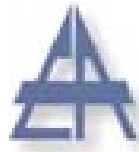


# Erdschlussortung durch Fremdstromeinspeisung

Diplomarbeit



Institut für Elektrische Anlagen  
der TU Graz

Betreuer:  
Univ.-Prof. DI Dr. techn. Lothar Fickert  
DI Christian Raunig

Autor:  
Wolfgang Sporer

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

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

Graz / März - 2011



## 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 11.03.2011

Wolfgang Sporer

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei meinem Betreuer Herrn Univ.-Prof. Lothar Fickert für seine Unterstützung bei der Erstellung meiner Diplomarbeit bedanken.

Weiters gilt mein besonderer Dank Christian Raunig, der immer eine offene Tür für mich hatte und mir stets mit Rat und Tat zur Seite gestanden hat, sowie allen Mitarbeitern am Institut für elektrische Anlagen.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meiner Familie, Freunden und Studienkollegen für die langjährige Unterstützung bedanken.

## Kurzfassung

**Titel:** Erdschlussortung durch Fremdstrom einspeisung

**Schlüsselwörter:** Erdschlussortung, Erdschluss, Fremdstrom einspeisung, Erdschlusskompensation, Mittelspannungsnetz, Magnetfeldsonde, mobile Ortung

Der Großteil der Mittel und Hochspannungsnetze werden in Mitteleuropa mit einer Erdschlusskompensation betrieben, um die Versorgungssicherheit für die Kunden und eine hohe Spannungsqualität zu gewährleisten. Der Vorteil der geringen Fehlerströme in erdschlusskompensierten Netzen verursacht allerdings Probleme bei der Fehlerortung. Daher gibt es viele Verfahren für die Erdschlussortung, diese sind aber für den Einsatz in Mittelspannungsnetzen teilweise zu kostenintensiv oder stoßen an ihre Grenzen. Diese Diplomarbeit beschäftigt sich mit einer neuen Methode der Erdschlussortung basierend auf der Einspeisung eines Ortungsstroms direkt in die fehlerbehaftete Phase oder in die Leistungshilfswicklung der Petersenspule (Nullsystem), der die Verfolgung der Fehler schleife mit einer Magnetfeldsonde ermöglicht.

## Abstact

**Title:** Earth fault localization using additional current injektion

**Keywords:** earth fault localization, earth fault, additional current injektion, earth fault compensation, medium voltage grid, magnetic field sensor, mobile tracing

Most of the medium and high voltage grids in Central Europe are operated with earth fault compensation, to warrant supply reliability to the customer and high power quality. The advantage of the low fault current in earth fault compensated grids caused problems at the fault localization. Therefore are many types of techniques for earth fault localization but they are partly to expensive for use in medium voltage grids or they meet her own limit. This thesis deals with a new method of earth fault localization based on injecting an localization current into the faulty phase or into the power auxiliary winding of Petersen-coil (zero sequence), that allows the tracing of the fault loop with a magnetic sensor.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>7</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>11</b>
<b>2 Allgemeines</b>	<b>12</b>
2.1 Sternpunktbehandlung . . . . .	12
2.1.1 Netze mit isoliertem Sternpunkt . . . . .	13
2.1.2 Netze mit Erdschlusskompensation . . . . .	14
2.2 Parameter eines gelöschten Netzes . . . . .	16
2.2.1 Verstimmung ( $v$ ) . . . . .	16
2.2.2 Dämpfung ( $d$ ) . . . . .	17
2.2.3 Erdschlussreststrom ( $I_{\text{Rest}}$ ) . . . . .	17
2.2.4 Kapazitiver Erdschlussstrom ( $I_{\text{CE}}$ ) . . . . .	18
2.2.5 Sternpunktverlagerungsspannung ( $U_{\text{NE}}$ ) . . . . .	18
2.2.6 Oberschwingungsanteil (THD) . . . . .	18
2.2.7 Berührungsspannung ( $U_{\text{TP}}$ ) . . . . .	19
2.2.8 Löschgrenze ( $I_{\text{G}}$ ) . . . . .	20
2.3 Tonfrequenzrundsteuerung (TRA) . . . . .	21
2.3.1 Ankopplung . . . . .	21
2.3.1.1 Parallelankopplung . . . . .	21
2.3.1.2 Serienankopplung . . . . .	22
<b>3 Herkömmliche Erdschlusserfassung und -ortungsmethoden</b>	<b>23</b>
3.1 Detektion über Verlagerungsspannung in Kombination mit Suchschaltungen	23
3.2 Erdschlusswischerverfahren . . . . .	24
3.2.1 Erdschlusswischerverfahren mit qu-Algorithmus . . . . .	26
3.2.2 Erdschlusswischerverfahren mit qu2-Algorithmus . . . . .	28
3.3 Wattreststromerfassung . . . . .	29

3.4	Oberschwingungsortung . . . . .	30
3.5	Pulsortung . . . . .	32
3.6	Admittanzverfahren . . . . .	33
3.7	Erdschlussortung durch Feldmessung . . . . .	34
<b>4</b>	<b>Erdschlussortung durch Fremdstromspeisung</b>	<b>35</b>
4.1	Stationäre Einspeisung . . . . .	36
4.2	Mobile Einspeisung . . . . .	37
4.3	Magnetfeldsonde . . . . .	38
<b>5</b>	<b>Beschreibung des Simulationsmodells</b>	<b>40</b>
5.1	Netztopologie eines Mittelspannungsnetzes . . . . .	40
5.2	Leitungsparameter . . . . .	44
5.3	Petersenspule . . . . .	46
5.3.1	Ersatzschaltbild . . . . .	47
5.4	Transformator (HS-MS) und Hochspannungsnetz . . . . .	52
<b>6</b>	<b>Evaluierung</b>	<b>53</b>
6.1	Stationäre Einspeisung . . . . .	56
6.1.1	Auswertung für ein reines Kabelnetz . . . . .	64
6.1.2	Auswertung für ein gemischtes Netz . . . . .	72
6.1.3	Vergleich der Modellnetze . . . . .	76
6.1.4	Fehlinterpretationen . . . . .	77
6.2	Mobile Einspeisung . . . . .	79
6.2.1	Auswertung für ein reines Kabelnetz . . . . .	80
6.2.2	Auswertung für ein gemischtes Netz . . . . .	83
6.3	Tonfrequenzrundsteuerungsanlagen (TRA) . . . . .	84
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>85</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>88</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>90</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>93</b>

# Abkürzungsverzeichnis

$B$ .....	magnetische Feldstärke in T
$C'_{Fr}, C'_{Fr}$ .....	längenbezogenes Null- bzw. Mitsystem der Freileitungskapazität in $\frac{F}{km}$
$C'_{K}, C'_{K}$ .....	längenbezogenes Null- bzw. Mitsystem der Kabelkapazität in $\frac{F}{km}$
$C'_B$ .....	längenbezogene Betriebskapazität in $\frac{F}{km}$
$C_E$ .....	Leiter-Erde-Kapazität in F
$C'_E$ .....	längenbezogene Leiter-Erde-Kapazität in $\frac{F}{km}$
$d$ .....	Dämpfung in p.u.
DP .....	Detektionspegel der Magnetfeldsonde in A
$f_G$ .....	Frequenz des Signalgenerators in Hz
$I_0$ .....	Nullstrom
$I_1$ .....	Grundschiwingung des Stromes in A
$\underline{I}_1, \underline{I}'_2$ .....	Primär- und Sekundärstrom einer Petersenspule in A
$I_{CE}$ .....	kapazitiver Erdfehlerstrom in A
$I'_{CE,Fr}$ .....	längenbezogene kapazitive Ströme einer Freileitung in $\frac{A}{km}$
$I'_{CE,K}$ .....	längenbezogene kapazitive Ströme eines Kabels in $\frac{A}{km}$
$I_{CE,Netz}$ .....	kapazitive Ströme im Netz in A
$I_G$ .....	Signalgeneratorstrom in A
$I_{krank}$ .....	Ortungsstrom in A
$I_L$ .....	induktiver Löschiwulenstrom in A
$\underline{I}_{m0}$ .....	Magnetisierungsstrom einer Petersenspule in A
$I_{Rest}$ .....	Erdschlussreststrom in A
$I_\nu$ .....	Harmonische Oberschiwingungen des Stromes in A
$k$ .....	Unsymmetriefaktor in p.u.
$k_0$ .....	Erdfaktor in p.u.

$L_i^{0,1}$	Null- bzw. Mitsystem der Leitungsinduktivitäten in $\Omega$
$L_{Fr}^0, L_{Fr}^1$	längenbezogenes Null- bzw. Mitsystem der Freileitungsinduktivität in $\frac{F}{km}$
$L_K^0, L_K^1$	längenbezogenes Null- bzw. Mitsystem der Kabelinduktivität in $\frac{F}{km}$
$l_{a,Fr}$	Länge eines Freileitungsteilstückes in km
$l_{a,K}$	Länge eines Kabelteilstückes in km
$l_a$	Länge eines Leitungsteilstücks in km
$L_D$	Induktivität der Petersenspule in H
$l_{Netz}$	Netzausdehnung in km
LS	Leistungsschalter
$n$	Anzahl der Abgänge
$n_{a,Fr}$	Anzahl der Freileitungsteilstücke
$n_{a,K}$	Anzahl der Kabelteilstücke
$P_{cu}$	Kupferverluste einer Petersenspule in W
$P_{fe}$	Eisenverluste einer Petersenspule in W
$r$	Abstand vom Leiter in m
$R_i^{0,1}$	Null- bzw. Mitsystem der Leitungswiderstände in $\Omega$
$R_{Fr}^0, R_{Fr}^1$	längenbezogenes Null- bzw. Mitsystem des Freileitungswiderstandes in $\frac{\Omega}{km}$
$R_K^0, R_K^1$	längenbezogenes Null- bzw. Mitsystem des Kabelwiderstandes in $\frac{\Omega}{km}$
$R_1, R_2'$	Wicklungswiderstände einer Petersenspule in $\Omega$
$R_E'$	längenbezogener Erdwiderstand in $\frac{\Omega}{km}$
$R_{fe}$	ohmscher Widerstand für die Eisenverluste einer Petersenspule in $\Omega$
$R_M$	ohmscher Querableitwiderstand der Petersenspule in $\Omega$
$R_Q$	ohmscher Querableitwiderstand des Netzes in $\Omega$
$S_{Gen}$	Signalgeneratorleistung in VA
SG	Signalgenerator
SS	Sammelschiene
THD	Oberschwingungsanteil in p.u.
$U_0$	Nullspannung
$\underline{U}_1, \underline{U}_2$	Primär- und Sekundärspannung einer Petersenspule in V
$U_B$	Betriebsspannung des Netzes in V



$u_e$ .....	Übersetzungsverhältnis einer Petersenspule
$u_k$ .....	relative Kurzschlussspannung in %
$U_N$ .....	Nennspannung des Netzes in V
$\underline{U}_{NE}$ .....	Sternpunktverlagerungsspannung in V
$v$ .....	Verstimmung in p.u.
$\underline{X}'_{L,K}$ .....	längenbezogene Reaktanz der Kabelinduktivität in $\frac{\Omega}{km}$
$\underline{X}'_{1\sigma}, \underline{X}'_{2\sigma}$ .....	Streureaktanz einer Petersenspule in $\Omega$
$\underline{X}_C$ .....	Reaktanz einer Kapazität in $\Omega$
$\underline{X}'_{L,Fr}$ .....	längenbezogene Reaktanz der Freileitungsinduktivität in $\frac{\Omega}{km}$
$\underline{X}_{m0}$ .....	Hauptreaktanz einer Petersenspule in $\Omega$
$\underline{Z}^0, 1$ .....	Null- bzw. Mitimpedanz in $\Omega$
$\underline{Z}^0_K, \underline{Z}^1_K$ .....	längenbezogenes Null- bzw. Mitsystem der Kabelimpedanz in $\frac{\Omega}{km}$
$\underline{Z}_{11}$ .....	Selbstimpedanz der Leitung in $\Omega$
$\underline{Z}_{12}$ .....	Koppelimpedanz der Leitung in $\Omega$
$\underline{Z}_F$ .....	Fehlerübergangswiderstand in $\Omega$
$\underline{Z}_{Fehler,Netz}$ .....	Impedanz der gesunden Abgänge für die erdschlussbehaftete Phase in $\Omega$
$\underline{Z}_{Fehlerschl}$ .....	Impedanz der Fehlerschleife in $\Omega$
$\underline{Z}_{Ges}$ .....	Gesamtimpedanz für den Ortungsstrom in $\Omega$
$\underline{Z}_{gesund}$ .....	Impedanz der gesunden Phasen in $\Omega$
$\underline{Z}_K$ .....	Kurzschlussimpedanz der Petersenspule in $\Omega$
$\underline{Z}_{krank}$ .....	Impedanz der kranken Phasen in $\Omega$
$\underline{Z}_{L1,L2,L3}$ .....	Leitungsimpedanzen in $\Omega$
$\underline{Z}_{L,i}$ .....	Leitungsimpedanz in $\Omega$
$\underline{Z}_{m0}$ .....	Leerlaufimpedanz der Petersenspule in $\Omega$
$\underline{Z}_{Netz}$ .....	Netzimpedanz in $\Omega$
$\underline{Z}_{p1}$ .....	Impedanz der Primärseite der Petersenspule in $\Omega$
$\underline{Z}_{p2}$ .....	Impedanz der Primärleistungshilfswicklung der Petersenspule in $\Omega$
$\underline{Z}_{Petersen}$ .....	Impedanz der Petersenspule in $\Omega$
$\underline{Z}_{Trafo}$ .....	Transformatorimpedanz in $\Omega$
$\sigma$ .....	Verhältnis der Primärstreuintduktivität zur Hauptinduktivität einer Petersenspule in p.u.
$\mu_0$ .....	Permeabilität in $\frac{Vs}{Am}$



---

$\omega_G$  ..... Generatorkreisfrequenz in rad/s  
 $\omega$  ..... Kreisfrequenz in rad/s

# 1 Einleitung

Der häufigste Fehler in gelöschten Netzen ist der Erdschluss (siehe Abbildung 1.1). Um die Versorgungssicherheit zu gewährleisten, werden daher Mittel- und Hochspannungsnetze im Mitteleuropa vorwiegend mit Erdschlusskompensation betrieben. Die gelöschten Netze weisen den Vorteil auf, dass sie mit einem Erdschluss weiter betrieben werden können. Es besteht jedoch die Gefahr von stromstarken Doppelerdschlüssen in Folge der hohen Spannungsbeanspruchung der Betriebsmittel. Daher ist es notwendig einen Fehler selektiv zu erfassen. Aufgrund der geringen Ströme bereiten die Erdschlüssen in gelöschten Netzen der Schutztechnik aber Probleme.

Es gibt bereits eine Vielzahl von Ortungsmethoden. Diese stoßen aber oft an ihre Grenzen oder sind für den Einsatz in Mittelspannungsnetzen einfach zu teuer. Das an der TU Graz entwickelte Verfahren stellt eine Alternative dar. Für die Ortung wird ein nicht netzfrequenter Ortungsstrom in das Netz eingebracht, mit dessen Hilfe über das vom Ortungsstrom verursachte Magnetfeld eine Verfolgung der Fehlerschleife mittels Magnetfeldsonde möglich ist.

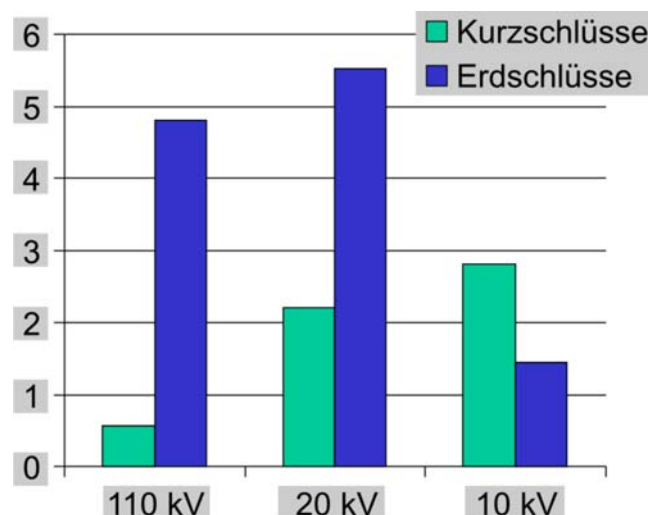


Abbildung 1.1: Netzfehler je 100 km Netzlänge [12]

## 2 Allgemeines

### 2.1 Sternpunktbehandlung

Dieser Abschnitt basiert auf [16] [20] [21].

Unter dem Begriff Sternpunkterdung oder Sternpunktbehandlung fasst man alle Maßnahmen zur Begrenzung des einpoligen Kurzschlussstromes und der Teilkurzschlussströme in der Erde oder zur Begrenzung der mit einem einpoligen Kurzschluss verbundenen Spannungsunsymmetrie (Verlagerungsspannung) zusammen [17]. Die Auswirkung der Sternpunkterdung im störungsfreien Betrieb kann als geringfügig betrachtet werden. Kommt es jedoch zum Erdschluss, so spielt die Sternpunktbehandlung eine entscheidende Rolle, da die Sternpunkterdung ein wichtiger Faktor für die Größe der Kurzschlussströme darstellt.

Mögliche Sternpunkterdungsarten sind:

- Netze mit freiem oder isoliertem Sternpunkt
- Netze mit Erdschlusskompensation  
(sowie Sonderformen: KNOSPE etc.)
- Netze mit niederohmigen Sternpunktbehandlung
- Netze mit mittelohmiger Sternpunktbehandlung

Die niederohmige Sternpunkterdung (starre Sternpunkterdung), bei der im Erdschlussfall Ströme im kA-Bereich erreicht werden, wird bei Übertragungsnetzen eingesetzt und ist nicht Gegenstand dieser Diplomarbeit.

### 2.1.1 Netze mit isoliertem Sternpunkt

In einem Netz mit isoliertem Sternpunkt (Abbildung 2.1) sind alle Sternpunkte gegenüber der Erde isoliert oder hochohmig mit Erde verbunden. Bei einem idealen Erdschluss ( $Z_F = 0$ ) wird die Spannung der fehlerbehafteten Phase im gesamten Netz Null und in den fehlerfreien Leitern kommt es zu einer Erhöhung der Leiter-Erde-Spannung auf die verkettete Spannung. Aufgrund der Spannungsanhebung in den gesunden Leitern und der damit zu geringen Isolationsreserve kann es zu stromstarken Folgefehlern (zweipoligen Kurzschluss, Doppelerdschluss) kommen. Verwendung findet diese Art der Sternpunkterdung hauptsächlich in Mittelspannungsnetzen mit geringer Ausdehnung, da höhere Systemlängen auch höhere kapazitive Ströme verursachen. In Freileitungen kann man mit der Selbstlöschung des Lichtbogens rechnen, wenn der kapazitive Erdschlussstrom kleiner als 35 A (für 10 kV oder 20 kV Netze), oder kleiner als 60 A (für 60 kV Netze) ist [17].

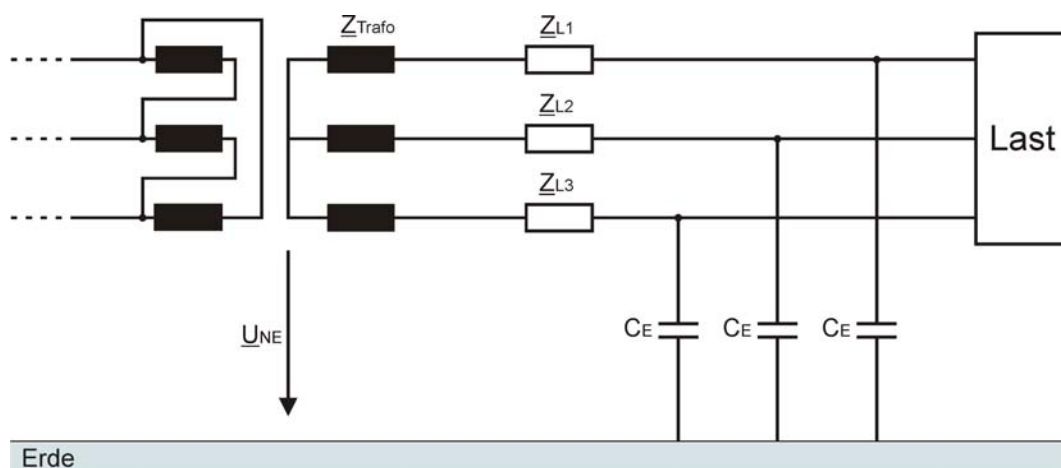


Abbildung 2.1: Isoliertes Netz

$U_{NE}$	Sternpunktverlagerungsspannung in V
$C_E$	Leiter-Erde-Kapazität in F
$Z_{L1, L2, L3}$	Leitungsimpedanzen in $\Omega$
$Z_{Trafo}$	Transformatorimpedanz in $\Omega$

Verwendung [16]:

- bei Mittelspannungsfreileitungsnetzen geringer Ausdehnung
- bei kleinen Kabelnetzen (z.B. KW-Eigenbedarfsnetzen, Industrienetzen)

Vorteile [16]:

- einfache Ausführung
- geringe Anforderungen an die Erdungsanlagen

Nachteile [16]:

- intermittierende Erdschlüsse sind möglich
- Isolation der Betriebsmittel gegen Erde muss der verketteten Betriebsspannung entsprechen
- keine sichere selektive Erdschlusserfassung
- erhöhte Gefahr des Auftretens von subsynchronen Kippschwingungen

## 2.1.2 Netze mit Erdschlusskompensation

In einem gelöschten Netz (siehe Abbildung 2.2) ist mindestens ein Transformatorsternpunkt über eine Erdschlusslöschspule (Petersenspule) mit Erde verbunden. Bei einem Erdschluss liefert die Petersenspule einen, dem kapazitiven Erdschlussstrom entgegengesetzten, induktiven Löschspulenstrom, damit der Fehlerstrom an der Fehlerstelle unterhalb der Löschgrenze gehalten werden kann [8]. Damit bietet sich die Möglichkeit, ein Netz trotz Erdschluss weiter zu betreiben, was zu einer hohen Versorgungssicherheit führt. Die Petersenspulen werden oft als Tauchkernspulen aufgebaut, um den benötigten induktiven Löschspulenstrom einstellen zu können. Bei einer Vollkompensation fließt nur mehr der nicht kompensierbare Wattreststrom  $I_{Rest}$  und der Oberschwingungsstrom. Auch bei gelöschten Netzen kommt es zu der in 2.1.1 beschriebenen Spannungsanhebung der gesunden Phasenspannungen. Im Vergleich zum isolierten Netz ist aber durch die Kompensation des kapazitiven Fehlerstromes eine wesentlich größere Netzausdehnung möglich, so dass Lichtbögen noch von selber verlöschen. Eingesetzt werden gelöschte Netze hauptsächlich im mitteleuropäischen Raum aber, auch mit tendenziell steigender Anzahl in weiteren Ländern [8].

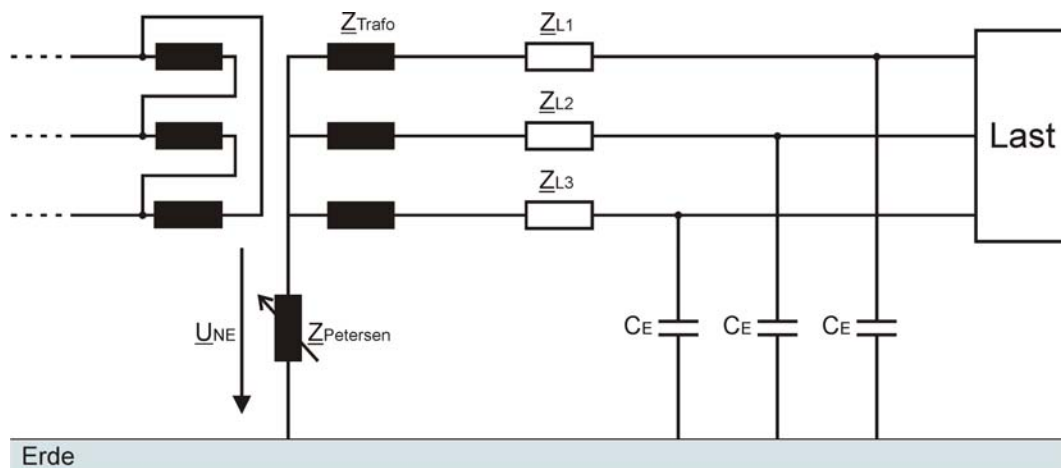


Abbildung 2.2: Netz mit Erdschlusskompensation

$\underline{U}_{NE}$	Sternpunktverlagerungsspannung in V
$C_E$	Leiter-Erde-Kapazität in F
$\underline{Z}_{L1, L2, L3}$	Leitungsimpedanz in $\Omega$
$\underline{Z}_{Trafo}$	Transformatorimpedanz in $\Omega$
$\underline{Z}_{Petersen}$	Impedanz der Petersenspule in $\Omega$

Verwendung [16]:

- bei Mittel- und Hochspannungsnetzen (3 kV bis 110 kV) größerer Ausdehnung

Vorteile [16]:

- trotz 1-poligem Fehler kann das Netz vorübergehend weiter betrieben werden (dies bedeutet eine Erhöhung der Versorgungssicherheit)
- in Freileitungsnetzen verlöschen Erdschlüsse meist von selbst
- kleine Erdschlussrestströme
- geringe Anforderungen an die Erdungsanlagen
- geringe Zahl von Abschaltungen beim Auftreten von Erdschlüssen
- wiederkehrende Spannung steigt wesentlich langsamer als bei isoliertem Netz

Nachteile [16]:

- Begrenzung der Netzausdehnung durch den Erdschlussreststrom
- Dauererdschlüsse sind möglich, und damit steigt die Gefahr von Mehrfacherschlüssen
- oft unsichere selektive Erdschlusserfassung
- Mehraufwand durch Einbau und Regelung der Petersenspulen
- Isolation der Betriebsmittel gegen Erde muss der verketteten Betriebsspannung entsprechen

## 2.2 Parameter eines gelöschten Netzes

In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Parameter für den Betrieb von gelöschten Netzen angeführt.

### 2.2.1 Verstimmung ( $v$ )

Die Verstimmung gibt an in welchem Maße ein gelöschtes Netz über- oder unterkompensiert betrieben wird. Durch das Zu- und Abschalten von Kabelstücken ergeben sich Änderungen in den Erdkapazitäten wodurch erhöhte Nullspannungen auftreten können. Daher werden gelöschte Netze in der Regel überkompensiert betrieben. Allerdings sollte in Mittelspannungsnetzen eine Verstimmung von 20 Prozent nicht überschritten werden. Größere Werte gefährden die Selbstlöschung des Lichtbogens und führen zu einem erhöhten Erdschlussreststrom an der Fehlerstelle [14].

$$v = \frac{I_{CE} - I_L}{I_{CE}} = \frac{\omega \sum C_E - \frac{1}{\omega L_D}}{\omega \sum C_E} = 1 - \frac{1}{\omega^2 L_D \sum C_E} \quad (2.1)$$

$v$	Verstimmung in pu
$I_{CE}$	kapazitiver Erdfehlerstrom in A
$I_L$	induktiver Löschspulenstrom (Grundschwingung) in A
$\omega$	Kreisfrequenz in rad/s
$C_E$	Leiter-Erde-Kapazität in F
$L_D$	Induktivität der Petersenspule in H



### 2.2.2 Dämpfung (d)

Die Dämpfung in einem Netz gibt den Anteil der Querableitwirkströme und der Löschspulenwirkströme im Verhältnis zum kapazitiven Erdschlussstrom an. Im gelöschten Netz ist d ein Maß für den ohmschen Anteil des Reststromes [16].

$$d = \frac{1}{\omega \cdot \sum C_E} \cdot \left( \frac{1}{R_M} + \sum \frac{1}{R_Q} \right) \quad (2.2)$$

d	Dämpfung in pu
$R_M$	ohmscher Querableitwiderstand der Petersenspule in $\Omega$
$R_Q$	ohmscher Querableitwiderstand des Netzes in $\Omega$

### 2.2.3 Erdschlussreststrom ( $I_{Rest}$ )

Der Erdschlussreststrom ist jener Anteil am Fehlerstrom der nicht kompensierbar ist. Bei einer idealen Verteilung der Petersenspule gilt folgende Näherungsformel.

$$I_{Rest} = 3\omega C_E (d + jv) \cdot \frac{U_B}{\sqrt{3}} \quad (2.3)$$

$I_{Rest}$	Erdschlussreststrom in A
$U_B$	Betriebsspannung des Netzes in V

Der Erdschlussreststrom setzt sich aus dem Verstimmungsstrom, Oberschwingungsreststrom und Wattreststrom zusammen und darf die Löschgrenze nicht überschreiten. Mit zu berücksichtigen sind eventuelle Ströme aus Ortungseinrichtungen. In Freileitungsnetzen kann der Erdschlussstrom unter zehn Prozent des kapazitiven Erdschlussreststromes gehalten werden, in Kabelnetzen erreicht man hingegen Werte zwischen drei und vier Prozent [10].

## 2.2.4 Kapazitiver Erdschlussstrom ( $I_{CE}$ )

Der kapazitive Erdschlussstrom ist von den Erdkapazitäten des Netzes abhängig und ist daher maßgeblich für die Dimensionierung der Petersenspule verantwortlich. Aufbaubedingt besitzen Kabel gegenüber Freileitungen wesentlich höhere Erdkapazitäten.

$$I_{CE} = 3\omega C_E \frac{U_B}{\sqrt{3}} = \sqrt{3}\omega C_E U_B \quad (2.4)$$

 $I_{CE}$ 

kapazitiver Erdschlussstrom in A

## 2.2.5 Sternpunktverlagerungsspannung ( $U_{NE}$ )

Die Verlagerungsspannung tritt zwischen Sternpunkt und Erde auf und ist damit die Ursache für den Stromfluss in der Petersenspule. Aufgrund von unsymmetrischen Leitungen tritt sie bereits im ungestörten Betrieb auf. Um die Verlagerungsspannung im Normalbetrieb herabzusetzen, kann das Netz geringfügig verstimmt werden [17].

$$U_{NE} = -\frac{k}{\sqrt{d^2 + v^2}} \cdot \frac{U_B}{\sqrt{3}} \quad (2.5)$$

 $\frac{U_{NE}}{k}$ Sternpunktverlagerungsspannung in V  
Unsymmetriefaktor in p.u.

