

# Erdschlusslöschung im 20-kV-Verteilernetz der KELAG Netz GmbH.

Diplomarbeit



Institut für Elektrische Anlagen  
Technische Universität Graz

Betreuer

Univ.-Prof. DI Dr.techn. Lothar Fickert  
DI Tengg Christian, Ing. Ortner Manfred,  
Ing. Schoass Karl, DI Wernegger H.-J.

Vorgelegt von:

Christian Schneider

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 / Februar – 2010



## 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 .....

.....

(Unterschrift)

## **Danksagung**

Mein Dank geht an erster Stelle an meinen Betreuer Herrn Prof. Lothar Fickert, für seine Unterstützung und seine Hilfsbereitschaft während der Erstellung meine Arbeit.

Auch möchte ich mich bei allen Mitarbeitern des Instituts für Elektrische Anlagen, die immer mit Rat und Tat zur Seite standen bedanken, insbesondere bei Christian Raunig, der mir als Freund und Diskussionspartner zur Seite stand.

Meinen Studienkollegen und Freunden möchte ich danken, dass sie mich in diesem schönen Lebensabschnitt begleitet haben und mir den nötigen Rückhalt gegeben haben.

Danke

## **Kurzfassung**

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wird die Erdschlusslöschung für das 20-kV-Verteilernetz der KELAG Netz Gesellschaft (KNG) in Kärnten untersucht. Dabei werden folgende Punkte und Detailfragen behandelt. Neben einer Übersicht über die theoretischen Grundlagen wird eine Analyse des bestehenden 20-kV-Verteilernetzes Kärntens durchgeführt. Hierbei werden die Betriebsmittel der Umspannwerke erfasst und die zugehörigen Löscherbezirke auf ihre Ausbaureserven untersucht. Anschließend werden die Möglichkeiten zur Erdschlussortung untersucht und bewertet. Einen wichtigen Punkt stellt die Simulation eines konkreten Löscherbezirks dar. In diesem Modell werden die unterschiedlichen Erdschlussortungsverfahren zur Erfassung eines erdschlussbehafteten Abzweiges untersucht.

Als Ergebnis der Simulation stellt sich heraus, dass kein untersuchtes Ortungsverfahren universell einsetzbar ist, sondern nur durch ein detailliertes Erdschluss-Engineering geeignete Maßnahmen für die Erdschlusserfassung abgeleitet werden können.

**Schlüsselwörter: Erdschlusslöschung, Erdschlussortung, Schutztechnik**

## **Abstract**

This thesis examines the earth fault compensation in the 20-kV-distribution grid of KELAG Netz Company (KNG). Apart from an investigation into the theoretical background of this field, an analysis of the existing 20-kV-distribution grid in Carinthia is provided by this thesis. Therefore the operating facilities of the substations are evaluated and the associated area, which is galvanically connected to the arc extinguishing coil, in relation to the arc extinguishing safety reserve is investigated. Following this, the alternatives of earth fault location methods are examined. Important is the simulation of a concrete substation. In this simulation the different earth fault location methods for detecting an earth fault on a line are analysed.

As a result of this research, this thesis shows that there is no earth fault location method which fits all different grid structures. Only with a detailed earth fault engineering it is possible to take the adequate measures for earth fault detection.

**Key words: earth fault compensation, earth fault location, shielding method**

## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Zeichenerklärung</b> .....	<b>8</b>
<b>2 Einleitung</b> .....	<b>10</b>
<b>3 Methoden</b> .....	<b>11</b>
3.1 Methode der Symmetrischen Komponenten .....	11
3.2 Mit-, Gegen- und Nullimpedanzen .....	12
3.3 Nullimpedanz einer Freileitungen ohne Erdseil .....	12
3.3.1 Ohmscher Widerstand des Nullsystems einer Freileitung ohne Erdseil.....	13
3.3.2 Induktivität des Nullsystems einer Freileitung ohne Erdseil.....	13
3.3.3 Nullimpedanz einer Freileitung ohne Erdseil nach Carson .....	14
3.4 Nullimpedanz von Kabeln .....	14
3.5 Nullkapazitäten von Freileitungen und Kabeln .....	15
3.5.1 Erdkapazität $C_E$ von Freileitungen ohne Erdseil.....	15
3.5.2 Erdkapazität $C_E$ von Kabeln.....	16
<b>4 Allgemeines</b> .....	<b>18</b>
4.1 Grundlagen der Sternpunktbehandlung in Drehstromnetzen .....	18
4.1.1 Netze mit isoliertem Sternpunkt: .....	18
4.1.2 Netze mit Erdschlusskompensation (gelöschtes Netz).....	19
4.1.3 Netze mit niederohmiger Sternpunkterdung.....	21
4.2 Gelöschtes Netz .....	23
4.2.1 Allgemein.....	23
4.2.2 Gelöschtes Netz mit Erdschlusslöschspule.....	24
4.3 Parameter.....	25
4.3.1 Verstimmung $v$ .....	25
4.3.2 Dämpfung $d$ .....	25
4.3.3 Löschgrenze $I_G$ .....	25
4.3.4 Erdschlussreststrom $I_{Rest}$ .....	25

4.3.5	Kapazitiver Erdschlussstrom $I_{CE}$ .....	26
4.3.6	Sternpunktverlagerungsspannung $U_{NE}$ .....	26
4.3.7	Oberschwingungsgehalt THD .....	26
4.3.8	Parameterbestimmung und Betrieb von Erdschlusslöschspulen.....	27
4.3.9	Betrieb.....	28
4.4	Einflussfaktoren .....	30
4.5	Normative Behandlung des gelöscht betriebenen 20-kV-Netzes in Österreich.....	31
4.6	Kritische Netzgrößen und Löschgrenze .....	31
4.6.1	Maximaler theoretischer Ausbaugrad .....	33
4.7	Einfluss der Oberschwingungen .....	35
4.7.1	Resonanzen .....	36
<b>5</b>	<b>Analyse des 20-kV-Verteilernetzes der KNG.....</b>	<b>37</b>
5.1	Allgemein.....	37
5.2	110/20-kV-Umspannwerke: .....	37
5.2.1	Transformatoren .....	37
5.2.2	Erdschlusslöscheinrichtungen .....	38
5.2.3	Löschreserven .....	38
5.3	20-kV-Abzweige .....	39
<b>6</b>	<b>Analyse des Störungsgeschehen der KNG.....</b>	<b>42</b>
6.1	Störungsstatistik .....	42
<b>7</b>	<b>Netzbetrieb der KNG.....</b>	<b>44</b>
7.1	Allgemein.....	44
7.2	Schutztechnik .....	44
7.2.1	Methoden der Erdschlusserfassung.....	45
7.2.2	Erdschlusserfassung und -ortung bei der KNG.....	49
7.3	Methoden zur Erdschlussortung .....	50
7.3.1	Erdschlussmelderelais.....	50

7.3.2	Erdschlusswischerverfahren .....	51
7.3.3	Wattmetrisches Verfahren .....	56
7.3.4	Pulsortung .....	58
7.3.5	Oberschwingungsverfahren .....	60
7.3.6	Zusammenfassung: .....	62
<b>8</b>	<b>Simulation mit MATLAB/Simulink .....</b>	<b>63</b>
8.1	Allgemein.....	63
8.2	Musternetz.....	63
8.2.1	Simulationsdaten .....	64
8.2.2	Betriebszustand Erdschlusslöschspule .....	66
8.3	Simulation der Musternetze .....	66
8.4	Umspannwerk mit Stichleitungen.....	67
8.4.1	Erdschlussortungsverfahren .....	68
8.5	Umspannwerk mit Ringleitung .....	71
8.5.1	Erdschlussortungsverfahren .....	71
8.6	Umspannwerk mit vermaschten Abzweigen.....	76
8.6.1	Erdschlussortungsverfahren .....	76
8.7	Einfluss von Fehlerort und Fehlerübergangswiderstand .....	77
8.8	Bewertung der Erdschlussortungsverfahren .....	79
<b>9</b>	<b>Ergebnisse .....</b>	<b>82</b>
<b>10</b>	<b>Diskussion und Ausblick.....</b>	<b>83</b>
	<b>Anhang A</b>	
	<b>Anhang B</b>	

# 1 Zeichenerklärung

$C_E$	Erdkapazität pro Leiter
$E$	Erde
$f$	Frequenz der Grundschiwingung $f = 50 \text{ Hz}$
$g$	Güte des Netzes
$g_1$	Güte der Grundschiwingung
$g_3$	Güte bei der dritten Oberschiwingung
$g_5$	Güte bei der fünften Oberschiwingung
$g_7$	Güte bei der siebten Oberschiwingung
$I_1$	Strom im Leiter 1
$I_2$	Strom im Leiter 2
$I_3$	Strom im Leiter 3
$I_{CE}$	Kapazitiver Erdschlussstrom (ungelöscht)
$I_{1E}$	Strom von Leiter 1 zu Erde
$I_{2E}$	Strom von Leiter 2 zu Erde
$I_{3E}$	Strom von Leiter 3 zu Erde
$I_G$	Löschgrenze
$I_L$	Löschspulenstrom
$I_M$	Summenstrom
$I_{Rest}$	Erdschlussreststrom
$k$	Unsymmetriefaktor des Netzes
$L_D$	Induktivität Löschspule
$N$	Sternpunkt
$p_1$	Anteil der Grundschiwingung
$p_3$	Anteil der dritten Oberschiwingung
$p_5$	Anteil der fünften Oberschiwingung
$p_7$	Anteil der siebten Oberschiwingung
$R_D$	Wirkwiderstand der Löschspule
$R_E$	Erdungswiderstand
$R_L$	Widerstand einer Leitung
$U_B$	Betriebsspannung
$U_{NE}$	Sternpunktverlagerungsspannung
$U_{TP}$	Berührungsspannung
$v$	Verstimmung
$v_1$	Verstimmung der Grundschiwingung
$v_3$	Verstimmung der dritten Oberschiwingung
$v_5$	Verstimmung der fünften Oberschiwingung
$v_7$	Verstimmung der siebten Oberschiwingung
$X_T$	Transformator Reaktanz
$Z_E$	Fehlerimpedanz

$\underline{Z}_L$	Leitungsimpedanz
$\underline{Z}_{sE}$	Selbstimpedanzbelag, Rückleitung über Erde
$\underline{Z}_{gE}$	Gegenimpedanzbelag, Rückleitung über Erde
$\omega$	Kreisfrequenz der Grundschiwingung
$\mu_0$	magnetische Feldkonstante

Die hochgestellten Indizes <sup>0</sup>, <sup>1</sup>, <sup>2</sup> kennzeichnen das Null-, Mit- und Gegensystem der symmetrischen Komponenten

## 2 Einleitung

Der Netzbetreiber ist durch die Liberalisierung des Elektrizitätsmarktes mehr denn je bemüht, den durch die Regulierung vorgegebenen Anforderungen und Erwartungen gerecht zu werden. Ein großes Augenmerk wird dabei auf die Versorgungssicherheit und Versorgungsqualität gelegt. Versorgungsunterbrechungen sind - ob geplant oder ungeplant - auf ein akzeptables Maß zu reduzieren. Hierbei stellen geplante Abschaltungen von Betriebsmitteln ein geringeres Problem dar, da es meist möglich ist, die Versorgung der Netzkunden aufrechtzuerhalten bzw. sie im Vorhinein über die Unterbrechungen zu informieren. Unvorhersehbare Störungen, welche ungeplante Abschaltungen hervorrufen, sind vom Netzbetreiber jedoch nur zum Teil beeinflussbar. Für die Erstellung des Schutzkonzeptes eines Netzes ist die Wahl der Sternpunktbehandlung entscheidend. Um einen zukünftigen strategischen Netzausbau langfristig planen zu können, ist die Erhebung und Bewertung des Ist-Zustandes des Netzes für den Netzbetreiber wesentlich.

Im Zuge dieser Diplomarbeit wird das 20-kV-Verteilernetz der KNG untersucht. Dabei sollen folgende Punkte und Detailfragen behandelt werden:

- Übersicht über die theoretischen Grundlagen
- Analyse des bestehenden 20-kV-Verteilernetzes in Kärnten
  - Erhebung der Kabel/Freileitungs-Ausbaureserven der einzelnen Umspannwerke
- Der Netzbetrieb des 20-kV-Verteilernetzes
  - Ermittlung des angewandten Schutzkonzeptes
  - Methoden der Erdschlusserfassung
  - Erläuterung von gängigen Erdschlussortungsmethoden
- Erstellen eines Modellnetzes zur Untersuchung der Erdschlussortungsmethoden
  - Darstellung der Einsatzgebiete der einzelnen Methoden
  - Bewertung der einzelnen Methoden

### 3 Methoden

Da ein Erdschluss einen unsymmetrischen Fehler darstellt, kann für genauere Untersuchungen auf die Methode der Symmetrischen Komponenten zurückgegriffen werden.

