elektrochemischen Wechselwirkungen mit der Umgebung der Rohrleitung Berücksichtigung finden. Hinsichtlich des Personenschutzes, aber auch zur Vermeidung von Korrosionseffekten müssen durch bauliche Maßnahmen unzulässig hohe Spannungen vermieden werden. Immer leistungsfähigere und dichtere Energietransport- und Verteilnetze und die steigende Anzahl an Personen- und Gütertransporten auf elektrifizierten Bahnstrecken haben eine Zunahme der negativen Beeinflussungen von fremden Anlagen zur Folge. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen die spannungsreduzierende Wirkung von Erdungsanlagen und eines längs einer Rohrleitung verlegten Kompensationsleiters auf. Ergänzend zur gegebenenfalls sehr teuren Methode der Errichtung von Erdungsanlagen kann im Verlegen von Kompensationsleitern eine mögliche Alternative gesehen werden. Zusätzlich wurden elektrische Rohrleitungsparameter messtechnisch ermittelt und mit Werten aus der Theorie verglichen.

Abstract

Title: Determination of pipeline parameters by measurements considering earthing systems

Key words: metallic pipelines; electromagnetic interference; pipeline impedance; pi-circuits; a.c. corrosion; cathodically corrosion protection; earthing systems; compensation

When planning and operating pipeline networks which conduce to the transport of liquid fuels, gases or district heat based on different reasons a multiplicity of electrical parameters have to be taken into account. On the one hand it is unavoidable that pipeline networks and electric grids as well as railway systems are located in the same route and therefore the pipeline system is inductive, capacitive and conductive interfered. On the other hand electrochemical interdependencies between the pipeline and the surrounding soil have to be taken into account. Regarding personal safety as well as for avoiding a.c. corrosion processes inadmissible induced voltages have to be reduced by constructional measures. Increasingly powerful and increasingly compact energy- transport and supply grids as well as an increasing number of passenger and freight transports along electrified railway lines lead to an increasing electrical interference of pipeline systems. The results of this thesis show the voltage reducing effects of earthing systems as well as of a longitudinal to the pipeline buried compensation conductor. In addition to possibly expensive method of constructing earthing systems, the installation of a compensation conductor can be seen as a possible alternative. Additionally, electrical pipeline parameters were measured and compared with theoretical values.

Inhaltsverzeichnis

1	Abkürzungsverzeichnis	8
2	Kurzfassung	12
2.1	Ziel	12
2.2	Methode	12
2.3	Ergebnisse	12
2.4	Schlussfolgerungen	12
3	Einleitung	13
3.1	Hintergrund der Arbeit	13
3.2	Resultierende Aufgabenstellung	13
4	Arten der niederfrequenten Beeinflussung und deren Auswirkungen auf Rohrleitungen	15
4.1	Ohmsche Beeinflussung (galvanische Kopplung)	15
4.2	Induktive Beeinflussung (induktive Kopplung)	17
4.3	Kapazitive Beeinflussung (kapazitive Kopplung)	18
4.4	Spannungen an der Rohrleitung	20
5	Rechnerische Ermittlung der elektrischen Kenngrößen einer erdverlegten Rohrleitung	25
5.1	Erläuterung	25
5.2	Längsimpedanz der Rohrleitung	26
5.3	Queradmittanz der Rohrleitung	28
5.4	Gesamtimpedanz, Wellenwiderstand und Längenkonstanten der Rohrleitung	29
6	Messkonzept	31
6.1	Topographische Situation	31
6.2	Definition der Schaltzustände der Rohrleitung	33
6.3	Erste Versuche und Parametrierung der Messgeräte im Labor	35
6.4	Erfassung der Ströme in den Bahnoberleitungen	36
6.5	Erfassung der Spannungen und Ströme entlang Rohrleitung und Begleitkabel mittels Datalogger	41

6.6	Hochauflösende Erfassung der Spannungen und Ströme entlang Rohrleitung und Begleitkabel.....	44
6.7	Frequenzselektive Einspeisung zur Ermittlung der Rohrleitungsimpedanz	49
6.8	Ermittlung des spezifischen Bodenwiderstands und des Ausbreitungswiderstands der Anlagenerder	51
7	Messergebnisse	54
7.1	Spannungen und Ströme entlang Rohrleitung und Begleitkabel	54
7.2	Rohrleitungsimpedanzen	61
8	Diskussion.....	66
8.1	Wirkung von Begleitkabel und Erdungsanlagen.....	66
8.2	Vergleich der messtechnisch ermittelten Werte mit den theoretisch ermittelten Werten für die Rohrleitungsimpedanzen.....	70
9	Literatur	74
10	Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	77
10.1	Abbildungen.....	77
10.2	Tabellen.....	80

1 Abkürzungsverzeichnis

Kapitel 4.1

\underline{U}_E	Erdungsspannung (V)
\underline{Z}_E	Erdungsimpedanz (Ω)
\underline{I}_E	Strom über die Erdungsanlage (A)

Kapitel 4.2

\underline{U}_i	induzierte Längsspannung (V)
\underline{z}_g	Koppelimpedanzbelag (Ω/km)
\underline{I}	Wechselstrom im beeinflussenden Leiter (A)
l	Länge des Parallellaufes (km)

Kapitel 4.3

C	elektrische Kapazität (F)
A	Fläche der Elektroden (m^2)
d	Abstand der Elektroden, bzw. Stärke des Dielektrikums (m)
ε	Permittivität (As/Vm)
ε_0	elektrische Feldkonstante des Vakuums (As/Vm)
ε_r	dielektrische Leitfähigkeit des Dielektrikums
Q	Ladungsmenge (As)
U	zwischen den Leitern bestehende Spannung (V)
X_C	kapazitiver Blindwiderstand (Ω)
f	Frequenz der Spannung (Hz)
ω	Kreisfrequenz (1/s)
\underline{U}_1	influenzierende Spannung (V)
\underline{U}_F	influenzierte Spannung (V)
\underline{I}_F	influenzierter Strom bei (A)
c_K	Koppelkapazitätsbelag (F/m)
c_F	Erdkapazitätsbelag (F/m)
d	Näherung (m)
l	Länge des beeinflussten Systems (m)
\underline{Z}_F	Fehlerimpedanz gegen Erde (Ω)
l	Länge des Parallellaufes (km)

Kapitel 4.4

\underline{U}_L	Spannung der Rohrleitung an der Stelle x gegen ferne Erde (V)
\underline{I}_L	Strom in der Rohrleitung an der Stelle x (A)
r_L	Längswiderstandsbelag (Ω/m)
l_L	Längsinduktivitätsbelag (H/m)
g_L	Längsleitwertbelag (S/m)
c_L	Längskapazitätsbelag (F/m)
ω	Kreisfrequenz (1/s)

Kapitel 5

R_R	Rohrradius der Rohrleitung (mm)
d_{St}	Stärke der Stahlwand der Rohrleitung (mm)
d_P	Stärke der Polyethylenumhüllung der Rohrleitung (mm)
D_N	Nenninnendurchmesser der Rohrleitung (mm)
l	Länge des messtechnisch betrachteten Gasleitungsabschnitts (km)
f	Frequenz der beeinflussenden Bahnstrecke (Hz)

ω	Kreisfrequenz (1/s)
μ_0	Vakuumpermeabilität (Vs/Am)
μ_r	relative Permeabilitätszahl der Stahlwand, ferromagnetisch
ε_0	Dielektrizitätskonstante (As/Vm)
ε_r	relative Dielektrizitätszahl der Polyethylenumhüllung bei Frequenz f
ρ	spezifischer Bodenwiderstand (Ωm)
ρ_{St}	spezifischer Widerstand der Stahlwand ($\Omega\text{mm}^2/\text{m}$)
ρ_{Cu}	spezifischer Widerstand von Kupfer ($\Omega\text{mm}^2/\text{m}$)
r_U	auf die Fläche bezogener Umhüllungswiderstand der Rohrleitung mit Polyethylenumhüllung, Erfahrungswert (Ωm^2)
e	Eulersche Zahl
γ	Besselsche Konstante
c	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum (km/s)
\underline{Z}_L	Längsimpedanzbelag der Rohrleitung pro Kilometer (Ω/km)
\underline{Z}_L	Längsimpedanz der Rohrleitung (Ω)
r'_{Lo}	ohmscher Längswiderstandsbelag eines zylinderförmigen Volleleiters ohne Skineffekt pro Kilometer (Ω/km)
δ_{St}	Eindringtiefe in den Stahl bei Skineffekt (mm)
r_{Lo}	ohmscher Längswiderstandsbelag eines zylinderförmigen Volleleiters mit Skineffekt pro Kilometer, entspricht Längswiderstandsbelag der Rohrleitung (Ω/km)
r_e	Erdwiderstand pro Kilometer (Ω/km)
R_e	Erdwiderstand (Ω)
R_L	ohmscher Längswiderstand der Rohrleitung (Ω)
R_K	ohmscher Widerstand des Kupferleiters (Ω)
x'_{iLo}	innerer Längsreaktanzenbelag eines zylinderförmigen Volleleiters ohne Skineffekt pro Kilometer ($j\Omega/\text{km}$)
x_{iLo}	innerer Längsreaktanzenbelag eines zylinderförmigen Volleleiters mit Skineffekt pro Kilometer, entspricht innerem Längsreaktanzenbelag der Rohrleitung ($j\Omega/\text{km}$)
δ_e	Eindringtiefe einer elektromagnetischen Welle in das Erdreich (m)
D_e	Tiefe des äquivalenten Erdrückleiters (m)
x_L	Selbstreaktanzenbelag der Schleife, welche die Rohrleitung mit Erdrückleitung bildet pro Kilometer ($j\Omega/\text{km}$)
X_L	Längsreaktanzen der Rohrleitung ($j\Omega$)
L_L	Längsinduktivität der Rohrleitung (mH)
x_{LK}	Selbstreaktanzenbelag der Schleife, welche die Rohrleitung mit Rückleitung über den Kompensationsleiter bildet, pro Kilometer ($j\Omega/\text{km}$)
X_{LK}	Längsreaktanzen der Rohrleitung bei Rückleitung über den Kompensationsleiter ($j\Omega$)
L_{LK}	Längsinduktivität der Rohrleitung bei Rückleitung über den Kompensationsleiter (mH)
y_L	Queradmittanzbelag der Rohrleitung pro Kilometer (S/km)
\underline{Y}_L	Queradmittanz der Rohrleitung (S)
g_L	ohmscher Querableitungsbelag der Rohrleitung pro Kilometer (S/km)
G_L	ohmsche Querableitung (Konduktanz) der Rohrleitung (S)
b_L	kapazitiver Querableitungsbelag der Rohrleitung pro Kilometer ($j\text{S}/\text{km}$)
c_L	Erdkapazitätsbelag der Rohrleitung pro Kilometer ($\mu\text{F}/\text{km}$)
B_L	kapazitive Querableitung (Suszeptanz) der Rohrleitung ($j\text{S}$)
C_L	Erdkapazität der Rohrleitung (μF)
\underline{Z}_{Ges}	Gesamtimpedanzbelag der Rohrleitung pro Kilometer (Ω/km)
\underline{Z}_{Ges}	Gesamtimpedanz der Rohrleitung (Ω)

\underline{Z}_W	Wellenwiderstand der Rohrleitung (Ω)
\underline{Y}	Übertragungskonstante (1/km)
\underline{L}	Längenkonstante der Rohrleitung (km)
λ'	Wellenlänge elektromagnetischer Wellen im Medium (km)

Kapitel 6.2

U_{eff}	messtechnisch ermittelter Effektivwert der Spannung (V)
I_{eff}	messtechnisch ermittelter Effektivwert des Stroms (A)
$u(t)$	messtechnisch ermittelter Augenblickswert der Spannung (V)
$i(t)$	messtechnisch ermittelter Augenblickswert des Stroms (A)

Kapitel 6.3

I_{therm}	thermischer Grenzstrom eines Anlagenteils (A)
I_{max}	maximaler Betriebsstrom (A)
B_{EFD}	magnetische Ersatzflussdichte (μT)

Kapitel 6.7

\underline{U}	komplexe Spannung ($V\angle^\circ$)
U_{eff}	Effektivwert der komplexen Spannung (V)
φ_u	Phasenwinkel der komplexen Spannung ($^\circ$)
\underline{I}	komplexer Strom ($A\angle^\circ$)
I_{eff}	Effektivwert des komplexen Stroms (A)
φ_i	Phasenwinkel des komplexen Stroms ($^\circ$)
f	Frequenz (Hz)
t	Dauer der Einspeisung (s)
R	ohmscher Widerstand (Ω)
X	Reaktanz ($j\Omega$)
\underline{Z}	Impedanz (Ω)

Kapitel 6.8

U	messtechnisch ermittelte Spannung (V)
I	eingespeister Strom (A)
r	Abstand der Stromspeisenden Elektrode zur Spannungssonde (m)
ρ_E	spezifischer Bodenwiderstand (Ωm)

Kapitel 7.1

$\overline{I_{Beff}}$	Mittelwert der Ströme im Bahnsystem (A)
$I_{Beff_i}, \dots, I_{Beff_n}$	Ströme im Bahnsystem (A)
$\overline{U_{RLeff}}$	Mittelwert der Spannungen Rohrleitung gegen ferne Erde (V)
$U_{RLeff_i}, \dots, IU_{RLeff_n}$	Spannungen Rohrleitung gegen ferne Erde (V)
n	Anzahl der sekundlichen Abtastungen im betrachteten Zeitfenster
I_{Bmax}	maximaler Betriebsstrom im Bahnsystem (A)
U_{RLno}	normierte Spannung Rohrleitung gegen ferne Erde (V)

Kapitel 7.2

l_{gem}	Länge des messtechnisch erfassten Rohrleitungsabschnitts (km)
l_{ges}	Länge des gesamten betrachteten Rohrleitungsabschnitts (km)
R_{Lgem}	ohmscher Längswiderstand gemessen (Ω)
X_{Lgem}	induktive Längsreaktanz gemessen ($j\Omega$)
R_{Qgem}	ohmsche Querableitung gemessen (Ω)
X_{Qgem}	kapazitive Querreaktanz gemessen ($j\Omega$)

R_L	ohmscher Längswiderstand umgerechnet (Ω)
X_L	induktive Längsreaktanz umgerechnet ($j\Omega$)
R_Q	ohmsche Querableitung umgerechnet (Ω)
X_Q	kapazitive Querreaktanz umgerechnet ($j\Omega$)
R_A	Ausbreitungswiderstand des Anlagenerders (Ω)
ρ_E	spezifischer Bodenwiderstand (Ωm)

Kapitel 8.1

$E_{RL}(x)$	elektrische Längsfeldstärke der Rohrleitung (V/m)
$E_{BK}(x)$	elektrische Längsfeldstärke des Begleitkabels (V/m)
I_{RL}	Stromfluss längs der Rohrleitung (A)
I_{BK}	Stromfluss längs des Begleitkabels (A)
I_E	Stromfluss über die Erdungsanlage (A)
E_K'	durch Stromfluss im Begleitkabel verursachte elektrische Längsfeldstärke in der Rohrleitung (V/m)
R_A	Ausbreitungswiderstand des Anlagenerders (Ω)
ρ_E	spezifischer Bodenwiderstand (Ωm)

Kapitel 8.2

μ_r	relative Permeabilitätszahl
R_{Lgem}	messtechnisch ermittelter Längswiderstand der Rohrleitung (Ω)
R_L	errechneter Längswiderstand der Rohrleitung (Ω)
X_{Lgem}	messtechnisch ermittelte induktive Längsreaktanz der Rohrleitung ($j\Omega$)
X_{LK}	errechnete induktive Längsreaktanz der Rohrleitung bei Rückleitung über das Begleitkabel ($j\Omega$)
L_{Lgem}	aus Messwerten abgeleitete Längsinduktivität der Rohrleitung (mH)
L_{LK}	errechnete Längsinduktivität der Rohrleitung (mH)
R_{Qgem}	messtechnisch ermittelte ohmsche Querableitung als Resistanz der Rohrleitung (Ω)
G_L	errechnete Querableitung als Leitwert der Rohrleitung (S)
R_Q	aus errechneten Werten abgeleitete ohmsche Querableitung als Resistanz der Rohrleitung (Ω)
r_U	auf die Fläche bezogener Umhüllungswiderstand der Rohrleitung mit Polyethylenumhüllung, Erfahrungswert (Ωm^2)
r_{Ugem}	auf die Fläche bezogener Umhüllungswiderstand der Rohrleitung mit Polyethylenumhüllung, aus den Messwerten abgeleitet (Ωm^2)
X_{Qgem}	messtechnisch ermittelte kapazitive Querableitung als Reaktanz der Rohrleitung ($j\Omega$)
B_L	errechnete kapazitive Querableitung als Suszeptanz der Rohrleitung (jS)
X_Q	aus errechneten Werten abgeleitete kapazitive Querableitung als Reaktanz der Rohrleitung ($j\Omega$)
C_{Lgem}	aus Messwerten abgeleitete Erdkapazität der Rohrleitung (μF)
C_L	errechnete Erdkapazität der Rohrleitung (μF)
ϵ_r	relative Dielektrizitätszahl der Polyethylenumhüllung der Rohrleitung

2 Kurzfassung

2.1 Ziel

Entlang einer Gashochdruckleitung werden die Auswirkungen von Erdungsanlagen sowie die eines mitgeführten Kompensationsleiters auf Rohrleitungspotentiale und Ströme messtechnisch untersucht. Zusätzlich werden die Rohrleitungsimpedanzen der aus verschweißten, mit Polyethylen umhüllten, Stahlrohren bestehenden Gashochdruckleitung ermittelt.

2.2 Methode

Nach Recherche in Literatur, einschlägigem Regelwerk und Normen werden die elektrischen Parameter der Gashochdruckleitung anhand der Theorien von Carson [2] und Pollaczek [3], [4] bzw. von M. Michailow und Z. Rasumov [5] errechnet. Diese Werte werden zur Abschätzung der zu erwartenden Messgrößen bzw. zum Vergleich mit den Messergebnissen herangezogen.

Im Labor des Instituts für Elektrische Anlagen wird ein Messkonzept erstellt. Es werden die Messgeräte parametrisiert und abgeglichen. Zusätzlich werden an Modellen Testmessungen durchgeführt. Nach der Vor-Ort-Messung an der realen Gashochdruckleitung werden die Messergebnisse ausgewertet, mit den theoretischen Werten verglichen, interpretiert und diskutiert.

2.3 Ergebnisse

Hinsichtlich der Verschaltung von Gashochdruckleitung, Erdungsanlagen und Begleitkabel wurden unterschiedliche Schaltzustände hergestellt und messtechnisch erfasst. Es konnten verschiedene spannungsreduzierende Wirkungen von Erdungsanlagen und Begleitkabel nachgewiesen werden. Für die einzelnen Schaltzustände wurden individuelle Rohrleitungsreduktionsfaktoren errechnet. Auch bei Verschaltung des Begleitkabels mit der Gashochdruckleitung komplett ohne Erdungsanlagen wurde eine gute spannungsreduzierende Wirkung festgestellt.

2.4 Schlussfolgerungen

Der Kompensationsleiter stellt zur gegebenenfalls sehr teuren Methode der Errichtung von Erdungsanlagen eine mögliche Alternative dar. Dieses Erkenntnis sollte durch weiterführende Messungen und Erstellung entsprechender mathematischer Modelle belegt werden.

Bei der theoretischen Ermittlung der Rohrleitungsimpedanzen muss auf die Wahl richtiger Werte von physikalischen Materialkonstanten geachtet werden.

3 Einleitung

3.1 Hintergrund der Arbeit

Bei der Planung und im Betrieb von Rohrleitungsnetzen bestehend aus verschweißten Stahlrohren welche dem Transport von flüssigen Brennstoffen, Gasen oder Fernwärme dienen, müssen aus unterschiedlichsten Gründen zahlreiche elektrotechnische Aspekte berücksichtigt werden.

Zum einen lässt es sich nicht vermeiden, dass die Trassenführung der Rohrleitungsnetze topologisch gesehen oft über weite Strecken gemeinsam mit elektrischen Netzen und elektrifizierten Bahnstrecken erfolgt und somit von diesen ohmsch, induktiv und kapazitiv beeinflusst werden. Zum anderen müssen die elektrochemischen Wirkungen der Gleich- aber auch der Wechselströme mit der Umgebung der Rohrleitung Berücksichtigung finden.

Hinsichtlich des Personenschutzes, aber auch zur Vermeidung von elektrochemischen Korrosionseffekten, welche eine Reduzierung der Nutzungsdauer zur Folge haben, müssen durch bauliche Maßnahmen unzulässig hohe Spannungen und sonstige ungewollte Wechselwirkungen mit dem umgebenden Erdreich der Rohrleitung vermieden werden.

Hierbei müssen auch die stetige Zunahme des Bedarfs an elektrischer Energie und das steigende Verkehrsaufkommen auf den Bahnstrecken berücksichtigt werden. Immer leistungsfähigere und dichtere Energietransport- und Verteilnetze und die steigende Anzahl an Personen- und Gütertransporten auf den elektrifizierten Bahnstrecken haben eine Zunahme der niederfrequenten Beeinflussungen von fremden Anlagen zur Folge.

3.2 Resultierende Aufgabenstellung

Den gängigen mathematischen Modellen zur theoretischen Berechnung niederfrequenter Beeinflussungen im Erdreich verlegter Rohrleitungen und in weiterer Folge der Ermittlung und Bewertung der Spannungs- und Stromverteilung entlang der Rohrleitung wie sie in derzeit gültigen einschlägigen Bestimmungen, Vorschriften und Normen für die Elektrotechnik Anwendung finden, liegen als Basismodelle für in der Praxis verwendete mit Bitumen bzw. Polyethylen isolierte Rohrleitungen Kettenleiter-Ersatzschaltbilder für infinitesimal kleine Leitungsabschnitte zugrunde (Abbildung 3.1) [1].

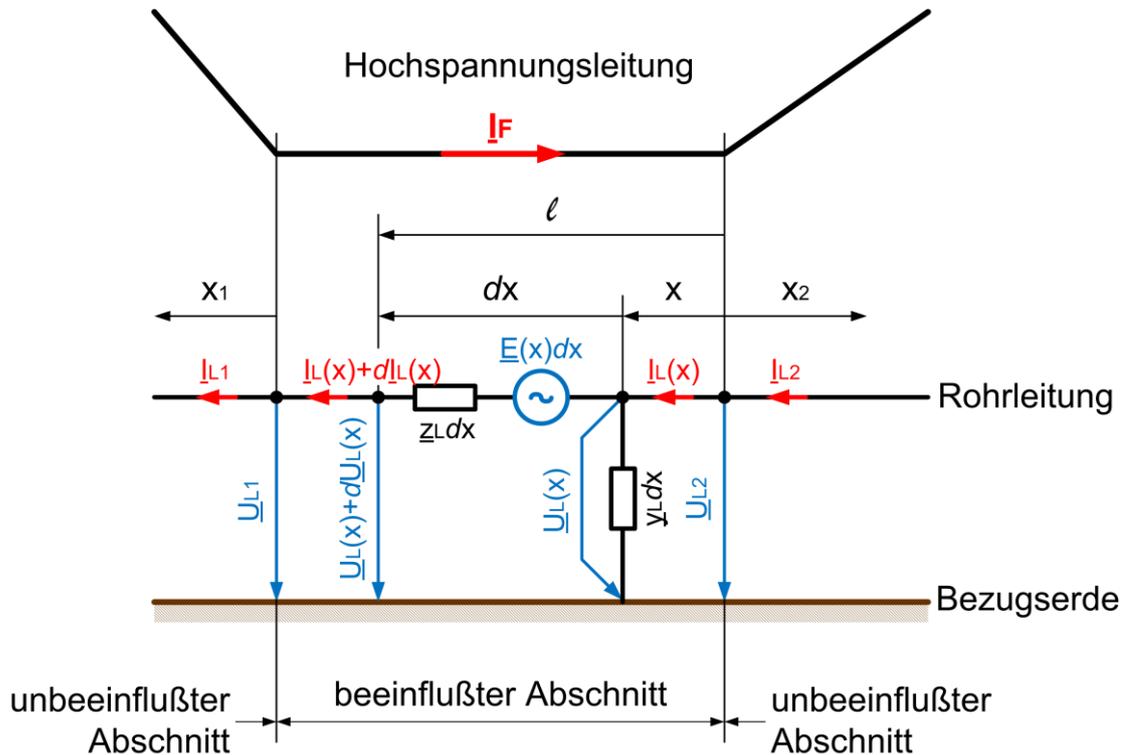


Abbildung 3.1: Einfaches Kettenleiter-Ersatzschaltbild bei induktiver Beeinflussung einer Rohrleitung (Darstellung aus [1], abgeändert)

Unter Berücksichtigung der Arbeiten von Carson [2] und Pollaczek [3], [4] bzw. von M. Michailow und Z. Rasumov [5] werden in dieser Arbeit die elektrisch relevanten Materialeigenschaften der Rohrleitung, die elektrischen Eigenschaften des Bodens sowie die Wirkung von parallel zur Rohrleitung geführten metallischen Kompensationsleitern, welche die komplexen Werte der Quer- und Längsimpedanzen in den Kettenleitermodellen bestimmen, zusammengestellt.

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt in der messtechnischen Bestimmung dieser Eigenschaften an einer realen Rohrleitung durch geeignete Verfahren und im anschließenden Vergleich mit den in mathematischen Simulationsmodellen üblicherweise eingesetzten Parametern. Unter Berücksichtigung der Wirkung von Erdern und eines parallel zur Rohrleitung verlegten metallischen Kompensationsleiters wird auch die Spannungs- und Stromaufteilung entlang der Rohrleitung messtechnisch erfasst und mit den Ergebnissen der mathematischen Simulationsmodelle verglichen. Diese Spannungen und Ströme werden entlang der messtechnisch betrachteten Rohrleitung durch eine parallel zur Rohrleitung verlaufende elektrifizierte Bahnstrecke verursacht. Aus diesem Grund werden die durch die Zugbewegungen auf der Bahnstrecke verursachten Ströme im Bahnsystem ebenfalls messtechnisch erfasst.

4 Arten der niederfrequenten Beeinflussung und deren Auswirkungen auf Rohrleitungen

4.1 Ohmsche Beeinflussung (galvanische Kopplung)

Geerdete elektrische Anlagen bilden über die Erdungsanlagen durch das Erdschicht betriebsmäßig oder im Fehlerfall stationäre elektrische Strömungsfelder aus, deren Form und Verlauf in unmittelbarer Umgebung der Anlage stark von den baulichen geometrischen Verhältnissen der Erdungsanlage (Horizontalerder, Tiefenerder, Ringerder, etc. ...) abhängig sind. Das daraus resultierende Potential, an der Erdoberfläche „Oberflächenpotential“ genannt, hat im Bereich des Erdschicht seinen höchsten Betrag, und nimmt mit zunehmender Entfernung ab. Ein solcher Potentialverlauf wird Spannungstrichter genannt (Abbildung 4.1) [7].

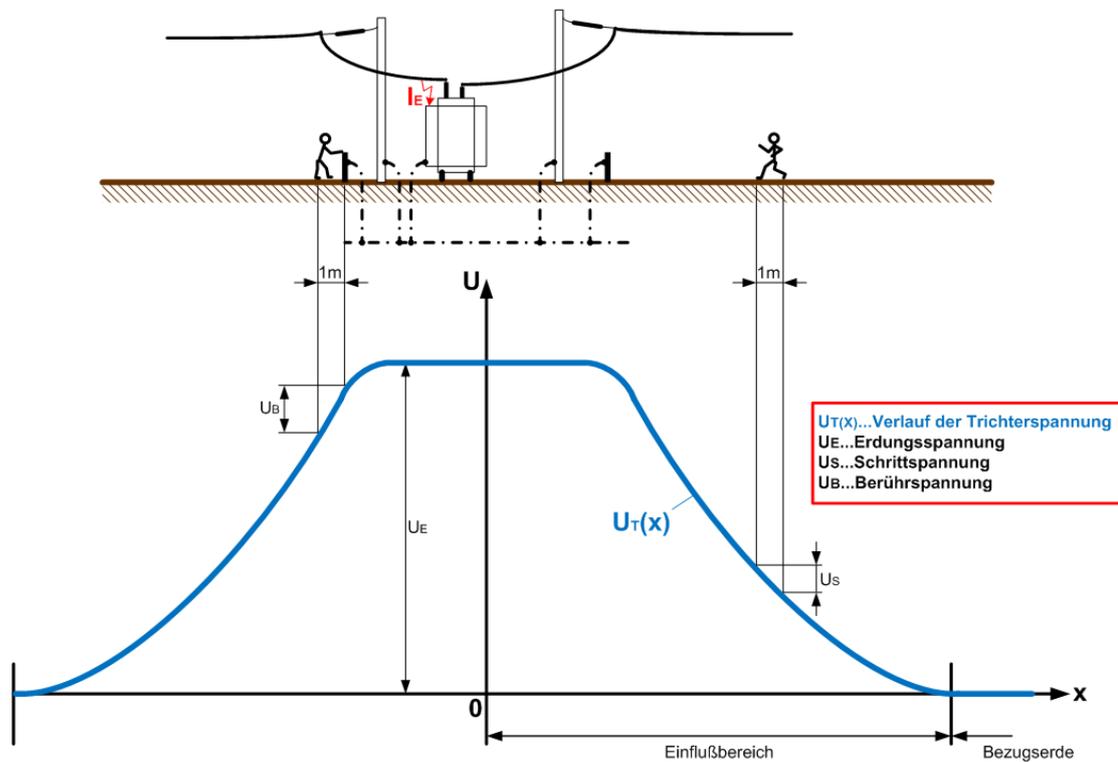


Abbildung 4.1: Schritt- und Berührungsspannungen (Darstellung aus [7], abgeändert)

Für die Erdungsspannung \underline{U}_E gilt:

$$\underline{U}_E = \underline{Z}_E \cdot \underline{I}_E$$

mit

\underline{Z}_E Erdungsimpedanz
 \underline{I}_E Strom über die Erdungsanlage

Die Erdungsimpedanz der Erdungsanlage setzt sich aus baulichen Gegebenheiten (geometrische Verhältnisse, verwendetes Material, ...), dem Übergangswiderstand Erder-Erdreich (der elektrische Strom teilt sich beim Übergang von der Metalloberfläche in das Erdreich auf viele kleine Berührungsstellen auf, daher entsteht der Übergangswiderstand aus der Parallelschaltung all dieser Stellen) und dem Widerstand des Erdreichs (spezifischer Bodenwiderstand, Bodenschichtung) zusammen. Dieser Widerstand ist in der unmittelbaren Umgebung des Erders groß, weil dort der leitende Querschnitt der Erde klein ist. Mit zunehmendem Abstand vom Erder vergrößert sich dieser Erdquerschnitt, woraus folgt, dass der elektrische Widerstand des Erdreichs kleiner wird. Schließlich wird der Widerstand des Erdreiches so klein, dass die Erde als elektrischer Leiter betrachtet werden kann [8].

Leitfähige, in Erde verlegte Betriebsmittel (metallische Rohrleitungen, andere Erdungsanlagen, Kabel usw.) welche sich im Bereich eines Spannungstrichters befinden, nehmen aufgrund der besseren spez. Leitfähigkeit im Vergleich zum Erdreich das örtliche Potential an und verschleppen dieses (Abbildung 4.2). Ändert sich über gewisse Distanzen dieses Potential, können diese Potentialunterschiede beeinflussend wirken, und unter Umständen zu Gefährdung von Menschen oder Schäden führen [7].

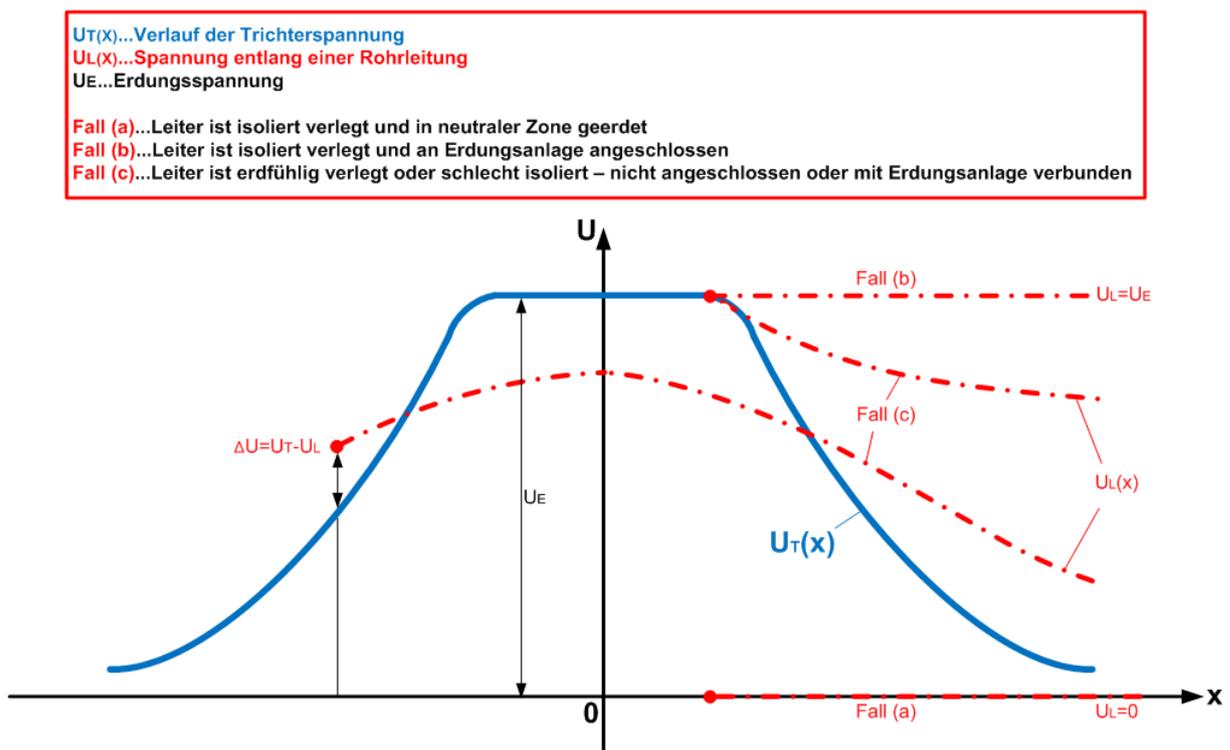


Abbildung 4.2: Spannungsverschleppung durch Rohrleitungen (Darstellung aus [7], abgeändert)

Die Beurteilung von ohmschen Beeinflussungen unter Berücksichtigung der Wirkungsdauer (Fehlerfall, Normalbetrieb) erfolgt gemäß einschlägigen gängigen Normen [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16].