## 2.2.6 Oberschwingungsanteil (THD)

Oberschwingungen entstehen in Energieversorgungsnetzen durch Rückwirkungen nichtlinearer Verbraucher, leistungselektronischer Einrichtungen, netzgeführter Stromrichter etc. [13]. Sie können nicht kompensiert werden und liefern dadurch den größten Teil am Erdschlussreststrom. Es bestehen aber unterschiedliche Regelungen für die Oberschwingungen hinsichtlich der Löschgrenzen. In der Norm EN 8383 sind die harmonischen Oberschwingungen für die Löschgrenze mit zu berücksichtigen, in der Norm ÖVE B1 wird hingegen nur die Grundwelle für die Löschgrenze herangezogen.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{\nu=2}^{\infty} I_{\nu}^2}}{I_1} \quad (2.6)$$

$THD$	Oberschwingungsanteil in p.u.
$I_1$	Grundschwingung des Stromes in A
$I_{\nu}$	Harmonische Oberschwingungen des Stromes in A

## 2.2.7 Berührungsspannung ( $U_{TP}$ )

Die Erdungsspannung berechnet sich aus der relevanten Erdungsimpedanz sowie aus dem Strom an der Fehlerstelle. Die Berührungsspannung ist jener Teil von der Erdungsspannung, der bei einem Erdfehler vom Menschen abgegriffen werden kann. Die Grenzwerte für die Berührungsspannung aus Abbildung 2.3 sind von der Stromflussdauer abhängig und dürfen nicht überschritten werden, um eine Gefährdung von Mensch und Tier zu verhindern. Die maximale Dauerfehlerspannung darf 75V nicht überschreiten.

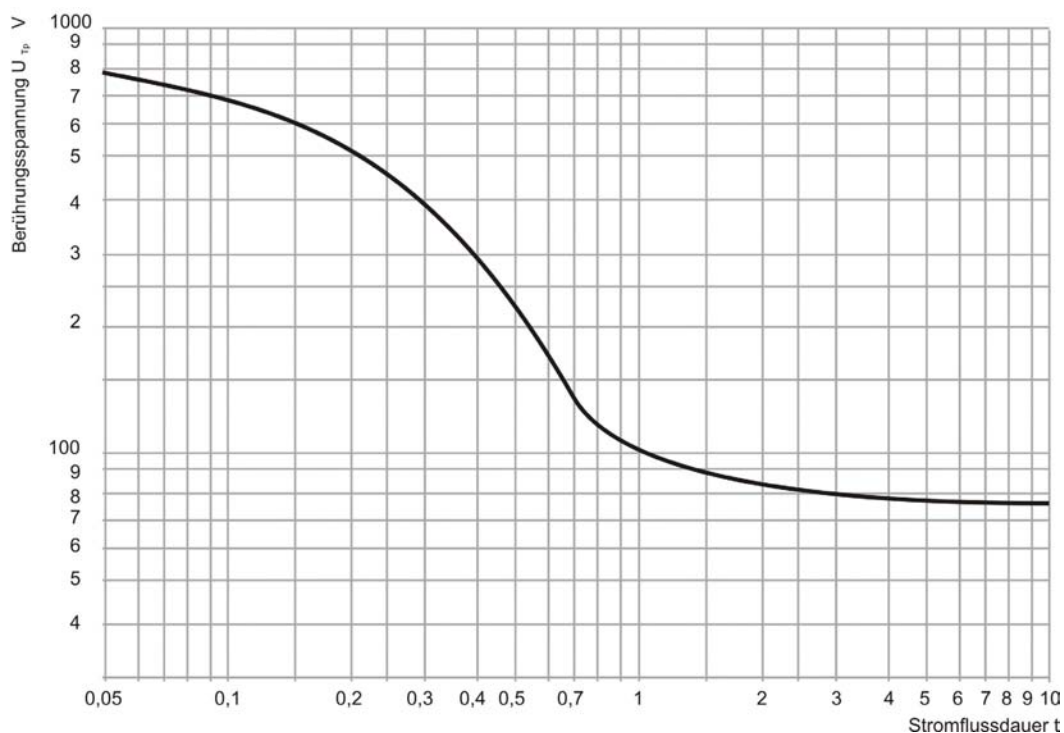


Abbildung 2.3: Zulässige Berührungsspannungen laut ÖVE/ÖNORM E 8383 [3]

## 2.2.8 Löschgrenze ( $I_G$ )

Der wichtigste Faktor für das selbstständige Verlöschen eines Lichtbogens ist der Betrag des Erdschlussreststromes. Die Grenzwerte der Restströme in Netzen mit Erdschlusskompensation sind in der Norm ÖVE B1 sowie in der Norm VDE 0228 geregelt.

Nennspannung des Netzes		3...20	25	30	45	60	110	150
Erdschlussreststrom bzw. Erdschlussstrom in A	Tabelle a	60	63	67	78	90	132	180
	Tabelle b	35	37	40	50	60	-	-

Tabelle a für Netze mit Erdschlusskompensation, für Kabelnetze bis 20 kV Nennspannung mit kleinen Freileitungsanteilen gilt Tabella a auch bei isoliertem Punkt, Tabelle b für Netze mit isoliertem neutralen Punkt.

Abbildung 2.4: Löschgrenzen laut ÖVE B1 [6]

Die Grundschwingung des Stromes darf in gelöschte Netze bis 20 kV Nennspannung die Grenze von 60 A, bei 110 kV Nennspannung von 132 A nicht überschreiten, um das selbstständige Verlöschen des Lichtbogens zu gewährleisten.

Bei Nichteinhaltung dieser Löschgrenzen ist eine Beeinflussungsuntersuchung hinsichtlich des stromstarken Doppelerdschlusses durchzuführen [6].

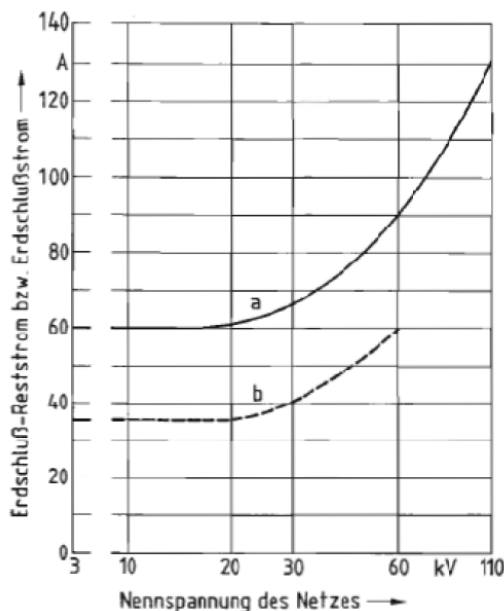


Abbildung 2.5: Löschgrenzen laut VDE 0228 Teil 2 [2]

## 2.3 Tonfrequenzrundsteuerung (TRA)

Tonfrequenzrundsteueranlagen werden zur Fernsteuerung von Verbrauchern in Energieversorgungsnetzen verwendet. Energieversorgungsunternehmen haben schon sehr früh versucht, über tarifliche Anreize den schwankenden Absatz an elektrischer Energie, der durch den menschlichen Lebensrythmus hervorgerufen wird, zu vergleichmäßigen.

Mit Hilfe der Rundsteuertechnik ist es möglich, einzelne Verbrauchergruppen zu- oder abzuschalten. Dabei wird das normale Energieversorgungsnetz als Übertragungsweg für ein aufmoduliertes Signal verwendet. Verbrauchern, die gesteuert werden sollen, wird ein Rundsteuerempfänger vorgeschaltet. Typische Anwendungsbeispiele sind das Schalten von Nachtspeicherheizungen und Straßenbeleuchtungen. Der große Vorteil von Rundsteueranlagen ist das großflächige und gleichzeitige Schalten von Lasten.

### 2.3.1 Ankopplung

Als Rundsteuersender werden in der Regel Umrichter, die die tonfrequenten Signale über einen Gleichspannungszwischenkreis erzeugen, verwendet. Die vom Sender erzeugten tonfrequenten Signale werden mittels Serien- oder Parallelankopplung in das Versorgungsnetz eingespeist. Durch die Wahl der Steuerfrequenz sowie die Netztopologie wird die Art der Ankopplung bestimmt. Bei Steuerfrequenzen unterhalb 200 Hz wird vorzugsweise die Serienankopplung verwendet, bei Frequenzen oberhalb 200 Hz die Parallelankopplung [1]. In Abbildung 2.6 sind die beiden Ankopplungsarten dargestellt.

#### 2.3.1.1 Parallelankopplung

Bei der Parallelankopplung erfolgt die Anbindung durch einen Kopplungskondensator und einer Kopplungsinduktivität parallel zum Netz. Die Komponenten bilden einen Serienschwingkreis, der auf die Netzfrequenz abgestimmt ist, wodurch die Netzspannung am hochohmigen Schwingkreis abgebaut wird. Für die hohen Tonfrequenzen ist hingegen der Schwingkreis niederohmig und die Signale können dem Netz überlagert werden.

### 2.3.1.2 Serienankopplung

Bei der Serienankopplung wird die Tonfrequenz über Transformatoren eingespeist. Die Induktivität des speisenden Transformators und des übergeordneten Netzes liegen in Reihe mit der Netzlast wodurch hohe Spannungsabfälle an den Induktivitäten bei der Verwendung hoher Tonfrequenzen auftreten [1].

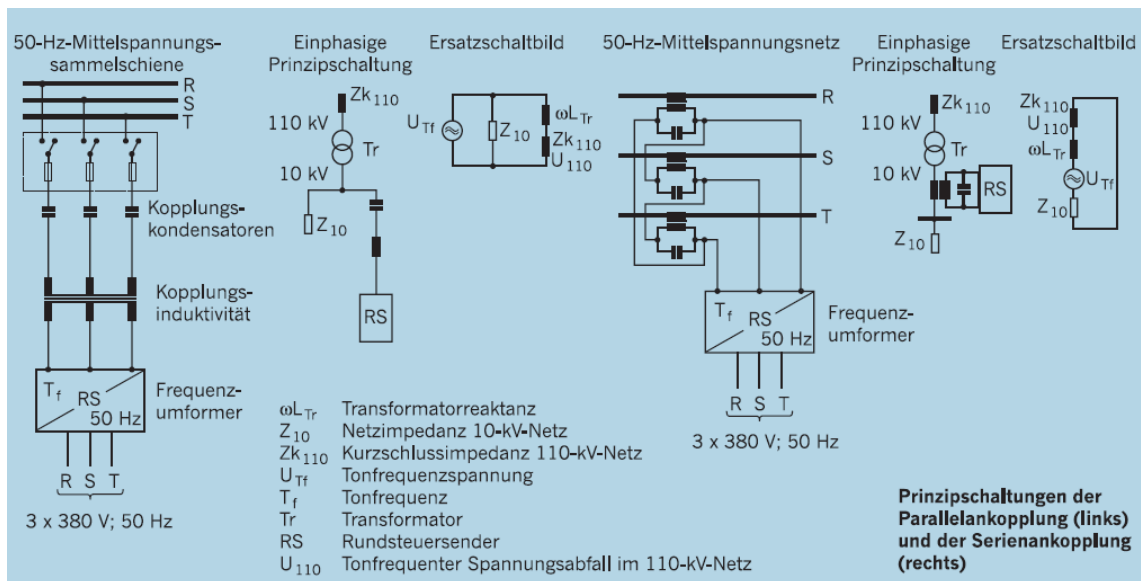


Abbildung 2.6: Arten der Ankopplung einer TRA [1]

## 3 Herkömmliche Erdschlusserfassung und -ortungsmethoden

Bei Erdschlüssen, die nicht von selbst verlöschen, muss es zu einer Abschaltung und Eingrenzung der Fehlerstelle kommen, um die nötigen Reparaturarbeiten durchführen zu können. Für den schnellen und gezielten Einsatz des Montagepersonals ist es wichtig, den fehlerbehafteten Abzweig zu erfassen. Aufgrund der kleinen Wirkströme, die für die Erkennung des fehlerhaften Abzweiges zur Verfügung stehen, bereitet die genaue Ortung der Schutztechnik Probleme. In diesem Kapitel werden die wichtigsten Erdschlussortungsverfahren beschrieben. Dieses Kapitel basiert auf [21] [11].

### 3.1 Detektion über Verlagerungsspannung in Kombination mit Suchschaltungen

Die einfachste Methode, um einen Erdschluss in einem Netz zu erfassen, ist die Messung der Verlagerungsspannung. Die Verlagerungsspannung tritt im gesamten Netz (Löschbezirk) auf und wird über Erdschlussmelderrelais abgefragt. Bei den Erdschlussmelderrelais wird ein Schwellwert für die Verlagerungsspannung eingestellt, dieser ist abhängig von der kapazitiven Unsymmetrie. Verlischt ein Fehler nicht von selbst, so muss eine Abschaltung für die nötige Reparatur erfolgen. Mit gezielten Schalthandlungen erfolgt eine Eingrenzung des Fehlerortes durch das geschulte Betriebspersonal. Hierfür werden die einzelnen Abzweige von der Sammelschiene kurzzeitig getrennt. Wird dabei der Schwellwert des Erdschlussmelderrelais unterschritten, so ist der kranke Abzweig gefunden. Es handelt sich hierbei um keine schnelle Lösung, daher gibt es bereits eine Vielzahl von Erdschlussortungsverfahren, die aber oft an ihre Grenzen stoßen.

## 3.2 Erdschlusswischerverfahren

Beim Erdschlusswischerverfahren wird der Aufladevorgang von den Erdkapazitäten der gesunden Leiter herangezogen. Für die Darstellung des Aufladevorganges in Abbildung 3.1 ist ein isoliertes Netz dargestellt, da die Induktivität der Petersenspule für den hochfrequenten Aufladevorgang unwirksam ist. Beim Eintritt eines Erdschlusses kommt es zu einer Spannungsanhebung in den gesunden Phasen, wodurch die zugehörigen Erdkapazitäten über die Einspeisung aufgeladen werden. Die dabei entstehenden Aufladeströme fließen über die Fehlerstelle zur Einspeisung zurück. In den gesunden Abgängen eilen die Aufladeströme der zugehörigen Spannung um  $90^\circ$  voraus. Im erdschlussbehafteten Abgang existiert der Aufladestrom in den gesunden Leitern auch, kompensiert sich aber in der Summenstrommessung an den Messstellen zwischen der Sternpunktbehandlung und der Fehlerstelle, da der Aufladestrom über den fehlerbehafteten Leiter zurück fließt [11]. Der verbleibende Summenstrom, der sich aus den Aufladeströmen aus den gesunden Abgängen zusammensetzt, ist der Spannung um  $90^\circ$  nacheilend.

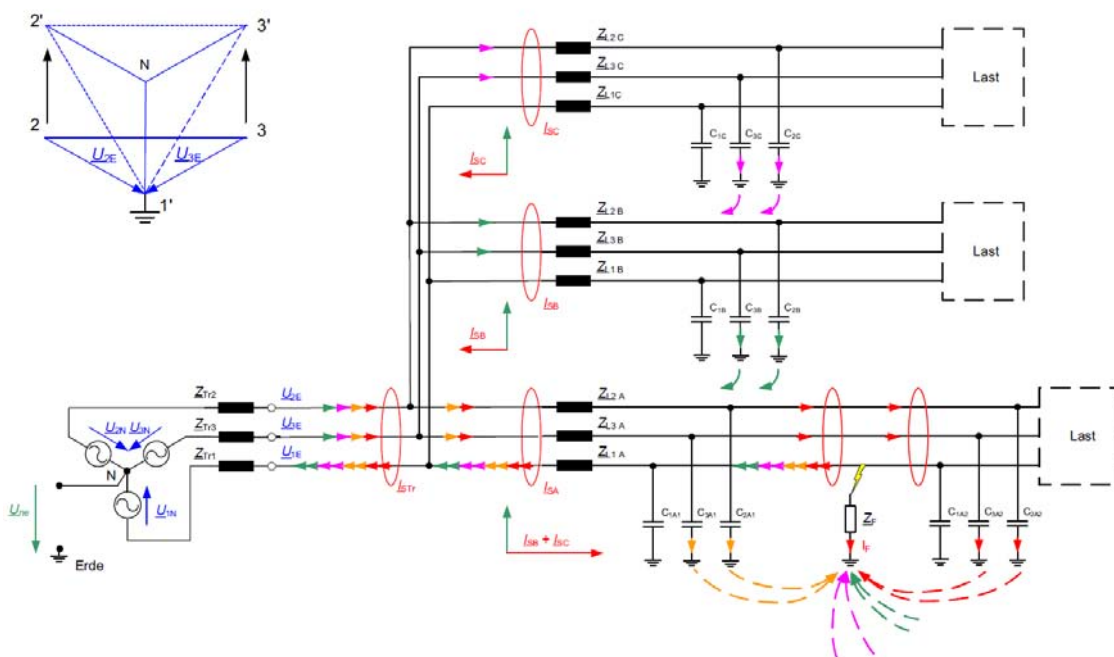


Abbildung 3.1: Aufladevorgang [11]



Für die Anwendung des Erdschlusswischerverfahrens werden die Verlagerungsspannung und die Nullströme der einzelnen Abgänge messtechnisch erfasst. Beim Überschreiten des Schwellwertes der Verlagerungsspannung werden die Augenblickswerte der Verlagerungsspannung und der Nullströme verglichen. In Abbildung 3.2 sind die Messgrößen dargestellt. Im fehlerhaften Abgang haben die Verlagerungsspannung und der Nullstrom entgegengesetzten Polarität, in den gesunden Abgängen haben hingegen die Nullspannung und der zugehörige Nullstrom die gleiche Polarität [11].

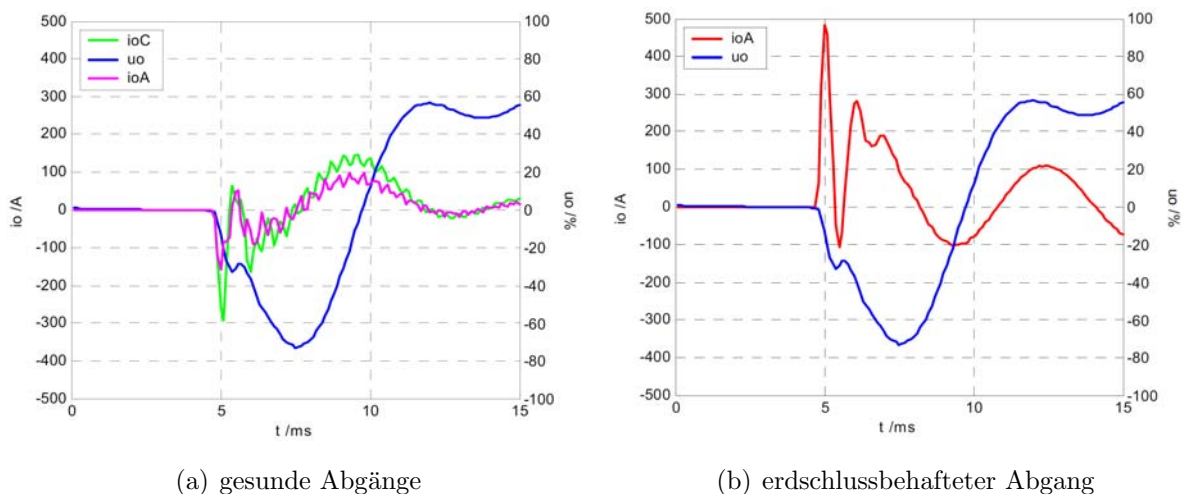


Abbildung 3.2: Transienter Vorgang [11]

Vorteile [21]:

- Holmgreen-Schaltung
- Eindeutige Anzeige bei dezentralen Erdschlussspulen

Nachteile [21]:

- Bei einem Erdschluss in der Nähe des Nulldurchganges des Nullstroms des fehlerhaften Abganges kann es zu Fehlinterpretation kommen
- Nur für niederohmige Erdfehler ( $< 50 \Omega$ ) geeignet
- Keine Ortung von stehenden Erdschlüssen
- Ortung ist nicht wiederholbar, auch nicht im Zuge von Netzumschaltungen (Suchschaltungen)

Einsatzgebiet [21]:

Das Wischerverfahren eignet sich sehr gut für Stichleitungen und Parallelleitungen. Auch bei mehrfach gespeisten und vermaschten Netzen ist eine Feststellung des Fehlerortes möglich.

### 3.2.1 Erdschlusswischerverfahren mit qu-Algorithmus

Erdschlusswischerverfahren mit qu- Algorithmus nutzen den Zusammenhang zwischen Nullspannung und Nullstrom aus der Gleichung (3.1) [11]. Durch die Aufladeströme der Leiter-Erde-Kapazitäten baut sich eine Verlagerungsspannung auf. Das Integral des Nullstromes entspricht dabei der Ladung. Für die Auswertung wird die Ladung über der Verlagerungsspannung aufgetragen. In einem gesunden Abgang ist die Ladung proportional zur Nullspannung und es entsteht eine Gerade (siehe Abbildung 3.3). Im fehlerbehafteten Abgang besteht der Zusammenhang aus Gleichung (3.1) nicht mehr, und es entsteht somit auch keine Gerade mehr.

Durch das Überschreiten des Schwellwertes der Verlagerungsspannung wird die Auswertung gestartet. Dabei werden die Daten vom letzten Nulldurchgang der Verlagerungsspannung aus dem Speicher der digitalen Relais geladen.

$$U_0(t) = U_0(t_0) + \frac{1}{C_E} \int I_0(\tau) d\tau \quad (3.1)$$

$U_0$	Nullspannung
$I_0$	Nullstrom
$C_E$	Leiter-Erde-Kapazität

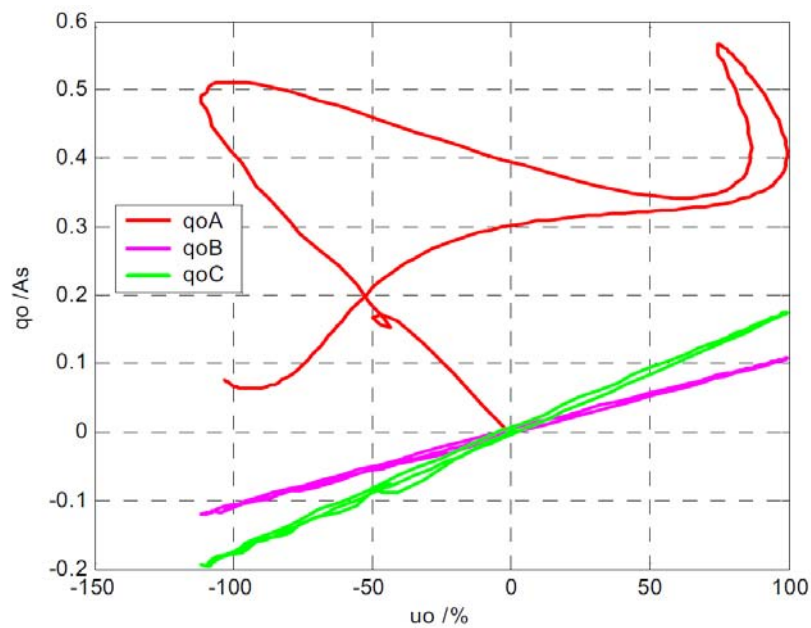


Abbildung 3.3:  $q_u$ -Diagramm eines niederohmigen Fehlers [11]

Vorteile [21]:

- Holmgreen-Schaltung anwendbar
- Eindeutige Anzeige bei dezentralen Erdschlussspulen
- Auch für hochohmige Fehler (1 bis 2 k $\Omega$ ) geeignet
- Geeignet für wiederzündende und intermittierende Erdschlüsse

Nachteile [21]:

- Keine Ortung von stehenden Erdschlüssen
- Ortung ist nicht wiederholbar, auch nicht im Zuge von Netzumschaltungen (Suchschaltungen)

Einsatzgebiet [21]:

Das Verfahren eignet sich sehr gut für Stichleitungen und meist für Parallelleitungen, bei mehrfach gespeisten und vermaschten Netzen ist eine Feststellung des fehlerhaften Abganges im Gegensatz zum Standardwischerverfahren nicht mehr möglich.

### 3.2.2 Erdschlusswischerverfahren mit qu2-Algorithmus

Bei Ringnetzen oder vermaschten Netzen ist der Zusammenhang zwischen Nullstrom und Nullspannung aus Gleichung (3.1) nicht mehr gegeben, da aufgrund der unterschiedlichen Längsimpedanzen sich bereits unterschiedliche Ringströme ausbilden. Um das Problem der Ringströme im gesunden Betrieb zu lösen, wird für den qu-Algorithmus eine Linearisierung um den Arbeitspunkt und eine adaptive Störunterdrückung in den Eingangssignalen der Relais durchgeführt [11].

Vorteile [21]:

- Holmgreen-Schaltung anwendbar
- Eindeutige Anzeige bei dezentralen Erdschlussspulen
- Funktioniert auch bei Parallelleitungen
- Auch für hochohmige Fehler (1 bis 2 k $\Omega$ ) geeignet
- Geeignet für wiederzündende und intermittierende Erdschlüsse

Nachteile [21]:

- Keine Ortung von stehenden Erdschlüssen
- Ortung ist nicht wiederholbar, auch nicht im Zuge von Netzumschaltungen (Suchschaltungen)

Einsatzgebiet [21]:

- Das Verfahren eignet sich sehr gut für Stichleitungen und Parallelleitungen, bei mehrfach gespeisten und vermaschten Netzen oder Ringnetzen wird die Erkennung des Fehlerortes verbessert.

### 3.3 Wattreststromerfassung

Bei der Erdschlussortung in einem gelöschten Netz durch die Wattreststromerfassung wird der verbleibende Wirkstromanteil des Erdschlussstromes für die Ortung herangezogen. Der Wattreststrom fließt, wie in Abbildung 3.4 dargestellt, von der Petersenspule über den kranken Abgang zur Fehlerstelle. Der kranke Abgang wird dabei durch die Richtung des Wattreststromes bestimmt. Um den Wattreststrom zu erfassen, welcher im Verhältnis zu den kapazitiven Strömen relativ klein ist, sind winkelgetreue Strom- und Spannungswandler erforderlich.

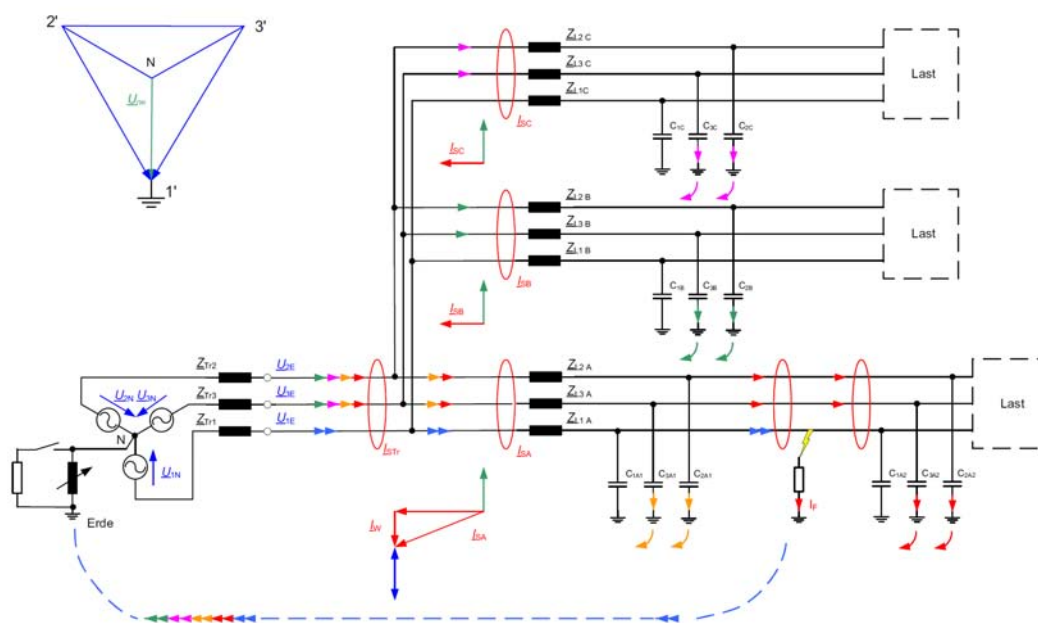


Abbildung 3.4: Prinzip Wattreststromerhöhung [11]

Durch das Zuschalten eines Widerstandes parallel zur Petersenspule besteht die Möglichkeit, den Wattreststrom zu erhöhen, wodurch eine leichtere Erfassung des kranken Abganges möglich ist. Die Einhaltung der Berührungsspannung an der Fehlerstelle aus Abbildung 2.3 muss dabei gewährleistet sein.

Folgende grundsätzliche Verfahren werden verwendet [11]:

- Dauernde Wattreststromerhöhung um 5 bis 10 A
- Wattreststromerhöhung von 5 bis 20 A während des gesunden Betriebes bis einige Sekunden nach dem Erdschlusseintritt
- Kurzzeitige Wattreststromerhöhung im Bereich von 300 A
- Kurzzeitige Wattreststromerhöhung im Bereich von 1200 - 2000 A ( KNOSPE )

Die kurzzeitige Wattreststromerhöhung wird durch die Verlustleistung des Widerstandes sowie durch die Auslegung der Erdungsanlage begrenzt.

Vorteile [21]:

- Ortung von stationären Erdschlüssen
- Wiederholbare Ortung

Nachteile [21]:

- Bei kleinen Strömen sehr empfindlich auf Winkelfehler
- Holmgreenschaltung nur bei Wattreststromerhöhung anwendbar, ohne Wattreststromerhöhung müssen Kabelumbauwandler eingesetzt werden
- Bei dezentralen Erdschlussspulen nicht immer eindeutige Fehlerortung möglich
- Technischer Aufwand

Einsatzgebiet [21]:

- Funktioniert für kleine Ströme schlecht bei Parallelleitungen und vermaschten Netzen, ein Stichbetrieb ist notwendig.

### 3.4 Oberschwingungsortung

Das Oberschwingungsortungsverfahren nutzt die durch nichtlineare Lasten entstehenden Oberschwingungsströme. Verwendung findet in der Regel die 5. Oberschwingung, für die das gelöschte Netz als isoliertes Netz angesehen werden kann, da die Petersenspule für die 5. Oberschwingung hochohmiger und die Leiter-Erde-Kapazitäten hingegen niederohmiger werden.