#### 3.1 Methode der Symmetrischen Komponenten

Ist der Betrag der drei Spannungen und der Ströme eines dreiphasigen Systems gleich groß und um jeweils 120° verschoben, spricht man von einem symmetrischen System [1]. Solch ein dreiphasiges symmetrisches System hat den Vorteil, dass es sich durch ein einphasiges Ersatzschaltbild beschreiben lässt.

Bei unsymmetrischer Belastung oder einem unsymmetrischen Fehler, wie dem einpoligen Erdschluss, wird die Beschreibung durch ein einphasiges System komplexer [2]. Die Methode der Symmetrischen Komponenten beruht darauf, ein unsymmetrisches System in drei unabhängige symmetrische Komponentensysteme zu zerlegen. Die Zerlegung in die drei Komponenten, Mit-, Gegen- und Nullsystem, lässt somit wieder eine einfache einphasige Betrachtung zu [2, 3].

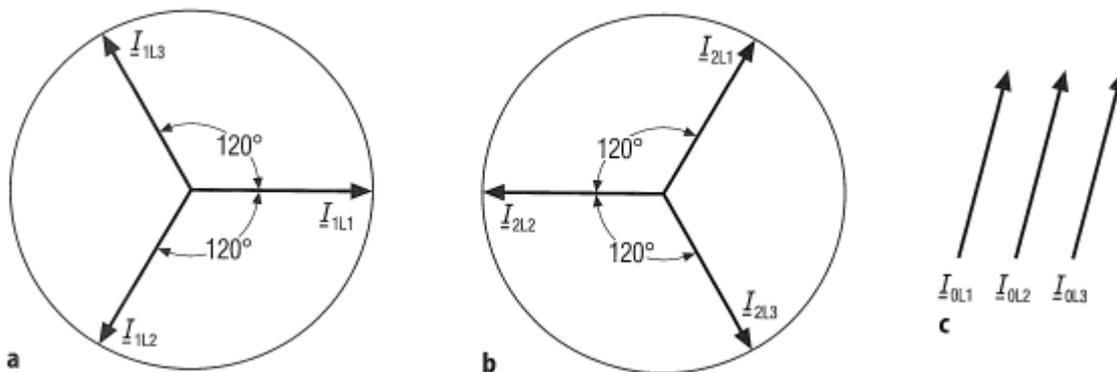


Abbildung 3-1: Beispiel für das Mit-(a), Gegen-(b) und Nullsystem (c) der Ströme [4]

Rechnen mit Symmetrischen Komponenten am Beispiel der Ströme

$$\begin{bmatrix} I^1 \\ I^2 \\ I^0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} \tag{3-1}$$

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I^1 \\ I^2 \\ I^0 \end{bmatrix} \tag{3-2}$$

$I^1$  ... Strom im Mitsystem  
 $I^2$  ... Strom im Gegensystem  
 $I^0$  ... Strom im Nullsystem

$$a = e^{j120^\circ}$$

$$a^2 = e^{j240^\circ}$$

Die Symmetrierung und Entsymmetrierung erfolgt für Spannungen und andere Größen des Drehstromnetzes analog den Gleichungen (3-1) und (3-2) [4].

### Mitsystem

Symmetrisches Drehstromsystem mit normaler Phasenfolge. Das Mitsystem entspricht jenen Größen, die auch im symmetrischen Dreiphasensystem aufscheinen [5].

$$\underline{I}^1 = \frac{1}{3}(\underline{I}_1 + a\underline{I}_2 + a^2\underline{I}_3) \quad (3-3)$$

### Gegensystem

Symmetrisches Drehstromsystem mit entgegengesetzter Phasenfolge. Tritt nur bei Unsymmetrie auf.

$$\underline{I}^2 = \frac{1}{3}(\underline{I}_1 + a^2\underline{I}_2 + a\underline{I}_3) \quad (3-4)$$

### Nullsystem

System mit drei Strömen gleicher Phasenlage und gleichem Betrag. Beschreibt Ströme, die über Erde (Erdschlussstrom) bzw. dem Neutralleiter fließen [5].

$$\underline{I}^0 = \frac{1}{3}(\underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3) \quad (3-5)$$

## 3.2 Mit-, Gegen- und Nullimpedanzen

Jedem der drei symmetrischen Systeme kann eine Impedanz  $\underline{Z}$  zugeordnet werden. Man erhält die Impedanzmatrix für ein symmetrisch aufgebautes Netz mit symmetrischer Einspeisung[4, 6].

$$\begin{bmatrix} \underline{U}^1 \\ \underline{U}^2 \\ \underline{U}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}^1 & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z}^0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}^1 \\ \underline{I}^2 \\ \underline{I}^0 \end{bmatrix} \quad (3-6)$$

$$\underline{Z}^1 = \frac{\underline{U}^1}{\underline{I}^1} \quad (3-7)$$

$$\underline{Z}^2 = \frac{\underline{U}^2}{\underline{I}^2} \quad (3-8)$$

$$\underline{Z}^0 = \frac{\underline{U}^0}{\underline{I}^0} \quad (3-9)$$

## 3.3 Nullimpedanz einer Freileitungen ohne Erdseil

Für das in dieser Arbeit erstellte Simulationsmodell sind die Leitungsparameter des Nullsystems notwendig.

### 3.3.1 Ohmscher Widerstand des Nullsystems einer Freileitung ohne Erdseil

Für Freileitungen ohne Erdseil gilt im Allgemeinen folgendes Ersatzschaltbild

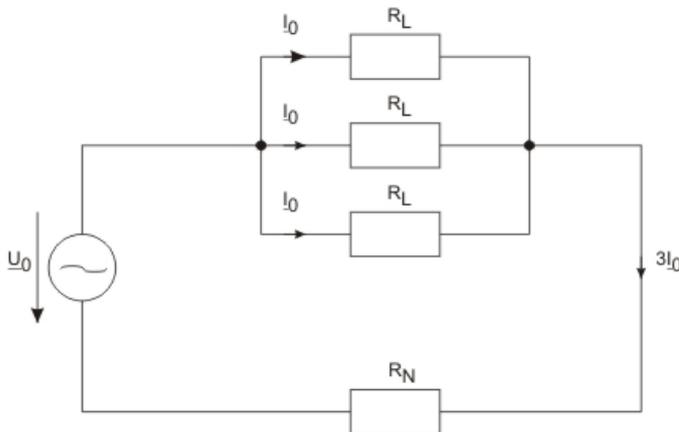


Abbildung 3-2: Ohmsche Komponenten im Nullsystem einer Freileitung mit Neutralleiter[7]

Aus diesem lässt sich folgende Formel für den ohmschen Widerstand des Nullsystems herleiten [7].

$$R^0 = R_L + 3 \cdot R_N \quad (3-10)$$

Das 20-kV-Verteilernetz der KNG ist jedoch ohne Neutralleiter ausgeführt, in diesem Fall bildet das Erdreich den Rückleiter.

$$R^0 = R_L + 3 \cdot R_E \quad (3-11)$$

Für den längenbezogenen Widerstand  $R'_E$  des Erdreichs ergibt sich folgender Wert.

$$R'_E = \pi^2 \cdot f \cdot 10^{-4} \cdot \quad (3-12)$$

$$R'_E \approx 50 \frac{\text{m}\Omega}{\text{km}} \cdot$$

Daraus kann das ohmsche Verhalten der gesamten Anordnung beschrieben werden.[7]

$$R^0 = R_L + 3 \cdot R_E = R_L + 3 \cdot 50 \frac{\text{m}\Omega}{\text{km}} \cdot l \quad (3-13)$$

### 3.3.2 Induktivität des Nullsystems einer Freileitung ohne Erdseil

Für Freileitungen ohne Neutralleiter stellt das Erdreich den Rückleiter dar. Durch Vereinfachungen lässt sich die Induktivitätsberechnung wieder auf die Berechnung der Induktivität einer Leiterschleife zurückführen [7].

$$L'^0 = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot 3 \cdot \ln \frac{\delta_E}{r_B} \quad (3-14)$$

$$\delta_E = 658 \cdot \sqrt{\frac{\rho_E}{f}} \quad (3-15)$$

$\rho_E$  ... spezifischer Erdwiderstand in  $\Omega\text{m}$ , z.B.: Ackerboden  $\rho_E = 100 \Omega\text{m}$

Daraus ergibt sich für übliche Mastabmessung einer 20-kV-Freileitung, bezogen auf die Betriebsinduktivität, ein Verhältnis von [7]

$$\frac{X'^0}{X'_B} = \frac{L'^0}{L'_B} \approx 3,3 \quad (3-16)$$

### 3.3.3 Nullimpedanz einer Freileitung ohne Erdseil nach Carson

Um einen Vergleich der angewandten Näherungsformeln für die Nullimpedanzen einer Freileitung zu erhalten, werden diese mit den Methoden von Carson überprüft.

Es ergeben sich für eine Freileitung mit drei verdrehten Leitern und gemittelten geometrischen Abständen folgende Näherungsformeln für den Selbstimpedanzbelag  $\underline{Z}'_{sE}$  und Gegenimpedanzbelag  $\underline{Z}'_{gE}$  mit Rückleitung über Erde [4].

$$\underline{Z}'_{sE} = R'_L + \omega \cdot \frac{\mu_0}{8} + j \cdot \omega \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \left( \frac{1}{4} + \ln \left( \frac{\delta_E}{r_L} \right) \right) \quad (3-17)$$

$$\underline{Z}'_{gE} = \omega \cdot \frac{\mu_0}{8} + j \cdot \omega \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \left( \frac{\delta_E}{d} \right) \quad (3-18)$$

$r_L$ ...Radius der Leiter

$d$ ...mittlerer Abstand der einzelnen Leiter zueinander

Daraus ergeben sich folgende Beziehungen für die Impedanzen der symmetrischen Komponenten[4].

$$\underline{Z}'_1 = \underline{Z}'_2 = \underline{Z}'_{sE} - \underline{Z}'_{gE} \quad (3-19)$$

$$\underline{Z}'_0 = \underline{Z}'_{sE} + 2 \cdot \underline{Z}'_{gE} \quad (3-20)$$

### 3.4 Nullimpedanz von Kabeln

Gegenüber Freileitungen lassen sich bei Kabeln sehr schwer Näherungen treffen. Grund dafür sind die unterschiedlichen Varianten im Kabelaufbau sowie das umgebende Erdreich. Besonders Rohrleitungen bzw. metallische Konstruktionen besitzen einen sehr großen Einfluss auf die Nullimpedanz. Korrekte Ergebnisse sind nur durch Messungen erhältlich [7, 8].

Für die Berechnung der benötigten Nullimpedanzen wird der Erdfaktor auch  $k_0$ - oder  $k_E$ -Faktor verwendet [9, 10].

$$\underline{k}_0 = \frac{1}{3} \cdot \left( \frac{\underline{Z}^0}{\underline{Z}^1} - 1 \right) \quad (3-21)$$

Der  $k_0$ -Faktor kann als leitungslängenunabhängige konstante Größe betrachtet werden und beschreibt das Verhältnis zwischen der Mitimpedanz und der Nullimpedanz [10]. Durch eine einfache Umformung ergibt sich folgende Formel zur Berechnung der Nullimpedanz.

$$\underline{Z}^0 = \underline{Z}^1 \cdot (3 \cdot \underline{k}_0 + 1) \quad (3-22)$$

Für die Berechnung der Nullimpedanz ist ein  $k_0$ -Faktor von 0,7/-40°, welcher den Erfahrungswerten entspricht, zu wählen [9, 11].

### 3.5 Nullkapazitäten von Freileitungen und Kabeln

Um nachfolgend Berechnungen und Aussagen über die Ausbaureserve einzelner Abzweige treffen zu können, muss die Erdkapazität  $C_E$  der Freileitungen und Kabeln bekannt sein. Die Erdkapazität ist maßgeblich für den zu löschenden Erdschlussstrom  $I_{CE}$  und somit für den maximalen Ausbaugrad.

$$I_{CE} = 3 \cdot I^0 = \sqrt{3} \omega C^0 U_B = \sqrt{3} \omega C_E U_B \quad (3-23)$$

Wie aus Gleichung (3-23) ersichtlich, ist die Nullkapazität  $C_0$  gleich der Erdkapazität  $C_E$ .