4.2 Induktive Beeinflussung (induktive Kopplung)

Über die Länge l verläuft das beeinflussende System, welches einen hohen Wechselstrom führt, parallel zum beeinflussten System. Der Strom bewirkt ein magnetisches Wechselfeld. Über dieses magnetische Feld besteht ab einer gewissen Näherung eine relevante Kopplung zum beeinflussten System (z.B. metallische Rohrleitung).

Ein einfaches Modell zur induktiven Beeinflussung ist im folgenden Bild dargestellt (Abbildung 4.3). Die über Erde geschlossene Schleife des beeinflussenden Systems führt den Wechselstrom \underline{I} und induziert in der einseitig offenen über Erde geführten Schleife der beeinflussten Leitung die Spannung \underline{U}_i . Für die magnetische Kopplung der beiden Leiterschleifen kann als Impedanz pro Längeneinheit der spezifische Koppelimpedanzbelag \underline{z}_g angenommen werden [1].

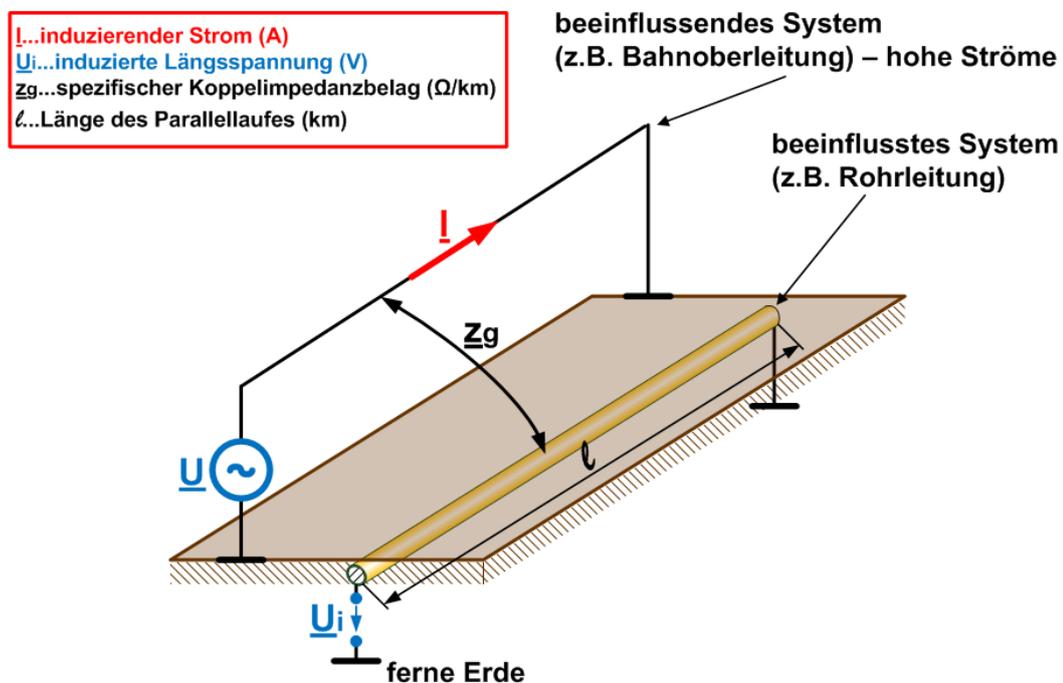


Abbildung 4.3: Einfaches Modell der induktiven Beeinflussung (Darstellung aus [1], abgeändert)

Für die induzierte Längsspannung \underline{U}_i gilt:

$$\underline{U}_i = \underline{z}_g \cdot l \cdot \underline{I}$$

mit

\underline{z}_g	Koppelimpedanzbelag (Ω/km)
\underline{I}	Wechselstrom im beeinflussenden Leiter (A)
l	Länge des Parallellaufes (km)

Reelle Systeme (z.B. mehrsystemige Hochspannungsfreileitungen mit Erdseilen, bzw. Bahnstrecken mit Erdseilen und Kompensationsleitern) verlaufen natürlich selten genau parallel, und besitzen auch mehrere, geometrisch verschieden angeordnete stromführende

Leiter. Hier müssen komplexe mathematische Methoden zur Ermittlung der resultierenden Ströme und Koppelimpedanzmatrizen angewendet werden [1].

4.3 Kapazitive Beeinflussung (kapazitive Kopplung)

Die physikalische Größe der elektrischen Kapazität C wird durch die geometrische Anordnung zweier leitfähiger Teile mit dazwischenliegendem Dielektrikum bestimmt. Eine einfache idealisierte Geometrie ist der Plattenkondensator.

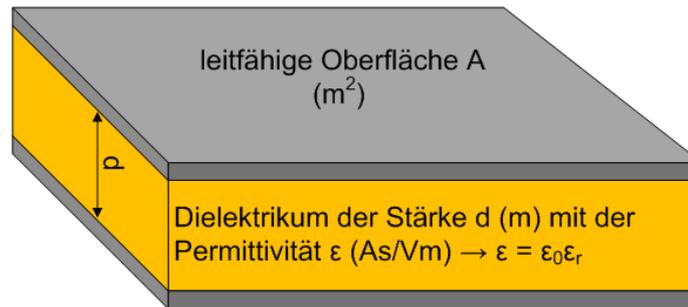


Abbildung 4.4: Plattenkondensator

Für die Kapazität eines Plattenkondensators gilt:

$$C = \varepsilon \cdot \frac{A}{d}; \varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$$

mit

C	elektrische Kapazität (F)
A	Fläche der Elektroden (m^2)
d	Abstand der Elektroden, bzw. Stärke des Dielektrikums (m)
ε	Permittivität (As/Vm)
ε_0	elektrische Feldkonstante des Vakuums (As/Vm)
ε_r	dielektrische Leitfähigkeit des Dielektrikums

Es wird somit die allgemeine Gegebenheit ersichtlich, dass mit wachsender Oberfläche A der Leiter bzw. mit sinkendem Abstand d (je dünner das Dielektrikum) die elektrische Kapazität steigt.

Das Dielektrikum sperrt den elektrischen Gleichstrom (Nichtleiter), ist jedoch für das elektrische Feld durchlässig. Wird an einer Kapazität eine Spannung angelegt, findet unter Einfluss des dadurch verursachten elektrischen Feldes eine Verschiebung der Ladungsträger statt. Dieser physikalische Effekt wird Influenz genannt. Betrachtet man

$$Q = C \cdot U$$

mit

Q	Ladungsmenge (As)
U	zwischen den Leitern bestehende Spannung (V),

wird ersichtlich, dass die elektrische Kapazität den Proportionalitätsfaktor zwischen der angelegten Spannung U und der dadurch verursachten Ladungsmenge Q bildet.

Bei der kapazitiven Beeinflussung wirken Hochspannungsanlagen durch Kopplung über das elektrische Feld beeinflussend auf fremde Einrichtungen. In der Praxis können kapazitive Kopplungen auch bei der parallelen Annäherung einer Hochspannungsfreileitung an eine metallische Rohrleitung über eine gewisse Strecke relevant werden. Die Kapazität zwischen beeinflussender und beeinflusster Einrichtung steigt mit zunehmender Länge des Parallellaufs (wirksame Oberfläche wird größer) und zunehmender Annäherung. Mit steigender Frequenz f einer sinusförmigen Wechselspannung wird der wirksame kapazitive Blindwiderstand X_C geringer [7].

$$X_C = - \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} = - \frac{1}{\omega \cdot C}$$

mit

X_C	kapazitiver Blindwiderstand (Ω)
C	elektrische Kapazität (F)
f	Frequenz der Spannung (Hz)
ω	Kreisfrequenz (1/s)

Zwischen der beeinflussenden Hochspannungsfreileitung und der beeinflussten Anlage wirkt der Koppelkapazitätsbelag c_K . Zwischen jedem Leiter der Hochspannungsfreileitung und dem Erdreich wirken Kapazitäten, welche an Strangspannung der Hochspannungssysteme liegen.

Zwischen dem beeinflussten System (z.B. polyethylenummüllte im Erdreich verlegte Stahlrohrleitung) und dem Erdreich wirkt der Erdkapazitätsbelag c_F . Parallel dazu kann die influenzierte Spannung \underline{U}_F des beeinflussten Systems gegen Erde abgegriffen werden (bei $\underline{Z}_F = \infty$), bzw. der influenzierte Ladestrom (bei $\underline{Z}_F = 0$) kommt zum Fließen (Abbildung 4.5).

Die unterschiedlichen Kapazitätsbeläge sind abhängig von Abständen, Leiterhöhen, Leiterradien und der dielektrischen Leitfähigkeit des dazwischenliegenden Mediums (z.B. Luft, Polyethylen, Erdreich,...) [7].

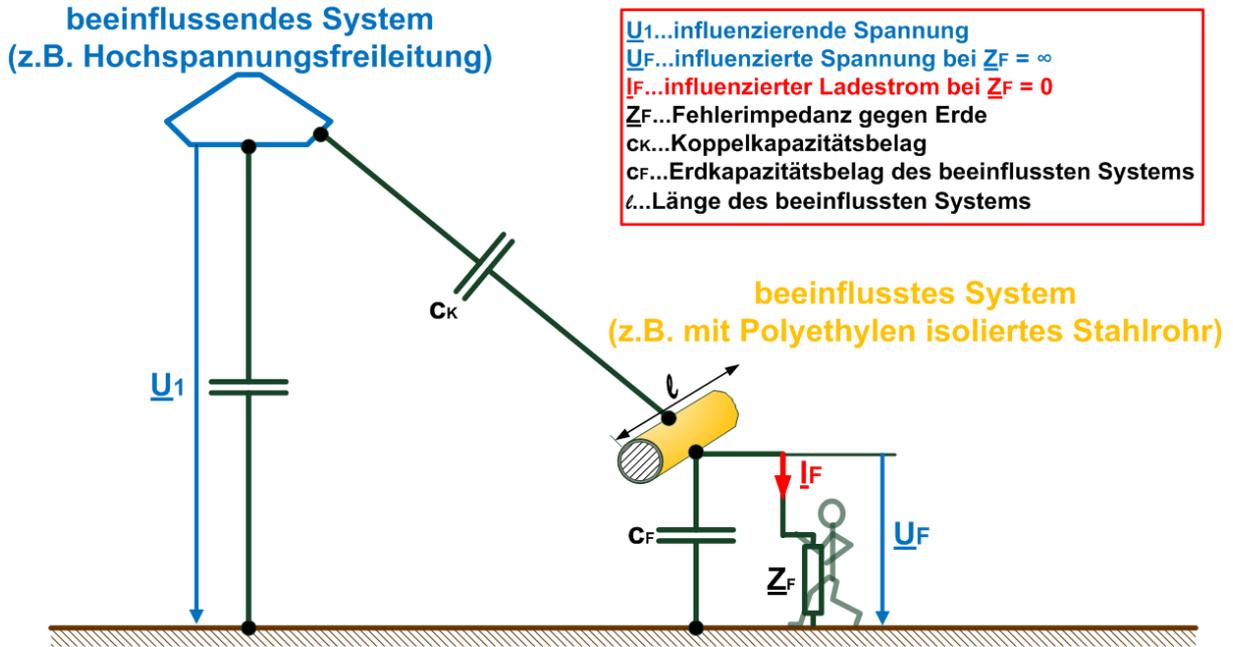


Abbildung 4.5: Einfaches Modell der kapazitiven Beeinflussung (Darstellung aus [7], abgeändert)

Für die influenzierte Spannung gilt:

$$\underline{U}_F = \frac{c_K \cdot d}{c_F \cdot l} \cdot \underline{U}_1 \Big|_{\text{bei } Z_F = \infty}$$

für den influenzierten Ladestrom gilt:

$$\underline{I}_F = j \cdot \omega \cdot c_K \cdot d \cdot \underline{U}_1 \Big|_{\text{bei } Z_F = 0}$$

mit

- \underline{U}_1 influenzierende Spannung (V)
- \underline{U}_F influenzierte Spannung bei $Z_F = \infty$ (V)
- \underline{I}_F influenzierter Strom bei $Z_F = 0$ (A)
- c_K Koppelkapazitätsbelag (F/m)
- c_F Erdkapazitätsbelag (F/m)
- d Näherung (m)
- l Länge des beeinflussten Systems (m)
- Z_F Fehlerimpedanz gegen Erde (Ω)
- ω Kreisfrequenz (1/s)

4.4 Spannungen an der Rohrleitung

Für eine erdfühlig verlegte isolierte Rohrleitung kann als Impedanzmodell hinsichtlich der längswirkenden ohmschen und induktiven Anteile, bzw. hinsichtlich der querwirkenden Leitwerte und Kapazitäten für infinitesimal kleine Leitungslängen das Kettenleitermodell aus Abbildung 4.6 angewendet werden [1].

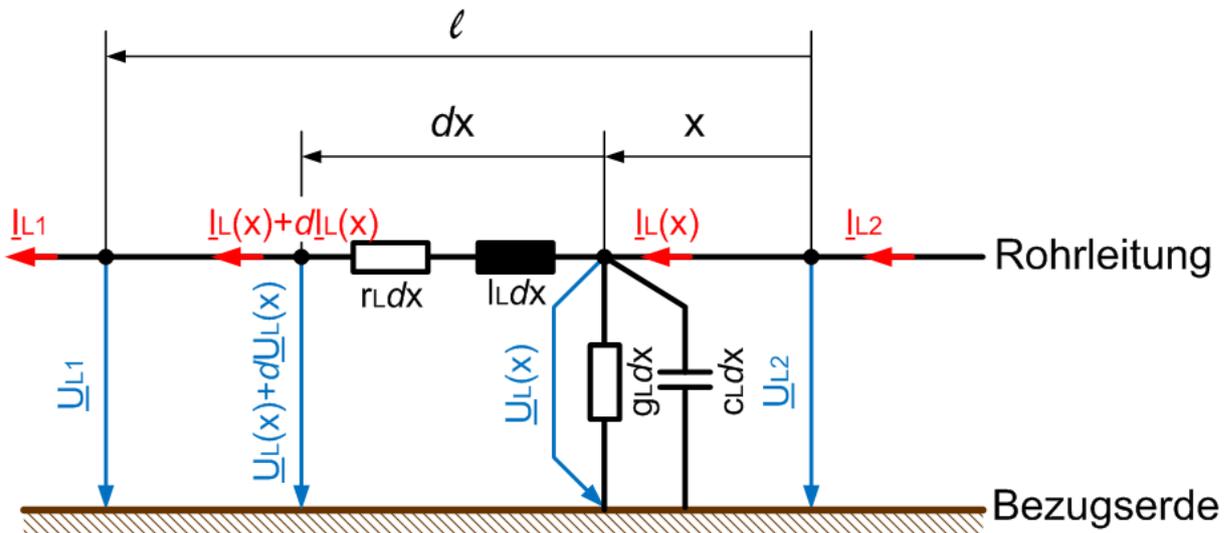


Abbildung 4.6: Ersatzschaltbild eines infinitesimal kleinen Rohrleitungsabschnittes (Darstellung aus [1], abgeändert)

Weiterführend kann angenommen werden, dass es sich bei den wirkenden Spannungs- bzw. Stromgrößen um sinusförmige Größen der Frequenz f bzw. der Kreisfrequenz ω im eingeschwungenen Zustand handelt [1].

Für die Spannung der Rohrleitung gegen das ferne Erdpotenzial an der Stelle x gilt:

$$\underline{U}_L(x) = \underline{I}_L(x) \cdot (r_L + j\omega l_L) dx + (\underline{U}_L(x) + d\underline{U}_L(x)),$$

für den Strom in der Rohrleitung an der Stelle x gilt:

$$\underline{I}_L(x) = \underline{U}_L(x) \cdot (g_L + j\omega c_L) dx + (\underline{I}_L(x) + d\underline{I}_L(x))$$

mit

- \underline{U}_L Spannung der Rohrleitung an der Stelle x gegen ferne Erde (V)
- \underline{I}_L Strom in der Rohrleitung an der Stelle x (A)
- r_L Längswiderstandsbelag (Ω/m)
- l_L Längsinduktivitätsbelag (H/m)
- g_L Längsleitwertsbelag (S/m)
- c_L Längskapazitätsbelag (F/m)
- ω Kreisfrequenz (1/s)

Zur Modellierung einer realen Rohrleitung muss nun Beachtung finden, in welchen Längenabschnitten eine homogene Impedanzverteilung entlang der Rohrleitung angenommen werden kann bzw. die Beeinflussungen auf diese kurzen Rohrleitungsabschnitte homogen verteilt sind. Mit dieser endlichen Länge multiplizierte Längsimbedanz- und Queradmittanzbeläge ergeben fixe Werte für Längswiderstand, Längsinduktivität, Längsleitwert und Längskapazität. Dem Rohrleitungsmodell der Länge l werden nun die in Querrichtung wirkende Kapazität und der in Querrichtung wirkende Widerstand jeweils zur Hälfte am Anfang und am Ende zugeteilt. Der Längswiderstand und

die Längsinduktivität werden in der Mitte dieser Π -Ersatzschaltung (Abbildung 4.7) positioniert [1].

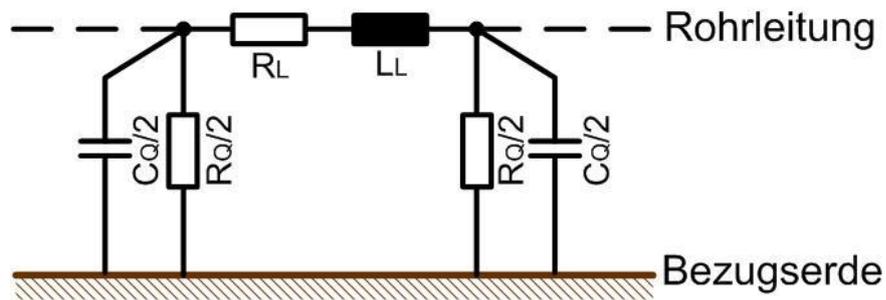


Abbildung 4.7: Homogenes Kettenleiterelement für kurze Abschnitte einer Rohrleitung (Darstellung aus [1], abgeändert)

Verschiedene Rohrleitungsabschnitte mit variierender Impedanzverteilung (verschiedene Isolierungen, variable Rohrleitungsdurchmesser, etc.) bzw. Rohrleitungsabschnitte mit unterschiedlicher Annäherung an die beeinflussende Hochspannungsfreileitung oder Bahnstrecke können nun in homogene Glieder aufgeteilt und zu einer Kettenleiterersatzschaltung zusammengefügt werden.

Induzierte Längsfeldstärken werden hier als Spannungsquellen in Längsrichtung der Kettenleiterelemente berücksichtigt, die ohmschen Beeinflussungen werden als Stromquellen in den Querelementen positioniert. Aus dem Kettenleitermodell resultiert eine Knotenpunktadmittanzmatrix, über welche die Beeinflussungsspannung entlang der Rohrleitung berechnet werden kann. Solche Kettenleitermodelle können in computergestützten Simulationen angewendet werden [1], [17], [18], [19], [20], [21].

In Abbildung 4.8 ist ein über die gesamte Länge homogen beeinflusstes Kettenleitermodell mit homogenem Impedanzbelag und dem resultierenden Spannungsverlauf über die Länge der nicht geerdeten Rohrleitung dargestellt [19], [20].

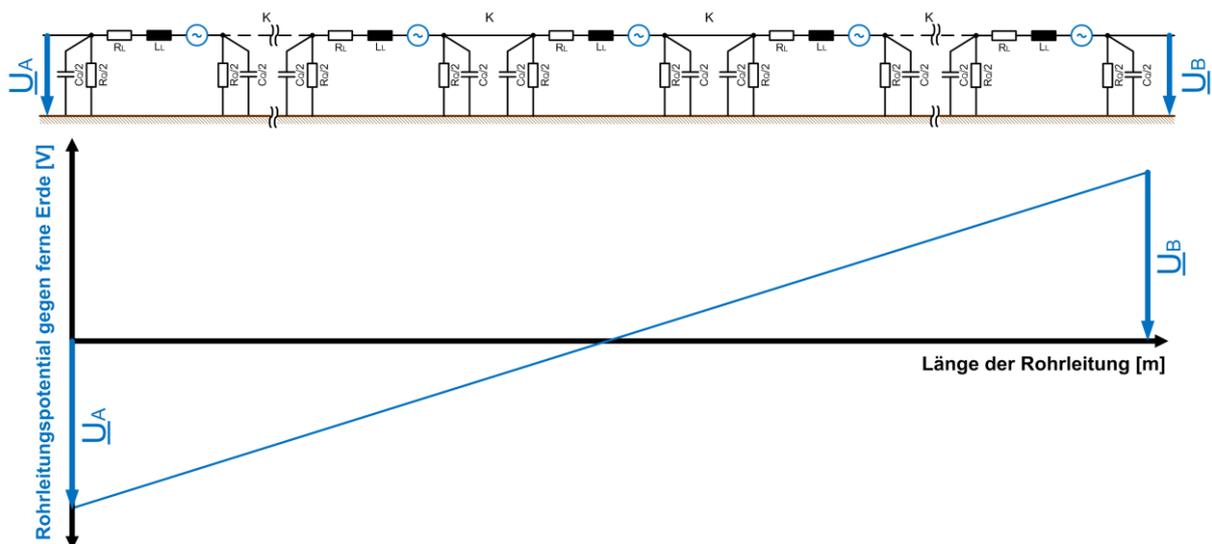


Abbildung 4.8: Homogen über die gesamte Länge beeinflusste Rohrleitung, Kettenleitermodell und verursachter Spannungsverlauf entlang der Rohrleitung

Etwaige Erdungsanlagen zur Reduzierung des Rohrleitungspotentials werden in den Kettenleitermodellen mit ihrem Ausbreitungswiderstand R_A als ohmsches Querelement an der entsprechenden Längenposition berücksichtigt.

In Abbildung 4.9 wird das Kettenleitermodell und der resultierende Spannungsverlauf einer Rohrleitung, welche nur in einem kurzen Stück in der Mitte einer induktiven Beeinflussung ausgesetzt ist, dargestellt [19], [20].

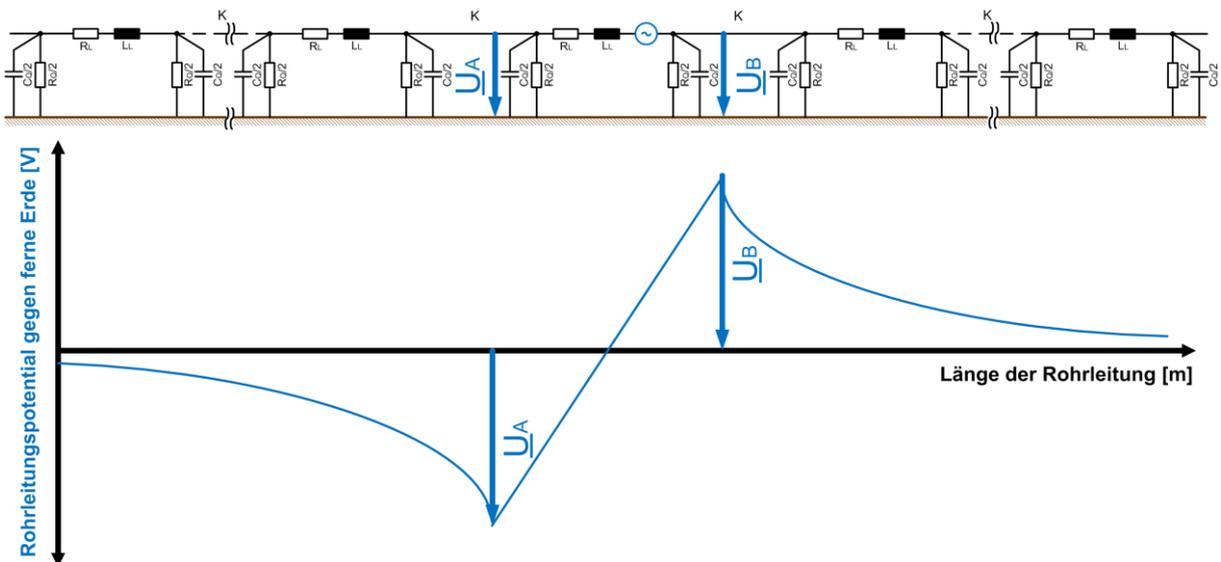


Abbildung 4.9: In einem Kettenleitermodell beeinflusste Rohrleitung, Kettenleitermodell und verursachter Spannungsverlauf entlang der Rohrleitung

Um den Personenschutz zu gewährleisten und um die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Wechselstromkorrosion zu minimieren sind in einschlägigen Bestimmungen und Vorschriften für die Elektrotechnik [10], [11], [13], [22], [23] unter anderem Grenzwerte für das Rohrleitungspotential (Tabelle 4.1) festgelegt. In Österreich kann hinsichtlich des Personenschutzes speziell für Rohrleitungsbeeinflussungen die „Technische Empfehlung Nr.30“ TE 30 Ausgabe April 1987 [12], herausgegeben vom Technischen Komitee für Beeinflussungsfragen des VEÖ, als Stand der Technik angesehen werden.

Die Grenzwerte des Rohrleitungspotentials zur Reduzierung der Korrosionswahrscheinlichkeit an erdverlegten Rohrleitungen sind in der Vornorm ÖNORM CEN/TS 15280 festgelegt [24].

Die Wahrscheinlichkeit für Wechselstromkorrosion hängt mit hohen Wechselstromdichten an Isolationsfehlern in der Umhüllung von Rohrleitungen zusammen. Die Ein- und Ausschaltpotentialwerte des kathodischen Korrosionsschutzes und der pH-Wert des Erdreiches wirken sich ebenfalls auf die Wechselstromkorrosion aus [24], [25]. Die „treibenden Kräfte“ für die Wechselstromkorrosion sind die Wechselspannungen und elektrischen Feldstärken entlang der Rohrleitung. Daher kann unter anderem durch die Verringerung dieser in die Rohrleitung eingekoppelten Wechselspannungen die Korrosionswahrscheinlichkeit in Folge von Wechselstrom reduziert werden.

Wortwörtlich aus [20]:

Hinsichtlich der **Dauer der Einwirkung der Beeinflussung** ist zwischen Langzeit- und Kurzzeitbeeinflussung zu unterscheiden:

- Die **Langzeitbeeinflussung** ist eine dauernd auftretende Beeinflussung, z.B. durch den Normalbetrieb einer Hochspannungsleitung oder eine häufig auftretende von Ort und Zeit der Einwirkung in der Stärke abhängige veränderliche Beeinflussung, z.B. durch induzierende Ströme in Bahnfahrleitungen im Normalbetrieb.
- Unter **Kurzzeitbeeinflussung** versteht man seltene Einwirkungen im Fehlerfall, z.B. bei (Erd-)Kurzschlüssen, die in der Regel rasch selbsttätig abgeschaltet werden. Im Sinne der ÖVE-B1 liegt eine Langzeitbeeinflussung dann vor, wenn die Einwirkdauer größer als 0,5 Sekunden ist; bei Kurzzeitbeeinflussung soll die Einwirkdauer unter 0,5 Sekunden, möglichst aber unter 0,2 Sekunden liegen.

(vergleiche dazu auch ÖVE EN 50122-1: 1997, Abschnitt 7.2, 50122-2:1998, 50122-2/11: 2003 – Änderung [13])

Regelwerk	Grenzwerte für das Rohrleitungspotential	Art der Beeinflussung	Maßnahmen zum Schutz gegen unzulässige Berührungsspannungen
Technische Empfehlung TE 30 Massnahmen bei Errichtung und Betrieb von Rohrleitungen und Starkstromanlagen mit Nennspannungen über 1kV zur Vermeidung unzulässiger Beeinflussung [12]	$U_R \leq 65 \text{ V}$	Langzeit	keine
	$U_R > 65 \text{ V}$	Langzeit	Anschluss von Erdern nach Punkt 4.1.1 TE 30 zur Herabsetzung des Rohrleitungspotentials auf weniger als 65 V oder Potentialsteuerung nach Punkt 4.1.2 TE 30 zur Verminderung der Berührungsspannung auf weniger als 65 V.
	$U_R \leq 500 \text{ V}$	Kurzzeit	keine
	$U_R > 500 \text{ V}$ bzw. $U_R \leq 2000 \text{ V}$ bei bitumenummüllten Rohrleitungen ergibt sich eine natürliche Begrenzung des Rohrleitungspotentials auf etwa 1500V. Daher kann bei Kurzzeitbeeinflussung auf den Anschluss von Erdern verzichtet werden.	Kurzzeit	Maßnahmen nach Punkt 4.1.3, 4.2, 4.3, 5.2 und 5.3 TE 30 oder Anschluss von Erdern nach Punkt 4.1.1 TE 30 zur Herabsetzung des Rohrleitungspotentials auf weniger als 500 V oder Potentialsteuerung bzw. Standortisolierung nach Punkt 4.1.2 TE 30 zur Verminderung der Berührungsspannung auf weniger als 500 V.
	$U_R > 2000 \text{ V}$ bei bitumenummüllten Rohrleitungen ergibt sich eine natürliche Begrenzung des Rohrleitungspotentials auf etwa 1500V. Daher kann bei Kurzzeitbeeinflussung auf den Anschluss von Erdern verzichtet werden.	Kurzzeit	Anschluss von Erdern nach Punkt 4.1.1 TE 30 zur Herabsetzung des Rohrleitungspotentials auf weniger als 2000 V und Maßnahmen nach Punkt 4.1.3, 4.2, 4.3, 5.2 und 5.3 TE 30 oder Anschluss von Erdern nach Punkt 4.1.1 TE 30 zur Herabsetzung des Rohrleitungspotentials auf weniger als 500 V.
ÖNORM CEN/TS 15280 Beurteilung der Korrosionswahrscheinlichkeit durch Wechselstrom an erdverlegten Rohrleitungen - Anwendung für kathodisch geschützte Rohrleitungen [24]	10 V, wo der örtliche Bodenwiderstand entlang der Rohrleitung größer als 25 Ω ist.		Verringerungsmaßnahmen können entweder an der beeinflussenden oder an der beeinflussten Anlage getroffen werden. Die Art der Maßnahmen hängt von den örtlichen Bedingungen und den technischen/ökonomischen Betrachtungen ab.
	4 V, wo der örtliche Bodenwiderstand entlang der Rohrleitung kleiner als 25 Ω ist.		

Tabelle 4.1: Grenzwerte für das Rohrleitungspotential bei 16.7 Hz und 50 Hz sowie Schutzmaßnahmen gegen unzulässige Berührungsspannungen gemäß TE 30 [12] und ÖNORM CEN/TS 15280 [24]

5 Rechnerische Ermittlung der elektrischen Kenngößen einer erdverlegten Rohrleitung

5.1 Erläuterung

Im Folgenden werden die Formeln von Carson [2] und Pollaczek [3], [4] bzw. von M. Michailow und Z. Rasumov [5] zur theoretischen Ermittlung der komplexen Impedanzparameter von erdfühlig verlegten isolierten Stahlrohren erläutert, und die konkreten Werte der in dieser Diplomarbeit später messtechnisch erfassten Gashochdruckleitung (Abbildung 5.1) berechnet, welche von einer Bahnstrecke mit der Frequenz von 16,7 Hz beeinflusst wird.

