

# **Modellierung und Messung der elektrischen Parameter von Pipelines**

Masterarbeit



Institut für Elektrische Anlagen  
Technische Universität Graz

Vorgelegt von  
Michael Muffat, BSc.

Betreuer  
Dr. techn. Dipl.-Ing. Ernst Schmautzer  
Dipl.-Ing. Christian Wahl, BSc.

Institutsleiter: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. 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 / Dezember – 2015



## Danksagung

Ein weiterer wichtiger Lebensabschnitt geht nun zu Ende. Mit einem lächelnden und einem weinenden Auge verlasse ich nun die Universität und wage mich in die neu erworbene Freiheit.

Mein Dank gebührt daher besonders folgenden Wegbegleitern:

- Meinen Kollegen und Betreuern meiner Master Arbeit Herrn Dipl.- Ing. Christian Wahl und Herrn Dr. techn. Dipl.-Ing. Ernst Schmutzer, welche mich mit Rat und Tat unterstützten und mir den Weg aufzeigten.
- Herrn Univ.-Prof. Dr. Fickert für die Aufnahme und Unterstützung am Institut für Elektrische Anlagen.
- Allen Kolleginnen und Kollegen am Institut für Elektrische Anlagen für den fachlichen Austausch und die Gemeinschaft. Die zahlreichen gemeinsamen Messeinsätze werden mir in äußerst angenehmer Erinnerung bleiben.
- Den Mitgliedern des Dynamobauzeichensaals für den Zusammenhalt während des Studiums, die Überwindung so mancher Tiefschläge, das Schaffen der „schweren Brocken“ , und das Kennenlernen fremder Kulturen (Vorarlberg; Tirol...).
- Meinen Freunden, die mich schon so durch manch finsternes Tal begleitet haben und immer zur Seite standen.

Zu guter Letzt meinen Eltern, die mir meine Ausbildung ermöglichten.

---

## **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 01.12.2015

Michael Muffat

## **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: Modellierung und Messung der elektrischen Parameter von Pipelines*

Österreich hatte im Jahr 2012 einen Bruttoinlandsverbrauch an Energie von 1420,8 PJ [1]. Die fossilen Energieträger Öl und Gas machen mit 57,4% mehr als die Hälfte des Energieverbrauchs aus [1]. Um derartige Mengen an Energie zu transportieren ist ein überregionales Netz aus Pipelines notwendig. Beim Bau bzw. beim Betrieb solcher Anlagen müssen verschiedenste Aspekte beachtet werden: Neben Druck, Gefälle oder Höhenlagen kommt auch die Elektrotechnik ins Spiel. Aufgrund der Trassenführungen kann oft eine Wechselstrombeeinflussung durch Hochspannungsanlagen auftreten. Unter Umständen kann diese Beeinflussung zu gefährlichen Berührungsspannungen sowie zu Materialkorrosion führen und daher ist ein korrektes Rohrleitungsmodell zur Berechnung von elektromagnetischen Beeinflussungen unumgänglich. Nur so können notwendige Gegenmaßnahmen richtig geplant und parametrisiert werden. Ziel dieser Arbeit soll es daher sein, neben einer theoretischen Betrachtung und Berechnung auch eine praktische Vorgangsweise für die Ermittlung der elektrischen Parameter von Rohrleitungen zu finden. Anhand eines Labormodells erfolgten eine erste Auswahl der Messgeräte sowie deren Parametrisierungen für die Außenmessung. Um die einzelnen elektrischen Komponenten der Rohrleitung bestimmen zu können, müssen auch diverse Umgebungsgrößen wie etwa der spezifische Erdwiderstand ermittelt werden. In einem ersten Schritt wurden zur Bestimmung des spezifischen Erdwiderstandes insgesamt fünf Messstrassen in der Nähe einer Rohrleitung aufgenommen. In einem zweiten Schritt wurden mithilfe des Programmes IP2 Win, die Messwerte ausgewertet und gemittelt. Um daraufhin die Hauptelemente des PI-Ersatzschaltbildes zur mathematischen Nachbildung der Rohrleitung zu ermitteln, wurden zwei verschiedene Messschaltungen verwendet. Zur Bestimmung der Längselemente musste eine Messschleife, die aus einer erdvergrabenen Rohrleitung, einer Stromquelle und einem künstlichen Rückleiter bildet wurde aufgebaut werden. Der Rückleiter muss in einem Abstand von mehr als 50 m zur Rohrleitung verlegt werden. Dieser Abstand war notwendig, um etwaige Kopplungen zwischen Rohrleitung und Rückleiter zu minimieren. Über die Messschleife Rohrleitung – Rückleiter konnte die Impedanz und der Winkel der Längselemente gemessen werden während Ströme über die Querelemente vernachlässigt wurden. Um die Querelemente bestimmen zu können, musste jeweils eine künstliche Erdungsanlage am Anfang und am Ende der Rohrleitung errichtet werden. Über die gemessenen Strom- und Spannungsverhältnisse sowie der vorher ermittelten Längsimpedanz konnten die Querelemente errechnet werden. Für eine korrekte Auswertung der Längs- und Querelemente mussten parasitäre Beeinflussungen und Übergangswiderstände berücksichtigt und gemessen bzw. herausgerechnet werden. Beim Vergleich der Ergebnisse zwischen Theorie [2] / AfK3 [3] und den Messergebnissen zeigt sich, dass die Abweichungen klein sind und es kann dadurch gezeigt werden, dass mit dem verwendeten theoretischen Modell die Berechnungen richtig sind. Zusätzlich kann auch gezeigt werden, dass der Umhüllungswiderstand ein frequenzabhängiges Verhalten hat und mit steigender Frequenz sinkt. **Schlüsselwörter:** Induktive Rohrleitungsbeeinflussung; PI-Ersatzschaltbild; Leitungsbelag; Umhüllungswiderstand; Messverfahren

## **Abstract**

*Title: Modelling and measurement of the electrical parameters of pipelines*

In 2012, the energy gross consumption in Austria was about 1420 PJ; more than half of it was produced by oil and gas. In fact of that, it is necessary to build and operate a good pipeline network infrastructure.

For pipelines, electrical aspects are also important because on one hand, cathodic protections systems are essential for operating pipelines. On the other hand, unwanted high inductive interference voltages can appear due to long parallel routes of pipelines and high voltage energy systems. These inductive interferences may produce hazardous A.C. pipeline voltages. High induced voltage levels can cause dangerous high touch voltages and A.C. material corrosion.

Thus, exact pipeline interference calculations are necessary planning and operating pipelines if given limits are exceeded. For correct calculations, a correct pipeline calculation model with correct parameters is indispensable otherwise necessary countermeasures are overpowered or displaced or are simply missing.

Aim of this work is to find out if given calculation models are correct and fit with practice. So, a practical procedure was needed to identify the pipeline parameters and how they can be used correct for comparing the theoretical calculation models.

First, actual used models have to be researched and calculated. Second, with using of a laboratory model it had to be determined which measurement devices are a best practice and how they can be used effective. Third, a practical approach was needed which means measurements on a real pipeline were conducted. And finally, a comparing between theoretical and practical results was needed to show if there are any differences between both findings. After the measurement devices were calibrated, the pie equivalent network has to be measured on the real pipeline. For the longitudinal parameters, a parallel temporary cable was used from the end of the pipeline to the supply point to eliminate the return conductor through the soil. To measure the transverse parameters, man-made earthing systems on both end of the pipeline were constructed to find out how much of the current was getting lost over the pipeline coating. All measurements were done with different supply currents and frequencies. Finally, under consideration of parasitic interferences and contact resistances, the results were compared with the theoretical results. It can be shown that the calculation models are mostly the same as the practical results show but it was founded out that the pipeline coating resistance is frequency-dependending and has to be considered stronger for correct pipeline interference calculations.

**Keywords: inductive interference of pipelines, pipeline impedance; metallic pipelines; pi-circuits, measurement**

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>6</b>
<b>1 Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>9</b>
<b>2 Aufgabenstellung.....</b>	<b>12</b>
<b>3 Grundlagen.....</b>	<b>13</b>
3.1 Definitionen.....	13
3.2 Modellbildung einer unendlich langen Leitung .....	15
3.2.1 Induktivität .....	16
3.2.2 Kapazität .....	18
3.2.3 Der Längs- und Querwiderstandsbelag.....	20
3.3 Kettenleitermodell eines beeinflussten Rohrleitungsabschnitts .....	21
3.4 Das elektrische Strömungsfeld im Erdreich .....	23
<b>4 Methoden.....</b>	<b>26</b>
4.1 Der spezifische Erdwiderstand.....	26
4.1.1 4-Sonden-Verfahren .....	29
4.1.2 Wenner Verfahren .....	31
4.1.3 Schlumberger Verfahren.....	32
4.2 Ermittlung des Erdungswiderstands einer elektrischen Anlage .....	32
4.2.1 3-Punkt-Methode .....	32
4.3 Berechnung der Kenndaten einer Rohrleitung .....	33
4.3.1 Berechnung laut AfK3.....	34
4.3.2 Berechnung des Rohrleitungsimpedanzmodells .....	35
4.4 Berechnung des Labormodells .....	37
4.4.1 Kenndaten der Berechnung.....	37
4.4.2 Berechnung Methode 1 - AfK3.....	38
4.4.3 Berechnung Methode 2 - Zylindrischen Vollleiter .....	39
4.4.4 Zusatz zu Methode 2 - zylindrischer Hohlleiter.....	40
4.4.5 Vergleich der Ergebnisse Labormodell .....	41
4.5 Berechnung der Stichleitung.....	42

4.5.1	Kenndaten der Stichleitung.....	42
4.5.2	Berechnung Methode 1 - AFK3 .....	43
4.5.3	Berechnung Methode 2 - zylindrischer Volleiter .....	43
4.5.4	Zusatz zu Methode 2 – zylindrischer Hohlleiter .....	45
4.5.5	Vergleich der Ergebnisse Stichleitung.....	46
<b>5</b>	<b>Messungen am Modell.....</b>	<b>47</b>
5.1	Allgemeines.....	47
5.2	Messablauf und Parametrierung .....	47
5.3	Messaufbau der Impedanz Messung an der Rohrleitung .....	48
5.4	Kalibrierung der Messgeräte.....	50
5.5	Ergebnisse .....	55
5.5.1	Allgemeines.....	55
5.5.2	Rohrleitungskennndaten.....	55
5.5.3	Messung mit variablen Strom und variabler Frequenz .....	56
5.5.4	Messung bei konstantem Strom von 100 A und variabler Frequenz .....	61
<b>6</b>	<b>Messungen an der Rohrleitung.....</b>	<b>62</b>
6.1	Allgemeines.....	62
6.2	Geografische Übersicht über Messaufbau .....	63
6.3	Kalibrierung der Messgeräte.....	64
6.4	Allgemeine Ergebnisse .....	65
6.4.1	Spezifischer Erdwiderstand .....	65
6.4.2	Mess – Erder .....	70
6.4.3	Übergangswiderstände und Widerstand $R_{\text{Schleife}}$ .....	71
6.5	Messung der Längselemente der Rohrleitung.....	72
6.5.1	Messaufbau.....	72
6.5.2	Messergebnisse .....	73
6.6	Messung der Querelemente .....	75
6.6.1	Messaufbau Variante 1 mit 2 Erdungsanlagen.....	75
6.6.2	Messergebnisse Variante 1 .....	76
6.6.3	Messaufbau Variante 2 mit einer Erdungsanlage.....	77
6.6.4	Messergebnisse zu Variante 2.....	78

<b>7</b>	<b>Diskussion der Ergebnisse .....</b>	<b>81</b>
7.1	Längselemente der Rohrleitung .....	81
7.2	Querelemente der Rohrleitung.....	84
7.2.1	Umhüllungswiderstand $r_u$ und Kapazität $C'$ .....	85
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>87</b>
<b>9</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>89</b>
<b>10</b>	<b>Abbildung und Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>90</b>
<b>11</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>94</b>
11.1	Messergebnisse Labor .....	94
11.1.1	Grafische Darstellung der Messergebnisse .....	95
11.2	Messergebnisse Stichleitung .....	97
11.2.1	Ergebnisse - Messung der Längselemente.....	97
11.2.2	Ergebnisse – Messung Querelemente Variante 1 .....	99
11.2.3	Ergebnisse – Messung Querelemente Variante 2.....	102
11.2.4	Ergebnisse –Querelemente Variante 2 nach Korrektur .....	104



# 1 Abkürzungsverzeichnis

$\rho_E$	Spezifischer Erdwiderstand in [ $\Omega\text{m}$ ]
$r_u$	Spezifischer Umhüllungswiderstand in [ $\Omega\text{m}^2$ ]
$H$	Magnetische Feldstärke in [ $\text{A/m}$ ]
$\phi_a$	Magnetischer Fluss in [ $\text{Vs}$ ]
$L_a$	Äußere Induktivität/ Selbstreaktanz in [ $\text{mH}$ ]
$W_m$	Magnetische Energie in [ $\text{J}$ ]
$L_i$	Innere Induktivität / Innere Reaktanz in [ $\text{mH}$ ]
$L$	Gesamtinduktivität in [ $\text{mH}$ ]
$U$	Spannung in [ $\text{V}$ ]
$q_k$	Ladung eines Leiters in [ $\text{As}$ ]
$C'$	Kapazitätsbelag in [ $\text{nF/m}$ ]
$R'$	Widerstandsbelag in [ $\Omega/\text{m}$ ]
$G'$	Ableitbetrag in [ $\text{S/m}$ ]
$L'$	Induktivitätsbelag in [ $\text{mH/m}$ ]
$L_{\text{Skin}}'$	Innerer Induktivitätsbelag mit Skineffekt in [ $\text{mH/m}$ ]
$\tan \delta$	Verlustfaktor (Ohmsche zu kapazitive Ableitströme)
$E$	Elektrische Feldstärke in [ $\text{V/m}$ ]
$I_F$	Beeinflussender Strom in [ $\text{A}$ ]
$I_L$	Strom in Rohrleitung in [ $\text{A}$ ]
$U_L$	Spannung der Rohrleitung gegen ferne Erde in [ $\text{V}$ ]
$Z_L$	Längsimpedanzbelag der Rohrleitung in [ $\Omega/\text{m}$ ]
$Y_L$	Queradmittanzbelag der Rohrleitung in [ $\text{S/m}$ ]
$J$	Stromdichte in [ $\text{A/m}^2$ ]
$\sigma$	Elektrische Leitfähigkeit in [ $1/\Omega\text{m}$ ]
$r_{\text{HK}}$	Radius Halbkugelerder in [ $\text{mm}$ ]
$k$	Geometriefaktor bei Wenner / Schlumberger / 4-Sondenverfahren
$R_{\text{S-ES}}$	Widerstand zwischen den Sonden S-ES in [ $\Omega$ ]

A	Querschnitt der Rohrleitung in [mm <sup>2</sup> ]
$\delta_{ST}$	Eindringtiefe Skineffekt bei Stahl in [mm]
$R_E$	Erdwiderstand in [ $\Omega$ ]
$D_E$	Tiefe Erdrückleiter in [m]
k	Geometriefaktor bei Wenner/Schlumberger/4 Sondenverfahren
$R_{S-ES}$	Widerstand zwischen den Sonden S-ES in [ $\Omega$ ]
$\epsilon_0$	Absolute Dielektrizitätszahl $8,854 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm}$
$\epsilon_R$	Relative Dielektrizitätszahl z.B. für PE 2,3
$\mu_0$	Absolute Permeabilität $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am}$
$\mu_r$	Relative Permeabilität z.B. für Stahl 500
e	Eulersche Zahl mit 2,718
$\gamma$	Besselkonstante mit 1,78
f	Frequenz in [Hz]
$\omega$	Kreisfrequenz in [1/s]
d	Durchmesser Rohrleitung in [mm]
r	Radius Rohrleitung in [mm]
$r_A$	Äußerer Radius der Rohrleitung in [mm]
$r_i$	Innerer Radius der Rohrleitung in [mm]
$\delta$	Dicke Umhüllungsmaterial der Rohrleitung in [mm]
$R_{Schleife}$	Widerstand des Begleitkabels in [ $\Omega$ ]
$X_{Begleitkabel}$	Blindwiderstand des Begleitkabels in [ $j\Omega$ ]
$R_{\text{übergangsw}}$	Übergangswiderstände in [ $\Omega$ ]
$R_{Erd1}$	Widerstand von Erdungsanlage 1 in [ $\Omega$ ]
$R_{Erd2}$	Widerstand von Erdungsanlage 2 in [ $\Omega$ ]
$R_{gemessen}$	Wirkanteil der gemessenen Impedanz in [ $\Omega$ ]
$X_{gemessen}$	Blindanteil der gemessenen Impedanz in [ $j\Omega$ ]
$R_q$	Wirkanteil der Querelemente in [ $\Omega$ ]
$X_q$	Blindanteil der Querelemente in [ $j\Omega$ ]
$Z_q$	Impedanz der Querelemente in [ $j\Omega$ ]

$Z_L$  Impedanz der Längselemente in  $[j\Omega]$

$Z_{\text{Messung}}$  Gemessene Gesamtimpedanz in  $[j\Omega]$

## 2 Aufgabenstellung

Hauptziel dieser Masterarbeit ist die Hinterfragung des in der Theorie verwendeten Pi-Ersatzschaltbildes zur Berechnung der induktiven und ohmschen Rohrleitungsbeeinflussung durch eine Modellbildung im Labor sowie mit Messungen an einer Rohrleitung die Komponenten des Ersatzschaltbildes zu bewerten.

Die Aufgaben sind wie folgt verteilt:

### **Arbeitspaket A:**

- Theoretische Betrachtung bestehender Berechnungsformeln und die Berechnung einer vorgegeben Rohrleitung und die Ermittlung der Komponenten des Ersatzschaltbildes
- Vergleich der einzelnen Berechnungsverfahren

### **Arbeitspaket B:**

- Aufbau des Labormodells (Rohrleitung 2 m Länge) und der Messeinrichtungen
- Parametrieren der Messgeräte und der verwendeten Sensorik
- Messung der Impedanz und des Winkels der reinen Rohrleitung
- Rückfolgerung auf das Kettenleitermodell

### **Arbeitspaket C:**

- Aufbau des Messequipments und Messung an der „echten“ Rohrleitung. Hierzu wird ein Rückleiter zur Rohrleitung verlegt
- Des Weiteren wird der wirksame spezifische Erdwiderstand mit Hilfe des „Wenner und Schlumberger Verfahren“ ermittelt.

### **Arbeitspaket D:**

- Auswertung und Interpretation der Messdaten. Vergleich der Ergebnisse mit denen aus dem Theoriemodell

## 3 Grundlagen

### 3.1 Definitionen

Die hier aufgelisteten Definitionen wurden aus folgenden Dokumenten entnommen und zusammengefasst:

*AfK-Empfehlung Nr.3 – Arbeitsgemeinschaft für Korrosionsfrage – Stand 2007 [3]*

*Technische Empfehlung Nr.30 – Technisches Komitee für Beeinflussungsfragen Stand 2014 [4]*

*ÖVE ÖNORM EN 50443 – Österreichischer Verband für Elektrotechnik – Stand 2012 [5]*

#### **Rohrleitungssystem**

Ein metallisches Rohrleitungssystem ist ein System aus vernetzten Rohren mit allen zugehörigen Geräten, Einrichtungen und Stationen.

#### **Erde**

Die Erde bezeichnet eine leitende Masse im Erdboden, deren elektrisches Potenzial an jedem Punkt zu Null angenommen wird.

#### **Erdung**

Beschreibt eine niederohmige und stromtragfähige Ableitung von einem erdfühligem Objekt(Rohrleitung) über ein erdfühliges Objekt(Erde). Hierbei wird zwischen passiven und aktiven Erdungen unterschieden. Der Erderstrom der passiven Erdung wird durch die Höhe der Beeinflussungsspannung und die Summe der Widerstände zwischen Erderanschluss und ferner Erde bestimmt.

#### **Spezifischer Erdwiderstand $\rho_E$**

Der spezifische Erdwiderstand  $\rho_E$  ist der elektrische Widerstand eines quadratischen Würfels von 1 m Seitenlänge zwischen zwei gegenüberliegenden Flächen.

#### **Umhüllung**

Bei Kabeln, Rohrleitungen oder anderen elektrischen Anlagen aus Metall benötigt es oft eine äußere elektrische Isolation. Die Isolation besteht aus einem dicken Überzug eines elektrisch isolierenden Mediums.

### **Spezifischer Umhüllungswiderstand $r_u$**

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

### **Erdungswiderstand einer Rohrleitung $R_R$**

Der Erdungswiderstand der Rohrleitung ist der durch den Umhüllungswiderstand bedingte Widerstand zwischen der Rohrleitung und ferner Erde.

### **Feuerschieber**

In Hausanschlussleitungen müssen Hauptabsperreinrichtungen eingebaut sein (diese werden auch „Feuerschieber“ oder „Brandarmatur“ genannt). Den Richtlinien des jeweiligen Netzbetreibers entsprechend sind diese entweder vor dem Gebäudeeintritt oder im Keller des Gebäudes angeordnet.“ Österreichischer Bundesfeuerwehrverband Sachgebiet 4.6 – Gefährliche Stoffe ÖBFV – INFO E – 07.



### 3.2 Modellbildung einer unendlich langen Leitung

Ziel dieses Modells ist es, aus der Geometrie der Leiteranordnung die charakteristischen Parameter wie z.B. Widerstandsbelag und Induktivitätsbelag zu berechnen. Die verwendeten Formeln in Kapitel 3.2, wurden aus den Skripten von Univ.-Prof. Dr. Fickert [6] und Univ.-Prof. Göran Andersson [7] entnommen.

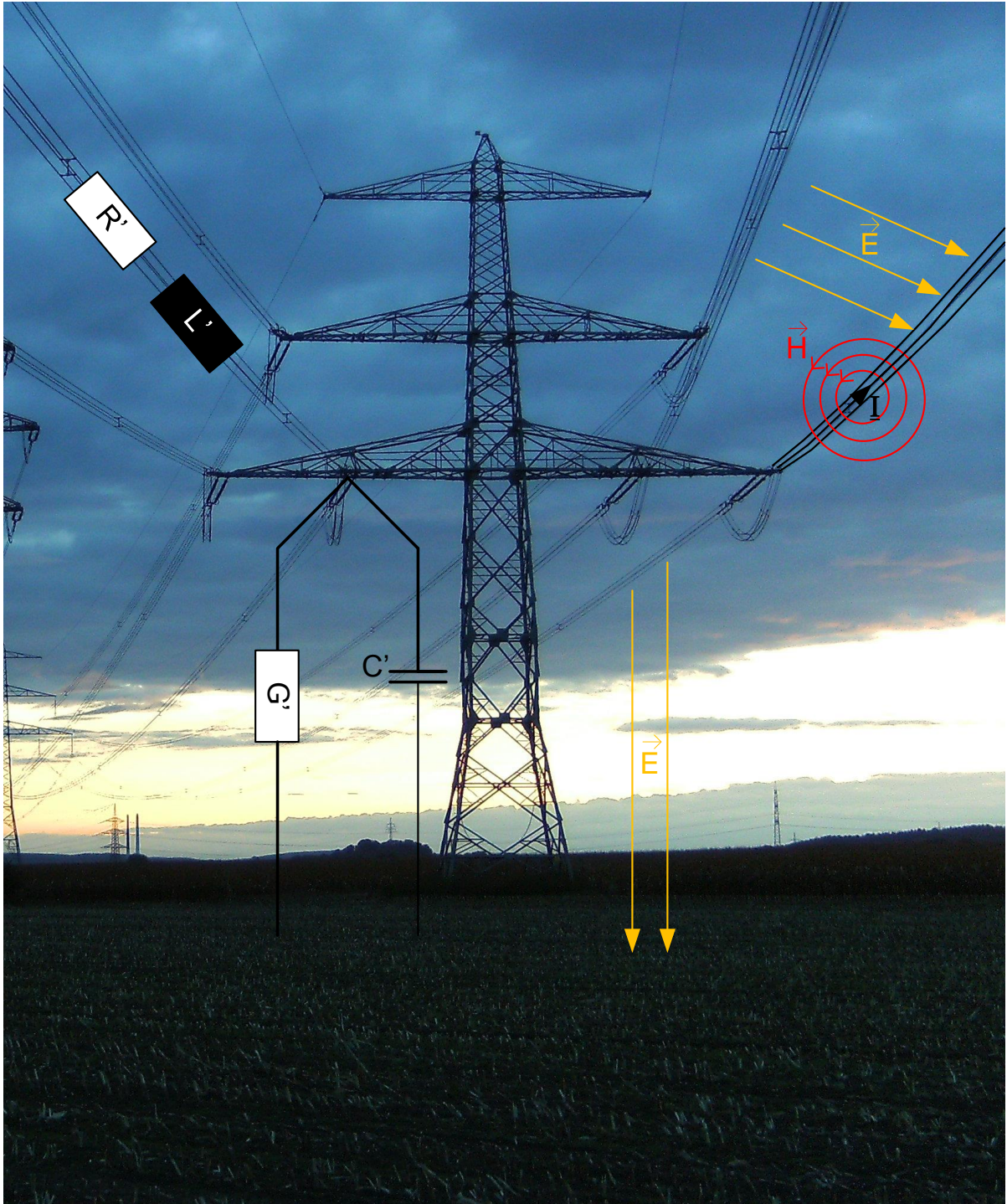


Abbildung 3-1 Magnetisches und elektrisches Feld einer unter Spannung stehenden Freileitung mit stark vereinfachten Ersatzschaltbild (keine Kopplungen zw. den Leitern)

### 3.2.1 Induktivität

Bei einem unendlich langen Leiter mit dem Radius  $r$  ergibt sich bei einem gleichmäßig verteilten Strom  $i$  ein konzentrisch verteiltes Magnetfeld  $H$ . Für einen Punkt P, welcher außerhalb des Radius  $r$  liegt, gilt:

$$H(x) = \frac{i}{2\pi \cdot x} \quad (3.1)$$

Für alle Punkte innerhalb vom Radius  $x < r$  gilt

$$H(x) = \frac{x \cdot i}{2\pi \cdot r^2} \quad (3.2)$$

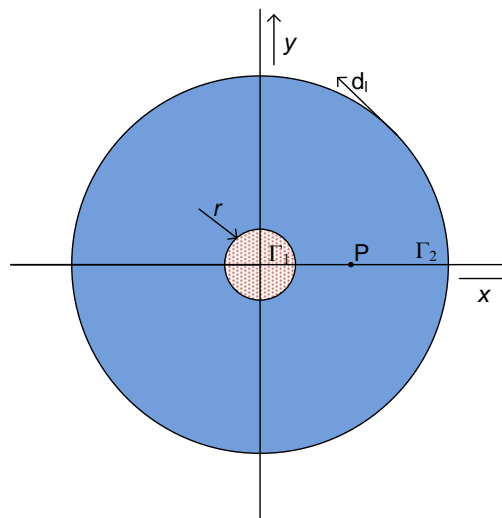


Abbildung 3-2 Unendlich langer Leiter - Querschnitt

Um nun die Induktivität zu bestimmen, wird der äußere und innere magnetische Fluss des Leiters, von Leiteroberfläche bis zu einem Punkt P, berechnet.

$$\Phi_A = \int_r^P B_A(x) dx = \int_r^P \mu_0 \cdot \frac{i}{2\pi \cdot x} dx = \frac{\mu_0 \cdot i}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{P}{r}\right) \quad (3.3)$$

$$\Phi_A = L_a \cdot i \quad (3.4)$$

$$L_a = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{P}{r}\right) \quad (3.5)$$

Aus der magnetischen Energie innerhalb des Leiters lässt sich die innere Induktivität berechnen.  $\mu_R$  steht für die relative Permeabilität des Leitermaterials.



$$W_M = \frac{1}{2} \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \int_0^r H_i^2 dV = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{16\pi} \cdot i^2 \quad (3.6)$$

$$W_M = \frac{1}{2} \cdot L_i \cdot i^2 \quad (3.7)$$

$$L_i = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{8\pi} \quad (3.8)$$

Die Gesamtinduktivität des Vollleiters ergibt sich aus der Summe der inneren und äußeren Induktivität.

$$L = L_i + L_a = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \left( \frac{\mu}{4} + \ln\left(\frac{P}{r}\right) \right) \quad (3.9)$$

### 3.2.2 Kapazität

Ein Leiter  $k$  besitzt eine Ladung  $q_k$ . Wird das Integral der Feldstärke über eine radiale Strecke, auf welcher die Punkte A und B liegen, abgebildet, so ergibt sich die Spannung zwischen diesen beiden Punkten.

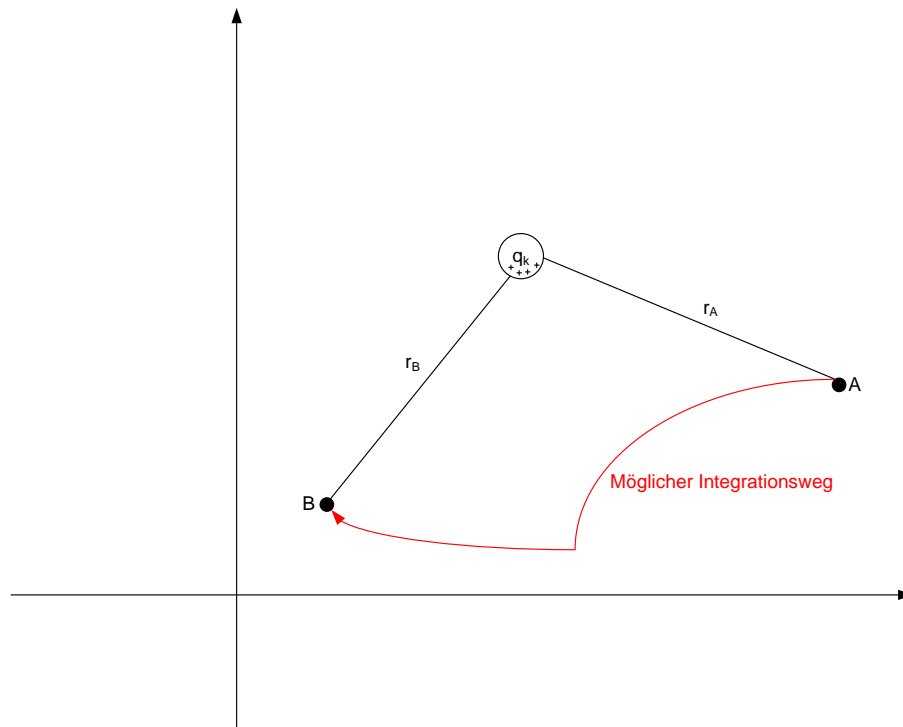


Abbildung 3-3 Integration der elektrischen Feldstärke

$$U = - \int_{r_A}^{r_B} \frac{q_k}{2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_R \cdot r} dr = \frac{q_k}{2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_R} \cdot \ln\left(\frac{r_A}{r_B}\right) \quad (3.10)$$

Berechnung bei mehreren Leitern:

$$U_{BA} = \frac{1}{2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_R} \cdot \sum_{i=1}^n q_i \cdot \ln\left(\frac{r_{Ai}}{r_{Bi}}\right) \quad (3.11)$$

Berechnung für einen Leiter:

$$U_B = \frac{1}{2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_R} \cdot \sum_{i=1}^n q_i \cdot \ln\left(\frac{1}{r_{Bi}}\right) \quad (3.12)$$

Über den Zusammenhang zwischen Ladung und Spannung werden schließlich die Kapazität  $C$  bzw. der Kapazitätsbelag  $C'$  ermittelt.

$$d_m = \sqrt[3]{d_{12} \cdot d_{23} \cdot d_{31}} \quad (3.13)$$

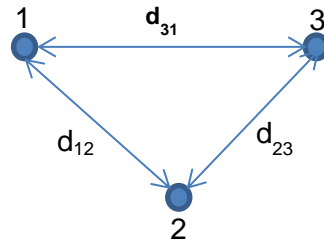


Abbildung 3-4 Geometrie Faktor  $d_m$

Unter der Berücksichtigung des Geometriefaktors ergibt sich nun die Kapazität einer verdrehten Dreiphasenleitung pro Phase und Länge zu:

$$C' = \frac{2\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_R}{\ln\left(\frac{d_m}{r}\right)} \quad (3.14)$$

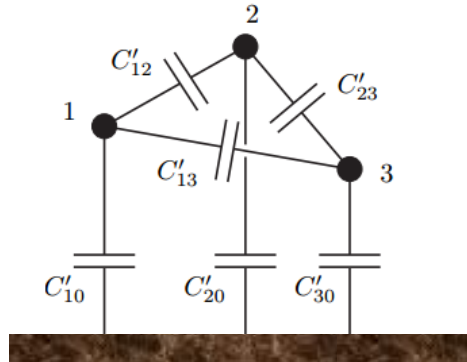


Abbildung 3-5 Kapazitätsverhältnisse bei mehreren Phasen und Erde

### 3.2.3 Der Längs- und Querwiderstandsbelag

Neben den kapazitiven und induktiven Elementen besitzt eine Leitung auch ohmsche Widerstände. Der Längswiderstand setzt sich bei Gleichstrom aus den Abmessungen und dem Material einer Leitung zusammen. Wird anstatt Gleichstrom ein Wechselstrom verwendet, muss zusätzlich der Skin Effekt berücksichtigt werden. Da sich der Strom bei Wechselspannung nicht mehr homogen auf den Leiterquerschnitt aufteilt, fließt sein überwiegende Anteil je nach Eindringtiefe  $\delta$  nur mehr in einem Bruchteil des Leiterquerschnitts. Es gilt, dass bei höherer Frequenz die Eindringtiefe sinkt und der Widerstand ansteigt. (Siehe [6])

Im Allgemeinen steht der ohmsche Längswiderstand für Wärmeverluste, welche beim Stromtransport in einer Leitung auftreten.

$$R' = \frac{\rho_{Material}}{A} \quad (3.15)$$

Die frequenzabhängige Eindringtiefe  $\delta$  des Skin Effektes ergibt sich aus:

$$\delta = \frac{\sqrt{2 \cdot \rho_{Material}}}{\omega \cdot \mu_0 \cdot \mu_R} \quad (3.16)$$

Der Querwiderstand ergibt sich bei Kabeln und Rohrleitungen aus den dielektrischen Verlusten der Feststoffisolation sowie aus den Korona-Verlusten, welche in der Isolierung zwischen den Leitern auftreten. Neben dem Querableitbelag wird auch häufig der Verlustfaktor  $\tan\delta$  angegeben.

$$\tan\delta = \frac{G'}{\omega \cdot C'} \quad (3.17)$$

### 3.3 Kettenleitermodell eines beeinflussten Rohrleitungsabschnitts

Rohrleitungen können aufgrund ihrer elektrotechnischen Eigenschaften nicht als einfach isolierte Leiter in der Erde behandelt werden. Wie Abbildung 3-6 zeigt, müssen sowohl der Längsimpedanzbelag  $\underline{z}_L$  als auch der Queradmittanzbelag der Rohrleitung  $\underline{y}_L$  berücksichtigt werden. Das dargestellte „Kettenleitermodell“ wird für die Modellierung eines differentiellen Leitungsabschnitts verwendet. Induktive und ohmsche Beeinflussungen durch elektrischen Anlagen wie z.B.: einer 220-kV-Freileitung können mithilfe solcher Modelle berechnet werden. [2]

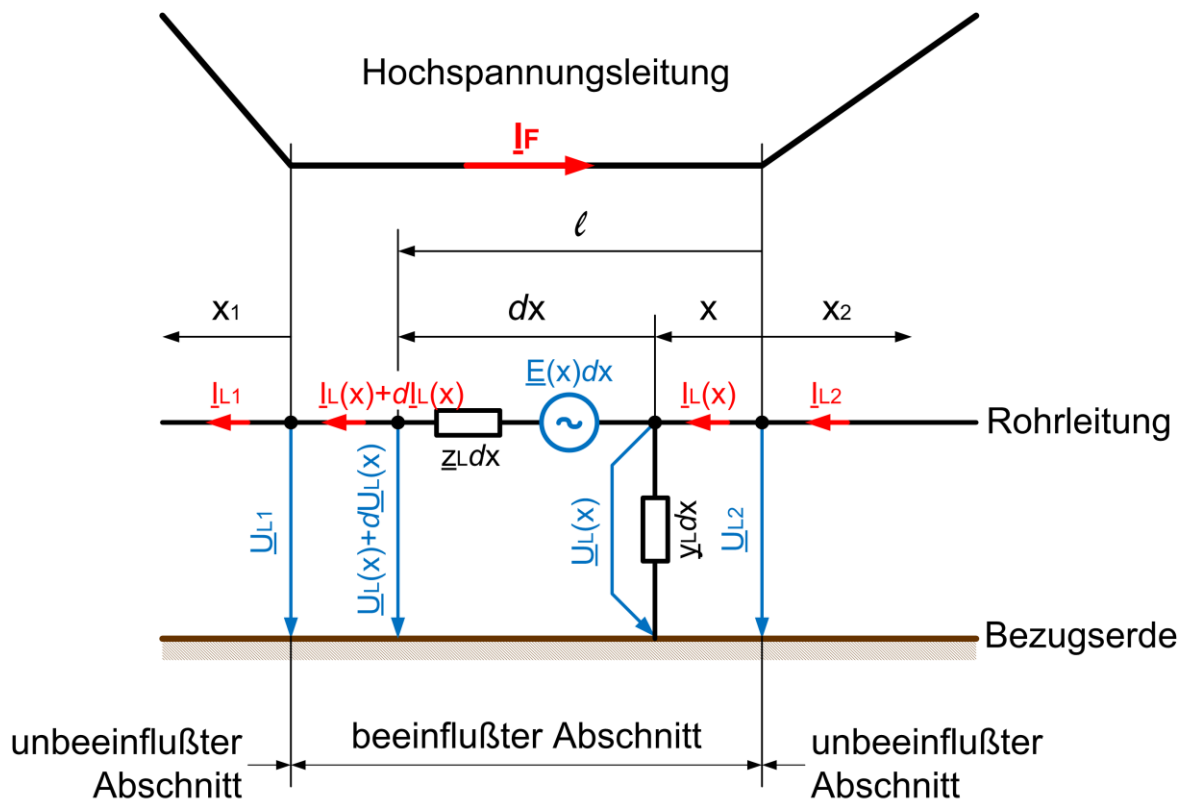


Abbildung 3-6: Vereinfachtes elektrisches Ersatzschaltbild der induktiv beeinflussten Rohrleitung, Beeinflussungsmodell [2]