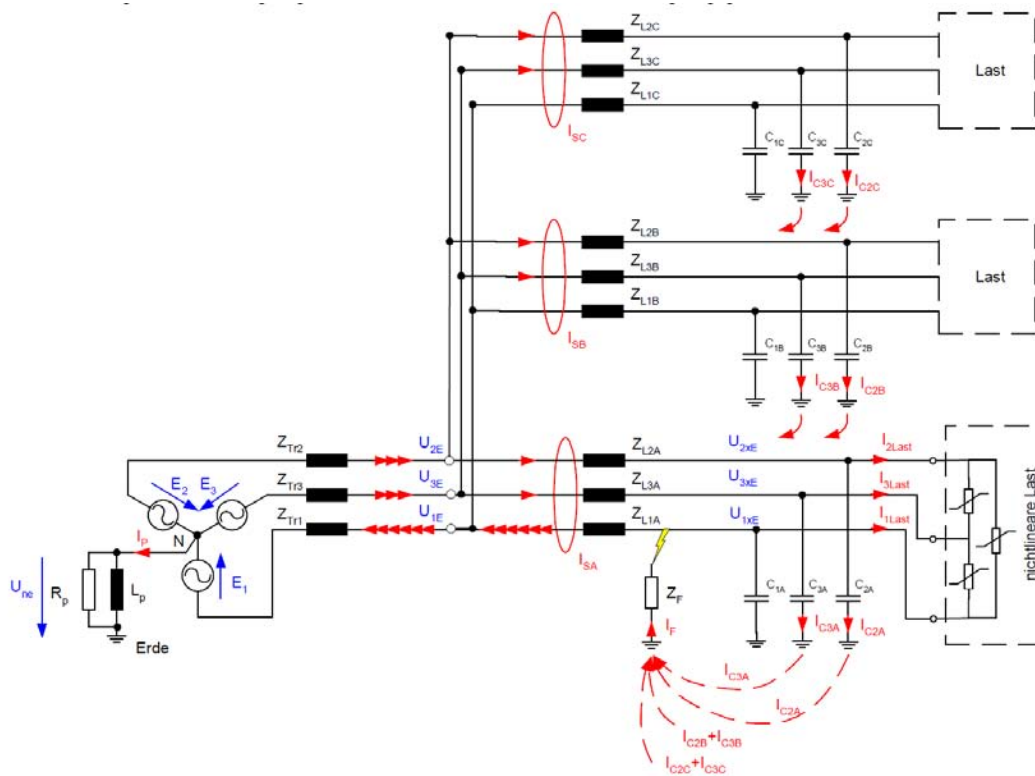


Abbildung 3.5: Prinzip Oberschwingungsortung [7]

Vorteile [21]:

- Ortung von stationären Erdschlüssen
- Oberschwingungen erforderlich
- Anforderungen an die Genauigkeit der Strom- und Spannungswandler sind gering

Nachteile [21]:

- Holmgreen-Schaltung nicht anwendbar
- Nur für niederohmige Fehler geeignet
- Werden die Oberschwingungsstrompegel miteinander verglichen, wird eine interne Kommunikation notwendig
- Schwankender Pegel der Oberschwingungsspannungen mit Tages-/Wochenverlauf

Einsatzgebiet [21]:

- Bevorzugt bei Stichtrieb, mit reinen Kabel- oder Freileitungsnetzen

### 3.5 Pulsortung

Bei der Pulsortung wird an die Leistungshilfswicklung der Petersenspule ein Kondensator zyklisch zugeschaltet, wodurch sich die Verstimmung des Netzes ändert. In einem Netz, das überkompensiert betrieben wird, ergibt sich durch das Zuschalten eine Stromänderung in Richtung Vollkompensation. Dabei verringert sich der Summenstrom im kranken Abgang und erhöht sich geringfügig in den gesunden Abgängen.

Für niederohmige Fehler ist eine symmetrische Taktgenerierung ausreichend, da der Nullstrom nur über die Fehlerstelle fließen kann. Bei hochohmigen Fehlern hingegen erfolgt eine Beeinflussung der Verlagerungsspannung, wodurch sich die kapazitiven Ströme auch in den gesunden Abgängen ändern und so eine Kopplung zu den gesunden Abgängen entsteht. Mit Hilfe einer unsymmetrischen Taktung, bei der die gesunden Abgänge invers zur Änderung im kranken Abgang sind, kann die Beeinflussung kompensiert werden.

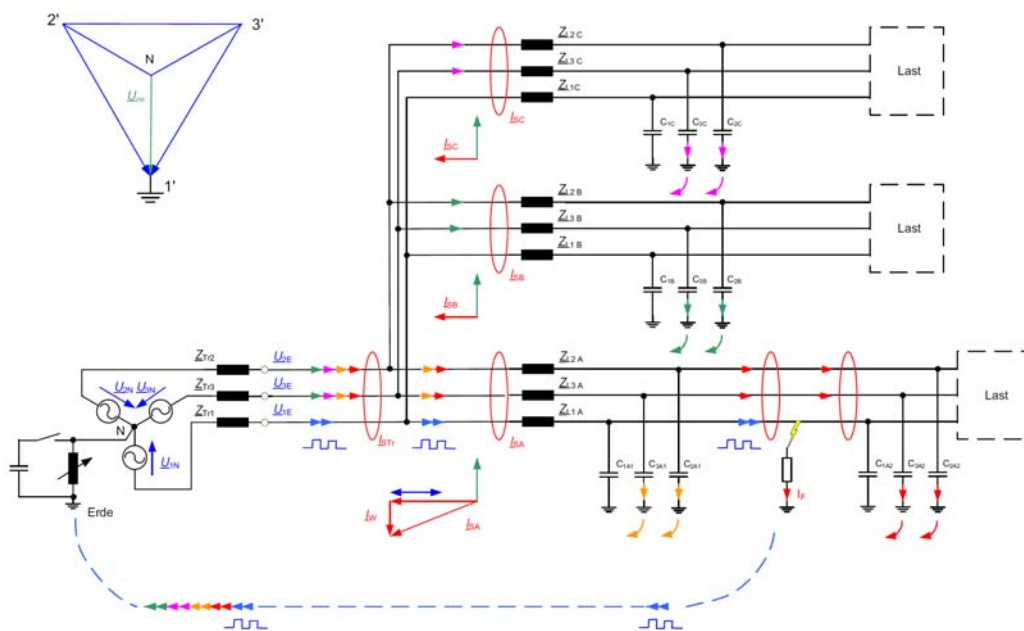


Abbildung 3.6: Prinzip der Pulsortung [11]



Vorteile [21]:

- Ortung von stationären Erdschlüssen
- Wiederholbare Ortung
- Einfache Tiefenortung möglich
- Holmgreen-Schaltung anwendbar

Nachteile [21]:

- Bei Änderung der Netzgröße muss der Kondensator neu dimensioniert werden
- Technischer Aufwand, Netzleittechnik

Einsatzgebiet [21]:

- Bevorzugt Stichbetrieb

## 3.6 Admittanzverfahren

Beim Admittanzverfahren werden die Admittanzen des erdschlussbehafteten Netzes aus der Nullspannung und dem Nullstrom berechnet und mit den Referenzwerten aus dem gesunden Betrieb verglichen.

Folgende Methoden zur Berechnung der Admittanzen sind möglich [11]:

- Verwendung der aktuellen 50 Hz Messwerte

$$\underline{Y} = \frac{\underline{I}_0}{\underline{U}_0} = G + jB \quad (3.2)$$

- Verwendung von 50 Hz Differenz-Messwerten zu unterschiedlichen Zeitpunkten

$$\Delta \underline{Y} = \frac{\Delta \underline{I}_0}{\Delta \underline{U}_0} = \Delta G + j\Delta B \quad (3.3)$$

- Verwendung von Messwerten ungleich 50 Hz zum gleichen Zeitpunkt

$$\underline{Y}_{fn} = \frac{\underline{I}_{0fn}}{\underline{U}_{0fn}} = G + j \left( \omega_n C - \frac{1}{\omega_n L} \right) \quad (3.4)$$

Als zusätzliches Ergebnis dieser Berechnung erhält man die Leitungskapazität des Abganges und die Induktivität von verteilt installierten Petersenspulen [11].

### 3.7 Erdschlussortung durch Feldmessung

Es gibt einige Verfahren, die über eine Feldmessung eine Erdschlussortung durchführen. Eines der bekanntesten Verfahren wurde 1981 von DI Prause am Europäischen Patentamt zum Patent angemeldet. In der Patentschrift wird ein Verfahren und das dazugehörige Gerät zur Erdschlussfernortung an Starkstromfreileitungen vorgestellt. In Abbildung 3.7 ist das Funktionsprinzip des Ortungsgerätes dargestellt.

Die Ortung erfolgt, indem in der Umgebung der Freileitung mit zwei einen Winkel miteinander einschließenden Antennen (1,2) die Größe des von einer bestimmten Oberschwingung des Netzstromes erzeugten Feldes, oder die Größe und/oder das Verhältnis zweier einem Winkel miteinander einschließenden Komponenten des von der bestimmten Oberschwingung erzeugten Feldes gemessen und angezeigt wird, so dass die Lokalisierung des Fehlers durch Abtastung einer sprunghaften Änderung wenigstens eines von den Anzeigeeinrichtungen (10,11) abgelesenen Messwertes erfolgt [18].

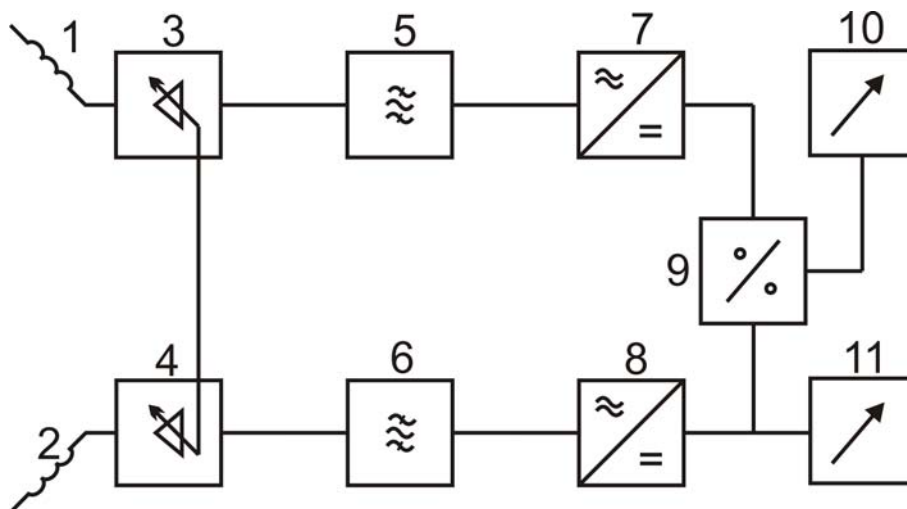


Abbildung 3.7: Funktionsprinzip des Ortungsgerätes [18]

1,2	induktive Rezeptoren
3,4	Verstärker
5,6	Filter
7,8	AC/DC-Wandler
9	quotientenbildende Einheit
10,11	Anzeigeeinheit

## 4 Erdschlussortung durch Fremdstromspeisung

Beim Erdschlussortungsverfahren durch Fremdstromspeisung wird ein nicht netzfrequenter Ortungsstrom in die Fehlerschleife eingebracht. Der Ortungsstrom ruft dabei ein Magnetfeld hervor, durch welches die Verfolgung der Fehlerschleife mittels einer Magnetfeldsonde möglich ist.

Die Magnetfeldsonden können als mobile oder ortsfeste Sonden ausgeführt sein. Mit Hilfe von mobilen Ortungssonden, die z.B. auf Schaltstangen montiert sind, kann das Bedienungspersonal durch das Abschreiten der Leitung den Fehlerort lokalisieren oder den fehlerhaften Abgang feststellen. Ortsfeste Sonden werden in den Netzabzweigungen angebracht. Bei einer Vielzahl von Sonden, die durch eine Leittechnik zentral erfasst werden, besteht die Möglichkeit einer automatischen selektiven Erfassung und Abschaltung des Fehlers.

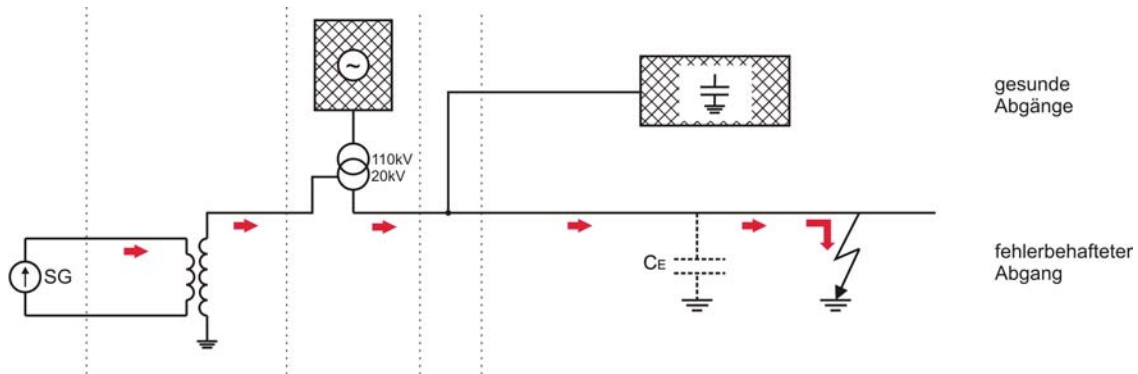
Zusätzlich zu der Ortung während dem Betrieb besteht auch die Möglichkeit, dieses Verfahren in einem abgeschalteten Netz anzuwenden. Es ist somit nicht zwingend notwendig, das Netz mit einem Erdschluss weiterzubetreiben, wodurch die Betriebsmittel nicht zusätzlich durch die Spannungserhöhung beansprucht werden. Damit kann die Gefahr von stromstarken Doppelerdschlüssen verringert werden.

Die Einspeisung des Ortungsstromes kann dabei auf unterschiedliche Arten erfolgen.

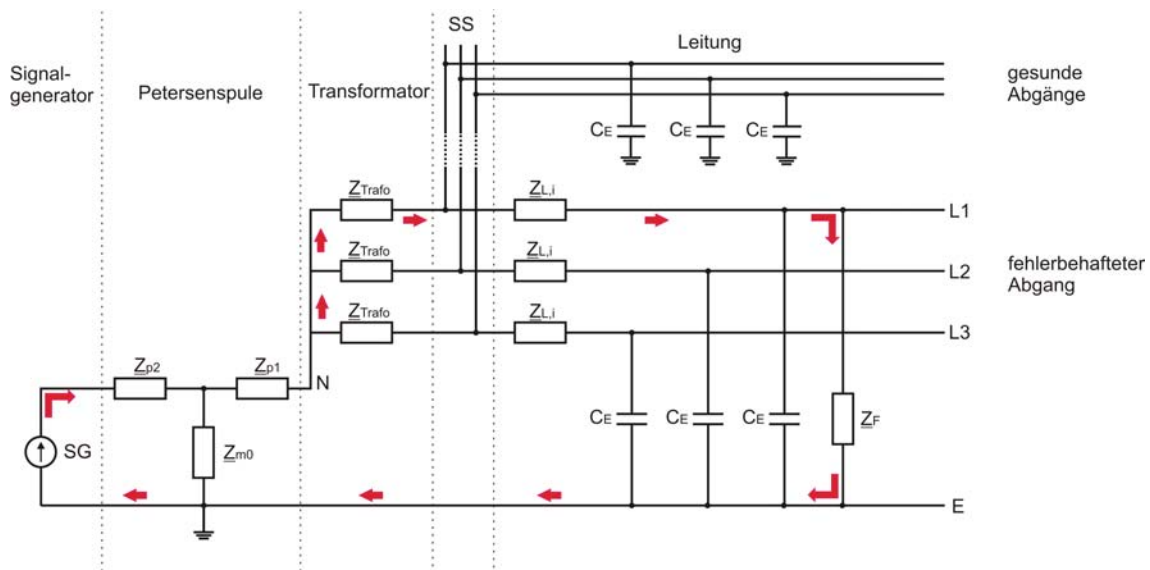
- Zentral in das Nullsystem (Petersenspulenhilfswicklung)
- Direkt in die fehlerbehaftete Phase mittels der Tonfrequenzrundsteuerung
- Direkt in die fehlerbehaftete Phase durch mobile Generatoren

## 4.1 Stationäre Einspeisung

In den Abbildungen 4.1(a) und 4.1(b) ist die Einspeisung des Ortungsstromes in die Petersenspulenhilfswicklung in Form eines Einlinienschaltbildes sowie in dreiphasiger Darstellung abgebildet. Die Petersenspule wird dabei ausgehend vom Ersatzschaltbild aus Kapitel 5.3 dargestellt.



(a) Einlinienschaltbild



(b) Dreiphasige Darstellung

Abbildung 4.1: Stationäre Einspeisung des Ortungsstromes

Der eingespeiste Ortungsstrom fließt entlang der Leitung zur Fehlerstelle und ermöglicht damit die Verfolgung der Fehlerschleife. Die Leistung, um einen über das Magnetfeld de-

tektierbaren Strom in der kranken Phase zu erreichen, ist abhängig von den Kapazitäten im gesamten Netz. Dabei werden die Leiter-Erde-Kapazitäten der gesunden Abzweige konzentriert dargestellt. Wie aus obiger Darstellung erkennbar ist, handelt es sich bei dieser Anordnung um einen Parallelschwingkreis des Ortungsstromes. Entscheidend für die benötigte Leistung ist dabei die Wahl der Frequenz.

Begrenzt wird diese Art der Einspeisung durch die maximal übertragbare Leistung der Petersenspulenwicklung und die Leistung des Signalgenerators.

## 4.2 Mobile Einspeisung

Die Erdschlussortung durch Fremdstromspeisung bietet auch gegenüber den in Kapitel 3 vorgestellten Verfahren eine Möglichkeit der Ortung in einem abgeschalteten Netzteil. Vor allem bei einigen Kabelnetzen wird der fehlerbehaftete Abgang abgeschaltet, um die Spannungsbeanspruchung für die Betriebsmittel so gering als möglich zu halten. Für die genaue Lokalisierung kann nun die mobile Erdschlussortung, bestehend aus einem batteriebetriebenen Signalgenerator und der Sonde herangezogen werden. In Abbildung 4.2 ist die Einspeisung eines mobilen Generators in einem abgeschalteten Netzteil dargestellt. Die Einspeisung erfolgt direkt in die fehlerhafte Phase. Die zu erwartende Leistung ist geringer als bei einer Einspeisung in das Nullsystem mittels Petersenspule.

Die Leistungsgrenzen für die mobile Einspeisung sind durch den Batteriebetrieb des Signalgenerators gegeben.

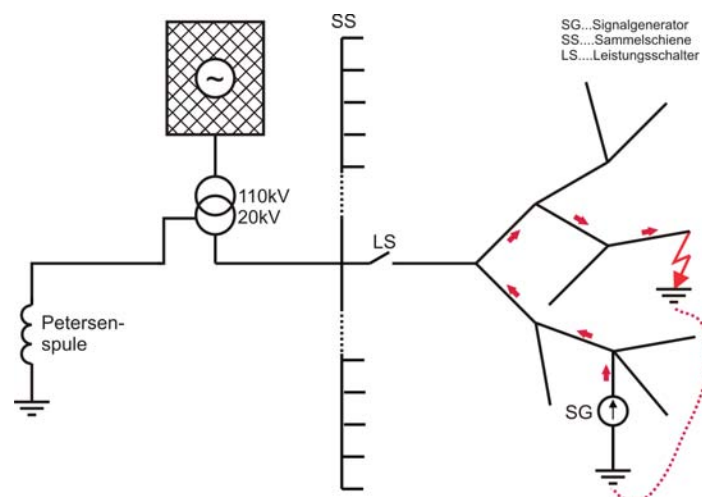


Abbildung 4.2: Mobile Einspeisung des Ortungsstromes

### 4.3 Magnetfeldsonde

Für eine Verfolgung der Fehlerschleife ist eine Erfassung des magnetischen Feldes notwendig. An der TU Graz ist ein erster Prototyp einer Magnetfeldsonde entwickelt worden, der auch schon in Feldversuchen getestet wurde. Der entscheidende Parameter für die Sonde ist der Detektionspegel, bei dem ein sicheres Ansprechen der Sonde stattfindet. Der Detektionspegel ist vom Abstand zum Leiter und von der Empfindlichkeit der Sonde abhängig. Im Rahmen der Feldversuche ist ein Detektionspegel für den Prototyp (siehe Abbildung 4.3) bei direktem Kontakt mit dem Leiter von 4,2 A ermittelt worden [19].

Für die Erfassung des magnetischen Feldes ist im Prototyp eine Sensorspule verbaut. Durch die zeitliche Veränderung des magnetischen Feldes wird in die Sensorspule eine Spannung induziert, die dem magnetischen Feld und den Spulendaten (Windungsanzahl, Querschnittfläche der Sensorspule) proportional ist.

Eine weitere Möglichkeit, um ein magnetisches Feld zu messen, sind Sonden, die aus Halbleitern aufgebaut sind. Dazu wird ein stromdurchflossener Hallsensor senkrecht in das zu messende Magnetfeld eingebracht. Die dadurch entstehende Ausgangsspannung vom Halbleiter ist dem magnetischen Feld und dem Strom proportional. Bei bekanntem Strom kann das magnetische Feld ermittelt werden.

Das magnetische Feld eines stromdurchflossenen Leiters kann mit Gleichung 4.1 berechnet werden.

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I_{krank}}{2\pi r} = \frac{4\pi 10^{-7} \frac{Vs}{Am} \cdot 10A}{2\pi \cdot 0,05m} = 12,7\mu T \quad (4.1)$$

$B$	magnetische Feldstärke in Tesla
$\mu_0$	Permeabilität in $\frac{Vs}{Am}$
$I_{krank}$	Ortungsstrom in A
$r$	Abstand vom Leiter in m

Es besteht ein linearer Zusammenhang zwischen dem magnetischen Feld und dem Leiterstrom. Das magnetische Feld nimmt mit  $1/r$  ab, wodurch es notwendig ist, den Abstand der Sonde so gering als möglich zu halten. Ein Leiter mit einem Strom von 10 A und einem Abstand von 5 cm ruft ein magnetisches Feld von  $12,7 \mu$ -Tesla hervor.

Für die Auswertung der relevanten Frequenz ist es notwendig, einen Filter einzubauen, oder es erfolgt eine Signalanalyse mittels FFT, wie sie in den Feldmessgeräten zur Verfügung stehen. Die Genauigkeit der Sonde ist nur von den Kosten abhängig. Teure Messgeräte ermöglichen eine Feldmessung bis in den Nano-Tesla-Bereich. In Abbildung 4.4 ist der Prototyp für die mobile Ortung dargestellt.



Abbildung 4.3: Prototyp der Magnetfeldsonde



Abbildung 4.4: Magnetfeldsonde für den mobilen Einsatz

# 5 Beschreibung des Simulationsmodells

In Abschnitt 5.1 werden die unterschiedlichen Modelle für die nachfolgenden Untersuchungen definiert. Bei den zwei Modellnetzen handelt es sich um Mittelspannungsnetze mit 20 kV Nennspannung, die realen Netzen nachmodelliert sind. Aufgrund der fehlenden Zugänglichkeit von Daten der Petersenspule sowie der Bedeutung für die Simulation erfolgt eine detaillierte Betrachtung in Abschnitt 5.3.

## 5.1 Netztopologie eines Mittelspannungsnetzes

Mittelspannungsnetze haben die Aufgabe, die elektrische Energie aus dem übergeordneten Hochspannungsnetz flächendeckend zu verteilen. Die grundsätzlichen Netzformen sind Strahlennetze, Ringnetze und Maschennetze. Aufgrund der einfachen Betriebsweise sowie der Übersichtlichkeit bei der Fehlersuche werden im Mittelspannungsbereich vor allem Strahlennetze verwendet. Dabei verlaufen die Stickleitungen strahlenförmig von der Sammelschiene des Umspannwerkes weg hin zu den einzelnen Ortsnetzstationen.

Um eine höhere Versorgungssicherheit zu gewährleisten, werden auch Ringnetze eingesetzt. Dabei besteht die Möglichkeit, die Enden zweier Strahlen betriebsmäßig zu verbinden. Im Falle eines Kurzschlusses können nach dem Heraustrennen des betroffenen Teilstücks die restlichen Verbraucher von der nicht gestörten Stickleitung weiter versorgt werden. Im ungestörten Betrieb ist jedoch die Verbindung geöffnet, wodurch wieder ein Strahlennetz entsteht.



Die größte Versorgungssicherheit bieten die vermaschten Netze. Dabei wird jeder Knoten bzw. Zweig mehrfach versorgt. Generell lässt sich sagen, dass aufgrund des durch die Strommarktliberalisierung ausgelösten Kostendruckes eng vermaschte Netze rückläufig sind [22].

In Abbildung 5.1 ist ein Mittelspannungsnetz in der Form einer Wabenstruktur dargestellt. Diese Wabenstruktur soll die flächendeckende Versorgung durch ein Mittelspannungsnetz symbolisieren. Es handelt sich dabei um ein vereinfachtes Modell, welches einem typischen Mittelspannungsnetz entspricht. Ausgeführt ist es als offener Ring, wodurch wieder ein Strahlennetz entsteht. Diese Netze können je nach landschaftlichen Gegebenheiten unterschiedliches Aussehen annehmen.

Ausgehend vom Umspannwerk werden die einzelnen Strahlen gespeist. Jeder Strahl wiederum versorgt mehrere Ortsnetzstationen, die ihrerseits Endverbraucher im Umkreis von typischerweise 250 - 500 Meter versorgen [22].

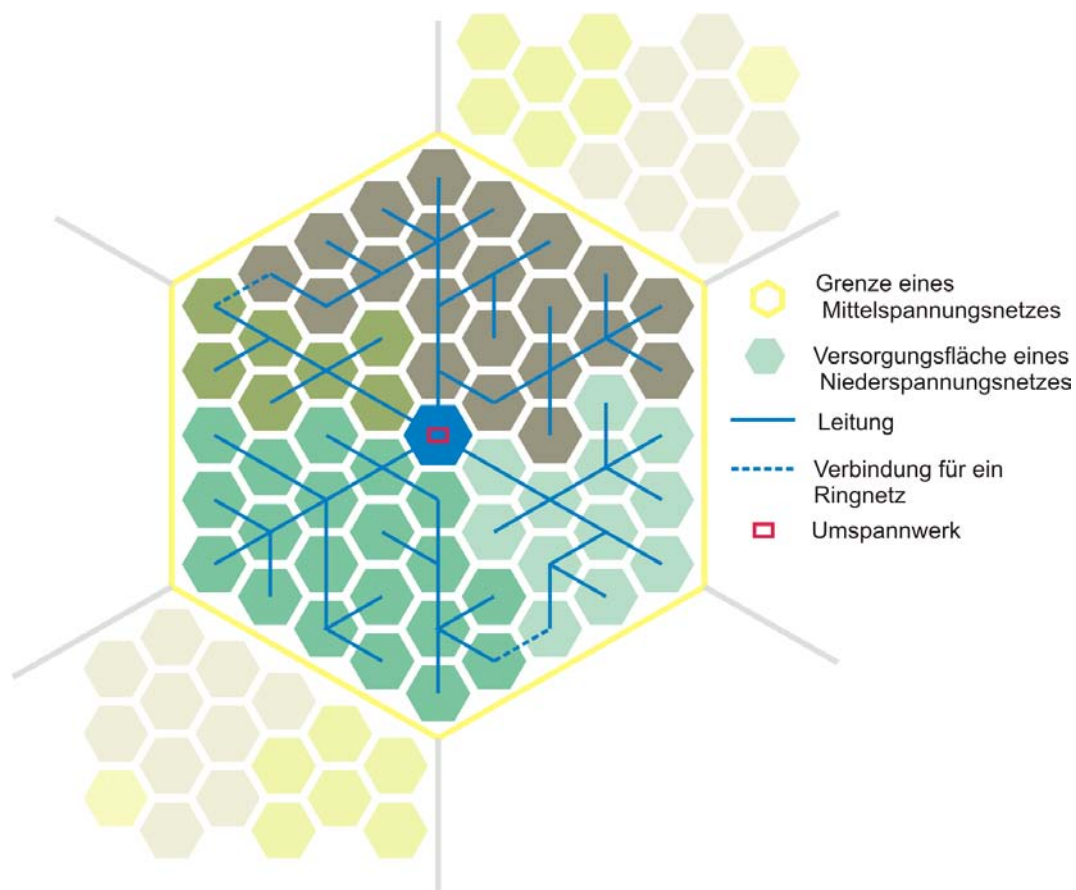


Abbildung 5.1: Mittelspannungsnetz als Wabenstruktur

Aus dieser einfachen Struktur werden in weiterer Folge die Modellnetze für die Simulation abgeleitet.

Für die Simulation des Erdschlussortungsverfahrens werden zwei Modellnetze definiert. Es handelt sich dabei um ein reines Kabelnetz bzw. ein gemischtes Netz. Untersuchungen für reine Freileitungsnetze werden nicht durchgeführt, da diese kaum mehr vorhanden sind.

Als Ausgangspunkt für die Modellbildung wird ein reines Kabelnetz mit einem kapazitiven Erdschlussstrom von 250 A angenommen. Dieser Strom entspricht einem typischen gelöschten Mittelspannungsnetz. Für die Netzausdehnung ( $l_{Netz}$ ) ergibt sich bei einer Verwendung eines Kabels mit einem kapazitiven Erdschlussstrom von 2,4 A/km eine Länge von 105 km.

$$l_{Netz} = \frac{I_{CE,Netz}}{I'_{CE,K}} = \frac{250A}{2,4 \frac{A}{km}} = 105km \quad (5.1)$$

$l_{Netz}$	Netzausdehnung in km
$I_{CE,Netz}$	kapazitive Ströme im Netz in A
$I'_{CE,K}$	längenbezogene kapazitive Ströme eines Kabels in $\frac{A}{km}$

Es erfolgt eine gleichmäßige Verteilung auf zehn Abgänge. Jeder Strahl/Abgang wird wiederum in sieben gleichmäßige Teilstücke unterteilt. Die Aufteilung eines einzelnen Abganges ist in Abbildung 5.2 dargestellt.