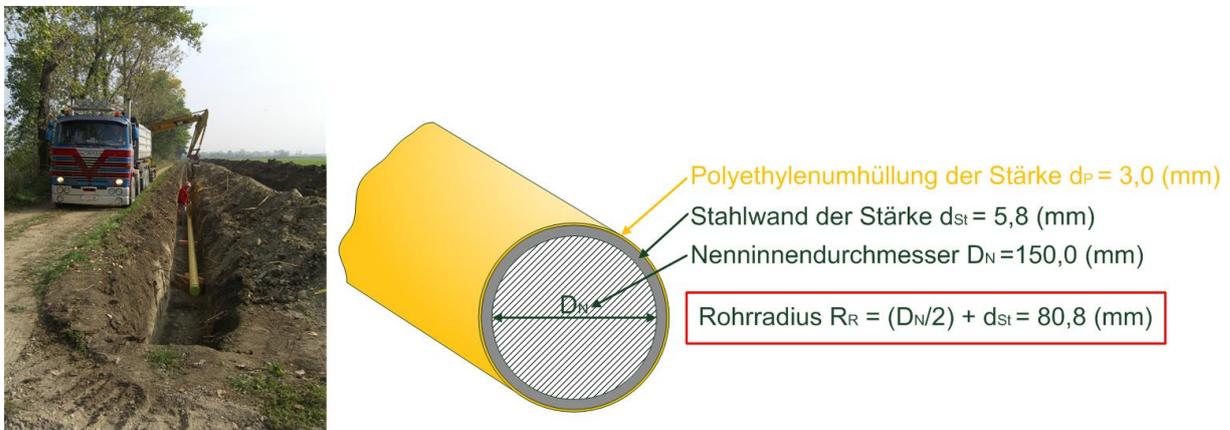


Abbildung 5.1: Aufbau und Maße der Gashochdruckleitung

Bedeutung der in den folgenden Gleichungen verwendeten Abkürzungen:

R_R	Rohrradius der Rohrleitung $R_R = 80,8$ (mm)
d_{St}	Stärke der Stahlwand der Rohrleitung $d_{St} = 5,8$ (mm)
d_P	Stärke der Polyethylenumhüllung der Rohrleitung $d_P = 3,0$ (mm)
D_N	Nenninnendurchmesser der Rohrleitung $D_N = 150,0$ (mm)
l	Länge des messtechnisch betrachteten Gasleitungsabschnitts $l = 7,09$ (km)
f	Frequenz der beeinflussenden Bahnstrecke $f = 16,7$ (Hz)
ω	Kreisfrequenz $\omega = 2\pi f = 104,93$ (1/s)
μ_0	Vakuumpermeabilität $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} = 12,5664 \cdot 10^{-7}$ (Vs/Am)
μ_r	relative Permeabilitätszahl der Stahlwand, ferromagnetisch $\mu_r \approx 500$
ϵ_0	Dielektrizitätskonstante $\epsilon_0 = 8,85419 \cdot 10^{-12}$ (As/Vm)
ϵ_r	relative Dielektrizitätszahl der Polyethylenumhüllung bei obiger Frequenz $\epsilon_r \approx 5$
ρ	spezifischer Bodenwiderstand $\rho = 100$ (Ωm)
ρ_{St}	spezifischer Widerstand der Stahlwand $\rho_{St} \approx 0,16$ ($\Omega\text{mm}^2/\text{m}$)
ρ_{Cu}	spezifischer Widerstand von Kupfer $\rho_{Cu} \approx 1,678 \cdot 10^{-2}$ ($\Omega\text{mm}^2/\text{m}$)
r_U	auf die Fläche bezogener Umhüllungswiderstand der Rohrleitung mit Polyethylenumhüllung, Erfahrungswert $r_U = 100000$ (Ωm^2)
e	Eulersche Zahl $e = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n = 2,718$
γ	Besselsche Konstante $\gamma = 1,781$
c	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum $c = 299792,458$ (km/s)

Rechnerisch zu ermittelnde Größen:

\underline{z}_L	Längsimpedanzbelag der Rohrleitung pro Kilometer (Ω/km)
\underline{Z}_L	Längsimpedanz der Rohrleitung (Ω)
r'_{Lo}	ohmscher Längswiderstandsbelag eines zylinderförmigen Volleiters ohne Skineneffekt pro Kilometer (Ω/km)
δ_{St}	Eindringtiefe in den Stahl bei Skineneffekt (mm)
r_{Lo}	ohmscher Längswiderstandsbelag eines zylinderförmigen Volleiters mit Skineneffekt pro Kilometer, entspricht Längswiderstandsbelag der Rohrleitung (Ω/km)
r_e	Erdwiderstand pro Kilometer (Ω/km)
R_e	Erdwiderstand (Ω)
R_L	ohmscher Längswiderstand der Rohrleitung (Ω)
R_K	ohmscher Widerstand des Kupferleiters (Ω)
x'_{iLo}	innerer Längsreaktanzbelag eines zylinderförmigen Volleiters ohne Skineneffekt pro Kilometer ($j\Omega/\text{km}$)
x_{iLo}	innerer Längsreaktanzbelag eines zylinderförmigen Volleiters mit Skineneffekt pro Kilometer, entspricht innerem Längsreaktanzbelag der Rohrleitung ($j\Omega/\text{km}$)
δ_e	Eindringtiefe einer elektromagnetischen Welle in das Erdreich (m)
D_e	Tiefe des äquivalenten Erdrückleiters (m)
x_L	Selbstreaktanzbelag der Schleife, welche die Rohrleitung mit Erdrückleitung bildet pro Kilometer ($j\Omega/\text{km}$)
X_L	Längsreaktanz der Rohrleitung ($j\Omega$)
L_L	Längsinduktivität der Rohrleitung (mH)
x_{LK}	Selbstreaktanzbelag der Schleife, welche die Rohrleitung mit Rückleitung über den Kompensationsleiter bildet pro Kilometer ($j\Omega/\text{km}$)
X_{LK}	Längsreaktanz der Rohrleitung bei Rückleitung über den Kompensationsleiter ($j\Omega$)
L_{LK}	Längsinduktivität der Rohrleitung bei Rückleitung über den Kompensationsleiter (mH)
\underline{y}_L	Queradmittanzbelag der Rohrleitung pro Kilometer (S/km)
\underline{Y}_L	Queradmittanz der Rohrleitung (S)
g_L	ohmscher Querableitungsbelag der Rohrleitung pro Kilometer (S/km)
G_L	ohmsche Querableitung (Konduktanz) der Rohrleitung (S)
b_L	kapazitiver Querableitungsbelag der Rohrleitung pro Kilometer (jS/km)
c_L	Erdkapazitätsbelag der Rohrleitung pro Kilometer ($\mu\text{F}/\text{km}$)
B_L	kapazitive Querableitung (Suszeptanz) der Rohrleitung (jS)
C_L	Erdkapazität der Rohrleitung (μF)
\underline{z}_{Ges}	Gesamtimpedanzbelag der Rohrleitung pro Kilometer (Ω/km)
\underline{Z}_{Ges}	Gesamtimpedanz der Rohrleitung (Ω)
\underline{Z}_W	Wellenwiderstand der Rohrleitung (Ω)
\underline{y}	Übertragungskonstante (1/km)
\underline{L}	Längenkonstante der Rohrleitung (km)
λ'	Wellenlänge elektromagnetischer Wellen im Medium (km)

5.2 Längsimpedanz der Rohrleitung

Für den ohmschen Längswiderstandsbelag eines zylinderförmigen Volleiters ohne Skineneffekt pro Kilometer r'_{Lo} gilt:

$$r'_{Lo} = \frac{\rho_{St}}{\pi \cdot R_R^2} \cdot 10^3 \left(\frac{\Omega}{\text{km}} \right) = \mathbf{0,0078} \left(\frac{\Omega}{\text{km}} \right),$$

für die Eindringtiefe in den Stahl bei Skineneffekt δ_{St} gilt:

$$\delta_{St} = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho_{St}}{\omega \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}} \text{ (mm)} = \mathbf{2,2031 \text{ (mm)}},$$

für den ohmschen Längswiderstandsbelag eines zylinderförmigen Volleiters mit Skineneffekt bzw. der Rohrleitung pro Kilometer r_{Lo} gilt:

$$r_{Lo} = r'_{Lo} \cdot \left(\frac{R_R}{2 \cdot \delta_{St}} + \frac{1}{4} \right) \left(\frac{\Omega}{km} \right) = \mathbf{0,1450 \left(\frac{\Omega}{km} \right)},$$

für den Erdwiderstand pro Kilometer r_e gilt:

$$r_e = \frac{\omega \cdot \mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 10^3 \left(\frac{\Omega}{km} \right) = \mathbf{0,0165 \left(\frac{\Omega}{km} \right)},$$

für den Erdwiderstand R_e gilt über die Länge l :

$$R_e = r_e \cdot l(\Omega) = \mathbf{0,1170 (\Omega)},$$

für den ohmschen Längswiderstand der Rohrleitung R_L gilt über die Länge l :

$$R_L = r_{Lo} \cdot l = \mathbf{1,0281 (\Omega)},$$

für den inneren Längsreaktanzbelag eines zylinderförmigen Volleiters ohne Skineneffekt pro Kilometer x'_{iLo} gilt:

$$x'_{iLo} = \frac{\omega \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}{8 \cdot \pi} \cdot 10^3 \left(j \frac{\Omega}{km} \right) = \mathbf{2,6233 \left(j \frac{\Omega}{km} \right)},$$

für den inneren Längsreaktanzbelag eines zylinderförmigen Volleiters mit Skineneffekt bzw. der Rohrleitung pro Kilometer x_{iLo} gilt:

$$x_{iLo} = x'_{iLo} \cdot \frac{2 \cdot \delta_{St}}{R_R} \left(j \frac{\Omega}{km} \right) = r'_{Lo} \cdot \frac{R_R}{2 \cdot \delta_{St}} \left(j \frac{\Omega}{km} \right) = \frac{\rho_{St}}{2 \cdot \pi \cdot R_R \cdot \delta_{St}} \cdot 10^3 \left(j \frac{\Omega}{km} \right) = \mathbf{0,1431 \left(j \frac{\Omega}{km} \right)},$$

für die Eindringtiefe einer elektromagnetischen Welle in das Erdreich δ_e gilt:

$$\delta_e = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho}{\omega \cdot \mu_0}} \text{ (m)} = \mathbf{1231,5718 \text{ (m)}},$$

für die Tiefe des äquivalenten Erdrückleiters D_e gilt:

$$D_e = \frac{\sqrt{2 \cdot e}}{\gamma} \cdot \delta_e \text{ (m)} = 658,8 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{f}} \text{ (m)} = \mathbf{1612,1125 \text{ (m)}},$$

für den Selbstreaktanzbelag der Schleife, welche die Rohrleitung mit Erdrückleitung bildet pro Kilometer x_L gilt:

$$x_L = \frac{\omega \cdot \mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{D_e}{R_R} \right) \cdot 10^3 \left(j \frac{\Omega}{km} \right) = \mathbf{0,2078 \left(j \frac{\Omega}{km} \right)},$$

für die Längsreaktanz der Rohrleitung X_L über die Länge l gilt:

$$X_L = (x_{iLo} + x_L) \cdot l \text{ (j}\Omega) = \mathbf{2,4879 \text{ (j}\Omega)},$$

für die Längsinduktivität der Rohrleitung L_L über die Länge l gilt:

$$L_L = \frac{X_L}{j\omega} (mH) = \frac{X_L}{j2 \cdot \pi \cdot f} (mH) = \mathbf{23,7 (mH)}$$

für den Längsimpedanzbelag der Rohrleitung \underline{z}_L pro Kilometer gilt:

$$\underline{z}_L = (r_e + r_{Lo}) + j(x_{iLo} + x_L) \left(\frac{\Omega}{km} \right) = \mathbf{0,1615 + j0,3509 \left(\frac{\Omega}{km} \right)},$$

für die Längsimpedanz der Rohrleitung \underline{Z}_L über die Länge l gilt:

$$\underline{Z}_L = \underline{z}_L \cdot l (\Omega) = \mathbf{1,1450 + j2,4879 (\Omega)}$$

Unter der Annahme, dass die Rückleitung des Stroms nicht im Erdreich, sondern vollständig im parallel zur Rohrleitung im Abstand von 0,3 m verlegten metallischen Kompensationsleiters erfolgt, würde anstelle der Tiefe des äquivalenten Erdrückleiters für D_e gelten:

$$D_e = \mathbf{0,3 (m)},$$

für den Selbstreaktanzbelag der Schleife, welche die Rohrleitung mit Rückleitung über den Kompensationsleiter bildet pro Kilometer x_{LK} gilt:

$$x_{LK} = \frac{\omega \cdot \mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{D_e}{R_R} \right) \cdot 10^3 \left(j \frac{\Omega}{km} \right) = \mathbf{0,0275 \left(j \frac{\Omega}{km} \right)},$$

für die entsprechende Längsreaktanz der Rohrleitung X_{LK} mit Rückleitung über den Kompensationsleiter über die Länge l gilt:

$$X_{LK} = (x_{iLo} + x_{LK}) \cdot l (j\Omega) = \mathbf{1,2096 (j\Omega)},$$

für die entsprechende Längsinduktivität der Rohrleitung L_{LK} mit Rückleitung über den Kompensationsleiter über die Länge l gilt:

$$L_{LK} = \frac{X_{LK}}{j\omega} (mH) = \frac{X_{LK}}{j2 \cdot \pi \cdot f} (mH) = \mathbf{11,5 (mH)}$$

5.3 Queradmittanz der Rohrleitung

Für den ohmschen Querableitungsbelag der Rohrleitung pro Kilometer g_L gilt:

$$g_L = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_R}{r_U} \cdot 10^3 \left(\frac{S}{km} \right) = \mathbf{0,0051 \left(\frac{S}{km} \right)},$$

für die ohmsche Querableitung (Konduktanz) der Rohrleitung G_L gilt über die Länge l :

$$G_L = g_L \cdot l (S) = \mathbf{0,0362(S)},$$

für den kapazitiven Querableitungsbelag der Rohrleitung pro Kilometer b_L gilt:

$$b_L = \omega \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r}{\ln \left(\frac{R_R + d_P}{R_R} \right)} \cdot 10^3 \left(j \frac{S}{km} \right) = \mathbf{0,000801 \left(j \frac{S}{km} \right)},$$

für den Erdkapazitätsbelag der Rohrleitung pro Kilometer c_L gilt:

$$c_L = \frac{b_L}{j\omega} \left(\frac{\mu F}{km} \right) = \frac{b_L}{j2 \cdot \pi \cdot f} \left(\frac{\mu F}{km} \right) = \mathbf{7,6301 \left(\frac{\mu F}{km} \right)},$$

für die kapazitive Querableitung (Suszeptanz) der Rohrleitung B_L gilt über die Länge l :

$$B_L = b_L \cdot l \text{ (jS)} = \mathbf{0,0057 \text{ (jS)}},$$

für die Erdkapazität der Rohrleitung C_L gilt über die Länge l :

$$C_L = \frac{B_L}{j\omega} \text{ (\mu F)} = \frac{B_L}{j2 \cdot \pi \cdot f} \text{ (\mu F)} = \mathbf{54,0974 \text{ (\mu F)}},$$

für den Queradmittanzbelag der Rohrleitung \underline{y}_L pro Kilometer gilt:

$$\underline{y}_L = g_L + jb_L \left(\frac{\text{S}}{\text{km}} \right) = \mathbf{0,0051 + j0,000801 \left(\frac{\text{S}}{\text{km}} \right)},$$

für die Queradmittanz der Rohrleitung \underline{Y}_L über die Länge l gilt:

$$\underline{Y}_L = \underline{y}_L \cdot l \text{ (S)} = \mathbf{0,0362 + j0,0057 \text{ (S)}}$$

5.4 Gesamtimpedanz, Wellenwiderstand und Längenkonstanten der Rohrleitung

Für die Gesamtimpedanz der Rohrleitung \underline{Z}_{Ges} über die Länge l aus Sicht des Leitungsanfangs (Abbildung 5.2) gilt:

$$\underline{Z}_{Ges} = \frac{\left(\frac{\underline{Y}_L}{2} \right)^{-1} \cdot \left(\underline{Z}_L + \left(\frac{\underline{Y}_L}{2} \right)^{-1} \right)}{\left(\frac{\underline{Y}_L}{2} \right)^{-1} + \left(\underline{Z}_L + \left(\frac{\underline{Y}_L}{2} \right)^{-1} \right)} \text{ (\Omega)} = \mathbf{27,7339 - j3,6339 \text{ (\Omega)}} \quad |\underline{Z}_{Ges}| = \mathbf{27,4961 \text{ (\Omega)}}$$

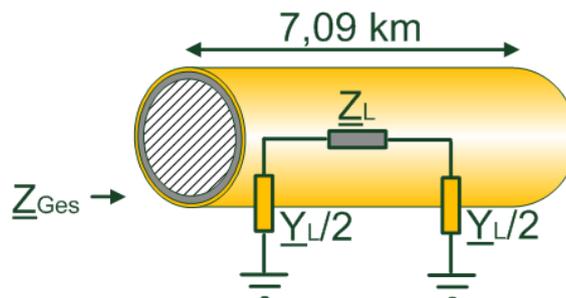


Abbildung 5.2: Gesamtimpedanz der Rohrleitung

Für den längenunabhängigen Wellenwiderstand der Rohrleitung \underline{Z}_W bei einer Frequenz von 16,7 Hz gilt:

$$\underline{Z}_W = \sqrt{\frac{(r_e + r_{Lo}) + (x_{iLo} + x_L)}{g_L + b_L}} \text{ (\Omega)} = \mathbf{7,6248 + j4,0850 \text{ (\Omega)}} \quad |\underline{Z}_W| = \mathbf{8,6501 \text{ (\Omega)}},$$

für die Übertragungskonstante der Rohrleitung $\underline{\gamma}$ bei einer Frequenz von 16,7 Hz gilt:

$$\underline{\gamma} = \sqrt{((r_e + r_{Lo}) + (x_{iLo} + x_L)) \cdot (g_L + b_L)} \left(\frac{1}{\text{km}} \right) = \mathbf{0,0356 + j0,0269 \left(\frac{1}{\text{km}} \right)},$$

für die Längenkonstante L , welche ein Maß für das Abklingen der Rohrspannung in einem nicht beeinflussten Teil der Rohrleitung darstellt [1], gilt bei einer Frequenz von 16,7 Hz:

$$L = \frac{1}{\operatorname{Re}(Y)} (\text{km}) = \mathbf{28.0899} (\text{km}),$$

für die Wellenlänge λ' im Medium bei einer Frequenz von 16,7 Hz gilt:

$$\lambda' = \frac{c}{f} \cdot \frac{1}{\sqrt{\mu_r \cdot \epsilon_r}} (\text{km}) = \mathbf{359,0329} (\text{km}).$$

Werden dem Modell am Anfang und Ende des betrachteten Rohrleitungsabschnitts Erdungsanlagen mit einem Ausbreitungswiderstand R_A von $0,4 \Omega$ beigefügt, so ändert sich die Gesamtimpedanz der Rohrleitung Z_{Ges} über die Länge l aus Sicht des Leitungsanfangs (Abbildung 5.3) zu:

$$Z_{Ges} = \frac{1}{\frac{1}{R_A} + \frac{Y_L}{2} + \frac{1}{Z_L + \frac{\left(\frac{Y_L}{2}\right)^{-1} \cdot R_A}{\left(\frac{Y_L}{2}\right)^{-1} + R_A}} (\Omega) = \mathbf{0,3665 + j0,0391} (\Omega) \quad |Z_{Ges}| = \mathbf{0,3685} (\Omega)$$

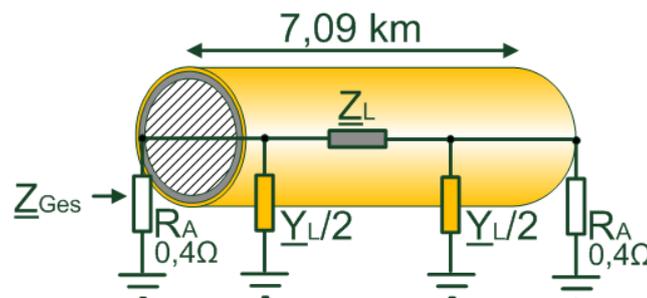


Abbildung 5.3: Gesamtimpedanz der geerdeten Rohrleitung

Bei dem parallel zur Rohrleitung verlegten metallischen Kompensationsleiter in Form eines isolierten Kupferkabels (Typenkurzzeichen: NYY – 01x50 RM SW) mit einem Querschnitt von $A = 50 \text{ mm}^2$ gilt für den ohmschen Widerstand R_K :

$$R_K = \rho_{Cu} \cdot \frac{l}{A} \cdot 10^3 (\Omega) = \mathbf{2,3794} (\Omega)$$

mit

- ρ_{Cu} spezifischer Widerstand von Kupfer $\rho_{Cu} = 1,678 \cdot 10^{-2} (\Omega\text{mm}^2/\text{m})$
- l Länge des messtechnisch betrachteten Rohrleitungsabschnitts $l = 7090 (\text{m})$
- A Querschnitt des Kupferkabels (NYY - 01X50 RM SW) $A = 50 (\text{mm}^2)$

Die Eindringtiefe in das Kupfer bei Skineneffekt überschreitet den Durchmesser des Kupferleiters. Daher wird der Skineneffekt beim Kupferkabel nicht berücksichtigt. Aufgrund der viel geringeren Permeabilität von Kupfer im Vergleich zu Stahl ist auch die innere Längsreaktanz der Stahlrohrleitung um mehrere Zehnerpotenzen höher.

6 Messkonzept

6.1 Topographische Situation

In der folgenden Abbildung 6.1 ist der Verlauf der messtechnisch erfassten Gashochdruckleitung mit Begleitkabel und der zweigleisigen Bahnstrecke dargestellt. Es wird ersichtlich, dass über die gesamte Länge der Gashochdruckleitung eine Parallelführung zur Bahnstrecke gegeben ist, was eine relevante induktive Beeinflussung der Gashochdruckleitung bedeutet. Eine Beeinflussung durch etwaige andere relevante Hochspannungsfreileitungen (110 kV / 220 kV / 380 kV) war im betrachteten Bereich nicht gegeben.

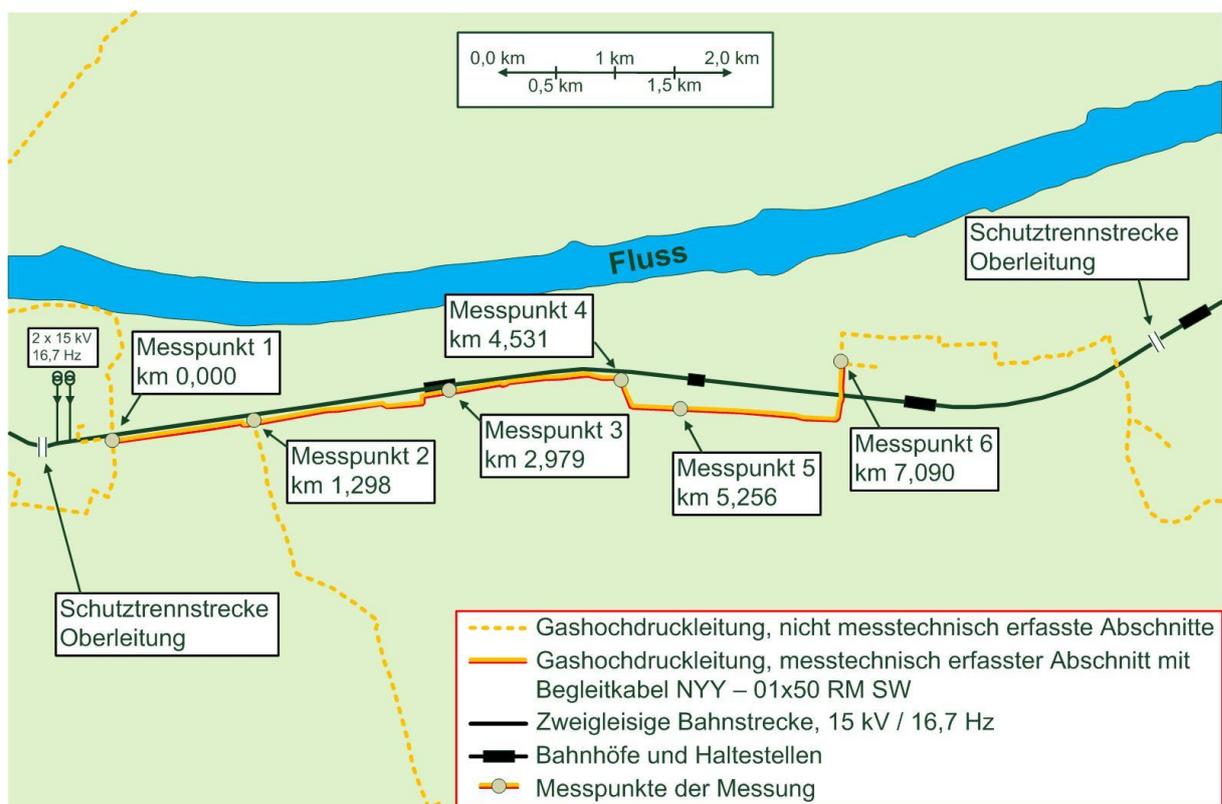


Abbildung 6.1: Übersichtsdarstellung der Gashochdruckleitung mit Parallelführung zu einer Bahnstrecke

Da die Querung kurz vor dem letzten Messpunkt 6 im rechten Winkel erfolgt, kann dieser Leitungsteil als für die induktive Beeinflussung nicht relevant angenommen werden.

Die Verlegung der Gashochdruckleitung erfolgt in einer durchschnittlichen Tiefe von zwei Metern. Das Begleitkabel wurde in einem Mindestabstand von 0,3 Metern zur Rohrleitung in derselben durchschnittlichen Tiefe verlegt.

Die Rohrleitung wurde bei Rohrleitungskilometer 0,00 und bei Rohrleitungskilometer 7,09 (Anfang und Ende des messtechnisch erfassten Abschnitts) durch einen Anlagenerder mit Abstand > 100 Meter zur Bahnstrecke niederohmig geerdet (Abbildung 6.2). Das Begleitkabel wurde im Normalbetrieb der Gashochdruckleitung mit denselben Anlagenerdern

leitend verbunden. Die messtechnische Erfassung des Ausbreitungswiderstands R_A dieser Erdungsanlagen wird in Kapitel 6.8 erläutert.

Zum Zeitpunkt der Messungen war, aufgrund von Baumaßnahmen des Betreibers der Bahnstrecke, eine für die Messungen sehr günstige Speisesituation der Bahnoberleitungen gegeben. Da die Züge über sogenannte Schutztrennstrecken den beeinflussenden Abschnitt erreichten und wieder verließen, und die zwei Oberleitungen in diesem Abschnitt nur an einem Punkt am Anfang gespeist wurden, war es möglich im betreffenden Unterwerk über Stromwandler die genauen Ströme messtechnisch zu erfassen (Abbildung 6.1). Als ebenfalls günstig erwiesen sich die Bahnhöfe im Abschnitt, da die Züge beim Beschleunigen aus den Bahnhöfen hohe Ströme aufnehmen. Die Aufzeichnung der beeinflussenden Ströme in den Oberleitungen der Bahnstrecke wird in Kapitel 6.4 erläutert.

Die messtechnisch nicht erfassten Abschnitte der Gashochdruckleitung sind durch sogenannte Isolierkupplungen galvanisch voneinander getrennt (Abbildung 6.2). Diese Isolierkupplungen dienen im Betrieb der Rohrleitung dem kathodischen Korrosionsschutz. Beim kathodischen Korrosionsschutz wird die Rohrleitung, als Kathode ausgeführt, im Bezug zu sogenannten Opferanoden auf einem negativen Gleichpotential gehalten. Dieses Potential bewegt sich in der Regel in einer Größenordnung von wenigen Volt, und wird über Gleichrichteranlagen bewerkstelligt. Die Isolierkupplungen dienen daher unter anderem im Sinne des kathodischen Korrosionsschutzes der galvanischen Aufteilung der Rohrleitung in sogenannte Schutzabschnitte. Zum Zeitpunkt der Messungen wurden diese Gleichrichteranlagen von der Rohrleitung getrennt.

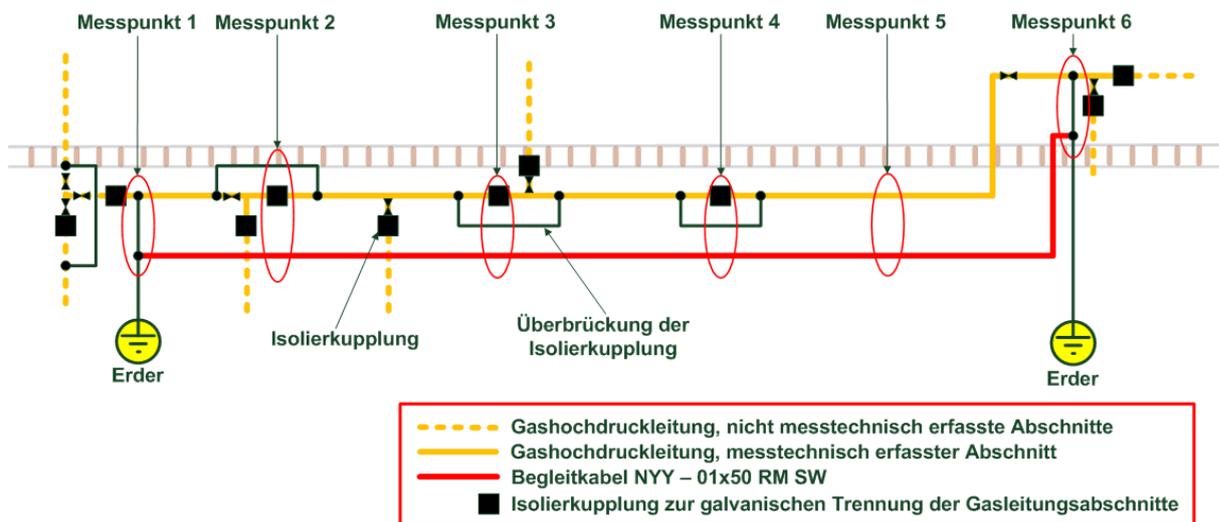


Abbildung 6.2: Pneumatisch-elektrische Situation der messtechnisch erfassten Gashochdruckleitung

Isolierkupplungen, welche sich im messtechnisch erfassten Abschnitt befinden, sind im Normalbetrieb der Rohrleitung mit einem Kupferkabel hohen Querschnitts ($35 \text{ mm}^2 \text{ CU}$) überbrückt. Bei Stichleitungen der Gashochdruckleitung im erfassten Abschnitt, welche die Messung negativ beeinflusst hätten, wurden diese Überbrückungen entfernt (Abbildung 6.2).

Die Messpunkte eins bis sechs wurden an Örtlichkeiten positioniert, an welchen das Rohrleitungspotential bzw. das Begleitkabel in sogenannten Messmarkern (Abbildung 6.3 links) bzw. in Schaltschränken (Abbildung 6.3 mittig) an die Oberfläche geführt wurde. An diesen Positionen war es auch möglich, das Begleitkabel aufzutrennen bzw. die Überbrückung der Isolierkupplungen zu entfernen.



Abbildung 6.3: Messmarker, Schaltschrank und Erdspieß für ferne Erde

In den Brücken der Isolierkupplungen konnten mittels Stromzangen die Ströme durch die Rohrleitung erfasst werden. In den an die Oberfläche geführten Schleifen des Begleitkabels konnten die Ströme durch das Begleitkabel erfasst werden. Ebenfalls konnte jeweils die Spannung der Rohrleitung bzw. des Begleitkabels gegen ferne Erde erfasst werden.

Hierzu musste ein sogenannter Erdspieß (Abbildung 6.3 rechts) richtig positioniert werden. Zur Positionierung des Erdspießes musste Berücksichtigung finden, diesen in großer Entfernung zu etwaigen metallischen, erdfühlig verlegten Anlagen (Bandeisen, Metallrohre, etc.) bzw. in großer Entfernung zu den Bahngleisen (Außerhalb des Spannungstrichters) zu positionieren, um das Potential der fernen Erde zu erfassen. Die genaue messtechnische Erfassung der Ströme und Spannungen an den Messstellen wird in Kapitel 6.5 bzw. in Kapitel 6.6 erläutert.

6.2 Definition der Schaltzustände der Rohrleitung

Zur Messung an der Gashochdruckleitung wurde in einem ersten Schritt ein Grundzustand, wie in Kapitel 6.1 beschrieben, hergestellt (Abbildung 6.4). Es wurden entlang der Rohrleitung an den jeweiligen Messstellen die Datalogger (siehe Kapitel 6.5) positioniert und bei Rohrleitungskilometer 0,000 bzw. zu einem späteren Zeitpunkt bei Rohrleitungskilometer 2,979 die hochauflösende Messaufzeichnung (siehe Kapitel 6.6) installiert.

Ebenfalls wurden die notwendigen Überbrückungen der Isolierkupplungen entfernt und somit die galvanische Trennung zu Leitungsabschnitten außerhalb der betrachteten Gashochdruckleitung sichergestellt (Abbildung 6.2).