Wird nun das Modell durch einen Strom  $I_F$  induktiv beeinflusst, ergibt sich über das elektromagnetische Feld die eingekoppelte Spannung  $U_i$ . Daraus können die Differentialgleichungen für die Strom- und Spannungsbeziehungen angeschrieben werden:

$$\frac{d^2 \underline{U}_L(x)}{dx^2} = \underline{z}_L \cdot \underline{y}_L \cdot \underline{U}_L(x) + \frac{d\underline{E}(x)}{dx} \qquad \frac{d^2 \underline{I}_L(x)}{dx^2} = \underline{z}_L \cdot \underline{y}_L \cdot \underline{I}_L(x) - \underline{y}_L \cdot \underline{E}(x)$$

Die in der Abbildung 3-6 und in den o.a. Gleichungen verwendeten Größen bedeuten:

$\underline{E}(x)$	induzierte elektrische Längsfeldstärke an der Stelle x in [V/m]
$\underline{I}_F$	beeinflussender Strom der Hochspannungsleitung in [A]
$\underline{I}_L(x)$	Strom in der Rohrleitung an der Stelle x in [A]
$\underline{U}_L(x)$	Spannung der Rohrleitung gegen das ferne Erdpotenzial (Bezugserde) an der Stelle x in [V]
$\underline{z}_L$	Längsimpedanzbelag der Rohrleitung in [ $\Omega/m$ ]
$\underline{y}_L$	Queradmittanzbelag der Rohrleitung in [S/m]

Wird von einer, zumindest innerhalb bestimmter Abschnitte, homogenen Rohrleitung ausgegangen, d.h. sind die Leitungskonstanten bzw. der Längsimpedanzbelag  $\underline{z}_L$  und der Queradmittanzbelag  $\underline{y}_L$  für diese kurzen betrachteten Stücke der Rohrleitung konstant, so kann eine äquivalente Ersatzschaltung für die Rohrleitung ermittelt werden (siehe Abbildung 3-7). Für die Rohrleitung wird dabei als **Längsimpedanz** der mit der Länge  $\ell$  des Rohrabschnitts multiplizierte Längsimpedanzbelag und als **Queradmittanz** der mit der Länge  $\ell$  des Rohrabschnitts multiplizierte Queradmittanzbelag eingesetzt. [2]

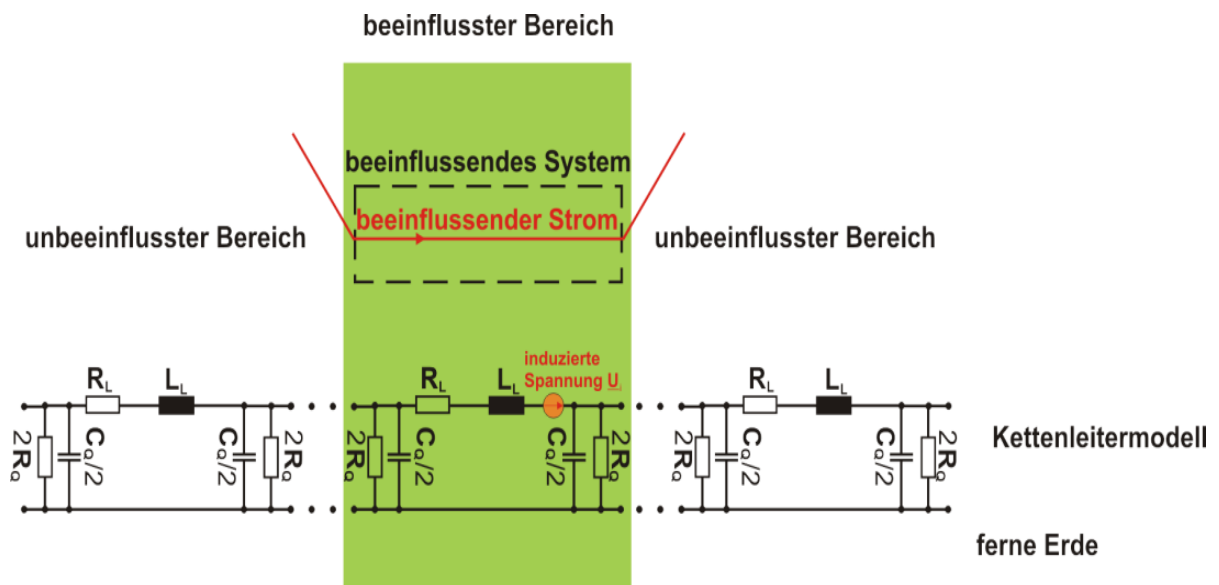


Abbildung 3-7: Rohrleitungersatzschaltbild, Unterteilung eines Rohrleitungsabschnitts in unbeeinflusste Abschnitte und einen durch Hochspannungsanlagen induktiv beeinflussten Abschnitt [2], geändert-

Die Beurteilung der Rohrleitungsbeeinflussung erfolgt im Sinne der derzeit gültigen einschlägigen Bestimmungen und Vorschriften für die Elektrotechnik (TE 30: 1987 [4], ÖVE/ÖNORM EN 50443: 2012 [5] und ÖVE/ÖNORM EN 15280: 2013 [8]).

### 3.4 Das elektrische Strömungsfeld im Erdreich

Um das Strömungsfeld in der Erde und somit den Stromfluss im Erdreich beschreiben zu können, bietet sich die genauere Betrachtung eines Halbkugelerders an.

Der Halbkugelerder wird als ideal leitend angenommen. Über diesen wird ein Strom in das umgebende homogene Erdreich mit der Leitfähigkeit  $\sigma_{\text{Erdboden}}$  eingepreßt.

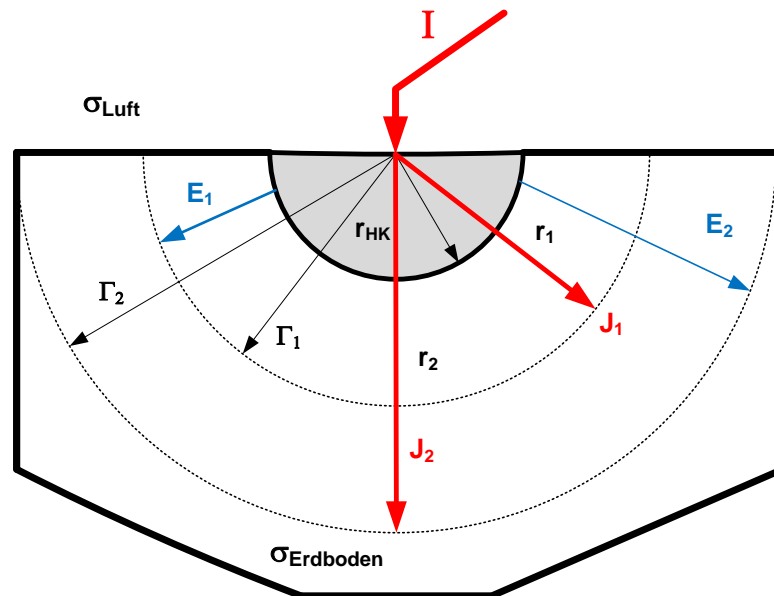


Abbildung 3-8 Elektrisches Strömungsfeld eines Halbkugelerders

Da die Leitfähigkeit von Luft gegenüber der Leitfähigkeit der Erde wesentlich kleiner ist, kann das obere Medium vernachlässigt werden. Der Strom wird sich vom Kugelmittelpunkt aus radial symmetrisch in das Erdreich ausbilden. Je größer der Radius wird, desto mehr Fläche steht dem Strom zur Verfügung. Daher wird mit der Distanz der Widerstand immer kleiner und somit auch der Spannungsabfall. Daraus folgt, dass der Spannungsabfall in Nahbereich des Halbkugelerders am Größten sein muss.

(Siehe Elektrisches Strömungsfeld Halbkugelerder [9]).

$$I = \iint \vec{j} \cdot d\vec{A} \quad (3.18)$$

$$I = \iint J_r(r) \cdot \vec{e}_r \cdot \vec{e}_r \cdot dA \quad (3.19)$$

$$I = J_r(r) \iint dA \quad (3.20)$$

$$J_r(r) = \frac{I}{2\pi \cdot r^2} \quad (3.21)$$

$$\vec{j} = \frac{I}{2\pi \cdot r^2} \cdot \vec{e}_r \quad (3.22)$$

Die Elektrische Feldstärke  $E$  ist über die Leitfähigkeit  $\sigma$  mit der Stromdichte verknüpft.

$$\vec{E} = \frac{1}{\sigma} \cdot \vec{j} \quad (3.23)$$

$$\vec{E} = \frac{I}{2\pi \cdot r^2 \cdot \sigma} \cdot \vec{e}_r \quad (3.24)$$

Die Erder-Spannung  $U$  für den Halbkugelerder ergibt sich über das Integral der elektrischen Feldstärke von der Oberfläche des Halbkugelerders bis ins Unendliche:

$$U = \int \vec{E} \cdot d\vec{s} \quad (3.25)$$

$$U = \int_{r_{HK}}^{\infty} \frac{I}{2\pi \cdot r^2 \cdot \sigma} \cdot \vec{e}_r \cdot \vec{e}_r \cdot d\vec{r} \quad (3.26)$$

$$U = \frac{I}{2\pi \cdot \sigma} \cdot \left[ \frac{-1}{r} \right]_{r_{HK}}^{\infty} \quad (3.27)$$

$$U = \frac{I}{2\pi \cdot \sigma} \cdot \left( \frac{-1}{r} + \frac{1}{r_{HK}} \right) \quad (3.28)$$

Daraus folgt der Ausbreitungswiderstand des Halbkugelerders mit:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{1}{2\pi \cdot \sigma \cdot r_{HK}} \quad (3.29)$$



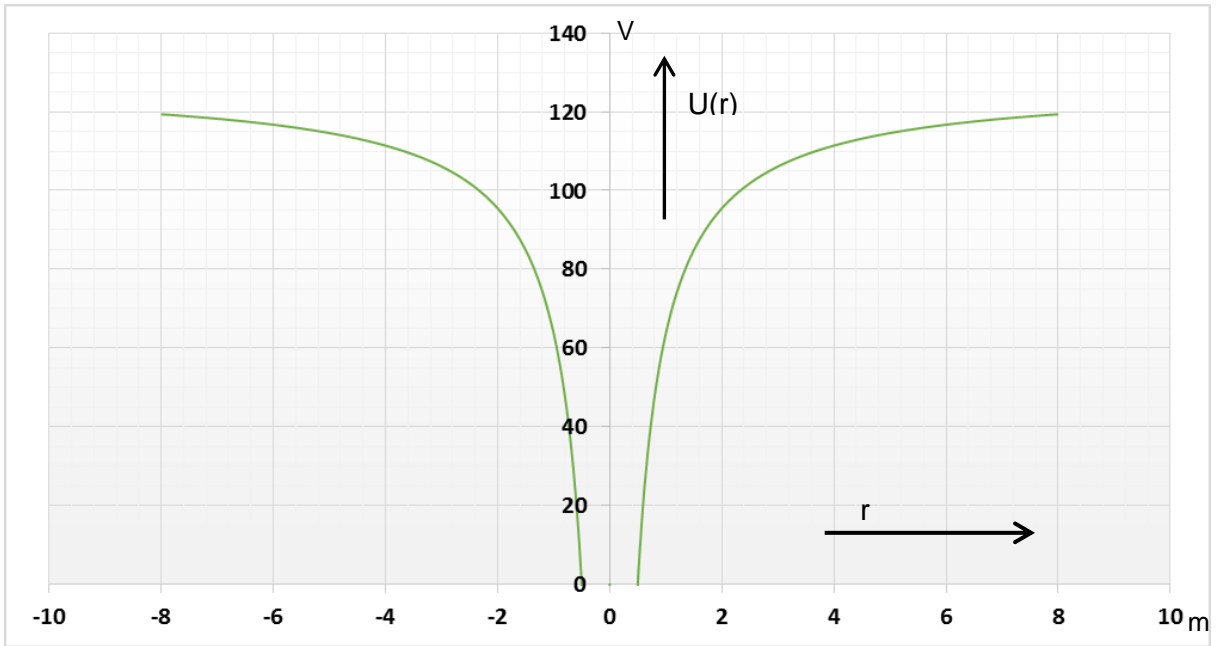


Abbildung 3-9 Spannungstrichter eines Halbkugelerders

## 4 Methoden

### 4.1 Der spezifische Erdwiderstand

Der spezifische Erdwiderstand wird mit Hilfe eines Einheitswürfels mit einer Kantenlänge von 1 m definiert und ist der auftretende Widerstand, wenn der Würfel von einer Kantenfläche zur gegenüberliegenden Kantenfläche durchströmt wird (Abbildung 4-1). Bei einem Boden aus Lehm mit ca. 200  $\Omega\text{m}$ , wäre bei einem Stromfluss von 0,5 A eine Potenzialdifferenz zwischen den Platten von 100 V messbar.

$$\rho_E = \frac{R \cdot A}{l} \text{ in } \Omega\text{m}$$

(4.1) [10]

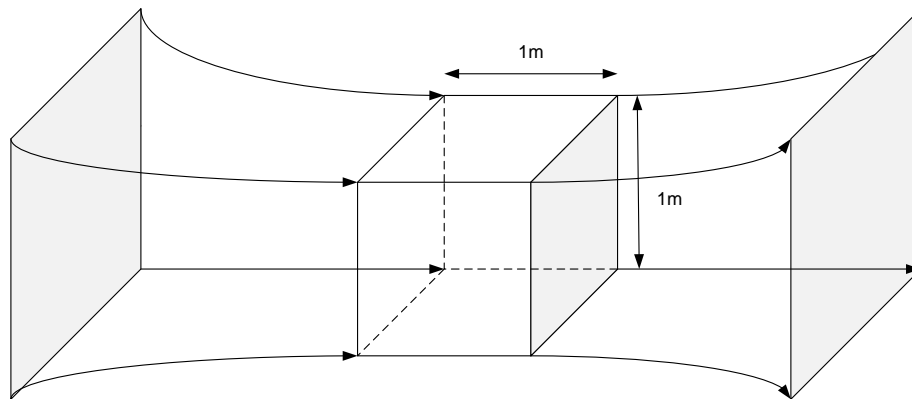


Abbildung 4-1 Definition des spezifischen Erdwiderstandes anhand des Einheitswürfel [10]

Der Erdboden besteht in der Praxis jedoch aus verschiedenen Materialien mit verschiedenen Schichtdicken (Abbildung 4-2). Je nach Material (Kies, Sand, Lehm...), Temperatur des Bodens, Wassergehalt des Bodens und PH-Wert des Wassers ändert sich der Wert des Erdbodenwiderstands um ein Vielfaches. Ein Vergleich von Messungen bei trockenen und feuchten Erdbedingungen derselben Messtrasse zeigt in den obersten Schichten Messunterschiede bis zu einem Faktor 3,5 [11].

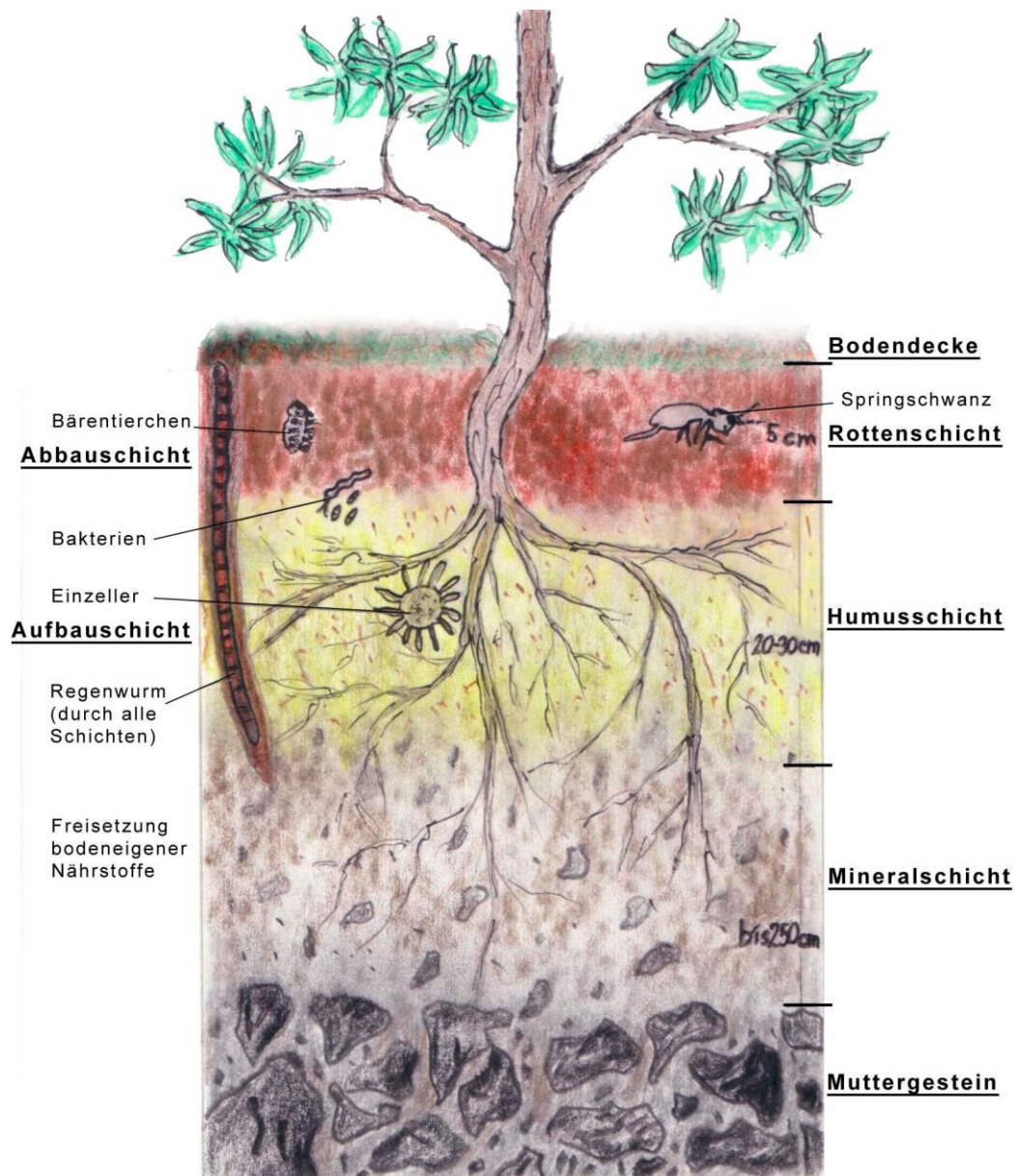


Abbildung 4-2 Typischer Bodenaufbau (Quelle: Angelo Huber, Land Oberösterreich)

Den unterschiedlichen Materialien können folgende Wertbereiche zugeordnet werden:

Bodenart	Bereich in [ $\Omega\text{m}$ ]
Lehm, Ton, Humus	20...200
Sand	200...2.500
Kies	500...3.000
Verwittertes Gestein	>1.000
Granit	2.000...50.000
Fels	>10.000
Beton	50...500
reines Leitungswasser	32,5...56
Regenwasser	3...33
Meerwasser	1,5...10
Kupfer	$0,018 \times 10^{-6}$
Aluminium	$0,029 \times 10^{-6}$
Eisen	$0,1 \times 10^{-6}$

Abbildung 4-3 Kennwerte des spezifischen Erdwiderstandes [12], geändert

Um für eine elektrische Anlage die richtigen Erder (Tiefenerder, Oberflächenerder) auszuwählen, muss der Aufbau des Erdreiches bekannt sein. Prinzipiell wird zwischen Sondierung und Kartierungsverfahren unterschieden. Bei einer Sondierung wird versucht den spezifischen Widerstand als eine Funktion der Tiefe aufzuzeichnen (z.B.: Methode von Schlumberger).

#### 4.1.1 4-Sonden-Verfahren

Während der Strom über die äußeren Elektroden eingespeist wird, erfolgt eine Spannungsmessung über die beiden inneren Sonden. Das Modell des halbkugelförmigen Strömungsfeldes setzt den homogenen Aufbau des Bodens voraus.

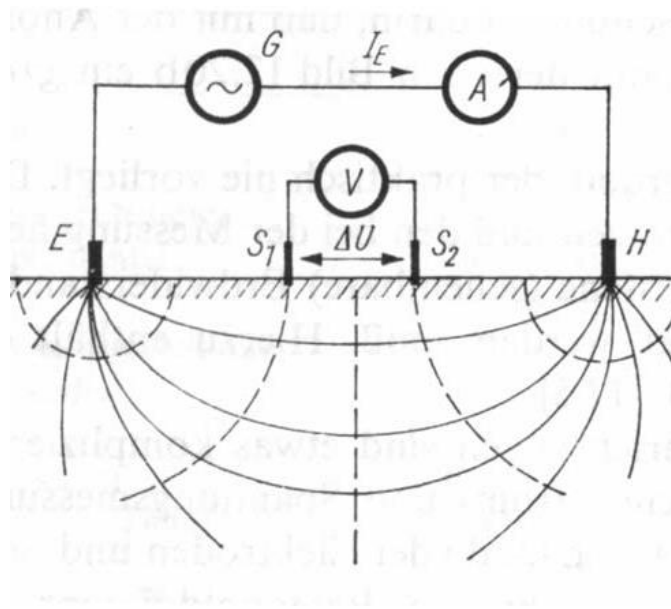


Abbildung 4-4 4-Sonden Methode – Elektrisches Strömungsfeld im Erdreich [9].

Bei Annahme des halbkugelförmigen Strömungsfeldes kann der Widerstand  $R$  zwischen den Äquipotentiallinien ermittelt werden

$$R_B = \frac{\Delta U}{I_E} \quad (4.2)$$

Daraus kann der spezifische Widerstand ermittelt werden:

$$\rho_w = k \cdot \frac{\Delta U}{I_E} = k \cdot R_B \quad (4.3)$$

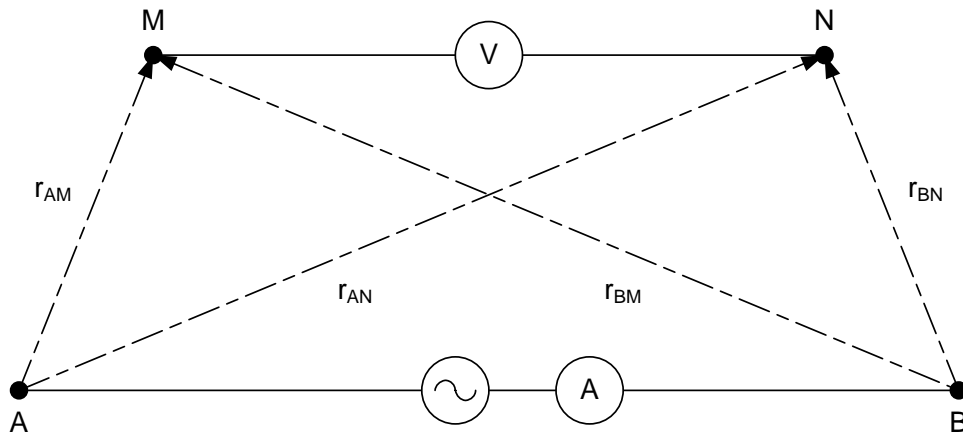


Abbildung 4-5 Geometriefaktors 4 Sonden Methode

Der Geometriefaktor  $k$  ist von der Configuration der Strom und Spannungselektroden abhängig und berechnet sich nach dem Superpositionsprinzip. (Siehe Abbildung 4-5)

$$k = \frac{2\pi}{\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{AN}} - \frac{1}{r_{BM}} + \frac{1}{r_{BN}}} \quad (4.4)$$

Bei einem homogenen Erdreich entspricht der spezifische Erdwiderstand dem in Gleichung (4.3). Da aber der Untergrund meistens inhomogen aufgebaut ist, wird der gemessene Widerstand als „scheinbarer“ Widerstand bezeichnet, der einer Mittelung der wahren Widerstandsverteilung entspricht.

$$\rho_w = k \cdot \frac{\Delta U}{I_E} = k \cdot R_B \quad (4.3)$$

### 4.1.2 Wenner Verfahren

Das Prinzip der Wenner Methode ähnelt dem 4-Sonden-Verfahren. Bei der Wenner Methode wird jedoch ein Wechselstrom mit einer Frequenz von z.B. 128 Hz über die 2 äußeren Sonden in das Erdreich eingebracht. Über die 2 inneren Sonden kann eine Potentialdifferenz  $\Delta U$  gemessen werden. Der Abstand zwischen den einzelnen Sonden ist konstant und wird im Messverlauf gleichmäßig vergrößert (z.B. 0.2 m, 0.5 m, 1 m, 2 m, 4 m, 8 m, 16 m). Mittels des Abstands der Sonden kann die Eindringtiefe in das Erdreich festgelegt werden. Ein kleiner Sonden Abstand ergibt daher den Widerstand der oberen Bodenschichten, ein größerer den der unteren Bodenschichten. Über diese Sondierung kann ein Bodenprofil erstellt werden.

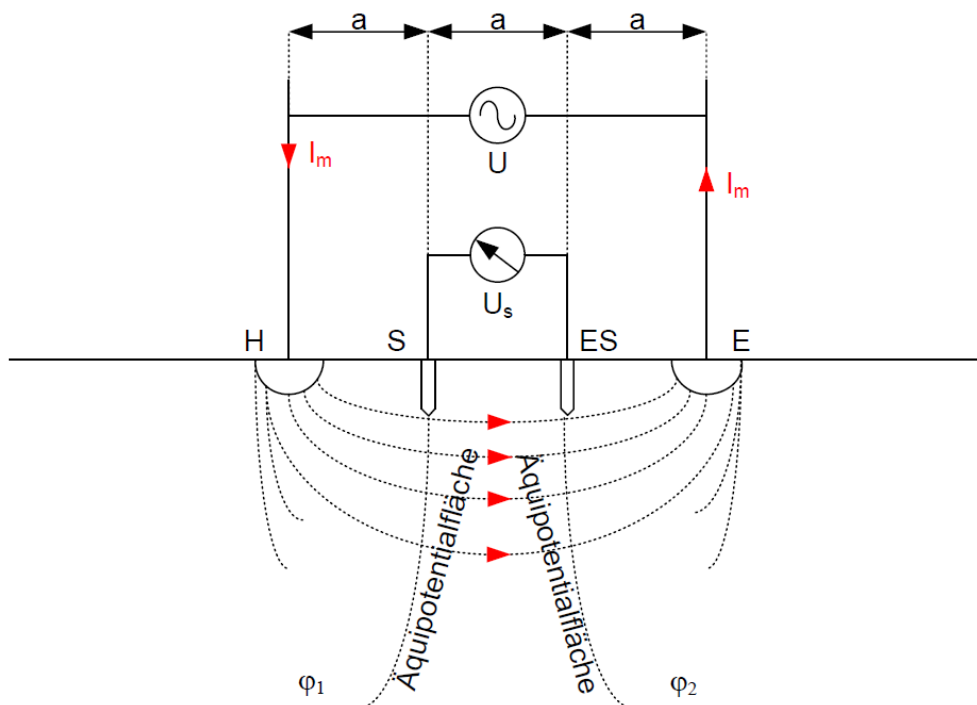


Abbildung 4-6 Wenner Verfahren, geändert [13]

Unter der Berücksichtigung, das alle Messsonden in einer Reihe stehen, ergibt sich:

$$\rho_E = 2\pi \cdot a \cdot R_{S-ES} \tag{4.5}$$

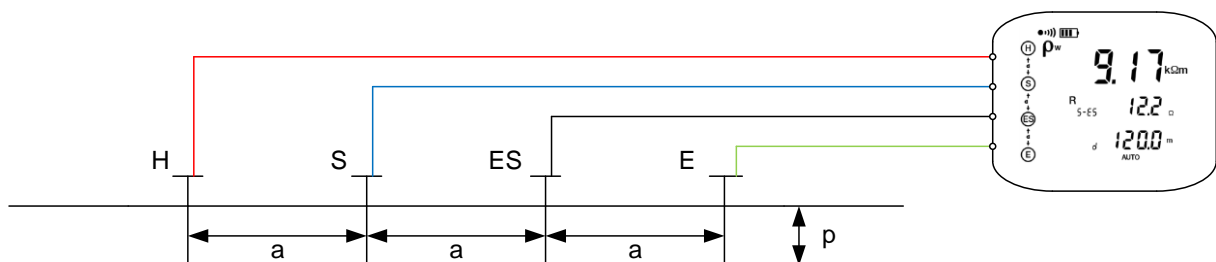


Abbildung 4-7 Messaufbau Wenner C.A. 6472, geändert [14]

### 4.1.3 Schlumberger Verfahren

Bei dieser Messmethode wird der spezifische Erdwiderstand als Funktion der Tiefe aufgenommen. Das Messverfahren ähnelt dem des Wenner Verfahrens, jedoch ändert sich der Abstand zwischen den Sonden. Die inneren Sonden verweilen bei einem Abstand  $a$  zueinander, während sich die äußeren Sonden in konstanten Abständen  $b$  nach Außen bewegen. Über die Abstände der Sonden lässt sich folgende Gleichung aufstellen:

$$\rho_E = 2\pi \cdot \frac{d^2 - \frac{A^2}{4}}{a} \cdot R_{S-ES} \tag{4.6}$$

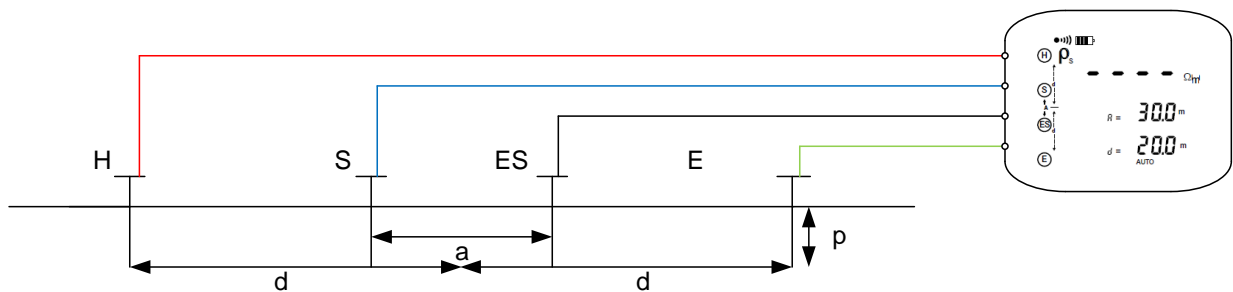


Abbildung 4-8 Messaufbau Schlumberger C.A. 6472 [14], geändert

## 4.2 Ermittlung des Erdungswiderstands einer elektrischen Anlage

### 4.2.1 3-Punkt-Methode

Um den Erdungswiderstand messen zu können, muss zwischen zum messenden Erder und Hilferder ein Mindestabstand von 80 m eingehalten werden. [14] Der Abstand zwischen dem zu messenden Erder und der Sonde beträgt mindestens 62 % des Abstandes des Hilferders. Generell soll ein Mindestabstand von 30 m zwischen den Erdspeissen eingehalten werden. Das Ergebnis kann durch eine erneute Prüfung mit einem variierten Sondenabstand bestätigt werden, indem die Sonde um 10 % näher an den fixen Hilferder verschoben wird.

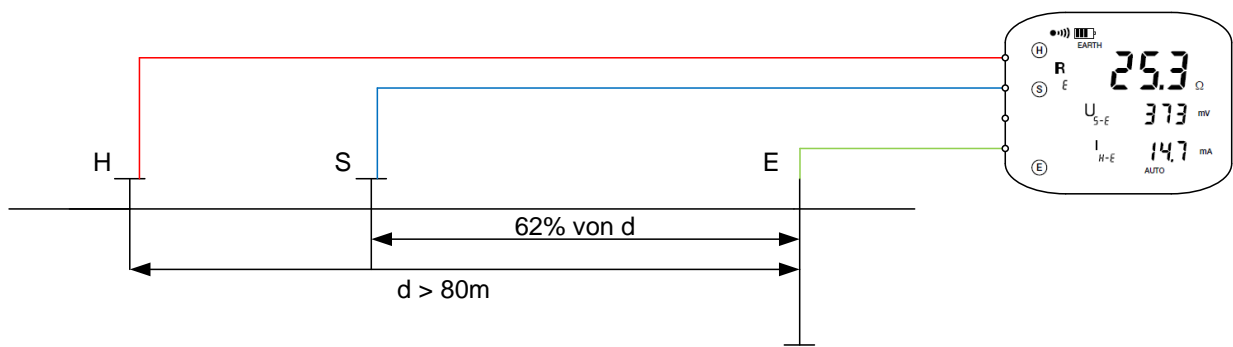


Abbildung 4-9 Messaufbau Erdungsmessung 3-Punktverfahren C.A. 6472 [14], geändert



### 4.3 Berechnung der Kenndaten einer Rohrleitung

Um die Kenndaten einer Rohrleitung berechnen zu können, ist es sinnvoll auf anerkannte theoretische Modelle der Elektrotechnik zurückzugreifen und diese hier anzuwenden bzw. leicht anzupassen. Eine Rohrleitung kann durch das Modell einer PI-Ersatzschaltung dargestellt werden. Je nach Geometrie und den verwendeten Materialien ergeben sich charakteristische Parameter. Wenn diese auf die Leitungslänge bezogen sind, werden sie auch Leitungsbeläge genannt.

Prinzipiell eine Rohrleitung mittels **Längsanteil** mit:

- **Widerstandsbelag  $R'$  in  $\Omega/m$**
- **Induktivitätsbelag  $L'$  in  $mH/m$**

und einen **Queranteil** mit:

- **Ableitbetrag  $G'$  in  $S/m$**
- **Kapazitätsbelag  $C'$  in  $F/m$**

nachgebildet werden. Da es sich hier um ein Modell handelt, werden lineare Verhältnisse, sowie eine homogene Aufteilung der einzelnen Größen entlang der Rohrleitungslänge vorausgesetzt.