#### 3.5.1 Erdkapazität $C_E$ von Freileitungen ohne Erdseil

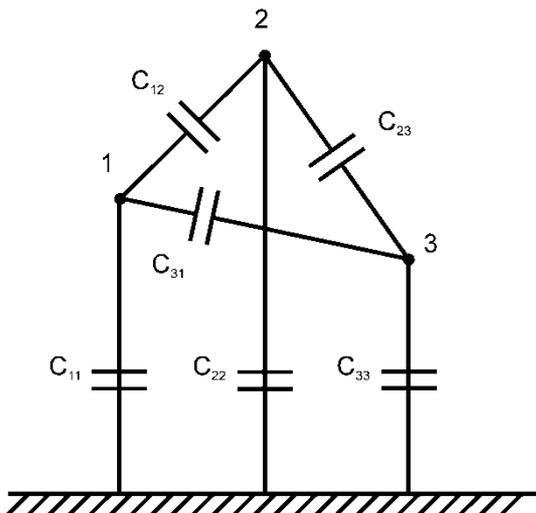


Abbildung 3-3: Teilkapazitäten einer Drehstromleitung ohne Erdseil[2]

Die Berechnung erfolgt nach dem Prinzip der Spiegelladung. Jeder Leiter wird hierbei an der Erde mit umgekehrtem Potential gespiegelt.

$$C^0 = \frac{6\pi\varepsilon}{\ln\left(\frac{D_{11}D_{22}D_{33}D_{12}^2D_{23}^2D_{31}^2}{r_1r_2r_3d_{12}^2d_{23}^2d_{31}^2}\right)} \quad (3-24)$$

$$D_m = \sqrt[9]{D_{11}D_{22}D_{33}D_{12}^2D_{23}^2D_{31}^2} \quad (3-25)$$

$$d_m = \sqrt[9]{r_1r_2r_3d_{12}^2d_{23}^2d_{31}^2} \quad (3-26)$$

$d_{ij}$ ...Abstand des Leiters i vom Leiter j

$D_{ij}$ ...Abstand des Leiters i vom Spiegelbild des Leiters j

$r_i$ ... Radius des Leiters i

Mit den Gleichungen (3-25) und (3-26) ergibt sich aus Gleichung (3-24) folgende Formel

$$C^0 = \frac{2\pi\varepsilon}{3 \ln\left(\frac{D_m}{d_m}\right)} = \frac{0,0242}{3 \log\left(\frac{D_m}{d_m}\right)} \left[\frac{\mu F}{km}\right] \quad (3-27)$$

Für das in Abbildung 3-3 dargestellte Drehstromsystem gilt im Allgemeinen Formel (3-27); durch die starke Beeinflussung der natürlichen Gegebenheiten wie Mastbild, Leiterführung, Bewuchs, Jahreszeit und Witterung lassen sich jedoch nur Momentanwerte berechnen. Für genaue Werte des Nullsystems muss eine Messung durchgeführt werden [12]. Aus diesem Grund werden mit Hilfe von Abschätzungen Mittelwerte für die Kapazitäten des Nullsystems errechnet [4, 6, 12].

Die Nullkapazitäten des Freileitungsnetzes ohne Erdseil sind um den Faktor 0,5 geringer als jene der Mitkapazitäten (=Betriebskapazitäten  $C_B$ ) [7].

$$C_E = C^0 = 0,5 \cdot C^1 \quad (3-28)$$

### 3.5.2 Erdkapazität $C_E$ von Kabeln

Die genauen Erdkapazitäten von Kabeln lassen sich, ähnlich wie bei Freileitungen, nur über Messungen bestimmen. Die Erdkapazitäten sind sehr stark von der Bauart des Kabeltyps abhängig [4].

Gürtelkabel:

$$C_E = C^0 = 0,5 \cdot C^1 [6] \quad (3-29)$$

Dreimantelkabel:

$$C_E = C^0 = C^1 [4, 6] \quad (3-30)$$

Einleiterkabel:

$$C_E = C^0 = C^1 [4, 6] \quad (3-31)$$

In Tabelle 3-1 sind jeweils für eine typische Freileitung und ein typisches Kabel, wie sie auch von der KNG verwendet werden, ausgewählte elektrische Kennwerte angeführt.

Bezeichnung	Typ	$C_B$ in nF/km	$C_E$ in nF/km	$I_{CE}$ in A/km
<b>ALD 3x95 mm<sup>2</sup></b>	20-kV-Freileitung	9,63	4,813	0,0524
<b>A2YHCY 3x150mm<sup>2</sup></b>	Kabel	254	254	2,764

**Tabelle 3-1: Kennwerte für Freileitung und Kabel**

Diese Werte sind für alle nachfolgenden Berechnungen und Betrachtungen zu verwenden.

## 4 Allgemeines

### 4.1 Grundlagen der Sternpunktbehandlung in Drehstromnetzen

Die Sternpunkterdung bzw. Behandlung umfasst alle Maßnahmen zur Begrenzung des einpoligen Kurzschlussstromes in der Erde oder zur Begrenzung der mit einem einpoligen Kurzschluss verbundenen Verlagerungsspannung [13].

#### 4.1.1 Netze mit isoliertem Sternpunkt:

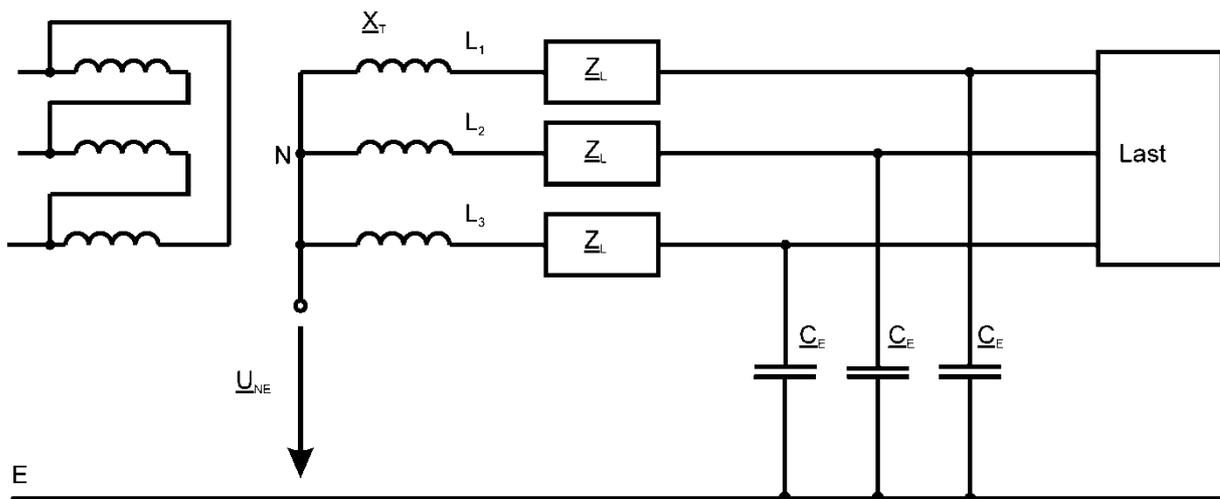


Abbildung 4-1: Isoliertes Netz – Prinzipschaltbild (einfaches Strahlennetz)

Im isolierten Netz (Abbildung 4-1) werden Transformatorsternpunkte und Sternpunktbildner nicht geerdet, sprich sie sind gegenüber Erde bzw. der Erdungsanlage isoliert. Bei einem angenommenen idealen Netz mit symmetrischer Belastung tritt keine Verlagerungsspannung  $U_{NE}$  auf. Der Erdschlussstrom  $I_{CE}$  ist in einem isolierten Netz abhängig von der Betriebsspannung und von den Erdkapazitäten  $C_E$ . Somit finden isolierte Netze ihre Anwendung in Mittelspannungsnetzen mit geringer Ausdehnung, da der kapazitive Erdschlussstrom mit der Netzgröße steigt. Dadurch ist in einem isolierten Netz der Ausbau von Freileitungen oder der stetige Austausch von Freileitungen durch Kabel begrenzt, da diese Maßnahmen stets zu einer Erhöhung des Erdschlussstromes führen [7, 14].

Bei einem Dauererdschluss kommt es zu einer betriebsfrequenten Spannungsanhebung in den fehlerfreien Leitern (Phasen) gegenüber Erde um den Faktor  $\sqrt{3}$ , die Spannung des fehlerbehafteten Leiters gegenüber Erde wird Null. Durch die Spannungsanhebung in den gesunden Leitern kann es zu einer Überbeanspruchung der Isolationsanlagen kommen und in Folge zu einem stromstarken Doppelerdschluss oder einem zweipoligen Kurzschluss mit Erdberührung. Lichtbogenfehler erlöschen in einem Freileitungsnetz von selbst, wenn der

kapazitiver Erdschlussstrom  $I_{CE}$  kleiner als 35 A (für 10 bis 20-kV-Netze) oder kleiner als 60 A (für 60-kV-Netze) ist [13][1, 7].

Anwendung:

- In Mittelspannungsnetzen mit geringer Ausdehnung
- In Eigenbedarfsnetzen von Kraftwerken und Industrieanlagen

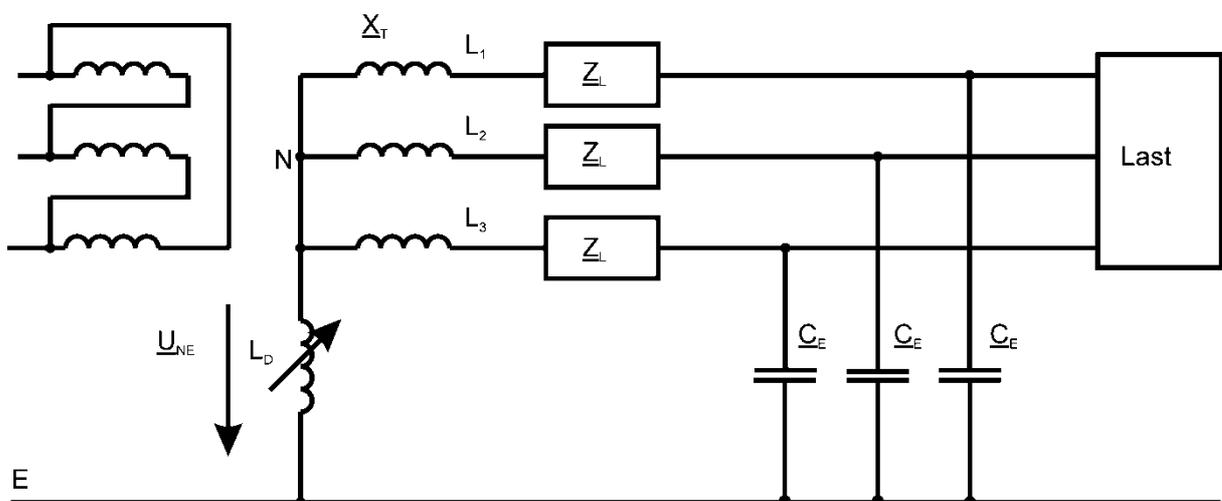
Vorteile:

- Einfache Ausführung
- Geringe Anforderungen an Erdungsanlagen

Nachteile:

- Dauererdschlüsse möglich, können sich zu Doppelerdkurzschlüssen ausweiten
- Intermittierende Erdschlüsse möglich
- Gefahr von transienten Überspannungen bei intermittierenden Erdschlüssen
- Dauererdschluss nicht selektiv erfassbar
- Netze können zu nicht vorhersehbaren Schwingungen neigen[14, 15]

**4.1.2 Netze mit Erdschlusskompensation (gelöschtes Netz)**



**Abbildung 4-2: Gelöschtes Netz - Prinzipsatzschaltbild (einfaches Strahlennetz)**

Im gelöschten Netz (Abbildung 4-2) werden ein oder mehrere Transformatorsternpunkte oder Sternpunktbildner über eine Erdschlusslöschspule  $L_D$  geerdet, d.h. mit der Erdungsanlage verbunden. Die Induktivität dieser Löschspulen ist meist über Stufenschalter oder Tauchanker einstellbar. Stimmt die induktive Reaktanz der Erdschlusslöschspule mit der kapazitiven Reaktanz des Netzes überein - man spricht von Vollkompensation - fließt bei einem auftretenden Erdschluss nur der sogenannte Erdschlussreststrom  $I_{Rest}$ . Dieser ist nicht kompensierbar und besteht aus einem Wirkanteil (Wattreststrom) und aus dem Oberschwingungsanteilen [13][1, 7, 14].