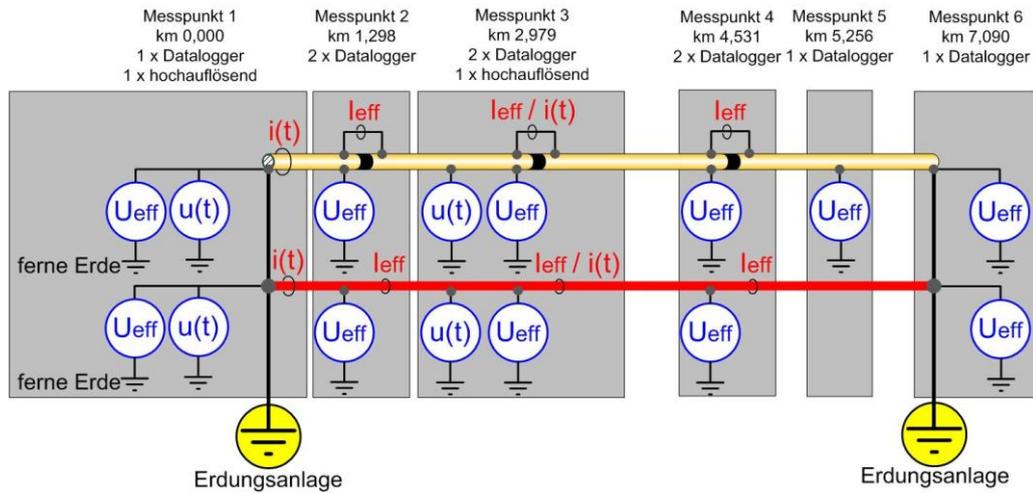


Abbildung 6.4: Elektrischer Grundzustand, hergestellt zur Messung an der Gashochdruckleitung

Die Aufzeichnungen mittels Datalogger bzw. die hochauflösende Aufzeichnung erfolgten über die gesamte Dauer der Messung. An den jeweiligen Messpunkten wurden die Werte, wie in Abbildung 6.4 dargestellt, erfasst.

Nun war Teil der Aufgabenstellung dieser Diplomarbeit, die genauen elektrischen Auswirkungen des Begleitkabels auf die relevanten elektrischen Parameter der Rohrleitung zu untersuchen. Zu diesem Zweck wurden hinsichtlich der Verschaltung von Begleitkabel, Rohrleitung und Erdungsanlagen im Laufe der Messung unterschiedliche Schaltzustände (Abbildung 6.5) hergestellt.

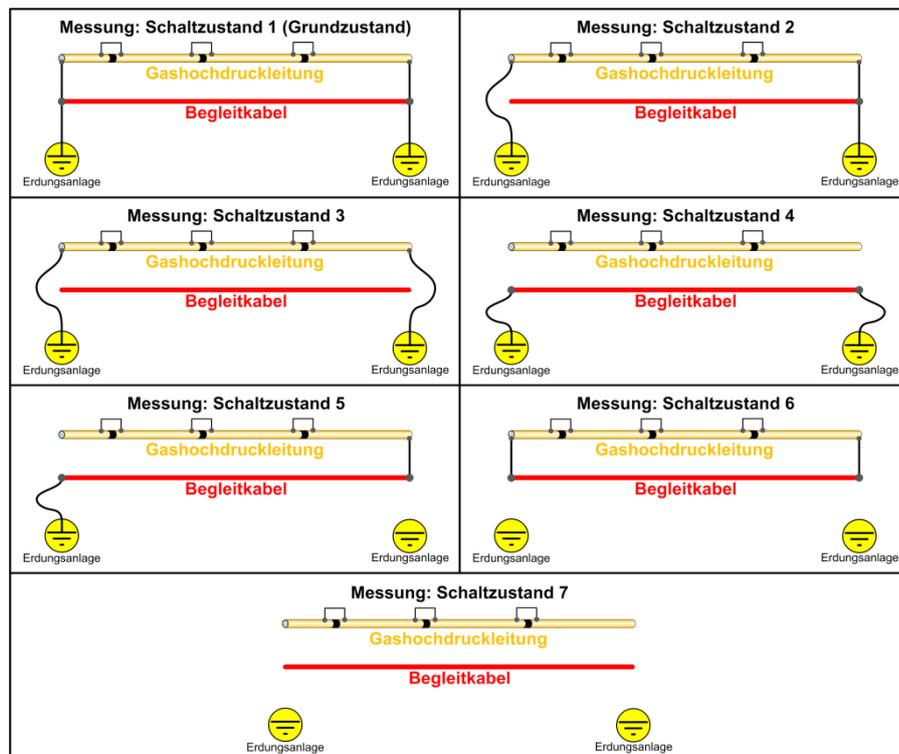


Abbildung 6.5: Schaltzustände, messtechnische Erfassung der Wirkung von Begleitkabel und Erdungsanlagen

6.3 Erste Versuche und Parametrierung der Messgeräte im Labor

Zur Festlegung und Erprobung des Messkonzepts wurden im Labor des Instituts für Elektrische Anlagen diverse Versuche durchgeführt (Abbildung 6.6).

In einem ersten Schritt wurde die Ersatzschaltung nach Abbildung 4.7 aufgebaut. Hierzu wurden für die Bauteile (Kapazitäten, Induktivitäten, ohmsche Widerstände) die zuvor in Kapitel 5 ermittelten Werte angenommen. Als Spannungsquelle in Längsrichtung dieser Ersatzschaltung wurde das Kalibrierwerkzeug der Marke Omicron, Typ CMC 256 herangezogen. Der Aufbau wurde mit Spannungen zwischen 10 V und 65 V und einer Frequenz von 16,7 Hz beaufschlagt. Diese Werte wurden aus Tabelle 4.1 für eine induktiv beeinflusste Rohrleitung unter Langzeitbeeinflussung (Kapitel 4.4) entnommen. Nun wurden die Messgeräte und Sensoren zur messtechnischen Erfassung der Beeinflussung wie später in Kapitel 6.5 und Kapitel 6.6 beschrieben parametriert und kalibriert.

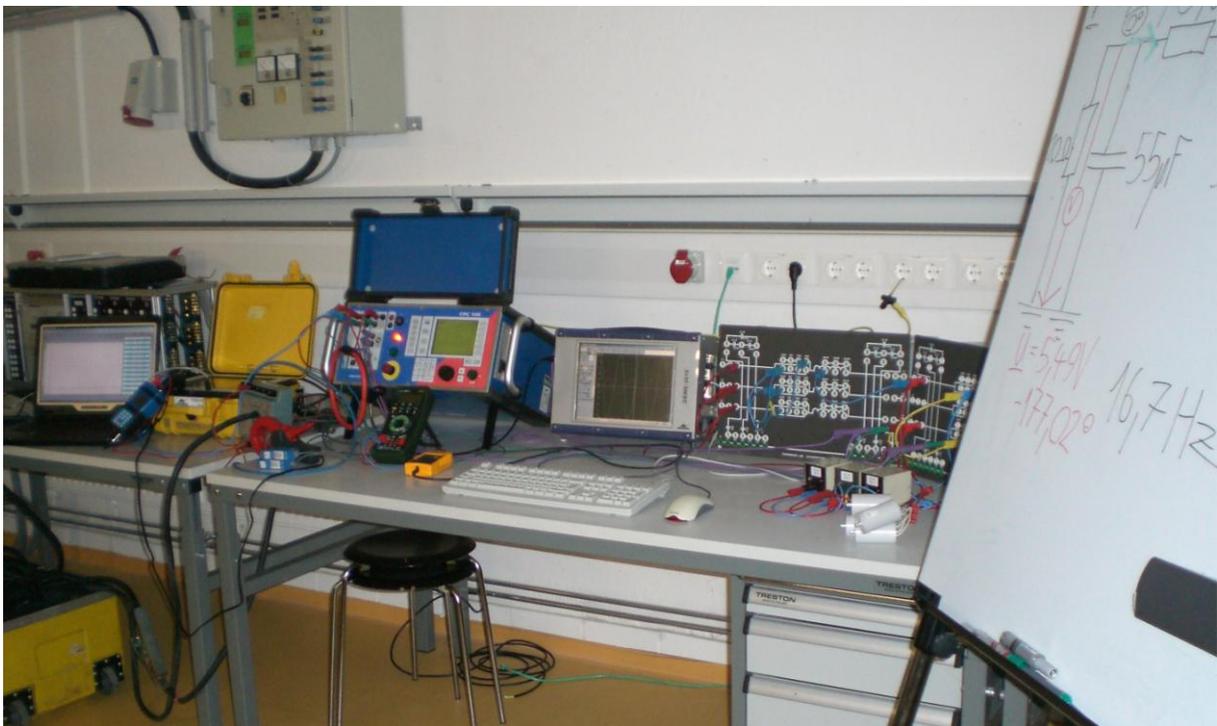


Abbildung 6.6: Versuchsaufbau im Labor am Institut für elektrische Anlagen

Zur Erprobung der messtechnischen Erfassung der Ströme in den Oberleitungen der Bahnstrecke konnte mit dem Prüfgerät der Marke Omicron, Typ CPC 100 ein Strom zwischen 100 A und 800 A (Kapitel 6.4) mit einer Frequenz von 16,7 Hz durch zwei Stromwandler für Laboranwendung gespeist werden. Nun wurden das Messgerät und die Sensoren wie in Kapitel 6.4 beschrieben auf die Erfassung der Sekundärseitigen Ströme parametriert und kalibriert.

Für die messtechnische Ermittlung der Rohrleitungsimpedanzen wurde eine frequenzselektive Einspeisung mit dem Prüfgerät der Marke Omicron, Typ CPC 100 und der Koppereinheit Typ CP CU1 vorbereitet. Da die Bauteile des Messaufbaus nach Abbildung 4.7 eine zu geringe Leistung für die Erprobung dieser Messung aufwiesen, wurde eine

separate Senke mit einer großen Wirkleistung von 2,5 kW in Form eines Leistungswiderstands für Laboranwendungen zur Einspeisung des Messsignals und Parametrierung des Messgerätes herangezogen.

6.4 Erfassung der Ströme in den Bahnoberleitungen

Die für die magnetische Kopplung maßgebenden auf die Rohrleitung beeinflussend wirkenden Anlagenteile einer mit Wechselstrom betriebenen Bahnstrecke bestehen aus den Versorgungs-, Verstärkungs-, Umgehungs-, Fahr- und Speiseleitungen, welche in Österreich und diversen anderen europäischen Ländern üblicherweise mit einer Spannung von 15 kV und einer gegenüber den öffentlichen Stromnetzen verminderten Netzfrequenz von 16,7 Hz betrieben werden und aus den Schienen und im Oberleitungssystem befindlichen Rück- bzw. Kompensationsleitern, welche der Rückleitung des Stromes dienen.

Zur Abschätzung der bei der Messung zu erwartenden Ströme wurden vom Betreiber der Bahnstrecke die Oberleitungssituation sowie die geometrische Anordnung der zweigleisigen Bahnstrecke bekanntgegeben. Anhand von Tabellen des Betreibers der Bahnstrecke mussten die zu erwartenden Ströme abgeschätzt werden. Die Ströme können als 24-h-Mittelwerte, maximale Betriebsströme oder durch strombegrenzend wirkende Anlagenteile bedingte thermische Grenzströme angenommen werden.

Bei der gegebenen Bahnstrecke handelte es sich um eine zweigleisige Bahnstrecke, welche nur mit Fahrdrabt und Tragseil und ohne diverse Rück- bzw. Verstärkungsleiter im Oberleitungssystem ausgerüstet war. Die Oberleitungsausrüstung war im betrachteten Abschnitt wie folgt gegeben:

- Fahrdrabt aus 100 mm² Kupfer, Widerstandsbelag 0,167 Ω/km
- Tragseil des Fahrdrabts aus 50 mm² Stahl, Widerstandsbelag 4,530 Ω/km
- Rückleitung des Stromes über die vier Schienen aus gehärtetem Voest-Stahl mit je 6800 mm², Widerstandsbelag 0,039 Ω/km
- kein separater Rückleiter im Oberleitungssystem
- keine separaten Speiseleitungen im Oberleitungssystem

Zum Zeitpunkt der Messung wurde diese Bahnstrecke als Stichleitung nur von einem Unterwerk aus gespeist (Abbildung 6.1). Es zeigte sich im Vergleich zum thermischen Grenzstrom des speisenden Trafos (15 kV seitig → $I_{\text{therm}} = 1180 \text{ A}$) die gegebene Oberleitungsausrüstung mit einem thermischen Grenzstrom von $I_{\text{therm}} = 1058 \text{ A}$ für das gesamte Bahnstreckensystem als strombegrenzend. Somit wurde der thermische Grenzstrom der Oberleitungsausrüstung als maximal auftretender Betriebsstrom des Systems angenommen.

In folgender Abbildung 6.7 sind ein Querschnitt über die Bahnstrecke mit Gashochdruckleitung und Begleitkabel und dem Verlauf des Magnetfelds in Form der magnetischen Ersatzflussdichte dargestellt. Als Strom im Bahnsystem wurde der maximal auftretende Betriebsstrom $I_{\text{max}} = 1058 \text{ A}$ angenommen.

Die Stromaufteilung im System sowie die resultierende magnetische Ersatzflussdichte wurden mit dem Programm MFCALC-Railway, einem Programm zur Berechnung der magnetischen Ersatzflussdichte durch Kabel und Leitungen von Bahnanlagen unter Berücksichtigung der Rückströme (Institut für Elektrische Anlagen der TU Graz, 2008) nach dem Biot-Savart-Gesetz, ermittelt. Die Visualisierung erfolgte mittels Matlab R2008a, einer Software zur Lösung von numerischen mathematischen Problemen mithilfe von Matrizen und zur grafischen Darstellung (The MathWorks, 2008).

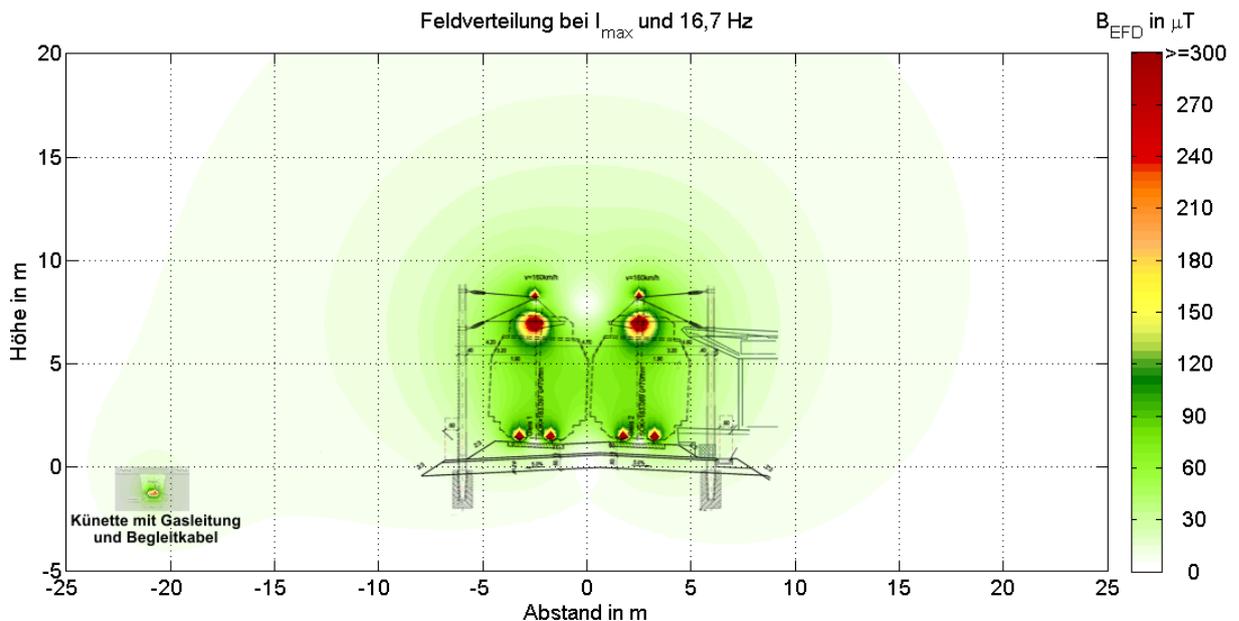


Abbildung 6.7: Magnetische Ersatzflussdichte im Querschnitt über die Bahnstrecke mit Gashochdruckleitung und Begleitkabel

Zur messtechnischen Erfassung der Ströme im Bahnsystem wurde entschieden, diese als Effektivwerte im Sekundentakt über die Dauer der Messung (vier Tage) aufzuzeichnen. Zu diesem Zweck musste ein Messgerät ausgewählt werden, welches die Messsignalverarbeitung- und Speicherung in der gewünschten Geschwindigkeit bewerkstelligen kann und die Kapazitäten zur Archivierung der großen resultierenden Datenmengen besitzt.

Hierzu erwies sich das Messgerät der Marke Dewetron vom Typ ELOG-570 als geeignet (Abbildung 6.8). Das ELOG-570 verfügt über Spannungskanäle zur Erfassung der drei Phasenspannungen welche zur Strommessung aber nicht benötigt wurden. Zusätzlich verfügt das ELOG-570 über zwölf Kanäle zur Strommessung [26]. Hier werden den Messströmen proportionale Spannungssignale an den Eingängen über einen 16-Bit Analog-Digitalwandler umgesetzt und zur Weiterverarbeitung mit der Messsoftware zur Verfügung gestellt. Zwei dieser Kanäle (Kanal 1:IL1 und Kanal 1:IL2) wurden für die Erfassung der zwei Oberleitungsströme verwendet (Abbildung 6.8 → **1** und **2**).

Als Sensoren zur Erfassung der sekundärseitigen Ströme in den Stromwandlern im Unterwerk des Bahnbetreibers wurden zwei Wechselstrommesszangen ausgewählt. Dies

hatte den Vorteil, dass die fix installierte Stromerfassung im Unterwerk nicht unterbrochen werden musste. Es mussten lediglich die Stromzangen sekundärseitig der Stromwandler positioniert werden (Abbildung 6.8 → 1 und 2).

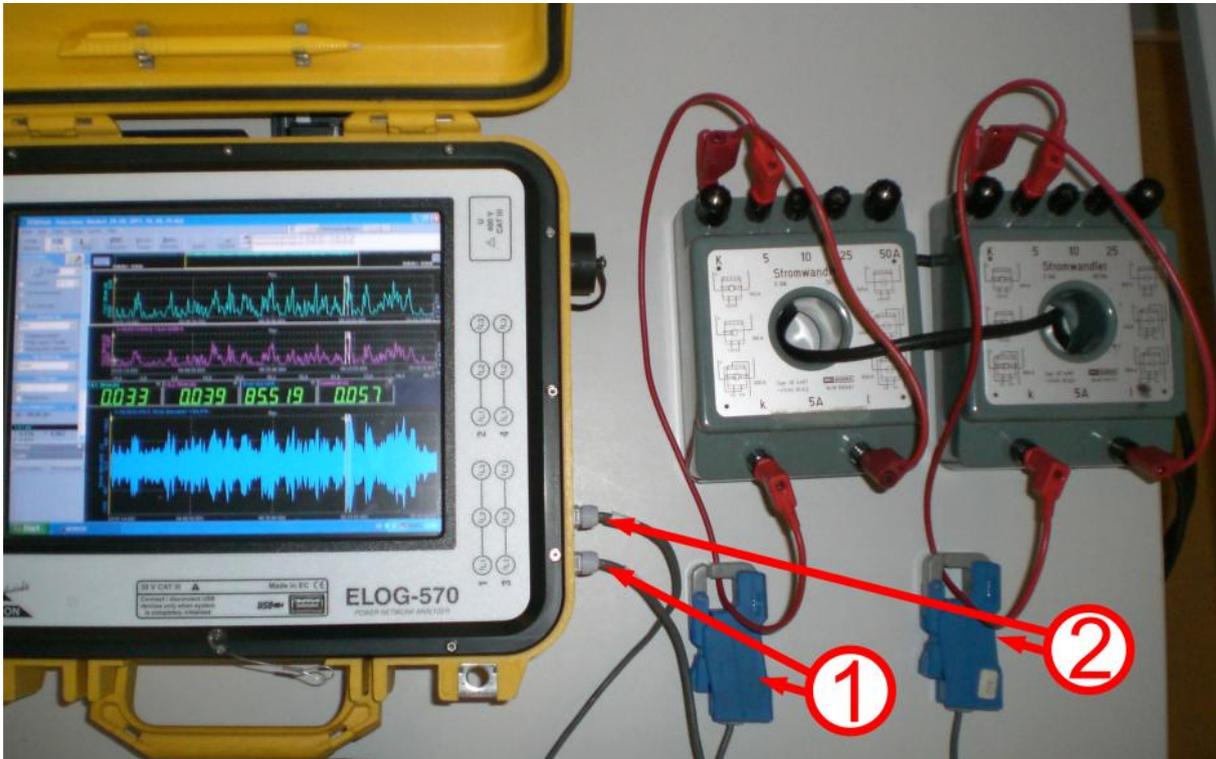


Abbildung 6.8: Messequipment zur Erfassung der Ströme im Bahnsystem

Strommesszangen funktionieren nach dem transformatorischen Prinzip. Der Kopf der Stromzange, bestehend aus einem beweglichen und einem unbeweglichen Schenkel, bildet im geschlossenen Zustand den Eisenkern. Der durch diesen Eisenkern geführte Leiter, welcher den zu erfassenden Wechselstrom führt, bildet die primäre Wicklung. An der internen Sekundärwicklung fällt über Widerstände eine zum Messstrom proportionale Spannung ab.

Zur Erfassung der Ströme im Bahnsystem wurden zwei Stromzangen der Marke Universal Technic, Typ M1.U mit einem Strom-Spannungsverhältnis von 10A~/0,1V~ gewählt.

Die Parametrierung und Kalibrierung der beiden Kanäle mit den Strommesszangen, sowie die erforderlichen Einstellungen zur Stromaufzeichnung erfolgten mit der Software DEWESoft 6.6.1 (Dewetron, © 2000 – 2008), welche auf dem ELOG-570 im Betriebssystem Windows® XP (Microsoft®) installiert war.

Zur Kalibrierung der Strommesszangen auf die jeweiligen Kanäle wurde zunächst im Kanal Setup ein Verhältnis von genau 5A~/0,05V~ eingestellt. Nun wurde mit dem Kalibrierwerkzeug der Marke Omicron, Typ CMC 256 als Stromquelle in einem Leiter ein Strom von 10 A eingeprägt, und mit 10 Windungen durch die Stromzange geführt. Im Kanal Setup des ELOG-570 können nun die resultierenden Abweichungen zu den 100 A des Kalibrierwerkzeugs eingesehen, und mittels individueller Kalibrierfaktoren in der Skalierung

der Kanäle berücksichtigt werden (Abbildung 6.9). Die Kalibrierung der Stromzangen auf die jeweiligen Kanäle erfolgte in einer vorangegangenen Diplomarbeit am Institut für Elektrische Anlagen [27].

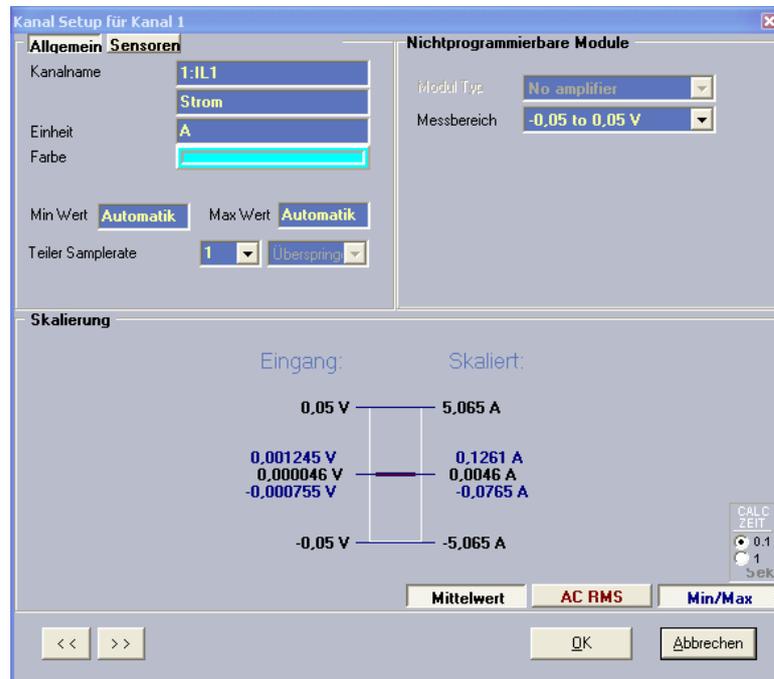


Abbildung 6.9: DEWESoft 6.6.1 / Kanalsetup des Kanals 1:1L1 für die Stromzange

Das Übersetzungsverhältnis der beiden Stromwandler im Unterwerk des Bahnbetreibers betrug 1500A / 1A. Aus diesem Grund wurde als Messbereich mit der maximalen Ausnutzung der Bereich von -0,05V bis 0,05V festgelegt (Abbildung 6.9). Als Einheit der messtechnisch Erfassten physikalischen Größe wurde das Ampere (A) festgelegt.

Die Aufzeichnung der Ströme im Sekundentakt musste ebenfalls parametrieren werden. Hier wurde festgelegt, dass die Ergebnisse alle 24 Stunden in einer neuen Datei abgespeichert werden. Zur späteren Reproduzierbarkeit der Messdaten wurde für die automatische Benennung dieser Dateien die Startzeit der jeweiligen Messung in der Form „JJJJ_MM_TT_hhmmss“ festgelegt. Das Messgerät konnte im Unterwerk über eine unterbrechungsfreie 230V / 50Hz Spannungsquelle versorgt werden. Somit konnte eine durch einen Stromausfall bedingte Unterbrechung der Aufzeichnung ausgeschlossen werden.

Es wurde festgelegt, die Werte in einer sogenannten statischen / reduzierten Abtastrate von einer Sekunde aufzuzeichnen. Dies bewirkte, dass jede Sekunde der ermittelte Effektiv-Mittel- Minimal- und Maximalwert des jeweiligen Kanals abgespeichert wurde. In der Software musste zusätzlich die Speicheroption „immer langsam“ festgelegt werden. Die Option „immer schnell“ hätte eine Aufzeichnung der dynamischen Abtastrate (z.B. 1000 s/sec) des Signals und somit eine viel größere Datenmenge bedeutet, was im Falle der Erfassung der Bahnströme nicht notwendig war.

Mit dem in Kapitel 6.3 erläuterten Messaufbau zur Erprobung dieser Messung wurde im Labor des Instituts für Elektrische Anlagen eine mehrstündige Aufzeichnung gefahren. Aus der resultierenden Datenmenge konnte so auf die bei der realen Messung erwartete Datenmenge hochgerechnet und das Auslangen der Speicherkapazität des ELOG-570 überprüft werden.

Mit der Software DEWESoft 6.6.1 können in zusätzlichen Mathematikkanälen mathematische Zusammenhänge der messtechnisch erfassten physikalischen Größen definiert und während der Aufzeichnung miterfasst werden. So wurde aus den beiden Sekundärströmen der jeweiligen Stromwandler der zwei Oberleitungen in einem solchen Mathematikkanal die Summe gebildet. In einem weiteren Mathematikkanal wurde diese Stromsumme mit dem Faktor 1500 (Übersetzungsverhältnis der Stromwandler) multipliziert (Abbildung 6.10).

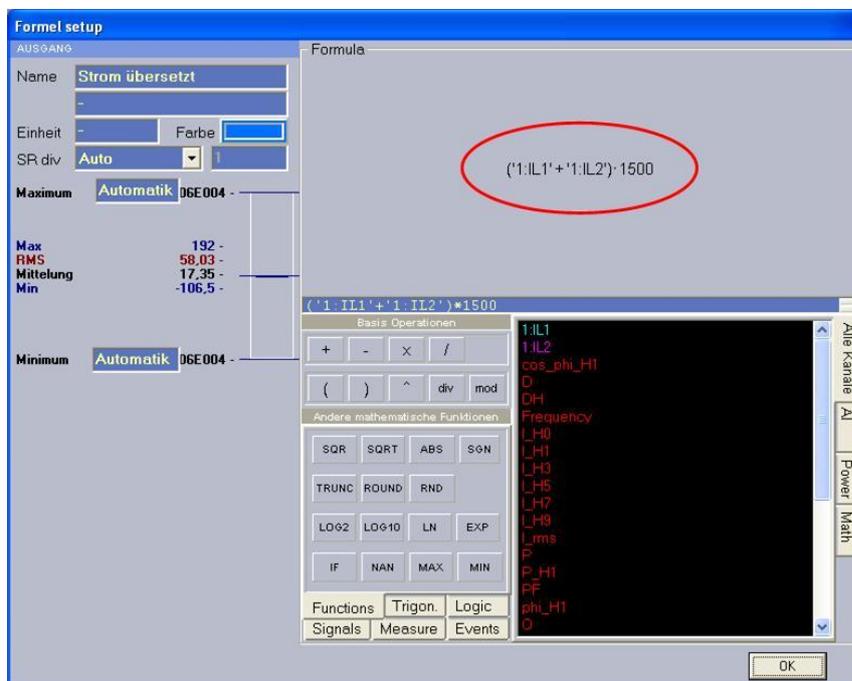


Abbildung 6.10: DEWESoft 6.6.1 / Mathematikkanal zur Ermittlung des Summenstroms im Bahnsystem

Bei der Installation der Messung im Unterwerk musste darauf geachtet werden, die beiden Stromzangen in derselben Richtung im Sekundärkreis der Messwandler zu positionieren. Gegensätzliche Richtungen hätten eine Verschiebung der Messsignale um 180° zueinander und somit ein falsches Ergebnis der Berechnungen in den Mathematikkanälen zur Folge gehabt.

Zur Reproduzierbarkeit bei der späteren Auswertung der unterschiedlichen Messergebnisse aller verwendeten Messgeräte war der synchrone Verlauf der Uhrzeiten in den unterschiedlichen Systemen ein sehr wichtiger Aspekt. Da die verwendeten Datalogger (Kapitel 6.5) über GPS (Global Positioning System) verfügten und auch ihre Uhrzeiten regelmäßig über dieses System synchronisierten, wurden alle anderen Messgeräte ebenfalls auf diese Zeiten abgestimmt. Hierzu wurde festgestellt, dass die Software DEWESoft die

Systemzeit des Betriebssystems Microsoft® Windows® XP übernimmt. Nun wurde die Systemzeit des Betriebssystems mit einem Internetzeitserver welcher die GPS Zeit führt synchronisiert. Vor und nach der Messung wurden bei allen verwendeten Messgeräten untereinander optisch der synchrone Sekundenwechsel und das Übereinstimmen der Uhrzeiten kontrolliert.

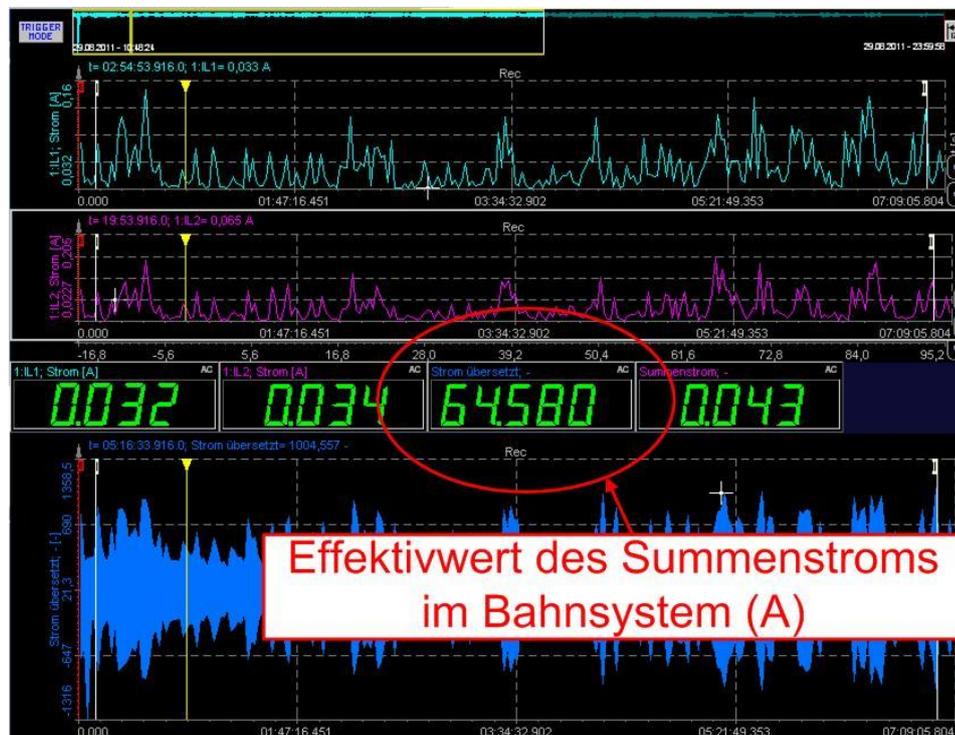


Abbildung 6.11: DEWESoft 6.6.1 / Ströme in Fahrdrähten und Trageilen der Bahnstrecke

In Abbildung 6.11 ist ein Ausschnitt aus den Messergebnissen bestehend aus den Teilströmen in den zwei Oberleitungen der Bahnstrecke und dem ermittelten Effektivwert des Summenstroms im Bahnsystem zu einem gewissen Zeitpunkt der Messung ersichtlich.

6.5 Erfassung der Spannungen und Ströme entlang Rohrleitung und Begleitkabel mittels Datalogger

Zur Erfassung der Spannungen und Ströme entlang der Rohrleitung und des Begleitkabels wurden zweikanalige Datalogger der Marke Weilekes Elektronik, Typ MiniLog2 verwendet. Das Auslesen und Auswerten der aufgezeichneten Messdaten erfolgte mit der zugehörigen Software WinLog 2.0 (Weilekes Elektronik).

Die Positionierung der Datalogger (Abbildung 6.4) erfolgte an Örtlichkeiten entlang der Rohrleitung, an welchen anhand von Messmarkern und Schaltschränken (Abbildung 6.3) die erforderlichen Messsignale der Gashochdruckleitung und des Begleitkabels an die Erdoberfläche geführt wurden.