Abbildung 4-10 Ersatzschaltbild Rohrleitung

### 4.3.1 Berechnung laut AfK3

$$R' = \frac{\sqrt{\rho_{St} \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \omega}}{\pi \cdot D \cdot \sqrt{2}} + \frac{\mu_0 \cdot \omega}{8} \quad (4.7)$$

$$\omega \cdot L' = \frac{\mu_0 \cdot \omega}{4\pi} \cdot 2 \cdot \ln\left(\frac{3,7 \cdot \sqrt{\rho_E}}{D \cdot \sqrt{\mu_0 \cdot \omega}}\right) + \frac{\sqrt{\rho_{St} \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \omega}}{\pi \cdot D \cdot \sqrt{2}} \quad (4.8)$$

$$G' = \frac{\pi \cdot D}{r_U} \quad (4.9)$$

$$\omega \cdot C' = \frac{\omega \cdot \pi \cdot D \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r}{\delta} \quad (4.10)$$

Zur Berechnung der Gesamtimpedanz wird nun folgendes Schaltbild verwendet:

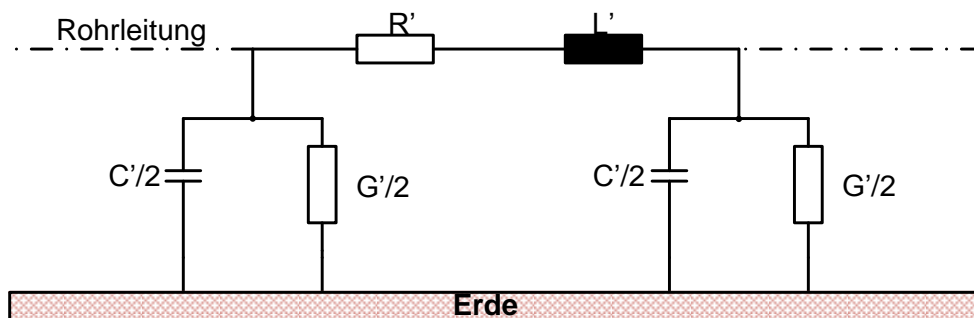


Abbildung 4-11 Elektrisches Ersatzschaltbild einer Rohrleitung, geändert [2]

Durch das Zusammenfassen der Längs- und Querelemente ergibt sich:

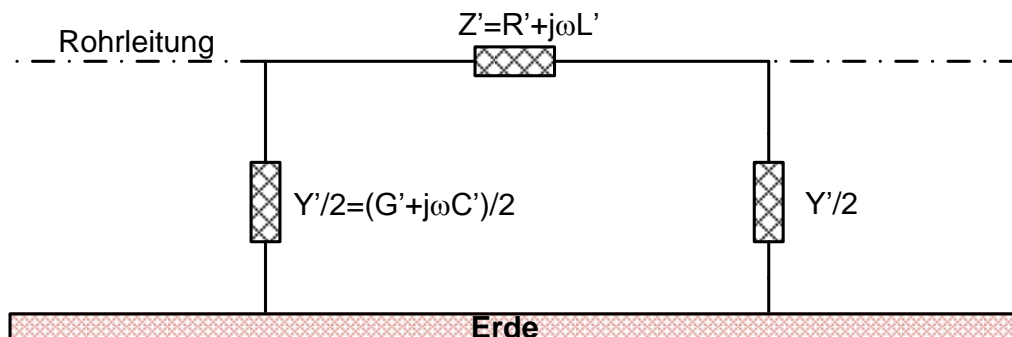


Abbildung 4-12 Längs- und Querelemente zu einem Ersatzschaltbild zusammengefasst, geändert [2]

### 4.3.2 Berechnung des Rohrleitungsimpedanzmodells

Für die Nachbildung des ohmschen Längswiderstands werden zwei Modelle, also zwei Querschnitte für die weiteren Berechnungen betrachtet:

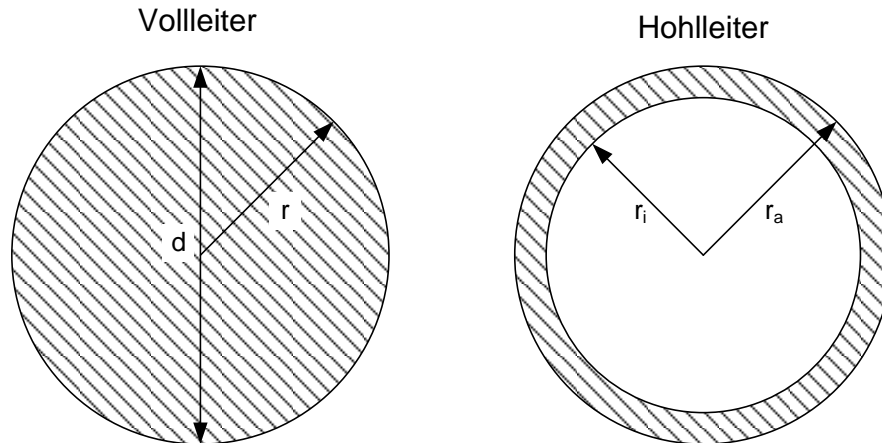


Abbildung 4-13 Querschnitte für die Berechnung

Die Berechnungen wurden anhand der Formeln Carson und Pollaczek und Michailow und Rasumov durchgeführt. [15] [16] [17] [18].

$$A = \frac{d^2 \cdot \pi}{4} \quad (4.11)$$

Daraus resultieren die beiden Längswiderstandsbeläge ohne Skin Effekt

$$R_l' = \frac{\rho_{st}}{A} \quad (4.12)$$

Die Eindringtiefe zur Berücksichtigung des Skin-Effekts errechnet sich wie folgt:

$$\delta_{ST} = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho_{ST}}{\omega \cdot \mu_0 \mu_r}} \quad (4.13)$$

$$R_{lSkin}' = R_l' \cdot \left( \frac{d}{2 \cdot \delta_{ST}} + \frac{1}{4} \right) \quad (4.14)$$

Der Erdwiderstand berechnet sich laut:

$$R_E' = \left( \frac{\mu_0 \cdot \omega}{8} \right) \quad (4.15)$$

Die innere und äußere Induktivität, auch innere Reaktanz und Selbstreaktanz eines Vollleiters genannt können mit folgenden Formeln beschrieben werden:

$$\omega \cdot L_i' = \frac{\omega \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}{8\pi} \quad (4.16)$$

Für die äußere Induktivität muss die Tiefe des äquivalenten Erdrückleiters in Erde  $D_e$  berechnet werden.

$$\delta_E = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho_E}{\omega \cdot \mu_0}} \quad (4.17)$$

$$D_e = \sqrt{\frac{2 \cdot e}{\gamma}} \cdot \delta_E \quad (4.18)$$

$$\omega \cdot L_a' = \frac{\omega \cdot \mu_0}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{D_e}{r_1}\right) \quad (4.19)$$

Bei der inneren Induktivität muss wieder der Skineneffekt berücksichtigt werden.

$$\omega \cdot L_{i\text{skin}}' = \omega \cdot L_i' \cdot \frac{2 \cdot \delta_{ST}}{\frac{d}{2}} \quad (4.20)$$

Für die innere und äußere Induktivität eines Hohlleiters müssen die Außen- und Innendurchmesser berücksichtigt werden.  $r_i$  steht für Innenradius und  $r_a$  für Außenradius. (Genaue Vorgehensweise siehe [19])

$$\omega \cdot L_i' = \frac{\omega \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}{8\pi} \cdot \left[ 1 - \frac{2 \cdot r_i^2}{r_a^2 - r_i^2} + \left( \frac{2 \cdot r_i^2}{r_a^2 - r_i^2} \right)^2 \cdot \ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right) \right] \quad (4.21)$$

$$\omega \cdot L_a' = \frac{\omega \cdot \mu_0}{2\pi} \cdot \ln\left( \frac{D_e}{r_a \cdot e^{-\frac{4}{3} \left( \frac{r_i(r_a - r_i)}{(2 \cdot r_i + r_a - r_i)^2} \right)}} \right) \quad (4.22)$$

$$L' = L_a' + L_i' \quad (4.23)$$

Aus der Theorie und den Arbeiten von Carson ergibt sich für die Querelemente einer Rohrleitung:

$$\omega \cdot C' = \omega \cdot \frac{2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_R}{\ln\left(\frac{\frac{d}{2} + \delta}{\frac{d}{2}}\right)} \quad (4.24)$$

$$G' = \frac{d \cdot \pi}{ru} \quad (4.25)$$

## 4.4 Berechnung des Labormodells

Die folgenden Berechnungen werden benötigt um die Messergebnisse in Kapitel 5 zu kontrollieren bzw. mögliche Abweichungen festzustellen. Dabei werden die Formeln der AfK3 [3] und die Formeln der Theorie [20] verwendet und gegenübergestellt.



Abbildung 4-14 Labormodell

### 4.4.1 Kenndaten der Berechnung

d Durchmesser  $d = 120 \text{ mm}$

l Länge der Rohrleitung  $l = 2 \text{ m}$

$\delta$  Dicke der Umhüllung  $\delta = 4 \text{ mm}$

$d_s$  Dicke der Stahlrohr  $d_s = 3,5 \text{ mm}$

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

$\mu_0$  Absolute Permeabilität  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}}$

$\mu_r$  Relative Permeabilität für Stahl  $\mu_r = 500$

$\rho_E$  Spezifischer Erdwiderstand  $\rho_E = 1400 \Omega\text{m}$

$\rho_{ST}$  Spezifischer Gleichstromwiderstand von Stahl  $\rho_{ST} = 0,16 \frac{\Omega\text{mm}^2}{\text{m}}$

$\epsilon_0$  Absolute Dielektrizitätszahl  $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}}$

$\epsilon_r$  Relative Dielektrizitätszahl der Rohrumhüllung  $\epsilon_r = 2,3$  für PE

$r_u$  Umhüllungswiderstand der Rohrleitung  $r_u = 100.000 \Omega\text{m}^2$

#### 4.4.2 Berechnung Methode 1 - AfK3

$$R' = \frac{\sqrt{0,16 \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}} \cdot 500 \cdot 2\pi \cdot 50 \text{ Hz}}}{\pi \cdot 120 \text{ mm} \cdot \sqrt{2}} + \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}} \cdot 2\pi \cdot 50 \text{ Hz}}{8} = 0,382 \frac{\text{m}\Omega}{\text{m}}$$

$$\omega \cdot L' = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}} \cdot 2\pi \cdot 50 \text{ Hz}}{4\pi} \cdot 2 \cdot \ln \left( \frac{3,7 \cdot \sqrt{100} \Omega \text{m}}{120 \text{ mm} \cdot \sqrt{4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}} \cdot 2\pi \cdot 50 \text{ Hz}}} \right) + \frac{\sqrt{0,16 \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}} \cdot 500 \cdot 2\pi \cdot 50 \text{ Hz}}}{\pi \cdot 120 \text{ mm} \cdot \sqrt{2}} = j0,505 \frac{\text{m}\Omega}{\text{m}}$$

$$G' = \frac{\pi \cdot 120 \text{ mm}}{100.000 \Omega \text{m}^2} = 0,00376 \frac{\text{mS}}{\text{m}}$$

$$\omega \cdot C' = \frac{2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot \pi \cdot 120 \text{ mm} \cdot 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}} \cdot 2,3}{4 \text{ mm}} = -j0,000602 \frac{\text{mS}}{\text{m}}$$

$$R = R' \cdot l = 0,382 \frac{\text{m}\Omega}{\text{m}} \cdot 2 \text{ m} = 0,0993 \text{ m}\Omega$$

$$\omega \cdot L = \omega \cdot L' \cdot l = j0,505 \frac{\text{m}\Omega}{\text{m}} \cdot 2 \text{ m} = j1,01 \text{ m}\Omega$$

$$L = 3,21 \mu\text{H}$$

$$G = G' \cdot l = 0,00376 \frac{\text{mS}}{\text{m}} \cdot 2 \text{ m} = 0,00752 \text{ mS}$$

$$\omega \cdot C = \omega \cdot C' \cdot l = -j0,000602 \frac{\text{mS}}{\text{m}} \cdot 2 \text{ m} = -j0,00120 \text{ mS}$$

$$C = 3,83 \text{ nF}$$

#### 4.4.3 Berechnung Methode 2 - Zylindrischen Vollleiter

$$A_{\text{Rohr}} = \frac{(120 \text{ mm})^2 \cdot \pi}{4} = 11309,73 \text{ mm}^2$$

$$R_l' = \frac{0,16 \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}}}{11309,73 \text{ mm}^2} = 0,0141 \frac{\text{m}\Omega}{\text{m}}$$

$$\delta_{ST} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,16 \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}}}{4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}} \cdot 500 \cdot 2\pi \cdot 50 \text{ Hz}}} = 1,27 \text{ mm}$$

$$\delta_E = \sqrt{\frac{2 \cdot 100 \Omega \text{m}}{2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}}}} = 711,76 \text{ m}$$

$$D_e = \sqrt{\frac{2 \cdot 2,718}{1,781}} \cdot 711,76 \text{ m} = 931,77 \text{ m}$$

$$R_{l\text{Skin}}' = 0,0141 \frac{\text{m}\Omega}{\text{m}} \cdot \left( \frac{60 \text{ mm}}{2,54 \text{ mm}} + \frac{1}{4} \right) = 0,336 \frac{\text{m}\Omega}{\text{m}}$$

$$R_{l\text{Skin}} = 0,336 \frac{\text{m}\Omega}{\text{m}} \cdot 2 \text{ m} = 0,672 \text{ m}\Omega$$

$$\omega \cdot L_i' = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}} \cdot 500 \cdot 2\pi \cdot 50 \text{ Hz}}{8\pi} = j7,85 \frac{\text{m}\Omega}{\text{m}}$$

$$\omega \cdot L_{i\text{Skin}}' = j7,85 \frac{\text{m}\Omega}{\text{m}} \cdot \frac{2 \cdot 1,27 \text{ mm}}{60 \text{ mm}} = j0,333 \frac{\text{m}\Omega}{\text{m}}$$

$$\omega \cdot L_{i\text{Skin}} = \frac{0,333 \text{ m}\Omega}{\text{m}} \cdot 2 \text{ m} = j0,666 \text{ m}\Omega$$

$$\omega \cdot L_a' = \frac{2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}}}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{931,77 \text{ m}}{\frac{60 \text{ mm}}{1000}}\right) = j0,606 \frac{\text{m}\Omega}{\text{m}}$$

$$\omega \cdot L_a = j0,606 \frac{\text{m}\Omega}{\text{m}} \cdot 2 \text{ m} = j1,212 \text{ m}\Omega$$

$$\omega \cdot L_{\text{Gesamt}}' = j0,939 \frac{\text{m}\Omega}{\text{m}}$$

$$\omega \cdot L_{\text{Gesamt}} = j0,939 \frac{\text{m}\Omega}{\text{m}} \cdot 2 \text{ m} = j1,878 \text{ m}\Omega$$

$$L = 5,98 \mu\text{H}$$

$$\omega \cdot C' = 2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot \frac{2\pi \cdot 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}} \cdot 2,3}{\ln\left(\frac{60 \text{ mm} + 4 \text{ mm}}{60 \text{ mm}}\right)} = 0,000622 \frac{\text{mS}}{\text{m}}$$

$$\omega \cdot C = 0,000622 \frac{\text{mS}}{\text{m}} \cdot 2 \text{ m} = 0,00124 \text{ mS}$$

$$C = 3,96 \text{ nF}$$

$$G' = \frac{\pi \cdot 120 \text{ mm}}{100.000 \Omega \text{ m}^2} = 0,00376 \frac{\text{mS}}{\text{m}}$$

$$G = 0,00752 \text{ mS}$$

#### 4.4.4 Zusatz zu Methode 2 - zylindrischer Hohlleiter

Hier ändert sich die innere und äußere Induktivität aufgrund der neuen geometrischen Verhältnisse.

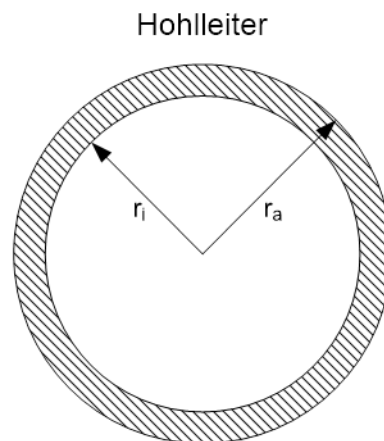


Abbildung 4-15 Hohlleitermodell

Die innere Induktivität ergibt sich aus:

$$\omega \cdot L_i' = \frac{2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}} \cdot 500}{8\pi} \cdot \left[ 1 - \frac{2 \cdot 52,4^2}{60^2 - 52,4^2} + \left( \frac{2 \cdot 52,4^2}{60^2 - 52,4^2} \right)^2 \cdot \ln \left( \frac{60}{52,4} \right) \right] = j1,32 \frac{\text{m}\Omega}{\text{m}}$$

$$\omega \cdot L_{i\text{skin}}' = j1,32 \frac{\text{m}\Omega}{\text{m}} \cdot \frac{2 \cdot 1,27 \text{ mm}}{60 \text{ mm}} = j0,0561 \frac{\text{m}\Omega}{\text{m}}$$

Für die äußere Induktivität gilt:

$$\omega \cdot L_a' = \frac{2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}}}{2\pi} \cdot \ln \left( \frac{931,77 \text{ m}}{60 \text{ mm} \cdot e^{-\frac{4}{3} \left( \frac{52,4 \cdot (60 \text{ mm} - 52,4 \text{ mm})}{(2 \cdot 52,4 \text{ mm} + 60 \text{ mm} - 52,4 \text{ mm})^2} \right)}} \right) = j0,174 \frac{\text{m}\Omega}{\text{m}}$$

$$\omega \cdot L_{\text{Gesamt}}' = \omega \cdot L_{i\text{skin}}' + \omega \cdot L_a' = j0,231 \frac{\text{m}\Omega}{\text{m}}$$

$$L_{\text{Gesamt}} = 1,47 \mu\text{H}$$



#### 4.4.5 Vergleich der Ergebnisse Labormodell

Ergebnisse Labor Modell						
AFK3 Ergebnisse	R'	0,383	mΩ/m	R	0,765	mΩ
	$\omega L'$	0,506	j mΩ/m	$\omega L$	1,011	j mΩ
	G'	0,004	mS/m	G	0,008	mS
	B'	0,603	j μS/m	B	1,206	j μS
	L'	1,609	μH/m	L	3,219	μH
	C'	1,919	nF/m	C	3,839	nF
Ergebnisse Theorie Modell	R'	0,386	mΩ/m	R	0,772	mΩ
	$\omega L'$ Vollleiter	0,940	j mΩ/m	$\omega L$ Vollleiter	1,879	j mΩ
	$\omega L'$ Hohlleiter	0,201	j mΩ/m	$\omega L$ Hohlleiter	0,462	j mΩ
	G'	0,004	mS/m	G	0,008	mS
	B'	0,623	j μS/m	B	1,246	j μS
	L' Vollleiter	2,991	μH/m	L Vollleiter	5,982	μH
	L' Hohlleiter	0,736	μH/m	L Hohlleiter	1,472	μH
	C'	1,983	nF/m	C	3,965	nF

**Tabelle 4-1 Ergebnisse der elektrischen Parameter des Labormodells für AfK3 und Theorie [20] bei 50 Hz**

Anhand der in Tabelle 4-1 dargestellten Berechnungsergebnisse können folgende Aussagen zusammengefasst werden:

- Der Wirkanteil der Längselemente ist bei beiden Verfahren nur minimal verschieden.
- Bei beiden Verfahren wird die Rohrleitung als Vollleiter (d.h. unter Vernachlässigung des Skin Effekts) betrachtet und berechnet. Die spätere Messung an der Pipeline hat gezeigt, dass das verwendete Vollleitersmodell die Messergebnisse bestätigt.
- Ein wesentlicher Unterschied ergibt sich beim Blindanteil der Längselemente. Hierbei liegt der Wert des Theorie-Modells im Vergleich zu den Ergebnissen der Messungen des Labormodells um fast das Zweifache. Grund dafür dürfte das Berechnungsmodell gemäß AfK 3 sein. Bei der Ermittlung der äußeren Induktivität werden hier teilweise fixe Faktoren verwendet (siehe Formel (4.8)).
- Im direkten Vergleich der induktiven Blindelemente von Vollleiter und Hohlleiter sind große Abweichungen erkennbar.
- Die Ergebnisse für die Querelemente (G und C) unterscheiden sich nur geringfügig.

## 4.5 Berechnung der Stickleitung

Die Berechnung des elektrischen Modells der zu messenden Pipeline ist Grundvoraussetzung für erste Parametrierungen der Messgeräte bzw. Sensoren. Anhand der berechneten Ergebnisse kann ein direkter Vergleich mit den Messergebnissen aus Kapitel 6 durchgeführt werden. Verwendung hierbei finden wieder die Formeln aus AfK3 [3] und der Theorie [20].

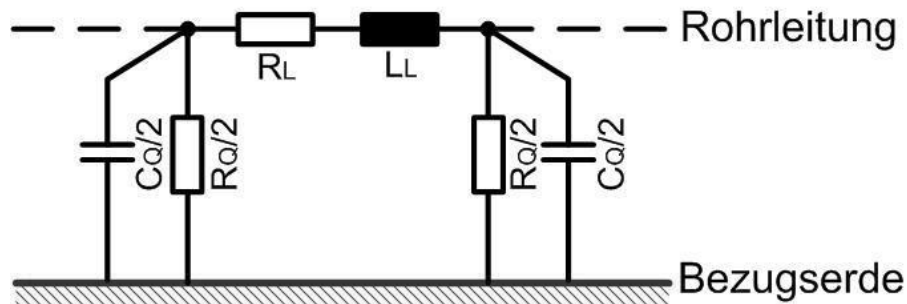


Abbildung 4-16 Kettenleiter für Abschnitt der Pipeline [2], geändert

### 4.5.1 Kenndaten der Stickleitung

- d Durchmesser  $d = 60,3 \text{ mm}$
- l Länge der Rohrleitung  $l = 606,09 \text{ m}$
- $\delta$  Dicke der Umhüllung  $\delta = 4 \text{ mm}$
- $d_s$  Dicke der Stahlrohres  $d_s = 3,6 \text{ mm}$
- f Frequenz  $f = 50 \text{ Hz}$
- $\mu_0$  Absolute Permeabilität  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}}$
- $\mu_r$  Relative Permeabilität für Stahl  $\mu_r = 500$
- $\rho_E$  Spezifischer Erdwiderstand  $\rho_E = 100 \Omega\text{m}$
- $\rho_{ST}$  Spezifischer Gleichstromwiderstand von Stahl  $\rho_{ST} = 0,16 \frac{\Omega\text{mm}^2}{\text{m}}$
- $\epsilon_0$  Absolute Dielektrizitätszahl  $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}}$
- $\epsilon_r$  Relative Dielektrizitätszahl der Rohrumhüllung  $\epsilon_r = 2,3$  für PE
- $r_u$  Umhüllungswiderstand der Rohrleitung  $r_u = 100.000 \Omega\text{m}^2$
- e Eulersche Zahl  $e = 2,718$
- $\gamma$  Besselkonstante  $\gamma = 1,781$

#### 4.5.2 Berechnung Methode 1 - AFK3

$$R' = \frac{\sqrt{0,16 \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}} \cdot 500 \cdot 2\pi \cdot 50 \text{ Hz}}}{\pi \cdot 60,3 \text{ mm} \cdot \sqrt{2}} + \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}} \cdot 2\pi \cdot 50 \text{ Hz}}{8} = 0,713 \frac{\text{m}\Omega}{\text{m}}$$

$$\omega \cdot L' = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}} \cdot 2\pi \cdot 50 \text{ Hz}}{4\pi} \cdot 2 \cdot \ln \left( \frac{3,7 \cdot \sqrt{100 \Omega \text{m}}}{60,3 \text{ mm} \cdot \sqrt{4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}} \cdot 2\pi \cdot 50 \text{ Hz}}} \right) + \frac{\sqrt{0,16 \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}} \cdot 500 \cdot 2\pi \cdot 50 \text{ Hz}}}{\pi \cdot 60,3 \text{ mm} \cdot \sqrt{2}} = j0,961 \frac{\text{m}\Omega}{\text{m}}$$

$$G' = \frac{\pi \cdot 60,3 \text{ mm} / 1000}{100.000 \Omega \text{m}^2} = 0,00189 \frac{\text{mS}}{\text{m}}$$

$$\omega \cdot C' = \frac{2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot \pi \cdot 60,3 \text{ mm} \cdot 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}} \cdot 2,3}{4 \text{ mm}} = -j0,000302 \frac{\text{mS}}{\text{m}}$$

$$R = R' \cdot l = 0,713 \frac{\text{m}\Omega}{\text{m}} \cdot 606,09 \text{ m} = 0,432 \Omega$$

$$\omega \cdot L = \omega \cdot L' \cdot l = j0,961 \frac{\text{m}\Omega}{\text{m}} \cdot 606,09 \text{ m} = j0,583 \text{ m}\Omega$$

$$L = 1,857 \text{ mH}$$

$$G = G' \cdot l = 0,00189 \frac{\text{mS}}{\text{m}} \cdot 606,09 \text{ m} = 1,149 \text{ mS}$$

$$\omega \cdot C = \omega \cdot C' \cdot l = 0,000302 j \frac{\text{mS}}{\text{m}} \cdot 606,09 \text{ m} = j0,182 \text{ mS}$$

$$C = 0,578 \mu\text{F}$$

#### 4.5.3 Berechnung Methode 2 - zylindrischer Vollleiter

$$A_{\text{Rohr}} = \frac{(60,3 \text{ mm})^2 \cdot \pi}{4} = 2855,77 \text{ mm}^2$$

$$R'_l = \frac{0,16 \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}}}{2855,77 \text{ mm}^2} = 0,056 \frac{\text{m}\Omega}{\text{m}}$$

$$\delta_{ST} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,16 \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}}}{4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}} \cdot 500 \cdot 2\pi \cdot 50 \text{ Hz}}} = 1,273 \text{ mm}$$

$$R'_{l\text{Skin}} = 0,056 \frac{\text{m}\Omega}{\text{m}} \cdot \left( \frac{30,15 \text{ mm}}{2,54 \text{ mm}} + \frac{1}{4} \right) = 0,674 \frac{\text{m}\Omega}{\text{m}}$$

$$R_{l\text{Skin}} = 0,674 \frac{\text{m}\Omega}{\text{m}} \cdot 606,09 \text{ m} = 0,408 \Omega$$

$$R_E' = \frac{2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}} \cdot \pi}{2\pi \cdot 4} = 0,0493 \frac{\text{m}\Omega}{\text{m}}$$

$$R_E = 0,0493 \frac{m\Omega}{m} \cdot 606,09 m = 29,909 m\Omega$$

$$R = R_E + R_{Lskin} = 0,408 \Omega + 0,0299 \Omega = 0,440 \Omega$$

$$\omega \cdot L_i' = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{m} \cdot 500 \cdot 2\pi \cdot 50 \text{ Hz}}{8\pi} = j7,853 \frac{m\Omega}{m}$$

$$\omega \cdot L_{i'skin}' = j7,85 \frac{m\Omega}{m} \cdot \frac{2 \cdot 1,27 \text{ mm}}{30,15 \text{ mm}} = j0,663 \frac{m\Omega}{m}$$

$$\delta_E = \sqrt{\frac{2 \cdot 1400 \Omega m}{4\pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{m} \cdot 2\pi \cdot 50 \text{ Hz}}} = 2663,17 \text{ m}$$

$$D_e = \sqrt{\frac{2 \cdot 2,718}{1,781}} \cdot 2663,17 \text{ m} = 3486,38 \text{ m}$$

$$\omega \cdot L_a' = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{m} \cdot 2\pi \cdot 50 \text{ Hz}}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{3486,38 \text{ m}}{30,15 \frac{mm}{1000}}\right) = j0,732 \frac{m\Omega}{m}$$

$$\omega \cdot L'_{Gesamt} = \omega \cdot L_a' + \omega \cdot L_{i'skin}' = j0,732 \frac{m\Omega}{m} + j0,663 \frac{m\Omega}{m} = j1,395 \frac{m\Omega}{m}$$

$$\omega \cdot L_{Gesamt} = j1,395 \frac{m\Omega}{m} \cdot 606,09 m = j0,846 \Omega$$

$$L_{Gesamt} = 2,69 \text{ mH}$$

$$\omega \cdot C' = 2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot \frac{2\pi \cdot 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{F}{m} \cdot 2,3}{\ln\left(\frac{30,15 \text{ mm} + 4 \text{ mm}}{30,15 \text{ mm}}\right)} = 0,000322 \frac{mS}{m}$$

$$\omega \cdot C = \omega \cdot C' \cdot l = 0,000322 \frac{mS}{m} \cdot 606,09 m = 0,195 \text{ mS}$$

$$C = 622,52 \text{ nF}$$

$$G' = \frac{\pi \cdot \frac{60,3 \text{ mm}}{1000}}{100.000 \Omega m^2} = 0,00189 \frac{mS}{m}$$

$$G = 1,14 \text{ mS}$$

#### 4.5.4 Zusatz zu Methode 2 – zylindrischer Hohlleiter

Hier ändert sich die innere und äußere Induktivität aufgrund der neuen geometrischen Verhältnisse.

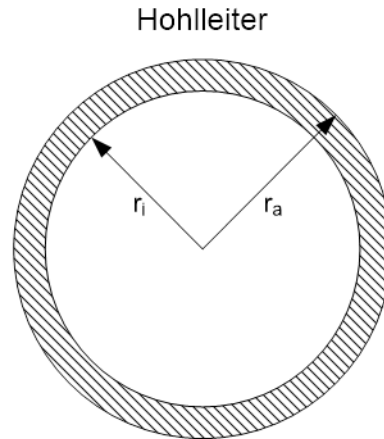


Abbildung 4-17 Hohlleitermodell

$$\omega \cdot L_i' = \frac{2\pi \cdot 50\text{Hz} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}} \cdot 500}{8\pi} \cdot \left[ 1 - \frac{2 \cdot 22,55^2}{30,15^2 - 22,55^2} + \left( \frac{2 \cdot 30,15^2}{60^2 - 22,15^2} \right)^2 \cdot \ln \left( \frac{30,15}{22,15} \right) \right]$$

$$= j2,619 \frac{\text{m}\Omega}{\text{m}}$$

$$\omega \cdot L_{i'_{\text{skin}}} = 2,619 \frac{\text{m}\Omega}{\text{m}} \cdot \frac{2 \cdot 1,27 \text{ mm}}{30,15 \text{ mm}} = j0,2212 \frac{\text{m}\Omega}{\text{m}}$$

Des Weiteren gilt für die Äußere Induktivität:

$$\omega \cdot L_a' = \frac{2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}}}{2\pi} \cdot \ln \left( \frac{3486 \text{ m}}{30,15\text{mm} \cdot e^{\frac{4}{3} \left( \frac{22,15 \cdot (30,15 \text{ mm} - 22,15 \text{ mm})}{(2 \cdot 22,15 \text{ mm} + 30,15 \text{ mm} - 22,15 \text{ mm})^2} \right)}} \right) = j0,303 \frac{\text{m}\Omega}{\text{m}}$$

$$\omega \cdot L_{\text{Gesamt}}'' = \omega \cdot L_a' + \omega \cdot L_i' = j0,524 \frac{\text{m}\Omega}{\text{m}}$$

$$\omega \cdot L_{\text{Gesamt}} = j0,524 \frac{\text{m}\Omega}{\text{m}} \cdot 606,09 \text{ m} = 0,318 \Omega$$

$$L_{\text{Gesamt}} = 1,01 \text{ mH}$$

#### 4.5.5 Vergleich der Ergebnisse Stichleitung

Ergebnisse Stichleitung						
AFK3 Ergebnisse	R'	0,713	mΩ/m	R	431,959	mΩ
	$\omega L'$	0,962	j mΩ/m	$\omega L$	582,927	j mΩ
	G'	0,002	mS/m	G	1,148	mS
	B'	0,303	j μS/m	B	183,638	j μS
	L'	3,061	μH/m	L	1855,513	μH
	C'	0,964	nF/m	C	584,537	nF
Ergebnisse Theorie Modell	R'	0,727	mΩ/m	R	440,448	mΩ
	$\omega L'$ Vollleiter	1,396	j mΩ/m	$\omega L$ Vollleiter	846,014	j mΩ
	$\omega L'$ Hohlleiter	0,525	j mΩ/m	$\omega L$ Hohlleiter	318,118	j mΩ
	G'	0,002	mS/m	G	1,148	mS
	B'	0,323	j μS/m	B	195,571	j μS
	L' Vollleiter	4,443	μH/m	L Vollleiter	2692,947	μH
	L' Hohlleiter	1,671	μH/m	L Hohlleiter	1012,602	μH
	C'	1,027	nF/m	C	622,454	nF

**Tabelle 4-2 Ergebnisse der elektrischen Parameter der Stichleitung für AfK3 und Theorie [20] bei 50 Hz**

Anhand der in Tabelle 4-2 dargestellten Berechnungsergebnisse können folgende Aussagen zusammengefasst werden:

- Der Wirkanteil der Längselemente ist bei beiden Verfahren nur minimal verschieden.
- Bei beiden Verfahren wird die Rohrleitung als Vollleiter (d.h. unter Vernachlässigung des Skin Effekts) betrachtet und berechnet. Die spätere Messung an der Pipeline hat gezeigt, dass das verwendete Vollleitermodell die Messergebnisse bestätigt.
- Ein wesentlicher Unterschied ergibt sich beim Blindanteil der Längselemente. Hierbei liegt der Wert des Theorie-Modells im Vergleich zu den Ergebnissen der Messungen des Labormodells um fast das Zweifache. Grund dafür dürfte das Berechnungsmodell gemäß AfK 3 sein. Bei der Ermittlung der äußeren Induktivität werden hier teilweise fixe Faktoren verwendet (siehe Formel (4.8)).
- Im direkten Vergleich der induktiven Blindelemente von Vollleiter und Hohlleiter sind große Abweichungen erkennbar.
- Die Ergebnisse für die Querelemente (G und C) unterscheiden sich nur geringfügig.

Ein abschließender Vergleich der Rechenergebnisse mit den Messergebnissen wird im Kapitel 7 durchgeführt.

## 5 Messungen am Modell

### 5.1 Allgemeines

In den folgenden Abschnitten wird die Messung der Komponenten des Rohrleitungsersatzschaltbildes für die Nachbildung der Berechnung von induktiven und ohmschen Rohrleitungsbeeinflussungen mittels verschiedener Prüfströme und Prüffrequenzen dargestellt. Zu diesem Zweck wurde ein Versuchsaufbau mit einer 2 m langen Rohrleitung erstellt. Ein Messkreisstromkreis wird über ein OMICRON CPC 100 gespeist. Die Messungen der Ströme erfolgt über Rogowski Spulen und ebenso wie bei den Spannungsmessungen in zwei Messbereichen. Es werden je Kanal jeweils ein großer und ein kleiner Messbereich verwendet.

### 5.2 Messablauf und Parametrierung

- Es erfolgt die Messung der Impedanz mittels verschiedener Ströme und Frequenzen.
- Der Prüfstrom wird über das Omicron CPC in den Prüfaufbau eingespeist.
- Die Messung der Spannung erfolgt mittels zwei Messspitzen am jeweiligen Ende der Rohrleitung.
- Mittels einer Rogowski Spule wird der gemessene Prüfstrom an ein Dewetron 2600 übermittelt.

#### Messung 1:

Die eingepprägten Ströme werden mittels Rampenverfahren von 10 A bis 60 A im eingespeist. Dabei beträgt die Steigungsdauer zwischen den Stufen jeweils 5 s (Siehe Abbildung 5-1).

Die Ermittlung der Impedanz und des Winkel erfolgte bei den Frequenzen 15 Hz, 30 Hz, 50 Hz, 100 Hz, 200 Hz und 400 Hz.

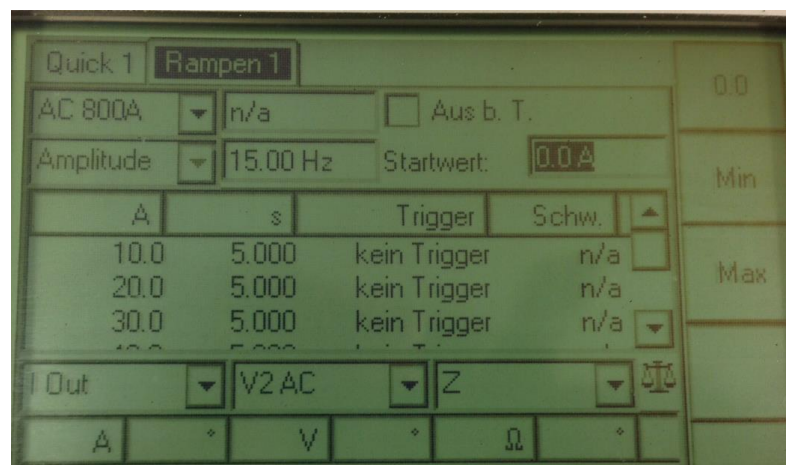


Abbildung 5-1 Rampenverfahren Omicron CPC

## Messung 2:

Aufgrund der Ergebnisse von Messung 1 (Siehe Kapitel 5.5.3) wird eine weitere Messung durchgeführt. Dabei werden die einzelnen Rampen bis von 10 A bis 100 A mit den Frequenzen 0 Hz, 15 Hz, 50 Hz abgefahren. Ziel dieser Messung ist es, durch den erweiterten Strombereich eine bessere Einsicht in die Strom Abhängigkeit des Labor Modells zu gewinnen und den Gleichstromwiderstand der Rohrleitung zu messen.



Abbildung 5-2 Messaufbau Labor

## 5.3 Messaufbau der Impedanz Messung an der Rohrleitung

An den beiden Enden der Rohrleitung wurde ein kleiner Teil der vorhandenen Umhüllung entfernt, um eine korrekte Einspeisung mit den OMICRON CPC 100 zu gewährleisten. Die durchgezogenen Linien in Abbildung 5-4 stellen die Versorgungsleitungen dar und die strichlierten Linien die Messleitungen. Die Auswertung der Impedanz erfolgte einerseits über das OMICRON CPC 100, durch zu Hilfenahme des Spannungseingangs  $V_{1AC}$  und der internen Strommessung  $I_{Out}$  und andererseits über ein Dewetron 2600 mit mehreren Messkarten für Strom und Spannungsmessung. Für die Spannungs- und Strommessungen wurden jeweils zwei Messbereiche gewählt. Die genaue Parametrierung befindet sich in Kapitel 5.4.