Der Erdschlussreststrom  $I_{\text{Rest}}$  wird durch die Netzgröße, die Anlagenkomponenten sowie die Umgebungsbedingungen bestimmt. Durch die Erdschlusskompensation wird erreicht, dass der Erdschlusslichtbogen im Vergleich zum isolierten Netz, auch bei wesentlich größerer Netzausdehnung, von selbst erlischt. Dadurch wird eine Betriebsunterbrechung vermieden. Im Vergleich zum isolierten Netz ist der Anstieg der wiederkehrenden Spannung viel langsamer, somit lassen sich die höheren Grenzwerte erklären (Tabelle 4-1) [1]. Bezüglich der max. möglichen Netzgrößen (max. Erdschlussstrom), bei der die physikalische Funktion der Erdschlusslöschung noch gegeben ist, liegen keine verlässlichen Angaben vor. Entscheidend sind neben dem Wattreststrom auch die nicht kompensierbaren Oberschwingungsanteile des Erdschlussreststromes [7]. In der Praxis wird die Netzgröße in der Regel durch netzbetriebliche Einschränkungen vorgegeben (Beeinflussung von Einbauten, Beherrschung der zul. Berührungsspannung, Spannungshaltung usw.). Von Interesse ist die Frage, inwieweit in bestehenden Netzen der stetige Austausch von Freileitungen durch Kabel vorgenommen werden kann.

Bei einem Dauererdschluss kommt es zu einer betriebsfrequenten Spannungsanhebung in den fehlerfreien Leitern (Phasen) um den Faktor  $\sqrt{3}$ , die Spannung am kurzgeschlossenen Leiter gegenüber Erde wird Null. Durch die Spannungsanhebung in den gesunden Leitern kann es zu einer Überbeanspruchung der Isolationsanlagen kommen und in Folge zu einem stromstarken Doppelerdkurzschluss [7].

Netze mit Erdschlusskompensation werden vorwiegend in Europa für Mittel- und Hochspannungsanlagen verwendet. Der größte Vorteil von gelöschten Netzen ist die Selbstlöschung von Erdschlusslichtbögen und die daraus folgende geringe Anzahl von durch Netzkunden wahrnehmbaren Spannungseinbrüchen und Versorgungsunterbrechungen (Versorgungsqualität) [14].

#### Anwendungen:

- In Mittel- und Hochspannungsnetzen mit größeren Ausdehnungen

#### Vorteile:

- Erhöhung der Versorgungssicherheit
- Geringe Anzahl von Abschaltungen bei auftretenden Erdschlüssen
- Kleine Erdschlussrestströme
- Erdschlusslichtbogen erlischt meist von selbst
- Geringe Anforderungen an Erdungsanlagen [14, 15]

### Nachteile:

- Erhöhter Mehraufwand durch Einbau von Erdschlusslöscheinrichtungen und Regelungen
- Isolation der Betriebsmittel gegen Erde, muss mindestens der verketteten Nennspannung entsprechen
- Dauererdschlüsse möglich, können sich zu Doppelerdkurzschlüssen ausweiten
- Dauererdschluss oft nicht selektiv erfassbar
- Begrenzung der Netzausdehnung bedingt durch Erdschlussreststrom [15]

### 4.1.3 Netze mit niederohmiger Sternpunktterdung

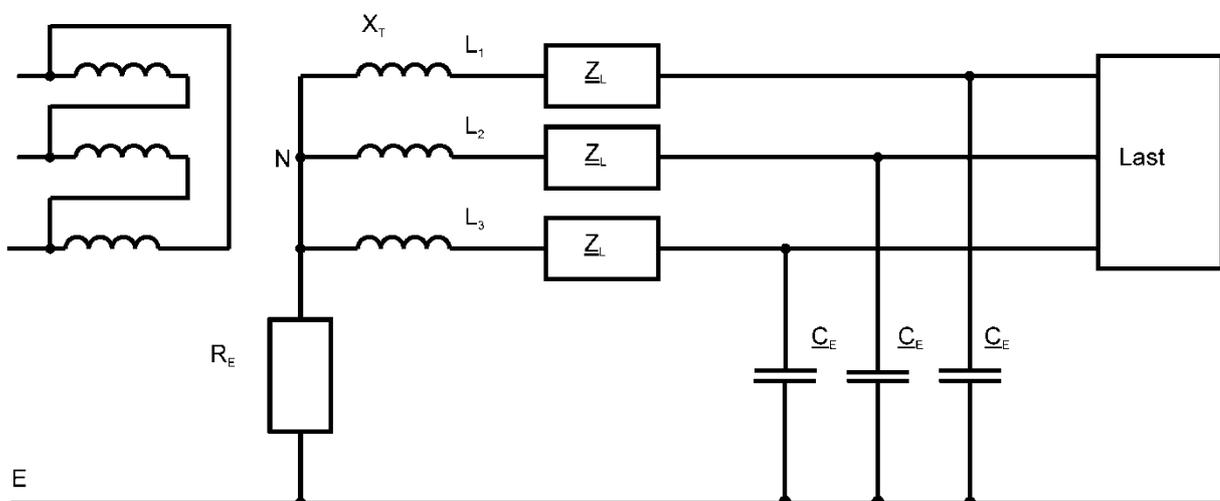


Abbildung 4-3: Niederohmig geerdetes Netz - Prinzipschaltbild (einfaches Strahlennetz)

In Netzen mit niederohmiger Sternpunktterdung (Abbildung 4-3) werden ein oder mehrere Transformatorsternpunkte oder Sternpunktbildner über strombegrenzende Widerstände  $R_E$  geerdet, um die Erdkurzschlussströme zu begrenzen (ca. 2 kA) [13]. Eine weitere Form der niederohmigen Sternpunktterdung ist die starre Erdung, hierbei werden die Sternpunkte direkt mit der Erdungsanlage verbunden ( $R_E = 0 \Omega$ ) [14].

Bei dieser Art von Sternpunktbehandlung sind für die Auslegung der Betriebsmittel die auftretenden einphasigen Erdkurzschlüsse relevant, da diese Werte im Bereich der dreiphasigen Kurzschlussströme annehmen können (bis zu 80 kA) [7]. Gegenüber den vorher vorgestellten Sternpunktbehandlungen, treten im Falle eines Erdkurzschlusses nur sehr geringe betriebsfrequente Spannungserhöhungen in den gesunden Leitern (Phasen) auf. Bei auftretenden Erdkurzschlüssen in niederohmigen Netzen erlöschen Erdschlusslichtbögen nicht mehr selbst, die Schutzeinrichtungen müssen sofort und selektiv fehlerbehaftete Leitungen abschalten, da die Erdkurzschlussströme einerseits eine gewisse zerstörerische Wirkung an der Fehlerstelle besitzen und hohe Berührungsspannungen und Schrittspannungen am Fehlerort hervorrufen [7].

Durch die sofortige Abschaltung der fehlerbehafteten Phasen im Fehlerfall wird die Versorgungsqualität stark beeinträchtigt. Da erfahrungsgemäß in Freileitungsnetzen 90 % der Fehler nach dem Ab- und anschließenden Einschalten (in der Regel automatisiert durchgeführt) nicht mehr bestehen (Lichtbogen erlischt, selbsteilende Wirkung des Isoliermediums Luft), wird durch die sogenannte Automatische-Wieder-Einschaltung (AWE) , die Leitung abgeschaltet und nach einer kurzen Ausschaltzeit (0,1 s – 1 s) wieder zugeschaltet, um einen fehlerfreien Netzbetrieb wieder herzustellen [14]. Durch die Automatische-Wieder-Einschaltung wird die Versorgungssicherheit stark erhöht [7].

#### Anwendung:

- In Hoch- und Höchstspannungsnetzen (110 kV – 750 kV) mit großer Ausdehnung
- In Niederspannungsnetzen (400 V)

#### Vorteile:

- Keine Begrenzung der Netzausdehnung
- Einfache Ausführung
- Einfache selektive Erdschlusserfassung, AWE möglich

#### Nachteile:

- Große Erdkurzschlussströme, werden für Tiefenortung mittels Phasen-Überstromanzeiger benötigt, erfordern aufwändigere Erdungsanlagen
- Durch AWE Abschaltung von Leitungen (0,1 s – 1 s) [14, 15]

## 4.2 Gelöschtes Netz

### 4.2.1 Allgemein

Für Mittel- und Hochspannungsnetze ist die gängigste Sternpunktbehandlung die des gelöschten Netzes. Für solch ein erdschlusskompensiertes Netz werden Löschspulen zwischen dem Sternpunkt des Stromversorgungssystems und der Erdungsanlage geschaltet. Diese Spulen werden so dimensioniert, dass bei einem Erdschluss der am Fehlerort auftretende kapazitive Erdschlussstrom kompensiert wird. Je nach Abstimmung der Löschspule wird der Erdschlussstrom mehr oder weniger kompensiert, eine vollkommene Kompensation ist nur theoretisch möglich (siehe Punkt 4.3.4), der somit verbleibende Fehlerstrom wird als Erdschlussreststrom  $I_{\text{Rest}}$  (Wattreststrom, Oberschwingungsreststrom) bezeichnet [4].

Der größte Vorteil eines solch betriebenen Netzes ist die Versorgungssicherheit, da es bei einem Erdschluss nicht unmittelbar zu einer Abschaltung kommt und 95% (nach Angabe von Netzbetreibern) der Erdschlusslichtbögen in Freileitungsnetzen von selbst erlöschen. Die restlichen 5% sind Dauererdschlüsse und intermittierenden Erdschlüsse, welche zu Doppelerdschlüssen oder zu Kurzschlüssen ausarten können[12].

Zu erwähnen ist, dass in Ballungszentren, die meist ein reines Kabelnetz besitzen, zunehmend mehr niederohmig geerdete Netze gegenüber gelöschten Netzen anzutreffen sind. Dies beruht auf der Tatsache, dass in einem stark verkabelten Netz die Gefahr besteht, dass Dauererdschlüsse in Mehrfacherdschlüsse übergehen [7, 16]. Aus diesem Grund wird vermehrt, unter Einhaltung der zulässigen Berührungsspannung, eine niederohmige Sternpunktterdung eingesetzt, daraus ergeben sich folgende Vorteile [17]:

- Vermeiden von Doppel- und Mehrfacherdschlüssen
- Vereinfachte Fehlerortung [18]

Geschichtlich gesehen wurden mehrere technische Lösungen entwickelt, um dem im Fehlerfall kapazitiven Erdschlussstrom eine induktive Gegenkomponente entgegenzusetzen. Jedoch hatten technische Realisierungen wie die Polerdung oder der Brauch'scher Löschtransformator einen großen Nachteil, sie sind sehr aufwändig zu installieren und verursachen auch im fehlerfreien Betrieb Wirkleistungsverluste. 1919 entwickelte Herr Prof. Waldemar Petersen (1880-1946) die Idee, eine Spule in den Sternpunkt von Transformatoren zu schalten; diese Spule wurde später nach ihm benannt. Heute ist die Petersen-Spule Stand der Technik [13].

## 4.2.2 Gelöschtes Netz mit Erdschlusslöschspule

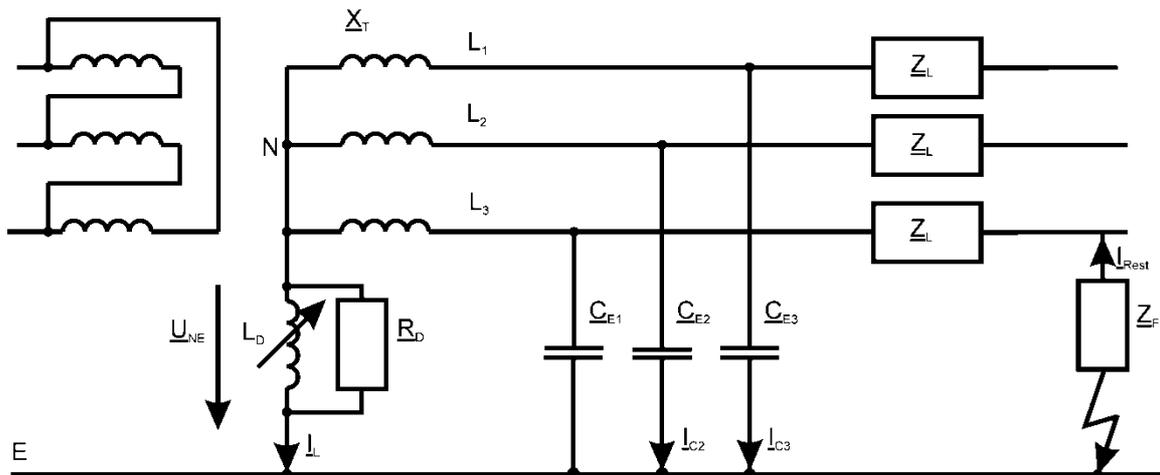


Abbildung 4-4: Prinzipsatzschaltbild – gelöschtes Netz (einfaches Strahlennetz)

$C_E$ ...	Erdkapazitäten	N ...	Sternpunkt
$Z_L$ ...	Leitungsimpedanz	$U_{NE}$ ...	Sternpunktverlagerungsspannung
$L_D$ ...	Löschspuleninduktivität	$I_L$ ...	Spulenstrom
$R_D$ ...	Verlustwiderstand Löschspule	$I_{Rest}$ ...	Erdschlussreststrom
$X_T$ ...	Transformatorreaktanzen	$Z_F$ ...	Fehlerimpedanz

Das oben angeführte einfache Ersatzschaltbild für ein gelöschtes Netz mit der Methode nach Petersen enthält eine Erdschlusslöschspule ( $L_D$  und  $R_D$  entspricht der Ersatzschaltung dieser Spule), welche vom induktiven Spulenstrom  $I_L$  durchflossen wird. Dieser Spulenstrom kompensiert an der Fehlerstelle den über die Erdkapazitäten abfließenden kapazitiven Strom. An der Fehlerstelle verbleibt trotz Kompensation der sogenannte Erdschlussreststrom  $I_{Rest}$ .