Ein Erfassen der Ströme durch die Rohrleitung war an Positionen möglich, wo die Isolierkupplungen in der Rohrleitung in Schaltschränken an der Erdoberfläche überbrückt

wurden (Kapitel 6.1). Ein Erfassen der Ströme durch das Begleitkabel war an Positionen möglich, wo das Begleitkabel in Schaltschränken an die Erdoberfläche geführt wurde. In folgender Tabelle 6.1 ist die Positionierung der Datalogger mit den jeweils erfassten Messwerten ersichtlich.

Datalogger	Position	erfasste Werte
Nr.1	Messpunkt 1 bei Rohrleitungskilometer 0.000	Kanal 1: Effektivwert der Spannung von Rohrleitung gegen ferne Erde U_{RL} (V) Kanal 2: Effektivwert der Spannung von Begleitkabel gegen ferne Erde U_{BK} (V)
Nr.2	Messpunkt 2 bei Rohrleitungskilometer 1.298	Kanal 1: Effektivwert der Spannung von Rohrleitung gegen ferne Erde U_{RL} (V) Kanal 2: Effektivwert des Stroms in der Rohrleitung I_{RL} (A)
Nr.3		Kanal 1: Effektivwert der Spannung von Begleitkabel gegen ferne Erde U_{BK} (V) Kanal 2: Effektivwert des Stroms im Begleitkabel I_{BK} (A)
Nr.4	Messpunkt 3 bei Rohrleitungskilometer 2.979	Kanal 1: Effektivwert der Spannung von Rohrleitung gegen ferne Erde U_{RL} (V) Kanal 2: Effektivwert des Stroms in der Rohrleitung I_{RL} (A)
Nr.5		Kanal 1: Effektivwert der Spannung von Begleitkabel gegen ferne Erde U_{BK} (V) Kanal 2: Effektivwert des Stroms im Begleitkabel I_{BK} (A)
Nr.6	Messpunkt 4 bei Rohrleitungskilometer 4.531	Kanal 1: Effektivwert der Spannung von Rohrleitung gegen ferne Erde U_{RL} (V) Kanal 2: Effektivwert des Stroms in der Rohrleitung I_{RL} (A)
Nr.7		Kanal 1: Effektivwert der Spannung von Begleitkabel gegen ferne Erde U_{BK} (V) Kanal 2: Effektivwert des Stroms im Begleitkabel I_{BK} (A)
Nr.8	Messpunkt 5 bei Rohrleitungskilometer 5.256	Kanal 1: Effektivwert der Spannung von Rohrleitung gegen ferne Erde U_{RL} (V)
Nr.9	Messpunkt 6 bei Rohrleitungskilometer 7.090	Kanal 1: Effektivwert der Spannung von Rohrleitung gegen ferne Erde U_{RL} (V) Kanal 2: Effektivwert der Spannung von Begleitkabel gegen ferne Erde U_{BK} (V)

Tabelle 6.1: Positionierung der Datalogger und erfasste Werte

Das Erfassen der Ströme jeweils auf dem 2. Kanal der Datalogger erfolgte mittels Strommesszangen der Marke Fluke, Typ i5s AC Current Clamp. Die Funktionsweise von Strommesszangen wurde bereits in Kapitel 6.4 erläutert. Das Strom- Spannungsverhältnis der Messzangen betrug 0,4V / 1A.

Der Datalogger MiniLog2 wurde für die Messung wie folgt parametrier:

Für die beiden Kanäle der Datalogger standen folgende Optionen zur Gleich- und Wechselspannungsaufzeichnung zur Auswahl:

1. Ch1_{DC}+CH2_{AC}
2. Ch1_{AC}+CH2_{DC}
3. Ch1_{DC}+CH2_{DC}
4. **Ch1_{AC}+CH2_{AC}**

Es wurde Ch1_{AC}+CH2_{AC} gewählt. Für den Messbereich der Wechselspannungsmessung standen folgende Optionen zur Auswahl:

1. Hi – Bereich bis 100V
2. **Lo – Bereich bis 10V**
3. Mic – Bereich bis 100mV

Es wurde als Grundzustand der Messbereich Lo gewählt, da nur aus diesem Messbereich ein automatischer Wechsel in den Messbereich Hi bei Messbereichsüberschreitung

stadtfindet. Die Messbereiche Hi und Lo des MiniLog2 waren hinsichtlich ihrer Auflösung und Genauigkeit in jeweils zwei Unterkategorien aufgeteilt:

Bereich:	Unterkategorie:	Auflösung:	Genauigkeit:	Genauigkeit, umgerechnet auf die Strommessung in Kanal 2:
Hi	100 V > X > 50V	0,1V	± 1,0% ±0,2V	±0,5A
	50V > X > 0V	0,01V	± 0,5% ±0,02V	±0,05A
Lo	10V > X > 0,2V	1mV	± 0,5% ±2mV	±5mA
	200mV > X > 0mV	0,1mV	± 0,5% ±0,5mV	±1,5mA

Hinsichtlich der Abtastrate wurde die Option 1000ms gewählt, was die Erfassung eines Effektivwerts pro Kanal und Sekunde bedeutete. Laut Spezifikationen des Messgeräteherstellers [28] erlaubte diese Einstellung eine Akkulaufzeit von zehn Tagen und bei einer Speicherkapazität von $1,2 \cdot 10^6$ Messwerten eine Aufzeichnungsdauer von sieben Tagen, was für die Dauer der Messung ausreichend war.



Abbildung 6.12: Messequipment zur Erfassung der Spannungen und Ströme entlang Rohrleitung und Begleitkabel mittels Datalogger

Da die Datalogger mit GPS-Empfängern (Global Positioning System) ausgestattet waren, konnten die Uhrzeiten zu Beginn der Messung mit der GPS-Systemzeit synchronisiert werden. Während der Messung erfolgte dann alle sechs Stunden eine automatisierte Synchronisation der Messgeräte mit der GPS-Systemzeit. Laut Spezifikationen des

Messgeräteherstellers [28] betrug die Zeitabweichung der Systemzeit pro 24 Stunden zehn Millisekunden, was bei einer automatischen Synchronisation alle sechs Stunden eine Abweichung der Systemzeiten der Datalogger untereinander von weniger als vier Millisekunden bedeutete. Es wurde während der Aufzeichnung jeder Messwert mit einem Zeitstempel der Form „JJJJ_MM_TT_hhmmss“ versehen.

In Abbildung 6.12 ist das gesamte Messequipment, wie es bei der Messung verschalten war, ersichtlich. Die einzelnen Positionen der Abbildung 6.12 bedeuten:

- 1 Strommesszange zur Erfassung des Effektivwerts des Stroms durch die Rohrleitung auf Kanal 2 des Dataloggers
- 2 Erfassung des Effektivwerts der Spannung zwischen Rohrleitung und ferner Erde auf Kanal 1 des Dataloggers
- 3 Strommesszange zur Erfassung des Effektivwerts des Stroms durch das Begleitkabel auf Kanal 2 des Dataloggers
- 4 Erfassung des Effektivwerts der Spannung zwischen Begleitkabel und ferner Erde auf Kanal 1 des Dataloggers
- 5 GPS-Empfänger (Global Positioning System) zur Erfassung der GPS-Systemzeit
- 6 Erdspieß zur Erfassung des fernen Erdpotentials
- 7 Zweikanaliger Datalogger der Marke Weilekes Elektronik, Typ MiniLog2

Zur Kalibrierung der Datalogger wurde mit dem Kalibrierwerkzeug der Marke Omicron, Typ CMC 256 für jeden Kanal eines Dataloggers wie in Kapitel 6.4 erläutert ein individueller Kalibrierfaktor ermittelt, und in der späteren Auswertung der Messdaten mit der Software WinLog 2.0 (Weilekes Elektronik) angewendet.

6.6 Hochauflösende Erfassung der Spannungen und Ströme entlang Rohrleitung und Begleitkabel

Zur genauen Analyse der Stromaufteilungen und Spannungsabfälle an Gashochdruckleitung, Begleitkabel und Erdungsanlage wurden für die Dauer der Herstellung der unterschiedlichen Schaltzustände (Abbildung 6.5) und für die Dauer der frequenzselektiven Einspeisungen zur Ermittlung der Rohrleitungsimpedanzen (Kapitel 6.7) an Messpunkt 1 bei Kilometer 0,000 (Abbildung 6.4) und an Messpunkt 3 bei Kilometer 2,979 jeweils eine hochauflösende Messung installiert, welche die Signale mit einer Abtastrate von 10000 Samples pro Sekunde erfassten.

Hinsichtlich der sehr schnellen Signalerfassung- und Verarbeitung bzw. bezüglich der sehr großen resultierenden Datenmengen werden bei einer solchen Messung große Ansprüche an das Messsystem gestellt.

Zu diesem Zweck wurden die Messsysteme vom Typ DEWE-3020 und DEWE-3010 der Marke Dewetron ausgewählt. Diese Systeme verfügen über eine Festplattenspeicherkapazität von 1000 GB und einen möglichen Datendurchsatz bei der Signalverarbeitung von 70 MB pro Sekunde. Da die beiden Systeme annähernd dieselben

Spezifikationen aufweisen und dieselbe Messung mit beiden Systemen durchgeführt wurde, wird das Messkonzept in Folge anhand des Messsystems DEWE-3020 beschrieben.

Beim Messsystem DEWE-3020 befinden sich seitlich acht Steckplätze (Kanal 0-7), welche die Bestückung mit unterschiedlichen Messmodulen ermöglichen [29].

Die Parametrierung und Kalibrierung der acht Kanäle sowie die Aufzeichnungen erfolgten mit der Software DEWESoft 7.0.4 b3 (Dewetron, © 2000 – 2010), welche auf dem DEWE-3020 im Betriebssystem Windows[®] 7 (Microsoft[®]) installiert war.

Die acht seitlichen Steckplätze wurden zur Messung mit folgenden Modulen bestückt:

- Kanal 0, Kanal 1, Kanal 6 und Kanal 7 wurden für die Spannungsmessungen mit Modulen des Typs DAQP-HV (Dewetron) mit einer Bandbreite von 300 kHz und sieben wählbaren Eingangsbereichen (± 20 V bis ± 1400 V) bestückt. Die Genauigkeit der Module in den gewählten Messbereichen betrug $\pm 0,05$ % des Messwertes bzw. $\pm 0,05$ % des Messbereichs [30].
- Kanal 2, Kanal 3, Kanal 4 und Kanal 5 wurden für die Strommessungen mittels Rogowskispule (Kanal 2 und Kanal 3) bzw. mittels Stromzange (Kanal 4 und Kanal 5) mit Modulen des Typs DAQP-LV (Dewetron) mit einer Bandbreite von 300 kHz und zwölf wählbaren Eingangsbereichen (10 mV bis 50 V) bestückt. Die Genauigkeit der Module in den gewählten Messbereichen betrug $\pm 0,02$ % des Messwertes bzw. $\pm 0,05$ % des Messbereichs [30].

Da einerseits die Erfassung der Beeinflussung der Rohrleitung und des Begleitkabels durch das Bahnsystem während der unterschiedlichen Schaltzustände (Abbildung 6.5) und andererseits die frequenzselektive Einspeisung zur Ermittlung der Rohrleitungsimpedanzen (Kapitel 6.7) mit dieser Messung erfasst werden sollte, und hinsichtlich Dessen unterschiedliche Größenordnungen der Messsignale zu erwarten waren, wurde jedes der vier erfassten Messsignale auf zwei Kanäle des Messsystems gelegt, und die beiden Kanäle auf einen jeweils großen und kleinen Messbereich parametrieren. Somit wurden alle acht verfügbaren Module des Messsystems ausgenutzt.

Als Sensor für die Erfassung der Ströme durch die Rohrleitungen auf Kanal 2 (großer Messbereich) und Kanal 3 (kleiner Messbereich) des DEWE-3020 wurde die Rogowskispule ausgewählt. Die Rogowskispule ist eine Luftspule, also ohne Eisenkern. Um den Umfang des kreisrunden dielektrischen flexiblen Spulenkörpers ist ein Leiter regelmäßig aufgewickelt. Wird dieser flexible Spulenkörper um einen mit Wechselstrom durchflossenen Leiter gelegt, wird in dieser Luftspule eine Spannung induziert, welche an hochohmigen Widerständen gemessen werden kann. Durch Variation dieser Widerstände können unterschiedliche Messbereiche festgelegt werden. Ein Nachteil der Rogowskispule ist, dass sie zur Generierung eines messbaren Spannungssignals einen Verstärker mit separater Energiequelle benötigt. Im Falle der verwendeten Spule handelte es sich hierbei um zwei AA Alkali-Mangan Zellen mit einer Nennspannung von 1,5 V, welche im Vorfeld erneuert wurden.

Bei dieser Messung wurde eine Rogowskispule der Marke Fluke, Typ i3000s Flex verwendet, welche über drei Messbereiche (bis 30 A / bis 300 A / bis 3000 A) verfügt. Zur Messung wurde der kleinste Messbereich mit einer Empfindlichkeit von 0,1 V / 1 A ausgewählt. Die Genauigkeit der gewählten Rogowskispule betrug $\pm 1\%$ des Bereichs [31], was im gewählten Bereich einer Stromstärke von $\pm 0,3$ A entsprach. In der folgenden Abbildung 6.13 ist das Setup des Kanals 2 des Messsystems DEWE-3020 in der Software DEWESoft 7.0.4 b3 auf die Rogowskispule für den großen Messbereich des Stroms durch die Gashochdruckleitung dargestellt.

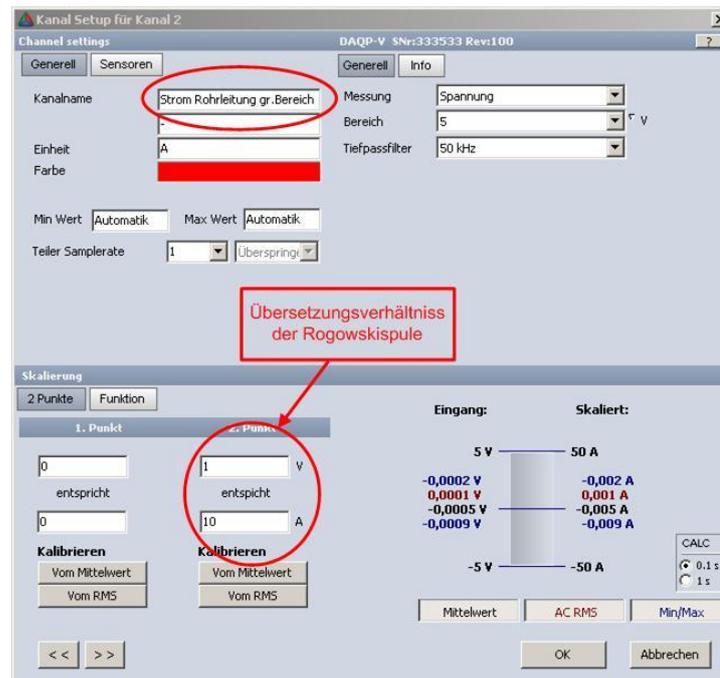


Abbildung 6.13: DEWESoft 7.0.4 b3 / Kanalsetup des Kanals 2 für die Rogowskispule

Das Erfassen der Ströme durch das Begleitkabel auf Kanal 4 (großer Messbereich) und Kanal 5 (kleiner Messbereich) erfolgte mittels Strommesszangen der Marke Chauvin Arnoux, Typ C1XX. Die Funktionsweise von Strommesszangen wurde bereits in Kapitel 6.4 erläutert. Zur Messung wurde eine Empfindlichkeit von 1 V / 1 A ausgewählt.

Die Setups erfolgten für die restlichen Kanäle wie folgt (Abbildung 6.14):

	Kanalbenennung:	Skalierung:	Bereich:
Kanal 0	Spg. Rohrleitung gegen ferne Erde gr. Bereich	200 V entspricht 200 V	± 200 V
Kanal 1	Spg. Rohrleitung gegen ferne Erde kl. Bereich	40 V entspricht 40 V	± 40 V
Kanal 2	Strom Rohrleitung gr. Bereich	1 V entspricht 10 A	± 50 A
Kanal 3	Strom Rohrleitung kl. Bereich	1 V entspricht 10 A	± 5 A
Kanal 4	Strom Begleitkabel gr. Bereich	1 V entspricht 1 A	± 50 A
Kanal 5	Strom Begleitkabel kl. Bereich	1 V entspricht 1 A	± 5 A
Kanal 6	Spg. Begleitkabel gegen ferne Erde gr. Bereich	200 V entspricht 200 V	± 200 V
Kanal 7	Spg. Begleitkabel gegen ferne Erde kl. Bereich	40 V entspricht 40 V	± 40 V

Die Kalibrierung erfolgte mit dem Kalibrierwerkzeug der Marke Omicron, Typ CMC 256. Es wurde für jeden Kanal des DEWE-3020 ein individueller Kalibrierfaktor ermittelt, und in der späteren Auswertung der Messdaten berücksichtigt.

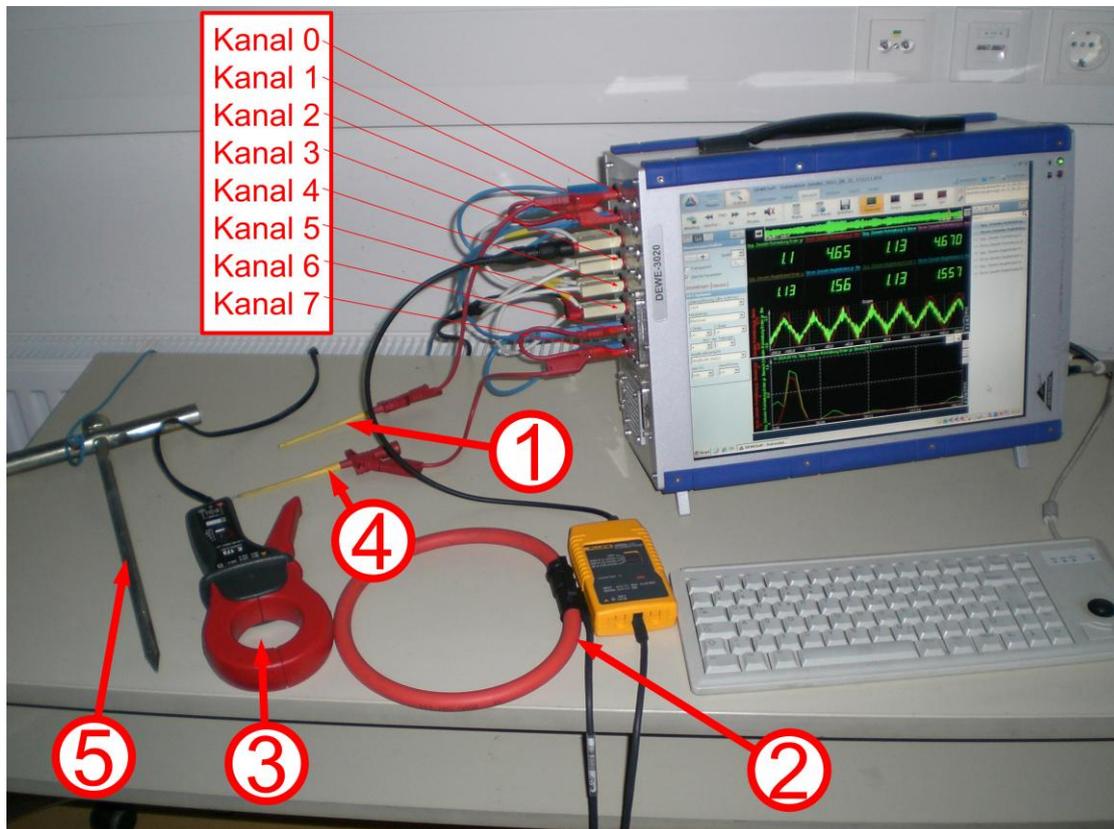


Abbildung 6.14: Messequipment zur hochauflösenden Erfassung der Spannungen und Ströme entlang Rohrleitung und Begleitkabel

In Abbildung 6.14 ist das gesamte Messequipment, wie es bei der Messung verschaltet war, ersichtlich. Die einzelnen Positionen der Abbildung 6.14 bedeuten:

- 1 Erfassung der Spannung zwischen Rohrleitung und ferner Erde auf **Kanal 0** und **Kanal 1** des DEWE-3020
- 2 Rogowskispule zur Erfassung des Stroms durch die Rohrleitung auf **Kanal 2** und **Kanal 3** des DEWE-3020
- 3 Strommesszange zur Erfassung des Stroms durch das Begleitkabel auf **Kanal 4** und **Kanal 5** des DEWE-3020
- 4 Erfassung der Spannung zwischen Begleitkabel und ferner Erde auf **Kanal 6** und **Kanal 7** des DEWE-3020
- 5 Erdspeiß zur Erfassung des fernen Erdpotentials

Zur Reproduzierbarkeit bei der späteren Auswertung der unterschiedlichen Messergebnisse aller verwendeten Messgeräte war, wie beim Erfassen der Ströme in den Bahnoberleitungen (Kapitel 6.4), auch bei dieser Messung der synchrone Verlauf der Uhrzeiten in den unterschiedlichen Systemen ein sehr wichtiger Aspekt. Da die verwendeten Datalogger (Kapitel 6.5) über GPS (Global Positioning System) verfügten und auch ihre Uhrzeiten

regelmäßig über dieses System synchronisierten, wurden alle anderen Messgeräte ebenfalls auf diese Zeiten abgestimmt. Hierzu wurde festgestellt, dass die Software DEWESoft die Systemzeit des Betriebssystems Windows® 7 (Microsoft®) übernimmt. Nun wurde die Systemzeit des Betriebssystems mit einem Internetzeitserver welcher die GPS Zeit führt synchronisiert. Vor und nach der Messung wurden bei allen verwendeten Messgeräten untereinander optisch der synchrone Sekundenwechsel und das Übereinstimmen der Uhrzeiten kontrolliert.

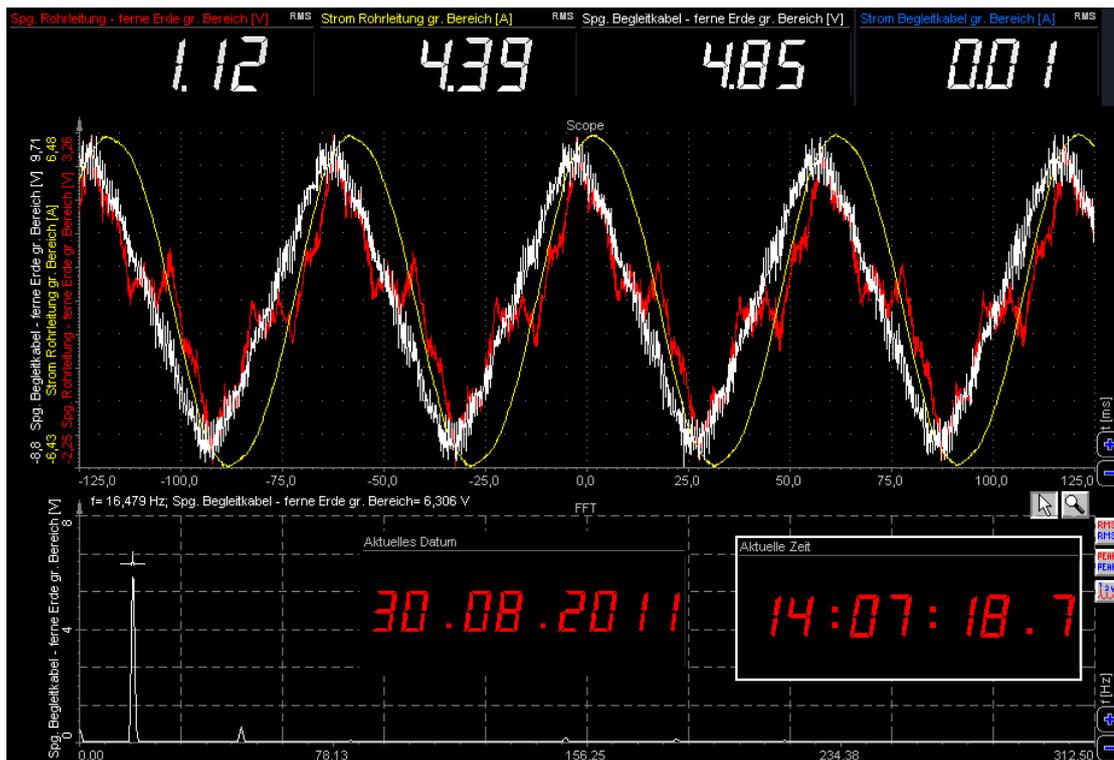


Abbildung 6.15: DEWESoft 7.0.4 b3 / Spannungen und Ströme entlang Rohrleitung und Begleitkabel

Die hochauflösende Abspeicherung der Daten musste ebenfalls parametrieren werden. Zur Späteren Reproduzierbarkeit wurde festgelegt, dass die Daten alle 250 MB in einer neuen Datei der Form „JJJJ_MM_TT_hhmmss“ abgespeichert werden.

Es wurde festgelegt, die Werte in einer sogenannten dynamischen Abtastrate von 10000 Samples pro Sekunde aufzuzeichnen. In der Software musste zusätzlich die Speicheroption „immer schnell“ festgelegt werden. Die Option „immer langsam“ hätte nur eine Aufzeichnung der Effektivwerte der Signale bedeutet.

Mit dem in Kapitel 6.3 erläuterten Messaufbau zur Erprobung dieser Messung wurde im Labor des Instituts für Elektrische Anlagen eine mehrstündige Aufzeichnung gefahren. Aus der resultierenden Datenmenge konnte so auf die bei der realen Messung erwartete Datenmenge hochgerechnet, und das Auslangen der Speicherkapazität des DEWE-3020 überprüft werden. Insgesamt wurde bei dieser Messung eine Datenmenge von 25 GB erfasst.

6.7 Frequenzselektive Einspeisung zur Ermittlung der Rohrleitungsimpedanz

Die frequenzselektive Einspeisung zur Ermittlung der Rohrleitungsimpedanzen wurde mit einem Prüfgerät zur elektrischen Diagnose der Marke Omicron, Typ CPC100 und der zugehörigen Koppereinheit zur Erfassung von Leitungsimpedanzen, Typ CP CU1 durchgeführt (Abbildung 6.16).

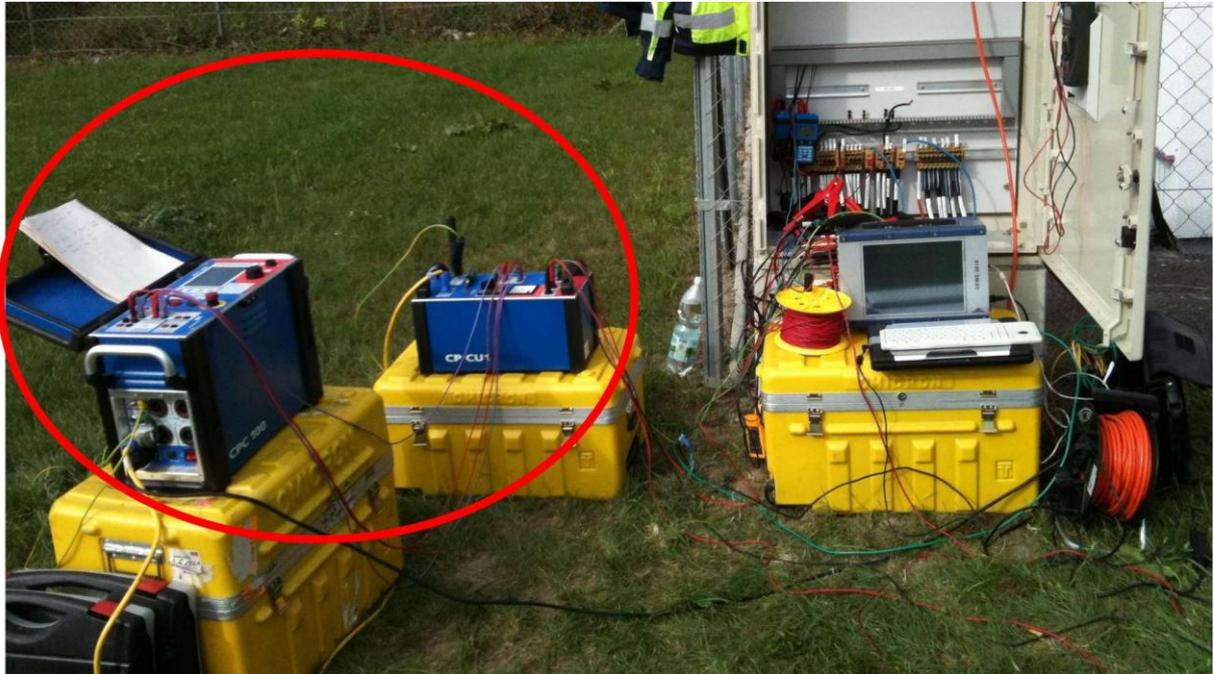


Abbildung 6.16: Frequenzselektive Einspeisung zur Ermittlung der Impedanzen der Gashochdruckleitung

Zur Ermittlung der ohmschen Querableitungen und der Erdkapazitäten wurde die Rohrleitung bei Kilometer 0,000 von der Erdungsanlage getrennt. Bei Kilometer 2,979 wurde die Überbrückung der Isolierkupplung entfernt. Somit war das Rohrleitungsstück zwischen Kilometer 0,000 bis Kilometer 2,979 von der restlichen Rohrleitung getrennt und über die Polyethylenhülle isoliert im Erdreich verlegt (Abbildung 6.17).

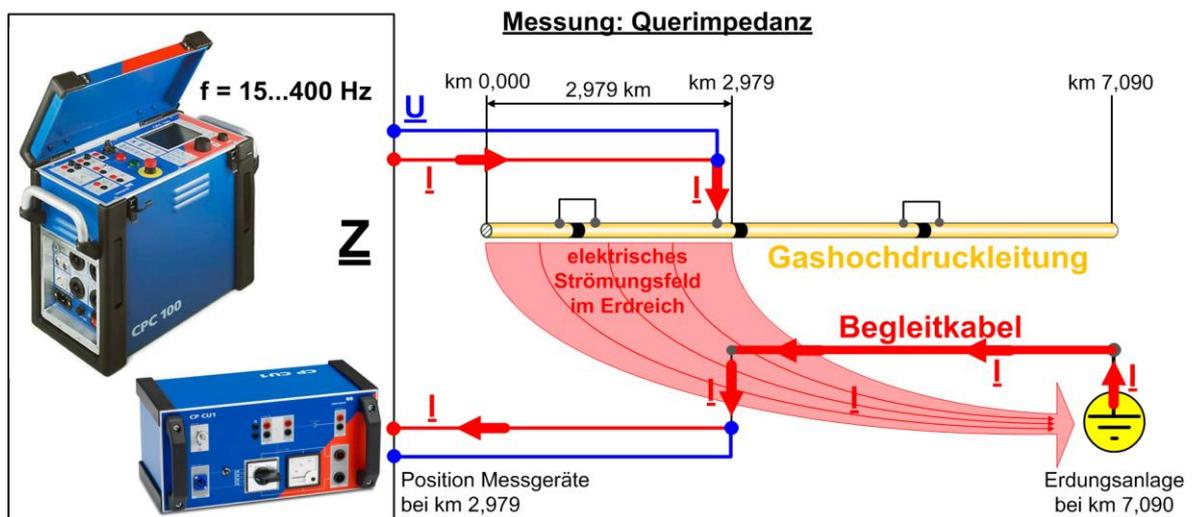


Abbildung 6.17: Schaltzustand zur Ermittlung der Querimpedanzen

Bei Kilometer 7,090 wurde die Erdungsanlage mit dem Begleitkabel verbunden. Somit konnte der eingespeiste Querstrom relativ niederohmig über Erdungsanlage und Begleitkabel zurück zum Messpunkt bei Kilometer 2,979 fließen (Abbildung 6.17).

Folgende Parameter mussten an CPC100 und CP CU1 vorgegeben werden:

Vorgegebene Frequenzen (f): 15 Hz / 50 Hz / 70 Hz / 90 Hz / 110 Hz / 130 Hz / 150 Hz / 170 Hz / 190 Hz / 210 Hz / 210 Hz / 230 Hz / 250 Hz / 400 Hz

mit: $\underline{i} = I_{\text{eff}} \cdot e^{j \cdot \varphi_i} = I_{\text{eff}} \angle \varphi_i$

Vorgegebener Strombetrag (I_{eff}): 20 A

Vorgegebener Stromwinkel (φ_i): 0 °

Dauer Einspeisung (t): bei jeder Frequenz → 300 s

Ermittelte Größen: zu jeder Frequenz → $\underline{U} = U_{\text{eff}} \angle \varphi_u / R (\Omega) / X (j\Omega)$

Bei Kilometer 0,000 und Kilometer 2,979 war jeweils eine hochauflösende Messung wie in Kapitel 6.6 beschrieben installiert. Dadurch war die Möglichkeit gegeben, kontrolliert in Zeitfenstern ohne relevante Beeinflussung durch die Bahnanlage einzuspeisen.

Zur Ermittlung der Längsimpedanzen wurde die Rohrleitung bei Kilometer 0,000 mit dem Begleitkabel verbunden. Bei Kilometer 2,979 blieb die Überbrückung der Isolierkupplung entfernt. Somit konnte die Schleife von der Rohrleitung bei Kilometer 2,979 über das Begleitkabel wie in Abbildung 6.18 dargestellt messtechnisch erfasst werden.