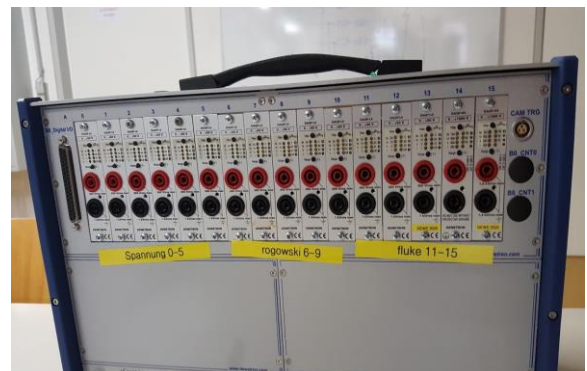


Abbildung 5-3 Übersicht Kanäle Omicron CPC 100 und Dewetron



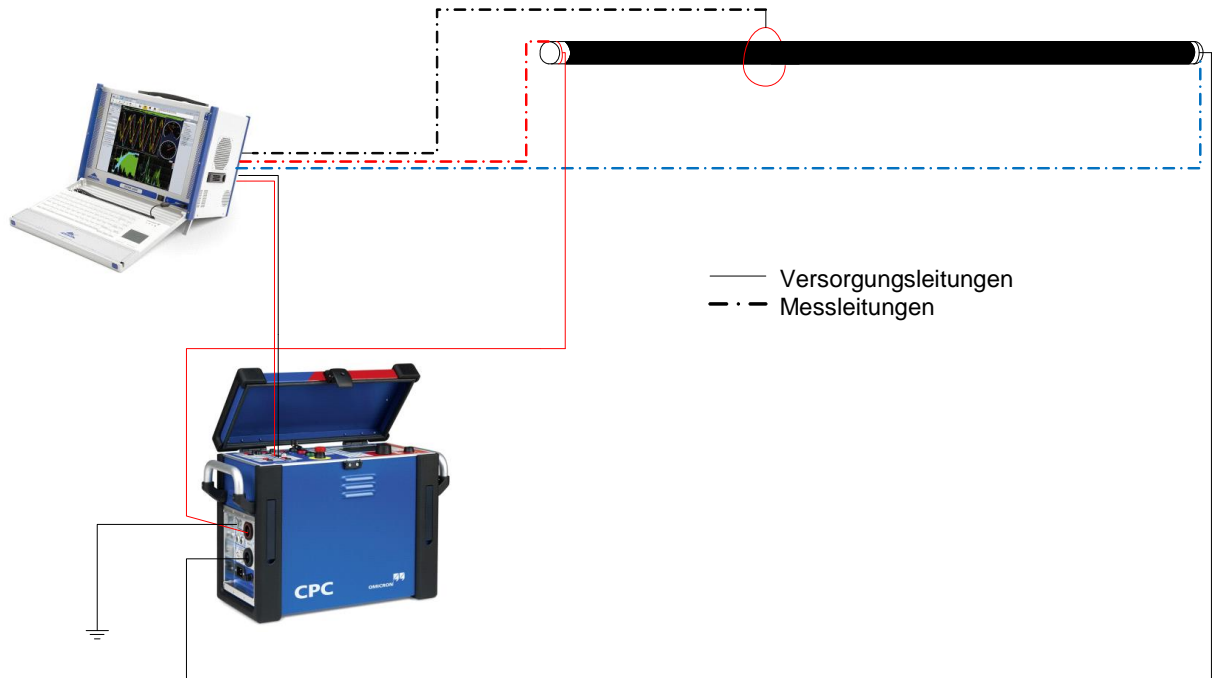


Abbildung 5-4 Messung Rohrleitung ohne Erdung

Abbildung 5-5 zeigt den Messaufbau des Labormodells. Mit der Stromquelle CPC 100 wurden über die zwei 800AC-Ausgänge die oben beschriebenen Messströme und Frequenzen mittels 4-Punkt-Schaltung auf die Rohrleitung eingespeist.

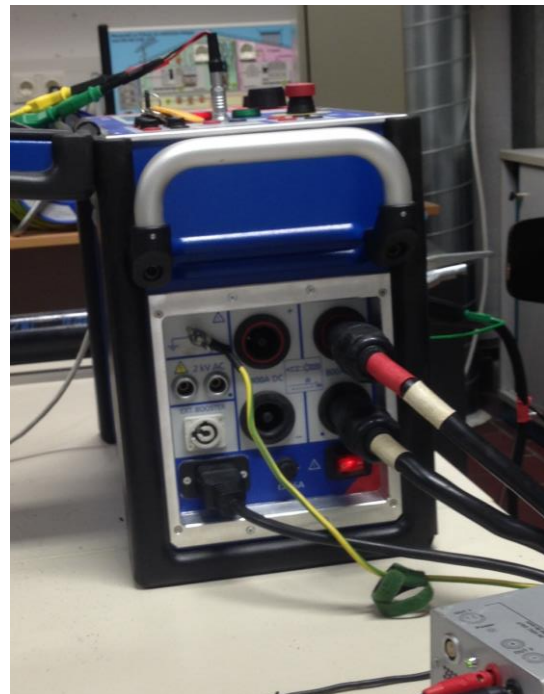


Abbildung 5-5 Einspeisung über Omicron CPC 100 an den Enden der Rohrleitung

## 5.4 Kalibrierung der Messgeräte

Für die Messung der Ströme und Spannungen werden folgende Messkarten<sup>1</sup> benötigt:

- DAQP-HV 100 V ..1 kHz für die Spannungsmessung
- DAQP-LV 5 V.....3 kHz für die Messung der Ströme

Für die Strommessung wurden Fluke i3000s Flex und Fluke i5s Wechselstromzangen verwendet. Die Fluke Flex i3000s besitzen geschirmte Messleitungen und funktionieren nach dem Prinzip einer Rogowski Spule. Für die Messung stehen drei Messbereiche zur Verfügung. Die Wechselstrom-Messzangen Fluke i5s sind gewöhnliche Wechselstromzangen mit einem Messbereich und sind vor allem für die Messung kleinerer Ströme geeignet.

### Fluke i3000s - 3 Bereiche:

30 A mit 1 mV/A

300 A mit 10 mV/A

3000 A mit 100 mV/A

Frequenz von 10 Hz bis 50 kHz

### Fluke i5s - 1 Bereich

400mV/A

Frequenz von 40 Hz bis 5 kHz



Abbildung 5-6 Fluke i3000s Flex Rogowskyspule und und Fluke i5s Stromzange

---

<sup>1</sup> Meßkarten für das CPC 100:

800 AC Ausgänge für Einspeisung auf Rohrleitung

V1AC Eingänge zur Messung des Spannungsabfalls an den Rohrleitungsenden

Die Messungen mit den i3000s wurden mit den Bereichen 300 und 3000 A durchgeführt. Im Programm Dewesoft<sup>2</sup> musste dies daher bei der Parametrierung der Messkanäle berücksichtigt werden. Anhand der Punkt-Einstellung (siehe Abbildung 5-7) können verschiedene Verhältnisse eingetragen werden. Je nachdem welcher Strombereich gewählt wird, muss auch der entsprechende Spannungsbereich der Messkarte richtig eingestellt werden. Bei unsachgemäßen Einstellungen kann es zu Messbereichsüberschreitungen der Kanäle und Klippingeffekte und damit zu falschen Messergebnisinterpretationen kommen.

In der folgenden Abbildung 5-7 werden die Einstellung der Messkarten vorgenommen. Neben der Wahl des Messbereichs, können auf Kopplungen, Tiefpassfilter oder auch Verhältnisse eingestellt werden.

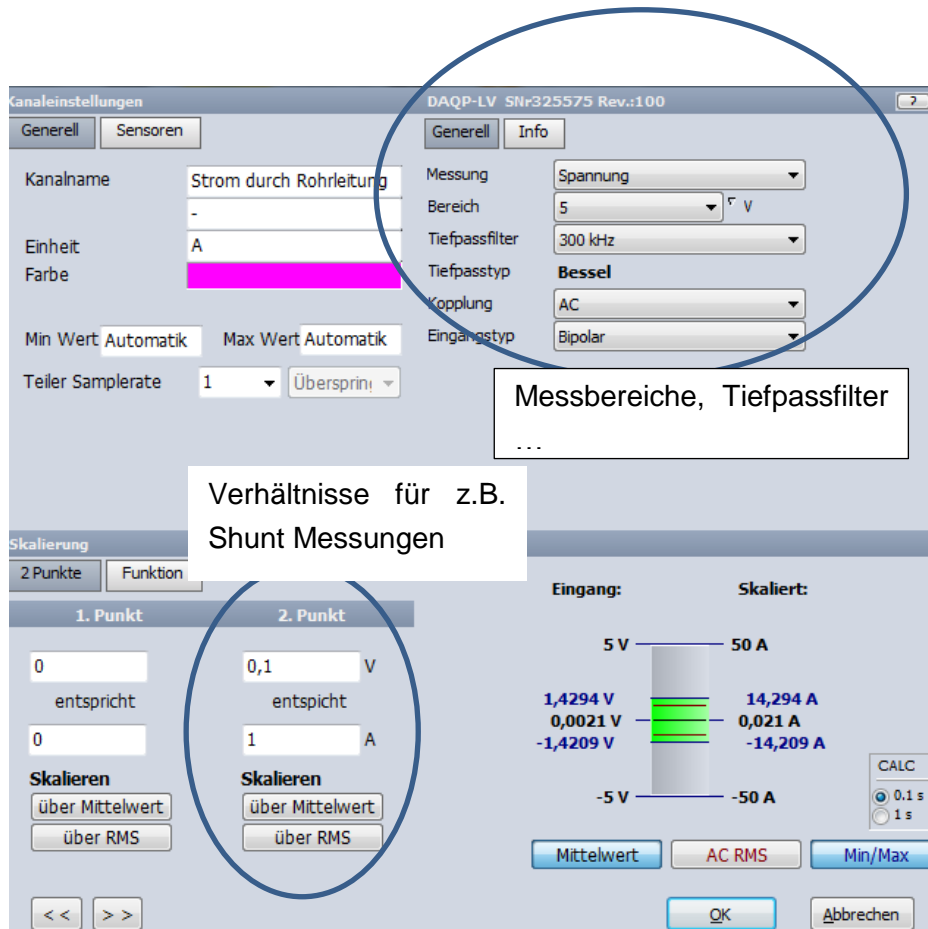


Abbildung 5-7 Parametrierung Stromkanal

<sup>2</sup> Programm DEWESOFT:

DAQP-HV 100 V Eingang 0 bis Eingang 2 zur Messung der angelegten Spannung. im großen Bereich DAQP-HV 100 V Eingang 2 bis Eingang 4 zur Messung der angelegten Spannung. im kleinen Bereich DAQP-LV 5 V Eingang 5 bis Eingang 8 zur Messung der fließenden Ströme über die Rohrleitung

Ein weiteres verwendetes Feature ist in Abbildung 5-8 zu sehen. Mit Hilfe des Mathemoduls können sowohl einfache Formeln, als auch z.B.: Statistische Prozesse auf Messgrößen angewandt werden.

EIN/AUS	F	NAME	WERT
EIN	Speich.	Formel	'Spannung an Messobjekt/RMS'/Strom durch Rohrleitung/RMS'
		Impedanz	-1000 1000
EIN	Speich.	Einfache Statistik	RMS Block basiert ; bt = 0,1s
		Spannung an Messobjekt/RMS	- [V] 100
EIN	Speich.	Einfache Statistik	RMS Block basiert ; bt = 0,1s
		Strom durch Rohrleitung/RMS	- [A] 50
EIN	Speich.	Referenz Kurve	Referenz
		Referenz 15	- [-] 5
EIN	Speich.	Exakte Frequenz	Exakte Frequenz des Eingangskanals
		Strom durch Rohrleitung/Frequenz	- [Hz] 5
EIN	Speich.	Formel	'Impedanz**cos_phi_L1_H1/RMS**1000
		Wirkanteil	- [mOhm] 1E8
EIN	Speich.	Einfache Statistik	RMS Block basiert ; bt = 0,1s
		cos_phi_L1_H1/RMS	- [-] 1
EIN	Speich.	Einfache Statistik	RMS Block basiert ; bt = 0,1s
		phi_L1_H1/RMS	- [deg.] 180
EIN	Speich.	Formel	'Impedanz**sin(phi_L1_H1/RMS)*1000
		Blindanteil	- [mOhm] 1E8

Abbildung 5-8 Mathemodul Dewesoft

Anhand des Leistungsmoduls können je nach System bei Angabe der richtigen Ströme und Spannungen Größen wie z.B.: Wirkleistung, Scheinleistung oder  $\cos \varphi$  ermittelt werden.

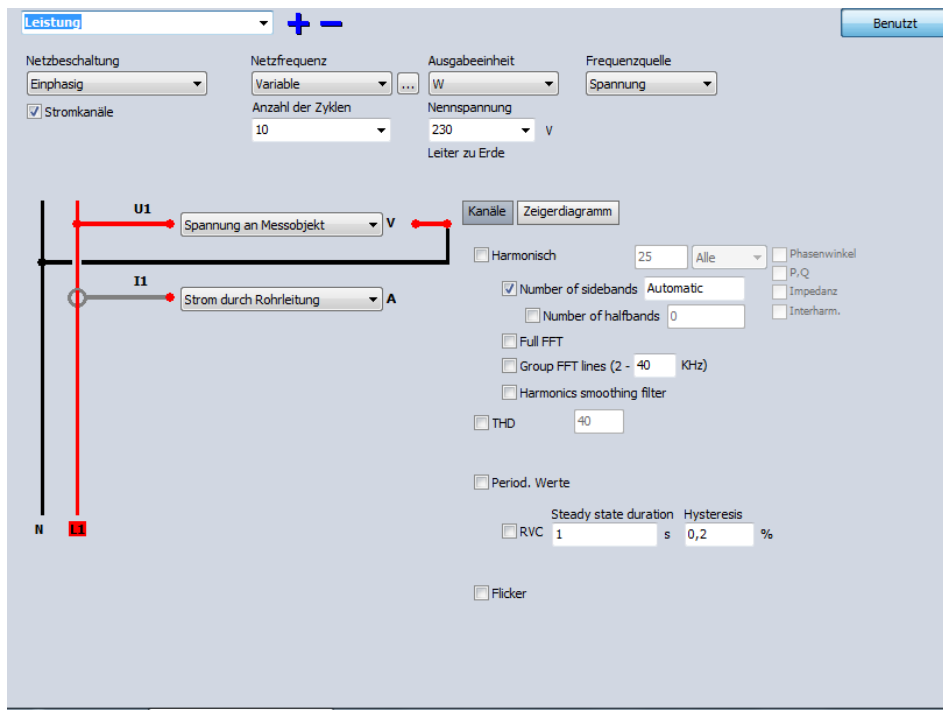


Abbildung 5-9 Leistungsmodul Dewesoft

Mit Ermittlung des  $\cos\varphi$ -Faktors kann direkt auf die Wirk- und Blindanteile der Längselemente der Rohrleitung geschlossen werden.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (5.1)$$

$$S = U \cdot I \quad (5.2)$$

$$P = U \cdot I \cdot \cos(\varphi) \quad (5.3)$$

$$Q = U \cdot I \cdot \sin(\varphi) \quad (5.4)$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (5.5)$$

$$R = \underline{Z} \cdot \cos(\varphi) \quad (5.6)$$

$$X = \underline{Z} \cdot \sin(\varphi) \quad (5.7)$$

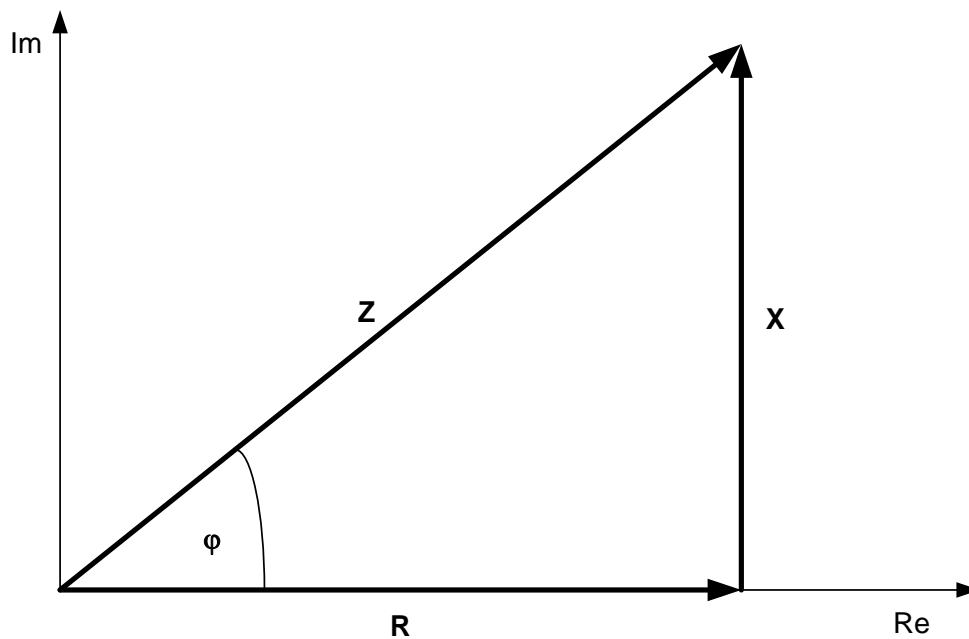


Abbildung 5-10 Widerstands Dreieck

Mithilfe des Programm Dewesoft 7.1 konnten alle Spannungen und Ströme aufgezeichnet und gedeutet werden. In Abbildung 5-11 befindet sich ein Screenshot von der Messung der Querelemente. Neben den Standard Größen wie Messspannung, eingespeister Strom und Frequenz wurde auch die mögliche Impedanz  $Z$  mit ihren Winkel angezeigt.

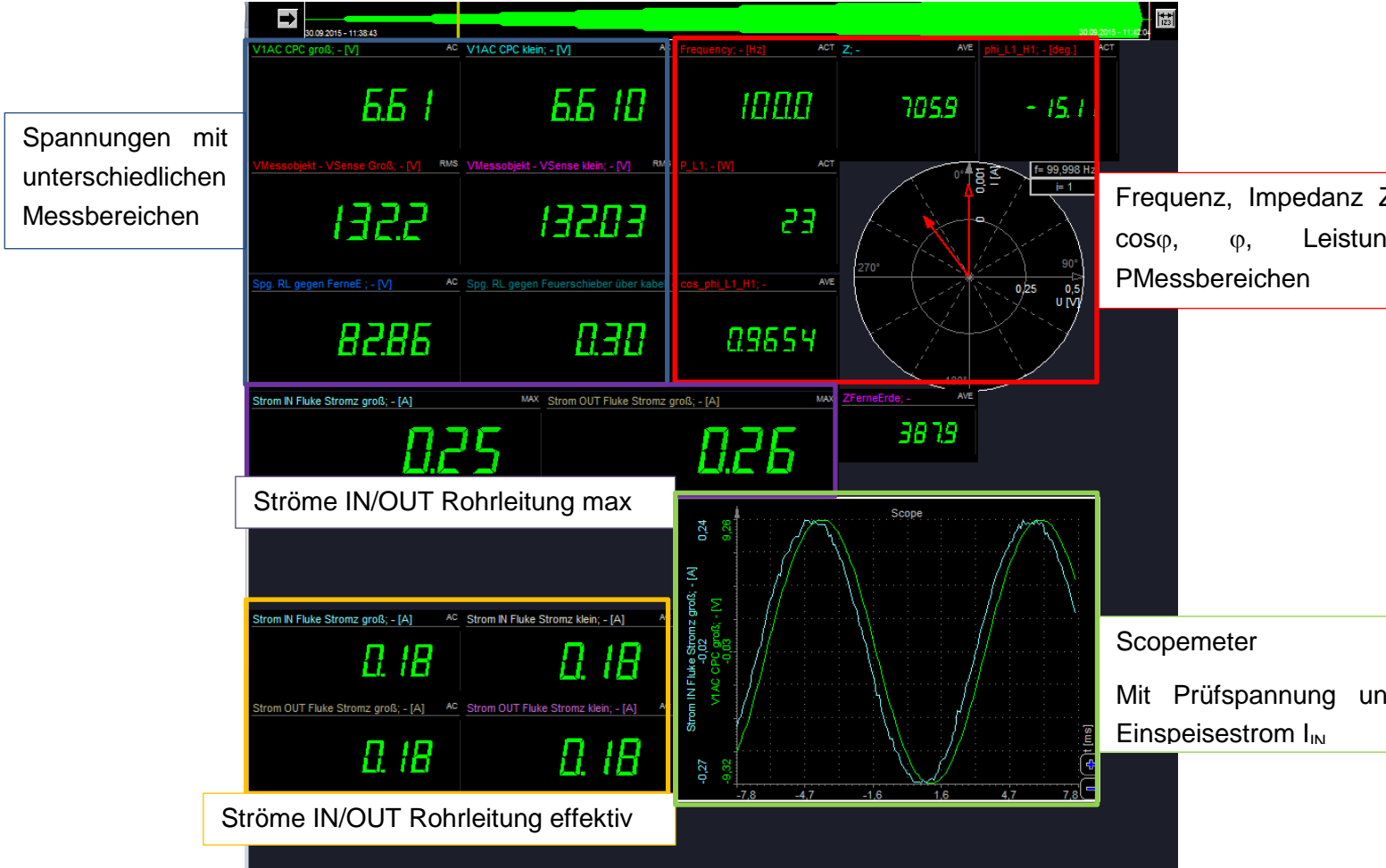


Abbildung 5-11 Übersicht Messüberwachung in Dewesoft 7.1

## 5.5 Ergebnisse

### 5.5.1 Allgemeines

In diesem Abschnitt befinden sich die Messergebnisse für einen eingestellten Strom von 10 A bis 60 A mit den Frequenzen 0 Hz, 15 Hz und 50 Hz, sowie eine Messung mit 100 A und variablen Frequenzen.

Wie zu erwarten war, verhält sich das Prüfobjekt aufgrund des fehlenden Erdbezugs ohmsch- induktiv.

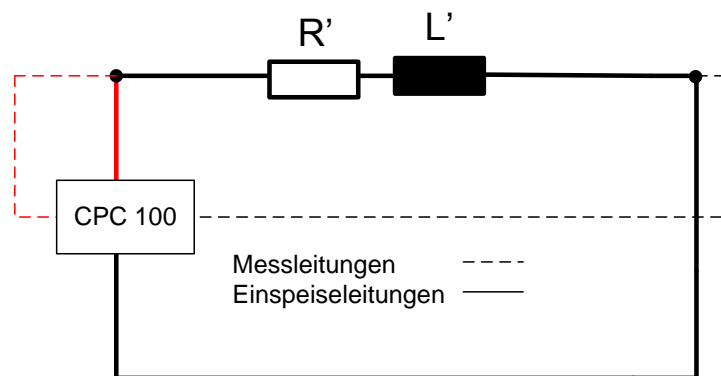


Abbildung 5-12 Einfaches Ersatzschaltbild Messung Labor

Dabei fiel auf, dass nicht nur mit steigender Frequenz sondern auch mit steigendem Strom die Impedanz und deren Winkel zunahm. Eine mögliche Erklärung der Zunahme der Impedanz durch die Stromerhöhung könnten gewisse Koppelleinflüsse von Versorgungsleitungen zu den Messobjekten oder der Stromverdrängung aufgrund des Skin-Effekts sein. Aus der Auswertung der Messergebnisse in Kapitel 6 wurde eine erhöhte Genauigkeit der Messwerte bei höheren Strömen festgestellt. Die detaillierten Messergebnisse befinden sich im Anhang, der Vergleich der Ergebnisse bzw. deren weitere Interpretation in Kapitel 7.

### 5.5.2 Rohrleitungskenndaten

Die Kenndaten des Rohrleitungsmodells sind wie folgt:



Durchmesser: 120 mm  
 Länge: 2 m  
 Dicke Stahl: 3,5 mm  
 Dicke Umhüllung: 4 mm

### 5.5.3 Messung mit variablen Strom und variabler Frequenz

In den Tabellen 5-1 und 5-2 befinden sich die Ergebnisse zu Messung 1 für 15 Hz und 50 Hz mit Strömen bis zu 60 A. Auffallend hier sind die Steigende Impedanz und der steigende Winkel bei 15 Hz und die Steigende Impedanz und der fallende Winkel für 50 Hz mit größer werdenden Prüfstrom.

#### Frequenz 15Hz

Strom in [A]	$U_{\text{mess}}$ in [mV]	Z in [ $m\Omega$ ]	Winkel in [ $^{\circ}$ ]
10,00	6,88	0,69	30,34
20,00	14,36	0,72	31,39
30,00	22,65	0,76	32,28
40,00	32,24	0,81	32,97
50,00	43,53	0,87	33,27
60,00	56,90	0,95	33,25

Tabelle 5-1 Messergebnisse Messung 1 15 Hz

#### Frequenz 50Hz

Strom in [A]	$U_{\text{mess}}$ in [mV]	Z in [ $m\Omega$ ]	Winkel in [ $^{\circ}$ ]
10,00	13,19	1,33	47,45
20,00	27,89	1,40	46,79
30,00	44,14	1,48	45,55
40,00	62,16	1,56	44,53
50,00	81,99	1,64	43,03
60,00	104,00	1,74	41,35

Tabelle 5-2 Messergebnisse Labormodell Messung 1 50 Hz

#### 5.5.3.1 Messung 2 bei 0Hz, 15Hz, 50 Hz und Strom von 10 A-100 A

In den Tabellen 5-3 und 5-4 befinden sich die Ergebnisse zu Messung 2 für 0 Hz, 15 Hz und 50 Hz, mit Strömen bis zu 100 A. Die Messung mit 0 Hz ergibt einen konstanten Wert für den Gleichstromwiderstand des Modells mit  $R = 0,583 \Omega$ .

#### Frequenz 0Hz

Strom in [A]	R in [ $m\Omega$ ]
10,00	0,583
20,00	0,582
30,00	0,582
40,00	0,583
50,00	0,581
60,00	0,581
70,00	0,580
80,00	0,581
90,00	0,582
100,00	0,581

Tabelle 5-3 Messergebnisse Labormessung mit 0 Hz



Im Vergleich mit den Ergebnissen der Messung 1 (Siehe Tabellen 5-1 und 5-2 sind im Bereich von 10 A bis 60 A nur kleinere Abweichungen zu erkennen. Ab einem Prüfstrom von 60 A ist bei Messung 2 für 15 Hz neben dem weiteren Anstieg der Impedanz nun ein Abnehmen des Winkels zu beobachten. Für Messung 2 und 50 Hz nimmt die Impedanz ebenfalls zu. Der Winkel hier ändert sich von anfangs 47,35° auf einen Endwert von 34°.

Frequenz 15Hz			Frequenz 50Hz		
Strom in [A]	Z in [mΩ]	Winkel in [°]	Strom in [A]	Z in [mΩ]	Winkel in [°]
10,00	0,73	29,52	10,00	1,42	47,35
20,00	0,76	30,72	20,00	1,48	46,42
30,00	0,80	31,76	30,00	1,55	45,50
40,00	0,86	32,71	40,00	1,64	44,33
50,00	0,94	32,97	50,00	1,74	42,83
60,00	1,06	32,20	60,00	1,85	40,94
70,00	1,17	30,93	70,00	1,97	38,79
80,00	1,26	29,83	80,00	2,09	36,85
90,00	1,34	28,81	90,00	2,19	35,22
100,00	1,40	28,21	100,00	2,27	34,00

Tabelle 5-4 Ergebnisse der 2 Versuchsmessung 15 und 50 Hz

### 5.5.3.2 Grafische Darstellung der Ergebnisse der Messung 1 und 2

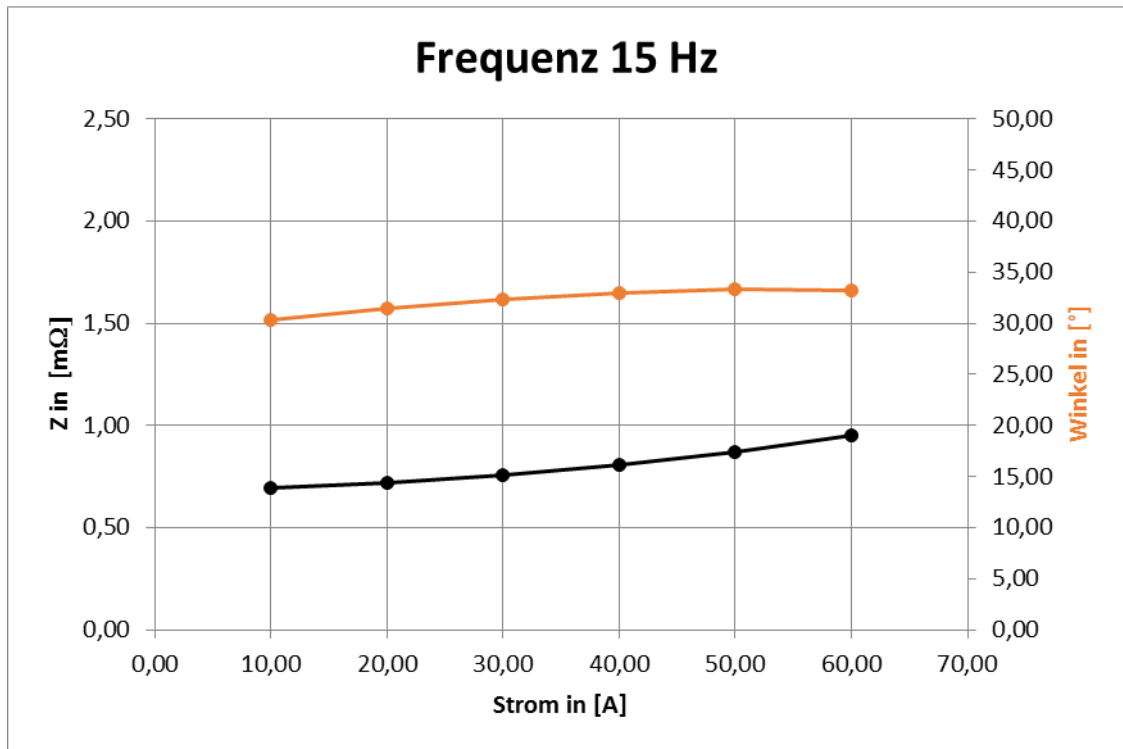


Abbildung 5-13 Ergebnisse Labormodell 15 Hz bis 60 A

In der unteren Abbildung 5-14 sind die Ergebnisse der zweiten Messung aufgetragen. Auffallend hier im Vergleich zu Messung 1 ist, dass der Winkel ab ca. 60 A wieder zu sinken beginnt. Dabei unterschreitet er sogar seinen Anfangswert von 29,52 Grad.

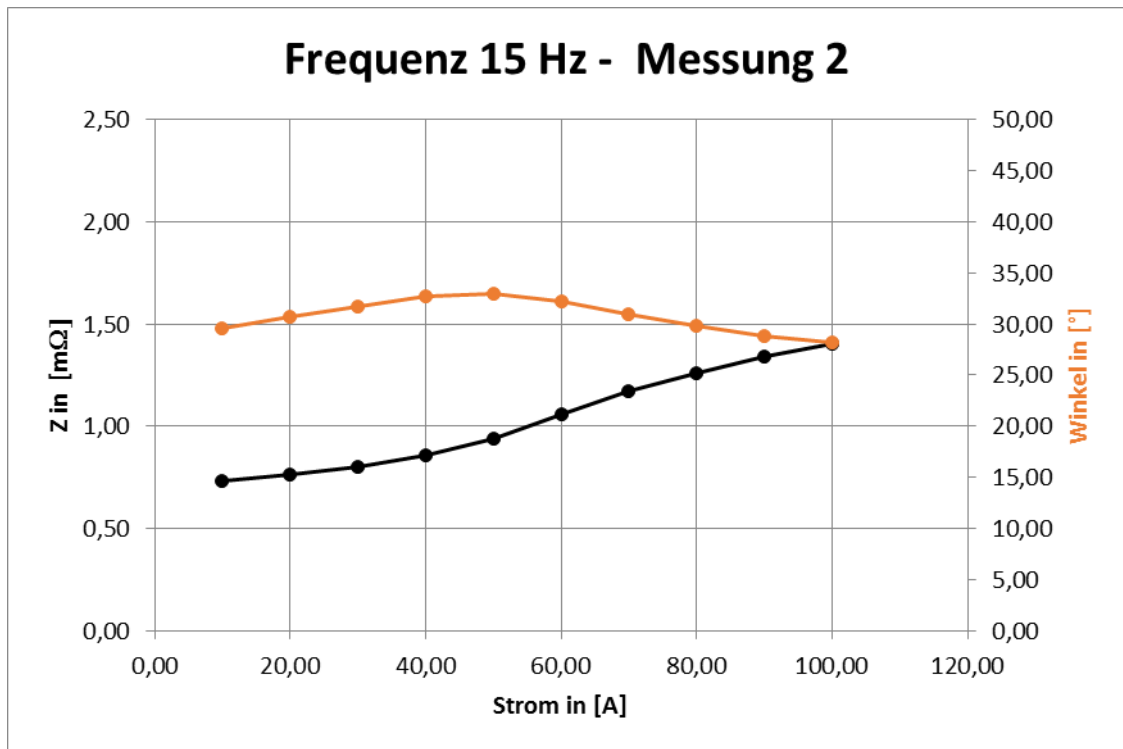


Abbildung 5-14 Ergebnisse Labormodell 15 Hz bis 100 A Messung 2

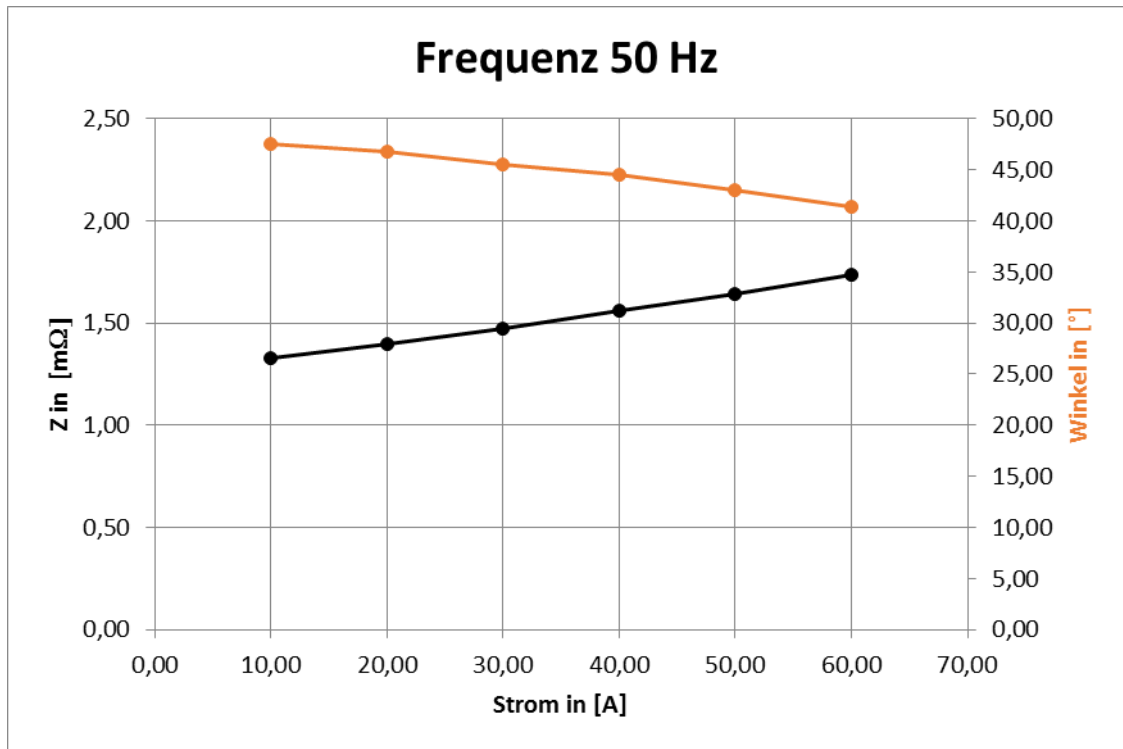


Abbildung 5-15 Ergebnisse Labormodell 50 Hz bis 60 A

Die Ergebnisse der Messung 1 und Messung 2 mit 50 Hz sind nur geringfügig unterschiedlich. Bei beiden sind eine Abnahme des Winkels und eine Zunahme der Impedanz, bei Stromerhöhung festzustellen.