### 4.3 Parameter

Für den Betrieb eines gelöschten Netzes müssen einige wichtige Größen bekannt sein.

#### 4.3.1 Verstimmung $v$

$$v = \frac{I_{CE} - I_L}{I_{CE}} = \frac{\omega \sum C_E - \frac{1}{\omega L_D}}{\omega \sum C_E} = 1 - \frac{1}{\omega^2 L_D \sum C_E} \quad (4-1)$$

Die Verstimmung  $v$  im gelöschten Netz gibt das Verhältnis zwischen kapazitiven Erdschlussstrom  $I_{CE}$  und den Erdschlusslöschspulenstrom  $I_L$  an. Die Verstimmung beschreibt, ob das Netz über- oder unterkompensiert betrieben wird. Für eine negative Verstimmung  $v$  ist der induktive Erdschlusslöschspulenstrom  $I_L$  größer als der kapazitive Erdschlussstrom  $I_{CE}$ , man spricht von Überkompensation. Ist die Verstimmung  $v$  positiv, spricht man von Unterkompensation [7].

#### 4.3.2 Dämpfung $d$

$$d = \frac{1}{\omega \sum C_E} \left( \frac{1}{R_D} + \sum \frac{1}{R_Q} \right) \quad (4-2)$$

Die Dämpfung  $d$  im gelöschten Netz gibt das Verhältnis der Querableitwiderstände und der Löschspulenwiderstände zum kapazitiven Erdschlussstrom an. Die Dämpfung  $d$  ist ein Maß für den ohmschen Anteil des Erdschlussreststromes.

#### 4.3.3 Löschgrenze $I_G$

Durch die Löschgrenze  $I_G$  wird sichergestellt, dass die auftretenden Beeinflussungen von Fernmeldeanlagen die zulässigen Grenzwerte nicht überschreiten, sowie die auftretenden Berührungs- und Fehlerspannungen bei entsprechender Dimensionierung der Erdungsanlagen eingehalten werden (siehe Punkt 4.5). Die Löschgrenze trifft keine Aussage über das tatsächliche physikalische Erlöschen von Lichtbögen, orientiert sich jedoch daran.

#### 4.3.4 Erdschlussreststrom $I_{Rest}$

Der Erdschlussreststrom ist der an der Fehlerstelle nicht kompensierbare Strom, der gegen Erde hin abfließt. Er besteht aus Wattreststrom, Verstimmungsstrom, Oberschwingungsreststrom und aus eventuell vorhandenen Strömen von Ortungseinrichtungen. Der betriebsfrequente Anteil des Erdschlussreststromes wird vor allem durch die Größen Verstimmung, Verlustfaktor, Frequenz, Erdkapazitäten und Betriebsspannung bestimmt [19]. Für Freileitungsnetze beträgt der Erdschlussreststrom größenordnungsmäßig in der Regel bis ca. ein Zehntel des kapazitiven Erdschlussstromes  $I_{CE}$ , in Kabelnetzen werden Werte von 3% bis 4% des Erdschlussstromes erreicht [4, 7].

$$I_{Rest} = 3\omega C_E(d + jv) \frac{U_B}{\sqrt{3}} = I_{CE} \cdot \sqrt{d^2 + v^2} \quad (4-3)$$

Hierbei ist zu erwähnen, dass die Näherungsformel (4-3) für den Erdschlussreststrom nur für eine ideale Anzahl und Verteilung von Löschkulen unmittelbar am Fehlerort gilt [15].

#### 4.3.5 Kapazitiver Erdschlussstrom $I_{CE}$

Der kapazitive Erdschlussstrom  $I_{CE}$  ist der Strom, der am Fehlerort gegen Erde abfließen würde, wenn kein induktiver Löschkulen entgegenwirkt. Der Erdschlussstrom ist abhängig von den Erdkapazitäten des Netzes. Für die Nennfrequenz gibt dieser Strom die Größe des einzustellenden induktiven Löschkulens der Erdschlusslöschkule, bei Vollkompensation, vor.

$$I_{CE} = 3\omega C_E \frac{U_B}{\sqrt{3}} = \sqrt{3}\omega C_E U_B \quad (4-4)$$

#### 4.3.6 Sternpunktverlagerungsspannung $U_{NE}$

In erdschlusskompensierten Netzen ergibt sich bereits im ungestörten Betrieb eine Verlagerungsspannung  $U_{NE}$ . Diese entsteht durch die kapazitive innere Unsymmetrie von Freileitungen in den 20-kV-Verteilnetzen, da diese in der Regel nicht verdreht ausgeführt sind. Der Einsatz von Kabeln hingegen reduziert die Verlagerungsspannung, da diese durch ihren Aufbau eine wesentlich geringere Unsymmetrie besitzen [19].

$$U_{NE} = -\frac{k}{\sqrt{d^2 + v^2}} \cdot \frac{U_B}{\sqrt{3}} \quad (4-5)$$

k... kapazitiver Unsymmetriefaktor

$$k = \left| \frac{C_{EL1} + a^2 C_{EL2} + a C_{EL3}}{C_{EL1} + C_{EL2} + C_{EL3}} \right| \approx \frac{\Delta C_E}{3C_E} \quad (4-6)$$

#### 4.3.7 Oberschwingungsgehalt THD

Da durch die Erdschlusslöschkule nur der betriebsfrequente Erdschlussstrom kompensiert wird, tragen Oberschwingungen sehr stark zur Größe des Erdschlussreststromes bei, wobei die 5. und 7. Harmonische Oberschwingung (250Hz und 350 Hz) im Erdschlussreststrom in der Regel am stärksten ausgeprägt sind.

### 4.3.8 Parameterbestimmung und Betrieb von Erdschlusslöschspulen

Die Funktion einer Erdschlusslöschspule wird durch folgende Parameter bestimmt

- Erdschlussstrom  $I_{CE}$
- Verstimmung  $v$
- Dämpfung  $d$
- Sternpunktverlagerungsspannung  $U_{NE}$
- Kapazitiver Unsymmetriefaktor  $k$

#### 4.3.8.1 Berechnung des Erdschlussstroms $I_{CE}$

Um den induktiven Kompensationsstrom für die Erdschlusslöschung einstellen zu können, muss der kapazitive Erdschlussstrom bekannt sein. Dieser wird rechnerisch ermittelt.

#### 4.3.8.2 Bestimmung der Verstimmung $v$

$$v = \frac{I_{CE} - I_L}{I_{CE}} \quad (4-7)$$

Um den Verstimmungsgrad  $v$  zu bestimmen, müssen durch Berechnung oder Messung die Ströme  $I_{CE}$  und  $I_L$  bekannt sein.

#### 4.3.8.3 Bestimmung der Dämpfung $d$

Es gibt mehrere Verfahren um die Dämpfung  $d$  zu bestimmen [14].

- Wendepunktverfahren
- Maximalwertverfahren
- Zweipunktverfahren

#### 4.3.8.4 Sternpunktverlagerungsspannung $U_{NE}$

$$U_{NE} = -\frac{k}{\sqrt{d^2 + v^2}} \cdot \frac{U_B}{\sqrt{3}} \quad (4-8)$$

Die Sternpunktverlagerungsspannung  $U_{NE}$  muss aus der Messung bekannt sein.

#### 4.3.8.5 Kapazitiver Unsymmetriefaktor $k$

Sind die Verstimmung  $v$  und die Dämpfung  $d$  für eine bestimmte Verlagerungsspannung bekannt, kann der kapazitive Unsymmetriefaktor  $k$  bestimmt werden.

$$k = \frac{U_{NE1} \sqrt{v_1^2 + d^2}}{U_B} \cdot \sqrt{3} \quad (4-9)$$

### 4.3.8.6 Regelung

Die Regelung einer Erdschlusslöschspule kann auf zwei Arten erfolgen:

#### Rechnerische Ermittlung

Mittels Netzberechnungen wird der Erdschlussstrom rechnerisch bestimmt und die Einstellungen für die Erdschlusskompensationseinrichtung bestimmt [14].

#### Durch die Aufnahme der Resonanzortskurve (Abstimm- oder Durchstimmversuche)

Es wird der Verlauf der Sternpunktverlagerungsspannung aufgenommen. Durch Verstimmen der Erdschlusslöschspule wird das Maximum der Verlagerungsspannung gesucht, welches im Resonanzpunkt  $v=0$  erreicht wird, da in diesem Punkt die Erdschlusslöschspule mit den Leiter-Erde-Kapazitäten einen Parallelschwingkreis bildet [20].

### 4.3.9 Betrieb

Der Arbeitsbereich von Erdschlusslöschspulen ist durch den maximalen Erdschlussstrom im Fehlerfall und die maximale Sternpunktverlagerungsspannung im fehlerfreien Betrieb begrenzt.

Nennspannungen des Netzes [kV]		3...20	25	30	45	60	110	150
Erdschlussreststrom bzw. Erdschlussstrom [A]. Maßgebend ist die Grundwelle	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 20kV Nennspannung mit kleinen Freileitungsanteil gilt Tabelle a auch bei isoliertem neutralem Punkt. Tabelle b für Netze mit isoliertem neutralem Punkt.

**Tabelle 4-1: Löschgrenzen von Starkstromnetzen gemäß ÖVE-B 1/1976, Tab 22-2 [21]**

Wird dieser Wert in Abhängigkeit von der Spannung, bei 20-kV-Verteilernetzen 60 A, überschritten, muss nach geltender Norm ÖVE-B 1/1976 der Doppelerdschluss hinsichtlich induktiver und ohmscher Beeinflussung untersucht werden. Hierfür muss die anliegende Dauerfehlerspannung unter der zulässigen Fehler- und Berührungsspannung laut ÖVE/ÖNORM E 8383 liegen. Ist das nicht der Fall, muss entweder mit Hilfe von geeigneten Erdungsanlagen die Dauerfehlerspannung gesenkt oder der Fehler in der maximal zulässigen Zeit abgeschaltet werden.

Abbildung 4-5 zeigt, dass die höchst zulässige Berührungsspannungen  $U_{TP}$  von der Stromflussdauer abhängt. Bei kurzen Fehlerzeiten ist daher eine wesentlich höhere Berührungsspannung zulässig. Die max. zulässige Dauerfehlerspannung darf 75 V nicht überschreiten.