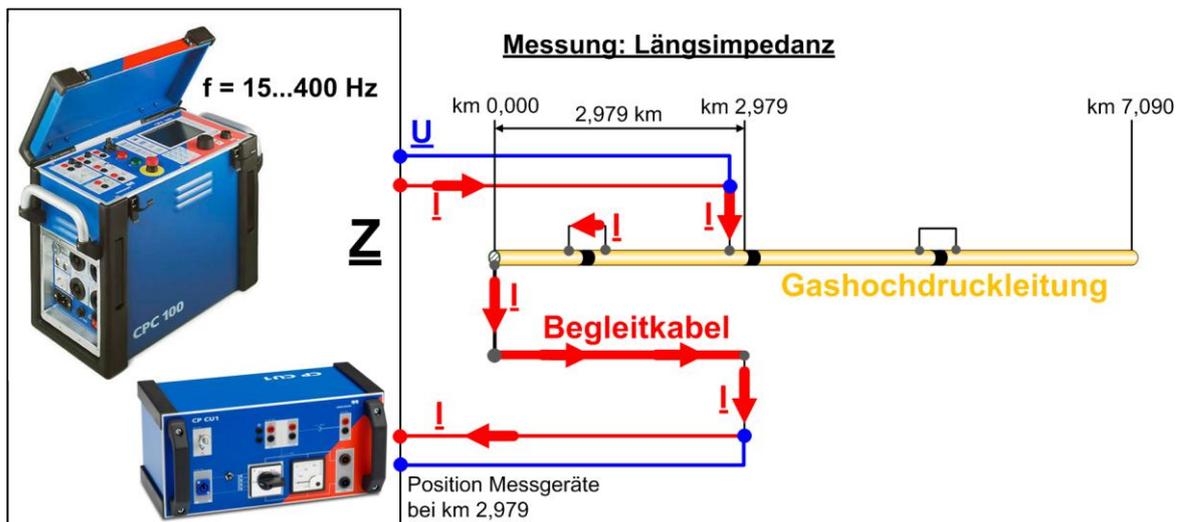


Abbildung 6.18: Schaltzustand zur Ermittlung der Längsimpedanzen

Die Parameter an CPC100 und CP CU1 zur Einspeisung blieben dieselben, wie bei der Messung zur Ermittlung der Querimpedanzen. Mithilfe der hochauflösenden Messung konnten ebenfalls Zeitfenster ohne Beeinflussung durch die Bahnanlage abgewartet werden.

6.8 Ermittlung des spezifischen Bodenwiderstands und des Ausbreitungswiderstands der Anlagenerder

Als spezifischen Erdwiderstand ρ_E bezeichnet man den spezifischen elektrischen Widerstand der Erde (Abbildung 6.19). Die Größe des spezifischen Erdwiderstands ist abhängig von der Bodenzusammensetzung (Bodenart und Bodenkörnung), dem Bodendruck, der Feuchtigkeit, der Temperatur und von der Bodenschichtung [8].

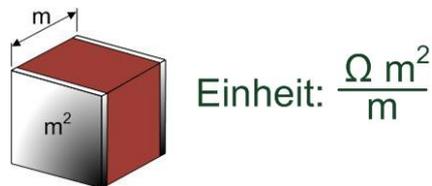


Abbildung 6.19: Spezifischer Erdwiderstand

Da das Erdreich im allgemeinen Fall inhomogen ist, ändern sich in horizontaler und in vertikaler Richtung die Bodenschichtungen bzw. der Feuchtigkeitsgehalt des Bodens (Grundwasserspiegel). Daher ändert sich mit der Bodenstruktur auch der spezifische Erdwiderstand ρ_E [8].

Eine theoretische Möglichkeit zur messtechnischen Ermittlung des spezifischen Erdwiderstandes wäre die Einspeisung eines Stromes in einem gewissen Punkt, und die Messung der Spannung nach Abbildung 6.20 [32].

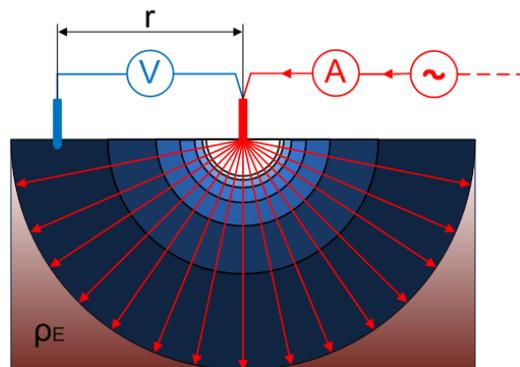


Abbildung 6.20: Punkteinspeisung des Stromes, Messung der Spannung

Für die messtechnisch ermittelte Spannung gilt:

$$U = \frac{\rho_E \cdot I}{2 \cdot r \cdot \pi}$$

mit

- U messtechnisch ermittelte Spannung (V)
- I eingespeister Strom (A)
- r Abstand der Stromspeisenden Elektrode zur Spannungssonde (m)
- ρ_E spezifischer Bodenwiderstand (Ωm)

Da der Abstand der stromeinspeisenden Elektroden sehr viel größer als der Sondenabstand zur Spannungsmessung sein muss, weil ansonsten keine messbaren Spannungen zustande kämen, ist diese Messung in der Praxis nur schwierig zu implementieren.

Eine geeigneterere Methode zur messtechnischen Ermittlung des spezifischen Bodenwiderstands stellt das Prinzip der Viersondenmethode dar (Abbildung 6.21) [32].

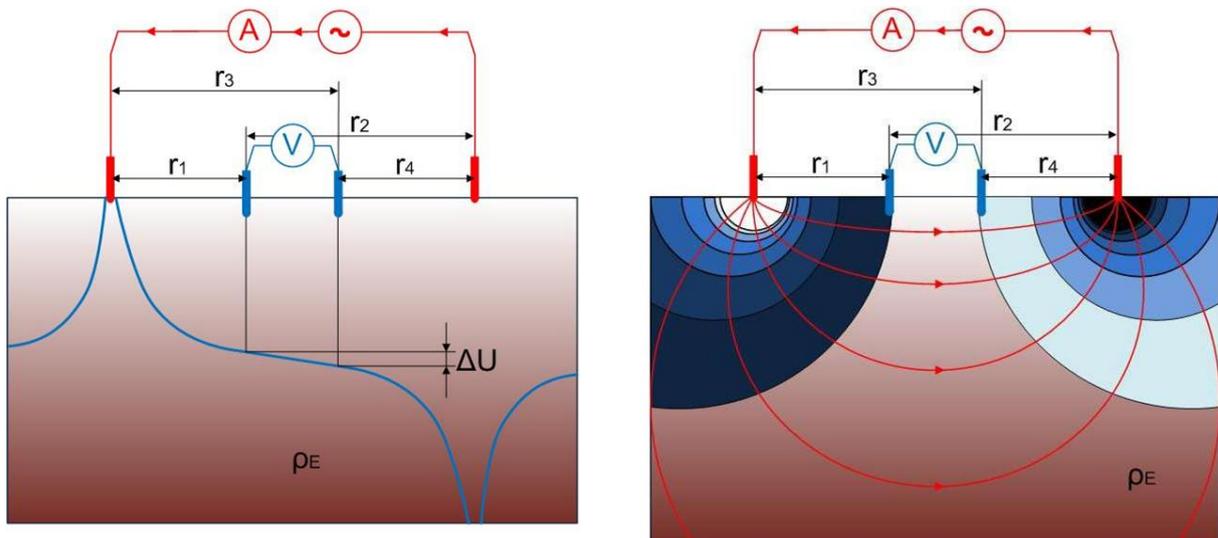


Abbildung 6.21: Prinzip der Viersondenmethode

Hierbei muss der Abstand der stromeinspeisenden Elektroden nichtmehr so groß sein. Im Erdreich wird ein elektrisches Strömungsfeld erzeugt, und an der Erdoberfläche wird zwischen zwei Punkten dieses Strömungsfeldes eine Potentialdifferenz abgegriffen. Die so messtechnisch erfasste Bodenschicht ist von den Eindringtiefen des Strömungsfeldes in das Erdreich, und somit vom Abstand der Stromspeisenden Elektroden abhängig.

Für den spezifischen Bodenwiderstand ρ_E gilt: [32]

$$\rho_E = \frac{2 \cdot \pi \cdot \Delta U}{I} \left(\frac{1}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4}} \right)$$

mit

- ρ_E spezifischer Bodenwiderstand (Ωm)
- ΔU messtechnisch ermittelte Spannung (V)
- I eingespeister Strom(A)
- r_1 Abstand der Stromspeisenden Elektrode 1 zur Spannungssonde 1 (m)
- r_2 Abstand der Stromspeisenden Elektrode 2 zur Spannungssonde 2 (m)
- r_3 Abstand der Stromspeisenden Elektrode 1 zur Spannungssonde 2 (m)
- r_4 Abstand der Stromspeisenden Elektrode 2 zur Spannungssonde 1 (m)

Bei der in dieser Diplomarbeit durchgeführten Messung zur Ermittlung des spezifischen Bodenwiderstandes wurde das Erdungsmessgerät der Marke Chauvin Arnoux, Typ C.A 6472 verwendet. Mit diesem Messgerät kann u. A. die gängige Viersondenmethode nach Wenner angewendet werden. Nach dieser Methode wurden bei der Messung vier Erdspeie in

gleichen Abständen r entlang einer Geraden angeordnet (Abbildung 6.22). Die Anschlüsse E und H für die Elektroden dienen zur Einspeisung des Wechselstroms, die Sondenanschlüsse ES und S zum Abgreifen der Potentialdifferenz ΔU .

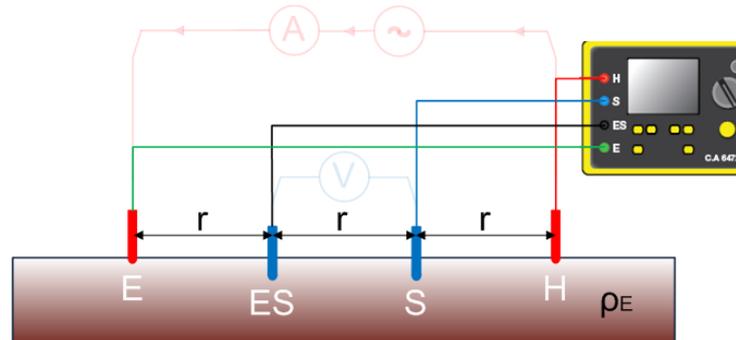


Abbildung 6.22: Viersondenmethode zur Ermittlung des spezifischen Bodenwiderstandes nach Wenner

Bei der Wenner Methode wird der spezifische Bodenwiderstand bis zu einer Tiefe erfasst, die ungefähr dem Abstand r zwischen den Erdspeissen entspricht. Durch mehrere Messungen mit variierendem Abstand r kann auf die Struktur der Bodenschichtung geschlossen werden.

Der Ausbreitungswiderstand eines Anlagenerders setzt sich aus dem Widerstand der Metallelektrode (kleinster Anteil), aus dem Übergangswiderstand Erder-Erdreich (Stromaufteilung auf Parallelschaltung vieler kleiner Berührstellen) und aus dem Widerstand des Erdreichs zusammen. Der elektrisch wirksame Querschnitt der Erde ist in unmittelbarer Umgebung des Erders klein und wird mit zunehmendem Abstand größer, der Widerstand des Erdreichs verhält sich hierzu umgekehrt proportional. Somit kann die Erde ab ausreichender Entfernung (Erfahrungswert 20 m) [33] als elektrischer Leiter betrachtet werden.

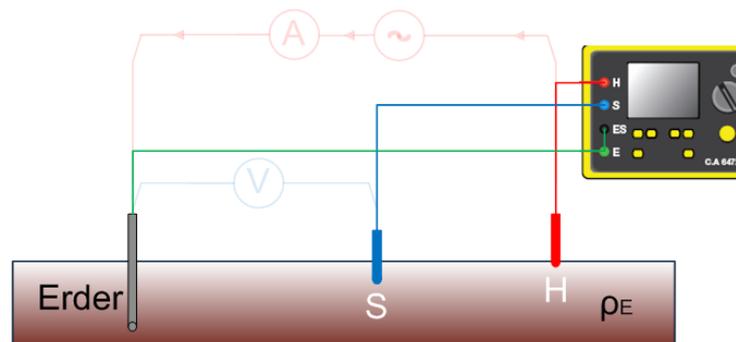


Abbildung 6.23: Dreipunktmethode zur Ermittlung des Ausbreitungswiderstands der Erder

Der Ausbreitungswiderstand der Erder wurde ebenfalls mit dem Erdungsmessgerät der Marke Chauvin Arnoux, Typ C.A 6472 mittels Dreipunktmessung (Abbildung 6.23) ermittelt. Hierbei musste darauf geachtet werden, die Elektroden zur Stromspeisung bzw. die Spannungssonden außerhalb des Spannungstrichters der Anlagenerder zu positionieren.

7 Messergebnisse

7.1 Spannungen und Ströme entlang Rohrleitung und Begleitkabel

Wie in Kapitel 6.2 detailliert erläutert, wurden die Gashochdruckleitung, die zwei Anlagenerder am Anfang und am Ende der Gashochdruckleitung und das mit der Gashochdruckleitung mitgeführte Begleitkabel unter verschiedenen elektrischen Schaltzuständen betrieben, und die jeweiligen Auswirkungen dieser unterschiedlichen Schaltzustände auf die Parameter „Spannungen Rohrleitung gegen ferne Erde“, „Spannungen Begleitkabel gegen ferne Erde“, „Ströme in der Rohrleitung“, und „Ströme im Begleitkabel“ untersucht.

Da die folgenden Auswertungen dieser Parameter immer in Bezug auf die unterschiedlichen Schaltzustände gesetzt werden, sind diese in folgender Abbildung 7.1 nochmals dargestellt.

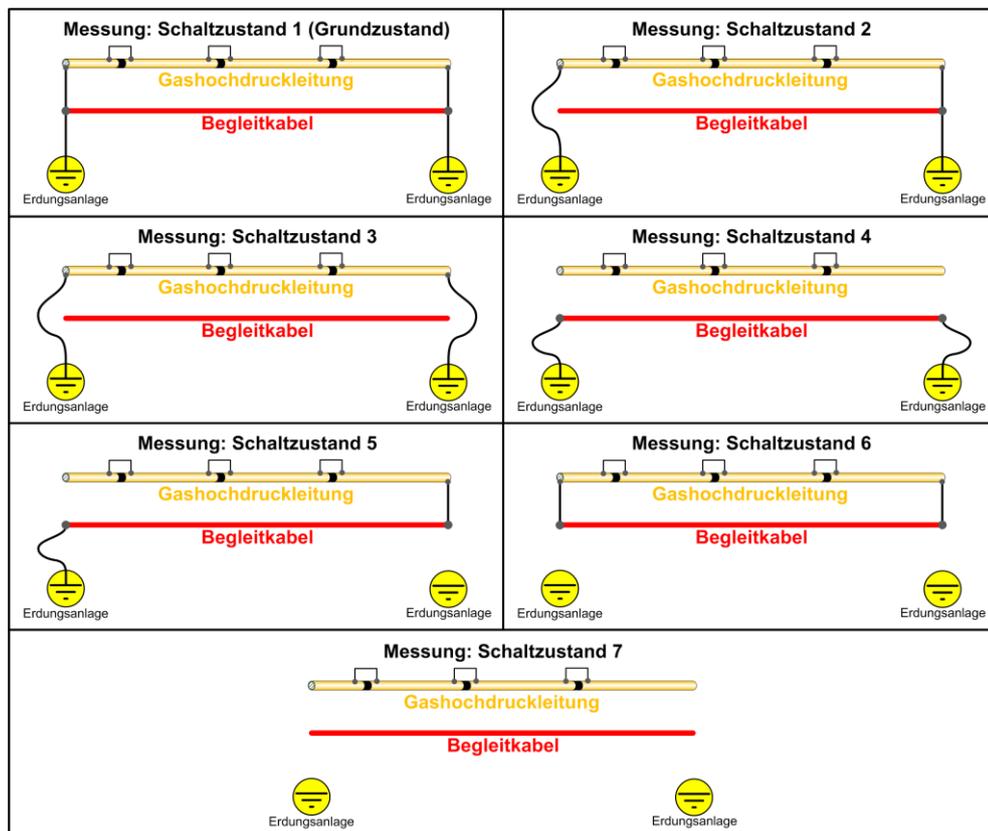


Abbildung 7.1: Schaltzustände, messtechnische Erfassung der Wirkung von Begleitkabel und Erdungsanlagen

Zeitgleich wurden für die Dauer der gesamten Messung wie in Kapitel 6.4 detailliert erläutert die beeinflussend wirkenden Ströme des parallel verlaufenden Bahnsystems erfasst. In den betrachteten Bahnabschnitt (Abbildung 6.1) einfahrende Züge verursachten bei Beschleunigungsvorgängen (z.B. beim Ausfahren aus den Bahnhöfen) über Zeiträume von einigen Minuten erhebliche Ströme. Es wurden Effektivwerte von bis zu 900 A (bei $f = 16,7$ Hz) erfasst.

Erste Vergleiche der Signalverläufe der beeinflussend wirkenden Ströme mit den Signalverläufen der in der betrachteten Gashochdruckleitung induzierten Spannungen bzw. der daraus resultierenden Ströme in der Gashochdruckleitung zeigten immer den eindeutigen, zeitsynchronen Zusammenhang zwischen beeinflussendem und beeinflussten System (Abbildung 7.2).



Abbildung 7.2: Verlauf des beeinflussenden Stroms im Bahnsystem im Vergleich mit dem Spannungsverlauf der Gashochdruckleitung gegen ferne Erde

Die hochauflösende Erfassung (Kapitel 6.6) der Spannungen und Ströme entlang der Rohrleitung erlaubte auch eine nachträgliche Betrachtung der Frequenzspektren von in der Gashochdruckleitung induzierten Signalen (Abbildung 7.3).

Es wurde ersichtlich, dass die Betriebsfrequenz des Bahnsystems (16,7 Hz) auch den überwiegenden Anteil des induzierten, harmonischen Signals in der Gashochdruckleitung ausmachte.

Sehr kleine Anteile einer Frequenz von 50 Hz könnten als die dritte harmonische Oberschwingung des Bahnsystems (z.B. durch diverse Leistungselektronik verursacht), aber auch als ohmsche bzw. induktive Interferenzen aus dem Versorgungsnetz (50 Hz) gedeutet werden (Abbildung 7.3).

Ebenfalls wurden zum Teil auch sehr geringe Anteile einer Frequenz von 150 Hz und einer Frequenz von 450 Hz erfasst. Hinsichtlich des Versorgungsnetzes (50 Hz) würden diese Anteile den dritten bzw. neunten Oberschwingungsanteil bedeuten. Hinsichtlich des Bahnsystems (16,7 Hz) würden diese Anteile den neunten bzw. siebenundzwanzigsten Oberschwingungsanteil bedeuten. Da diese Anteile zu den relevanten Betrachtungszeiten

weniger als ein Prozent des Grundschwingungsanteils (16,7 Hz) ausmachten, konnten diese Erscheinungen vernachlässigt werden.

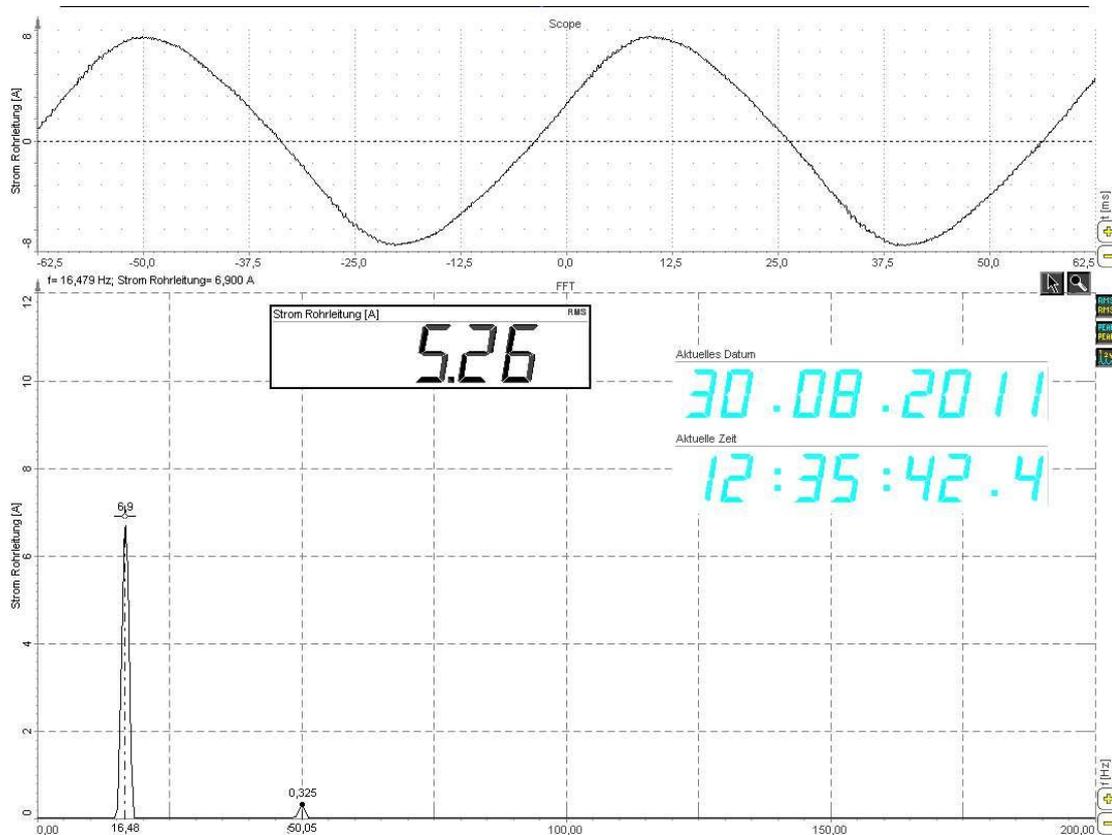


Abbildung 7.3: Sinusverlauf und Frequenzspektrum des Stroms in der Gashochdruckleitung

Für den Zeitraum der Herstellung eines Schaltzustands nach Abbildung 7.1 wurde jeweils ein Zeitfenster des Stroms im Bahnsystem (Abbildung 7.2) mit relevanten beeinflussenden Strömen ausgewählt. Zum selben Zeitpunkt wurden aus den Aufzeichnungen in den einzelnen Messpunkten an der Gashochdruckleitung dieselben Zeitfenster für die Effektivwerte der Spannungen von der Gashochdruckleitung gegen ferne Erde ausgewählt, und für die jeweiligen Schaltzustände wurden nach

$$\overline{I_{Beff}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_{Beff_i} \quad \text{bzw.}$$

$$\overline{U_{RLeff}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{RLeff_i}$$

mit

$\overline{I_{Beff}}$	Mittelwert der Ströme im Bahnsystem (A)
$I_{Beff_1}, \dots, I_{Beff_n}$	Ströme im Bahnsystem (A)
$\overline{U_{RLeff}}$	Mittelwert der Spannungen Rohrleitung <i>gegen ferne Erde</i> (V)
$U_{RLeff_1}, \dots, U_{RLeff_n}$	Spannungen Rohrleitung gegen ferne Erde (V)
n	Anzahl der sekundlichen Abtastungen im betrachteten Zeitfenster

die Mittelwerte gebildet.

Um einen Vergleich der Messergebnisse für die unterschiedlichen Schaltzustände untereinander zu ermöglichen, wurden diese nach

$$U_{RLno} = \frac{I_{Bmax}}{I_{Beff}} \cdot \overline{U_{RLeff}}$$

mit

I_{Bmax}	maximaler Betriebsstrom im Bahnsystem (Kapitel 6.4) $I_{Bmax} = 1058$ (A)
$\frac{U_{RLno}}{I_{Bmax}}$	Spannung Rohrleitung gegen ferne Erde auf I_{Bmax} normiert (V)
$\frac{I_{Bmax}}{I_{Beff}}$	Mittelwert der Ströme im Bahnsystem (A)
$\frac{U_{RLno}}{U_{RLeff}}$	Mittelwert der Spannungen Rohrleitung gegen ferne Erde (V)

für jeden Schaltzustand auf den maximal auftretenden Betriebsstrom (Kapitel 6.4) im Oberleitungssystem der Bahnstrecke normiert.

Die Ergebnisse dieser Auswertung für die Spannungen der Gashochdruckleitung gegen ferne Erde über die betrachtete Gesamtlänge der Rohrleitung sind in folgender Abbildung 7.4 dargestellt.

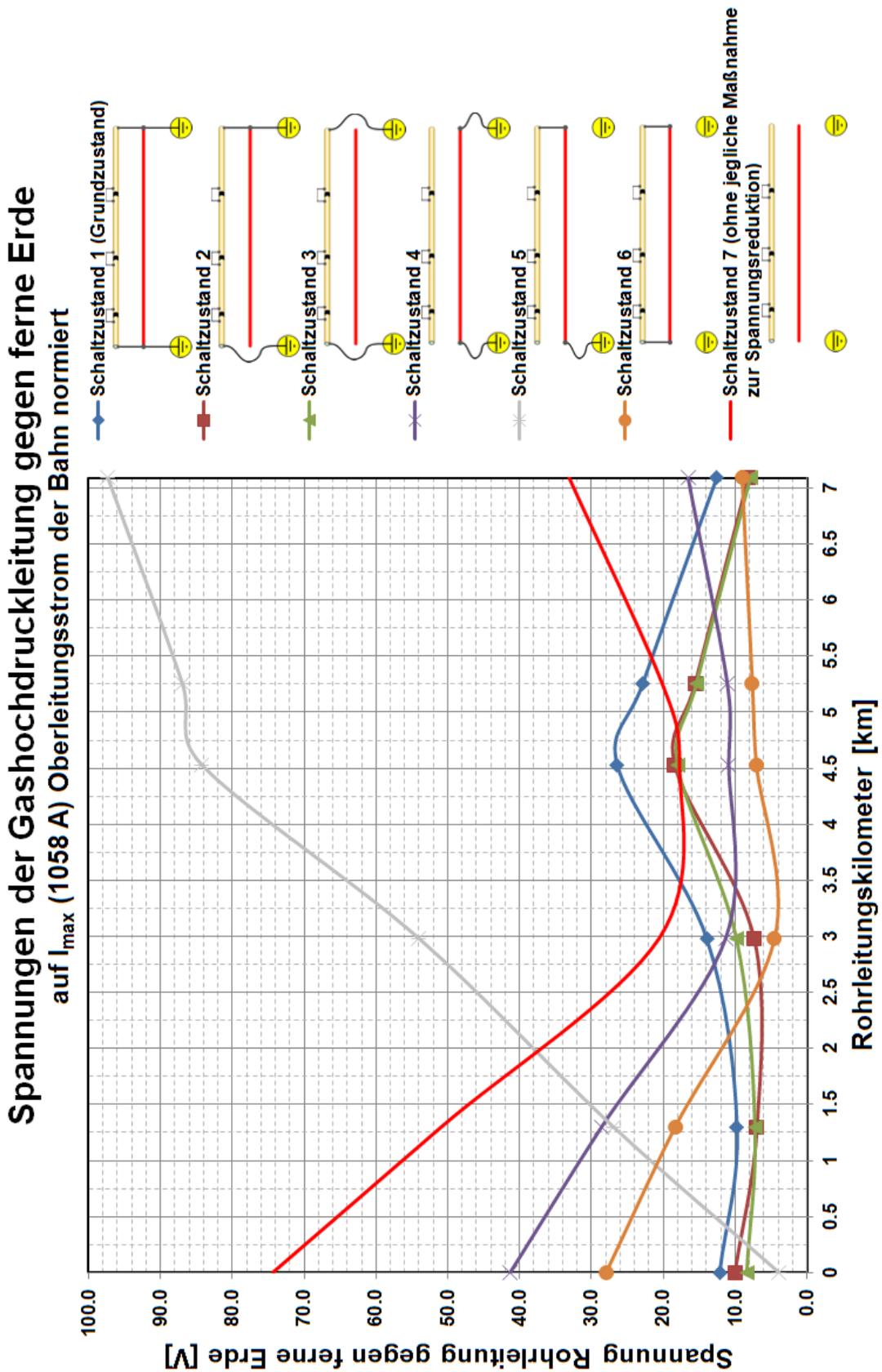


Abbildung 7.4: Normierte Spannungen der Gashochdruckleitung gegen ferne Erde während der unterschiedlichen Schaltzustände

Für die Veranschaulichung der Wirkung der jeweiligen Verschaltung von Gashochdruckleitung, Erdungsanlagen und Begleitkabel wurde festgestellt, dass Schaltzustand 7 jener Zustand ohne jegliche bauliche Maßnahme zur Reduktion der Rohrleitungspotentiale darstellt (Abbildung 7.1). In diesem Sinne wurde für die unterschiedlichen Schaltzustände ein Rohrleitungsreduktionsfaktor definiert. Hinsichtlich dessen wurde dem Schaltzustand 7 über die betrachtete Gesamtlänge ein Rohrleitungsreduktionsfaktor von 1 zugeordnet. Alle anderen Zustände wurden in Bezug auf diesen Zustand ohne jegliche bauliche Maßnahme zur Spannungsreduktion gesetzt (Abbildung 7.5).

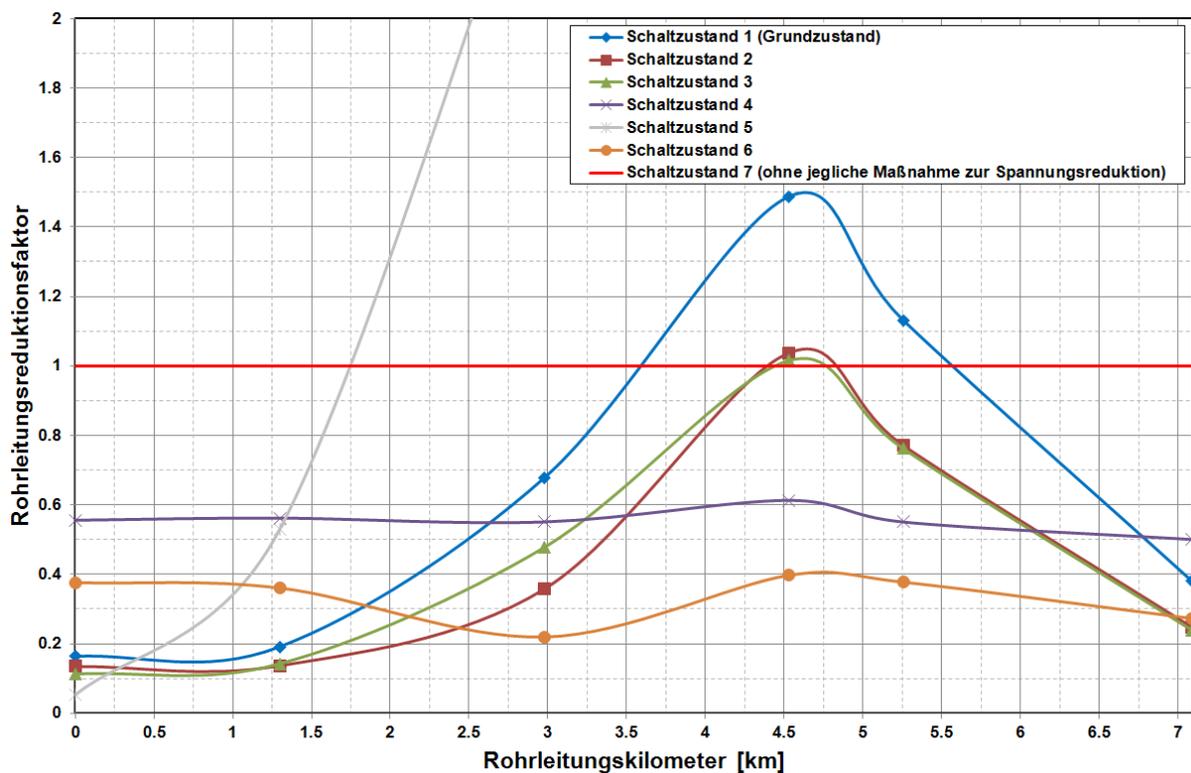


Abbildung 7.5: Rohrleitungsreduktionsfaktoren der unterschiedlichen Schaltzustände für die Spannungen der Rohrleitung gegen ferne Erde

Aus baulichen Gründen konnten die Ströme in der Gashochdruckleitung nicht an allen Messpunkten des 7,090 Kilometer langen Abschnittes erfasst werden. Es konnten lediglich die Ströme von Rohrleitungskilometer 0,000 bis zu Rohrleitungskilometer 4,531 an insgesamt vier über diese Länge verteilten Messpunkten erfasst werden (Abbildung 6.4).

Die Auswertung der Messergebnisse für die Ströme in der Gashochdruckleitung erfolgte nach demselben Prinzip, wie für die Spannungen der Gashochdruckleitung gegen ferne Erde. Wie eine Betrachtung der unterschiedlichen elektrischen Schaltzustände nach Abbildung 7.1 schon vermuten lässt, ist es nur während der Schaltzustände 1, 2, und 3 zu relevanten messbaren Stromflüssen in der Gashochdruckleitung gekommen.