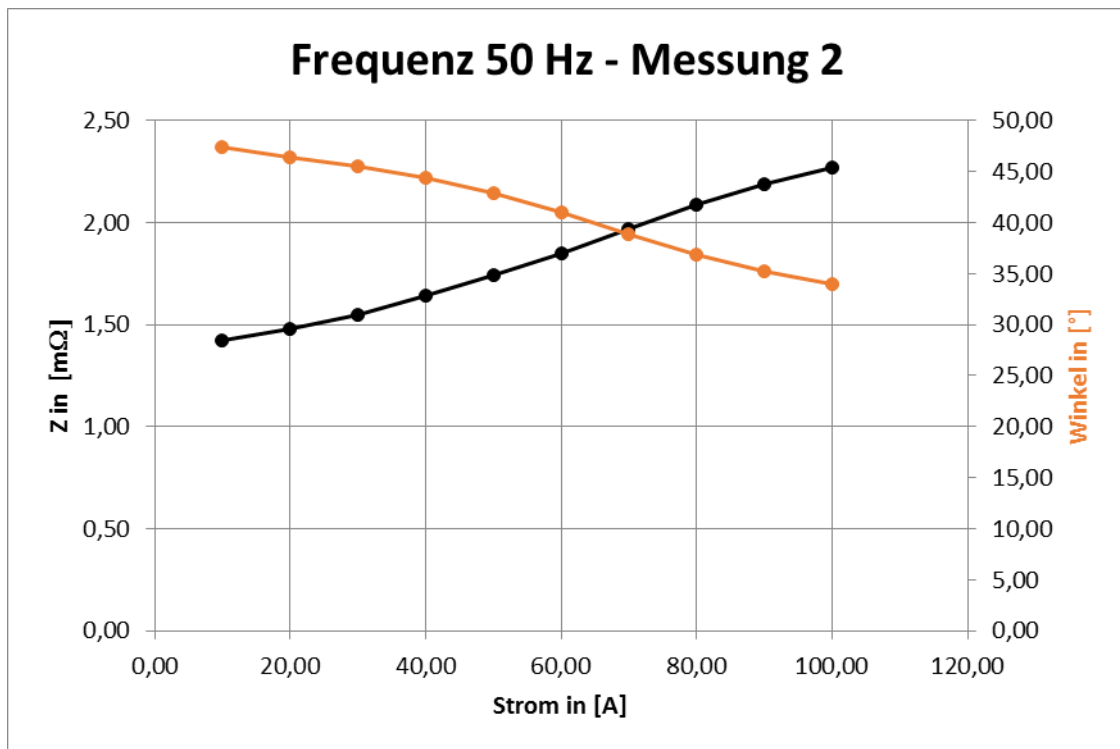


Abbildung 5-16 Ergebnisse Labormodell 50 Hz bis 100 A Messung 2

Bei der Gleichstrommessung verhält sich das Labormodell konstant. Der Gleichstromwiderstand beträgt ca.  $R = 0,58 \Omega$ .

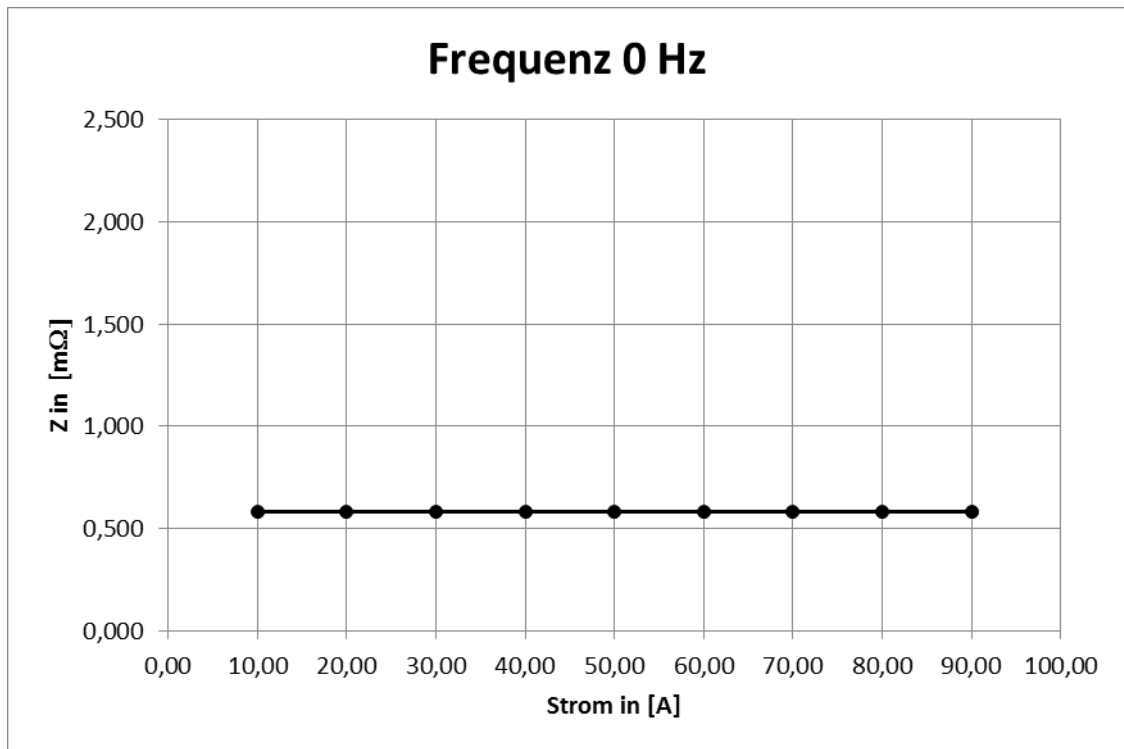


Abbildung 5-17 Ergebnisse Labormodell 0 Hz bis 100 A Messung

### 5.5.4 Messung bei konstantem Strom von 100 A und variabler Frequenz

In Tabelle 5-5 und Abbildung 5-18 werden die Ergebnisse für die Messung mit den Frequenzen 15 Hz, 30 Hz, 50 Hz, 100 Hz, 200 Hz und 400 Hz bei einem konstanten Prüfstrom von 100 A dargestellt. Mit steigender Frequenz wachsen der Betrag der Impedanz und ihr Winkel fast linear an.

**Strom 100A**

Frequenz in [Hz]	$U_{\text{mess}}$ in [mV]	Z in [ $m\Omega$ ]	Winkel in [ $^\circ$ ]
15,00	137,00	1,38	30,00
30,00	181,20	1,81	31,30
45,00	212,80	2,22	32,87
50,00	221,60	2,22	33,34
100,00	290,80	2,91	36,74
200,00	391,10	3,91	41,50
400,00	552,50	5,52	47,62

Tabelle 5-5 Impedanz Messung mit variabler Frequenz

#### 5.5.4.1 Grafische Darstellung

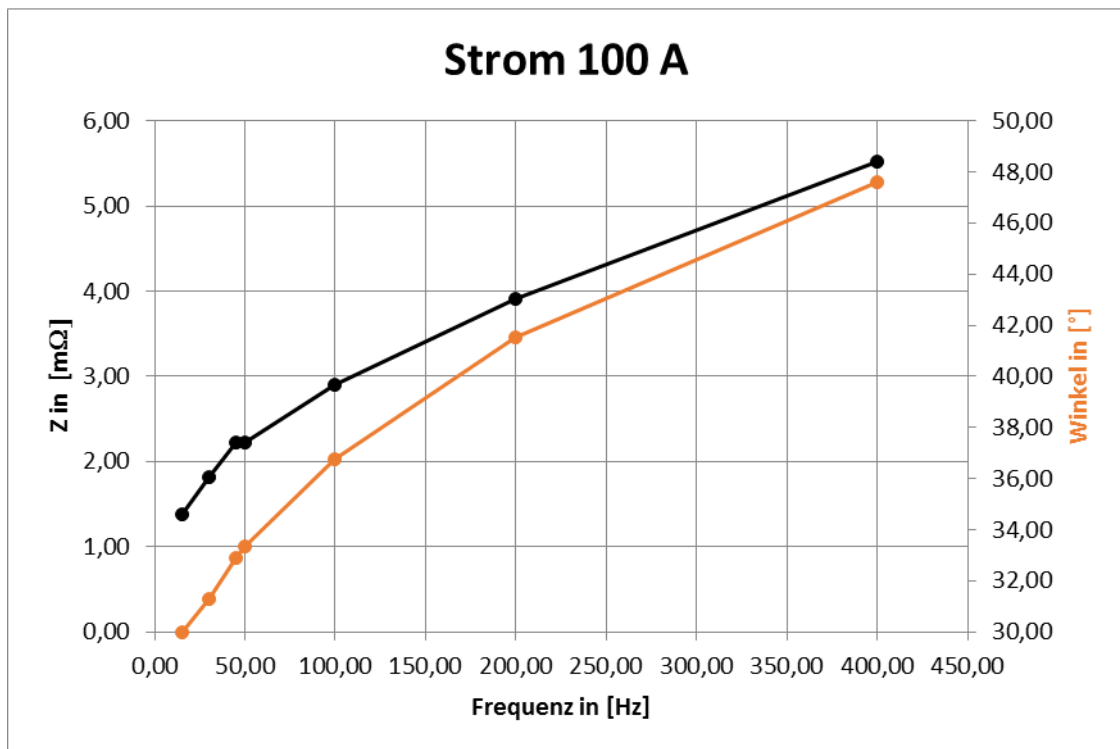


Abbildung 5-18 Grafische Darstellung der Messwerte des Messmodells mit konstantem Strom und variabler Frequenz

## 6 Messungen an der Rohrleitung

### 6.1 Allgemeines

Im folgenden Abschnitt wird die Messung der Rohrleitungsparameter zur Nachbildung von Rohrleitungen im Hinblick auf die Modellbildung anhand eines praktischen Beispiels demonstriert. Zu diesem Zweck wurde ein kaum beeinflusster Rohrleitungsabschnitt ausgewählt. Über zwei verschiedene Messschaltungen wurde jeweils mit Hilfe der Stromquelle OMICRON CPC 100 ein Messstrom in die Rohrleitung eingespeist und die Rohrleitungsimpedanzen messtechnisch erfasst. Der Einspeisepunkt befand sich auf einem Waldweg, die Stichleitung war über eine isolierte Kupplung mit der Rohrleitung verbunden. Am Ende der Rohrleitung befand sich ein Großverbraucher, welcher über einen Feuerschieber gastechnisch getrennt werden kann. Es ist zu beachten, dass der Feuerschieber elektrisch leitend und erdfühlig war. Bei der Ermittlung der Längsimpedanzen wurde der Messstromkreis über Stromquelle –Rohrleitung und ein extra verlegtes Begleitkabel geschlossen. (Siehe Abbildung 6-2). Die Querelemente wurden über den Messkreis Rohrleitung – Erdungsanlage 1 bestimmt.



Abbildung 6-1 Messstation / Verlegung des Begleitkabels



## 6.2 Geografische Übersicht über Messaufbau

Aufgrund des dicht bewaldeten Gebietes musste die Messschleife wie in Abbildung 6-2 gelegt werden. Wie hier ersichtlich befindet sich neben dem Einspeisepunkt (Messmarker) auch die künstliche Erdungsanlage 1, welche für die Bestimmung der Querelemente benötigt wird. In der Nähe des Feuerschiebers befindet sich die künstliche Erdungsanlage 2. Die blauen Linien stellen ungefähr die Messtrassen der Messung des spezifischen Erdwiderstandes dar.

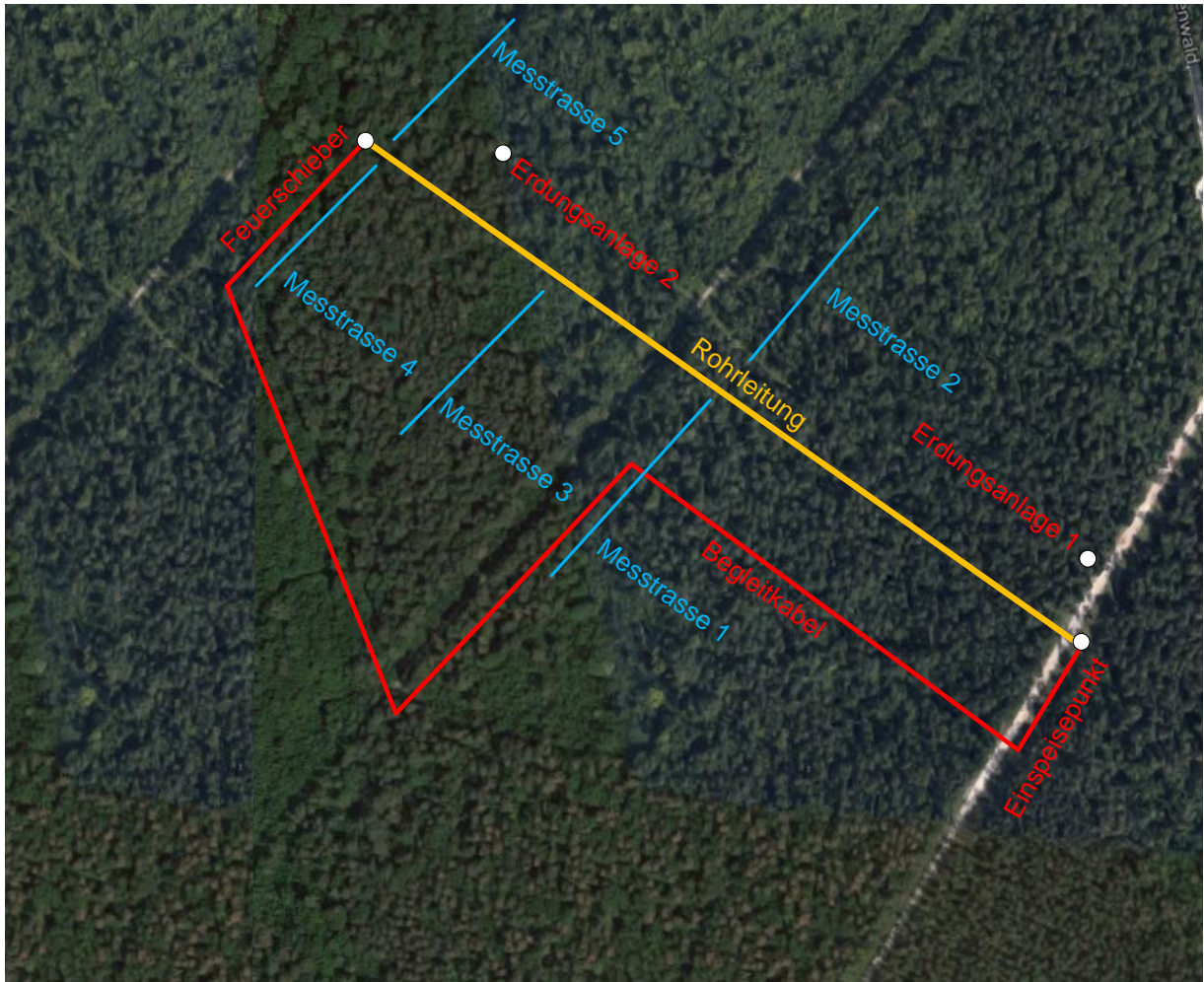


Abbildung 6-2 Geografische Übersicht über die Messtrasse

### 6.3 Kalibrierung der Messgeräte

Mit Hilfe der Versuche im Labor konnten erste grobe Einstellungen vorab getroffen werden. Aufgrund der komplexen Messschaltungen (beschreiben) mussten jedoch einige Änderungen gegenüber den Einstellungen im Labor wie zum Beispiel „Messbereichserweiterung bei der Prüfspannung VSENSE“ getroffen werden.

Die Kanäle des Dewetron 2600 wurden wie folgt verwendet:

Kalibrierung Kanäle Dewetron - Messung der Längselemente					
Kanal	Name	Messkarte	Messbereich in V	Sensoren usw.	Bereich
A10	V1AC	DAQP-HV	100	keine	-
A11	V1AC	DAQP-HV	20	keine	-
A12	VSENSE	DAQP-HV	800	keine	-
A13	VSENSE	DAQP-HV	200	keine	-
A14	Spannung gegen FE	DAQP-HV	800	keine	-
A15	Strom in RL	DAQP-LV	50	Fluke Stromzange	400mV/A
A16	Strom in RL	DAQP-LV	25	Fluke Stromzange	400mV/A
A17	Strom aus RL	DAQP-LV	50	Fluke Stromzange	400mV/A
A18	Strom aus RL	DAQP-LV	25	Fluke Stromzange	400mV/A

Kalibrierung Kanäle Dewetron - Messung der Querelemente					
Kanal	Messgröße	Messkarte	Messbereich in V	Sensoren usw.	Bereich
A10	V1AC	DAQP-HV	100	keine	-
A11	V1AC	DAQP-HV	20	keine	-
A12	VSENSE	DAQP-HV	800	keine	-
A13	VSENSE	DAQP-HV	200	keine	-
A14	Spannung gegen FE	DAQP-HV	800	keine	-
A15	Spannung FS-Einspeisung	DAQP-HV	800	keine	-
A16	Strom in RL	DAQP-LV	50	Fluke Stromzange	400mV/A
A17	Strom in RL	DAQP-LV	25	Fluke Stromzange	400mV/A
A18	Strom aus RL	DAQP-LV	50	Fluke Stromzange	400mV/A
A19	Strom aus RL	DAQP-LV	25	Fluke Stromzange	400mV/A

**Tabelle 6-1 Kanaleinstellungen Dewetron Messgerät**



## 6.4 Allgemeine Ergebnisse

### 6.4.1 Spezifischer Erdwiderstand

Für die Festlegung des spezifischen Erdwiderstandes wurden fünf Messtrassen am Messort mithilfe des Wennerverfahrens aufgenommen (Siehe Abbildung 6-2). Die Sondenabstände betragen [1 m; 2 m; 4 m; 8 m; 16 m], die Lufttemperatur betrug ca. 18° und der Boden war in einem trockenen Zustand.

Spezifischer Erdwiderstand		
	Sondenabstand in [m]	$\rho_E$ in [ $\Omega m$ ]
<b>Messtrasse 1</b>	1	1910
	2	2040
	4	1010
	8	205
	16	124
<b>Messtrasse 2</b>	1	4660
	2	7280
	4	4070
	8	1200
	16	172
<b>Messtrasse 3</b>	1	1910
	2	2340
	4	2570
	8	2220
	16	1430
<b>Messtrasse 4</b>	1	780
	2	1180
	4	1110
	8	1490
	16	1070
<b>Messtrasse 5</b>	1	719
	2	1020
	4	1280
	8	1900
	16	1190

Tabelle 6-2 Gemessene spezifische Erdwiderstände

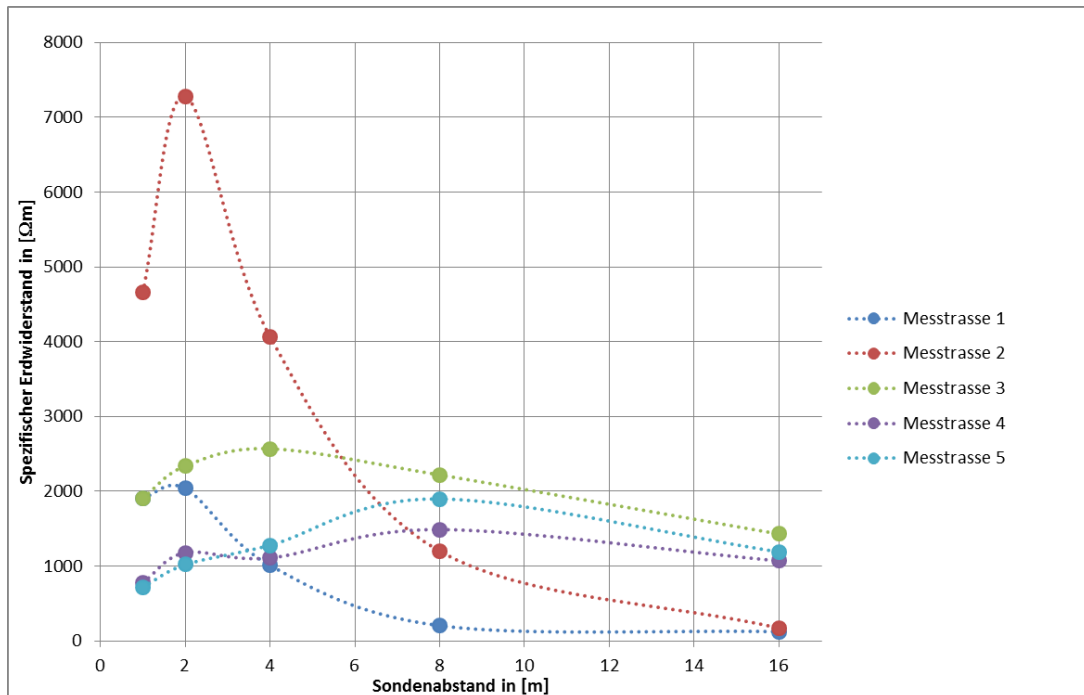


Abbildung 6-3 Ergebnisse der Erdwiderstandsmessung

Die hohen Werte für den Erdwiderstand lassen auf eine hochohmige Schotterstruktur im Untergrund schließen.

Eine Studie über das betreffende Gebiet von Herrn Dr. Hans Malicky, Biologische Station Lunz der Österreichischen Akademie der Wissenschaften [21], verstärkt die Aussagekraft der Messergebnisse. Nach den dort getroffenen Aussagen dürfte es sich um ein massives Schotterbecken handeln. Eine genauere Auswertung der Messung wurde mit Hilfe des geoelektrischen Programms IP2 Win.<sup>3</sup> durchgeführt.

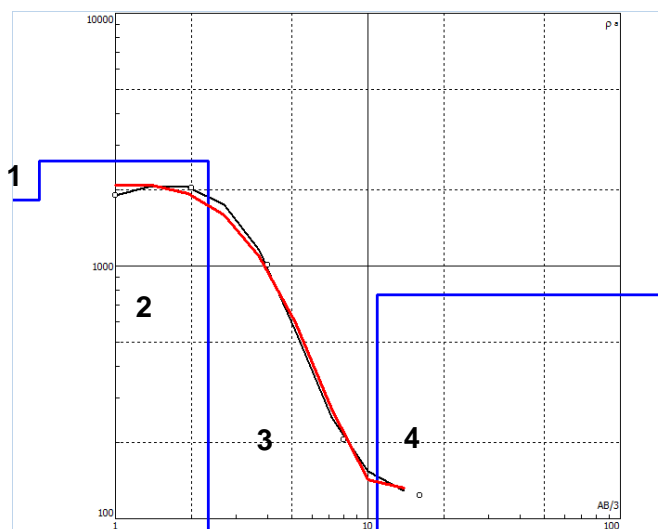


Abbildung 6-4 Messtrasse 1 Auswertung mit IP2Win

<sup>3</sup> IP2Win IP2 Win- Russia, Moscow State University, Geological Faculty, Department of Geophysics V.A. Shevnin <http://geophys.geol.msu.ru/ipi2win.htm>

IP2 Win wird zur Analyse geoelektrischer Daten verwendet. Das Programm verarbeitet dabei die Daten typischer Messverfahren, wie z.B. Wenner oder Schlumberger und errechnet über Näherungsverfahren die Schichtbreite und den Widerstand der einzelnen Bodenschichten. Nach der Eingabe der Messdaten gibt das Programm einen ersten Vorschlag für eine Bodenschichtsaufteilung. Mittels einer Inversion / Anpassung kann der Fehler auf wenige Prozent minimiert werden. [22].

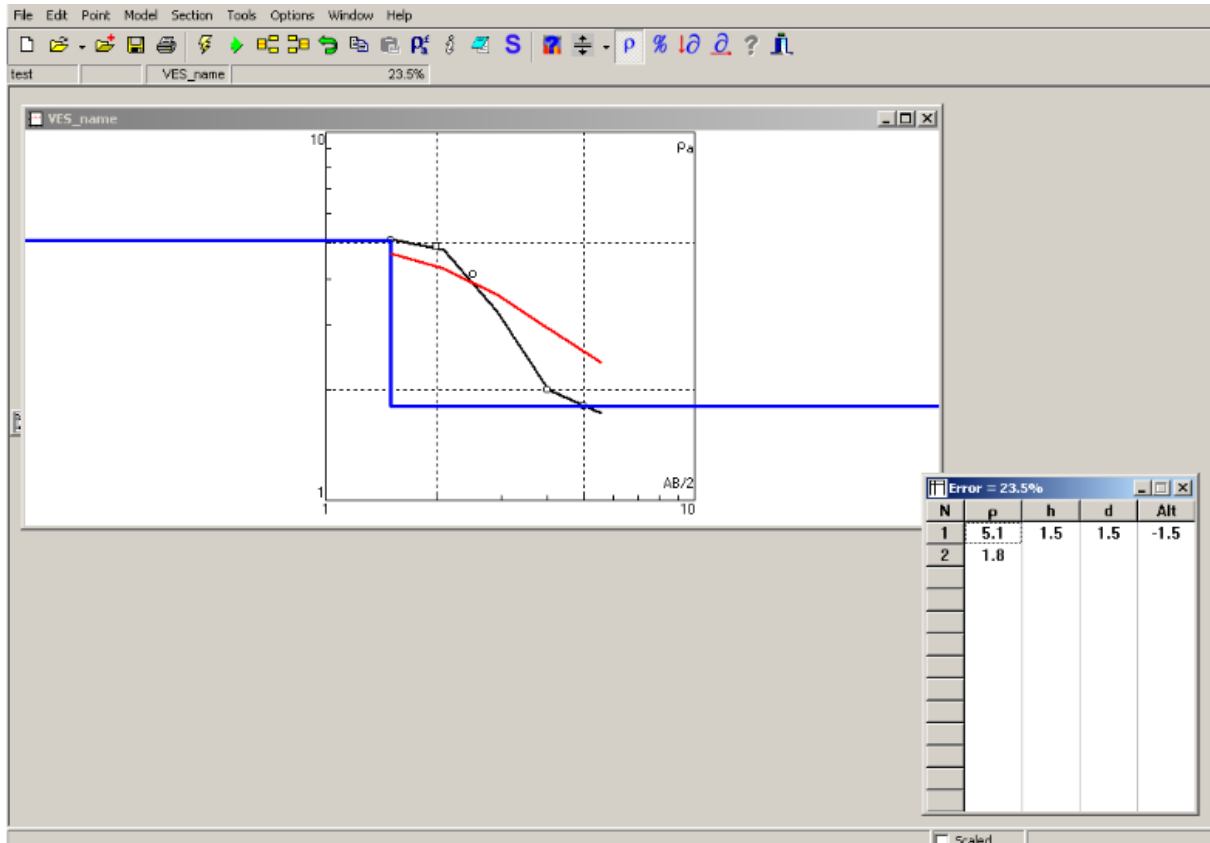


Abbildung 6-5 IP2Win "Messdaten unbearbeitet"

In Abbildung 6-4 ist erkennbar, dass das Programm den Erdboden in vier Schichten unterschiedlicher Breite mit unterschiedlichen Widerständen festlegt. Nach der Inversion bleibt eine wahrscheinliche Abweichung von 6,87 % zum realen Schichtaufbau.

Schicht	ρ <sub>E</sub> in [Ωm]	Schichtdicke in [m]	Erdtiefe in [m]
1	1831,00	0,50	0,50
2	2613,00	1,83	1,88
3	63,80	8,55	4,01
4	767,00	x	x

Tabelle 6-3 IP2Win Auswertung Messtrasse 1

In Tabelle 6-3 werden die einzelnen Schichten der Messtrasse 1 beschrieben. Dabei fällt Schicht 3 mit 63,8 Ωm deutlich zu klein aus, da Schicht 4 wieder einen Wert von 767 Ωm aufweist. Da es sich bei IP2 nur um ein Modell handelt dürfte dies die Abweichung erklären.

Des Weiteren können gegenüberliegende Messtrassen auch zusammen ausgewertet werden, um so ein gemeinsames Profil zu erstellen.

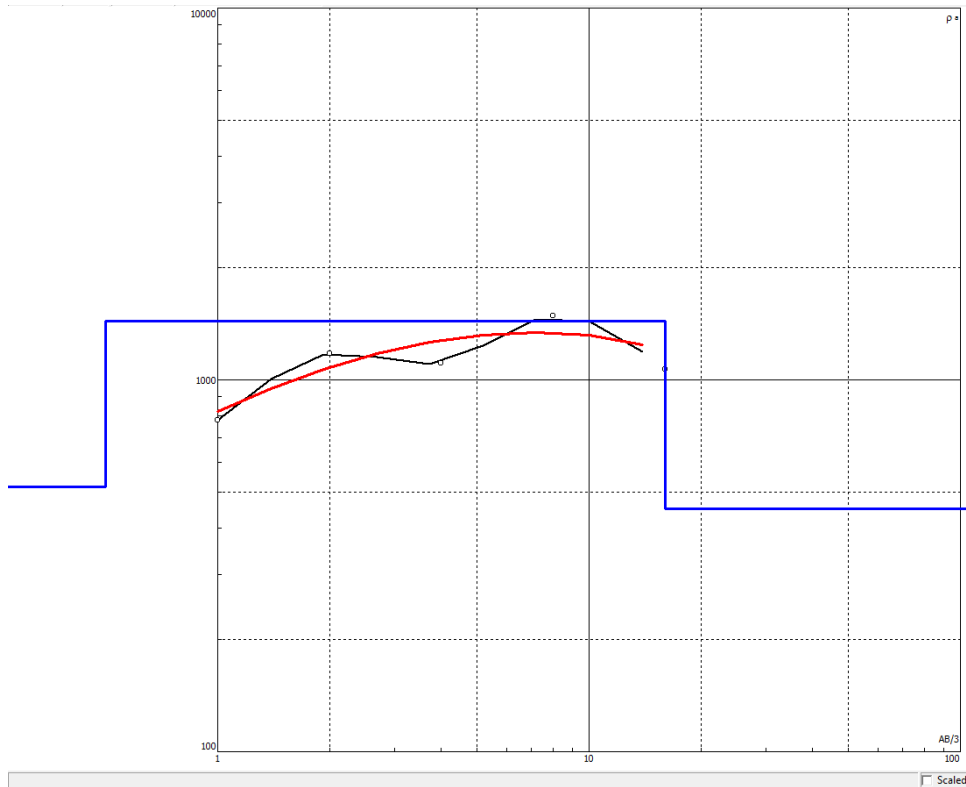


Abbildung 6-6 IP2 WIN Einzel Auswertung für Messtrasse 4

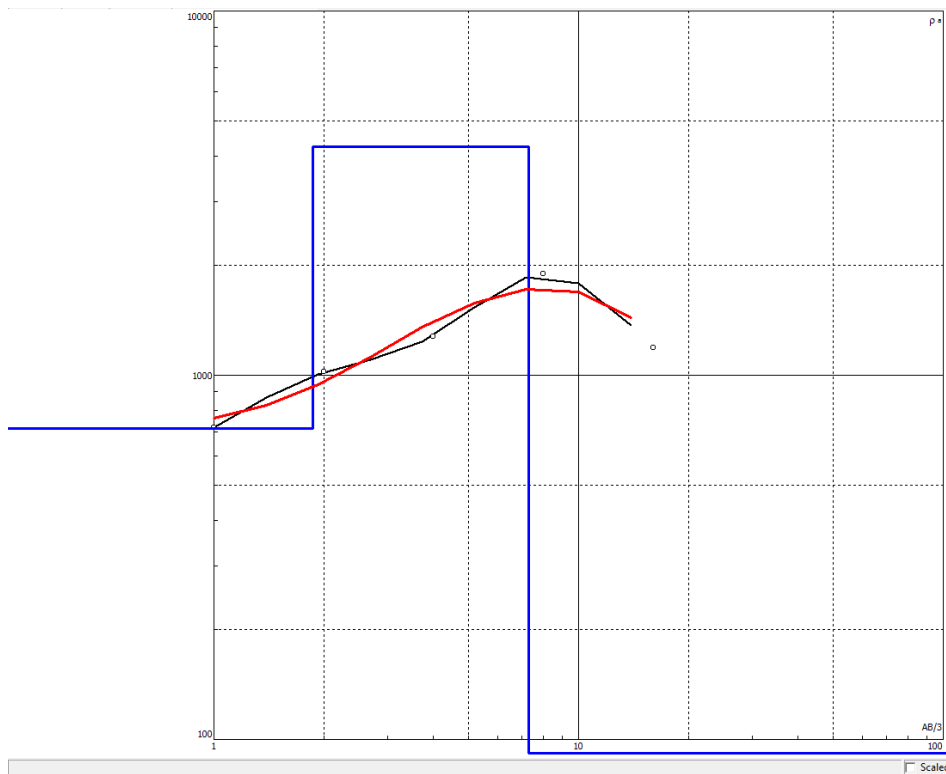


Abbildung 6-7 IP2 WIN Einzel Auswertung für Messtrasse 5

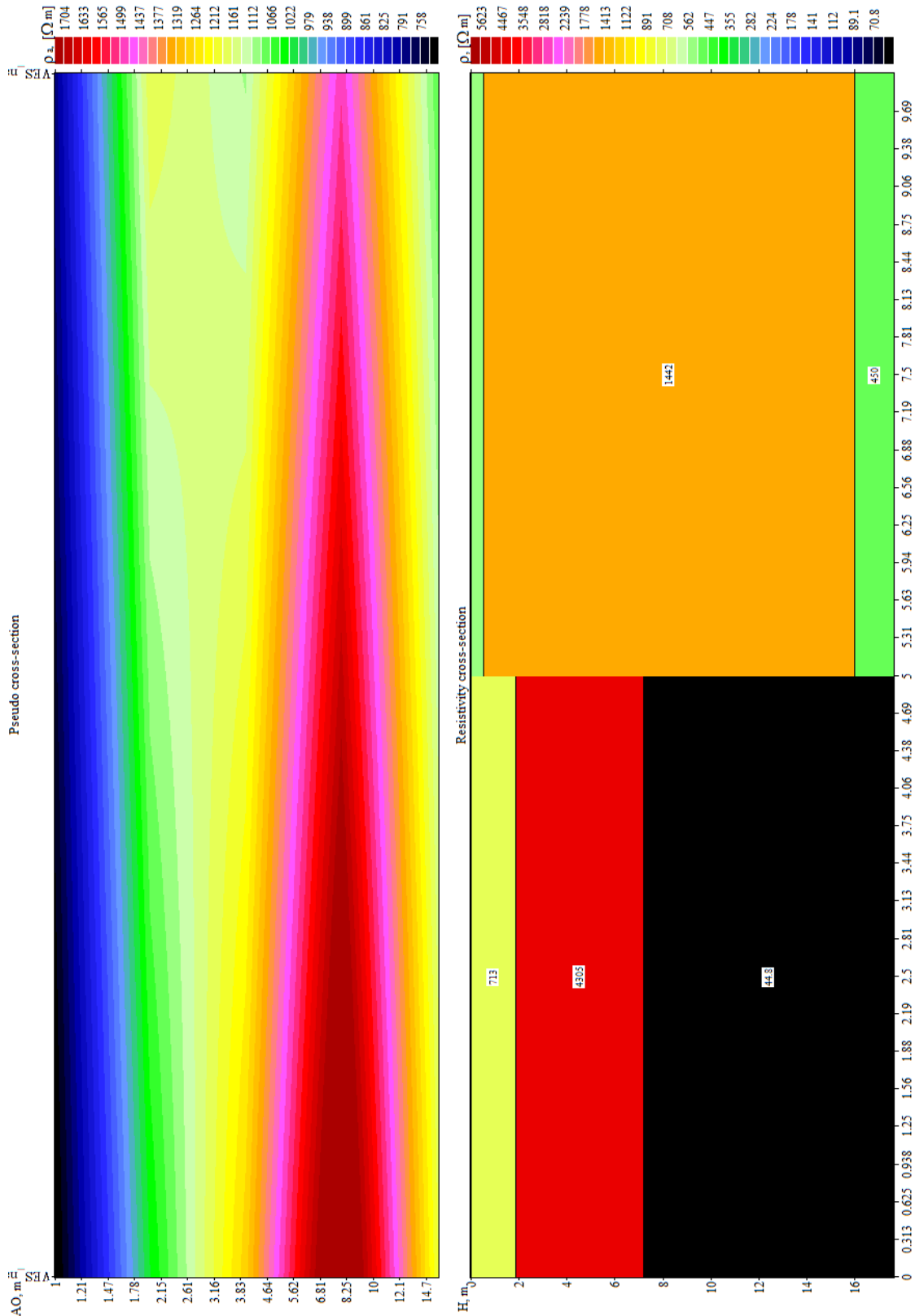


Abbildung 6-8 IP2WIN Auswertung für die Messtrassen 4 und 5

Im rechten Teil von Abbildung 6-8 sind die Ergebnisse der Messtrassen 4 und 5 abgebildet. Die Beiden haben jeweils 3 Schichten unterschiedlicher Breite mit unterschiedlichen Widerständen. Im linken Teil der Grafik wird nun das kombinierte Ergebnis dargestellt.