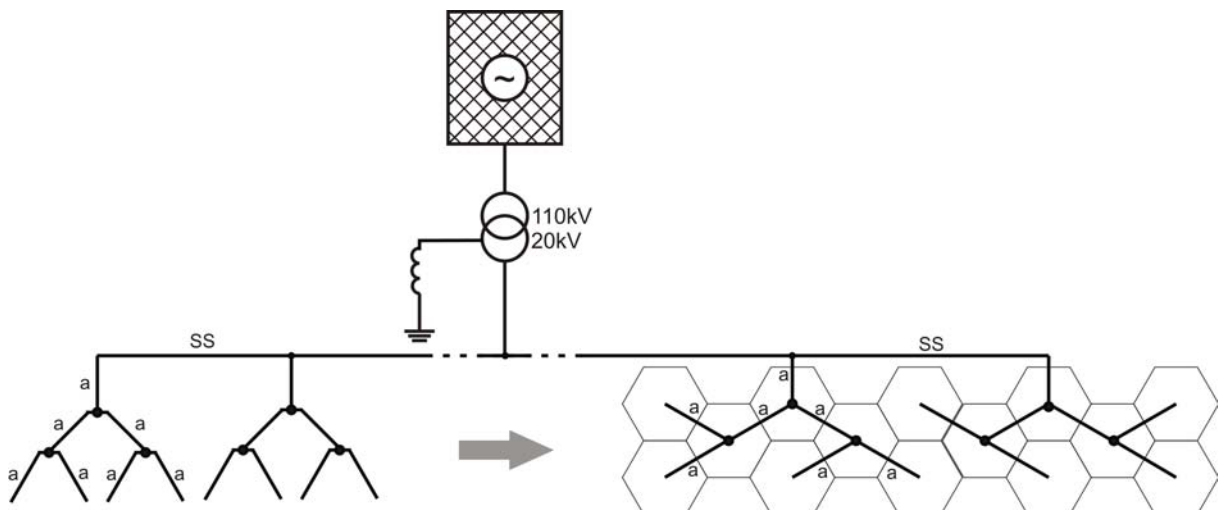


Abbildung 5.2: Netzstruktur für die Simulation

Für die einzelnen Teilstücke ergibt sich nach Gleichung 5.2 eine Länge von 1,5 km.

$$l_a = \frac{l_{Netz}}{n \cdot n_a} = \frac{105 km}{10 \cdot 7} = 1,5 km \quad (5.2)$$

$l_a$	Länge eines Leitungsteilstücks in km
$l_{Netz}$	Netzausdehnung in km
$n$	Anzahl der Abgänge
$n_{a,K}$	Anzahl der Kabelteilstücke

In Abbildung 5.3 sind die Modellnetze dargestellt. Das reine Kabelnetz entspricht einem Stadtnetz mit einem zentralen Umspannwerk, von dem aus die Verbraucherzellen gespeist werden.

Für das gemischte Netz wird eine typische ländliche Gegend mit einer Stadt und dem dazugehörigen Umland angenommen. Dabei erfolgt die innerstädtische Versorgung durch ein Kabelnetz mit der doppelten Teilstücklänge ( $l_{a,K} = 2 \cdot l_a = 3$  km). Die Ortsnetzstationen im Umland werden annahmegemäß durch Freileitungen mit der dreifachen Teilstücklänge ( $l_{a,Fr} = 3 \cdot l_a = 4,5$  km) versorgt. Der kapazitive Strom für das gemischte Netz wird mit den Leitungsparameter aus Tabelle 5.1 in Gleichung 5.3 berechnet.

$$\begin{aligned} I_{CE,Netz} &= I'_{CE,Fr} \cdot l_{a,Fr} \cdot n_{a,Fr} \cdot n + I'_{CE,K} \cdot l_{a,K} \cdot n_{a,K} \cdot n \\ &= 65,3 mA/km \cdot 4,5 km \cdot 6 \cdot 10 + 2,4 A/km \cdot 3 km \cdot 1 \cdot 10 = 88,2 A \end{aligned} \quad (5.3)$$

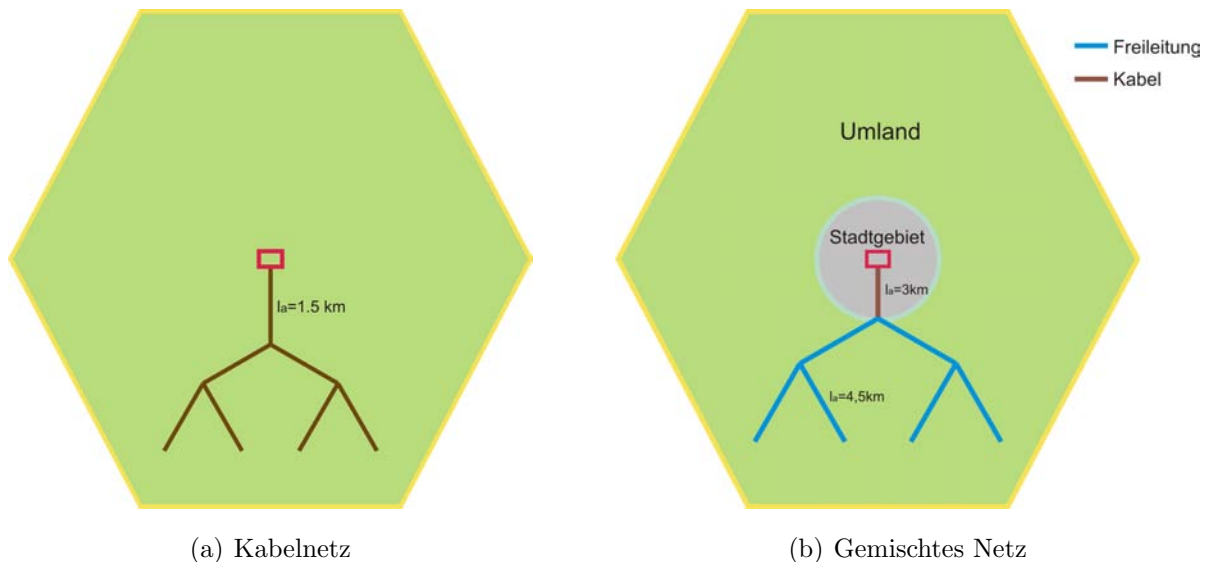


Abbildung 5.3: Modellnetze

## 5.2 Leitungsparameter

In Tabelle 5.1 sind typische Kenndaten von Freileitungen und Kabeln, wie sie in Mittelspannungsnetzen Verwendung finden, angegeben. Bevor die Werte im Simulink Modell verwendet werden können, erfolgt eine Umrechnung auf symmetrische Komponenten. Die Nullimpedanzen können nur durch Näherungen abgeschätzt werden, da sie von unterschiedlichen Faktoren (spezifischer Erdwiderstand, Kabelschirm, Schirmbehandlung, etc.) abhängig sind. Genaue Werte können nur durch eine Messung ermittelt werden. Es werden symmetrische Leitungen vorausgesetzt.

Bezeichnung	Typ	$R'$ $\Omega/\text{km}$	$X'_L$ $\Omega/\text{km}$	$C'_B$ $\text{nF}/\text{km}$	$C'_E$ $\text{nF}/\text{km}$	$I'_{CE}$ $\text{A}/\text{km}$
Stalu 95/15	Freileitung	0,306	0,355	10	6	0,065
N2XS2Y 1x95RM	Kabel	0,193	0,132	216	216	2,35

Tabelle 5.1: Kenndaten der im Modell verwendeten Leitungen [4]

### Berechnung der Freileitungsparameter:

$$R'_{Fr} = 0,306 \frac{\Omega}{\text{km}} \quad (5.4)$$

$$L'_{Fr} = \frac{X'_{L,Fr}}{\omega} = \frac{0,355}{2\pi 50} = 1,1 \frac{\text{mH}}{\text{km}} \quad (5.5)$$

$$C'_{Fr} = C'_B = 10 \frac{\text{nF}}{\text{km}} \quad (5.6)$$

Der ohmsche Widerstand des Nullsystems ergibt sich aus dem Leiterwiderstand und dem dreifachen wirksamen Erdwiderstand. Für den längenbezogenen Erdwiderstand  $R'_E$  werden  $50 \text{ m}\Omega/\text{km}$  eingesetzt [14].

$$R'^0_{Fr} = R'^1_{Fr} + 3 \cdot R'_E = 0,306 + 3 \cdot 0,05 = 0,456 \frac{\Omega}{\text{km}} \quad (5.7)$$

Das Verhältnis der Nullinduktivität zur Induktivität des Mitsystems (Betriebsinduktivität) beträgt bei einer 20 kV Freileitung ungefähr 3,3 [14].

$$L_{Fr}^0 = 3,3 \cdot L_{Fr}^1 = 3,3 \cdot 1,1 = 3,63 \frac{mH}{km} \quad (5.8)$$

$$C_{Fr}^0 = C'_E = 6 \frac{nF}{km} \quad (5.9)$$

### Berechnung der Kabelparameter:

Als Mittelspannungskabel wird eine Einleiterkabel mit einem Querschnitt von 95 mm<sup>2</sup> gewählt.

$$R_K^1 = 0,193 \frac{\Omega}{km} \quad (5.10)$$

$$L_K^1 = \frac{X'_{L,K}}{\omega} = \frac{0,132}{2\pi 50} = 430 \frac{\mu H}{km} \quad (5.11)$$

$$C_K^1 = C'_B = 216 \frac{nF}{km} \quad (5.12)$$

Für die Berechnung der Nullimpedanz des Kabels wird der Erdfaktor  $k_0$  herangezogen. In Mittelspannungsnetze kann dieser einfachheitshalber mit 1 angenommen werden [4].

$$Z_K^0 = Z_K^1 \cdot (3 \cdot k_0 + 1) \quad (5.13)$$

$$Z_K^0 = (0,193 + j0,132) \cdot (3 \cdot 1 + 1) = 0,772 + j0,528 \frac{\Omega}{km} \quad (5.14)$$

$$R_K^0 = 0,772 \frac{\Omega}{km} \quad (5.15)$$

$$X_{L,K}^0 = 0,528 \frac{\Omega}{km} \quad (5.16)$$

$$L_K^0 = \frac{X_{L,K}^0}{\omega} = \frac{0,528}{2\pi 50} = 1,7 \frac{mH}{km} \quad (5.17)$$

$$C_K^0 = C'_E = 216 \frac{nF}{km} \quad (5.18)$$

In Tabelle 5.2 sind die Leitungsparameter, wie sie in der Simulation verwendet werden, zusammengefasst.

Bezeichnung	Typ	$R^1$	$L^1$	$C^1$	$R^0$	$L^0$	$C^0$
		$\Omega/\text{km}$	$\text{mH}/\text{km}$	$\text{nF}/\text{km}$	$\Omega/\text{km}$	$\text{mH}/\text{km}$	$\text{nF}/\text{km}$
Stalu 95/15	Freileitung	0,306	1,1	10	0,456	3,63	6
N2XS2Y 1x95RM	Kabel	0,193	0,43	216	0,772	1,7	216

Tabelle 5.2: Leitungsparameter für die Simulation

### 5.3 Petersenspule

Die Petersenspule, benannt nach ihrem Erfinder Waldemar Petersen, wird zwischen dem Sternpunkt und der Erde geschaltet. Im einfachsten Fall ist sie als einphasige Drosselspule mit fester Induktivität ausgeführt. Da die Netztopologie ständigen Veränderungen unterworfen ist, ist es notwendig, die Induktivität für eine vorgegebene Verstimmung ständig anzupassen. Zwei grundsätzliche Ausführungsformen mit veränderlicher Induktivität sind:

- Tauchkernspulen
- Stufenspulen

Bei der in Abbildung 5.4 dargestellten Tauchkernspule erfolgt die Einstellung durch Vergrößern oder Verkleinern des Luftspaltes. Tauchkernspulen zeichnen sich durch eine stufenlose Einstellung der Induktivität (keine Schaltheilungen) und der Möglichkeit eines motorischen Antriebes der Gewindestange aus. Bei Stufenspulen erfolgt die Einstellung der Induktivität durch Zu- oder Abschalten von Windungsteilen im abgeschalteten Zustand. Eingestellt wird die Spule durch Abstimmungsversuche oder aufgrund der Berechnungen der kapazitiven Ströme im Netz. Bei Tauchkernspulen mit einem Petersenspulenregler gibt es aber auch die Möglichkeit eines automatischen Abgleichs. Dieser wird im gesunden Netz durchgeführt.

Petersenspulen besitzen in der Regel neben der Hauptwicklung auch noch eine Leistungshilfswicklung und eine Spannungsmesswicklung. Verwendet wird die Leistungshilfswicklung vor allem für die niederohmige Sternpunkterdung (KNOSPE), bei der kurzzeitig der ohmsche Anteil des Erdschlussreststromes erhöht wird. Ein Zusatzwiderstand wird dafür für einige Sekunden an die Leistungshilfswicklung angeschlossen.

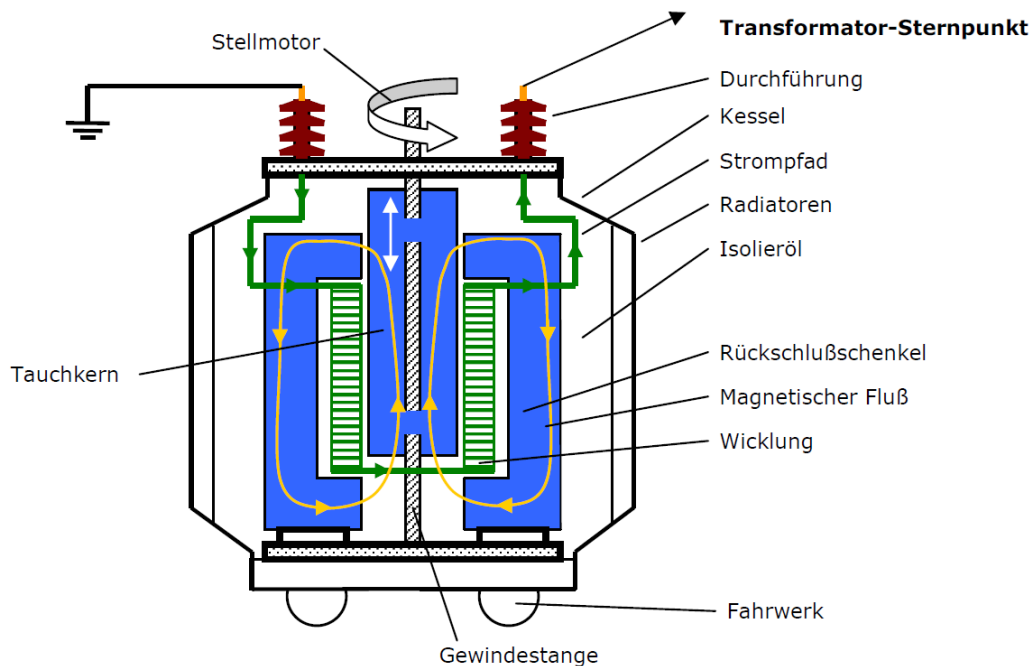


Abbildung 5.4: Aufbau einer Petersenspule [5]

### 5.3.1 Ersatzschaltbild

Bei der Petersenspule handelt es sich mit ihrer Hauptwicklung und einer Leistungshilfswicklung um einen Einphasentransformator. Um ein möglichst praxisnahes Simulationsmodell zu erstellen, bedarf es eines genauen Ersatzschaltbildes der Petersenspule als Einphasentransformator.

In der Regel werden die Parameter des Ersatzschaltbildes (siehe Abbildung 5.5) aus einem Leerlauf- und einem Kurzschlussversuch gewonnen. Eine weitere Möglichkeit ist, mit dem vom Hersteller zur Verfügung gestellten Kennwerten (Kurzschlussspannung, Eisenverluste, Kupferverluste,...), die Parameter zu bestimmen. Aufgrund der mangelnden Zugänglichkeit der Daten von Herstellern sowie der fehlenden Möglichkeit, Messungen an einer Petersenspule durchführen zu können, werden im Rahmen dieser Diplomarbeit die Kennwerte (z.B. Streureaktanz) mit den Daten aus einem Feldversuch für die Erdschlussortung durch Fremdstromspeisung ermittelt.

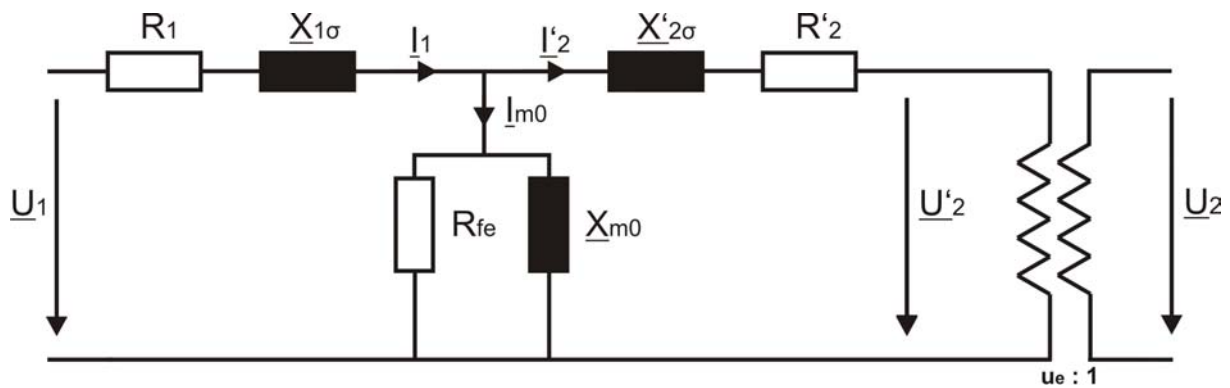


Abbildung 5.5: Transformatorersatzschaltbild

$\underline{U}_1, \underline{U}_2$	Primär- und Sekundärspannung einer Petersenspule in V
$\underline{I}_1, \underline{I}'_2$	Primär- und Sekundärstrom einer Petersenspule in A
$R_1, R'_2$	Wicklungswiderstände einer Petersenspule in $\Omega$
$\underline{X}_{1\sigma}, \underline{X}'_{2\sigma}$	Streuinduktivität einer Petersenspule in $\Omega$
$\underline{X}_{m0}$	Hauptinduktivität einer Petersenspule in $\Omega$
$\underline{I}_{m0}$	Magnetisierungsstrom einer Petersenspule in A
$R_{fe}$	ohmscher Widerstand für die Eisenverluste einer Petersenspule in $\Omega$

Im Zuge des Feldversuchs ist eine Petersenspule vom restlichen 20 kV Mittelspannungsnetz getrennt worden. Die durchgeführte Impedanzmessung bei kurzgeschlossener Hochspannungsseite ergab auf der Sekundärseite ( $\underline{U}_2 = 500 \text{ V}$ ) einen Wert von  $|\underline{Z}_K| = 43 \text{ m}\Omega$  [19].

$$|\underline{Z}_K| = 43 \text{ m}\Omega \quad (\text{bez. auf } 500\text{V}) \quad (5.19)$$

Bei der Petersenspule im Feldversuch handelte es sich um eine Tauchkernspule, die einen Einstellbereich von 40-400 A aufweist. Der Kurzschlussversuch wurde mit einer Spulenzugstellung von 230 A durchgeführt. Die Impedanz der Petersenspule ( $\underline{Z}_{Petersen}$ ) kann mit Gleichung 5.20 berechnet werden.

$$\underline{Z}_{Petersen} = \frac{U_N}{I_L \sqrt{3}} \quad (5.20)$$

Für die Berechnung der Transformatorparameter ist es notwendig das Verhältnis zwischen der Primärstreuinduktivität und der Hauptinduktivität ( $\sigma$ ) sowie das Übersetzungsverhältnis ( $u_e$ ) der Petersenspule zu bestimmen. Bei der Berechnung der Längszweige von Transformatoren werden die Querelemente in der Regel vernachlässigt wodurch die Kurzschlussimpedanz gleichmäßig auf die Primär- und Sekundärreaktanz der



Petersenspule aufgeteilt werden kann. Als erste Bedingung für das Gleichungssystem mit den beiden Unbekannten wird die Primärimpedanz in Abhängigkeit von  $\sigma$  angegeben. Diese setzt sich weiter aus der halben Kurzschlussimpedanz und dem Übersetzungsverhältnis der Petersenspule zusammen. Als zweite Bedingung muss das Übersetzungsverhältnis so gewählt werden, das trotz der Spannungsabfälle an den Längszweigen die Leerlaufspannung an der Leistungshilfswicklung 500 V beträgt. In Gleichung 5.22 wird der Spannungsabfall an der Hauptinduktivität der Leerlaufspannung der Leistungshilfswicklung gleichgesetzt.

### 1. Bedingung

$$\underbrace{\underline{Z}_{Petersen} \cdot \sigma}_{\underline{Z}_{p1}} = \frac{\underline{Z}_K}{2} \cdot u_e^2 \quad \left( \text{bez. auf } \frac{20kV}{\sqrt{3}} \right) \quad (5.21)$$

### 2. Bedingung

$$I_L \cdot \underbrace{(1 - \sigma) \cdot \underline{Z}_{Petersen}}_{\underline{Z}_{m0}} = \underline{U}_2 \cdot u_e \quad \left( \text{bez. auf } \frac{20kV}{\sqrt{3}} \right) \quad (5.22)$$

In Gleichung 5.23 ergibt sich die Reaktanz der Petersenspule mit 50,2  $\Omega$ , unter der Annahme das  $\underline{Z}_{Petersen} \approx \underline{X}_{Petersen}$  gilt.

$$\underline{Z}_{Petersen} \approx \underline{X}_{Petersen} = \frac{U_N}{I_L \sqrt{3}} = \frac{20kV}{230A \sqrt{3}} = 50,2 \Omega \quad \left( \text{bez. auf } \frac{20kV}{\sqrt{3}} \right) \quad (5.23)$$

In der quadratischen Gleichung 5.24 berechnet sich das Übersetzungsverhältnis mit 19,36. Das Verhältnis zwischen Primärstreinduktivität und der Hauptinduktivität beträgt 16,1%.

$$u_{e1,2} = \frac{\underline{U}_2 \pm \sqrt{\underline{U}_2^2 + 2 \cdot I_L^2 \cdot \underline{Z}_K \cdot \underline{Z}_{Petersen}}}{I_L \cdot \underline{Z}_K} = 19,36 \quad (5.24)$$

$$\sigma = \left( \frac{\underline{Z}_K \cdot u_e^2}{2 \cdot \underline{Z}_{Petersen}} \right) \cdot 100 = 16,1\% \quad (5.25)$$

Mit den ermittelten Parametern für  $\sigma$  und  $u_e$  können die Reaktanzen der Petersenspule in den Gleichungen 5.26 und 5.27 bestimmt werden.

$$\underline{X}_{1\sigma} = \underline{X}'_{2\sigma} = \underline{X}_{Petersen} \cdot \sigma = 8,07\Omega \quad (5.26)$$

$$\underline{X}_{m0} = (1 - \sigma) \cdot \underline{X}_{Petersen} = 42,13\Omega \quad (5.27)$$

Um die Annahme zu überprüfen, dass die Querelemente bei der Kurzschlussmessung zu vernachlässigen sind, wird die Kurzschlussimpedanz in Gleichung 5.28 mit den zuvor bestimmten Parameter für die Petersenspule berechnet.

$$\underline{Z}_K \approx \underline{X}_K = \left( \underline{X}_{1\sigma} + \frac{\underline{X}_{m0} \cdot \underline{X}'_{2\sigma}}{\underline{X}_{m0} + \underline{X}'_{2\sigma}} \right) \cdot \frac{1}{u_e^2} = 39,5m\Omega \quad (\text{bez. auf } 500V) \quad (5.28)$$

Durch den geringen Größenunterschied der Streuinduktivität zur Hauptinduktivität ergibt sich eine Abweichung der berechneten Kurzschlussimpedanz zu der gemessenen Kurzschlussimpedanz von 8%.

In Petersenspule treten Wirkverluste auf. Diese liegen im Allgemeinen im Bereich von 40 kW bis 80 kW und sind unabhängig von der Spannungsebene [7]. Die Wirkverluste setzen sich aus den Kupfer- und Eisenverlusten zusammen. Für die Berechnung des Ersatzschaltbildes wird eine gesamte Verlustleistung (Kupfer- und Eisenverluste) von 60 kW angenommen. Die Aufteilung der Verluste erfolgt mit einem Verhältnis von 3:1 ( $P_{cu} = 45kW$ ;  $P_{fe} = 15kW$ ). In den Gleichungen 5.29 und 5.30 werden die Widerstände, für die Berücksichtigung der Wirkverluste im Ersatzschaltbild, berechnet.

$$R_1 = \frac{P_{cu}}{I_L^2} = \frac{45kW}{(230A)^2} = 0,85\Omega \quad (5.29)$$

$$R_{fe} = \frac{U_2^2}{P_{fe}} \cdot u_e^2 = \frac{500V}{15kW} \cdot 19,36^2 = 6,26k\Omega \quad (R_{fe} \approx 150 \cdot \underline{X}_{m0}) \quad (5.30)$$

Die (Magnetisierungs-) Eisenverluste sind abhängig von der Spulenstellung und werden mit dem 150-fachen Wert der Hauptinduktivität berücksichtigt.

In Abbildung 5.6 ist das Ersatzschaltbild für die Petersenspule mit einem induktiven Löschspulenstrom von 230 A dargestellt.

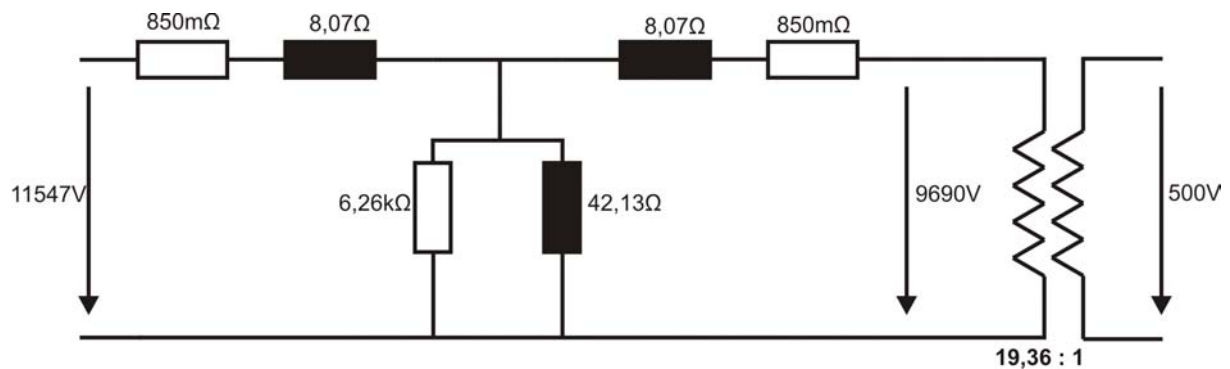


Abbildung 5.6: Ersatzschaltbild der Petersenspule für einen Löschspulenstrom von 230 A

Um einen Vergleich mit einem Transformator zur Energieübertragung durchführen zu können wird die relative Kurzschlussspannung ( $u_k$ ) der Petersenspule in Gleichung 5.31 berechnet.

$$u_k = \left( \frac{I_L \cdot \left( \underline{Z}_{p1} + \frac{\underline{Z}_{p1} \cdot \underline{Z}_{m0}}{\underline{Z}_{p1} + \underline{Z}_{m0}} \right) \cdot \sqrt{3}}{U_N} \right) \cdot 100 = 29,7\% \quad (5.31)$$

Transformatoren zur Energieübertragung, im Leistungsbereich der Petersenspule, weisen eine relative Kurzschlussspannung von 6-10% auf (siehe Tabelle 5.3). Das Verhältnis der Streuinduktivität zur Hauptinduktivität ( $\sigma$ ) wird für die nachfolgenden Berechnungen mit 0.15 angenommen. Der in diesem Abschnitt ermittelte Wert für  $\sigma$  dient lediglich als Abschätzung für Petersenspulen, da vor allem bei Tauchkernspulen die Streuinduktivität in Abhängigkeit der Stellung der Spule stark schwanken kann.

## 5.4 Transformator (HS-MS) und Hochspannungsnetz

Die Berechnung der HS-MS-Transformatorparameter erfolgt mit den Werten aus der Tabelle 5.3. In der Simulation wird ein Transformator mit einer Nennleistung von 25 MVA, mit der für gelöschte Netze typischen Dy-Schaltgruppe, verwendet. Diese Schaltgruppe bietet den Vorteil, dass Erdschlüsse nicht übertragen werden.

Leistung	$i_m$ %	$p_{fer}$ %	$u_k$ %	$u_{kw}$ %
100kVA	1,5%	0,25%	4%	1,3%
1MVA	0,75%	0,12%	6%	0,7%
10MVA	0,5%	0,08%	7-10%	0,5%
100MVA	0,25%	0,05%	8-12%	0,35%
1000MVA	0,15%	0,02%	10-15%	0,15%
25MVA	0,4%	0,07%	9%	0,45%

Tabelle 5.3: Kennwerte von Grosstransformatoren [9]

In Tabelle 5.4 sind die Parameter für die Simulation angegeben.

$R_{fe}$ $\Omega$	$L_{m0}$ H	$R_1$ $m\Omega$	$L_{1\sigma}$ mH	$R'_2$ $m\Omega$	$L'_{2\sigma}$ mH
22857	12,73	1089	69,2	1089	69,2

Tabelle 5.4: Transformatorparameter für Simulink  
(Bezogen auf die Hochspannungsseite)

Die Kurzschlussleistung des überlagerten Hochspannungsnetzes wird mit 1000 MVA und einem Kurzschlusswinkel von  $85^\circ$  angenommen.

## 6 Evaluierung

Für die Evaluierung der Erdschlussortung durch Fremdstromeinspeisung werden Simulationen mit MATLAB-Simulink durchgeführt. Das Ziel ist es dabei, die möglichen Grenzen sowie die Vor- und Nachteile dieses Verfahrens herauszuarbeiten. Dazu werden Untersuchungen hinsichtlich der Generatorfrequenz, Generatorleistung und dem Fehlerübergangswiderstand durchgeführt.

Eine besondere Bedeutung hat dabei die Wahl der Generatorfrequenz. Der an der TU Graz entwickelte Prototyp arbeitet mit einer Frequenz von 183 Hz [15]. Die nachfolgenden Simulationen sollen belegen, ob die Wahl der Frequenz für den Prototypen günstig war oder ob entscheidende Verbesserungen durch einen Frequenzwechsel möglich sind. Die benötigte Generatorleistung, um den Ortungsstrom in der Fehlerschleife zu treiben, ist der entscheidende Kostenfaktor und ist stark abhängig von der Frequenzwahl. Die Leistung des benötigten Signalgenerators soll so gering als möglich gehalten werden, aber trotzdem noch eine zuverlässige Ortung ermöglichen.