Die Stromflüsse im erfassten Teil der Gashochdruckleitung sind in der nachfolgenden Abbildung 7.6 dargestellt. Es wird ersichtlich, dass diese über die Länge von 4,531 Kilometer

in Längsrichtung der Gashochdruckleitung fließenden Ströme relativ konstante Werte besitzen, was auf ein Weiterführen dieser Konstanz bis zum Ende des betrachteten Abschnitts bei Kilometer 7,090 schließen lässt.

Ströme in der Gashochdruckleitung
auf I_{max} (1058 A) Oberleitungsstrom der Bahn normiert

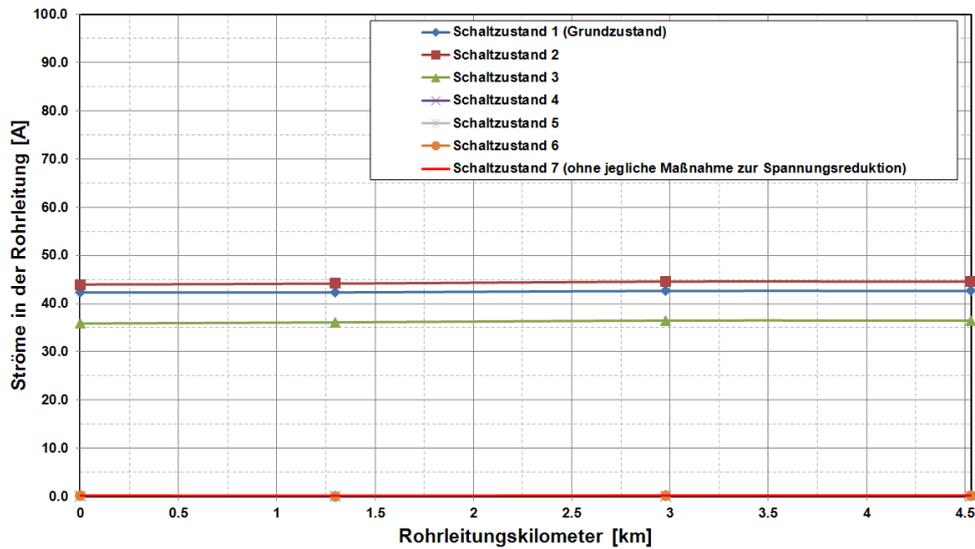


Abbildung 7.6: Normierte Ströme in der Gashochdruckleitung während der unterschiedlichen Schaltzustände

Wie die Spannungen der Gashochdruckleitung gegen ferne Erde wurden auch die Spannungen des Begleitkabels gegen ferne Erde mit Ausnahme eines Messpunkts bei Kilometer 5,256 (Tabelle 6.1) erfasst und ausgewertet. Die Ergebnisse dieser Auswertung sind in nachfolgender Abbildung 7.7 dargestellt.

Spannungen des Begleitkabels gegen ferne Erde
auf I_{max} (1058 A) Oberleitungsstrom der Bahn normiert

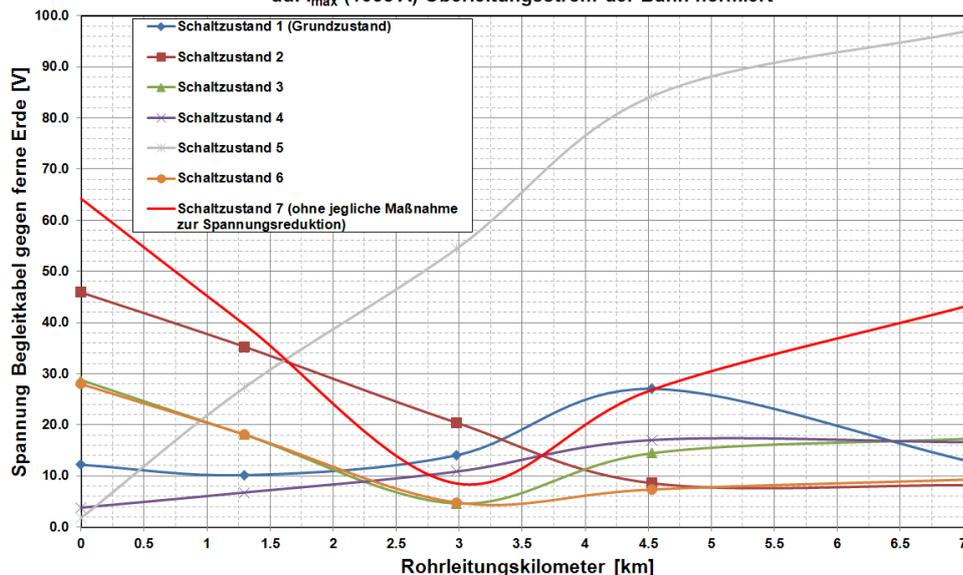


Abbildung 7.7: Normierte Spannungen des Begleitkabels gegen ferne Erde während der unterschiedlichen Schaltzustände

Die Ströme im Begleitkabel wurden an denselben Messpunkten wie die Ströme in der Gashochdruckleitung von Rohrleitungskilometer 0,000 bis zu Rohrleitungskilometer 4,531 erfasst (Abbildung 6.4), und wie die Ströme in der Gashochdruckleitung ausgewertet.

Zu relevanten messbaren Stromflüssen im Begleitkabel ist es nur während der Schaltzustände 1 und 4 gekommen.

Die Stromflüsse im erfassten Teil des Begleitkabels sind in der nachfolgenden Abbildung 7.8 dargestellt. Es wird entsprechend der Ströme in der Gashochdruckleitung ersichtlich, dass diese über die Länge von 4,531 Kilometer in Längsrichtung des Begleitkabels fließenden Ströme relativ konstante Werte besitzen, was ebenfalls auf ein Weiterführen dieser Konstanz bis zum Ende des betrachteten Abschnitts bei Kilometer 7,090 schließen lässt.

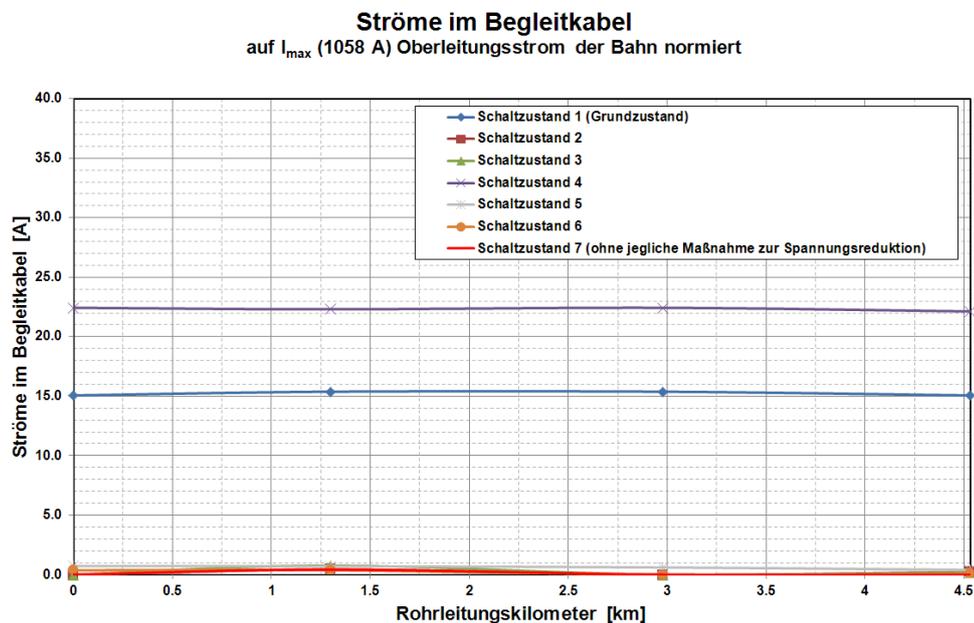


Abbildung 7.8: Normierte Ströme im Begleitkabel während der unterschiedlichen Schaltzustände

7.2 Rohrleitungsimpedanzen

Die Längs- und Querparameter der Rohrleitungsimpedanzen wurden mit der in Kapitel 6.7 erläuterten frequenzselektiven Einspeisung ermittelt. Die Messmethode zur Ermittlung der Ausbreitungswiderstände der Anlagenerder wurde in Kapitel 6.8 erläutert.

Da die Längs- und Querparameter der Rohrleitungsimpedanzen messtechnisch nur für einen Teilabschnitt von 2,979 Kilometer (Kapitel 6.7) ermittelt werden konnten, wurden diese zur besseren Vergleichbarkeit mit den theoretischen Ergebnissen aus Kapitel 5 nach

$$R_L = \frac{R_{Lgem}}{l_{gem}} \cdot l_{ges} ; X_L = \frac{X_{Lgem}}{l_{gem}} \cdot l_{ges} ; R_Q = \frac{R_{Qgem}}{l_{ges}} \cdot l_{gem} ; X_Q = \frac{X_{Qgem}}{l_{ges}} \cdot l_{gem}$$

mit

- l_{gem} Länge des messtechnisch erfassten Rohrleitungsabschnitts $l_{gem} = 2,979$ (km)
- l_{ges} Länge des gesamten betrachteten Rohrleitungsabschnitts $l_{ges} = 7,090$ (km)
- R_{Lgem} ohmscher Längswiderstand gemessen für 2,979 km Rohrleitung (Ω)
- X_{Lgem} induktive Längsreaktanz gemessen für 2,979 km Rohrleitung ($j\Omega$)
- R_{Qgem} ohmsche Querableitung gemessen für 2,979 km Rohrleitung (Ω)
- X_{Qgem} kapazitive Querreaktanz gemessen für 2,979 km Rohrleitung ($j\Omega$)
- R_L ohmscher Längswiderstand umgerechnet auf 7,090 km Rohrleitung (Ω)
- X_L induktive Längsreaktanz umgerechnet auf 7,090 km Rohrleitung ($j\Omega$)
- R_Q ohmsche Querableitung umgerechnet auf 7,090 km Rohrleitung (Ω)
- X_Q kapazitive Querreaktanz umgerechnet auf 7,090 km Rohrleitung ($j\Omega$)

auf die Gesamtlänge von 7,090 Kilometer des betrachteten Rohrleitungsabschnitts der Gashochdruckleitung umgerechnet.

Da der ohmsche Längswiderstand während der Messung mit Rückleitung über das Begleitkabel ermittelt wurde (Kapitel 6.7), der ohmsche Anteil des Begleitkabels bei der theoretischen Ermittlung des ohmschen Längswiderstands der Rohrleitung (Kapitel 5.2) aber nicht berücksichtigt wurde, wurde dieser in einer zusätzlichen Auswertung vom Messergebnis abgezogen.

Die Messergebnisse und das Ergebnis aus der theoretischen Berechnung für den ohmschen Längswiderstand der Rohrleitung sind in folgender Abbildung 7.9 dargestellt. Der frequenzabhängige Anstieg des ohmschen Längswiderstands ist mit dem Effekt der Stromverdrängung zu erklären.

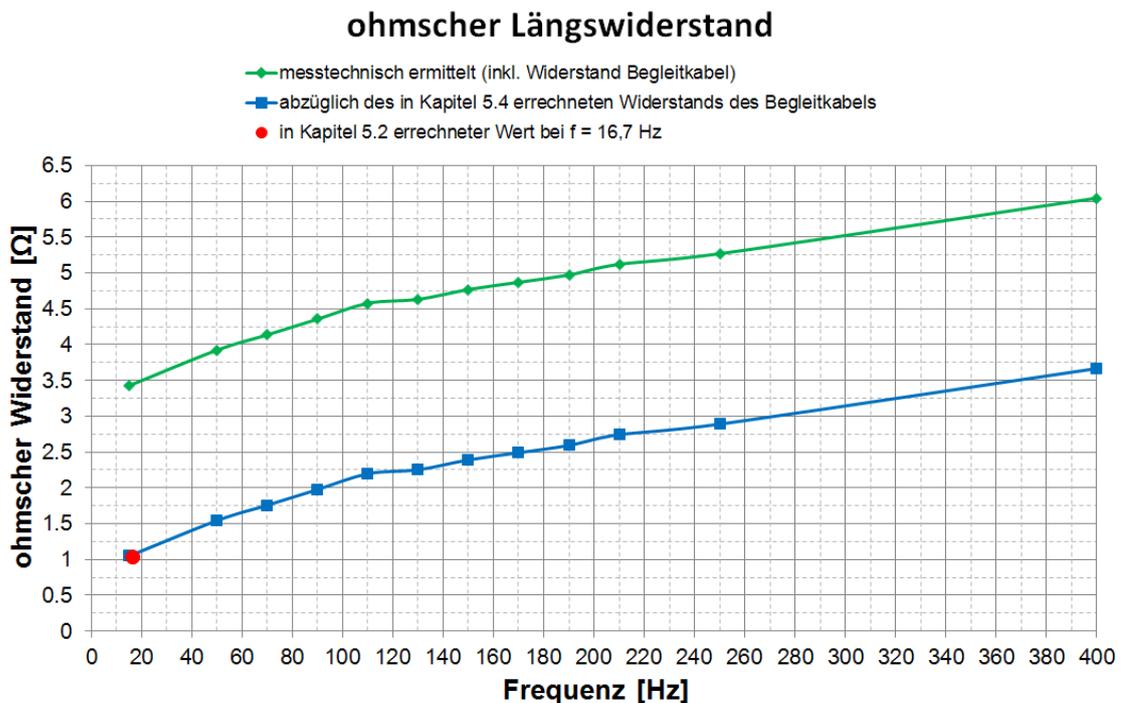


Abbildung 7.9: Ohmscher Längswiderstand, messtechnisch und theoretisch ermittelt

Für die Selbstreaktanz der Rohrleitung wurde in Kapitel 5.2 ein Wert berechnet, der sich für die Schleife, welche die Rohrleitung mit Erdrückleitung bildet, ergeben würde. Zusätzlich wurde für diesen Anteil der Längsinduktivität in Kapitel 5.2 auch die Rückleitung über das Begleitkabel berücksichtigt. Die Messung der Längsreaktanzen erfolgte mit Rückleitung über das Begleitkabel (Abbildung 6.18).

In folgender Abbildung 7.10 sind die Ergebnisse dieser Berechnung und die Ergebnisse der Messung für die induktive Längsreaktanz und die Längsinduktivitäten einander gegenübergestellt.

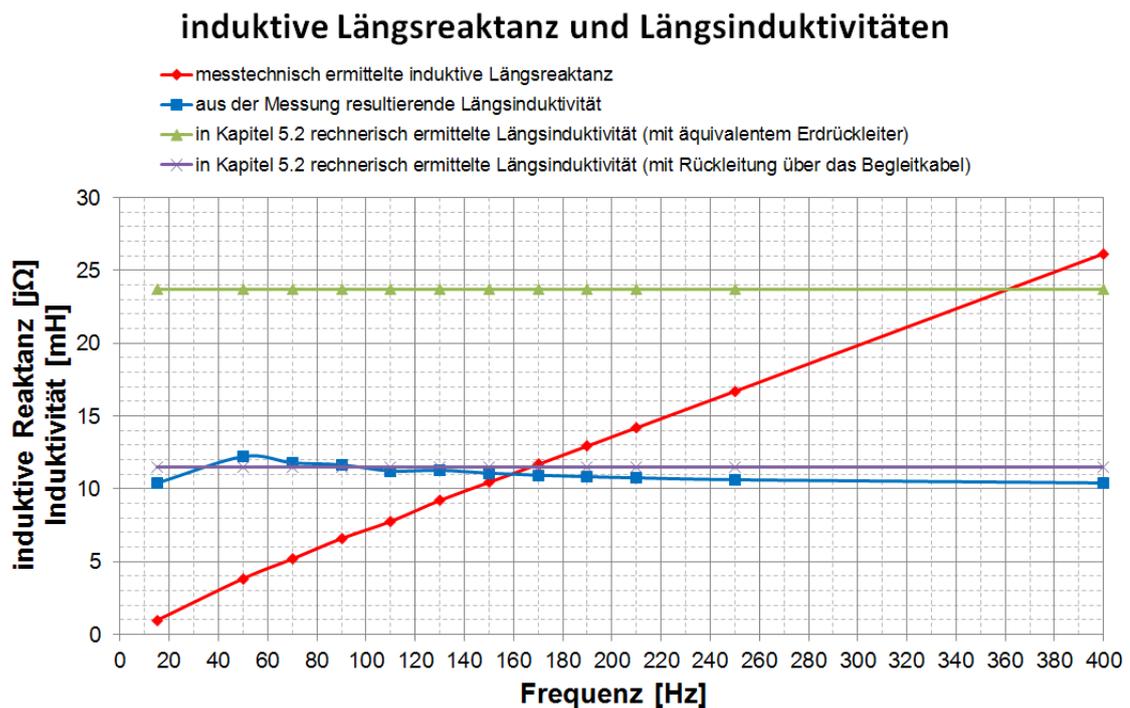


Abbildung 7.10: Induktive Längsreaktanz und Längsinduktivitäten, messtechnisch und theoretisch ermittelt

Bei der frequenzselektiven Einspeisung in die isolierte Rohrleitung zur Ermittlung der Querimpedanzen (Abbildung 7.16) zeigte sich beim Betrachten der aufgezeichneten Längsströme zu diesem Zeitpunkt, dass mit zunehmender Frequenz die Querableitung der Ströme nichtmehr regelmäßig über die betrachtete Rohrleitungslänge stattfand. Vielmehr konzentrierten sich diese Stromdichten der Querableitung ab Frequenzen > 100 Hz nur mehr auf einen Teilbereich der Rohrleitung in Richtung Einspeisepunkt (Abbildung 7.11).

Dieser Effekt kann mit dem Ansteigen der wirkenden Längsimpedanzen und der gleichzeitigen Abnahme der Querimpedanzen mit zunehmender Frequenz erklärt werden. Allgemein kann gesagt werden, dass diese Messung nur für vielfach größere Querimpedanzen im Verhältnis zu den Längsimpedanzen $X_Q \gg X_L$ ($\approx 100:1$) Gültigkeit hat.

Anhand der Messergebnisse der Datalogger für die Längsstromaufteilung (Abbildung 7.11) während der frequenzselektiven Einspeisung wurden für die weiteren Auswertungen der Querimpedanzen nur mehr die Ergebnisse für die Frequenzen 15 Hz, 50 Hz, und 70 Hz herangezogen. Hier fand die Verteilung der Querströme noch annähernd linear über die

Rohrleitungslänge statt. Messergebnisse für Frequenzen > 70 Hz wurden nicht weiter betrachtet.

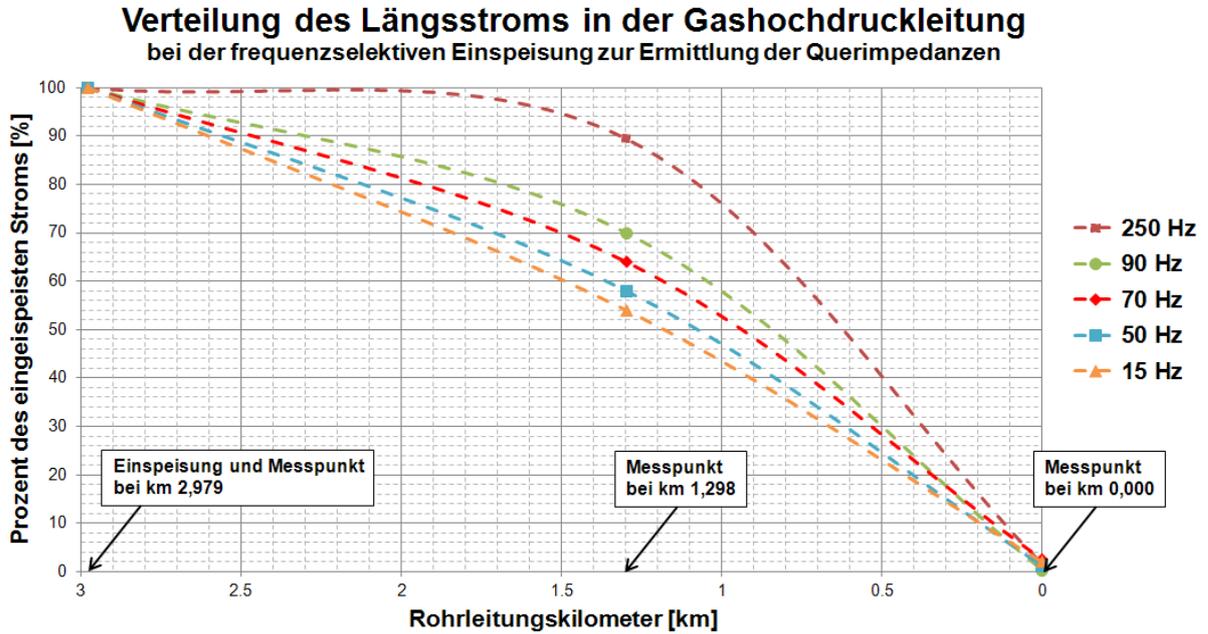


Abbildung 7.11: Frequenzabhängige Verteilung der Längsströme entlang der Rohrleitung bei der Einspeisung zur Ermittlung der Querimpedanzen

In der folgenden Abbildung 7.12 sind die Messergebnisse für die ohmsche Querableitung und dem daraus resultierenden Umhüllungswiderstand der mit Polyethylen isolierten Rohrleitung dargestellt.

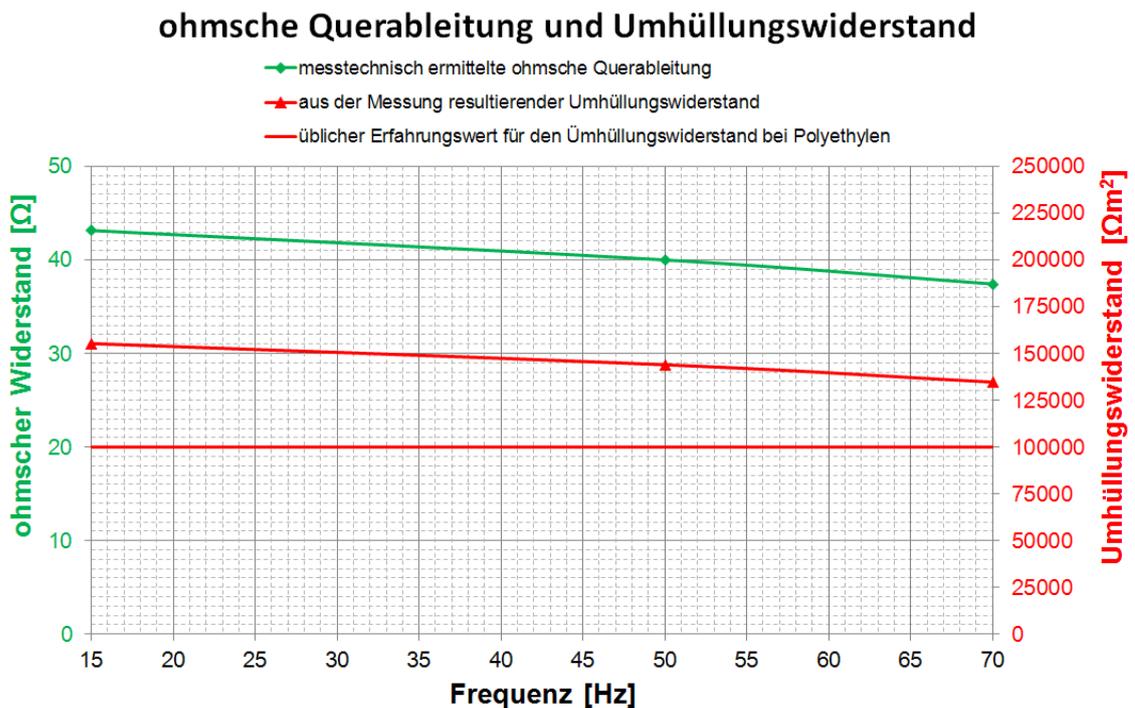


Abbildung 7.12: Ohmsche Querableitung und Umhüllungswiderstand

In der folgenden Abbildung 7.13 sind die Messergebnisse für die kapazitive Querreaktanz und der daraus resultierenden Erdkapazität der mit Polyethylen isolierten Rohrleitung dargestellt.

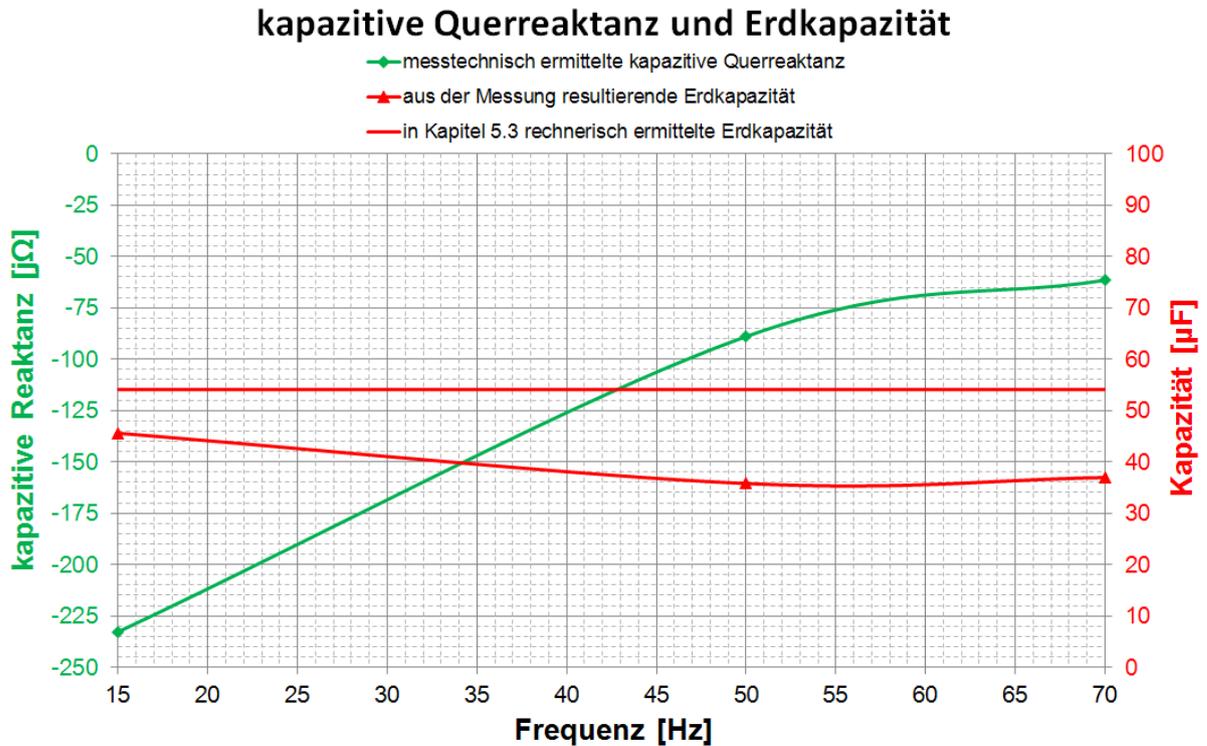


Abbildung 7.13: Kapazitive Querreaktanz und Erdkapazität

Für die Ausbreitungswiderstände R_A der beiden Anlagenerder zu Beginn und am Ende des betrachteten Rohrleitungsabschnitts wurden anhand der in Kapitel 6.8 erläuterten Messung folgende Werte ermittelt:

- Anlagenerder bei Rohrleitungskilometer 0,00: $R_A = 0,26 \text{ } (\Omega)$
- Anlagenerder bei Rohrleitungskilometer 7,09: $R_A = 0,23 \text{ } (\Omega)$

Die Anlagenerder waren als Horizontalerder in Form von verzinkten Stahlbändern gegeben. In der Ferne wurden diese Stahlbänder in Trafostationen jeweils mit der Nullung des Niederspannungsnetzes verbunden.

Für den spezifischen Bodenwiderstand ρ_E wurde bei Messungen an mehreren Stellen entlang der Rohrleitung ein durchschnittlicher Wert von $\rho_E \approx 110 \text{ } (\Omega\text{m})$ ermittelt.

8 Diskussion

8.1 Wirkung von Begleitkabel und Erdungsanlagen

Hinsichtlich der Verläufe der Spannungen gegen ferne Erde (Abbildung 7.4) kann aufgrund der stark spannungsanhebenden Wirkung Schaltzustand 5 (Abbildung 7.1) für weitere Betrachtungen ausgeschlossen werden.

Vergleicht man nun die übrigen Verläufe der Spannungen gegen ferne Erde mit den Verläufen der Ströme in der Rohrleitung (Abbildung 7.6), wird Folgendes ersichtlich:

Es kann zwischen zwei Charakteristiken für die Spannungsverläufe unterschieden werden. Die Spannungsverläufe der Schaltzustände, welche einen relevanten Stromfluss in der Rohrleitung zufolge haben und jene Spannungsverläufe ohne relevanten Stromfluss in der Rohrleitung (Abbildung 8.1).

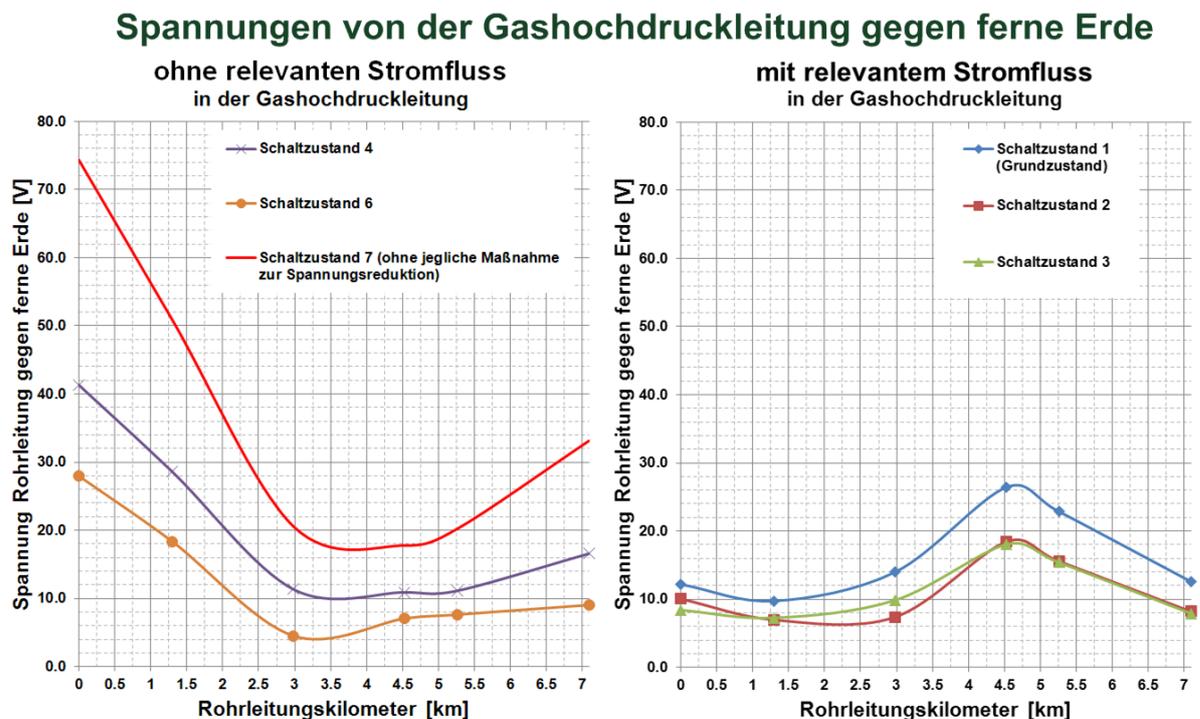


Abbildung 8.1: Spannungsverläufe Rohrleitung gegen ferne Erde mit und ohne relevantem Stromfluss in der Rohrleitung

Man erkennt, dass in der Rohrleitung nur dann relevante Stromflüsse zustande kommen, wenn diese beidseitig mit den Erdungsanlagen verbunden ist.

Durch die großen Ströme im Bahnsystem wird in der über das resultierende Magnetfeld eingekoppelten Rohrleitung eine in Längsrichtung wirkende elektrische Feldstärke $E_{RL}(x)$ (V/m) induziert. Im Begleitkabel wird eine in dieselbe Richtung wirkende elektrische Längsfeldstärke $E_{BK(x)}$ (V/m) induziert.

Im Schaltzustand 1 (Abbildung 8.2) sind nun Rohrleitung und Begleitkabel beidseitig mit den Erdungsanlagen verbunden. Die induzierten elektrischen Längsfeldstärken in Rohrleitung und Begleitkabel haben nun jeweils Stromflüsse I_{RL} (A) und I_{BK} (A) zur Folge, welche sich im Verbindungsknoten mit der Erdungsanlage summieren. Über die Erdungsanlagen fließt also der Summenstrom I_E (A) aus Rohrleitung und Begleitkabel.