### 6.4.2 Mess – Erder

Für den Messaufbau nach Abbildung 6-17 wurden zwei künstliche Messerder (siehe Abbildung 6-9) errichtet. Die Messung der Erdungsanlagen erfolgte mittels eines Chauvin-Arnoux 6472 mit der 3-pol-Messung (Siehe Kapitel 4.2.1).

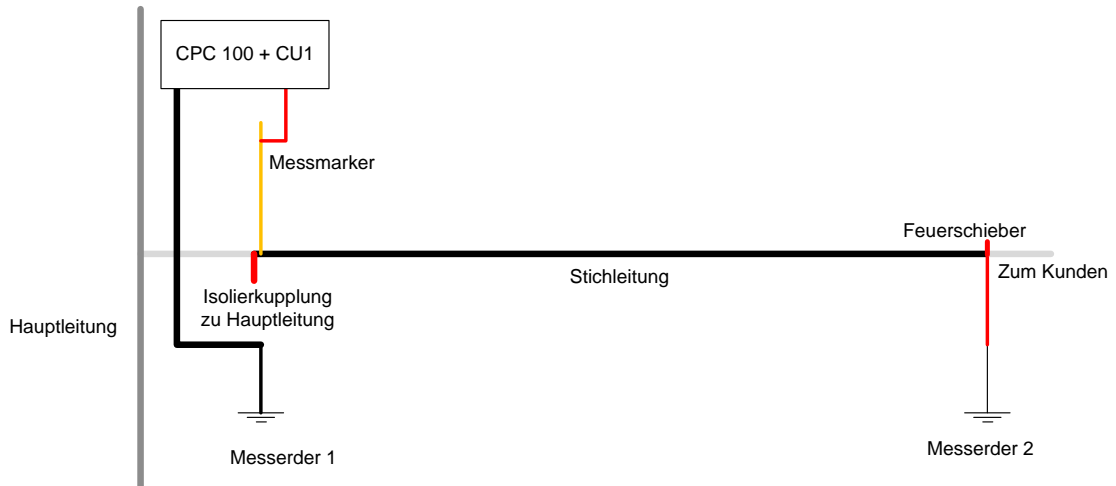


Abbildung 6-9 Künstliche Erder Übersicht



Abbildung 6-10 Erdungsmessung bei Erdungsanlage 1

Messung der Anlagenerder		
Ort	Sondenabstand in [m]	$R_E$ in [ $\Omega$ ]
Erder 1	62% d 49,6	285
	52% d 41,6	283
Erder 2	62% d 49,6	338
	52% d 41,6	337
Feuerschieber	62% d 49,6	610
	52% d 41,6	605

Tabelle 6-4 Künstliche Erdungsstationen und „erdfähiger“ Feuerschieber

### 6.4.3 Übergangswiderstände und Widerstand $R_{\text{Schleife}}$

Bei der Messung der Widerstände in der Messschleife wurden einige für die Bestimmung der Rohrleitungswiderstände nicht relevante Widerstandswerte mitgemessen, welche berücksichtigt werden und aus den Messergebnissen herausgerechnet werden müssen. Neben den Widerständen des Begleitkabels  $R_{\text{Schleife}}$  und  $R_{\text{Klemmen}}$  und den Widerständen für die Versorgungsleitungen und Messleitungen  $R_{\text{Messleitungen}}$  müssen auch die Übergangswiderstände  $R_{\text{Übergangswiderstand}}$  berechnet bzw. erfasst werden.

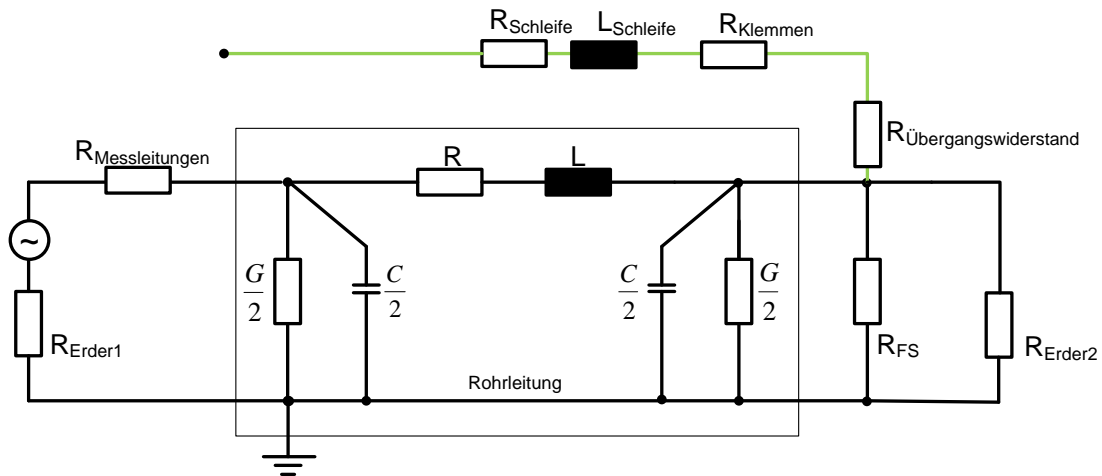


Abbildung 6-11 Messschaltung mit Messwiderständen



Abbildung 6-12 Bestimmung von R Begleitkabel



Abbildung 6-13 Übergangswiderstand Feuerschieber (FS)

Der Widerstand des Begleitkabels, sowie die Klemmwiderstände zwischen den Kabeln werden mittels Zwei-Draht DC-Messung ermittelt und betragen insgesamt  $R_{\text{Kabel}} = 1,21 \Omega$ . Die Induktivität wurde mittels der Formeln in Kapitel 3.2.1 berechnet. Für die Übergangswiderstände wurde ein Wert von ca.  $R_{\text{Übergang}} = 0,4 \Omega$  gemessen. Dabei wurden alle Versorgungs- und Messleitungen sowie Zangenwiderstände berücksichtigt.



## 6.5 Messung der Längselemente der Rohrleitung

### 6.5.1 Messaufbau

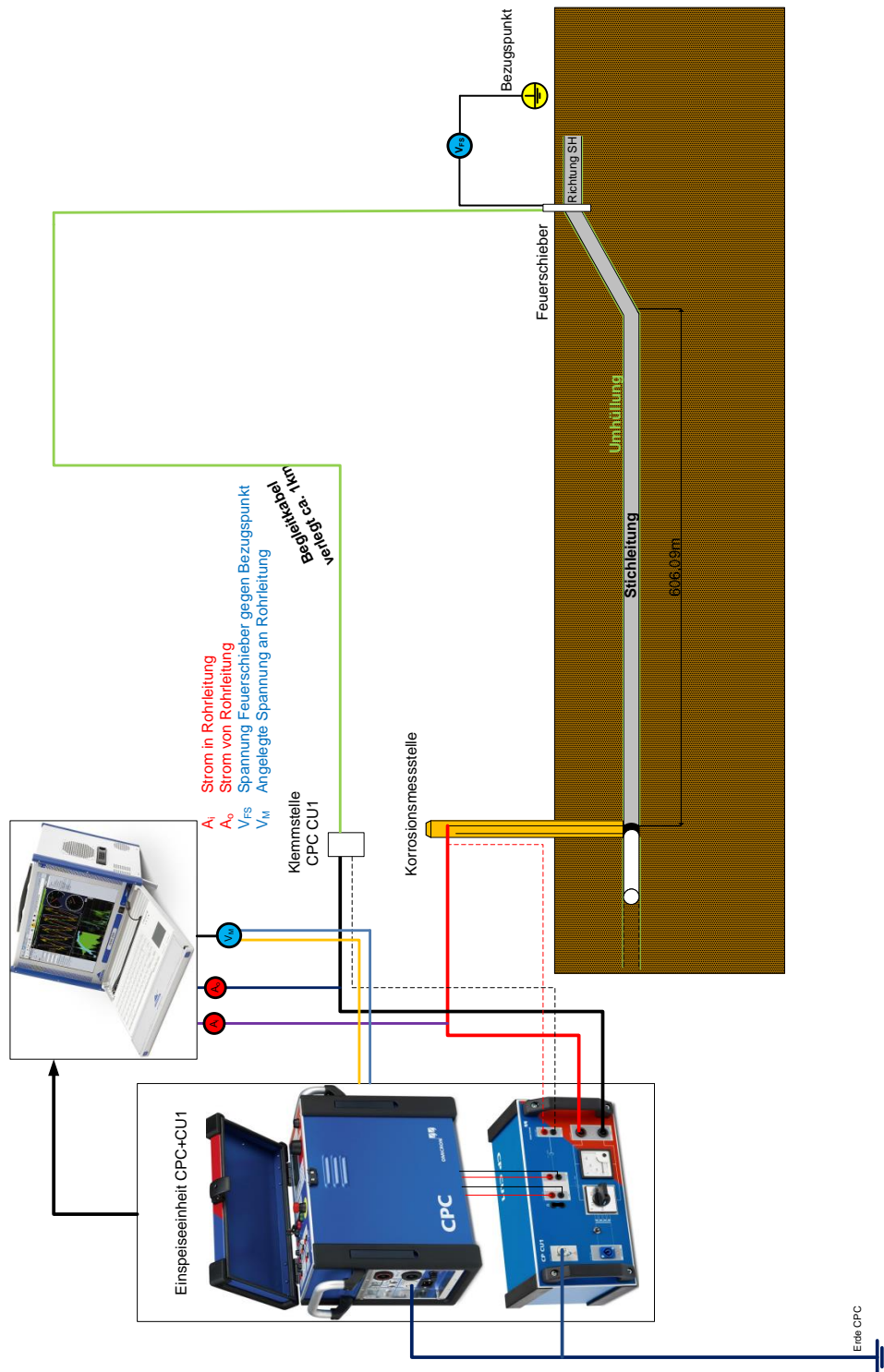


Abbildung 6-14 Messaufbau Rohrleitung mit Rückleiter



Zur Ermittlung der Längskomponenten der Rohrleitung wurde ein Begleitkabel mit einer Länge von ca. 1 km und einem Querschnitt von 16 mm<sup>2</sup> in einem Abstand von mindestens 50 m verlegt. Über die Einspeisung in die Rohrleitung und die Rückführung über das Begleitkabel wird Schaltung der Längselemente mit dem Kabel realisiert. Die Ströme, welche über die Querelemente abfließen, sind hier vernachlässigbar. Die Einspeisung erfolgt mittels CPC 100 und einer CU1 Koppereinheit über einen Messmarker (Siehe Abbildung 6-15).



**Abbildung 6-15 Messmarker**

Dabei wird der Korrosionsschutz vorübergehend entfernt und dessen Anschlüsse verwendet. Mithilfe des mehrkanaligen Datenloggers Dewetron wird die Messung überwacht und aufgenommen. Die Ströme werden mit Hilfe Fluke i5s Stromzangen in unterschiedlichen Bereichen gemessen. Ebenso wird die Messspannung VT der Rohrleitung und die Spannung am Feuerschieber FS mitgemessen (Siehe Abbildung 6-16).

### **6.5.2 Messergebnisse**

In Tabelle 6-5 befinden sich die Messergebnisse für einen eingestellten Strom bis 1 A und dem max. Strom mit verschiedenen Frequenzen. Die Zusammenstellung der detaillierten Messergebnisse befindet sich im Anhang. Eine Interpretation der Messergebnisse der Tabellen 6-5 und 6-6 findet sich Kapitel 7. Die Impedanz-Messung der Schleife Rohrleitung – Rückleiter ergibt ein ohmsch-induktives Verhalten. Die Impedanz ändert mit steigender Frequenz ihren Betrag sowie ihren Winkel.

Einspeisung RL-Rückleiter Kabel				
Frequenz in [Hz]	Eingespeister Strom CT in [mA]	Spannung am Messobjekt VT in [V]	gem. Impedanz Z in [ $\Omega$ ]	gem. Winkel in [ $^\circ$ ]
15,00	903,00	3,80	4,20	6,30
30,00	939,00	3,94	4,20	11,00
50,00	950,00	4,83	5,10	14,70
100,00	960,00	4,79	4,97	27,00
200,00	970,00	5,65	5,80	47,80
400,00	970,00	9,06	9,32	69,70

Tabelle 6-5 Messergebnisse hinsichtlich Längsimpedanz bei 1 A mit variabler Frequenz

Einspeisung RL-Rückleiter Kabel mit FS-Messung					
Frequenz in [Hz]	Eingespeister Strom CT in [A]	Spannung am Messobjekt VT in [V]	Spannung FS-Bezugspunkt in [V]	gem. Impedanz Z in [ $\Omega$ ]	gem. Winkel in [ $^\circ$ ]
15,00	14,23	27,16	3,00	1,91	13,49
30,00	14,70	30,70	2,93	2,09	22,91
50,00	14,75	34,90	2,55	2,36	32,30
100,00	14,77	46,77	3,44	3,16	47,37
200,00	9,78	49,06	5,20	5,00	60,69
400,00	3,94	35,27	5,15	8,93	69,55

Tabelle 6-6 Messergebnisse hinsichtlich Längsimpedanz bei max. möglichen Strom und variabler Frequenz

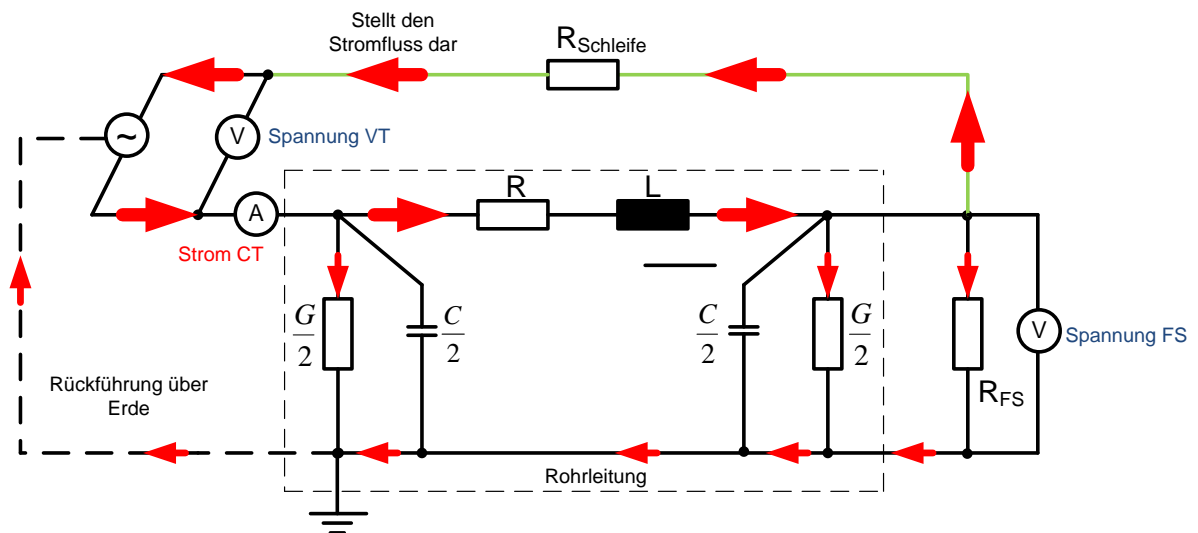


Abbildung 6-16 Ersatzschaltung Messaufbau Längselemente

## 6.6 Messung der Querelemente

### 6.6.1 Messaufbau Variante 1 mit 2 Erdungsanlagen

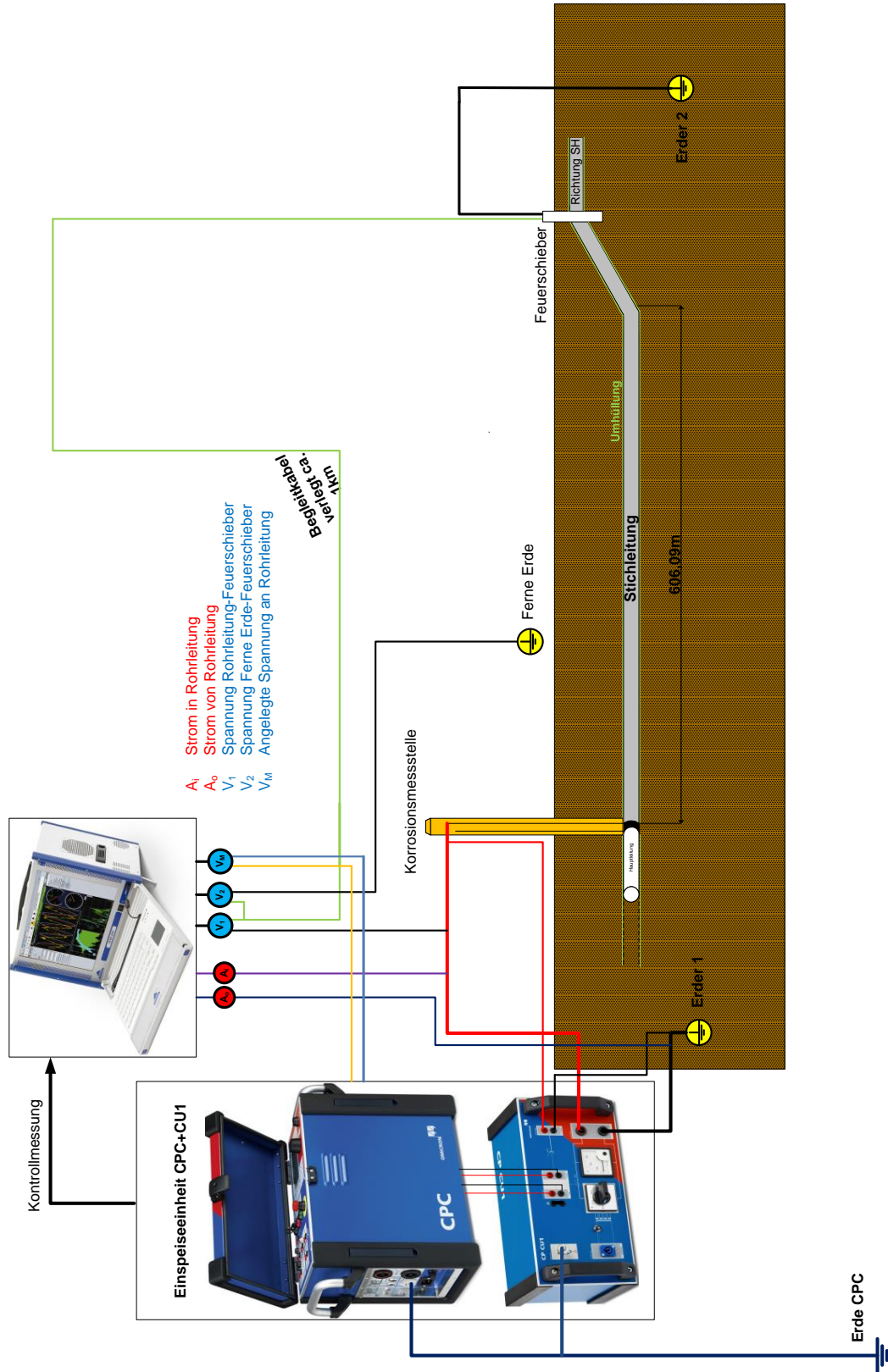


Abbildung 6-17 Messaufbau Rohrleitung mit 2 Messerdern

Bei dieser Messvariante wurde jeweils eine künstliche Erdungsanlage am Anfang und am Ende der Rohrleitung installiert. Zur Messung bzw. Einspeisung wurden die Messgeräte aus Kapitel 6.5 verwendet. Die Einspeisung erfolgt hier über die Erdungsanlage 1 und die Anschlüsse des Messmarkers. Die Rückführung wird über die Querelemente der Rohrleitung gewährleistet (siehe Abbildung 6-17). Wieder werden der eingespeiste Strom CT sowie die Messspannung VT über das Dewetron mitgemessen. Die Strompfeile zeigen die mögliche Stromaufteilung der Messschaltung an (siehe Abbildung 6-18). Dabei wird die jeweilige Größenaufteilung jedoch nicht beachtet.

### 6.6.2 Messergebnisse Variante 1

In Tabelle 6-7 befinden sich die Messergebnisse für einen eingestellten Messstrom CT bis ca. 1 A mit verschiedenen Frequenzen. Die Zusammenfassung der Messergebnisse befindet sich im Anhang. Aufgrund der künstlichen Erdungsanlage  $R_{Erd2}$  fließt der meiste Strom über die Erdungsanlage und nicht über die Querelemente der Rohrleitung. Daher wird eine falsche Impedanz gemessen. Aus diesem Grund wurde die Messung in Variante 2 umgewandelt.

Einspeisung RL - Erdungstation 1 / FS über Erdungstation 2 geerdet				
Frequenz in [Hz]	Eingespeister Strom CT in [mA]	Spannung am Messobjekt VT in [V]	gem. Impedanz Z in [ $\Omega$ ]	gem. Winkel in [ $^\circ$ ]
15,00	488,00	214,00	439,00	-0,55
30,00	782,00	339,00	434,00	-1,72
50,00	931,00	402,00	432,00	-2,77
100,00	960,00	411,00	428,00	-5,05
200,00	898,00	406,00	417,00	-9,00
400,00	875,00	334,00	382,00	-14,80

Tabelle 6-7 Messergebnisse Querzweig bei 1A und variabler Frequenz

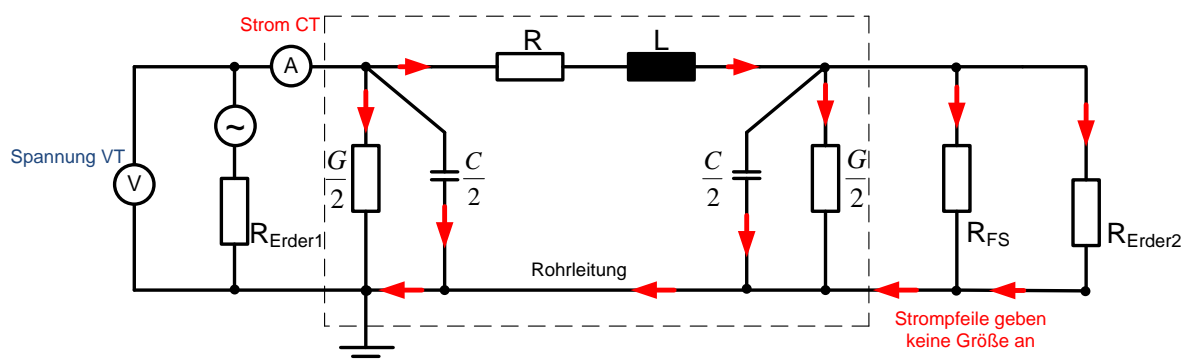


Abbildung 6-18 Ersatzschaltung Messaufbau Querelemente Variante 1

### 6.6.3 Messaufbau Variante 2 mit einer Erdungsanlage

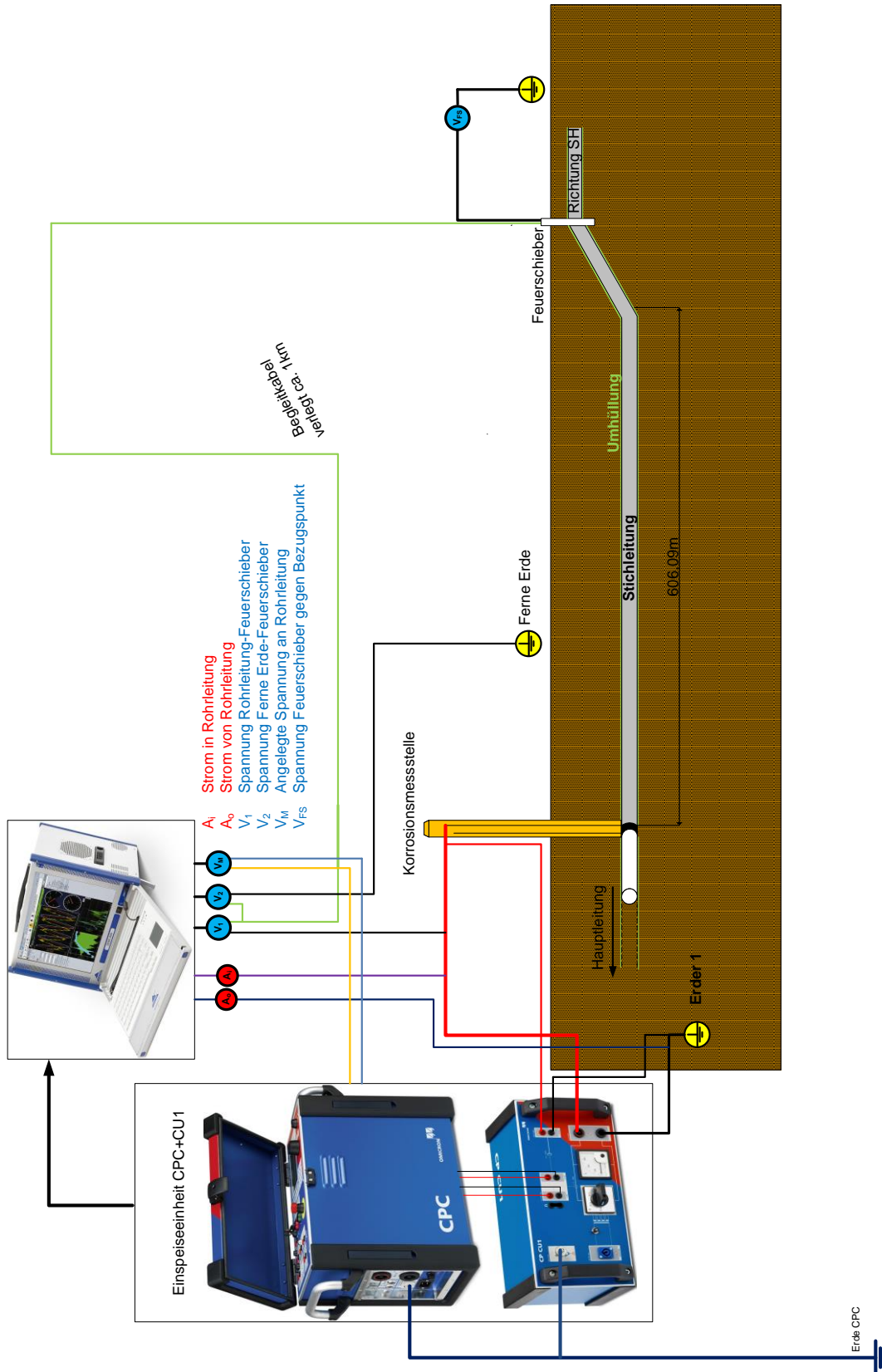


Abbildung 6-19 Messaufbau Variante 2 mit 1 Erdungsanlage und einer Spannungsmessung am FS

Bei diesem Messaufbau wird nur mehr die Erdungsanlage 1, welche zur Einspeisung des Messstroms gegen Erde notwendig ist, verwendet. Nach einer Auswertung der vorhergehenden Messung konnte gezeigt werden, dass Erdungsanlage 2 zu einer Verfälschung der Ergebnisse führt da ein Großteil des Messstroms über diese Erdungsanlage zurückfließt und die kleinen Anteile, die über die Isolation der Rohrleitung fließen, nicht mehr erfasst werden können. Da es bei dieser Messschaltung zu einem Spannungsabfall an der künstlichen Erdungsanlage 1 kommt, muss dies bei der Auswertung beachtet werden. Es wird daher eine zusätzliche Spannung RL-ferne Erde zur Bestimmung von der Messimpedanz herangezogen.

### 6.6.4 Messergebnisse zu Variante 2

Einspeisung RL - Erdungstation 1 / FS nicht geerdet						
Frequenz in [Hz]	Eingespeister Strom CT in [mA]	Spannung am Messobjekt VT in [V]	Spannung RL-Ferne Erde in [V]	Spannung Kabel-RL in [V]	gem. Impedanz Z in [ $\Omega$ ]	gem. Winkel in [°]
15,00	328,00	247,00	150,00	0,30	750,00	-1,60
30,00	563,00	402,00	247,00	0,66	713,00	-4,46
50,00	775,00	541,00	329,00	0,92	697,00	-7,00
100,00	924,00	617,00	371,00	1,41	668,00	-12,70
200,00	868,00	513,00	300,00	1,93	590,00	-21,00
400,00	768,00	352,00	183,80	2,40	458,00	-26,70

Tabelle 6-8 Vergleich der Messergebnisse der Variante 1 zur Variante 2 mit max 1 A und variabler Frequenz

Einspeisung RL - Erdungssation 1 / Messung an FS						
Frequenz in [Hz]	Eingespeister Strom CT in [mA]	Spannung am Messobjekt VT in [V]	Feuerschieber+Kabel gegen Erde in [V]	Feuerschieber gegen Bezugspunkt in [V]	Feuerschieber-RL in [V]	gem. Impedanz Z in [ $\Omega$ ]
15,00	329,00	247,00	152,50	150,00	0,50	749,00
30,00	550,00	403,00	248,50	242,00	0,60	719,00
50,00	771,00	545,00	332,00	324,00	0,80	704,90
100,00	882,00	622,00	373,00	364,00	1,28	670,00
200,00	868,00	512,18	300,00	293,00	1,76	599,00
400,00	764,00	352,99	184,00	182,00	2,18	460,28

Tabelle 6-9 Messergebnisse 2 zu Variante 2 mit 1A und variabler Frequenz

In Tabelle 6-8 und Tabelle 6-9 ist der Unterschied zwischen der Prüfspannung  $V_T$  und der Spannung RL-FE erkennbar. Durch den Spannungsabfall an  $R_{Erd1}$  liegt nicht mehr die volle Spannung  $V_T$  an der Rohrleitung an. Durch die Messung der Spannung RL-FE wurde die korrekte Prüfspannung aufgezeichnet. Es kann daher für die weiteren Berechnungen / Auswertungen die künstliche Erde  $R_{Erd1}$  vernachlässigt werden (Siehe korrigierte Messergebnisse im Anhang 11.2.4.).

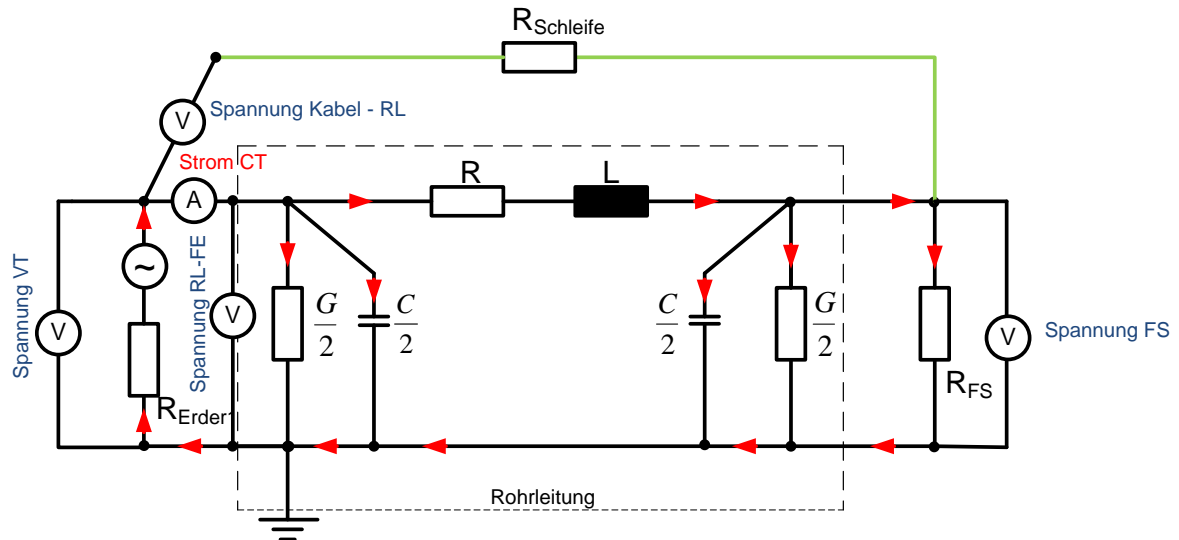


Abbildung 6-20 Ersatzschaltung Messaufbau Querelemente Variante 2

Die Abbildung 6-21 und Abbildung 6-22 zeigen den Verlauf der gemessenen Impedanz bzw. des Winkels bei verschiedenen Mess-Frequenzen an. Mit steigender Frequenz ist eine Abnahme der Impedanz und eine Zunahme des Winkels erkennbar. Außerdem scheint es hierbei um einen linearen Vorgang zu handeln, da sich die Kurven nicht schneiden und ähnliche Verläufe haben.

Anhand der Abbildung 6-21 & Abbildung 6-22 sind die Frequenzabhängigkeit der gemessenen Impedanzen und Winkel erkennbar. Hierbei nimmt der Betrag der Impedanz mit steigender Frequenz ab deren Winkel zu.

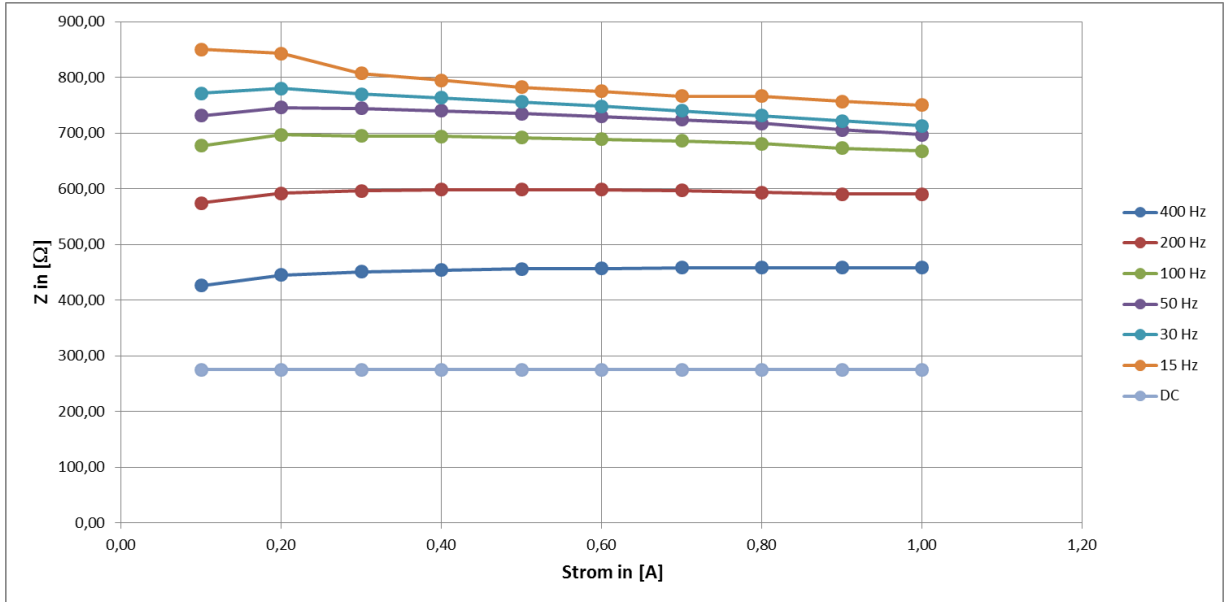


Abbildung 6-21 Verlauf der gemessenen Impedanz bei unterschiedlichen Frequenzen und Strömen

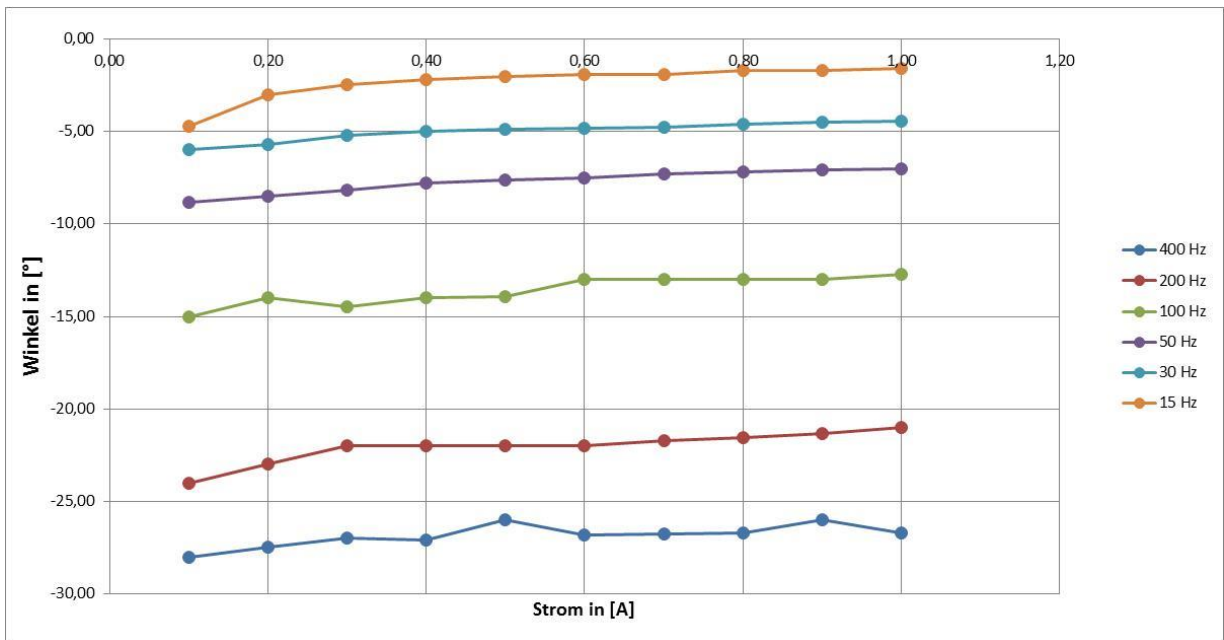


Abbildung 6-22 Winkelverlauf bei unterschiedlichen Frequenzen und Strömen



## 7 Diskussion der Ergebnisse

### 7.1 Längselemente der Rohrleitung

Anhand des Labormodelles wurde ein ohmsch/induktives Verhalten für die Längselemente der Rohrleitung nachgewiesen. Unter Berücksichtigung der Messergebnisse aus den Tabellen 6-4 und 6-5 sowie des Ersatzschaltbildes in Abbildung 6-11 kann folgendes zusammengefasst werden:

Der eingespeiste Strom fließt hauptsächlich über die Rohrleitungslängselemente R und L und kehrt über das ausgelegte Begleitkabel, welches einen Widerstand  $R_{\text{Schleife}}$  aufweist, zur Quelle zurück. Die angelegte Messspannung teilt sich daher auf eine Serienschaltung der Längselemente, des Schleifenwiderstandes und der Übergangswiderstände auf.