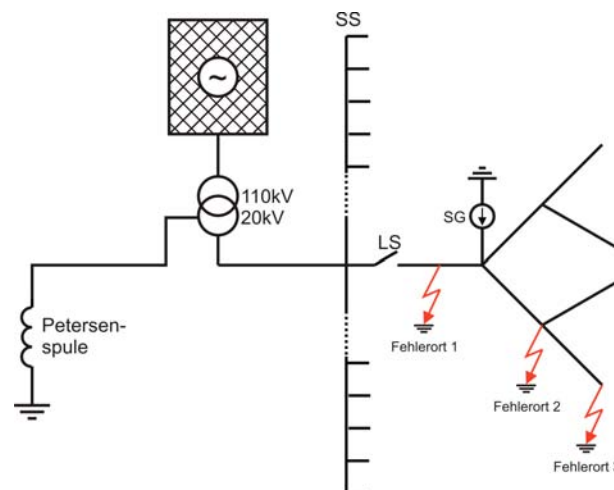


Abbildung 6.1: Gewählte Fehlerorte bzw. mobiler Einspeisepunkt für die Simulation

Der Fehlerwiderstand wird in der nachfolgenden Simulation als ohmscher Widerstand berücksichtigt. Die in Kapitel 3 vorgestellten Verfahren ermöglichen teilweise eine zuverlässige Ortung bis in den  $k\Omega$  Bereich und stellen damit eine Herausforderung für die Erdschlussortung durch Fremdstromeinspeisung dar. Um auch den Einfluss der Fehlerorte in die Berechnungen mit einfließen zu lassen, werden drei unterschiedliche Fehlerorte definiert. Diese gelten für alle nachfolgenden Simulationen und sind in Abbildung 6.1 dargestellt. Für die Auswertung der mobilen Ortung ist auch der gewählte Einspeiseort dargestellt.

Im Fehlerfall kommt es zu dynamischen Vorgängen, die beispielsweise für die Erdschlusswischerverfahren herangezogen werden. Für die Evaluierung der Erdschlussortung durch Fremdstromeinspeisung werden hingegen nur stationäre Vorgänge untersucht. Um den Ortungsstrom mit Hilfe der Sonde verfolgen zu können, ist es notwendig, aus dem zeitlichen Verlauf eines Signals den Ortungsstrom zu bestimmen. In Abbildung 6.2 ist der Verlauf des Stromes in einem erdschlussbehafteten Abgang dargestellt. Dabei wurde dem netzfrequenten Strom durch die Einspeisung über die Petersenspulenhilfswicklung (Nullsystem) der Ortungsstrom aufmoduliert und mittels Simulation ausgewertet.

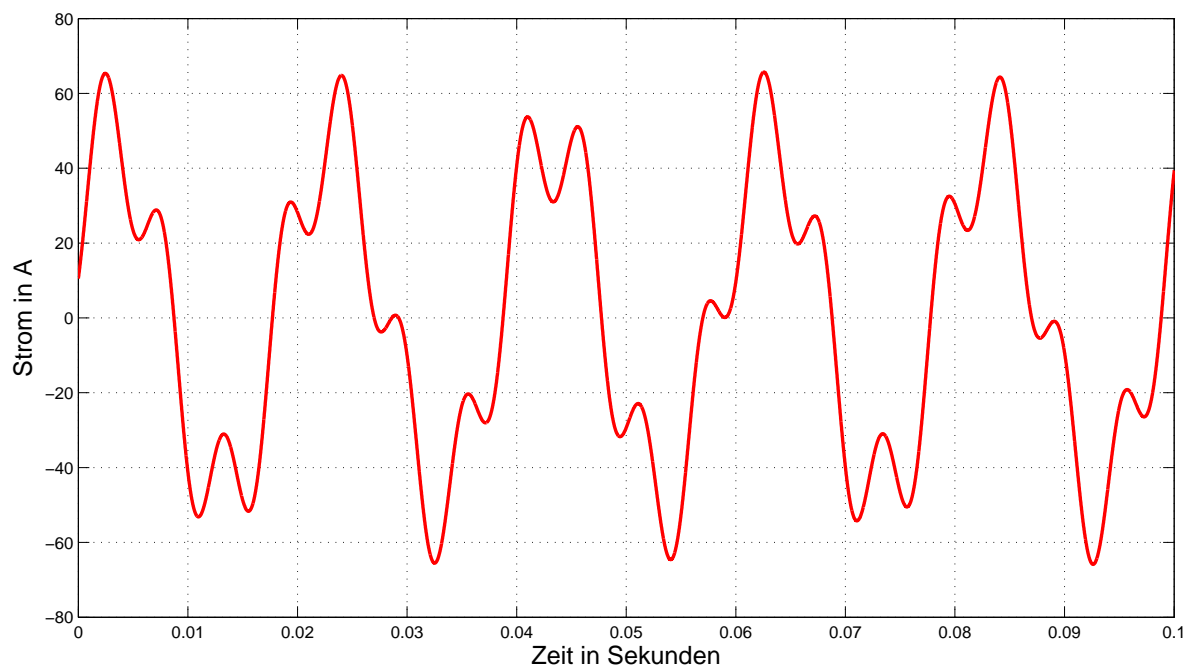


Abbildung 6.2: 50-Hz-Komponente mit überlagertem Ortungsstrom (183 Hz)

Um das Frequenzspektrum mit den einzelnen Komponenten zu erhalten, wird eine FFT (Fast Fourier Transformation) auf das Signal angewendet. Durch das Anpassen der FFT ist es möglich, eine einzelne Spitze für die in der Simulation vorkommenden Frequenzen zu erhalten. Diese Vorgehensweise bedeutet einen hohen Simulationsaufwand, da für die Bestimmung des Ortungsstromes für jede Generatorfrequenz eine Simulation mit einer anschließenden FFT durchgeführt werden muss. Eine Abhilfe schafft die Steady-State Funktion, die über das Tool "Powergui" in Simulink zur Verfügung gestellt wird, mit deren Hilfe statische Untersuchungen an Simulink-Modellen vorgenommen werden können.

Für die Amplitude der 183-Hz-Komponente ergibt sich aus Abbildung 6.3 ein Wert von 17,8837 A. Das Ergebnis aus der Steady-State Funktion liefert ein Ergebnis von 17,8840 A. Aufgrund der minimalen Abweichungen werden die nachfolgenden Untersuchungen mit der Steady-State Funktion durchgeführt.

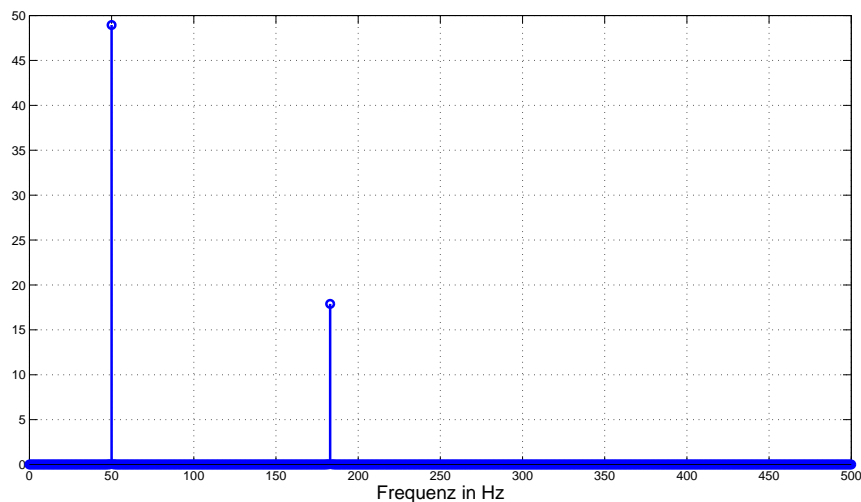


Abbildung 6.3: Frequenzspektrum des zuvor in Abbildung 6.2 dargestellten Signals

## 6.1 Stationäre Einspeisung

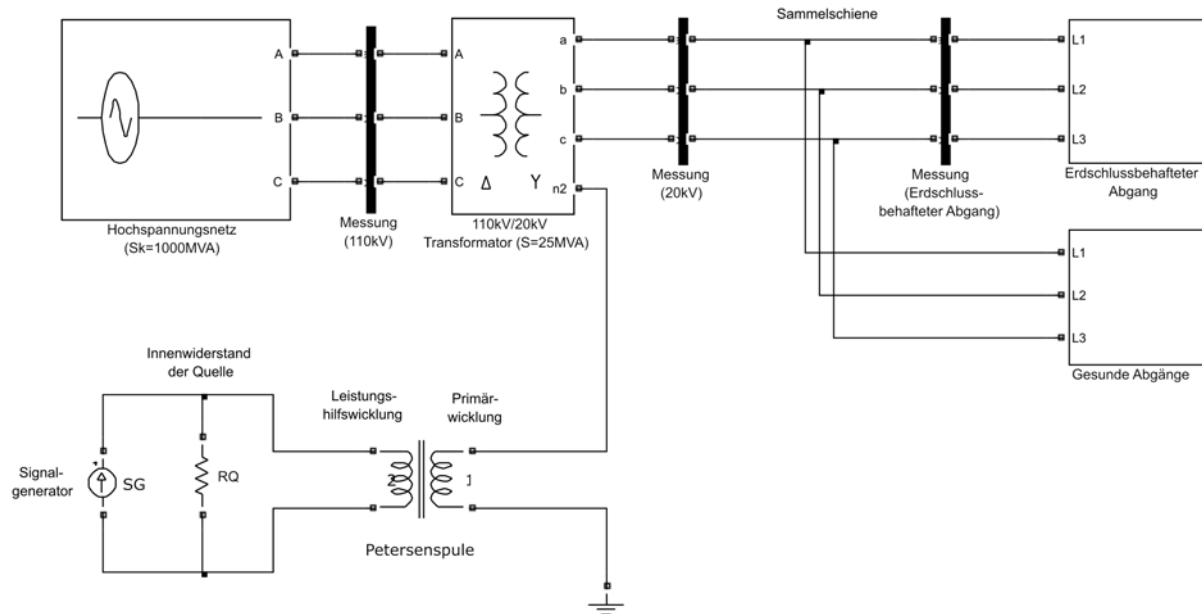


Abbildung 6.4: Simulinkmodell für die stationäre Einspeisung

In Abbildung 6.4 ist das Simulationsmodell für die stationäre Einspeisung dargestellt. Es besteht aus einem Transformator mit der Schaltgruppe Dy, der aus dem übergeordneten Hochspannungsnetz (110 kV) versorgt wird. Am sekundärseitig ausgeführten Sternpunkt ist die Petersenspule für die Erdschlusskompensation angeschlossen. Die Petersenspule wird als Einphasentransformator nachbildet, bei der die Sekundärseite die Leistungshilfswicklung darstellt. In die Leistungshilfswicklung wird der Ortungsstrom mit einer Stromquelle eingespeist, da die Verwendung einer idealen Spannungsquelle zu einem Kurzschluss auf der Sekundärseite führen würde. Für die Simulation darf die Stromquelle nicht in Serie zur Petersenspule angeschlossen werden, daher wird ein hochohmiger Innenwiderstand ( $R_Q = 1 \text{ M}\Omega$ ) für die Stromquelle angenommen. Dieser hat keine weiteren Auswirkungen auf die Ergebnisse. An die Sammelschiene sind die Leitungsblöcke angeschlossen. Der Erdschluss befindet sich im ersten Abgang, und die gesunden Abgänge sind im zweiten Block zusammengefasst. Für die Erfassung der Ströme und Spannungen sind Messelemente in Serie geschaltet, mit deren Hilfe eine Auswertung über die Steady-State Funktion erfolgen kann.



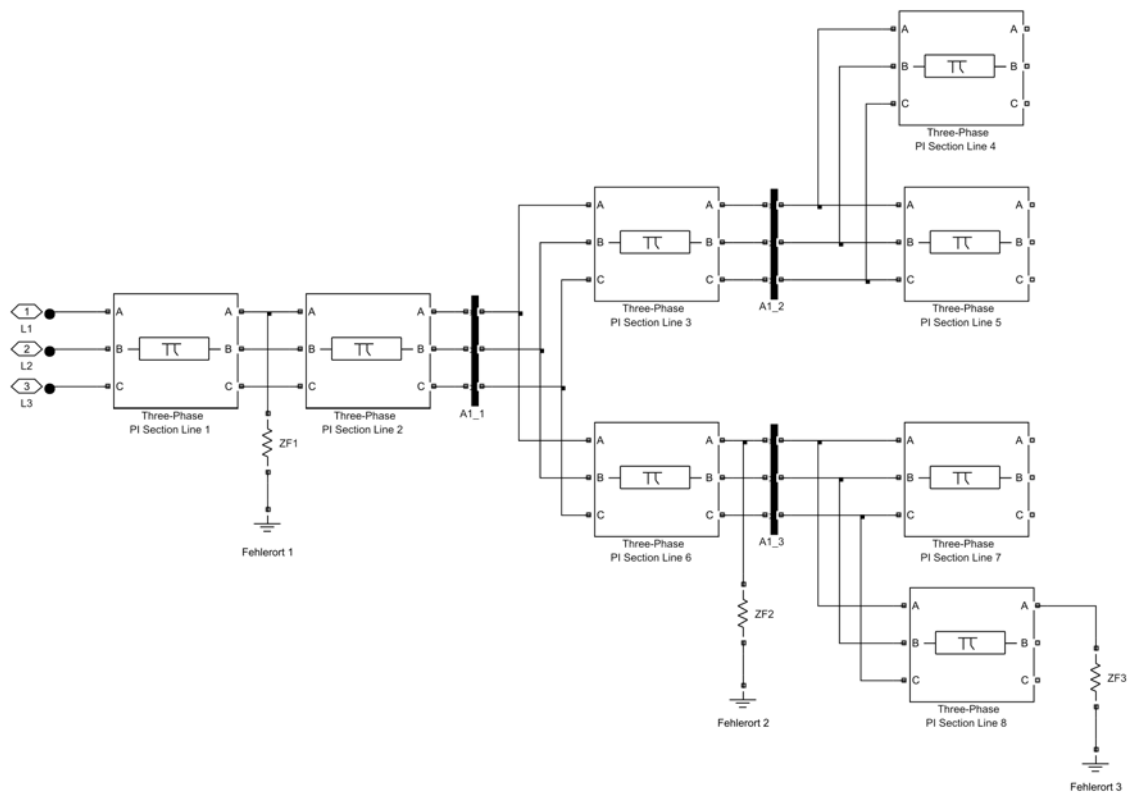


Abbildung 6.5: Detailliertes Modell für den erdschlussbehafteten Abgang

Das detaillierte Modell des erdschlussbehafteten Abganges ist in Abbildung 6.5 dargestellt. Die einzelnen Leitungselemente sind mit PI-Gliedern aufgebaut. Um den ersten Fehlerort ( $Z_{F1}$ ), in der Mitte des ersten Teilstückes, zu berücksichtigen, wird das Teilstück auf zwei PI-Elemente aufgeteilt. Die weiteren Fehlerorte ( $Z_{F2}$ ,  $Z_{F3}$ ) sind direkt in den Verzweigungen angebracht. An den Fehlerstellen wird die Phase L1 über einen Fehlerübergangswiderstand mit Erde verbunden. Alle weiteren Abgänge (gesunde Abgänge) sind bis auf die Fehlerwiderstände gleich aufgebaut.

Bevor die Untersuchungen für die Modellnetze durchgeführt werden, erfolgt noch eine Verifikation für ein einfaches Strahlennetz mit zehn Abgängen ohne Verzweigungen. Dazu werden die Formeln für eine analytische Lösung hergeleitet und mit den Ergebnissen aus einem einfachen Simulinkmodell verglichen. Vernachlässigt wird gegenüber dem Modell in Abbildung 6.4 das Hochspannungsnetz und die Primärseite des Transformators. Der Fehlerort befindet sich am Ende des ersten Abganges.

## Verifikation eines vereinfachten Modells

In Abbildung 6.6 ist das Ersatzschaltbild für die Verifikation dargestellt. Um einen Vergleich mit der Simulation zu ermöglichen, werden die Leitungen als PI-Ersatzschaltung berechnet. Ziel der analytischen Lösung ist die Verifikation des Matlab-Modells sowie die Möglichkeit, eine schnelle Berechnung zu ermöglichen.

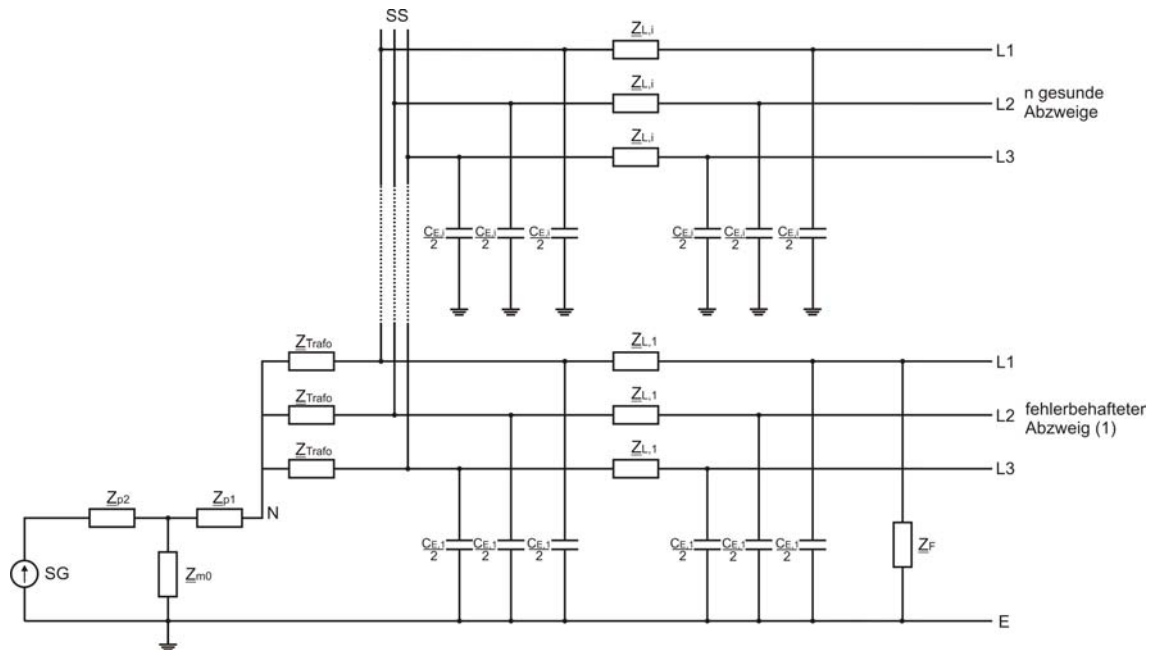


Abbildung 6.6: Ersatzschaltbild für die Verifikation

$Z_{Trafo}$	Transformatorimpedanz in $\Omega$
$Z_{L,i}$	Leitungsimpedanz in $\Omega$
$Z_{m0}$	Leerlaufimpedanz der Petersenspule in $\Omega$
$Z_{p1}$	Impedanz der Primärseite der Petersenspule in $\Omega$
$Z_{p2}$	Impedanz der Primärleistungshilfswicklung der Petersenspule in $\Omega$
$Z_F$	Fehlerübergangswiderstand in $\Omega$
$C_{E,i}$	Leiter-Erde-Kapazität in F
SG	Signalgenerator

Der Erdschluss befindet sich im ersten Abgang auf der Phase L1. Für eine Vereinfachung der analytischen Berechnung werden die Impedanzen für die einzelnen Phasen zusammengefasst. Die Netzimpedanz ( $Z_{Netz}$ ) setzt sich aus den Impedanzen für die gesunden Phasen ( $Z_{gesund}$ ), sowie aus der Impedanz der kranken Phase ( $Z_{krank}$ ) zusammen. Um die Aufteilung des Ortungsstromes berechnen zu können wird die Impedanz  $Z_{krank}$ , in die Impedanz der Fehlerschleife ( $Z_{Fehlerschl.}$ ) sowie in die Impedanz der restlichen Abgänge

die über die Sammelschiene mit der fehlerhaften Phase verbunden sind ( $Z_{Fehler,Netz}$ ), aufgeteilt. Für die Berechnung der Petersenspulenimpedanzen sei auf Abschnitt 5.3.1 verwiesen. Das Ersatzschaltbild für die zusammengefassten Impedanzen ist in Abbildung 6.7 dargestellt.

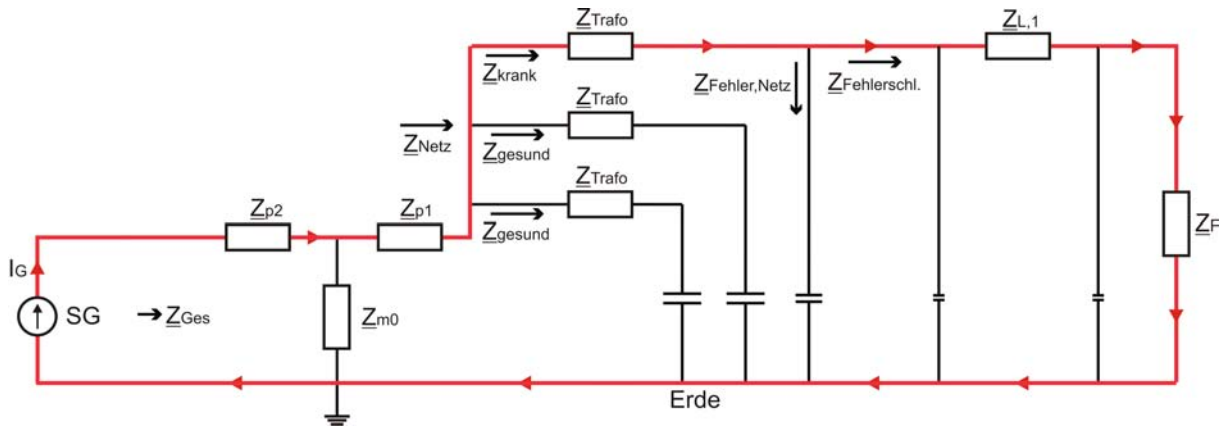


Abbildung 6.7: Ersatzschaltbild für die Zusammenfassung der Impedanzen

$Z_{p1}$	Impedanz der Primärseite der Petersenspule in $\Omega$
$Z_{p2}$	Impedanz der Primärleistungshilfswicklung der Petersenspule in $\Omega$
$Z_{m0}$	Leerlaufimpedanz der Petersenspulen in $\Omega$
$Z_{Trafo}$	Transformatorimpedanz in $\Omega$
$Z_{gesund}$	Impedanz der gesunden Phasen in $\Omega$
$Z_{krank}$	Impedanz der kranken Phasen in $\Omega$
$Z_{Fehlerschl}$	Impedanz der Fehlerschleife in $\Omega$
$Z_{Fehler,Netz}$	Impedanz der gesunden Abgänge für die erdschlussbehaftete Phase in $\Omega$
$Z_{Netz}$	Netzimpedanz in $\Omega$
$Z_{Ges}$	Gesamtimpedanz für den Ortungsstrom in $\Omega$
$I_G$	Signalgeneratorstrom in A

Die Impedanz des Null- bzw. Mitsystems einer Leitung berechnet sich aus den Selbst- und Koppelimpedanzen der Leitung.

$$\underline{Z}^1 = \underline{Z}_{11} - \underline{Z}_{12} \quad (6.1)$$

$$\underline{Z}^0 = \underline{Z}_{11} + 2 \cdot \underline{Z}_{12} \quad (6.2)$$

Durch das Umformen der Gleichungen 6.1 und 6.2 ergibt sich die Selbstimpedanz ( $Z_{11}$ ) der Leitungen aus den Impedanzen des Null- und Mitsystems.

$$\underline{Z}_{11} = \frac{\underline{Z}^0 + 2 \cdot \underline{Z}^1}{3} \quad (6.3)$$

Für die Verifikation werden in der Leitungsimpedanz ( $\underline{Z}_{L,i}$ ) die ohmschen und induktiven Impedanzen des Null- bzw. Mitsystems berücksichtigt. In den nachfolgenden Gleichungen stellt der Index  $i$  die Nummer des Abganges dar.

$$\underline{Z}_{L,i} = \frac{R_i^0 + 2R_i^1 + j2\pi f_G \cdot (L_i^0 + 2L_i^1)}{3} \quad (6.4)$$

$\underline{Z}_{L,i}$	Leitungsimpedanz in $\Omega$
$R_i^{0,1}$	Null- bzw. Mitsystem der Leitungswiderstände in $\Omega$
$L_i^{0,1}$	Null- bzw. Mitsystem der Leitungsinduktivitäten in $\Omega$
$\omega_G$	Generatorkreisfrequenz in rad/s

Die Reaktanz einer Kapazität ergibt sich aus Gleichung 6.5.

$$\underline{X}_C = \frac{1}{j\omega_G C_E} \quad (6.5)$$

$\underline{X}_C$	Reaktanz einer Kapazität in $\Omega$
$C_E$	Kapazität in $\mu F$
$\omega_G$	Generatorkreisfrequenz in rad/s <span style="float: right;">(<math>\omega_G = 2\pi f_G</math>)</span>

Die Impedanz der Fehlerschleife ( $\underline{Z}_{Fehlerschl.}$ ) für den erdschlussbehafteten Abgang ergibt sich in Gleichung 6.6.

$$\underline{Z}_{Fehlerschl.} = \frac{\underline{X}_{C,1}^2 \cdot (\underline{Z}_{L,1} + \underline{Z}_F) + \underline{X}_{C,1} \underline{Z}_{L,1} \underline{Z}_F}{\underline{X}_{C,1}^2 + \underline{X}_{C,1} \cdot (2\underline{Z}_F + \underline{Z}_{L,1}) + \underline{Z}_{L,1} \underline{Z}_F} \quad (6.6)$$

Die Impedanz der restlichen Abgänge die über die Sammelschiene mit der fehlerhaften Phase verbunden sind werden in Gleichung 6.7 berechnet. Besteht das Netz nur aus einem Abgang, dann gilt  $\underline{Z}_{Fehler,Netz} = \infty$ .

$$\underline{Z}_{Fehler,Netz} = \left( \sum_{i=2}^n \frac{2 \cdot \underline{X}_{C,i} + \underline{Z}_{L,i}}{\underline{X}_{C,i}^2 + \underline{X}_{C,i} \cdot \underline{Z}_{L,i}} \right)^{-1} \quad (6.7)$$

Mit Hilfe der in den Gleichungen 6.6 und 6.7 berechneten Impedanzen sowie der Transformatorimpedanz erhält man die gesamte Impedanz der kranken Phase.

$$\underline{Z}_{krank} = \underline{Z}_{Trafo} + \frac{\underline{Z}_{Fehlerschl.} \cdot \underline{Z}_{Fehler,Netz}}{\underline{Z}_{Fehlerschl.} + \underline{Z}_{Fehler,Netz}} \quad (6.8)$$

In Gleichung 6.9 werden die Impedanzen der gesunden Abgänge einer Phase zusammengefasst. Die Impedanz der gesunden Phasen wird hauptsächlich durch die Leiter-Erde-Kapazitäten bestimmt. Mit der Impedanz der gesunden Abgänge kann die gesamte Netzimpedanz ermittelt werden.

$$\underline{Z}_{gesund} = \underline{Z}_{Trafo} + \left( \sum_{i=1}^n \frac{2 \cdot \underline{X}_{C,i} + \underline{Z}_{L,i}}{\underline{X}_{C,i}^2 + \underline{X}_{C,i} \cdot \underline{Z}_{L,i}} \right)^{-1} \quad (6.9)$$

$$\underline{Z}_{Netz} = \frac{\underline{Z}_{gesund} \cdot \underline{Z}_{krank}}{\underline{Z}_{gesund} + 2 \cdot \underline{Z}_{krank}} \quad (6.10)$$

Mit Hilfe der Stromteilerregel kann der Strom im fehlerbehafteten Abgang bestimmt werden.

$$\underline{I}_{krank} = \frac{\underline{Z}_{m0} \cdot (\underline{Z}_{p1} + \underline{Z}_{Netz}) \cdot \underline{Z}_{Netz} \cdot \underline{Z}_{Fehler,Netz} \cdot I_G}{(\underline{Z}_{m0} + \underline{Z}_{p1} + \underline{Z}_{Netz}) \cdot (\underline{Z}_{Netz} + \underline{Z}_{p1}) \cdot \underline{Z}_{krank} \cdot (\underline{Z}_{Fehler,Netz} + \underline{Z}_{Fehlerschl.})} \quad (6.11)$$

$\underline{Z}_{p1}$	Impedanz der Primärseite der Petersenspule in $\Omega$
$\underline{Z}_{p2}$	Impedanz der Primärleistungshilfswicklung der Petersenspule in $\Omega$
$\underline{Z}_{m0}$	Leerlaufimpedanz der Petersenspule in $\Omega$
$\underline{Z}_{Netz}$	Netzimpedanz in $\Omega$
$\underline{Z}_{gesund}$	Impedanz der gesunden Phasen für alle Abgänge in $\Omega$
$\underline{Z}_{krank}$	Impedanz der kranken Phasen in $\Omega$
$\underline{Z}_{Fehlerschl.}$	Impedanz der Fehlerschleife in $\Omega$
$\underline{Z}_{Fehler,Netz}$	Impedanz der gesunden Abgänge für die erdschlussbehaftete Phase in $\Omega$
$\underline{I}_{krank}$	Ortungsstrom in A
$I_G$	Signalgeneratorstrom in A

Um den Ortungsstrom auch in Abhängigkeit der Generatorleistung zu erhalten, kann der Generatorstrom durch Gleichung 6.12 ersetzt werden.

$$I_G = \sqrt{\frac{S_{Gen}}{\underline{Z}_{Ges}}} \quad (6.12)$$

$I_G$	Generatorstrom in A
$S_{Gen}$	Generatorleistung in VA
$\underline{Z}_{Ges}$	Gesamtimpedanz in $\Omega$

Die Herleitung der Gleichung 6.11 gilt nur für ein reines Strahlennetz ohne Verzweigungen, kann jedoch als Abschätzung für Netze mit Verzweigungen in den Abgängen herangezogen werden.