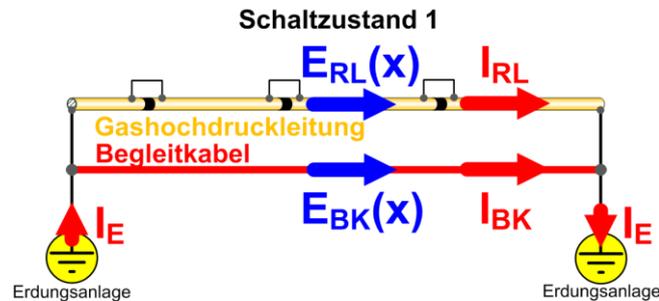


Abbildung 8.2: Schaltzustand 1, Rohrleitung und Begleitkabel beidseitig mit der Erdungsanlage verbunden

Es kann festgehalten werden, dass durch die Parallelschaltung von Gashochdruckleitung und Begleitkabel der Stromfluss über die Erdungsanlagen und somit der Spannungsabfall Rohrleitung gegen ferne Erde im Vergleich zu Schaltzustand 3 vergrößert wird.

Im Schaltzustand 3 (Abbildung 8.3) ist nur mehr die Rohrleitung beidseitig mit den Erdungsanlagen verbunden. Die induzierte elektrische Längsfeldstärke $E_{RL}(x)$ (V/m) in der Rohrleitung hat nun den Stromfluss in der Rohrleitung zur Folge, welcher dem Stromfluss über die Erdungsanlagen entspricht. Hinsichtlich der Spannung Rohrleitung gegen ferne Erde unterscheidet sich Schaltzustand 3 nur unwesentlich von Schaltzustand 2.

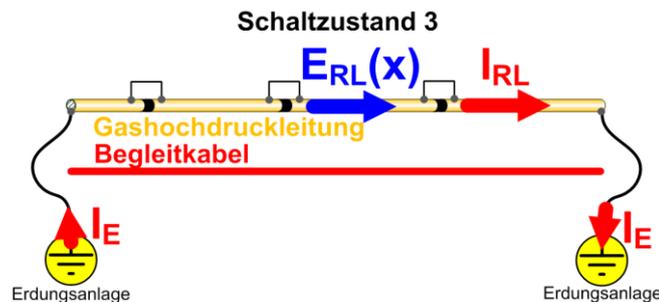


Abbildung 8.3: Schaltzustand 3, nur Rohrleitung beidseitig mit der Erdungsanlage verbunden

Im Schaltzustand 4 (Abbildung 8.4) ist nur mehr das Begleitkabel beidseitig mit den Erdungsanlagen verbunden. Die induzierte elektrische Längsfeldstärke im Begleitkabel hat nun einen Stromfluss im Begleitkabel zur Folge, welcher dem Stromfluss über die Erdungsanlagen entspricht. Das aus diesem Stromfluss resultierende Magnetfeld induziert in der Rohrleitung eine elektrische Längsfeldstärke E_K' (V/m), welche der vom Strom im Bahnsystem verursachten elektrischen Längsfeldstärke $E_{RL}(x)$ (V/m) entgegengesetzt ist, und somit spannungskompensierend auf die Rohrleitung wirkt.

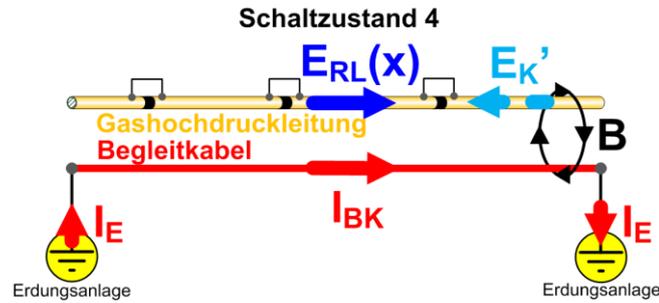


Abbildung 8.4: Schaltzustand 4, nur Begleitkabel beidseitig mit der Erdungsanlage verbunden

Im Schaltzustand 6 (Abbildung 8.5) sind Rohrleitung und Begleitkabel beidseitig miteinander verbunden. Die Erdungsanlagen wurden komplett vom restlichen System getrennt.

Durch die großen Ströme im Bahnsystem wird hier wieder in der über das resultierende Magnetfeld eingekoppelten Rohrleitung eine in Längsrichtung wirkende elektrische Feldstärke $E_{RL}(x)$ (V/m) induziert. Im Begleitkabel wird eine in dieselbe Richtung wirkende elektrische Längsfeldstärke $E_{BK}(x)$ (V/m) induziert.

Aufgrund dieser Schleife würden resultierende Ströme in der Rohrleitung in entgegengesetzter Richtung der Ströme im Begleitkabel (im Kreis) fließen. Dieser Stromfluss wäre aber auch einer der beiden Feldstärken entgegengesetzt (Abbildung 8.5). Die Messung hat gezeigt, dass bei dieser Schaltung keine Stromflüsse zustande kommen und eine spannungsreduzierende Wirkung erzielt wird.

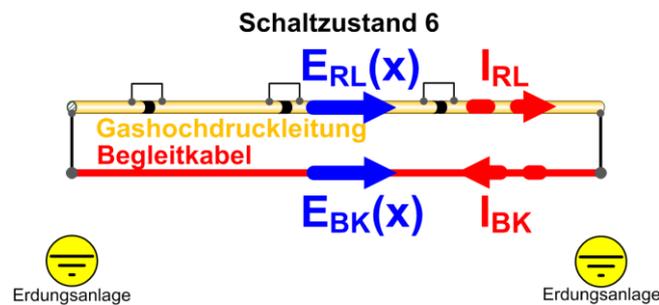


Abbildung 8.5: Schaltzustand 6, Rohrleitung beidseitig mit Begleitkabel verbunden, ohne Erdungsanlagen

Hinsichtlich der in Kapitel 7.1 definierten Rohrleitungsreduktionsfaktoren (Abbildung 7.5) für die Spannungen der Rohrleitung gegen ferne Erde wurden die in der folgenden Tabelle 8.1 angeführten Schaltzustände zur weiteren Betrachtung ausgewählt. Über die gesamte betrachtete Rohrleitungslänge wurden Mittelwerte, Maxima und Minima der Rohrleitungsreduktionsfaktoren gebildet.

Rohrleitungsreduktionsfaktoren			
	Mittelwert	Maxima	Minima
Schaltzustand 1	0.67	1.49	0.16
Schaltzustand 2	0.45	1.04	0.14
Schaltzustand 3	0.45	1.02	0.11
Schaltzustand 4	0.56	0.61	0.50
Schaltzustand 6	0.33	0.40	0.22
Schaltzustand 7	1.00	1.00	1.00

Tabelle 8.1: Rohrleitungsreduktionsfaktoren für den messtechnisch betrachteten Abschnitt

Man sieht, dass die Verschaltung Rohrleitung und Begleitkabel nach Schaltzustand 6 (Abbildung 8.5) zu einer Schleife komplett ohne Erdungsanlagen hinsichtlich der Spannungsreduktion im Normalbetrieb eine sehr gute Alternative zur konservativen Methode der Errichtung von Erdungsanlagen nach Schaltzustand 3 (Abbildung 8.3) darstellen könnte. Ein weiterer Vorteil ist im nichtvorhandenen Stromfluss in der Rohrleitung gegeben.

Allerdings stellt auch die Errichtung mehrerer Erdungsanlagen entlang der Rohrleitung eine Möglichkeit dar. Es könnten die gleichen spannungsreduzierenden Ergebnisse erzielt werden. Mit ansteigendem spezifischen Erdwiderstand ρ_E in der Umgebung einer Rohrleitung steigt aber der bauliche Aufwand, welcher zur Erreichung von gewünschten Ausbreitungswiderständen R_A bei Erdungsanlagen betrieben werden muss. Folglich steigen somit auch die Errichtungskosten. In Regionen mit felsigem Untergrund (z.B. im Gebirge) müssen teilweise teure Tiefenbohrungen durchgeführt werden.

Der Verschaltung nach Schaltzustand 4 (Abbildung 8.4) in welcher nur das Begleitkabel an Anfang und Ende geerdet wird müsste hinsichtlich der spannungsreduzierenden Wirkung der Schaltzustand 3 (Abbildung 8.3) vorgezogen werden. Bei beiden Zuständen wird dieselbe Anzahl an Erdungsanlagen benötigt. Ein Vorteil von Schaltzustand 4 gegenüber Schaltzustand 3 könnte allerdings ebenfalls im nicht vorhandenen Stromfluss in der Rohrleitung gesehen werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass zur konservativen, gegebenenfalls teuren Methode der Errichtung von Erdungsanlagen hier eventuelle Alternativen aufgezeigt werden.

Weiterführend müssten diese Erkenntnisse aber noch durch wiederholte Messungen und durch Erstellung entsprechender mathematischer Modelle belegt werden.

8.2 Vergleich der messtechnisch ermittelten Werte mit den theoretisch ermittelten Werten für die Rohrleitungsimpedanzen

Ohmscher Längswiderstand

Die Ergebnisse aus der Messung für den ohmschen Längswiderstand (Abbildung 7.9) zeigen den Effekt der Stromverdrängung hin zu höheren Frequenzen auf. Da die Messschleife zur Ermittlung der Längsimpedanzen (Abbildung 6.18) auch das Begleitkabel beinhaltete, muss für den Vergleich der Theorie mit den Messergebnissen der ohmsche Längsanteil des Begleitkabels vom Messergebnis abgezogen werden.

Die errechnete Eindringtiefe bei Skineffekt für eine Frequenz von 16,7 Hz entspricht beim Kupferkabel ($\delta_{CU} = 15,9536 \text{ (mm)}$) ca. dem doppelten des Durchmessers ($D_{CU} = 8 \text{ (mm)}$), wenn als Querschnittsform ein Rundleiter angenommen wird. Hauptsächlich wirkt sich der Skineffekt bei der Rohrleitung aus, da Stahl ferromagnetische Eigenschaften und somit eine um ein Vielfaches größere relative Permeabilitätszahl μ_r als Kupfer besitzt. In den theoretischen Betrachtungen (Kapitel 5) wurde zur Berechnung für die Stahlwand der Rohrleitung als relative Permeabilitätszahl $\mu_r \approx 500$ angenommen. Im Vergleich hierzu verhält sich Kupfer diamagnetisch mit einer relativen Permeabilitätszahl von $\mu_r = 0,9999936$.

Der bei der Messung ermittelte Wert des ohmschen Längsanteils abzüglich des ohmschen Anteils des Begleitkabels ergibt als Wert für den ohmschen Längsanteil der Rohrleitung bei einer Frequenz von 16,7 Hz:

- Messtechnisch ermittelter Längswiderstand der Rohrleitung $R_{Lgem} = 1,0473 \text{ (}\Omega\text{)}$

Der in Kapitel 5.2 errechnete Wert für den ohmschen Längsanteil der Rohrleitung bei einer Frequenz von 16,7 Hz ergibt:

- Errechneter Längswiderstand der Rohrleitung $R_L = 1,0281 \text{ (}\Omega\text{)}$

Dies sind jeweils die Werte für die gesamte betrachtete Rohrleitungslänge von 7,09 km. Man erkennt eine relativ geringe Abweichung von 1,87 %.

Induktive Längsreaktanz und Längsinduktivität

Die messtechnische Erfassung der Längsreaktanzen erfolgte ebenfalls in der Schleife nach Abbildung 7.9, und beinhaltete das Begleitkabel zur Rückleitung des Messstromes. Wiederum wirkte sich hier die um ein Vielfaches höhere relative Permeabilitätszahl μ_r des Stahles im Vergleich zum Kupfer aus. Die in Kapitel 5.2 errechnete innere Längsreaktanz des Stahlrohres überschreitet um ein Vielfaches die innere Längsreaktanz des Kupferkabels, und machte somit den Hauptanteil der gesamten inneren Längsreaktanz der Messschleife aus.

Der bei der Messung ermittelte Wert für die Längsreaktanz der Rohrleitung bei einer Frequenz des Messstroms von 16,7 Hz ergab:

- Messtechnisch ermittelte induktive Längsreaktanz der Rohrleitung
 $X_{Lgem} = \mathbf{0,9806} \text{ (j}\Omega\text{)}$

Der in Kapitel 5.2 ermittelte Wert für die Längsreaktanz der Rohrleitung mit Rückleitung über das Begleitkabel bei einer Frequenz von 16,7 Hz ergab:

- Errechnete induktive Längsreaktanz der Rohrleitung
 $X_{LK} = \mathbf{1,2096} \text{ (j}\Omega\text{)}$

Aus diesen Werten für die induktiven Längsreaktanzen können die Werte für die Längsinduktivitäten der Rohrleitung für die Gesamtlänge von 7,09 km abgeleitet werden.

Für die aus den Messwerten abgeleitete Längsinduktivität der Rohrleitung gilt:

$$L_{Lgem} = \frac{X_{Lgem}}{j\omega} \text{ (mH)} = \frac{X_{Lgem}}{j2 \cdot \pi \cdot f} \text{ (mH)} = \mathbf{10,4} \text{ (mH)}$$

Für die im Kapitel 5.2 errechnete Längsinduktivität der Rohrleitung gilt:

$$L_{LK} = \frac{X_{LK}}{j\omega} \text{ (mH)} = \frac{X_{LK}}{j2 \cdot \pi \cdot f} \text{ (mH)} = \mathbf{11,5} \text{ (mH)}$$

Die Abweichung des errechneten Werts vom messtechnisch erfassten Wert beträgt 9,6 %.

Ohmsche Querableitung

Der bei der Messung ermittelte Wert für die ohmsche Querableitung als Resistanz R_{Qgem} ergab bei einer Frequenz von 16,7 Hz für die Gesamtlänge des betrachteten Rohrleitungsabschnitts:

- Messtechnisch ermittelte ohmsche Querableitung $R_{Qgem} = \mathbf{43,1514} \text{ (}\Omega\text{)}$

Der in Kapitel 5.3 errechnete Wert für die ohmsche Querableitung als Leitwert G_L der Rohrleitung ergab bei einer Frequenz von 16,7 Hz für die Gesamtlänge des betrachteten Rohrleitungsabschnitts:

- Errechnete ohmsche Querableitung der Rohrleitung $G_L = \mathbf{0,0362} \text{ (S)}$

Die Darstellung der ohmschen Querableitung in Form einer Leitwert hat den Vorteil, dass der Leitwert analog zu den Längselementen des Modells linear mit der Länge der Rohrleitung steigt.

Für die errechnete ohmsche Querableitung als Resistanz R_Q gilt:

$$R_Q = \frac{1}{G_L} = \mathbf{27,6243} \text{ (}\Omega\text{)}$$

Der errechnete Wert der ohmschen Querableitung resultiert aus dem als Erfahrungswert angenommenen Umhüllungswiderstand r_U für mit Polyethylen umhüllte Stahlrohrleitungen:

- Erfahrungswert für den Umhüllungswiderstand $r_U = 100000$ (Ωm^2)

Aus den Messwerten bei einer Frequenz von 16,7 Hz resultiert ein Umhüllungswiderstand von:

- Aus den Messwerten abgeleiteter Umhüllungswiderstand $r_{Ugem} = 155321$ (Ωm^2)

Allgemein kann gesagt werden, dass sich bei einer optimal mit Polyethylen umhüllten Stahlrohrleitung ein erheblich höherer Umhüllungswiderstand ($\approx 10^6 \Omega\text{m}^2$) einstellen würde. Der Werkstoff Polyethylen kann als sehr guter Isolator gesehen werden. Vor allem handelte es sich bei der messtechnisch erfassten Rohrleitung um eine relativ neue Gashochdruckleitung.

Auf die Messergebnisse für die ohmsche Querableitung wirkten sich hauptsächlich sogenannte Probebleche, welche zur Erhebung der Wechselstromkorrosion bzw. der Querstromdichte längs der Rohrleitung vergraben waren, mindernd aus.

Auch etwaige Fehlstellen in der Umhüllung erhöhen die in Querrichtung wirkende Konduktanz. Probebleche und Fehlstellen wirken hier wie hochohmige Erder in Querrichtung des Kettenleitermodells, welche in Summe den gesamten Leitwert in Querrichtung erhöhen.

Man sieht also, dass für reale mit Polyethylen umhüllte Rohrleitungen der Erfahrungswert für den Umhüllungswiderstand $r_u = 100000 \Omega\text{m}^2$ realistisch ist, wenn etwaige Probebleche, Fehlstellen in der Umhüllung und Alterseffekte Berücksichtigung finden sollen.

Kapazitive Querreaktanz und Erdkapazität

Der bei der Messung ermittelte Wert für die kapazitive Querableitung als Reaktanz der Rohrleitung bei einer Frequenz des Messstroms von 16,7 Hz ergab für die Gesamtlänge des betrachteten Rohrleitungsabschnitts:

- Messtechnisch ermittelte kapazitive Querableitung $X_{Qgem} = -232,7738$ ($j\Omega$)

Der in Kapitel 5.3 ermittelte Wert für die kapazitive Querableitung als Suszeptanz der Rohrleitung mit Rückleitung über das Begleitkabel bei einer Frequenz von 16,7 Hz ergab für die Gesamtlänge des betrachteten Rohrleitungsabschnitts:

- Errechnete kapazitive Querableitung $B_L = 0,0057$ (jS)

Die Darstellung der kapazitiven Querableitung in Form einer Suszeptanz hat den Vorteil, dass dieser imaginäre Leitwert analog zu den Längselementen des Modells wie bei der ohmschen Querableitung linear mit der Länge der Rohrleitung steigt.

Für die errechnete kapazitive Querableitung als Reaktanz X_Q gilt:

$$X_Q = \frac{1}{B_L} = -175,4386 \text{ (j}\Omega\text{)}$$

Aus diesen Werten für die kapazitiven Querreaktanzen können die Werte für die Erdkapazitäten der Rohrleitung für die Gesamtlänge von 7,09 km abgeleitet werden.

Für die aus den Messwerten abgeleitete Erdkapazität der Rohrleitung gilt:

$$C_{Lgem} = \frac{1}{j\omega \cdot X_{Qgem}} (\mu F) = \frac{1}{j2 \cdot \pi \cdot f \cdot X_{Qgem}} (\mu F) = \mathbf{45,5821} (\mu F)$$

Für die im Kapitel 5.3 errechnete Erdkapazität der Rohrleitung gilt:

$$C_L = \frac{1}{j\omega \cdot X_Q} (\mu F) = \frac{1}{j2 \cdot \pi \cdot f \cdot X_Q} (\mu F) = \mathbf{54,0974} (\mu F)$$

Die Erdkapazitäten der Rohrleitung steigen linear mit der Länge der Rohrleitung, weil sich analog zur Länge auch die wirkende Oberfläche der Rohrleitung vergrößert. Eine mögliche Erklärung für die Abweichung zwischen den Messwerten und den Werten der Theorie kann in der Wahl des Wertes für die relative Dielektrizitätszahl ϵ_r der Polyethylenhüllung von $\epsilon_r \approx 5$ [1] gesehen werden, da bei der realen Rohrleitung nicht nur das Polyethylen das Dielektrikum der Kapazität bildet. Vielmehr befindet sich zwischen der metallischen Oberfläche der Rohrleitung und dem fernen Erdpotential noch zusätzlich zur Polyethylenhüllung das Erdreich.

Eine zusammenfassende Gegenüberstellung aller Werte für die Rohrleitungsimpedanzen aus Messung und Theorie kann in folgender Tabelle 8.2 eingesehen werden.

	Theorie	Messung
$R_L (\Omega)$	1.0251	1.0473
$X_L (j\Omega)$	1.2096	0.9806
$L_L (mH)$	11.5	10.4
$R_Q (\Omega)$	27.6243	43.1514
$r_u (\Omega m^2)$	100000	155321
$X_Q (j\Omega)$	-175.4386	-232.7738
$C_L (\mu F)$	54.10	45.58

Tabelle 8.2: Gegenüberstellung der Werte für die Rohrleitungsimpedanzen

9 Literatur

- [1] Schmutzger, E.: Ein Beitrag zur Berechnung der induktiven Beeinflussung von Rohrleitungsnetzen. Dissertation, TU Graz, 1990
- [2] Carson, J.: Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return. Bell System Technical Journal 5, S. 539...554, 1926
- [3] Pollaczek, F.: Über das Feld einer unendlich langen wechselstromdurchflossenen Einfachleitung. Elektrische Nachrichtentechnik, Heft 9, Band 3, 1926
- [4] Pollaczek, F.: Über die Induktionswirkung einer Wechselstromeinfachleitung. Elektrische Nachrichtentechnik, Heft 4, 1927
- [5] Michailow, M; Rasumov, Z.D.: Elektrische Parameter von metallischen Rohrleitungen im Erdboden. Elektriceswo, Bd. 82, Heft 5, S. 60...63, 1963
- [6] Muckenhuber, R.: Die induktive Beeinflussung von Rohrleitungen durch Hochspannungsleitungen. ÖZE, Jg. 21, Heft 6, S. 273...280, 1968
- [7] Muckenhuber, R.: Studienbehelf zur Vorlesung Elektrische Anlagen 1 - Teil 2. Vorlesungsskript an der TU Graz, 1984
- [8] Frei, J.: Messung der Impedanz ausgedehnter Erdersysteme sowie deren Berechnung mit Hilfe approximativer, analytischer und numerischer Verfahren. Diplomarbeit, TU Graz, 2001
- [9] ÖVE-B1/1976: Beeinflussung von Fernmeldeanlagen durch Wechselstromanlagen mit Nennspannungen über 1 kV
- [10] ÖVE-EH 41/1987: Erdungen in Wechselstromanlagen mit Nennspannungen über 1kV, ersetzt durch ÖVE/ÖNORM E8384
- [11] ÖVE/ÖNORM E8384: Erdungen in Wechselstromanlagen mit Nennspannungen über 1kV, Ausgabe 20007-05-01
- [12] TE 30: Technische Empfehlung Nr. 30 (Ausgabe April 1987): Maßnahmen bei Bau und Betrieb von Rohrleitungen im Einflussbereich von Starkstromanlagen mit Nennspannungen über 1 kV. Technisches Komitee für Beeinflussungsfragen (VEÖ)
- [13] ÖVE EN 50122-1: 1997, Bahnanwendungen – Ortsfeste Anlagen. Teil 1: Schutzmaßnahmen in Bezug auf elektrische Sicherheit und Erdung. ÖVE EN 50122-2: 1998, 50122-2/11: 2003 – Änderung
- [14] prEN 50351 Entwurf: Grundnorm für die Berechnungs- und Messverfahren bezogen auf die Beeinflussung von Telekommunikationssystemen durch elektrische Energieversorgungs- und Bahnstromsysteme. 2000
- [15] prEN 50352 Entwurf: Grenzwerte für die Beeinflussung von Telekommunikationssystemen durch elektrische Energieversorgungs- und Bahnstromsysteme. 2004

- [16] ÖVE/ÖNORM E 8383: 2007-05-01; Erdungen in Wechselstromanlagen mit Nennspannungen über 1 kV (Ersatz für EH 41/1987)
- [17] Schmautzer, E.; Braunstein, R.; Ölz, M.: Simulation and Optimised Reduction of Induced Pipeline Voltages Caused by High-Voltage Lines on Inductively Interfered Pipelines. CIRED, 21st International Conference on Electricity Distribution, Frankfurt, 2011
- [18] Braunstein R.; Schmautzer E.; Ölz, M.: Impacts of Inductive and Conductive Interference due to High-Voltage Lines on Coating Holidays of Isolated Metallic Pipelines. CIRED, 21st International Conference on Electricity Distribution, Frankfurt, 2011
- [19] Schmautzer E.; Braunstein R.; Ölz, M.: Neue Herausforderungen an die induktive Rohrleitungsbeeinflussung unter Berücksichtigung des aktuellen Forschungsstands. 11. Symposium Energieinnovation, Graz, 2010
- [20] Schmautzer E.; Linhardt P.; Friedl W.; Ball G.: Wechselstromkorrosion an Rohrleitungen – Modellbildung und elektrochemische Analysen. Technischer Bericht im Auftrag der Österreichischen Vereinigung für das Gas- und Wasserfach, Institut für Elektrische Anlagen der TU Graz, Technische Versuchs- und Forschungsanstalt der TU Wien, 2004
- [21] Braunstein R.: Technical and Economical Optimisation of Measures Decreasing Inductive Interference of Metallic Pipelines. Dissertation, TU Graz, work in progress
- [22] ÖVE-E5, Teil 1/1981: Betrieb von Starkstromanlagen
- [23] ÖVE/ÖNORM EN 50110-1 (1997-06): Betrieb von Starkstromanlagen
- [24] CEN/TS 15280 (2006-07-10): Beurteilung der Korrosionswahrscheinlichkeit an erdverlegten Rohrleitungen – Anwendung für kathodisch geschützte Rohrleitungen. Technische Spezifikation, 2006
- [25] Büchler, M.; Voüte, C.-H.: Der Einfluss der Betriebsbedingungen des kathodischen Korrosionsschutzes auf die Wechselstromkorrosion und Schutzmaßnahmen. Schweizerische Gesellschaft für Korrosionsschutz, 2008
- [26] DEWETRON Ges. m. b. H.: Datenblatt Energiedatenlogger ELOG-570. <http://www.dewetron.com>, 2008
- [27] Braunstein R.: Energieeffizienz und Energieeinsparpotentiale in der Landwirtschaft. Diplomarbeit, Institut für Elektrische Anlagen, TU Graz, 2007
- [28] Weilekes Elektronik GmbH.: Bedienungsanleitung MiniLog2, 2011
- [29] DEWETRON Ges. m. b. H.: <http://www.dewetron.com/de/products/instruments/all-in-one/dewe-3020/>, 15.10.2011
- [30] DEWETRON Ges. m. b. H.: DEWE-Module. Technische Referenz, 2009
- [31] Fluke®: i3000s/i2000 Flex AC Current Probe. Instruction Sheet, 2006

[32] School of Earth Sciences, The University of Melbourne: A First Estimate of Resistivity.
<http://www.earthsci.unimelb.edu.au/ES304/MODULES/RES/NOTES/1estres.html>,
15.10.2011

[33] Schöneich H.-G.: MITTEILUNGEN DES FACHVERBANDES KATHODISCHER
KORROSIONSSCHUTZ E.V. Fachreferat, Jahreshauptversammlung, Hamburg, 1994

10 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

10.1 Abbildungen

Abbildung 3.1:	Einfaches Kettenleiter-Ersatzschaltbild bei induktiver Beeinflussung einer Rohrleitung (Darstellung aus [1], abgeändert)	13
Abbildung 4.1:	Schritt- und Berührspannungen (Darstellung aus [7], abgeändert)	14
Abbildung 4.2:	Spannungsverschleppung durch Rohrleitungen (Darstellung aus [7], abgeändert)	15
Abbildung 4.3:	Einfaches Modell der induktiven Beeinflussung (Darstellung aus [1], abgeändert)	16
Abbildung 4.4:	Plattenkondensator	17
Abbildung 4.5:	Einfaches Modell der kapazitiven Beeinflussung (Darstellung aus [7], abgeändert)	19
Abbildung 4.6:	Ersatzschaltbild eines infinitesimal kleinen Rohrleitungsabschnittes (Darstellung aus [1], abgeändert)	20
Abbildung 4.7:	Homogenes Kettenleiterelement für kurze Abschnitte einer Rohrleitung (Darstellung aus [1], abgeändert)	21
Abbildung 4.8:	Homogen über die gesamte Länge beeinflusste Rohrleitung, Kettenleitermodell und verursachter Spannungsverlauf entlang der Rohrleitung	21
Abbildung 4.9:	In einem Kettenleiterelement beeinflusste Rohrleitung, Kettenleitermodell und verursachter Spannungsverlauf entlang der Rohrleitung	22
Abbildung 5.1:	Aufbau und Maße der Gashochdruckleitung	24
Abbildung 5.2:	Gesamtimpedanz der Rohrleitung	28
Abbildung 5.3:	Gesamtimpedanz der geerdeten Rohrleitung	29
Abbildung 5.4:	Gesamtimpedanz der geerdeten Rohrleitung, Begleitkabel mit den Erden verbunden	30
Abbildung 6.1:	Übersichtsdarstellung der Gashochdruckleitung mit Parallelführung zu einer Bahnstrecke	31
Abbildung 6.2:	Pneumatisch-elektrische Situation der messtechnisch erfassten Gashochdruckleitung	32
Abbildung 6.3:	Messmarker, Schaltschrank und Erdspieß für ferne Erde	33

Abbildung 6.4:	Elektrischer Grundzustand, hergestellt zur Messung an der Gashochdruckleitung	34
Abbildung 6.5:	Schaltzustände, messtechnische Erfassung der Wirkung von Begleitkabel und Erdungsanlagen	34
Abbildung 6.6:	Versuchsaufbau im Labor am Institut für elektrische Anlagen	35
Abbildung 6.7:	Magnetische Ersatzflusssdichte im Querschnitt über die Bahnstrecke mit Gashochdruckleitung und Begleitkabel	37
Abbildung 6.8:	Messequipment zur Erfassung der Ströme im Bahnsystem	38
Abbildung 6.9:	DEWESoft 6.6.1 / Kanalsetup des Kanals 1:1L1 für die Stromzange	39
Abbildung 6.10:	DEWESoft 6.6.1 / Mathematikkanal zur Ermittlung des Summenstroms im Bahnsystem	40
Abbildung 6.11:	DEWESoft 6.6.1 / Ströme in Fahrdrähten und Tragseilen der Bahnstrecke	41
Abbildung 6.12:	Messequipment zur Erfassung der Spannungen und Ströme entlang Rohrleitung und Begleitkabel mittels Datalogger	43
Abbildung 6.13:	DEWESoft 7.0.4 b3 / Kanalsetup des Kanals 2 für die Rogowskispule	46
Abbildung 6.14:	Messequipment zur hochauflösenden Erfassung der Spannungen und Ströme entlang Rohrleitung und Begleitkabel	47
Abbildung 6.15:	DEWESoft 7.0.4 b3 / Spannungen und Ströme entlang Rohrleitung und Begleitkabel	48
Abbildung 6.16:	Frequenzselektive Einspeisung zur Ermittlung der Impedanzen der Gashochdruckleitung	49
Abbildung 6.17:	Schaltzustand zur Ermittlung der Querimpedanzen	49
Abbildung 6.18:	Schaltzustand zur Ermittlung der Längsimpedanzen	50
Abbildung 6.19:	Spezifischer Erdwiderstand	51
Abbildung 6.20:	Punkteinspeisung des Stromes, Messung der Spannung	51
Abbildung 6.21:	Prinzip der Viersondenmethode	52
Abbildung 6.22:	Viersondenmethode zur Ermittlung des spezifischen Bodenwiderstandes nach Wenner	53
Abbildung 6.23:	Dreipunktmethode zur Ermittlung des Ausbreitungswiderstands der Erder	53
Abbildung 7.1:	Schaltzustände, messtechnische Erfassung der Wirkung von Begleitkabel und Erdungsanlagen	54

Abbildung 7.2:	Verlauf des beeinflussenden Stroms im Bahnsystem im Vergleich mit dem Spannungsverlauf der Gashochdruckleitung gegen ferne Erde	55
Abbildung 7.3:	Sinusverlauf und Frequenzspektrum des Stroms in der Gashochdruckleitung	56
Abbildung 7.4:	Normierte Spannungen der Gashochdruckleitung gegen ferne Erde während der unterschiedlichen Schaltzustände	57
Abbildung 7.5:	Rohrleitungsreduktionsfaktoren der unterschiedlichen Schaltzustände für die Spannungen der Rohrleitung gegen ferne Erde	58
Abbildung 7.6:	Normierte Ströme in der Gashochdruckleitung während der unterschiedlichen Schaltzustände	59
Abbildung 7.7:	Normierte Spannungen des Begleitkabels gegen ferne Erde während der unterschiedlichen Schaltzustände	59
Abbildung 7.8:	Normierte Ströme im Begleitkabel während der unterschiedlichen Schaltzustände	60
Abbildung 7.9:	Ohmscher Längswiderstand, messtechnisch und theoretisch ermittelt	61
Abbildung 7.10:	Induktive Längsreaktanz und Längsinduktivitäten, messtechnisch und theoretisch ermittelt	62
Abbildung 7.11:	Frequenzabhängige Verteilung der Längsströme entlang der Rohrleitung bei der Einspeisung zur Ermittlung der Querimpedanzen	63
Abbildung 7.12:	Ohmsche Querableitung und Umhüllungswiderstand	63
Abbildung 7.13:	Kapazitive Querreaktanz und Erdkapazität	64
Abbildung 8.1:	Spannungsverläufe Rohrleitung gegen ferne Erde mit und ohne relevantem Stromfluss in der Rohrleitung	65
Abbildung 8.2:	Schaltzustand 1, Rohrleitung und Begleitkabel beidseitig mit der Erdungsanlage verbunden	66
Abbildung 8.3:	Schaltzustand 3, nur Rohrleitung beidseitig mit der Erdungsanlage verbunden	66
Abbildung 8.4:	Schaltzustand 4, nur Begleitkabel beidseitig mit der Erdungsanlage verbunden	67
Abbildung 8.5:	Schaltzustand 6, Rohrleitung beidseitig mit Begleitkabel verbunden, ohne Erdungsanlagen	67

10.2 Tabellen

Tabelle 4.1:	Grenzwerte für das Rohrleitungspotential bei 16.7 Hz und 50 Hz sowie Schutzmaßnahmen gegen unzulässige Berührspannungen gemäß TE 30 [12] und ÖNORM CEN/TS 15280 [24]	23
Tabelle 6.1:	Positionierung der Datalogger und erfasste Werte	42
Tabelle 8.1:	Rohrleitungsreduktionsfaktoren für den messtechnisch betrachteten Abschnitt	68
Tabelle 8.2:	Gegenüberstellung der Werte für die Rohrleitungsimpedanzen	72