Die Auswertung der Längselemente und die Berechnung der Schleifenimpedanz werden im folgenden Beispiel für eine Frequenz von 50 Hz durchgeführt.

$$R_{\text{Schleife}} = \frac{\rho_{\text{Kupfer}} \cdot l_{\text{Schleife}}}{A} = 1,21 \Omega$$

$$R_{\text{Übergangswiderstände}} = 0,4 \Omega$$

$$Z_{50\text{Hz}} = 2,39 \Omega \mid 31,90^\circ$$

$$R_{\text{gemessen } 50\text{Hz}} = Z_{50\text{Hz}} \cdot \cos\varphi = 2,03 \Omega$$

$$X_{50\text{Hz}} = Z_{50\text{Hz}} \cdot \sin\varphi = j1,26 \Omega$$

$$R_{\text{Korrigiert}} = R_{\text{gemessen } 50\text{Hz}} - R_{\text{Schleife}} - R_{\text{Übergangswiderstände}} = 0,42 \Omega$$

$$\delta_K = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho_K}{\omega \cdot \mu_0}} = 9,49 \text{ mm}$$

$$X_{\text{Begleitkabel}} = \left( \frac{\omega \cdot \mu_0}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{\text{Abstand}}{r_{\text{Kabel}}}\right) + \frac{\rho_{\text{Kupfer}}}{2 \cdot r_{\text{Kabel}} \cdot \pi \cdot \delta_K} \right) = j0,46 \text{ m}\Omega$$

$$X_{\text{korrekt}} = X_{50\text{Hz}} - X_{\text{Begleitkabel}} = j0,80 \text{ m}\Omega$$

Frequenz in [Hz]	R <sub>Gemessen</sub> in [Ω]	R <sub>Korrigiert</sub> in [Ω]	R <sub>Theorie</sub> in [Ω]	R <sub>AFK3</sub> in [Ω]
15,00	1,90	0,29	0,24	0,23
30,00	1,94	0,33	0,34	0,33
50,00	2,03	0,42	0,44	0,43
100,00	2,17	0,56	0,64	0,69
200,00	2,41	0,80	0,93	0,93

**Tabelle 7-1 Ergebnisse für R**

Frequenz in [Hz]	X <sub>Gemessen</sub> in [Ω]	X <sub>Begleitkabel</sub> in [Ω]	X <sub>Korrigiert</sub> in [Ω]	X <sub>Theorie</sub> in [Ω]	X <sub>AFK3</sub> in [Ω]	L <sub>Gemessen</sub> in [mH]	L <sub>Theorie</sub> in [mH]
15,00	0,45	0,14	0,31	0,36	0,28	3,26	3,83
30,00	0,81	0,28	0,54	0,58	0,43	2,85	3,10
50,00	1,26	0,46	0,80	0,85	0,58	2,55	2,70
100,00	2,32	0,92	1,41	1,43	0,91	2,24	2,28
200,00	4,36	1,84	2,52	2,48	1,42	2,01	1,97

**Tabelle 7-2 Ergebnisse für L**

In Tabelle 7-1 sind nur minimale Unterschiede zwischen dem korrigierten Messwert, der Theorie und AfK 3 zu erkennen. Diese sind aus den Messtoleranzen der Messgeräte abzuleiten.

Tabelle 7-2 spiegelt die kleineren Abweichungen zwischen den korrigierten Messwerten und den berechneten Werten des Theorie-Modells wider. Die Ergebnisse der AfK 3 weichen hier deutlich mehr von den Messergebnissen ab.

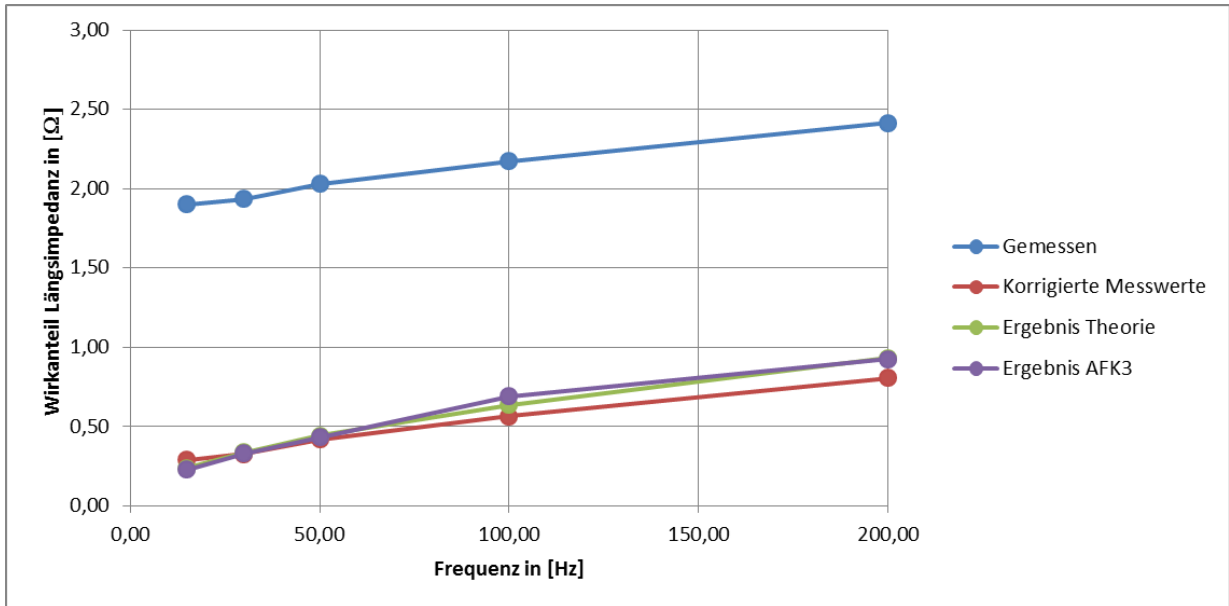


Abbildung 7-1 Ergebnisse Wirkanteil der Längsimpedanz

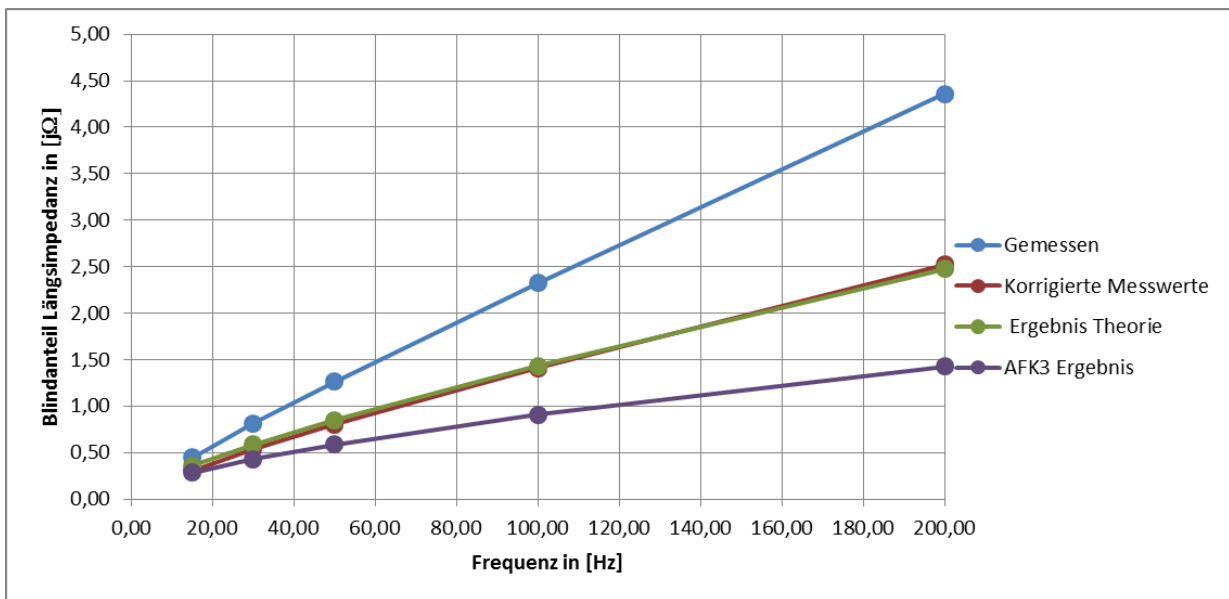


Abbildung 7-2 Ergebnisse Blindanteil der Längsimpedanz

## 7.2 Querelemente der Rohrleitung

Im Labor war eine Bestimmung der Querelemente mit verschiedenen Umhüllungsmaterialien nicht möglich, da das Probestück für eine Messung zu kurz und außerdem nicht im Erdboden eingegraben war.

Auf eine Auswertung von Messvariante 1 wurde aufgrund der starken Beeinflussung der Messergebnisse durch die beiden Erdungsanlagen verzichtet. Nachfolgende Betrachtungen gelten daher für Messschaltung in der Variante 2. Durch die Auswahl der richtigen Messspannung kann die künstliche Erdungsanlage  $R_1$  vernachlässigt werden. Es ergibt sich eine Serienschaltung der Längselemente mit dem Feuerschieber.

Bei der Messung wurde die Impedanz der gesamten Messschaltung gemessen. Bei der Einspeisung Rohrleitung – künstliche Erdungsanlage muss der Spannungsabfall an dieser berücksichtigt werden. Mit der korrigierten Spannung  $U_{\text{Korr}}$  kann nun die korrekte Impedanz  $Z_{\text{Korr}}$  berechnet werden. Über das Ersatzschaltbild kann nun  $Z_q$  berechnet werden. Es liegt die Längsimpedanz  $Z_L$  mit den  $R_{FS}$  in Serie. Aus der Parallelschaltung von  $(Z_L + R_{FS}) // Z_q$  ergibt nun  $Z_{\text{Korr}}$ . Mittels Umformung der Gleichung kann nun die wahre Querimpedanz  $Z_q$  ermittelt werden. (Ergebnisse in Tabelle 7-4).

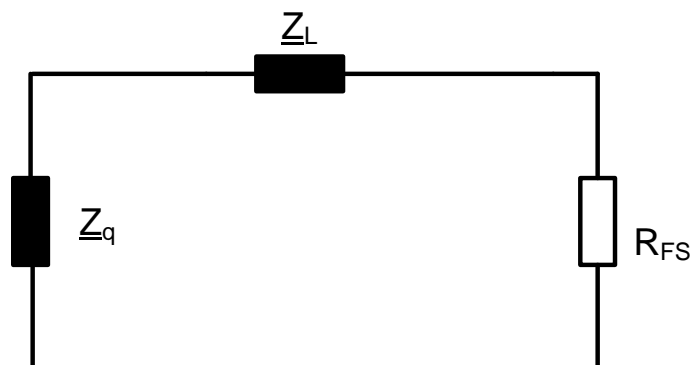


Abbildung 7-3 Vereinfachtes Ersatzschaltbild

$$Z_{\text{Korr}} = \frac{U_{\text{Korr}}}{I_{CT}} = 430,61 \Omega$$

$$Z_{LG} = Z_L + R_{FS}$$

$$\frac{1}{Z_{\text{Korr}}} = \frac{1}{Z_q} + \frac{1}{(Z_{LG})}$$

$$Z_q = \frac{Z_{\text{Messung}} \cdot Z_{L50\text{Hz}}}{(Z_{L50\text{Hz}} - Z_{\text{Messung}})} = 1232,8 - j582,4 \Omega$$

$$R_q = 1232,8 \Omega$$

$$X_q = -j582,4 \Omega$$

Anhand der Auswertung der Messung ist für die Querelemente eine starke Frequenzabhängigkeit erkennbar.

Tabelle 7-3 zeigt die gemessene und korrigierte Impedanz der Messschaltung. Anhand des gemessenen Winkels kann auf den Wirkanteil  $R_{\text{korr}}$  und den Blindanteil  $X_{\text{korr}}$  der Messschaltung geschlossen werden.

Frequenz in [Hz]	gem. Impedanz Z in [ $\Omega$ ]	Impedanz $Z_{\text{korr}}$ in [ $\Omega$ ]	korr. R in [ $\Omega$ ]	korr. X in [ $j\Omega$ ]
15,00	749,00	463,53	463,43	9,30
30,00	719,00	451,82	450,49	34,66
50,00	704,90	430,61	426,73	57,70
100,00	670,00	422,90	412,88	91,53
200,00	599,00	345,62	322,58	124,09

Tabelle 7-3 Gemessene Impedanz Querelemente

In Tabelle 7-4 sind die „echten“ berechneten Querelemente verzeichnet.

Frequenz in [Hz]	$R_{\text{quer}}$ berechnet in [ $\Omega$ ]	$X_{\text{quer}}$ berechnet in [ $j\Omega$ ]
15	1915,53	-163,28
30	1613,20	-486,15
50	1232,80	-582,48
100	937,10	-720,42
200	477,60	-468,70

Tabelle 7-4 Berechnete Querelemente

### 7.2.1 Umhüllungswiderstand $ru$ und Kapazität $C'$

Über den Wirkanteil  $R_q$  der Querelemente kann der Ableitbetrag  $G'$  berechnet werden.

$$G' = \frac{1}{R_{\text{quer}} \cdot l_{\text{Rohr}}} = 0,00134 \frac{\text{mS}}{\text{m}}$$

Über die Umformung der Formel (4.9) lässt sich nun der Umhüllungswiderstand  $ru$  berechnen.

$$ru = \frac{d \cdot \pi}{G'} = 140841,57 \Omega\text{m}^2$$

Frequenz in [Hz]	$R_{\text{quer}}$ berechnet in [ $\Omega$ ]	$G'$ in [mS/m]	$ru$ in [ $\Omega\text{m}^2$ ]
15	1915,53	0,00086	218 840,25
30	1613,20	0,00102	184 300,48
50	1232,80	0,00134	140 841,57
100	937,10	0,00176	107 059,25
200	477,60	0,00345	54 563,54

Tabelle 7-5 Umhüllungswiderstand  $ru$  bei unterschiedlichen Frequenzen

In Tabelle 7-5 ist ersichtlich, dass der Umhüllungswiderstand mit zunehmender Frequenz abnimmt. Eine genauere Aufklärung dieses Phänomens wird in dieser Arbeit nicht durchgeführt, jedoch ist das Verhalten wahrscheinlich auf die Materialeigenschaften der Umhüllung zurück zu führen.

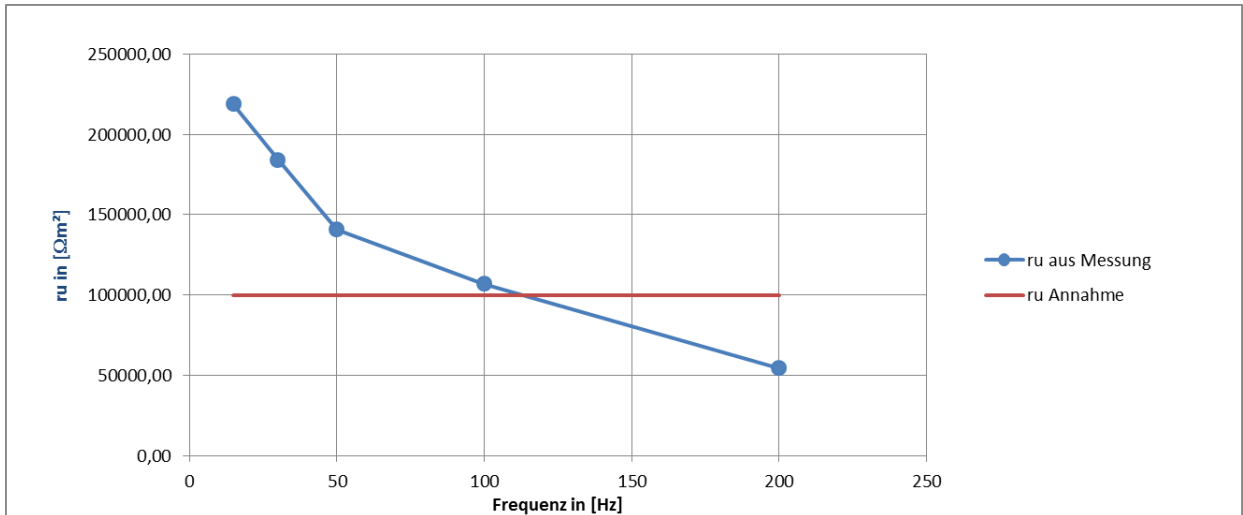


Abbildung 7-4 Umhüllungswiderstand ru - Frequenzabhängigkeit

Über  $X_{\text{quer}}$  kann der Kapazitätsbelag  $C'$  für 50 Hz berechnet werden.

$$C' = \frac{1}{\omega \cdot X_q \cdot l_{\text{Rohr}}} = 9,02 \frac{\text{nF}}{\text{m}}$$

Frequenz in [Hz]	$X_{\text{quer}}$ berechnet in [jΩ]	$C'$ in [nF/m]
15	-163,28	107,21
30	-486,15	18,01
50	-582,48	9,02
100	-720,42	3,65
200	-468,70	2,80

Tabelle 7-6 Kapazitätsbelag des Rohrleitungsmodells bei unterschiedlichen Frequenzen

Der berechnete Kapazitätsbelag für die Rohrleitung liegt bei 2,8 nF/m. Die Auswertung ergibt für unterschiedliche Frequenzen kapazitive Beläge von 2,8 nF/m bis 107 nF/m. Neben möglichen induktiven / kapazitiven Einkopplungen wäre die Theorie der „Energieverluste im Dielektrikum“ [23] eine weitere Möglichkeit die Ergebnisse zu erklären.

Aus der Theorie [23] ergeben sich folgende Möglichkeiten:

Für reine Leitungsverluste (Parallelschaltung RC) kann der Kapazitätszuwachs wie folgt angenähert werden:

$$C_\omega = C \cdot \left(1 + \frac{1}{\omega^2 \cdot C^2 \cdot R^2}\right) = C \cdot (1 + \tan(\delta)) = C + \Delta C.$$

$$\Delta C \approx \text{const.} \cdot \frac{1}{\sqrt{\omega}}.$$

Die Selbstinduktion eines Kondensators kann ebenfalls die Kapazität scheinbar erhöhen.

$$C_\omega = C \cdot (1 + \omega^2 \cdot C \cdot L)$$

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

- Die Ergebnisse der Theorie (Carson & Pollaczek...) und der AfK3 unterscheiden sich in den Berechnungen nur geringfügig. Durch die Verwendung diverser Konstanten weichen die Ergebnisse der AfK3 geringfügig zu denen der Theorie ab. Bei der Berechnung der induktiven Längselemente sollte hierauf besonders geachtet werden
- Nach der Auswertung der Messung kann gesagt werden, dass sich die Rohrleitung wie ein elektrischer Vollleiter verhält. Dies bestätigt die Verwendung des Vollleitermodells in den verwendeten Normen und Berechnungssystemen.
- Bei der Ermittlung der elektrischen Parameter von Pipelines muss aufgrund der meist kleinen Beträge der Elemente des elektrischen Ersatzschaltbildes, auf Beeinflussungen durch Umgebung geachtet werden. Mögliche Beeinflussungen ergeben sich aus: Rohrleitungsschaltelemente (z.B.: Feuerschieber); Erdungsanlagen für Korrosionsschutz; Erdungsanlagen von in der Nähe befindlichen Gebäuden / elektrischen Anlagen; Andere Rohrleitung Systeme.
- Die Messung der Querelemente sollte möglichst frei von den oben genannten Beeinflussungen erfolgen, da sonst eine korrekte Ermittlung der Ströme/Spannungen, welche über die Querelemente fließen, nicht möglich ist.
- Bei allen Auswertungen muss auch auf Koppelemente (kapazitive, induktive Kopplungen) und Übergangswiderstände achtgegeben werden.
- Es wird empfohlen, nicht nur die Ströme und Spannungen, sondern auch deren Winkel bei den Messungen mitzumessen. Dadurch ist eine bessere Bestimmung der Blindelemente möglich.
- Bei der Auswertung der Messergebnisse hat sich gezeigt, dass die Werte bei der Verwendung von höheren Strömen genauer werden und somit zuverlässigere Messwerte ermittelt werden können.
- Wie die Messungen und Berechnungen gezeigt haben, sind die Querelemente frequenzabhängig.
- Bei den Kapazitäten kommt es möglicherweise zu einer Frequenzabhängigkeit durch dielektrische Verluste oder Selbstinduktion, denn mit steigender Frequenz sinkt der Wert. Eine genaue Beschreibung dieses Verhaltens wurde in dieser Arbeit nicht mehr durchgeführt und wäre für zukünftige Arbeiten interessant.
- Zur Bestätigung der Messkonzepte bzw. Ergebnisse wären weitere Messungen, sowie eventuell Versuche mit definierten Beeinflussungen an Rohrleitungen interessant. Ein weiterer Punkt hierbei wäre die Berechnung mit finiten Elementen.

- Neben dem stationären Fall sollten auch transiente und subtransiente Vorgänge bei Beeinflussungen näher beleuchtet werden.
- Ebenfalls wären ein Ausbau des Labormodells und damit der Einsatz unterschiedlichen Umhüllungsmaterials förderlich.



## 9 Literatur

- [1] Energiestatus Österreich 2014; Entwicklung 2012; Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft.
- [2] Schmutzner, E.: Ein Beitrag zur Berechnung der induktiven Beeinflussung von Rohrleitungsnetzen. Dissertation, TU-Graz, 1990.
- [3] AfK-Empfehlung Nr.3; Wechselstrom-Bahnanlagen, (2007-11-01): Maßnahmen beim Bau und Betrieb von Rohrleitungen im Einflussbereich von Hochspannungs-Drehstromanlagen und.
- [4] 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).
- [5] ÖVE/ÖNORM EN 50443, (2012-10-01): Auswirkungen elektromagnetischer Beeinflussungen von Hochspannungswechselstrombahnen und/oder Hochspannungsanlagen auf Rohrleitungen.
- [6] Fickert, L.: Vorlesungsskript zur Vorlesung Elektrische Energiesysteme 1 an der TU Graz, 2008.
- [7] Andersson, G.: Elektrische Energiesysteme Vorlesungsteil Energieübertragung. EEH - Power Systems Laboratory. ETH Zürich, 2008.
- [8] ÖVE/ÖNORM EN 15280, (2013-10-01): "Beurteilung der Korrosionswahrscheinlichkeit durch Wechselspannung an erdverlegten Rohrleitungen, anwendbar für kathodisch geschützte Rohrleitungen".
- [9] Hoffmann, H.: Das elektomagentische Feld - Theorie und grundlegende Anwendung. 3., überarbeitete Auflage, Wien, New York: Springer(1986) .
- [10] Schmutzner, E.: Erdung und Schutzmaßnahmen in Elektrischen Anlagen, Institut für Elektrische Anlagen. TU-Graz, 1997/98.
- [11] Muffat, M.: Der spezifische Erdwiderstand im jahreszeitlichen Verlauf, Bachelorarbeit, Institut für Elektrische Anlagen TU Graz, 2013..
- [12] Gabbauer, A.: Ein Beitrag zur rechnerischen Bestimmung von Erdungsimpedanzen, Erdungsströmen und Erdungsspannungen von elektrischen Anlagen in Netzen mit niederohmiger Sternpunktserdung, Diplomarbeit, Institut für Elektrische Anlagen, TU Graz, 2001..

- [13] Frei, J.: Messung der Impedanz ausgedehnter Erdersysteme sowie deren Berechnung mit Hilfe approximativer analytischer und numerischer Verfahren, Diplomarbeit, Institut für Elektrische Anlagen TU Graz, 2001..
- [14] Chauvin Arnoux: C.A. 6472 Bedienanleitung .
- [15] Carson, J.: Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return. Bell System Technical Journal 5, 1926.
- [16] Pollaczek, F.: Über das Feld einer unendlich langen wechselstromdurchflossenen Einfachleitung. Elektrische Nachrichtentechnik, Heft 9, Band 3, 1926.
- [17] Pollaczek, F.: Über die Induktionswirkung einer Wechselstrom-einfachleitung. Elektrische Nachrichtentechnik, Heft 4, 1927.
- [18] Michilow, M; Rasumov, Z.D.: Elektrische Parameter von metallischen Rohrleitungen im Erdboden. Electricetwo, Bd. 82, Heft 5, 1963.
- [19] Raunig,R.;Schmautzer E.: Die Bestimmung induzierter Spannungen und Ströme verursacht durch parallel geführte Leitungssysteme,13. Symposium Energieinnovation, Graz, 2014.
- [20] Muckenhuber, R.: Die induktive Beeinflussung von metallischen Rohrleitungen im Erdboden, ÖZE, JG. 21, Heft 6, 1968.
- [21] Malicky, H.:Vegetationsprobleme des Wiener Neustädter Steinfeldes, Biologische Station Lunz der Akademie der Wissenschaften.
- [22] Kurniawan, A.: " BASIC IP2 WIN TUTORIAL",  
<https://alvathea.files.wordpress.com/2009/06/basic-ip2-win-tutorial.pdf>.
- [23] Banneitz,F.:Taschenbuch der drahtlosen Telegraphie und Telephonie,Springer-Verlag Berlin, Stand 1927.

## 10 Abbildung und Tabellenverzeichnis

Abbildung 3-1 Magnetisches und elektrisches Feld einer unter Spannung stehenden Freileitung mit stark vereinfachten Ersatzschaltbild (keine Kopplungen zw. den Leitern)	15
Abbildung 3-2 Unendlich langer Leiter - Querschnitt	16
Abbildung 3-3 Integration der elektrischen Feldstärke	18
Abbildung 3-4 Geometrie Faktor $d_m$	19
Abbildung 3-5 Kapazitätsverhältnisse bei mehreren Phasen und Erde	19
Abbildung 3-6: Vereinfachtes elektrisches Ersatzschaltbild der induktiv beeinflussten Rohrleitung, Beeinflussungsmodell [2]	21

Abbildung 3-7: Rohrleitungsersatzschaltbild, Unterteilung eines Rohrleitungsabschnitts in unbeeinflusste Abschnitte und einen durch Hochspannungsanlagen induktiv beeinflussten Abschnitt [2], geändert-	22
Abbildung 3-8 Elektrisches Strömungsfeld eines Halbkugelerders	23
Abbildung 3-9 Spannungstrichter eines Halbkugelerders	25
Abbildung 4-1 Definition des spezifischen Erdwiderstandes anhand des Einheitswürfel [10]	26
Abbildung 4-2 Typischer Bodenaufbau (Quelle: Angelo Huber, Land Oberösterreich)	27
Abbildung 4-3 Kennwerte des spezifischen Erdwiderstandes [12], geändert	28
Abbildung 4-4 4-Sonden Methode – Elektrisches Strömungsfeld im Erdreich [9].	29
Abbildung 4-5 Geometriefaktors 4 Sonden Methode	30
Abbildung 4-6 Wenner Verfahren, geändert [13]	31
Abbildung 4-7 Messaufbau Wenner C.A. 6472, geändert [14]	31
Abbildung 4-8 Messaufbau Schlumberger C.A. 6472 [14], geändert	32
Abbildung 4-9 Messaufbau Erdungsmessung 3-Punktverfahren C.A. 6472 [14], geändert	32
Abbildung 4-10 Ersatzschaltbild Rohrleitung	33
Abbildung 4-11 Elektrisches Ersatzschaltbild einer Rohrleitung, geändert [2]	34
Abbildung 4-12 Längs- und Querelemente zu einem Ersatzschaltbild zusammengefasst, geändert [2]	34
Abbildung 4-13 Querschnitte für die Berechnung	35
Abbildung 4-14 Labormodell	37
Abbildung 4-15 Hohlleitermodell	40
Abbildung 4-16 Kettenleiter für Abschnitt der Pipeline [2], geändert	42
Abbildung 4-17 Hohlleitermodell	45
Abbildung 5-1 Rampenverfahren Omicron CPC	47
Abbildung 5-2 Messaufbau Labor	48
Abbildung 5-3 Übersicht Kanäle Omicron CPC 100 und Dewetron	48
Abbildung 5-4 Messung Rohrleitung ohne Erdung	49
Abbildung 5-5 Einspeisung über Omicron CPC 100 an den Enden der Rohrleitung	49
Abbildung 5-6 Fluke i3000s Flex Rogowskyspule und und Fluke i5s Stromzange	50
Abbildung 5-7 Parametrierung Stromkanal	51
Abbildung 5-8 Mathemodul Dewesoft	52
Abbildung 5-9 Leistungsmodul Dewesoft	52
Abbildung 5-10 Widerstands Dreieck	53
Abbildung 5-11 Übersicht Messüberwachung in Dewesoft 7.1	54
Abbildung 5-12 Einfaches Ersatzschaltbild Messung Labor	55
Abbildung 5-13 Ergebnisse Labormodell 15 Hz bis 60 A	58
Abbildung 5-14 Ergebnisse Labormodell 15 Hz bis 100 A Messung 2	58
Abbildung 5-15 Ergebnisse Labormodell 50 Hz bis 60 A	59
Abbildung 5-16 Ergebnisse Labormodell 50 Hz bis 100 A Messung 2	59
Abbildung 5-17 Ergebnisse Labormodell 0 Hz bis 100 A Messung	60
Abbildung 5-18 Grafische Darstellung der Messwerte des Messmodells mit konstantem Strom und variabler Frequenz	61

Abbildung 6-1 Messstation / Verlegung des Begleitkabels	62
Abbildung 6-2 Geografische Übersicht über die Messtrasse	63
Abbildung 6-3 Ergebnisse der Erdwiderstandsmessung	66
Abbildung 6-4 Messtrasse 1 Auswertung mit IP2Win	66
Abbildung 6-5 IP2Win "Messdaten unbearbeitet"	67
Abbildung 6-6 IP2 WIN Einzel Auswertung für Messtrasse 4	68
Abbildung 6-7 IP2 WIN Einzel Auswertung für Messtrasse 5	68
Abbildung 6-8 IP2WIN Auswertung für die Messtrassen 4 und 5	69
Abbildung 6-9 Künstliche Erder Übersicht	70
Abbildung 6-10 Erdungsmessung bei Erdungsanlage 1	70
Abbildung 6-11 Messschaltung mit Messwiderständen	71
Abbildung 6-12 Bestimmung von R Begleitkabel	71
Abbildung 6-13 Übergangswiderstand Feuerschieber (FS)	71
Abbildung 6-14 Messaufbau Rohrleitung mit Rückleiter	72
Abbildung 6-15 Messmarker	73
Abbildung 6-16 Ersatzschaltung Messaufbau Längselemente	74
Abbildung 6-17 Messaufbau Rohrleitung mit 2 Messerdern	75
Abbildung 6-18 Ersatzschaltung Messaufbau Querelemente Variante 1	76
Abbildung 6-19 Messaufbau Variante 2 mit 1 Erdungsanlage und einer Spannungsmessung am FS	77
Abbildung 6-20 Ersatzschaltung Messaufbau Querelemente Variante 2	79
Abbildung 6-21 Verlauf der gemessenen Impedanz bei unterschiedlichen Frequenzen und Strömen	80
Abbildung 6-22 Winkerverlauf bei unterschiedlichen Frequenzen und Strömen	80
Abbildung 7-1 Ergebnisse Wirkanteil der Längsimpedanz	83
Abbildung 7-2 Ergebnisse Blindanteil der Längsimpedanz	83
Abbildung 7-3 Vereinfachtes Ersatzschaltbild	84
Abbildung 7-4 Umhüllungswiderstand $r_u$ - Frequenzabhängigkeit	86
Tabelle 4-1 Ergebnisse der elektrischen Parameter des Labormodells für AfK3 und Theorie [20] bei 50 Hz .....	41
Tabelle 4-2 Ergebnisse der elektrischen Parameter der Stickleitung für AfK3 und Theorie [20] bei 50 Hz .....	46
Tabelle 5-1 Messergebnisse Messung 1 15 Hz.....	56
Tabelle 5-2 Messergebnisse Labormodell Messung 1 50 Hz .....	56
Tabelle 5-3 Messergebnisse Labormessung mit 0 Hz.....	56
Tabelle 5-4 Ergebnisse der 2 Versuchsmessung 15 und 50 Hz .....	57
Tabelle 5-5 Impedanz Messung mit variabler Frequenz.....	61
Tabelle 6-1 Kanaleinstellungen Dewetron Messgerät .....	64
Tabelle 6-2 Gemessene spezifische Erdwiderstände.....	65
Tabelle 6-3 IP2Win Auswertung Messtrasse 1 .....	67

Tabelle 6-4 Künstliche Erdungsstationen und „erdfühiger“ Feuerschieber.....	70
Tabelle 6-5 Messergebnisse hinsichtlich Längsimpedanz bei 1 A mit variabler Frequenz....	74
Tabelle 6-6 Messergebnisse hinsichtlich Längsimpedanz bei max. möglichen Strom und variabler Frequenz.....	74
Tabelle 6-7 Messergebnisse Querzweig bei 1A und variabler Frequenz.....	76
Tabelle 6-8 Vergleich der Messergebnisse der Variante 1 zur Variante 2 mit max 1 A und variabler Frequenz.....	78
Tabelle 6-9 Messergebnisse 2 zu Variante 2 mit 1A und variabler Frequenz.....	78
Tabelle 7-1 Ergebnisse für R.....	82
Tabelle 7-2 Ergebnisse für L.....	82
Tabelle 7-3 Gemessene Impedanz Querelemente.....	85
Tabelle 7-4 Berechnete Querelemente.....	85
Tabelle 7-5 Umhüllungswiderstand $r_u$ bei unterschiedlichen Frequenzen.....	85
Tabelle 7-6 Kapazitätsbelag des Rohrleitungsmodells bei unterschiedlichen Frequenzen ...	86

# 11 Anhang

## 11.1 Messergebnisse Labor

Im folgenden Abschnitt befinden sich die weiteren Messergebnisse (30 Hz, 100 Hz, 200 Hz, 400 Hz) des Labormodells in tabellarischer und grafischer Form.