Für die Verifikation des Simulink-Modells wird der Strom mit einer konstanten Generatorleistung ( $S_{Gen} = 1 \text{ kVA}$ ) eingespeist (siehe Abbildung 6.8). Der satte Erdschluss befindet sich am Ende des ersten Abganges.

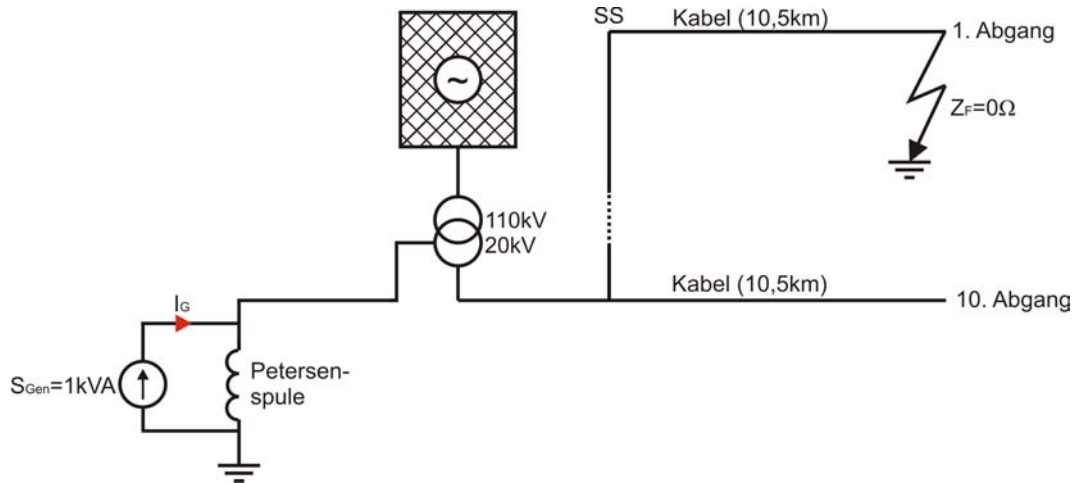


Abbildung 6.8: Modellnetz für die Verifikation

In Abbildung 6.9 sind die Ergebnisse aus der Simulation und der analytischen Berechnung für den Ortungsstrom sowie für den Generatorstrom dargestellt. Für eine Gegenüberstellung wird der Generatorstrom auf die Mittelspannungsebene bezogen.

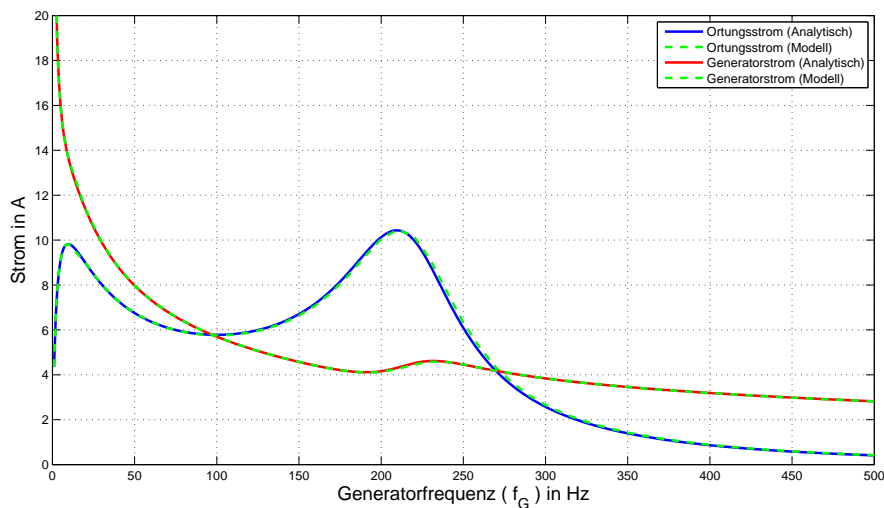


Abbildung 6.9: Effektivwerte des Generator- und Ortungsstromes in Abhängigkeit der Generatorfrequenz

Wie in Abbildung 6.9 zu erkennen ist, stimmen die simulierten und analytisch berechneten Effektivwertverläufe sehr gut überein. Die geringen Abweichungen bei höheren Frequenzen ergeben sich aufgrund der Vernachlässigung der Koppelkapazitäten in der analytischen Lösung. Deutlich zu erkennen ist, dass die Hauptinduktivität der Petersenspule den Generator bei sehr kleinen Frequenzen kurzschließt. Im Bereich zwischen 100 Hz und 270 Hz kommt es zu einer resonanzbedingten Stromüberhöhung durch die Induktivitäten und Kapazitäten im Netz.

### 6.1.1 Auswertung für ein reines Kabelnetz

Um die Tauglichkeit des Erdschlussortungsverfahrens durch Fremdstrom einspeisung in einem Kabelnetz zu bewerten, wird in die Leistungshilfswicklung der Petersenspule ein konstanter Strom mit 300 A eingespeist. Unter Berücksichtigung des Übersetzungsverhältnisses ( $u_e \approx 20$ , siehe Abschnitt 5.3) beträgt der Strom in der Primärwicklung der Petersenspule 15 A. Die Fehlerstelle befindet sich im ersten Abgang am Ende der Leitung (Fehlerort 3). Das Netz wird ohne Verstimmung betrieben ( $v = 0$ ).

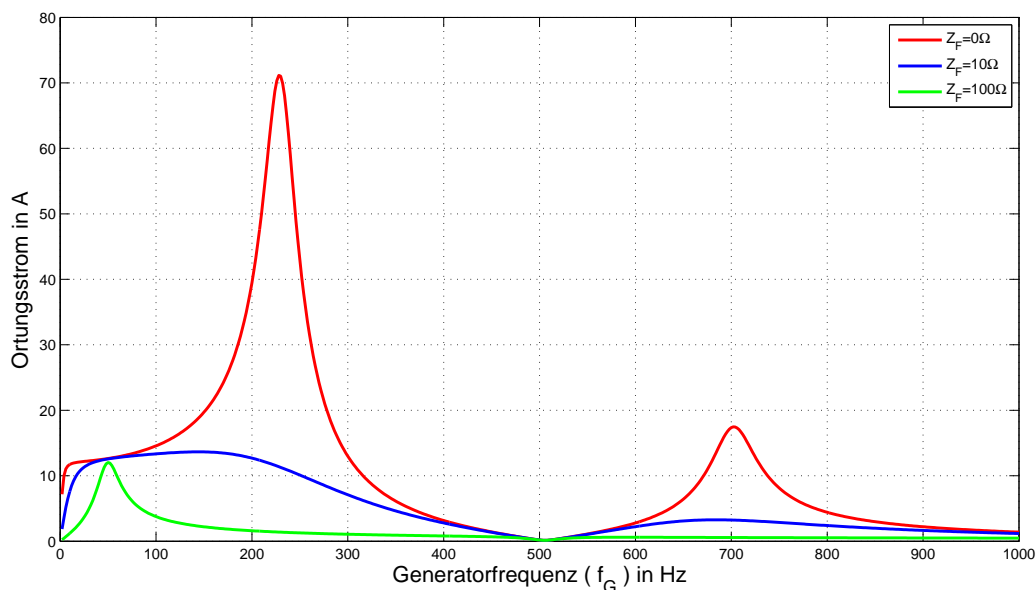


Abbildung 6.10: Ortungsstrom in Abhängigkeit der Generatorfrequenz (Stationäre Einspeisung; reines Kabelnetz;  $I_G = 300$  A; Fehlerort 3)

In Abbildung 6.10 ist der Ortungsstrom in Abhängigkeit der Generatorfrequenz für unterschiedliche Fehlerwiderstände dargestellt. Bei einem satten Kurzschluss ( $Z_F = 0 \Omega$ ) ist eine deutliche resonanzbedingte Stromüberhöhung bei 230 Hz und 700 Hz zu beobachten. Hervorgerufen werden die Spitzen durch die Induktivitäten und Kapazitäten im Netz und können zu unzulässig hohen Strömen an der Fehlerstelle führen. Bereits bei einem Fehlerwiderstand von  $10 \Omega$  erfolgt eine ausreichende Dämpfung damit es zu keiner Stromüberhöhung kommt. In einem gelöschten Netz bilden die Petersenspule und die Leiter-Erde-Kapazitäten einen Parallelschwingkreis der bei einer Verstimmung von Null auf 50 Hz abgestimmt ist. Für hochohmige Fehlerwiderstände ( $Z_F = 100 \Omega$ ) wird die Im-



pedanz des Parallelschwingkreises im Resonanzfall lediglich durch den Fehlerwiderstand bestimmt, wodurch das Maximum der Kurve bei 50 Hz zu finden ist.

Die benötigte Leistung des Generators, um einen Strom von 300 A in die Leistungshilfswicklung einzuspeisen, ist in Abbildung 6.11 dargestellt. Bei einem satten Kurzschluss kommt es bei der Resonanzfrequenz zu einer frequenzabhängigen Erhöhung der Leistung. Hochohmige Fehler ( $Z_F = 100 \Omega$ ) können nur im Bereich von 50 Hz erfasst werden. Die dafür benötigte Leistung liegt im Bereich von 16 kVA.

Bei 75 Hz und 238 Hz ist die Scheinleistung des Generators für verschiedene Fehlerwiderstände gleich groß. Die Wirk- und Blindleistungen ergänzen sich für unterschiedliche Fehlerwiderstände zur gleichen Scheinleistung. Der erste Schnittpunkt bei 75 Hz kommt durch den Parallelschwingkreis aus den Netzkapazitäten und der Impedanz der fehlerhaften Phase zustande. Der zweite aus dem Serienschwingkreis aus der gesamten Netzimpedanz und der Primärstreuinduktivität der Petersenspule.

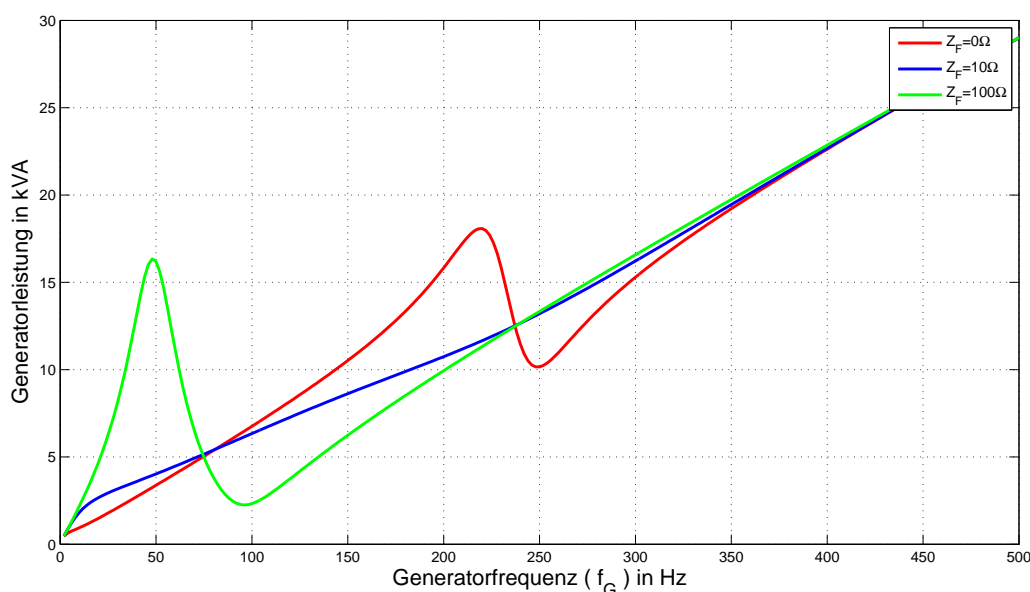


Abbildung 6.11: Generatorleistung in Abhängigkeit der Generatorfrequenz  
(Stationäre Einspeisung; reines Kabelnetz;  $I_G = 300 \text{ A}$ ; Fehlerort 3)

Anhand der Kurvenverläufe ist deutlich zu erkennen, dass hohe Generatorfrequenzen für ein reines Kabelnetz auszuschließen sind, da die Generatorleistung ab ca. 300 Hz linear ansteigt, der Ortungsstrom hingegen abnimmt.

Der, an der TU Graz entwickelte Prototyp der Magnetfeldsonde verwendet eine Frequenz von 183 Hz. Um die Grenzen der Sonde hinsichtlich des Fehlerwiderstandes zu bestimmen, ist der Ortungsstrom in Abhängigkeit des Fehlerwiderstandes für unterschiedliche Fehlerorte in Abbildung 6.12 dargestellt. Deutlich zu erkennen ist, dass der Fehlerort bei steigendem Fehlerwiderstand keinen signifikanten Einfluss auf den Ortungsstrom hat.

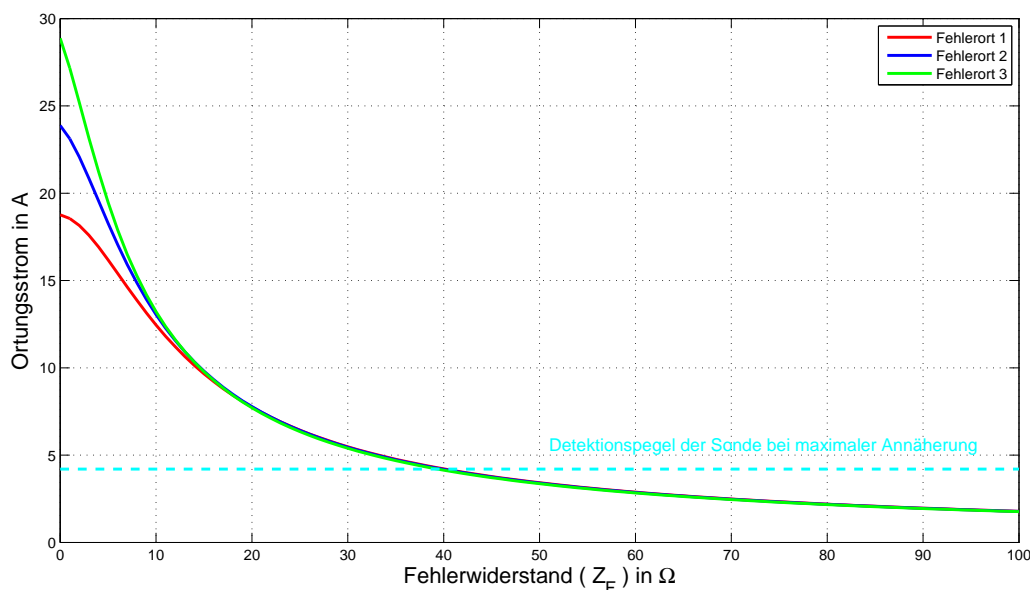


Abbildung 6.12: Ortungsstrom in Abhängigkeit vom Fehlerwiderstand (Stationäre Einspeisung; reines Kabelnetz;  $I_G = 300 \text{ A}$ ;  $f_G = 183 \text{ Hz}$ )

Der Detektionspegel der Sonde beträgt bei direktem Kontakt (Nahbereich) mit dem Leiter 4,2 A [19]. Eine selektive Erfassung ist nur oberhalb des Detektionspegels möglich, dadurch ergibt sich die Grenze des Fehlerwiderstandes bei 40  $\Omega$ . Wird die Messung mit einem Abstand zum Leiter durchgeführt, so verschiebt sich der Pegel nach oben. Für einen Pegel von 10 A ist nur mehr eine Erkennung bis ca. 14  $\Omega$  möglich. Daher ist die Empfehlung auszusprechen, dass eine Ortung mit der maximalen Annäherung durchzuführen ist.

Aufgrund des abnehmenden Verlaufs des Ortungsstromes ist eine Verbesserung des Verfahrens durch eine sensitivere Erfassung des magnetischen Feldes, möglich. Um Fehlerwiderstände bis 100  $\Omega$  zu erkennen, ist ein Grenzpegel von 1,8 A notwendig.

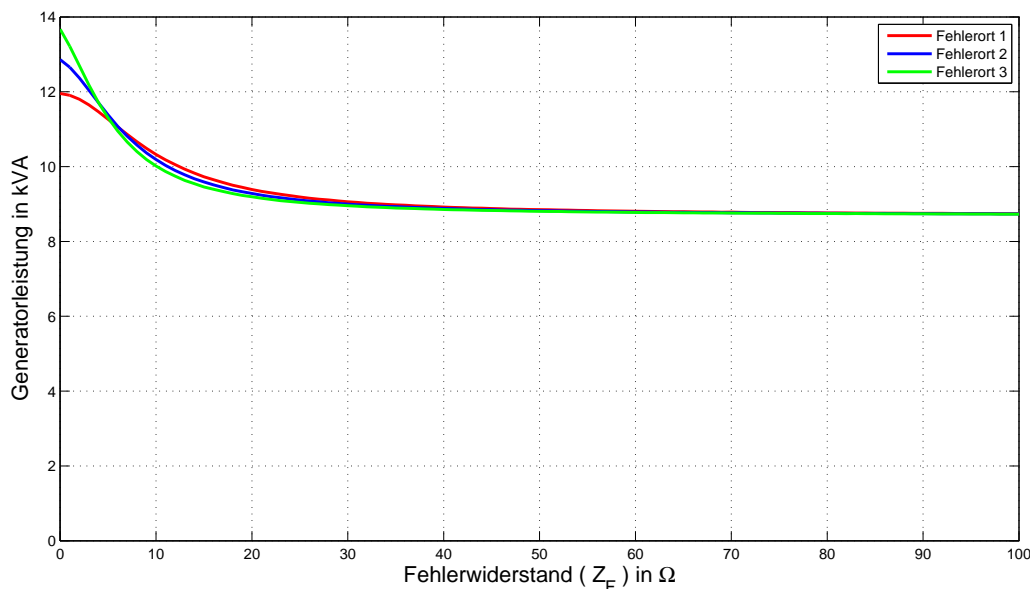


Abbildung 6.13: Generatorleistung in Abhängigkeit vom Fehlerwiderstand (Stationäre Einspeisung; reines Kabelnetz;  $I_G = 300 \text{ A}$ ;  $f_G = 183 \text{ Hz}$ )

Die zugehörigen Leistungen sind in Abbildung 6.13 dargestellt. Zu erkennen ist, dass die Leistung mit zunehmendem Fehlerwiderstand abnimmt. Dieser Effekt tritt im Bereich zwischen 75 Hz und 238 Hz auf. Für die Ortung von satten Erdschlüssen ist eine Leistung des Signalgenerators von ca. 8,7 kVA nötig.

Mit einer Generatorfrequenz von 183 Hz sind Fehlerübergangswiderstände im Bereich von 0 bis 40  $\Omega$  erfassbar. Um auch hochohmige Fehler zu erfassen, wird ein Frequenzwechsel durchgeführt. In Abbildung 6.10 ist zu erkennen, dass bei einem Fehlerwiderstand von 100  $\Omega$  der Ortungsstrom nur im Bereich von 50 Hz für eine Ortung ausreichend ist. Bei einem gelöschten Netz bilden die Erdkapazitäten mit der Induktivität der Petersenspule einen Parallelschwingkreis. Dieser ist bei einer Verstimmung von  $v = 0$  auf 50 Hz abgestimmt. Im Resonanzfall wird die Impedanz des Parallelschwingkreises lediglich durch die Dämpfung bestimmt. Dadurch wird erreicht, dass der gesamte eingeprägte Ortungsstrom zur Fehlerstelle fließt. Zur Ortung hochohmiger Fehlerwiderstände ist ein Frequenzwechsel in Richtung der Netzfrequenz notwendig, so dass eine Detektion des Ortungsstromes unter Verwendung von scharfen Filtern für die Magnetfeldsonde noch einwandfrei möglich ist. Als Alternative für die Frequenz des Prototypen werden für die nachfolgenden Untersuchungen 45 Hz gewählt.

In Abbildung 6.14 ist der Verlauf des Ortungsstromes für eine Generatorfrequenz von 45 Hz dargestellt.

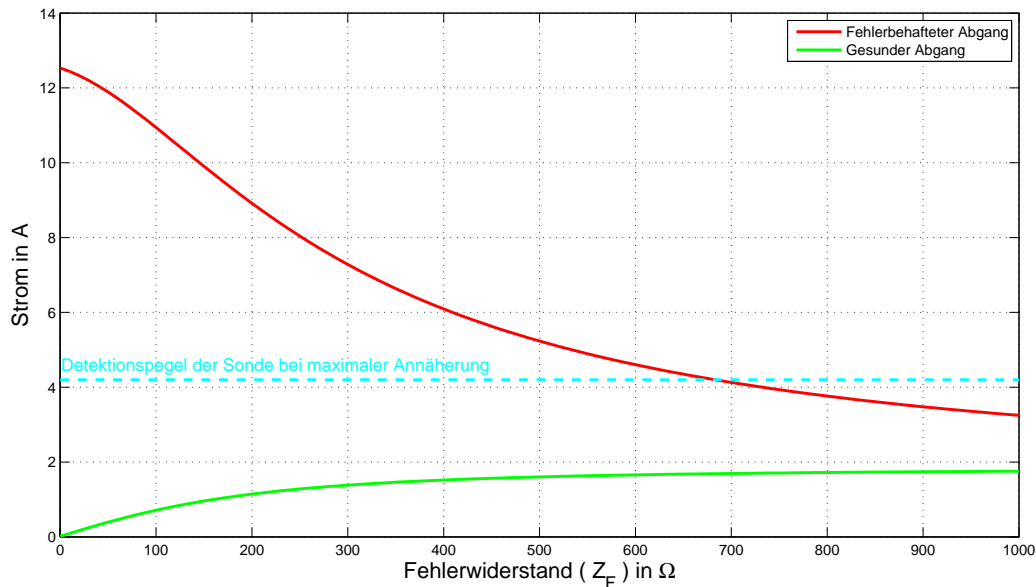


Abbildung 6.14: Ortungsstrom in Abhängigkeit vom Fehlerwiderstand (Stationäre Einspeisung; reines Kabelnetz;  $I_G = 300 \text{ A}$ ;  $f_G = 45 \text{ Hz}$ )

Durch die Veränderung der Frequenz ist es möglich, auch hochohmige Fehler (bis ca.  $680 \Omega$ ) mit einem Detektionspegel von  $4,2 \text{ A}$  zu erkennen. Bei einem Fehlerwiderstand von  $1 \text{ k}\Omega$  muss der Detektionspegel der Sonde einen Wert von  $3,25 \text{ A}$  aufweisen. Bei höheren Fehlerwiderständen besteht jedoch die Gefahr der Fehlinterpretation, da es zunehmend schwerer fällt, die gesunden Abgänge vom fehlerhaften Abgang zu unterscheiden.

Die benötigte Signalgeneratorleistung ist in Abbildung 6.15 dargestellt. Die Leistung nimmt mit größer werdendem Widerstand zu. Für eine Ortung im  $k\Omega$ -Bereich ist ein Leistung von ca. 37 kVA nötig.

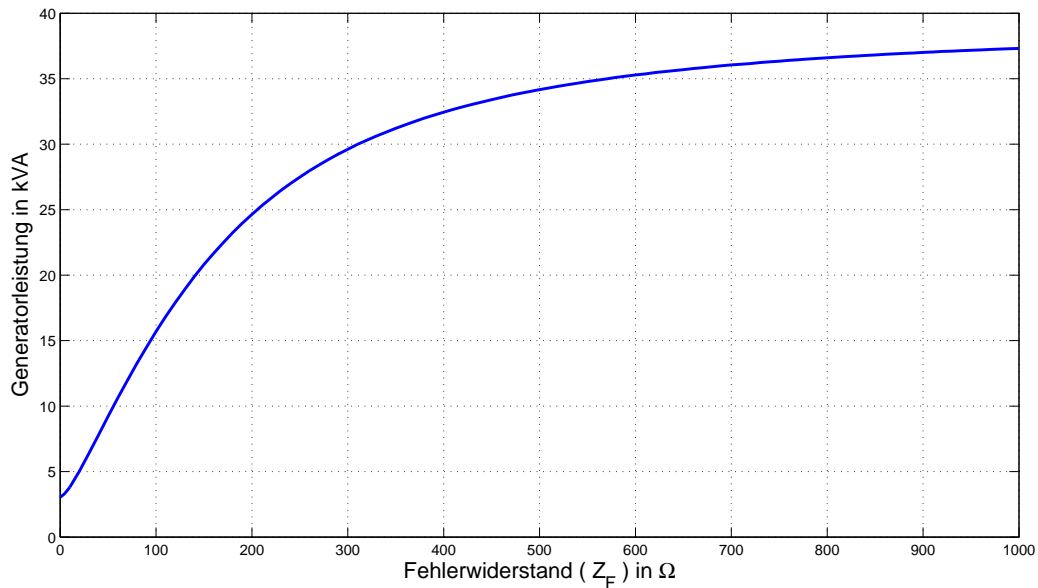


Abbildung 6.15: Generatorleistung in Abhängigkeit vom Fehlerwiderstand  
(Stationäre Einspeisung; reines Kabelnetz;  $I_G = 300 \text{ A}$ ;  $f_G = 45 \text{ Hz}$ )

Bei der Verwendung eines größeren Generators und einer Sonde mit einem scharfen Filter sind auch hochohmige Fehler selektiv erfassbar.

## Sensitivitätsanalyse der Modellannahmen für die Petersenspule

Um der Problematik bei der Bestimmung der Streuinduktivität für die Petersenspule Rechnung zu tragen, werden die Auswirkungen einer unterschiedlichen Aufteilung untersucht. Die in Kapitel 5.3 berechnete Aufteilung zwischen Hauptinduktivität und der Streuinduktivität kann nur als Richtwert gesehen werden, da regelbare Petersenspulen je nach eingestellter Stufe sehr unterschiedliche Streuinduktivitäten aufweisen.

In Abbildung 6.16 ist die Generatorleistung für unterschiedliche  $\sigma$  mit einer Generatorfrequenz von 183 Hz dargestellt. Deutlich zu erkennen ist eine Leistungszunahme für größeren Streuinduktivitäten.

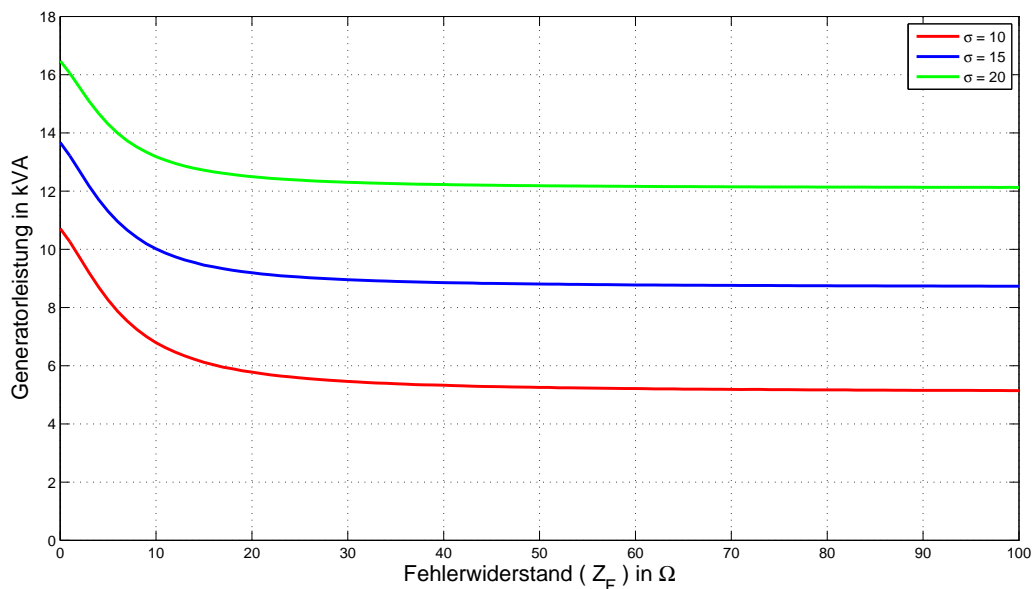


Abbildung 6.16: Generatorleistung in Abhängigkeit vom Fehlerwiderstand  
(Stationäre Einspeisung; reines Kabelnetz;  $I_G = 300 \text{ A}$ ;  $f_G = 183 \text{ Hz}$ ; Fehlerort 3)

Der Ortungsstrom unterliegt nur minimalen Veränderungen, da eine konstante Einspeisung des Stromes erfolgt (siehe Abschnittanfang).

In Abbildung 6.17 ist die Generatorleistung für unterschiedliche  $\sigma$  mit einer Generatorfrequenz von 45 Hz dargestellt. Zum Unterschied zu den Simulationen mit einer Generatorfrequenz von 183 Hz sind die Auswirkungen im Bereich der Netzfrequenz geringer. Bei größer werdendem  $\sigma$  wird die Leistung geringer. Durch die erhöhte Streuinduktivität werden die großen Kapazitäten vom Netz besser kompensiert, wodurch die Netzimpedanz kleiner wird und damit auch die nötige Generatorleistung.

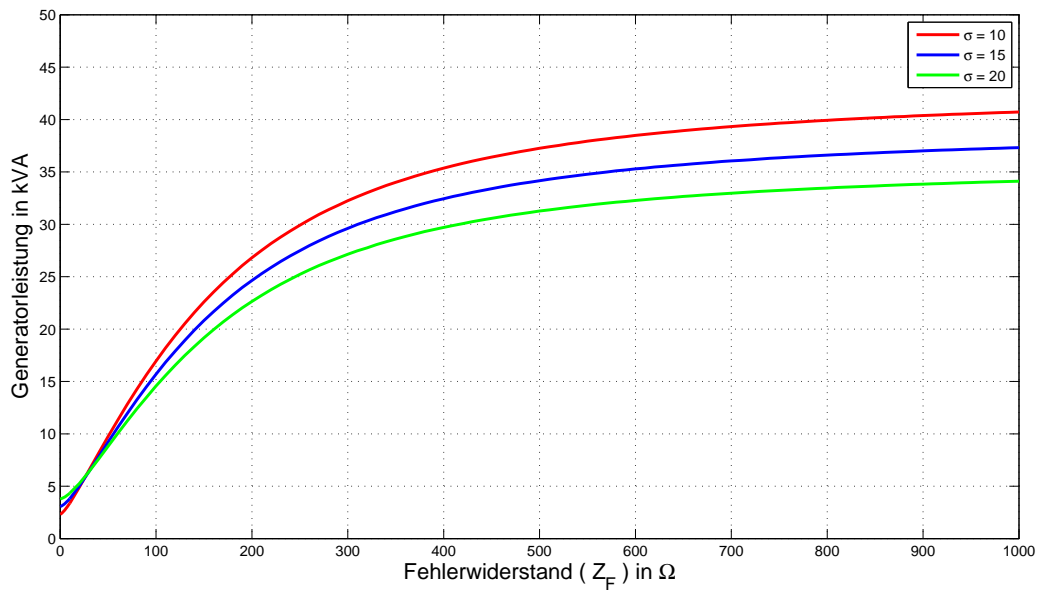


Abbildung 6.17: Generatorleistung in Abhängigkeit vom Fehlerwiderstand  
(Stationäre Einspeisung; reines Kabelnetz;  $I_G = 300 \text{ A}$ ;  $f_G = 45 \text{ Hz}$ ; Fehlerort 3)

## 6.1.2 Auswertung für ein gemischtes Netz

Um eine Evaluierung des Erdschlussortungsverfahrens für unterschiedliche Netze durchführen zu können, werden die gleichen Bedingungen wie in Abschnitt 6.2.1 angenommen.