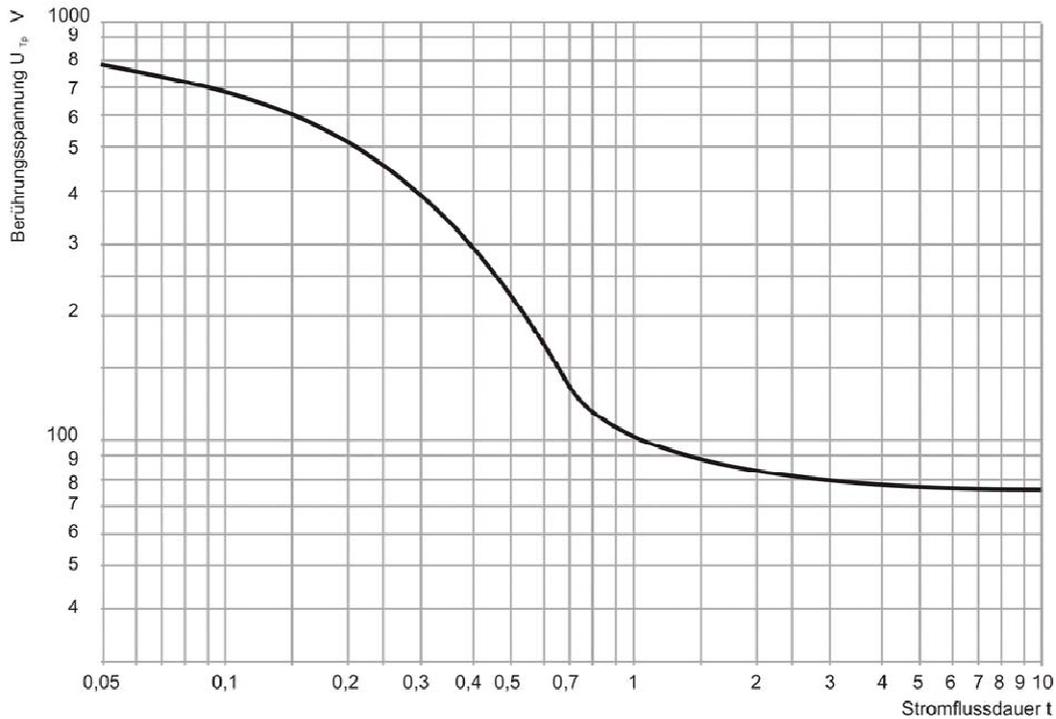


Abbildung 4-5: Höchst zulässige Berührungsspannung  $U_{TP}$  in Abhängigkeit der Stromflussdauer[22]

Anhand der vorweg genannten begrenzenden Parameter muss noch die Verstimmung  $v$  bestimmt werden und somit der prinzipielle Betriebsbereich. Für eine negative Verstimmung  $v$  ist der induktive Erdschlusslöschspulenstrom  $I_L$  größer als der kapazitive Erdschlussstrom  $I_{CE}$ , man spricht von Überkompensation. Ist die Verstimmung  $v$  positiv, spricht man von Unterkompensation. Man erhält, wie in

Abbildung 4-6 dargestellt einen typischen Betriebsbereich

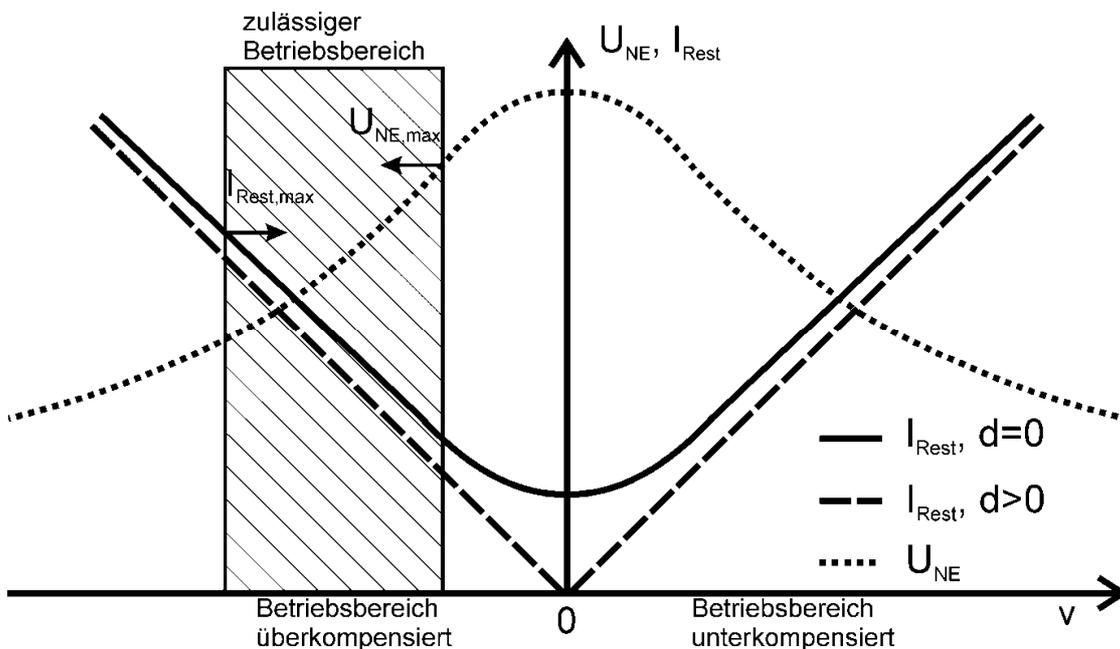


Abbildung 4-6: Verlagerungsspannung  $U_{NE}$  und Erdschlussreststrom  $I_{Rest}$  mit zulässigem Betriebsbereich (überkompensiert)[13]

Wie in

Abbildung 4-6 ersichtlich, bleibt bei Verstimmung  $v = 0$  in einem realen Netz ein Erdschlussreststrom über, der hinsichtlich der Grundfrequenz nur aus dem Wirkanteil besteht. Durch zentrale große Einheiten von Löschspulen in den speisenden Umspannwerken wird versucht den Wirkreststrom gering zu halten [16].

Unangenehme Auswirkung auf den eingestellten Betriebsbereich haben Änderungen der Erdkapazität zur Folge. Auf Grund der Tatsache, dass bei einem Dauererdschluss der betroffene Leitungsteil abgeschaltet wird, und somit die Erdkapazität sinkt und mit ihr der kapazitive Erdschlussstrom, kommt es zu einer Verschiebung des Betriebspunktes. Ausgehend von der gewählten Betriebsart (über- oder unterkompensiert) wandert der Betriebspunkt zum Resonanzpunkt hin oder entfernt sich vom selbigen. Demnach werden gelöschte Netze in der Regel überkompensiert betrieben, da eine Verschiebung des Betriebspunktes in Richtung Resonanz ( $v = 0$ ), und die daraus folgende höhere Verlagerungsspannung verhindert wird [7].

#### 4.4 Einflussfaktoren

Für den Betrieb eines gelöschten Netzes, sind folgende Einflussfaktoren zu berücksichtigen. Die Symmetrie des Netzes ist maßgeblich entscheidend für die Verlagerungsspannung  $U_{NE}$ , der Oberschwingungsgehalt im gelöschten Netz beeinflusst den Erdschlussreststrom wesentlich. Des Weiteren ist die Netzkapazität  $C_E$  zu nennen, welche den maximal auftretenden kapazitiven Erdschlussstrom bestimmt. Mit steigenden Netzkapazitäten steigt auch der Erdschlussstrom linear an, das bedeutet, dass mit zunehmendem Netzausbau und steigendem Verkabelungsgrad die Löschräume hinsichtlich der in der Literatur angeführten theoretischen Löschräume immer kleiner wird.

Die Symmetrie eines Netzes und deren Auswirkung auf die Verlagerungsspannung im fehlerfreien Betrieb können entscheidend für die Wahl des Betriebsbereichs der Erdschlusslöschspule sein. Bei hochgradig symmetrischen Netzen, ist die im fehlerfreien Betrieb auftretende Verlagerungsspannung sehr gering, somit können solche Netze mit Verstimmung  $v = 0$  betrieben werden.

Bei Unsymmetrie muss die Verlagerungsspannung berücksichtigt werden, da diese Werte annehmen kann, die zum Beispiel zum Ansprechen von zu empfindlich eingestellten Erdschlussrelais (Sternpunktverlagerungsspannung) führen kann.

Der Oberschwingungsgehalt THD ist im Bezug auf die Löschräume nicht zu vernachlässigen, da im Fehlerfall die Erdschlusslöschspule nur betriebsfrequente Ströme kompensiert. Somit setzt sich der Erdschlussreststrom aus dem Wattreststrom (ohmsche Verluste) und den Oberschwingungsrestströmen zusammen und ist für die Bewertung der Berührungs- und Schrittspannungen heranzuziehen.

## 4.5 Normative Behandlung des gelöscht betriebenen 20-kV-Netzes in Österreich

In der ÖNORM ÖVE-B1/1976 werden für unterschiedliche Spannungsebenen die erlaubten Grenzen des Erdschlussreststromes bezüglich der induktiven Beeinflussung von Fernmeldeanlagen angegeben, und damit der Begriff „Löschgrenze“ (in Ampere) definiert. Hier wird als Grundlage zur Bewertung des Erdschlussreststroms die Grundwelle herangezogen. (Tabelle 4-1) [21].

In der ÖVE/ÖNORM E 8383 werden die zulässigen Berührungs- und Schrittspannungen beschrieben. Hierbei wird zur Berechnung von auftretenden Berührungsspannungen  $U_{TP}$  der Effektivwert des Erdschlussreststromes herangezogen. Für Dauerfehler ( $t > 10$  s) wird eine Berührungsspannung von 75 V zugelassen. Die Erdschlussspannung  $U_E$  darf unter der Annahme, dass der PEN-Leiter des Niederspannungsnetzes an möglichst vielen Stellen im Netz geerdet ist, maximal den Wert  $U_E \leq 2 \cdot U_{TP}$  annehmen [22].

Für die Berechnung der Berührungsspannung mittels des Effektivwertes des Erdschlussreststroms ist es erforderlich, neben dem betriebsfrequenten Reststrom, sofern bekannt, auch die Oberschwingungsströme bei der Bewertung des gelöschten Netzes zu berücksichtigen.

## 4.6 Kritische Netzgrößen und Löschgrenze

Um die max. zulässige Beeinflussung von Fernmeldeanlagen nicht zu überschreiten, ist der maximal auftretende Erdschlussreststrom  $I_{Rest}$  durch die Löschgrenze von 60 A (bei 20-kV Nennspannung) nach oben hin begrenzt und somit auch die Netzgröße [21]. Des Weiteren ist der Erdschlussreststrom von der Betriebsspannung  $U_B$ , der Verstimmung  $v$ , der Dämpfung  $d$ , der Frequenz  $f$  und den Erdkapazitäten  $C_E$  abhängig. Die Netzgröße wird zusätzlich noch durch die, wenn keine Gegenmaßnahmen getroffen sind, Oberschwingungen im Erdschlussstrom begrenzt (Abbildung 4.7). Nachfolgende Formeln betrachten nur die die Grundschiwingung der Stromkomponente, Oberschwingungsströme werden nicht berücksichtigt.

Durch den stetigen Netzausbau und den Ersatz von Freileitungen durch Kabel, nimmt die Erdkapazität  $C_E$  ständig zu. Aus Formel (4-10) erkennt man, dass die Erdkapazität linear in die Berechnung des Erdschlussreststroms eingeht.

$$I_{Rest} = 3\omega C_E(d + jv) \frac{U_B}{\sqrt{3}} \quad (4-10)$$

Um die Löschgrenze  $I_G$  einzuhalten, ergibt sich folgende Formel für die maximal zulässige Verstimmung  $v_{max}$ .

$$v_{\max} \leq \frac{\sqrt{I_G^2 - (d \cdot I_{CE}^2)}}{I_{CE}} \quad (4-11)$$

Wird der Ausdruck unter der Wurzel negativ, somit das Ergebnis komplex, ist die Löschungsgrenze überschritten.

Die maximale Netzgröße, und die daraus resultierende maximale Erdkapazität  $C_{E,\max}$  in Bezug auf die Löschungsgrenze  $I_G$  lautet:

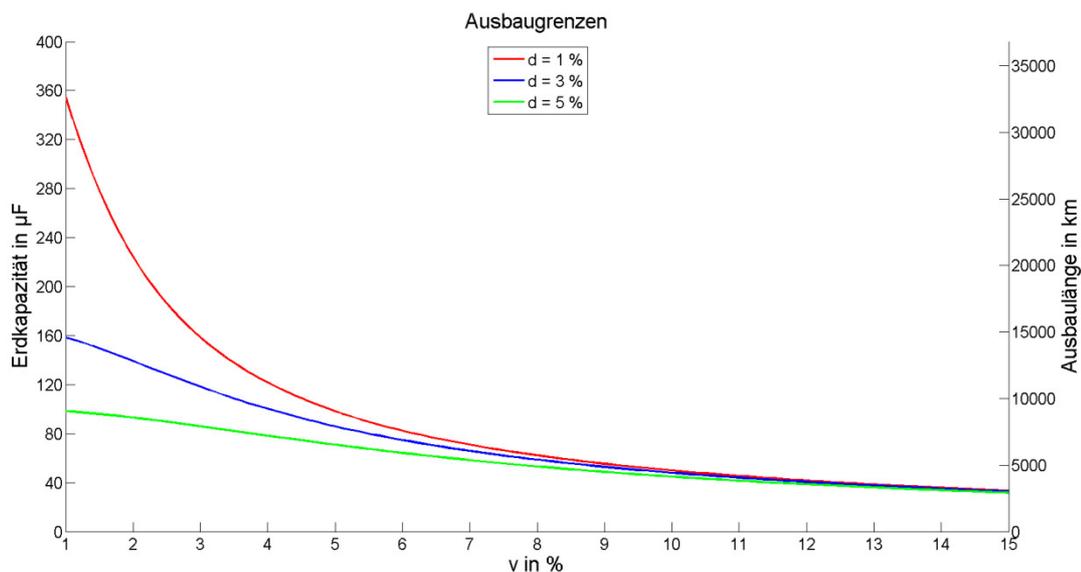
$$C_{E,\max} \leq \frac{I_G}{3\omega\sqrt{d^2 + v^2} \frac{U_B}{\sqrt{3}}} \quad (4-12)$$