### Frequenz 30Hz

Strom in [A]	$U_{\text{mess}}$ in [mV]	Z in [ $m\Omega$ ]	Winkel in [°]
10,00	9,55	0,96	42,71
20,00	20,36	1,02	42,65
30,00	32,44	1,08	42,36
40,00	46,26	1,16	41,73
50,00	62,22	1,25	40,67
60,00	80,50	1,34	39,25

### Frequenz 100Hz

Strom in [A]	$U_{\text{mess}}$ in [mV]	Z in [ $m\Omega$ ]	Winkel in [°]
10,00	19,89	2,00	49,29
20,00	41,37	2,08	48,15
30,00	64,43	2,15	47,00
40,00	89,31	2,24	45,89
50,00	115,50	2,31	44,78
60,00	144,00	2,40	43,40

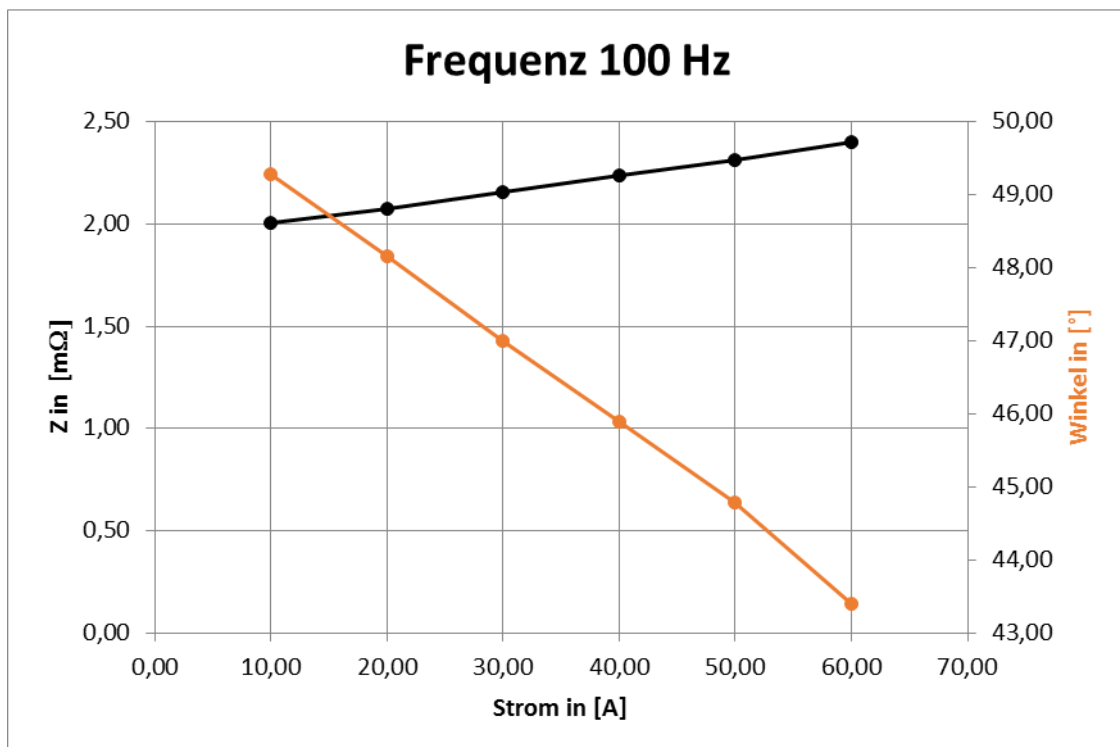
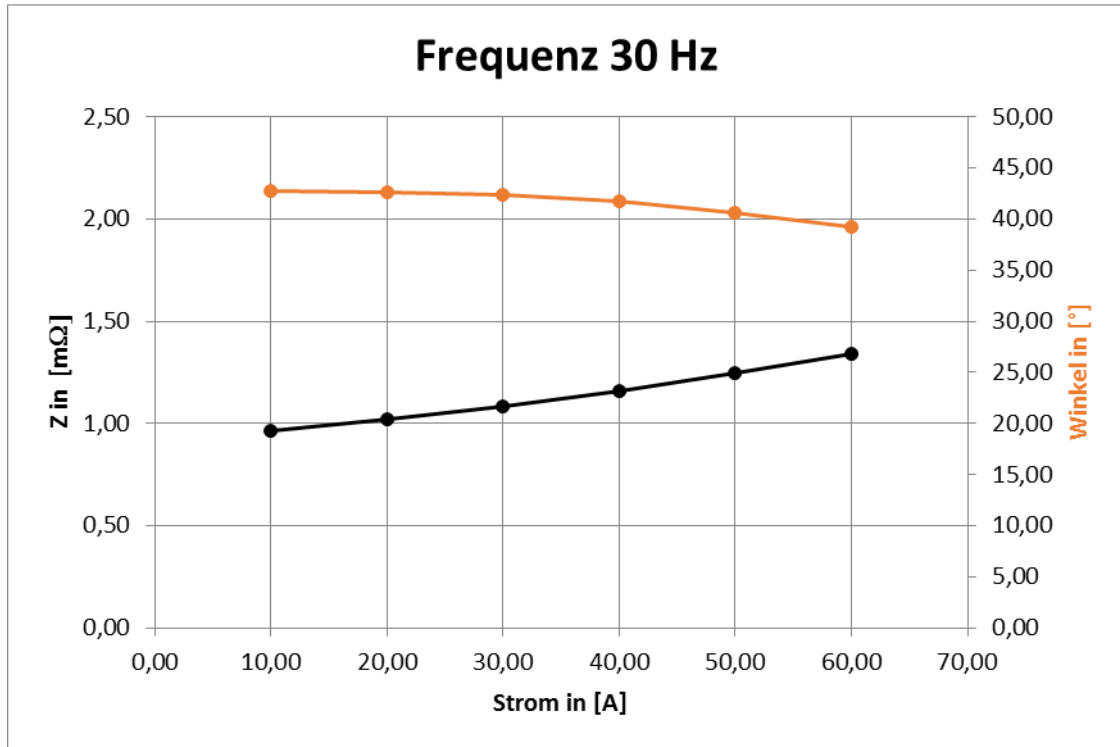
### Frequenz 200Hz

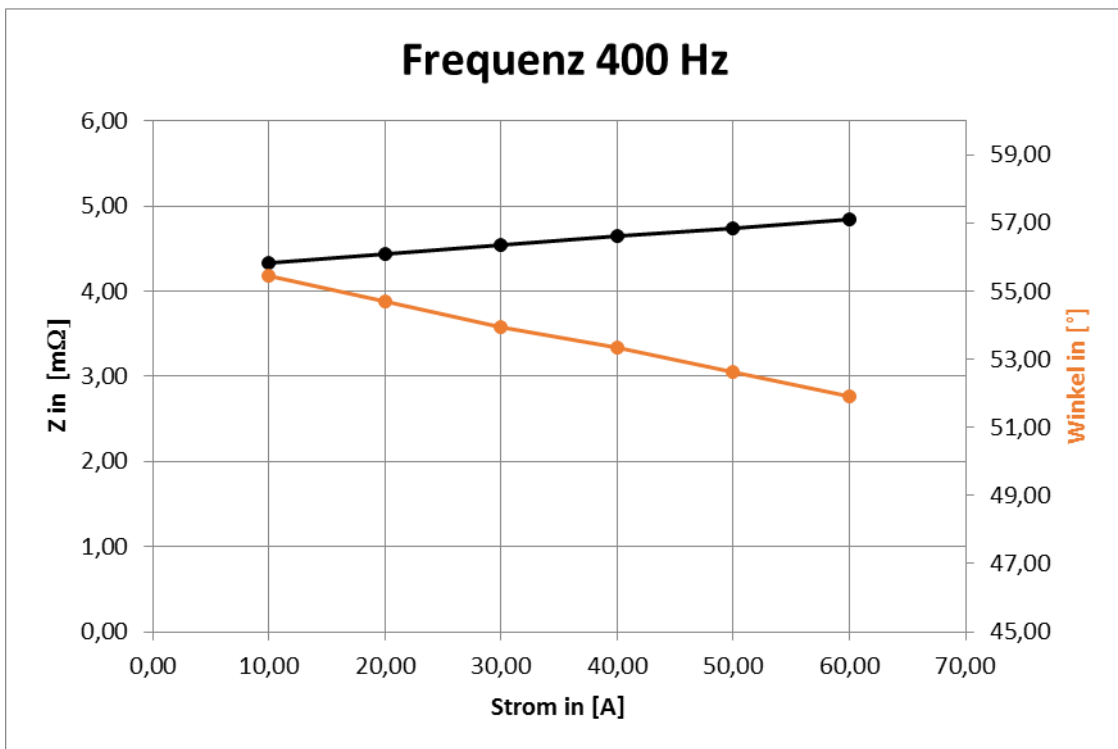
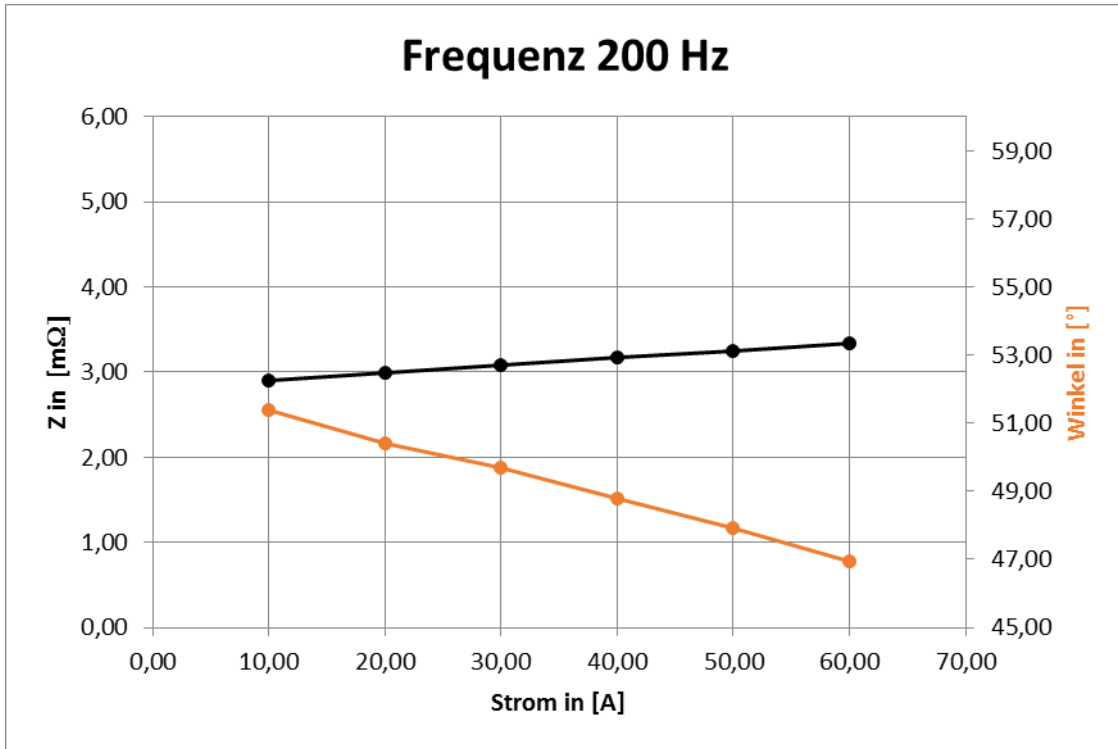
Strom in [A]	$U_{\text{mess}}$ in [mV]	Z in [ $m\Omega$ ]	Winkel in [°]
10,00	28,81	2,90	51,39
20,00	59,70	3,00	50,39
30,00	92,10	3,08	49,68
40,00	126,40	3,17	48,79
50,00	162,20	3,25	47,92
60,00	200,00	3,34	46,93

### Frequenz 400Hz

Strom in [A]	$U_{\text{mess}}$ in [mV]	Z in [ $m\Omega$ ]	Winkel in [°]
10,00	43,07	4,33	55,45
20,00	88,54	4,44	54,71
30,00	136,00	4,54	53,96
40,00	185,50	4,64	53,35
50,00	236,50	4,74	52,64
60,00	290,00	4,84	51,90

### 11.1.1 Grafische Darstellung der Messergebnisse







## 11.2 Messergebnisse Stichelung

### 11.2.1 Ergebnisse - Messung der Längselemente

Im folgenden Abschnitt befinden sich die weiteren Messergebnisse der Messung 1-Längselemente (15 Hz, 30 Hz, 50 Hz, 100 Hz, 200 Hz, 400 Hz) der gemessenen Stichelung.

Messung mittels CPC+CU1 auf Stufe CU10A				Frequenz	15 Hz
Eingestellter Strom I in [A]	Eingespeister Strom CT in [mA]	Spannung am Messobjekt VT in [V]	Spannung RL gegen Ferne Erde in [V]	gem. Impedanz Z in [ $\Omega$ ]	gem. Winkel in[ °]
0,10	72,00	0,49	0,30	6,80	2,77
0,20	150,00	1,05	0,27	7,00	2,72
0,30	235,00	1,50	0,25	6,50	3,35
0,40	324,00	1,95	0,20	5,96	4,09
0,50	416,00	2,30	0,25	5,50	4,50
1,00	903,00	3,80	0,40	4,20	6,30
5,00	4800,00	12,00	2,00	2,50	10,00
10,00	9600,00	20,00	4,10	2,09	12,30
15,00	14100,00	27,80	6,28	1,97	13,00
20,00	17300,00	33,00	8,00	1,95	13,00

Messung mittels CPC+CU1 auf Stufe CU10A				Frequenz	30 Hz
Eingestellter Strom I in [A]	Eingespeister Strom CT in [mA]	Spannung am Messobjekt VT in [V]	Spannung RL gegen Ferne Erde in [V]	gem. Impedanz Z in [ $\Omega$ ]	gem. Winkel in[ °]
0,10	92,00	0,56	0,13	6,18	6,20
0,20	181,00	1,13	1,20	6,22	6,60
0,30	273,00	1,61	0,20	5,92	7,17
0,40	366,00	2,06	0,25	5,61	7,85
0,50	460,00	2,45	0,32	5,33	8,40
1,00	939,00	3,94	0,50	4,20	11,00
5,00	4800,00	12,80	2,82	2,60	17,00
10,00	9770,00	22,77	5,80	2,34	20,50
15,00	14690,00	31,60	8,90	2,15	22,00
20,00	19500,00	41,26	12,00	2,10	22,80

Messung mittels CPC+CU1 auf Stufe CU10A				Frequenz	50 Hz
Eingestellter Strom I in [A]	Eingespeister Strom CT in [mA]	Spannung am Messobjekt VT in [V]	Spannung RL gegen Ferne Erde in [V]	gem. Impedanz Z in [ $\Omega$ ]	gem. Winkel in[ °]
0,10	96,00	0,65	0,06	7,88	10,70
0,20	190,00	1,46	0,23	7,83	9,19
0,30	281,00	2,08	0,38	7,45	9,90
0,40	376,00	2,64	0,50	7,00	10,60
0,50	471,00	3,08	0,60	6,54	11,26
1,00	950,00	4,83	0,90	5,10	14,70
5,00	4800,00	13,60	3,50	2,82	26,00
10,00	9770,00	24,32	7,40	2,49	30,20
15,00	14740,00	35,70	11,54	2,41	31,30
20,00	19680,00	47,20	15,77	2,39	31,90

Messung mittels CPC+CU1 auf Stufe CU10A				Frequenz	100 Hz
Eingestellter Strom I in [A]	Eingespeister Strom CT in [mA]	Spannung am Messobjekt VT in [V]	Spannung RL gegen Ferne Erde in [V]	gem. Impedanz Z in [ $\Omega$ ]	gem. Winkel in[ $^{\circ}$ ]
0,10	100,00	0,56	0,12	5,60	22,00
0,20	196,00	1,11	0,22	5,66	23,00
0,30	292,00	1,63	0,30	5,60	23,50
0,40	388,00	2,12	0,43	5,47	24,20
0,50	485,00	2,61	0,50	5,39	24,70
1,00	960,00	4,79	1,02	4,97	27,00
5,00	4870,00	17,00	5,06	3,48	41,22
10,00	9800,00	32,47	10,36	3,29	44,90
15,00	14700,00	47,60	15,80	3,20	46,60
20,00	19740,00	63,17	21,60	3,20	47,20

Messung mittels CPC+CU1 auf Stufe CU10A				Frequenz	200 Hz
Eingestellter Strom I in [A]	Eingespeister Strom CT in [mA]	Spannung am Messobjekt VT in [V]	Spannung RL gegen Ferne Erde in [V]	gem. Impedanz Z in [ $\Omega$ ]	gem. Winkel in[ $^{\circ}$ ]
0,10	107,00	0,67	0,20	6,20	40,70
0,20	210,00	1,33	0,35	6,37	41,20
0,30	310,00	1,96	0,48	6,34	41,90
0,40	411,00	2,58	0,62	6,25	42,90
0,50	514,00	3,16	0,80	6,15	44,00
1,00	970,00	5,65	1,43	5,80	47,80
5,00	4880,00	25,39	7,21	5,19	57,40
10,00	9800,00	49,25	14,76	5,01	60,80
14,00	14090,00	71,30	21,50	5,06	61,50
20,00	x	x	x	x	x

Messung mittels CPC+CU1 auf Stufe CU10A				Frequenz	400 Hz
Eingestellter Strom I in [A]	Eingespeister Strom CT in [mA]	Spannung am Messobjekt VT in [V]	Spannung RL gegen Ferne Erde in [V]	gem. Impedanz Z in [ $\Omega$ ]	gem. Winkel in[ $^{\circ}$ ]
0,10	135,00	1,27	0,33	9,50	56,26
0,20	264,00	2,55	0,63	9,70	57,00
0,30	393,00	3,80	0,90	9,60	57,80
0,40	522,80	5,05	1,18	9,60	59,00
0,50	648,00	6,16	1,45	9,52	60,40
1,00	970,00	9,06	2,16	9,32	62,80
5,00	4880,00	43,65	10,84	9,93	69,70

## 11.2.2 Ergebnisse – Messung Querelemente Variante 1

Im folgenden Abschnitt befinden sich die weiteren Messergebnisse der Messung 2-Querelemente Variante 1 (15 Hz, 30 Hz, 50 Hz, 100 Hz, 200 Hz, 400 Hz) der gemessenen Stichleitung.

Messung 1 Tag 1 Querbelag mit Erdungsanlage 1 und 2				
Messung mittels CPC+CU1 auf Stufe CU10A			Frequenz	15 Hz
Eingestellter Strom $I$ in [A]	Eingespeister Strom CT in [mA]	Spannung am Messobjekt VT in [V]	gem. Impedanz $Z$ in [ $\Omega$ ]	gem. Winkel in [ $^\circ$ ]
0,10	59,00	32,00	460,00	-1,00
0,20	164,00	76,00	460,00	-1,00
0,30	242,00	110,00	454,00	-1,00
0,40	303,00	137,00	451,00	-0,80
0,50	350,00	154,00	454,00	-0,78
0,60	386,00	172,00	444,00	-0,70
0,70	417,00	185,00	443,00	-0,68
0,80	443,00	196,00	441,00	-0,60
0,90	467,00	206,00	440,00	-0,55
1,00	488,00	214,00	439,00	-0,55
1,50	572,00	250,00	436,00	-0,48
2,00	630,00	273,00	433,00	-0,30

Messung mittels CPC+CU1 auf Stufe CU10A			Frequenz	30 Hz
Eingestellter Strom $I$ in [A]	Eingespeister Strom CT in [mA]	Spannung am Messobjekt VT in [V]	gem. Impedanz $Z$ in [ $\Omega$ ]	gem. Winkel in [ $^\circ$ ]
0,10	86,00	38,00	446,00	-2,30
0,20	176,00	79,00	449,00	-2,20
0,30	270,00	120,00	445,00	-2,00
0,40	361,00	160,00	443,00	-1,90
0,50	451,00	199,00	440,00	-1,90
0,60	536,00	235,00	439,00	-1,85
0,70	612,00	268,00	437,00	-1,77
0,80	687,00	296,00	436,00	-1,77
0,90	735,00	320,00	435,00	-1,73
1,00	782,00	339,00	434,00	-1,72
1,50	936,00	402,00	429,00	-1,67
2,00	962,00	412,00	429,00	-1,64

Messung mittels CPC+CU1 auf Stufe CU10A			Frequenz	50 Hz
Eingestellter Strom I in [A]	Eingespeister Strom CT in [mA]	Spannung am Messobjekt VT in [V]	gem. Impedanz Z in [ $\Omega$ ]	gem. Winkel in [ $^\circ$ ]
0,10	93,00	41,00	445,00	-3,60
0,20	184,00	82,00	447,00	-3,30
0,30	276,00	123,00	444,00	-3,15
0,40	371,00	164,00	441,00	-3,07
0,50	466,00	204,00	439,00	-2,99
0,60	560,00	245,00	436,00	-2,90
0,70	655,00	285,00	435,00	-2,90
0,80	749,00	325,00	434,00	-2,85
0,90	841,00	364,00	433,00	-2,81
1,00	931,00	402,00	432,00	-2,77
1,50	1260,00	538,00	428,00	-2,64
2,00	1320,00	567,00	428,00	-2,60

Messung mittels CPC+CU1 auf Stufe CU10A			Frequenz	100 Hz
Eingestellter Strom I in [A]	Eingespeister Strom CT in [mA]	Spannung am Messobjekt VT in [V]	gem. Impedanz Z in [ $\Omega$ ]	gem. Winkel in [ $^\circ$ ]
0,10	100,00	44,00	441,00	-6,40
0,20	194,00	86,00	443,00	-5,95
0,30	288,00	126,00	439,00	-5,60
0,40	383,00	166,00	434,00	-5,42
0,50	478,00	207,00	433,00	-5,30
0,60	574,00	248,00	433,00	-5,28
0,70	670,00	289,00	431,00	-5,23
0,80	766,00	330,00	430,00	-5,16
0,90	862,00	370,00	429,00	-5,10
1,00	960,00	411,00	428,00	-5,05
1,50	1,44	609,00	424,00	-4,89
2,00	x	x	x	x

Messung mittels CPC+CU1 auf Stufe CU10A			Frequenz	200 Hz
Eingestellter Strom I in [A]	Eingespeister Strom CT in [mA]	Spannung am Messobjekt VT in [V]	gem. Impedanz Z in [ $\Omega$ ]	gem. Winkel in [ $^{\circ}$ ]
0,10	103,00	44,00	432,00	-12,20
0,20	200,00	86,00	431,00	-10,80
0,30	298,00	126,00	422,00	-10,10
0,40	394,00	166,00	423,00	-9,82
0,50	490,00	206,00	420,00	-9,60
0,60	586,00	246,00	420,00	-9,50
0,70	684,00	286,00	419,00	-9,34
0,80	780,00	326,00	418,00	-9,20
0,90	877,00	366,00	417,00	-9,12
1,00	898,00	406,00	417,00	-9,00
1,50	1200,00	500,00	415,00	-8,86
2,00	x	x	x	x

Messung mittels CPC+CU1 auf Stufe CU10A			Frequenz	400 Hz
Eingestellter Strom I in [A]	Eingespeister Strom CT in [mA]	Spannung am Messobjekt VT in [V]	gem. Impedanz Z in [ $\Omega$ ]	gem. Winkel in [ $^{\circ}$ ]
0,10	97,00	36,50	379,00	-19,30
0,20	204,00	79,00	386,00	-17,40
0,30	304,00	116,00	383,00	-16,20
0,40	402,00	154,00	383,00	-15,75
0,50	500,00	191,00	382,00	-15,40
0,60	598,00	228,00	382,00	-15,25
0,70	696,00	265,00	382,00	-15,05
0,80	792,00	303,00	382,00	-14,95
0,90	846,00	323,00	382,00	-14,85
1,00	875,00	334,00	382,00	-14,80
1,50	935,00	385,00	383,00	-14,70
2,00	x	x	x	x

### 11.2.3 Ergebnisse – Messung Querelemente Variante 2

Im folgenden Abschnitt befinden sich die weiteren Messergebnisse der Messung 2-Querelemente Variante 2 (15 Hz, 30 Hz, 50 Hz, 100 Hz, 200 Hz, 400 Hz) der gemessenen Stichleitung.

Messung 1 Querbelag mit Einspeisung RL-Erdungsanlage 1 und Rückführung über Feuerschieber						
Messung mittels CPC+CU1 auf Stufe CU10A					Frequenz	15 Hz
Eingestellter Strom $I$ in [A]	Eingespeister Strom CT in [mA]	Spannung am Messobjekt VT in [V]	$U_{\text{Rohr-FE}}$ in [V]	$U_{\text{Kabel-Einspeisung}}$ in [V]	gem. Impedanz $Z$ in [ $\Omega$ ]	gem. Winkel in [ $^\circ$ ]
0,10	48,00	41,00	37,00	0,14	850,00	-4,70
0,20	135,00	115,00	73,00	0,15	843,00	-3,00
0,30	182,00	147,00	93,00	0,17	807,00	-2,45
0,40	214,00	170,00	109,00	0,20	795,00	-2,20
0,50	240,00	188,00	120,00	0,20	782,00	-2,00
0,60	262,00	203,00	127,00	0,23	775,00	-1,90
0,70	281,00	216,00	127,00	0,26	766,00	-1,89
0,80	297,00	228,00	142,00	0,30	766,00	-1,70
0,90	314,00	238,00	148,00	0,30	757,00	-1,70
1,00	328,00	247,00	150,00	0,30	750,00	-1,60
1,50	x	x	x	x	x	x
2,00	x	x	x	x	x	x

Messung mittels CPC+CU1 auf Stufe CU10A					Frequenz	30 Hz
Eingestellter Strom $I$ in [A]	Eingespeister Strom CT in [mA]	Spannung am Messobjekt VT in [V]	$U_{\text{Rohr-FE}}$ in [V]	$U_{\text{Kabel-Einspeisung}}$ in [V]	gem. Impedanz $Z$ in [ $\Omega$ ]	gem. Winkel in [ $^\circ$ ]
0,10	75,00	59,00	39,00	0,14	771,00	-6,00
0,20	163,00	130,00	84,00	0,18	780,00	-5,70
0,30	252,00	194,00	124,00	0,22	770,00	-5,20
0,40	325,00	248,00	157,00	0,26	763,00	-5,00
0,50	384,00	290,00	183,00	0,30	756,00	-4,90
0,60	432,00	323,00	202,00	0,36	748,00	-4,80
0,70	472,00	350,00	218,00	0,42	740,00	-4,77
0,80	508,00	372,00	231,00	0,50	731,00	-4,60
0,90	539,00	390,00	240,00	0,60	722,00	-4,50
1,00	563,00	402,00	247,00	0,66	713,00	-4,46
1,50	x	x	x	x	x	x
2,00	x	x	x	x	x	x

Messung mittels CPC+CU1 auf Stufe CU10A					Frequenz	50 Hz
Eingestellter Strom $I$ in [A]	Eingespeister Strom CT in [mA]	Spannung am Messobjekt VT in [V]	$U_{\text{Rohr-FE}}$ in [V]	$U_{\text{Kabel-Einspeisung}}$ in [V]	gem. Impedanz $Z$ in [ $\Omega$ ]	gem. Winkel in [ $^\circ$ ]
0,10	87,00	63,00	41,00	0,15	731,00	-8,80
0,20	176,00	132,00	84,00	0,20	746,00	-8,50
0,30	268,00	199,00	125,00	0,29	744,00	-8,15
0,40	358,00	265,00	166,00	0,33	740,00	-7,80
0,50	450,00	330,00	206,00	0,42	735,00	-7,60
0,60	536,00	391,00	242,00	0,50	730,00	-7,50
0,70	614,00	445,00	274,00	0,59	724,00	-7,30
0,80	683,00	490,00	300,00	0,66	717,00	-7,20
0,90	737,00	522,00	318,00	0,80	706,00	-7,07
1,00	775,00	541,00	329,00	0,92	697,00	-7,00
1,50	x	x	x	x	x	x
2,00	x	x	x	x	x	x

Messung mittels CPC+CU1 auf Stufe CU10A					Frequenz	100 Hz
Eingestellter Strom I in [A]	Eingespeister Strom CT in [mA]	Spannung am Messobjekt VT in [V]	$U_{\text{Rohr-FE}}$ in [V]	$U_{\text{Kabel-Einspeisung}}$ in [V]	gem. Impedanz Z in [ $\Omega$ ]	gem. Winkel in [ $^\circ$ ]
0,10	96,00	65,00	41,00	0,19	677,00	-15,00
0,20	189,00	132,00	82,00	0,30	697,00	-14,00
0,30	282,00	196,00	122,00	0,42	695,00	-14,50
0,40	376,00	261,00	161,00	0,55	694,00	-14,00
0,50	470,00	325,00	200,00	0,70	692,00	-13,95
0,60	565,00	389,00	238,00	0,80	689,00	-13,00
0,70	659,00	452,00	275,00	0,94	686,00	-13,00
0,80	754,00	514,00	312,00	1,10	681,00	-13,00
0,90	836,00	572,00	345,00	1,26	673,00	-13,00
1,00	924,00	617,00	371,00	1,41	668,00	-12,70
1,50	x	x	x	x	x	x
2,00	x	x	x	x	x	x

Messung mittels CPC+CU1 auf Stufe CU10A					Frequenz	200 Hz
Eingestellter Strom I in [A]	Eingespeister Strom CT in [mA]	Spannung am Messobjekt VT in [V]	$U_{\text{Rohr-FE}}$ in [V]	$U_{\text{Kabel-Einspeisung}}$ in [V]	gem. Impedanz Z in [ $\Omega$ ]	gem. Winkel in [ $^\circ$ ]
0,10	98,00	56,00	34,00	0,24	574,00	-24,00
0,20	200,00	120,00	72,00	0,44	592,00	-23,00
0,30	298,00	177,00	106,00	0,64	596,00	-22,00
0,40	394,00	235,00	140,00	0,83	598,00	-22,00
0,50	490,00	293,00	174,00	1,03	598,00	-22,00
0,60	586,00	350,00	207,00	1,24	598,00	-22,00
0,70	680,00	407,00	240,00	1,44	597,00	-21,70
0,80	777,00	461,00	240,00	1,68	593,00	-21,55
0,90	838,00	495,00	291,00	1,85	590,00	-21,33
1,00	868,00	513,00	300,00	1,93	590,00	-21,00
1,50	x	x	x	x	x	x
2,00	x	x	x	x	x	x

Messung mittels CPC+CU1 auf Stufe CU10A					Frequenz	400 Hz
Eingestellter Strom I in [A]	Eingespeister Strom CT in [mA]	Spannung am Messobjekt VT in [V]	$U_{\text{Rohr-FE}}$ in [V]	$U_{\text{Kabel-Einspeisung}}$ in [V]	gem. Impedanz Z in [ $\Omega$ ]	gem. Winkel in [ $^\circ$ ]
0,10	91,00	38,00	20,50	0,29	426,00	-28,00
0,20	206,00	92,00	48,50	0,60	445,00	-27,50
0,30	305,00	138,00	72,00	0,90	451,00	-27,00
0,40	404,00	183,00	96,00	1,20	454,00	-27,12
0,50	502,00	229,00	119,00	1,45	456,00	-26,00
0,60	600,00	274,00	143,00	1,75	457,00	-26,80
0,70	684,00	313,00	163,00	2,05	458,00	-26,77
0,80	716,00	328,00	171,26	2,20	458,00	-26,70
0,90	744,00	341,00	177,80	2,30	458,00	-26,00
1,00	768,00	352,00	183,80	2,40	458,00	-26,70
1,50	x	x	x	x	x	x
2,00	x	x	x	x	x	x

### 11.2.4 Ergebnisse –Querelemente Variante 2 nach Korrektur

Im folgenden Abschnitt befinden sich die weiteren Messergebnisse der Messung 2-Querelemente Variante 2 korrigierte Impedanz (15 Hz, 30 Hz, 50 Hz, 100 Hz, 200 Hz, 400 Hz) der gemessenen Sticheleitung.

Messung 1 Querbelag mit Einspeisung RL-Erdungsanlage 1 und Rückführung über Feuerschieber						
Messung mittels CPC+CU1 auf Stufe CU10A					Frequenz	15 Hz
Eingestellter Strom I in [A]	Eingespeister Strom CT in [mA]	Spannung am Messobjekt VT in [V]	$U_{\text{Rohr-FE}}$ in [V]	$U_{\text{Kabel-Einspeisung}}$ in [V]	korr. Impedanz Z in [ $\Omega$ ]	gem. Winkel in[ °]
0,10	48	41	37	0,14	770,83	-4,70
0,20	135	115	73	0,15	540,74	-3,00
0,30	182	147	93	0,17	510,99	-2,45
0,40	214	170	109	0,20	509,35	-2,20
0,50	240	188	120	0,20	500,00	-2,00
0,60	262	203	127	0,23	484,73	-1,90
0,70	281	216	127	0,26	451,96	-1,89
0,80	297	228	142	0,30	478,11	-1,70
0,90	314	238	148	0,30	471,34	-1,70
1,00	328	247	150	0,30	457,32	-1,60
1,50	x	x	x	x	x	x
2,00	x	x	x	x	x	x

Messung mittels CPC+CU1 auf Stufe CU10A					Frequenz	30 Hz
Eingestellter Strom I in [A]	Eingespeister Strom CT in [mA]	Spannung am Messobjekt VT in [V]	$U_{\text{Rohr-FE}}$ in [V]	$U_{\text{Kabel-Einspeisung}}$ in [V]	korr Impedanz Z in [ $\Omega$ ]	gem. Winkel in[ °]
0,10	75	59	39	0,14	520,00	-6,00
0,20	163	130	84	0,18	515,34	-5,70
0,30	252	194	124	0,22	492,06	-5,20
0,40	325	248	157	0,26	483,08	-5,00
0,50	384	290	183	0,30	476,56	-4,90
0,60	432	323	202	0,36	467,59	-4,80
0,70	472	350	218	0,42	461,86	-4,77
0,80	508	372	231	0,50	454,72	-4,60
0,90	539	390	240	0,60	445,27	-4,50
1,00	563	402	247	0,66	438,72	-4,46
1,50	x	x	x	x	x	x
2,00	x	x	x	x	x	x

Messung mittels CPC+CU1 auf Stufe CU10A					Frequenz	50 Hz
Eingestellter Strom I in [A]	Eingespeister Strom CT in [mA]	Spannung am Messobjekt VT in [V]	$U_{\text{Rohr-FE}}$ in [V]	$U_{\text{Kabel-Einspeisung}}$ in [V]	korr Impedanz Z in [ $\Omega$ ]	gem. Winkel in[ °]
0,10	87	63	41	0,15	471,26	-8,80
0,20	176	132	84	0,20	477,27	-8,50
0,30	268	199	125	0,29	466,42	-8,15
0,40	358	265	166	0,33	463,69	-7,80
0,50	450	330	206	0,42	457,78	-7,60
0,60	536	391	242	0,50	451,49	-7,50
0,70	614	445	274	0,59	446,25	-7,30
0,80	683	490	300	0,66	439,24	-7,20
0,90	737	522	318	0,80	431,48	-7,07
1,00	775	541	329	0,92	424,52	-7,00
1,50	x	x	x	x	x	x
2,00	x	x	x	x	x	x



Messung mittels CPC+CU1 auf Stufe CU10A					Frequenz	100 Hz
Eingestellter Strom I in [A]	Eingespeister Strom CT in [mA]	Spannung am Messobjekt VT in [V]	$U_{\text{Rohr-FE}}$ in [V]	$U_{\text{Kabel-Einspeisung}}$ in [V]	korr Impedanz Z in [ $\Omega$ ]	gem. Winkel in [°]
0,10	96	65	41	0,19	427,08	-15,00
0,20	189	132	82	0,30	433,86	-14,00
0,30	282	196	122	0,42	432,62	-14,50
0,40	376	261	161	0,55	428,19	-14,00
0,50	470	325	200	0,70	425,53	-13,95
0,60	565	389	238	0,80	421,24	-13,00
0,70	659	452	275	0,94	417,30	-13,00
0,80	754	514	312	1,10	413,79	-13,00
0,90	836	572	345	1,26	412,68	-13,00
1,00	924	617	371	1,41	401,52	-12,70
1,50	x	x	x	x	x	x
2,00	x	x	x	x	x	x

Messung mittels CPC+CU1 auf Stufe CU10A					Frequenz	200 Hz
Eingestellter Strom I in [A]	Eingespeister Strom CT in [mA]	Spannung am Messobjekt VT in [V]	$U_{\text{Rohr-FE}}$ in [V]	$U_{\text{Kabel-Einspeisung}}$ in [V]	korr Impedanz Z in [ $\Omega$ ]	gem. Winkel in [°]
0,10	98	56	34	0,24	346,94	-24,00
0,20	200	120	72	0,44	360,00	-23,00
0,30	298	177	106	0,64	355,70	-22,00
0,40	394	235	140	0,83	355,33	-22,00
0,50	490	293	174	1,03	355,10	-22,00
0,60	586	350	207	1,24	353,24	-22,00
0,70	680	407	240	1,44	352,94	-21,70
0,80	777	461	240	1,68	308,88	-21,55
0,90	838	495	291	1,85	347,26	-21,33
1,00	868	513	300	1,93	345,62	-21,00
1,50	x	x	x	x	x	x
2,00	x	x	x	x	x	x

Messung mittels CPC+CU1 auf Stufe CU10A					Frequenz	400 Hz
Eingestellter Strom I in [A]	Eingespeister Strom CT in [mA]	Spannung am Messobjekt VT in [V]	$U_{\text{Rohr-FE}}$ in [V]	$U_{\text{Kabel-Einspeisung}}$ in [V]	korr Impedanz Z in [ $\Omega$ ]	gem. Winkel in [°]
0,10	91	38	20,5	0,29	225,27	-28,00
0,20	206	92	48,5	0,60	235,44	-27,50
0,30	305	138	72	0,90	236,07	-27,00
0,40	404	183	96	1,20	237,62	-27,12
0,50	502	229	119	1,45	237,05	-26,00
0,60	600	274	143	1,75	238,33	-26,80
0,70	684	313	163	2,05	238,30	-26,77
0,80	716	328	171,26	2,20	239,19	-26,70
0,90	744	341	177,8	2,30	238,98	-26,00
1,00	768	352	183,8	2,40	239,32	-26,70
1,50	x	x	x	x	x	x
2,00	x	x	x	x	x	x