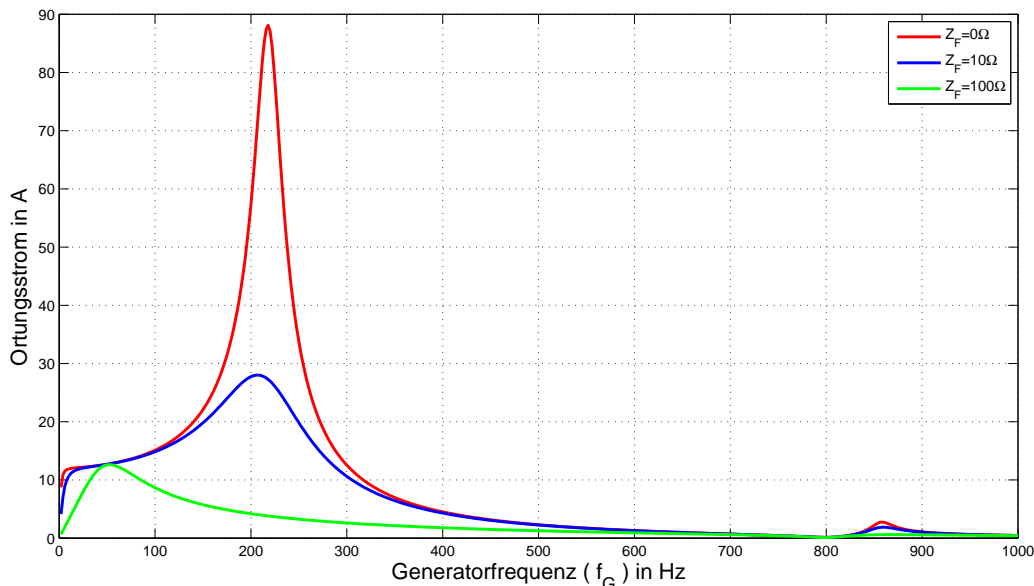


Abbildung 6.18: Ortungsstrom in Abhängigkeit der Generatorfrequenz  
(Stationäre Einspeisung; gemischtes Netz;  $I_G = 300 \text{ A}$ ; Fehlerort 3)

In Abbildung 6.18 ist der Ortungsstrom in Abhängigkeit der Generatorfrequenz für das gemischte Netz dargestellt. Die Verläufe für die unterschiedlichen Fehlerwiderstände sind ähnlich der Verläufe für ein reines Kabelnetz.

Die Resonanzfrequenz des Ortungsstromes für einen satten Kurzschluss ( $Z_F = 0 \text{ } \Omega$ ) beträgt 218 Hz und unterscheidet sich nur gering von jenem des gewählten Kabelnetzes. Im gemischten Netz kommt es auch bei einem Fehlerwiderstand von  $Z_F = 10 \text{ } \Omega$  zu einer Dämpfung, jedoch ist noch ein Aufschwingen des Ortungsstroms zu beobachten. Für hochohmige Fehlerwiderstände ( $Z_F = 100 \text{ } \Omega$ ) erfolgt vom Maximum bei 50 Hz ausgehend ein langsames Abklingen gegenüber dem Ortungsstrom in Abbildung 6.10. Auch beim gemischten Netz kommt es zu einem zweiten Resonanzeffekt bei hohen Frequenzen, dieser ist jedoch stark gedämpft.



Die dazugehörige Generatorleistung ist in Abbildung 6.19 dargestellt. Bei hochohmi- gen Fehlerwiderständen ist eine Generatorleistung von ca. 20 kVA notwendig. Die große Generatorleistung bei einem satten Kurzschluss wird verursacht durch den großen Wi- derstand des Parallelschwingkreises im Resonanzfall. Die Scheinleistung des Generators für die unterschiedlichen Fehlerwiderstände ist bei 75 Hz und 227 Hz gleich groß.

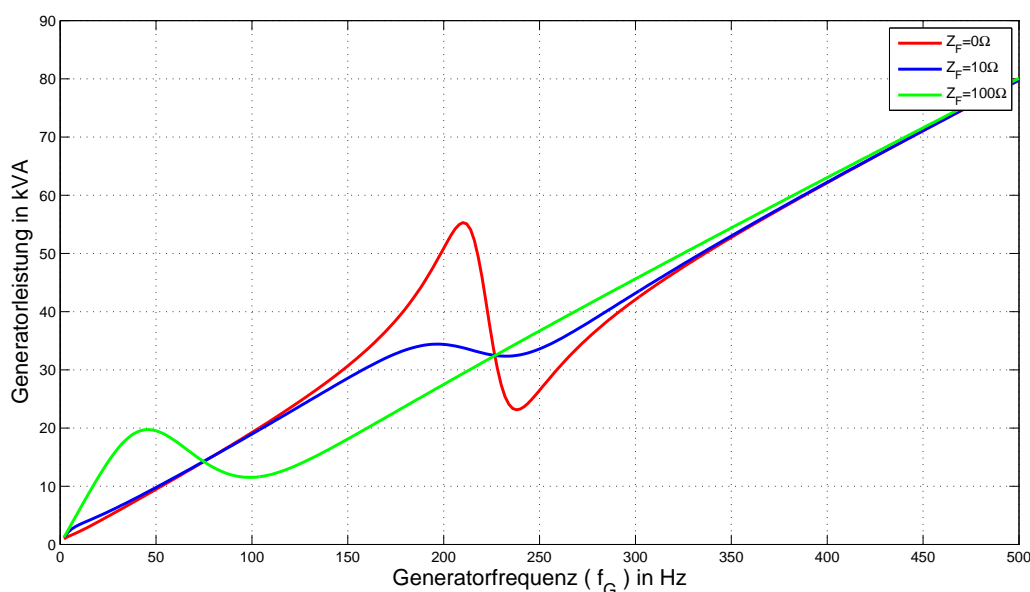


Abbildung 6.19: Generatorleistung in Abhängigkeit der Generatorfrequenz  
(Stationäre Einspeisung; gemischtes Netz;  $I_G = 300 \text{ A}$ ; Fehlerort 3)

Es zeigt sich, dass aufgrund der ähnlichen Kurvenverläufe wie für das reine Kabelnetz auch in einem gemischten Netz hohe Generatorfrequenzen auszuschließen sind.

Der Ortungsstrom für eine Generatorfrequenz von 183 Hz in Abhängigkeit vom Fehlerwiderstand ist in Abbildung 6.20 dargestellt. Zu erkennen ist, dass der Ortungsstrom bei niedrigen Frequenzen durch den Fehlerort beeinflusst wird. Im Gegensatz zum reinen Kabelnetz ist bei einem Detektionspegel von 4,2 A eine Ortung bis 112 Ω möglich. Bei einem fiktiven Pegel von 10 A ist hingegen nur mehr eine selektive Fehlererfassung bis in den Bereich von 40 Ω möglich.

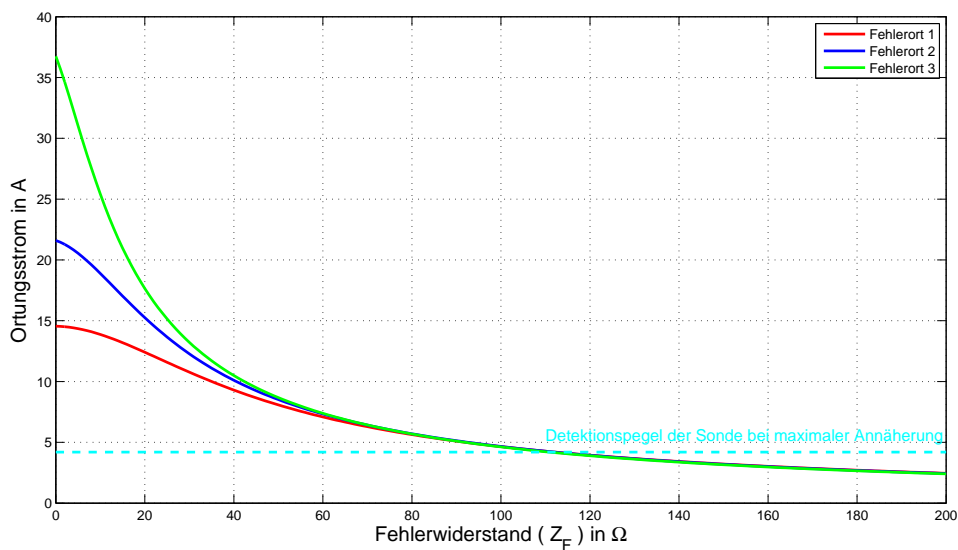


Abbildung 6.20: Ortungsstrom in Abhängigkeit vom Fehlerwiderstand (Stationäre Einspeisung; gemischtes Netz;  $I_G = 300 \text{ A}$ ;  $f_G = 183 \text{ Hz}$ )

Die Generatorleistung (siehe Abbildung 6.21) nimmt mit größer werdendem Fehlerwiderstand ab und liegt für hochohmige Fehlerwiderstände im Bereich von 24 kVA.

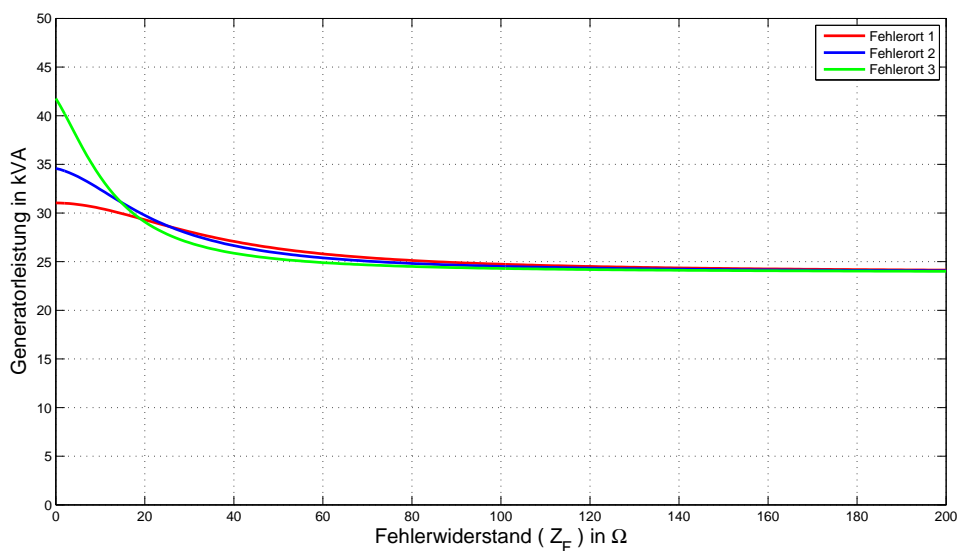


Abbildung 6.21: Generatorleistung in Abhängigkeit vom Fehlerwiderstand (Stationäre Einspeisung; gemischtes Netz;  $I_G = 300 \text{ A}$ ;  $f_G = 183 \text{ Hz}$ )

In Abbildung 6.22 ist der Ortungsstrom in Abhängigkeit des Fehlerwiderstandes für eine Generatorfrequenz von 45 Hz dargestellt. Durch den flachen Verlauf vom Ortungsstrom ist eine selektive Ortung bis in den k $\Omega$ -Bereich möglich. Bei einem Fehlerwiderstand von 2 k $\Omega$  muss der Detektionspegel der Sonden einen Wert von 4,1 A aufweisen.

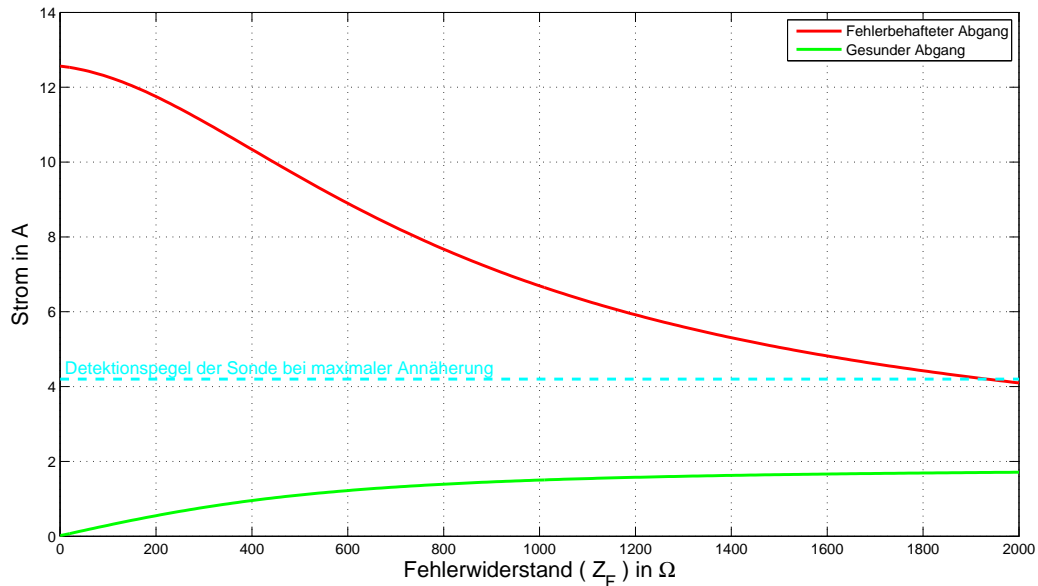


Abbildung 6.22: Ortungsstrom in Abhängigkeit vom Fehlerwiderstand  
(Stationäre Einspeisung; gemischtes Netz;  $I_G = 300 \text{ A}$ ;  $f_G = 45 \text{ Hz}$ ; Fehlerort 3)

Die Generatorleistung ist in Abbildung 6.23 dargestellt. Deutlich zu erkennen ist der steile Anstieg der Kurve bei kleinen Frequenzen. Bei höheren Frequenzen wird die Kurve für die Generatorleistung flacher. Jedoch sind für eine Ortung im k $\Omega$ -Bereich Leistungen von ca. 100 kVA notwendig.

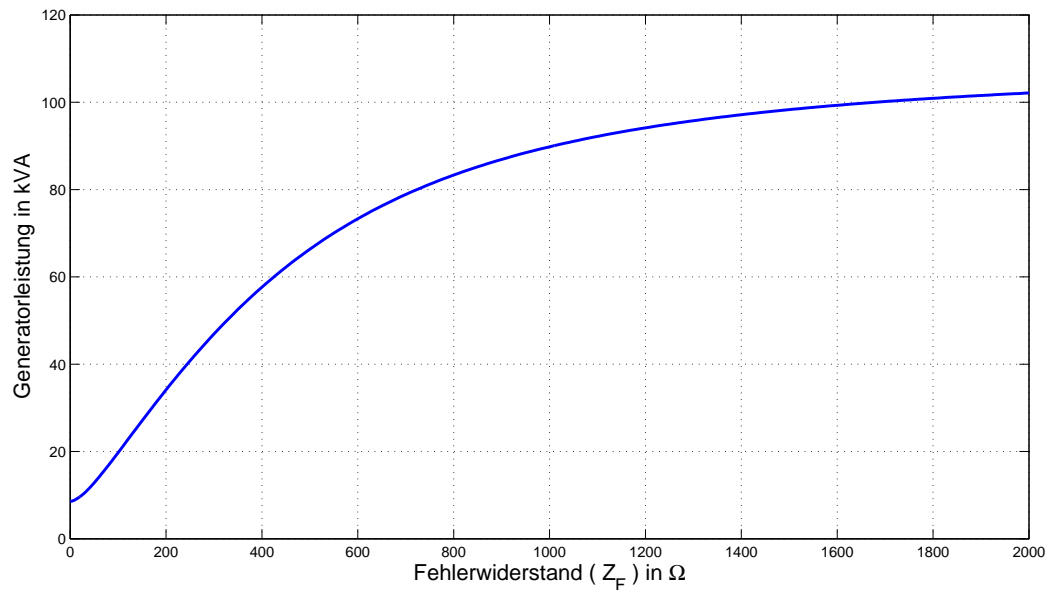


Abbildung 6.23: Generatorleistung in Abhängigkeit vom Fehlerwiderstand (Stationäre Einspeisung; gemischtes Netz;  $I_G = 300 \text{ A}$ ;  $f_G = 45 \text{ Hz}$ ; Fehlerort 3)

### 6.1.3 Vergleich der Modellnetze

Für beide Modellnetze ergibt sich ein ähnlicher Verlauf für den Ortungsstrom. Lediglich bei hochohmigen Fehlern nimmt der Ortungsstrom im Bereich von 50 Hz in einem reinen Kabelnetz schneller ab als in einem gemischten Netz, wodurch größere Fehlerwiderstände in einem gemischten Netz mit einer Generatorfrequenz von 45 Hz geortet werden können.

Bei der Frequenz des Prototypen (183 Hz) wird der Effekt der geringeren Leistung bei höheren Widerständen ausgenutzt. Eine Ortung für typische Fehlerwiderstände, die sich im Bereich bis 100  $\Omega$  befinden, ist nur im gemischten Netz in der Nähe des Detektionsspiegels möglich. Die durch die Anregung des Netzes mit der Eigenfrequenz hervorgerufene Stromüberhöhung des Ortungsstromes, ist in beiden Modellnetzen zu beobachten.

In Tabelle 6.1 und 6.2 sind die Ergebnisse aus der Simulation zusammengefasst.

Generatorfrequenz	$f_G = 183 \text{ Hz}$	$f_G = 183 \text{ Hz}$	$f_G = 45 \text{ Hz}$	$f_G = 45 \text{ Hz}$
Detektionspegel (DP)	DP = 4,2 A	DP = 10 A	DP = 4,2 A	DP = 10 A
$Z_{F,max}$	ca. 40 $\Omega$	ca. 14,5 $\Omega$	ca. 683 $\Omega$	ca. 145 $\Omega$
$S_{Gen}$ bei $Z_{F,max}$	ca. 8,9 kVA	ca. 9,7 kVA	ca. 35,8 kVA	ca. 20,35 kVA
$I_{gesund}$ bei $Z_{F,max}$	ca. 0,45 A	ca. 0,4 A	ca. 1,68 A	ca. 0,94 A

Tabelle 6.1: Ergebnisse für ein Kabelnetz

Generatorfrequenz	$f_G = 183 \text{ Hz}$	$f_G = 183 \text{ Hz}$	$f_G = 45 \text{ Hz}$	$f_G = 45 \text{ Hz}$
Detektionspegel (DP)	DP = 4,2 A	DP = 10 A	DP = 4,2 A	DP = 10 A
$Z_{F,max}$	ca. 112 $\Omega$	ca. 37 $\Omega$	ca. 1933 $\Omega$	ca. 445 $\Omega$
$S_{Gen}$ bei $Z_{F,max}$	ca. 24,5 kVA	ca. 27 kVA	ca. 101,7 kVA	ca. 62 kVA
$I_{gesund}$ bei $Z_{F,max}$	ca. 0,45 A	ca. 0,4 A	ca. 1,71 A	ca. 1,03 A

Tabelle 6.2: Ergebnisse für ein gemischtes Netz

### 6.1.4 Fehlinterpretationen

In den vorangegangenen Auswertungen sind die Abgänge identisch aufgebaut. In der Regel bestehen aber die einzelnen Abgänge der Netze aus unterschiedlichen Leitungstypen mit verschiedenen Leitungslängen. Aufgrund dessen kann es bei hohen Generatorfrequenzen zu Problemen durch Fehlinterpretationen kommen. Das in Abbildung 6.24 dargestellte Netz besteht aus einem langen Kabel und einer Freileitung. Die Freileitung weist am Ende der Leitung einen Erdschluss auf.

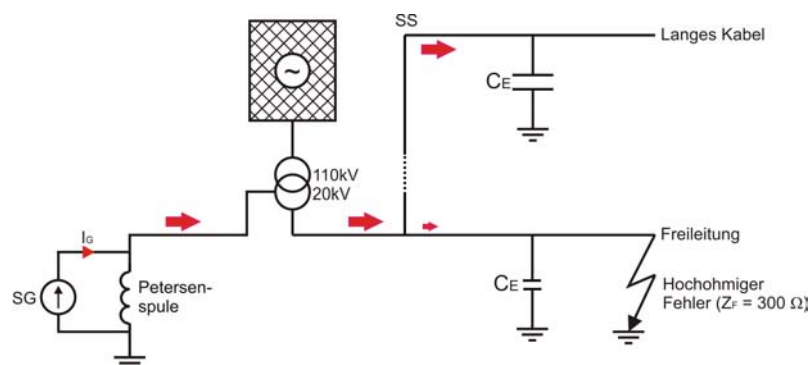


Abbildung 6.24: Problematik der Fehlinterpretation

Die Selektivität des Erdschlussortungsverfahrens wird durch das Verhältnis zwischen den Impedanzen der gesunden und der fehlerbehafteten Abgänge bestimmt. Die Impedanz der fehlerbehafteten Phase wird bei einem hochohmigen Fehlerübergangswiderstand vorwiegend durch diesen hervorgerufen und ist damit weitgehend unabhängig von der verwendeten Generatorfrequenz. In den gesunden Abgängen setzt sich die Impedanz ( $Z_{gesund}$ ) aus den Leiter-Erde-Kapazitäten zusammen. Für hohe Frequenzen wird dadurch die Impedanz in den gesunden Phasen zunehmend kleiner.

In Abbildung 6.25 sind die Beträge der Impedanzen für die gesunde und fehlerbehaftete Phase für das Kabel sowie für die Freileitung mit einer Länge von 15 km dargestellt.

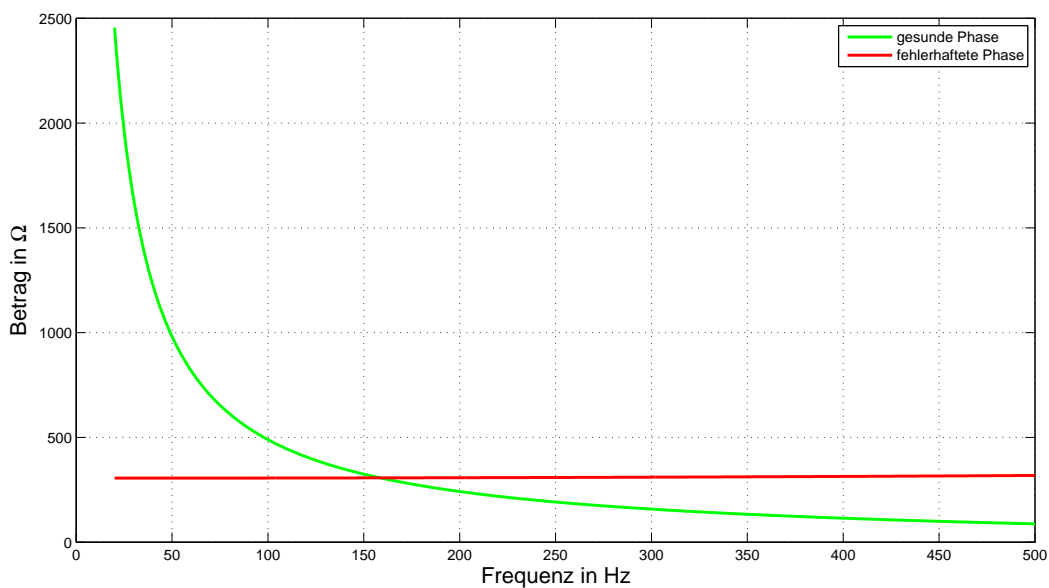


Abbildung 6.25: Leitungsimpedanzen für Abbildung 6.24

Deutlich zu erkennen ist, dass die Impedanz der gesunden Phase mit steigender Frequenz abnimmt und die Impedanz der Freileitung durch den Fehlerwiderstand ( $Z_F = 300 \Omega$ ) bestimmt wird. Ab einer Frequenz von 150 Hz ist der Ortungsstrom in der gesunden Phase höher, wodurch die Selektivität in Fehlererfassung nicht mehr gegeben ist.

Die hier verwendete Netztopologie stellt den "worst case" für die Erdschlussortung durch Fremdstromeinspeisung dar. Es soll lediglich aufgezeigt werden, dass es zu Problemen durch Fehlinterpretationen in Netzen mit unterschiedlichen Leitungstypen und Leitungslängen kommen kann.

## 6.2 Mobile Einspeisung

In diesem Abschnitt werden Untersuchungen für die mobile Erdschlussortung durchgeführt. Dabei wird der fehlerbehaftete Abgang durch das Öffnen des Leistungsschalters von der Sammelschiene und somit auch vom restlichen Netz getrennt. Die Einspeisung des Ortungsstromes erfolgt direkt in die fehlerbehaftete Phase mit einem mobilen Signalgenerator.

Die Grenzen des Signalgenerators sind vor allem technologisch durch die Energiebereitstellung gegeben. Bei der Verwendung von batteriebetriebenen Generatoren ist die zur Verfügung stehende Leistung begrenzt. Um diesen Umstand in der Simulation zu berücksichtigen, wird eine konstante Leistung vorgegeben. Dies geschieht über ein iteratives Verfahren, bei dem die Amplitude der Stromquelle für die jeweils gewünschte Leistung angepasst wird. Der in der Simulation verwendete Einspeisepunkt ist in Abbildung 6.1 dargestellt.

Bevor eine Auswertungen für die mobile Erdschlussortung durchgeführt wird, erfolgt die Herleitung einer analytische Lösung gemäß dem Ersatzschaltbild in Abbildung 6.26.

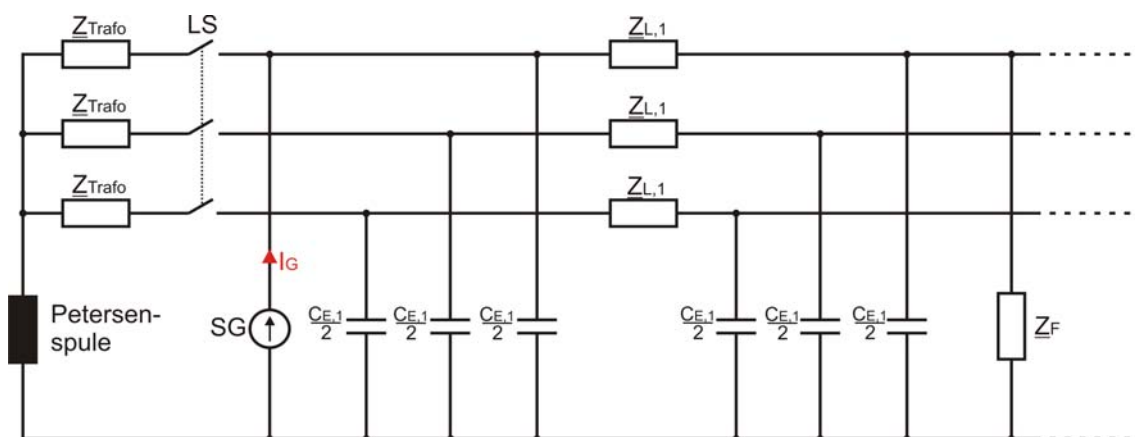


Abbildung 6.26: Ersatzschaltbild für die mobile Ortung

Der Ortungsstrom in Abhängigkeit der Generatorleistung kann mit Gleichung 6.13 berechnet werden.

$$I_{krank} = \sqrt{\frac{S_{Gen}}{Z_{Fehlerschl.}}} \quad (6.13)$$

$Z_{Fehlerschl.}$	Impedanz der Fehlerschleife in $\Omega$
$S_{Gen}$	Signalgeneratorleistung in VA
$I_{krank}$	Ortungsstrom in A

Es besteht ein quadratischer Zusammenhang zwischen Ortungsstrom und Generatorleistung.

### 6.2.1 Auswertung für ein reines Kabelnetz

In Abbildung 6.27 ist der Ortungsstrom in Abhängigkeit der Generatorfrequenz für unterschiedliche Fehlerwiderstände dargestellt. Die Einspeisung erfolgt mit einer konstanten Generatorscheinleistung von 3 kVA.

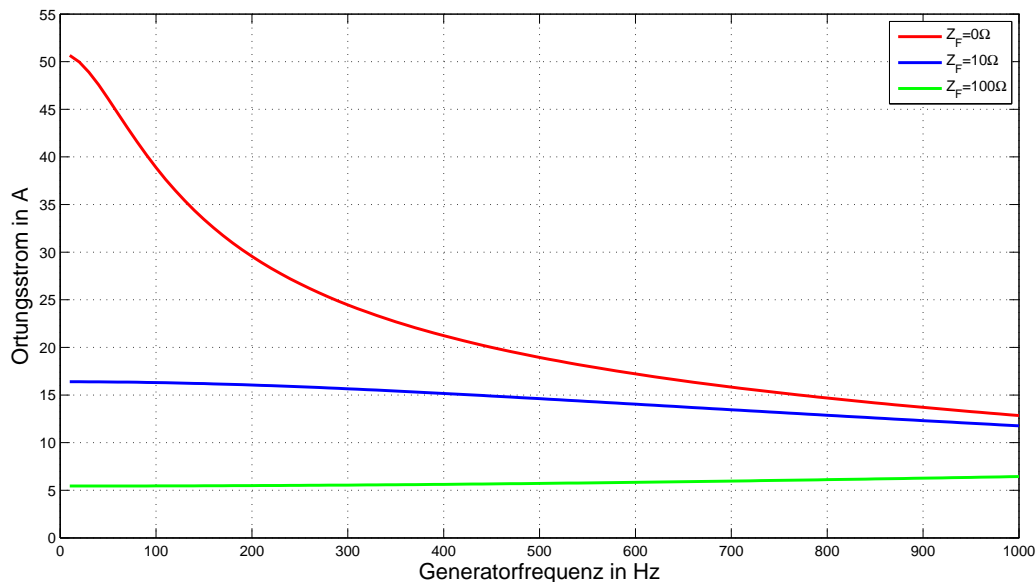


Abbildung 6.27: Ortungsstrom in Abhängigkeit der Generatorfrequenz (Mobile Einspeisung; reines Kabelnetz;  $S_{Gen} = 3$  kVA; Fehlerort 3)



Bei einem satten Kurzschluss ( $Z_F = 0 \Omega$ ) wird die Höhe des Ortungsstroms bei kleinen Frequenzen nur durch den ohmschen Leitungswiderstand bestimmt. Bei größer werden den Frequenzen nimmt der Einfluss der Leitungsinduktivität zu und der Ortungsstrom wird kleiner. Bei hochohmigen Fehlerwiderständen ( $Z_F = 100 \Omega$ ) wird der Ortungsstrom hauptsächlich durch den ohmschen Fehlerwiderstand bestimmt. Somit spielt die Wahl der Frequenz für die mobile Ortung keine entscheidende Rolle.