Setzt man nun für  $I_{\text{Rest}}$  die Löschungsgrenze ( $I_G = 60$  A, bei 20-kV Nennspannung) ein, und formt die Gleichung auf die Erdkapazität  $C_E$  um, erhält man die theoretische maximale Netzlänge in Abhängigkeit von der Verstimmung  $v$  und der Dämpfung  $d$ . Da im fehlerfreien Betrieb die Spannungen im Netz variieren können (19,6 kV – 22 kV), muss für die Berechnung natürlich der ungünstigste Fall d.h., die höchste auftretende Spannung eingesetzt werden [14].

$$C_{E,\max} \leq \frac{I_G}{3\omega\sqrt{d^2 + v^2} \frac{U_B}{\sqrt{3}}} = \frac{60}{\sqrt{3} \cdot 2\pi \cdot 50\sqrt{d^2 + v^2} \cdot 22000} [\mu\text{F}] \quad (4-13)$$

#### 4.6.1 Maximaler theoretischer Ausbaugrad

Gleichung (4-13) ergibt die maximal zulässige Erdkapazität, unter der es noch zur Einhaltung der Löschgrenze kommt. Aufgrund des technischen Parameters „Erdkapazität pro km“ von Freileitungen und Kabeln kann auf die maximale Ausbaulänge bzw. Netzgröße geschlossen werden. In der folgenden Abbildung 4-7 ist die maximal zulässige Erdkapazität in Abhängigkeit von Verstimmung  $v$  und Dämpfung  $d$  aufgetragen. Das Ergebnis wurde auf eine gängige Freileitungsinstallation (ALD 3 · 95 mm<sup>2</sup>,  $C_B = 9,63$  nF/km, häufig verwendete Freileitung der KNG) bezogen um repräsentative Ausbaulängen zu erhalten.



**Abbildung 4-7: Theoretische maximale Netz-Freileitungslänge in Abhängigkeit von  $v$  und  $d$ , unter Vernachlässigung von Oberschwingungen und Unsymmetrien**

Ein reines Freileitungsnetz mit einer Verstimmung von  $v = 5\%$  (überkompensiert, entspricht der gängigen Löschspuleneinstellung der KNG) und einer Dämpfung  $d = 3\%$ , ergibt eine maximale Ausbaulänge von 8929 km mit einem kapazitiven Erdschlussstrom  $I_{CE} = 1029$  A. Daraus ergibt sich der benötigte induktive Löschspulenstrom  $I_L = 978$  A.

$$C_E = \frac{I_G}{3\omega\sqrt{d^2 + v^2} \frac{U_B}{\sqrt{3}}} = \frac{60}{\sqrt{3} \cdot 2\pi \cdot 50 \sqrt{0,03^2 + 0,05^2} \cdot 22000} [\mu F] = 85,95 \mu F$$

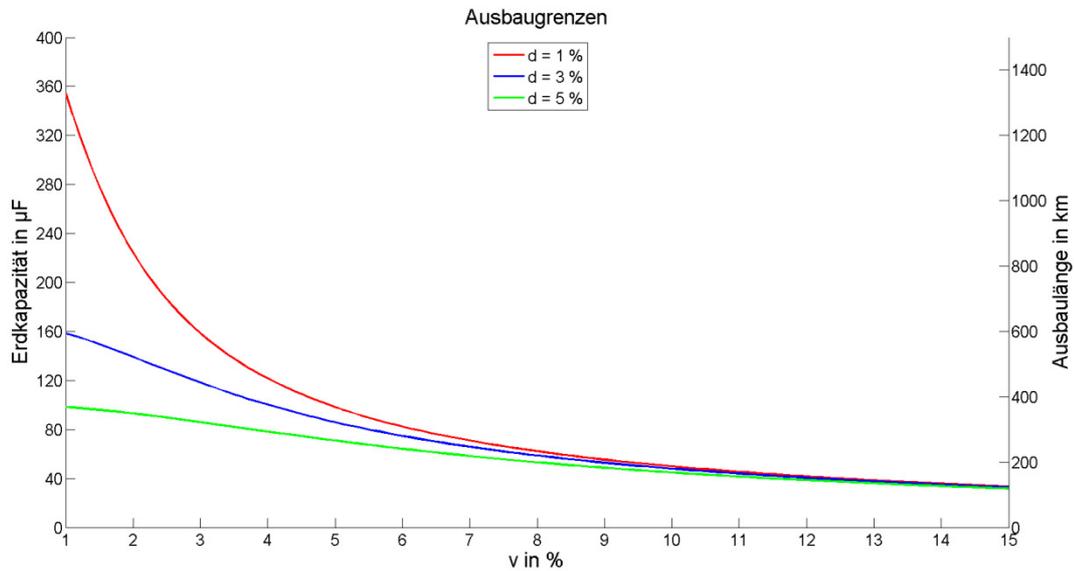
$$I_{CE} = 3 \cdot \omega \cdot C_E \cdot \frac{U_B}{\sqrt{3}} = 3 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 85,95 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{22000}{\sqrt{3}} \approx 1029 \text{ A}$$

Das Umformen von Gleichung (4-1) ergibt den Löschspulenstrom  $I_L$ .

$$I_L = I_{CE} - v \cdot I_{CE} = 1029 - 0,05 \cdot 1029 = 978 \text{ A}$$

Abbildung 4-8 zeigt die maximalen Ausbaulängen für ein reines Kabelnetz (Type A2YHCY 3 · 150 mm<sup>2</sup>,  $C_B = 254$  nF/km). Im Vergleich zum zuvor berechneten reinen Freileitungsnetz

erhält man aufgrund der höheren Erdkapazitäten bei gleichen Annahmen hinsichtlich Verstimmung und Dämpfung ( $v = 5\%$  und  $d = 3\%$ ) nur eine Netzgröße von 338 km.



**Abbildung 4-8: Theoretische maximale Netz-Kabellänge in Abhängigkeit von  $v$  und  $d$ , unter Vernachlässigung von Oberschwingungen und Unsymmetrien**

Unter der Annahme, dass ein reines Kabelnetz hochgradig symmetrisch ist und somit theoretisch vollkompensiert werden kann ( $v = 0$ ) ergibt sich bei einer Dämpfung von  $d = 3\%$  eine maximale Netzausbaulänge von 658 km. Diese große Netzausdehnung ist jedoch aufgrund der Höhe des benötigten Löschspulenstromes von 2000 A unrealistisch und somit rein theoretisch.

## 4.7 Einfluss der Oberschwingungen

In einem hochgradig symmetrischen Netz besteht der Erdschlussreststrom  $I_{\text{Rest}}$  bei vollständiger Kompensation ( $v = 0$ ) nahezu nur aus Oberschwingungsanteilen. Wenn die theoretische Löschgrenze ( $I_G = 60 \text{ A}$ , laut ÖVE-B 1/1976) als Gesamt-Effektivwert nicht überschritten werden soll, müssen die Oberschwingungen berücksichtigt werden [19].

Bei konservativer Berücksichtigung der Oberschwingungsströme ohne mögliche Oberschwingungsresonanzen ergibt sich unter der Berücksichtigung der Löschgrenze  $I_G$  eine maximale Verstimmung  $v_{\text{max}}$  von:

$$v_{\text{max}} \leq \frac{\sqrt{I_G^2 - (3C_E \cdot \omega \frac{U_B}{\sqrt{3}})^2 \cdot (d^2 + (g_3 \cdot p_3 \cdot 3)^2 \cdot (v_3^2) + (g_5 \cdot p_5 \cdot 5)^2 \cdot (v_5^2) + (g_7 \cdot p_7 \cdot 7)^2 \cdot (v_7^2))}}{3C_E \cdot \omega \frac{U_B}{\sqrt{3}}} \quad (4-1)$$

$p_i$  ... prozentuelle Oberschwingungsanteile

$v_i$  ... Verstimmung aus Sicht der i-ten Oberschwingung

$g_i$  ... Gütefaktor (Maß für die Überhöhung des Oberschwingungsreststroms)

$C_E$  ... Erdkapazität pro Leiter [14]

Wird der Ausdruck unter der Wurzel negativ, somit das Ergebnis komplex, ist die Löschgrenze überschritten [14].

Die maximale Erdkapazität  $C_{E,\text{max}}$  und die daraus resultierende maximale Netzgröße in Bezug auf die theoretische Löschgrenze  $I_G$  mit Berücksichtigung der 3.-, 5.- und 7.-Oberschwingung lautet:

$$C_E = \frac{I_G}{3 \cdot \omega \cdot \frac{U_B}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{d^2 + v^2 + (g_3 \cdot p_3 \cdot 3)^2 \cdot (v_3^2) + (g_5 \cdot p_5 \cdot 5)^2 \cdot (v_5^2) + (g_7 \cdot p_7 \cdot 7)^2 \cdot (v_7^2)}} \quad (4-1)$$

Dafür ist es notwendig die Oberschwingungsverstimmungen  $v_n$  zu kennen. Aus Formel (4-1) ergibt sich durch Umformen:

$$v = \frac{I_{CE} - I_L}{I_{CE}} \Rightarrow 1 - \frac{1}{\omega^2 L_D \sum C_E} \Rightarrow 1 - \frac{1}{3\omega^2 L_D C_E}$$

$$v_n = 1 - \frac{1}{3\omega^2 n^2 L_D C_E} \Rightarrow \frac{1}{n^2} \cdot \left( n^2 - \frac{1}{3\omega^2 L_D C_E} \right) \Rightarrow \frac{1}{n^2} \cdot \left( n^2 - 1 + 1 - \frac{1}{3\omega^2 L_D C_E} \right) \Rightarrow$$

$$v_n = (n^2 - 1 + v) \cdot \frac{1}{n^2} \quad (4-16)$$

$v$  ... Verstimmung der Grundwelle

$v_n$  ... Verstimmung auf die n-te Oberschwingung bezogen

n ... Ordnungszahl der Oberschwingung

#### 4.7.1 Resonanzen

Betrachtet man das Ersatzschaltbild eines Erdschlusses mit Hilfe der symmetrischen Komponenten (Abbildung 4-9) genauer, erkennt man, dass die Erdschlusslöschspule mit Leitungsinduktivitäten und –kapazitäten einen Resonanzkreis bildet. Im Erdschlussfall kann es in Abhängigkeit des Fehlerorts zu einer geänderten Aufteilung der Induktivitäten und Kapazitäten kommen, welche im ungünstigsten Fall genau die Resonanzbedingung erfüllt. In diesem Fall kommt es zu einem bedeutenden Oberschwingungsanteil im Erdschlussreststrom, welcher zur Überschreitung der Löschgrenze  $I_G$  (60 A für 20 kV Nennspannung) führen kann [14, 15].

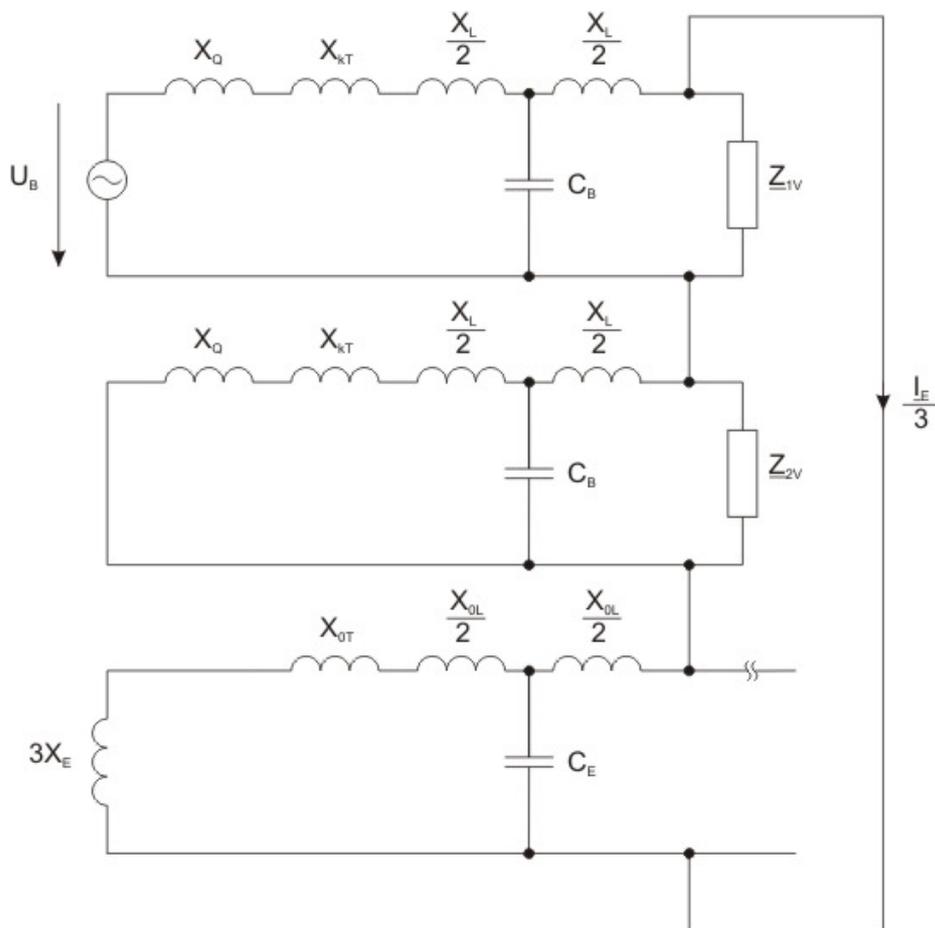


Abbildung 4-9: Ersatzschaltbild für symmetrische Komponenten [7]

Die Fehlerorte, an denen die Resonanz auftritt, sind von der Oberschwingungsfrequenz abhängig. Für eine genauere Untersuchung der möglichen Resonanzen in einem Netz muss ein detailliertes Modell vorliegen. Nur so ist es möglich, für die vorhandenen Frequenzen im Netz auf die lokalen Resonanzorte und die damit verbundenen erhöhten Oberschwingungsströme zu schließen [14, 15].