Um die Tauglichkeit des Prototypen für die mobile Ortung zu bewerten, ist der Ortungsstrom in Abhängigkeit des Fehlerwiderstandes in Abbildung 6.28 dargestellt. Deutlich zu erkennen ist die Abnahme des Ortungsstromes mit größer werdendem Fehlerwiderstand. Bei einer Generatorleistung von 3 kVA und einem Detektionspegel der Sonde von 4,2 A ist eine Ortung bis  $180 \Omega$  möglich. Bei einer Einspeisung von 1 kVA ist hingegen nur mehr eine Verfolgung der Fehlerschleife bis zu einem Fehlerübergangswiderstand von  $50 \Omega$  möglich. Um eine möglichst große Mobilität für das Betriebspersonal zu gewährleisten, ist es notwendig, die Generatorleistung so gering als möglich zu halten, was durch die Verwendung einer sensitiveren Magnetfeldsonde bewerkstelligt werden kann.

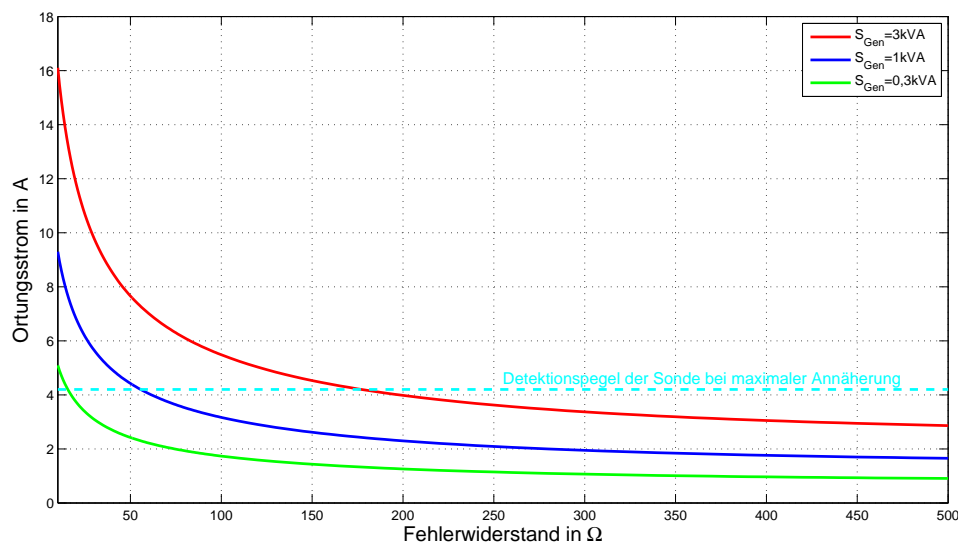


Abbildung 6.28: Ortungsstrom in Abhängigkeit vom Fehlerwiderstand (Mobile Einspeisung; reines Kabelnetz;  $f_G = 183 \text{ Hz}$ ; Fehlerort 3)

## Alternative

Als Alternative zur Magnetfeldsonde können auch Feldmessgeräte herangezogen werden. Diese weisen zwar hohe Anschaffungskosten im Vergleich zum Prototypen auf, ermöglichen dafür aber auch eine Feldmessung bis in den Nano-Tesla-Bereich. Feldmessgeräte mit einer Frequenzanalyse bieten zusätzlich die Möglichkeit einer variablen Einspeisung der Frequenz. Gelingt es, den Detektionspegel auf ein Ampere zu senken, so wäre eine Ortung bei einer Generatorleistung von 300 VA bis zu einem Fehlerübergangswiderstand von 500  $\Omega$  möglich.

## 6.2.2 Auswertung für ein gemischtes Netz

Der Ortungsstrom in Abhängigkeit der Generatorfrequenz für das gemischte Netz ist in Abbildung 6.29 dargestellt. Die Einspeisung erfolgt ebenfalls mit einer konstanten Leistung von 3 kVA. Im Gegensatz zum Kabelnetz ist die Leitungsimpedanz im gemischten Netz größer, was einen geringeren Ortungsstrom zur Folge hat.

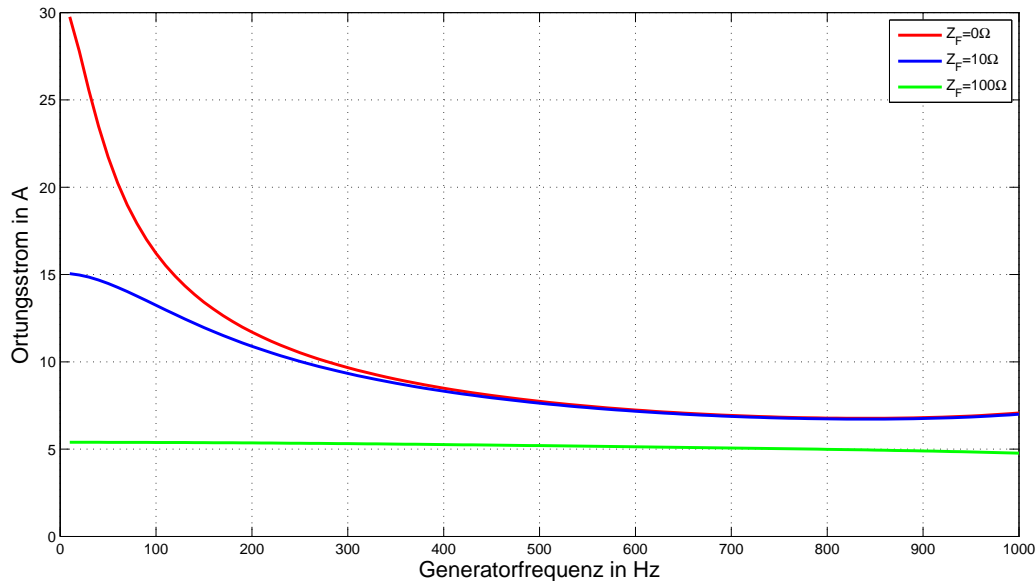


Abbildung 6.29: Ortungsstrom in Abhängigkeit der Generatorfrequenz  
(Mobile Einspeisung; gemischtes Netz;  $S_{Gen} = 3$  kVA; Fehlerort 3)

Es zeigt sich, dass bei unterschiedlichen Fehlerwiderständen ( $0 \Omega$  und  $10 \Omega$ ) eine Annäherung bei hohen Frequenzen erfolgt. Die maßgebende Impedanz bei niederohmigen Fehlerwiderständen ist dabei die Leitungsimpedanz. Für hochohmige Fehler ( $Z_F = 100 \Omega$ ) wird der Ortungsstrom lediglich durch den Fehlerwiderstand bestimmt.

In Abbildung 6.30 ist der Ortungsstrom in Abhängigkeit vom Fehlerwiderstand dargestellt. Mit einer eingespeisten Leistung von 0,3 kVA ist bei einem Detektionspegel von 1 A eine Ortung bis  $500 \Omega$  möglich.

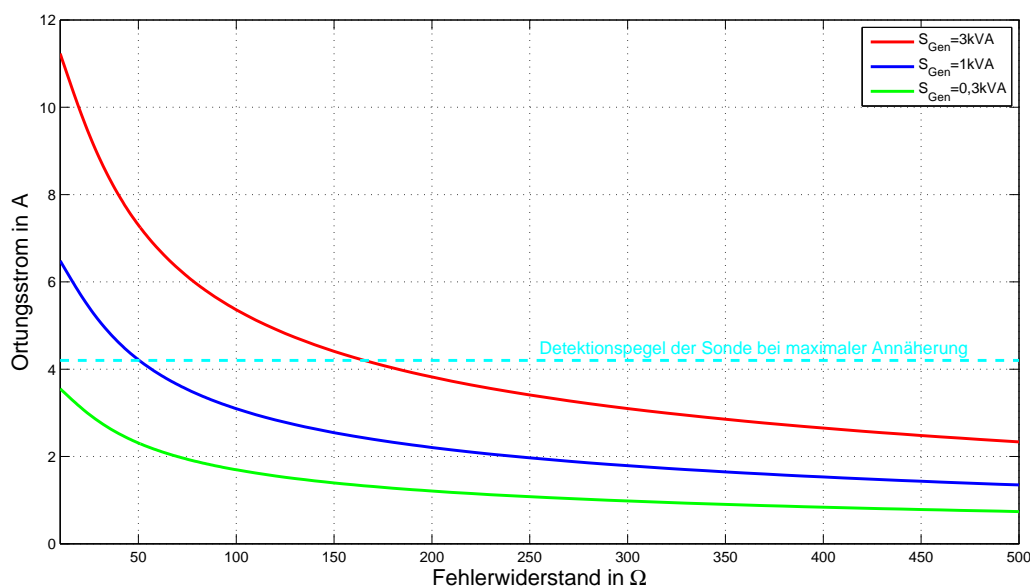


Abbildung 6.30: Ortungsstrom in Abhängigkeit vom Fehlerwiderstand  
(Mobile Einspeisung; gemischtes Netz;  $f_G = 183 \text{ Hz}$ ; Fehlerort 3)

### 6.3 Tonfrequenzrundsteueranlagen (TRA)

Eine weitere Möglichkeit, den Ortungsstrom in das Netz einzuspeisen, ist die Nutzung bestehender TRA als Signalquelle. Die TRA unterscheiden sich durch die Art der Ankopplung. Anlagen mit Parallelankopplung sind für Frequenzen ab 200 Hz in Verwendung. Die vorangegangenen Untersuchungen für die stationäre Einspeisung haben gezeigt, dass hohe Frequenzen auszuschließen sind, da die Gefahr von Fehlinterpretationen besteht. Die Serienankopplung, die vor allem für Frequenzen unter 200 Hz ausgelegt ist, wird in Österreich nur vereinzelt angewendet.

Aufgrund der geringen Anzahl von Anlagen, die für eine Verwendung in Frage kommen und dem Problem, dass die Ankopplung der TRA auf die Tonfrequenz abgestimmt ist, werden keine Simulationen für die TRA durchgeführt.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Gelöschte Netze erhöhen die Versorgungssicherheit, jedoch sind dafür aufwendige Erdschlussschutzkonzepte gegenüber der starren bzw. niederohmigen Erdung notwendig. Ziel dieser Diplomarbeit ist es, für das an der TU Graz entwickelte Erdschlusssortungsverfahren durch Fremdromeinspeisung Untersuchungen hinsichtlich der technischen Anwendbarkeit in einem Mittelspannungsnetz durchzuführen. Hierfür sind Simulationen für unterschiedliche Modellnetze mit Matlab-Simulink durchgeführt worden, um die technischen Parameter (Generatorleistung, Generatorfrequenz, etc.) zu erarbeiten.

Als erstes wurden Versuche für die stationäre Einspeisung durchgeführt. Dabei wird ein Ortungsstrom in die Leistungshilfswicklung der Petersenspule eingespeist. Dies stellt eine einfache durchzuführende Art der Ankopplung dar. Eine Einspeisung direkt in die fehlerbehaftete Phase ist nicht möglich. Die Isolationsfestigkeit des Generators müsste bei direkter Ankopplung auf die Betriebsspannung ausgelegt sein. Durch das Übersetzungsverhältnis der Petersenspule ist es jedoch notwendig, dass der Generator einen relativ großen Strom für die Ortung bereitstellt. Für die Simulation wurde ein konstanter Strom (300 A) in die Leistungshilfswicklung der Petersenspule eingespeist. In der Praxis könnte dieser Strom durch einen Anpassungstransformator aufgebracht werden. Die 300 A entsprechen der maximalen Dauerbelastung der Leistungshilfswicklung.

Es hat sich gezeigt, dass hohe Frequenzen für das Verfahren nicht geeignet sind, da die Generatorleistung ab einer Frequenz von 300 Hz linear ansteigt. Zusätzlich können bei der Verwendung von hohen Generatorfrequenzen Probleme durch resonanzbedingte Stromüberhöhungen entstehen. Diese würden unzulässig hohe Ströme an der Fehlerstelle hervorrufen. Bei einer Frequenz von 183 Hz, dies entspricht der Frequenz des Prototypen, sind die Leistungen relativ gering, jedoch können nur niederohmige Fehler geortet werden. Dies spiegeln auch die Ergebnisse aus einem Feldversuch in einem reinen Kabelnetz wieder.

Aufgezeigt wurde aber auch eine Verbesserungsmöglichkeit bei der Verwendung einer

alternativen Frequenz nahe der 50 Hz Netzfrequenz, wodurch Ortungen bis in den  $k\Omega$  Bereich möglich sind. Die dafür benötigten Leistungen sind aber relativ hoch. Dies hat aber auch den Vorteil, dass keine Beeinflussung der TRA-Empfänger in der Nähe der Netzfrequenz stattfindet. Ebenfalls umgeht man damit das Problem der Fehlinterpretation, welche in Netzen mit unterschiedlichem Aufbau der Abgänge entstehen können. Der Einfluss der Streuinduktivität der Petersenspule ist bei 45 Hz vernachlässigbar. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6.1 und 6.2 zusammengefasst.

Entscheidende Verbesserungen sind durch das Senken des Detektionspegels der Magnetfeldsonde möglich. Für den Prototypen liegt der untere Detektionspegel der Sonde bei 4,2 A. Es handelt sich dabei um die erste Entwicklungsstufe der Sonde, bei der versucht wurde, die Kosten so gering als möglich zu halten. Um eine flächendeckende Erfassung zu ermöglichen, ist eine Vielzahl von verteilten Sonden notwendig, wodurch ein enormer Kostendruck bei der Entwicklung der Sonde entsteht. Gelingt es, den Detektionspegel zu verringern, so kann dadurch die erforderliche Leistung des Generators gesenkt werden. Dies würde auch den Vorteil aufweisen, dass die Ströme an der Fehlerstelle gering gehalten werden können. Der Signalgenerator selbst könnte als Umrichter ausgeführt sein, der seine Energie aus dem Netz bezieht.

Die Simulationen wurden nur für Strahlennetze durchgeführt, da es bei Ringnetzen zu einer Aufteilung des Ortungsstroms kommt. Die Aufteilung führt unter Umständen zu Fehlinterpretationen und ist abhängig von der relativen Lage des Fehlerortes in der Schleife. Durch das Öffnen des Ringes und dem daraus resultierenden Strahlennetz ist eine verbesserte Ortung möglich. In einem Strahlennetz ist hingegen der Fehlerort vernachlässigbar.

Für die Untersuchungen der mobilen Ortung wurde von einer konstanten Leistung des Signalgenerators ausgegangen. Die Einspeisung erfolgte in einem vom Netz getrennten Abgang. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die Wahl der Frequenz nicht von entscheidender Bedeutung ist, da der Ortungsstrom lediglich von der eingespeisten Leistung und dem Fehlerwiderstand abhängt. Im Gegensatz zur stationären Ortung, wo eine Vielzahl von Magnetfeldsonden für eine flächendeckende Ortung angebracht werden müssen, wird für die mobile Ortung nur ein einziges Gerät benötigt. Dadurch können größere Anschaffungspreise für die Sonde in Kauf genommen werden.

Eine Alternative zu der Sonde für den stationären Betrieb sind Feldmessgeräte. Diese

weisen eine hohe Empfindlichkeit auf und ermöglichen Feldmessungen bis in den Nano-Tesla-Bereich. Gelingt es dadurch, den Detektionspegel der Sonde zu verringern, so sind Einsparungen für den Generator möglich, da ein quadratischer Zusammenhang zwischen benötigtem Ortungsstrom und der Leistung besteht. Dies ist wichtig, da bei einem batteriebetriebenen Generator die Energiebereitstellung begrenzt ist.

Der größte Nachteil bei der Ortung in einem abgeschalteten Netz ist, dass die Spannung des Signalgenerators nicht ausreichend ist, um einen Lichtbogenfehler wieder zu zünden. Für die Tonfrequenzrundsteuerung wurden keine Simulationen durchgeführt.

## Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurden erste Untersuchungen für die Erdschlussortung durch Fremdstromeinspeisung durchgeführt. Aus den Ergebnissen ist eine Weiterentwicklung der Magnetfeldsonde zu empfehlen, da dort enormes Einsparungspotential durch verringerte Anforderungen an den Signalgenerator liegt. Der schematische Zusammenhang zwischen den Generatorkosten und den Kosten der Sonde in Abhängigkeit vom Aufwand der Sonde ist in Abbildung 7.1 dargestellt. Die Ergebnisse dieser Diplomarbeit sollen als Ausgangsbasis für eine wirtschaftliche Betrachtung herangezogen werden. Dabei gilt es ein Optimum zwischen den Kosten für den Signalgenerator und den Kosten der Magnetfeldsonde zu ermitteln. Um die Praxistauglichkeit unter Beweis zu stellen, ist auch noch ein Langzeitfeldversuch wünschenswert.

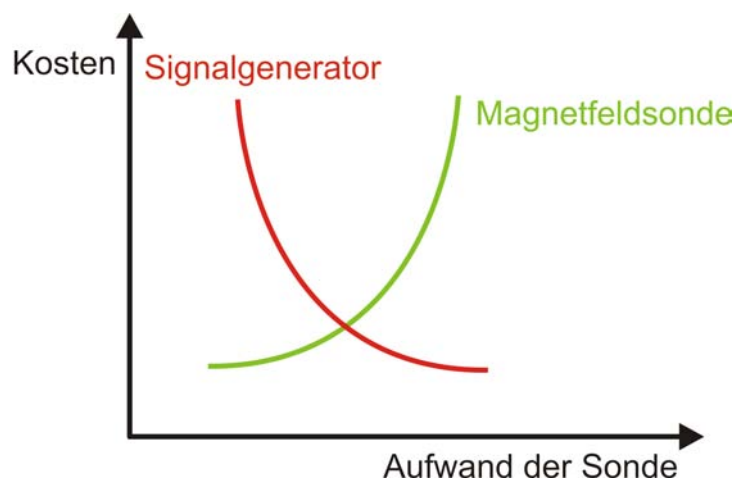


Abbildung 7.1: Schematische Darstellung der Kostenfunktionen

# Literaturverzeichnis

- [1] *Ankopplungen für die Tonfrequenz-Rundsteuertechnik.* <http://www.aeg-netcontrol.de/pdf/Gearic-Kopplung-de.pdf>.
- [2] *DIN VDE 0228 Teil 2. Maßnahmen bei Beeinflussung von Fernmeldeanlagen durch Starkstromanlagen* Auflage, 1987.
- [3] *ÖVE ÖNORM E 8383. Starkstromanlagen mit Nennwechselspannung über 1kV* Auflage, 1999.
- [4] *110-kV-Kabel/-Freileitung Eine technische Gegenüberstellung.* Verlag der Technischen Universität Graz, 2005.
- [5] *Die Erdschlusslöschspule (Petersenspule).* <http://www.electricworld.de/pdfs/petersen.PDF>, 2008.
- [6] 1976, *ÖVE B1: Beeinflussungen von Fernmeldeanlagen durch Wechselstromanlagen mit Nennspannungen über 1 kV.* Eigenverlag Österreichischer Verband für Elektrotechnik, 1976.
- [7] A-EBERLE: *Erdschlussortungsrelais.* Bedienungsanleitung für das Erdschlussortungsrelais EOR-D Auflage, 2010.
- [8] C. RAUNIG, L. FICKERT, G. ACHLEITNER C. OBKIRCHER: *Eine neue Methode zur Erdschlussortung mittels nicht netzfrequenter Stromeinspeisung.* 11. Symposium Energieinnovation, 2010.
- [9] CRASTAN, V.: *Elektrische Energieversorgung 1.* Springer-Verlag, 2.Auflage Auflage, WS 2007.
- [10] D. OEDING, R. OSWALD: *Elektrische Kraftwerke und Netze.* Springer-Verlag, 6.Auflage Auflage, 2004.



- [11] DRUML, G.: *Neue Methoden zur Erdschlusseingrenzung*. Vorträge der ETG-Fachtagung, 2009.
- [12] FICKERT, PROF.: *Schutz und Versorgungssicherheit in elektrischen Energiesystemen*. Institut für elektrische Anlagen, Vorlesungsskriptum zur gleichnamigen Vorlesung am Institut für elektrische Anlagen Auflage, 2008.
- [13] H. RENNER, M. SAKULIN: *Spannungsqualität und Versorgungszuverlässigkeit*. Institut für elektrische Anlagen, Vorlesungsskriptum zur gleichnamigen Vorlesung am Institut für elektrische Anlagen Auflage, 2008.
- [14] K. HEUCK, K. DETTMANN, D. SCHULZ: *Elektrische Energieversorgung*. Vieweg-Verlag, 7.Auflage Auflage, 2004.
- [15] LACHMANN, W.: *Frequenzselektive Magnetfeldsonde*. Institut für elektrische Anlagen, 2007.
- [16] OBKIRCHER, C.: *Ausbaugrenzen gelöscht betriebener Netze*. Institut für elektrische Anlagen, 2008.
- [17] OSWALD, B. R.: *Elektrische Energieversorgung*. Institut für Energieversorgung und Hochspannungstechnik, Universität Hannover, Vorlesungsskriptum zur gleichnamigen Vorlesung am Institut für Energieversorgung und Hochspannungstechnik Auflage, 2005.
- [18] PRAUSE, DOMOKOS: *Europäische Patentanmeldung*. Europäisches Patentamt, 1981.
- [19] PROF.FICKERT, DR.ACHLEITNER, DI FUCHS: *Versuchsprotokoll der Messung zur Erdschlussortung mit Fremdstromeinspeisung*. Institut für elektrische Anlagen, 2009.
- [20] RAUNIG, C.: *Kapazitive und induktive Beeinflussung von Hochspannungsfreileitungen*. Institut für elektrische Anlagen, 2010.
- [21] SCHNEIDER, C.: *Erdschlusslöschung im 20 kV Verteilernetz der KELAG Netz GmbH*. Institut für elektrische Anlagen, 2010.
- [22] SCHWAB, A.: *Elektroenergiesysteme*. Springer-Verlag, 2.Auflage Auflage, 2009.

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Netzfehler je 100 km Netzlänge [12] . . . . .	11
2.1	Isoliertes Netz . . . . .	13
2.2	Netz mit Erdschlusskompensation . . . . .	15
2.3	Zulässige Berührungsspannungen laut ÖVE/ÖNORM E 8383 [3] . . . . .	19
2.4	Löschgrenzen laut ÖVE B1 [6] . . . . .	20
2.5	Löschgrenzen laut VDE 0228 Teil 2 [2] . . . . .	20
2.6	Arten der Ankopplung einer TRA [1] . . . . .	22
3.1	Aufladevorgang [11] . . . . .	24
3.2	Transienter Vorgang [11] . . . . .	25
3.3	qu-Diagramm eines niederohmigen Fehlers [11] . . . . .	27
3.4	Prinzip Wattreststromerhöhung [11] . . . . .	29
3.5	Prinzip Oberschwingungsortung [7] . . . . .	31
3.6	Prinzip der Pulsortung [11] . . . . .	32
3.7	Funktionsprinzip des Ortungsgerätes [18] . . . . .	34
4.1	Stationäre Einspeisung des Ortungsstromes . . . . .	36
4.2	Mobile Einspeisung des Ortungsstromes . . . . .	37
4.3	Prototyp der Magnetfeldsonde . . . . .	39
4.4	Magnetfeldsonde für den mobilen Einsatz . . . . .	39
5.1	Mittelspannungsnetz als Wabenstruktur . . . . .	41
5.2	Netzstruktur für die Simulation . . . . .	42
5.3	Modellnetze . . . . .	43
5.4	Aufbau einer Petersenspule [5] . . . . .	47
5.5	Transformatorersatzschaltbild . . . . .	48
5.6	Ersatzschaltbild der Petersenspule für einen Löschspulenstrom von 230 A . . . . .	51

6.1	Gewählte Fehlerorte bzw. mobiler Einspeisepunkt für die Simulation . . .	53
6.2	50-Hz-Komponente mit überlagertem Ortungsstrom (183 Hz) . . . . .	54
6.3	Frequenzspektrum des zuvor in Abbildung 6.2 dargestellten Signals . . .	55
6.4	Simulinkmodell für die stationäre Einspeisung . . . . .	56
6.5	Detailliertes Modell für den erdschlussbehafteten Abgang . . . . .	57
6.6	Ersatzschaltbild für die Verifikation . . . . .	58
6.7	Ersatzschaltbild für die Zusammenfassung der Impedanzen . . . . .	59
6.8	Modellnetz für die Verifikation . . . . .	62
6.9	Effektivwerte des Generator- und Ortungsstromes in Abhängigkeit der Generatorfrequenz . . . . .	62
6.10	Ortungsstrom in Abhängigkeit der Generatorfrequenz (Stationäre Einspeisung; reines Kabelnetz; $I_G = 300\text{ A}$ ; Fehlerort 3) . . .	64
6.11	Generatorleistung in Abhängigkeit der Generatorfrequenz (Stationäre Einspeisung; reines Kabelnetz; $I_G = 300\text{ A}$ ; Fehlerort 3) . . .	65
6.12	Ortungsstrom in Abhängigkeit vom Fehlerwiderstand (Stationäre Einspeisung; reines Kabelnetz; $I_G = 300\text{ A}$ ; $f_G = 183\text{ Hz}$ ) . .	66
6.13	Generatorleistung in Abhängigkeit vom Fehlerwiderstand (Stationäre Einspeisung; reines Kabelnetz; $I_G = 300\text{ A}$ ; $f_G = 183\text{ Hz}$ ) . .	67
6.14	Ortungsstrom in Abhängigkeit vom Fehlerwiderstand (Stationäre Einspeisung; reines Kabelnetz; $I_G = 300\text{ A}$ ; $f_G = 45\text{ Hz}$ ) . . .	68
6.15	Generatorleistung in Abhängigkeit vom Fehlerwiderstand (Stationäre Einspeisung; reines Kabelnetz; $I_G = 300\text{ A}$ ; $f_G = 45\text{ Hz}$ ) . . .	69
6.16	Generatorleistung in Abhängigkeit vom Fehlerwiderstand (Stationäre Einspeisung; reines Kabelnetz; $I_G = 300\text{ A}$ ; $f_G = 183\text{ Hz}$ ; Fehlerort 3) . . . . .	70
6.17	Generatorleistung in Abhängigkeit vom Fehlerwiderstand (Stationäre Einspeisung; reines Kabelnetz; $I_G = 300\text{ A}$ ; $f_G = 45\text{ Hz}$ ; Fehlerort 3) . . . . .	71
6.18	Ortungsstrom in Abhängigkeit der Generatorfrequenz (Stationäre Einspeisung; gemischtes Netz; $I_G = 300\text{ A}$ ; Fehlerort 3) . . .	72
6.19	Generatorleistung in Abhängigkeit der Generatorfrequenz (Stationäre Einspeisung; gemischtes Netz; $I_G = 300\text{ A}$ ; Fehlerort 3) . . .	73
6.20	Ortungsstrom in Abhängigkeit vom Fehlerwiderstand (Stationäre Einspeisung; gemischtes Netz; $I_G = 300\text{ A}$ ; $f_G = 183\text{ Hz}$ ) . .	74

6.21	Generatorleistung in Abhängigkeit vom Fehlerwiderstand (Stationäre Einspeisung; gemischtes Netz; $I_G = 300\text{ A}$ ; $f_G = 183\text{ Hz}$ ) . . .	74
6.22	Ortungsstrom in Abhängigkeit vom Fehlerwiderstand (Stationäre Einspeisung; gemischtes Netz; $I_G = 300\text{ A}$ ; $f_G = 45\text{ Hz}$ ; Fehlerort 3) . . . . .	75
6.23	Generatorleistung in Abhängigkeit vom Fehlerwiderstand (Stationäre Einspeisung; gemischtes Netz; $I_G = 300\text{ A}$ ; $f_G = 45\text{ Hz}$ ; Fehlerort 3) . . . . .	76
6.24	Problematik der Fehlinterpretation . . . . .	77
6.25	Leitungsimpedanzen für Abbildung 6.24 . . . . .	78
6.26	Ersatzschaltbild für die mobile Ortung . . . . .	79
6.27	Ortungsstrom in Abhängigkeit der Generatorfrequenz (Mobile Einspeisung; reines Kabelnetz; $S_{Gen} = 3\text{ kVA}$ ; Fehlerort 3) . . . .	80
6.28	Ortungsstrom in Abhängigkeit vom Fehlerwiderstand (Mobile Einspeisung; reines Kabelnetz; $f_G = 183\text{ Hz}$ ; Fehlerort 3) . . . .	81
6.29	Ortungsstrom in Abhängigkeit der Generatorfrequenz (Mobile Einspeisung; gemischtes Netz; $S_{Gen} = 3\text{ kVA}$ ; Fehlerort 3) . . . .	83
6.30	Ortungsstrom in Abhängigkeit vom Fehlerwiderstand (Mobile Einspeisung; gemischtes Netz; $f_G = 183\text{ Hz}$ ; Fehlerort 3) . . . .	84
7.1	Schematische Darstellung der Kostenfunktionen . . . . .	87

# Tabellenverzeichnis

5.1	Kenndaten der im Modell verwendeten Leitungen [4] . . . . .	44
5.2	Leitungsparameter für die Simulation . . . . .	46
5.3	Kennwerte von Grosstransformatoren [9] . . . . .	52
5.4	Transformatorparameter für Simulink (Bezogen auf die Hochspannungs- seite) . . . . .	52
6.1	Ergebnisse für ein Kabelnetz . . . . .	77
6.2	Ergebnisse für ein gemischtes Netz . . . . .	77