## 5 Analyse des 20-kV-Verteilernetzes der KNG

### 5.1 Allgemein

Für weitere Untersuchungen bezüglich Erdschlusslöschung ist es notwendig, die Infrastruktur der Umspannwerke und deren 20-kV-Abzweige zu erheben. Es wurden drei 20-kV-Verteilernetze ausgewählt, welche als repräsentativ für die gesamten 20-kV-Verteilernetze der KNG angesehen werden.

UW 8, entspricht einem teilweise vermascht betriebenen Netz.

UW 14, entspricht einem 20-kV-Netz mit Freileitungs- und Kabelanteil mit je einer zentralen und einer dezentralen Löschspule.

UW 28, entspricht einem typischen 20-kV-Freileitungsnetz.

### 5.2 110/20-kV-Umspannwerke:

Erhebung der in den Umspannwerken eingesetzten Betriebstransformatoren und Erdschlusseinrichtungen. Berechnung der zugehörigen Löschreserven, ohne Oberschwingungsanteile, in Bezug auf die maximalen Spulenströme unter Berücksichtigung der theoretischen Löschgrenze  $I_G$ .

#### 5.2.1 Transformatoren

Die Schaltgruppe der Umspanntransformatoren von 110 kV auf 20 kV ist als YD5, mit oder ohne SternpunktAusführung, realisiert. Lediglich einige wenige Betriebstransformatoren besitzen eine YY-Schaltgruppe, diese werden zur galvanischen Trennung von Mittelspannungsnetzen eingesetzt. Die Nennleistungen  $S_N$  betragen 10 MVA bis 40 MVA. Einige Transformatoren sind mit einer zuschaltbaren aktiven Kühlung ausgestattet, damit kann eine Erhöhung ihrer Nennleistung erreicht werden.

Umspannwerk	Löschbezirk (Sammelschiene)	Baujahr	Nennleistung in MVA	Schaltgruppe	Primär in kV	Sekundär in kV
UW 8	SS 1	1958	20	Yd5	110,0	20,0
	SS 2	1978	32	YNd5	110,0	20,0
UW 14	SS 1	1974	20	Yd5	110,0	20,0
	SS 2	1990	20	YNd5	110,0	20,0
UW 28	SS 1	1975	20	Yd5	110,0	20,0
	SS 2	1980	20	YNd5	110,0	20,0

Tabelle 5-1: Übersicht der ausgewählten 110/20-kV-Transformatoren in den untersuchten Umspannwerken

## 5.2.2 Erdschlusslöscheinrichtungen

Im Einsatz sind Löserspulen mit einer Nennleistung von 500 kVA – 6305 kVA, und mit einem Sternpunktstrom von 27 A – 520 A. Die Betriebsarten sind Dauerbetrieb (DB), Kurzzeitbetrieb KB2h (maximal 2 Stunden) oder die Kombination der beiden Betriebsarten DB/KB2h (für 2 Stunden ist ein Überlastbetrieb von 25 % gegenüber dem normalen Betrieb möglich). Die Stellmöglichkeiten des Betriebspunktes der Erdschlusslöschspulen variieren, es sind sowohl stufenlose als auch in Stufen verstellbare Löserspulen im Einsatz. Die Sternpunktbildung erfolgt über geeignete Sternpunktbildner bzw. über Erdschlusslöschkombinationen.

Umspannwerk	Löschbezirk	Baujahr	Nennleistung in MVA	Betriebsart	Einstellart
UW 8	SS 1	1962	0,315	DB	stufenlos
	SS 2	1962	1,185	DB	7-stufig
		2007	2	DB/KB2h	stufenlos
UW 14	SS 1	1969	2	DB/KB2h	stufenlos
	SS 2	1993	2	DB/KB2h	stufenlos
SW 14-1		1967	2,43	DB	7-stufig
UW 28	SS 1	1978	2	DB/KB2h	stufenlos
	SS 2	1985	2	DB/KB2h	stufenlos

Tabelle 5-2: Übersicht der Erdschlusslöscheinrichtungen in den ausgewählten Umspannwerken

## 5.2.3 Löschreserven

Es wurde von allen Löschbezirken die max. theoretische Löschreserve ohne Oberschwingungsanteilen erhoben, das bedeutet der derzeitige Erdschlussstrom wurde auf den maximalen Spulenstrom bezogen. Für weitere Untersuchungen werden die drei, im Kapitel 5.1 erwähnten, 110/20-kV-Umspannwerke und deren Löschbezirke ausgewählt. Diese sollen repräsentativ für das gesamte 20-kV-Verteilernetz der KNG stehen.

Umspannwerk	Löschbezirk	Sternpunktstrom in A	Eingestellter Sternpunktstrom	Erdschlussstrom in A	Verstimmung in %	Löschreserve <sup>1</sup> in A
UW 8	SS 1	5-27,5	27	30,67	12%	57
	SS 2	40-100	189	188,35	0%	136,65 / 177,65
20-165/206(KB2h)						
UW 14	SS 1	16-165/206(KB2h)	155	156,62	1%	68,38 / 109,38
	SW 14-1	SS 2	17-165/206(KB2h)	193	188,57	-2%
80-200						
UW 28	SS 1	17-165/206(KB2h)	117	113,90	-3%	111,1 / 152,1
	SS 2	20-165/206(KB2h)	78	95,42	18%	129,58 / 170,58

Tabelle 5-3: Löschreserven in den ausgewählten Umspannwerken, Stand August 2009

<sup>1</sup> Löschreserve, bezogen auf die maximalen Spulenströme und unter Berücksichtigung der Löschgrenze und der Betriebsarten der Erdschlusslöschspule (Oberschwingungsanteile wurden vernachlässigt).

In Tabelle 5-3 ist ersichtlich, dass alle untersuchten Löschbezirke eine hohe Löschreserve aufweisen. Um jedoch in Zukunft strategische Entscheidungen bei Erreichen der Löschgrenze zu erleichtern, müssen diese in Bezug auf den weiteren Ausbau der Netze bzw. auf den kontinuierlich steigenden Verkabelungsgrad untersucht werden.

### 5.3 20-kV-Abzweige

Es werden für die ausgewählten Umspannwerke die Löschbezirke und deren zugehörige 20-kV-Abzweige erfasst. Von den Abzweigen werden die Kabel- und Freileitungslängen erhoben und der daraus resultierende Erdschlussstrom berechnet. Ausgewählte Löschbezirke werden hinsichtlich ihrer maximalen Ausbaugröße und den damit verbundenen Erdschlussströmen unter Berücksichtigung und Einhaltung der Löschgrenze untersucht.

Umspannwerk	Löschbezirk	Abzweig	Kabelanteil in km	Freileitungsanteil in km	resultierender Erdschlussstrom in A
UW 8	SS1	J05	6,29	29,38	14,68
		J10	5,23	11,91	15,99
	SS2	J13	k.A. <sup>1</sup>	k.A. <sup>1</sup>	k.A. <sup>1</sup>
		J15	k.A. <sup>1</sup>	k.A. <sup>1</sup>	k.A. <sup>1</sup>
		J11	k.A. <sup>1</sup>	k.A. <sup>1</sup>	k.A. <sup>1</sup>
		J12	k.A. <sup>1</sup>	k.A. <sup>1</sup>	k.A. <sup>1</sup>
UW 14	SS1	J10	13,159	1,152	40,92
		J01	37,717	33,782	115,7
	SS2	J07	7,393	12,953	27,38
		J04	29,114	10,192	99,26
		J02	15,263	16,349	49,08
		J03	4,426	12,552	12,85
UW 28	SS1	J07	6,364	47,008	19,89
		J11	10,05	2,31	28,41
		J06	3,17	11,117	8,48
		J04	4,043	26,232	12,50
		J05	14,37	16,402	44,62
	SS2	J08	12,809	64,281	37,48
		J14	5,941	0	19,40
		J15	5,324	4,158	20,48
		J12	5,609	0	18,06

**Tabelle 5-4: Beschaffenheit der 20-kV-Abzweige der Löschbezirke, Stand August 2009**

<sup>1</sup> Für diese Abzweige ist auf Grund des Netzbildes keine selektive Auswertung möglich.

Für weitere Untersuchungen werden die Löschbezirke Sammelschiene 1 vom Umspannwerk 8 und die Sammelschiene 2 vom Umspannwerk 14 ausgewählt.

Der maximale Ausbau wurde in 3 Szenarien unter Vernachlässigung des Oberschwingungsreststroms errechnet, erstens für einen reinen Zubau von Freileitungen (ALD), zweitens für einen reinen Kabelzubau (A2YHCYH) und drittens die realistischste Variante, einen gemischten Ausbau von Kabel und Freileitungen. Für die dritte Variante wurde für den Netzausbau ein Verhältnis von Kabellänge zu Freileitungslänge angenommen, welches dem derzeitigen Stand entspricht.

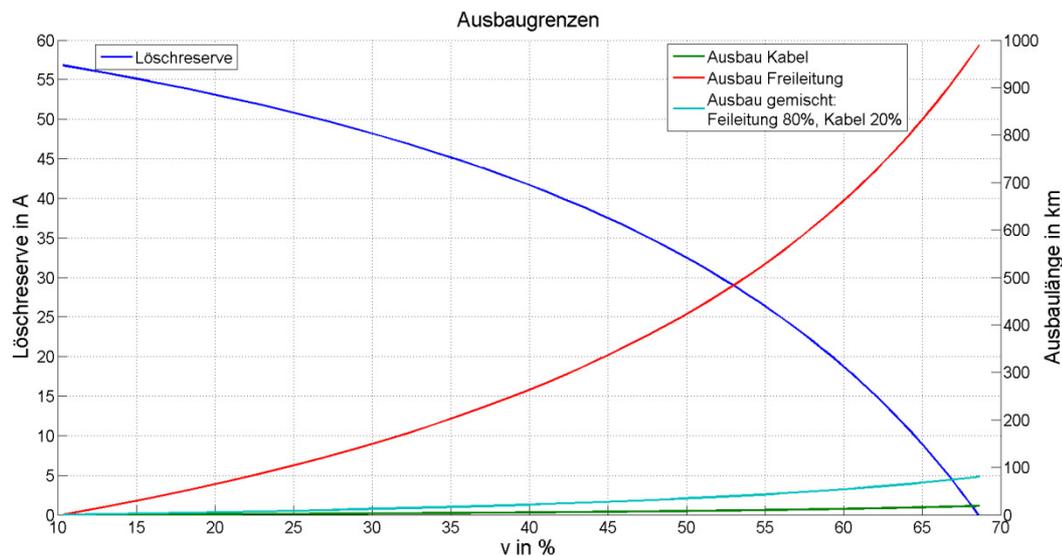


Abbildung 5-1: Löschrerise in Abhängigkeit von der Ausbaulänge, UW8, SS1

Der Löschrerise SS1 vom Umspannwerk 8 wird derzeit unterkompensiert betrieben, da der kapazitive Erdschlussstrom bereits größer ist, als der maximale Löschrerisestrom. In Abbildung 5-1 erkennt man die Abnahme der Löschrerise bei stetigem Netzausbau. Hinsichtlich der Tatsache, dass die Kompensationsspule schon den maximalen Löschrerisestrom liefert, kommt es durch einen Netzausbau und dem damit verbundenen Anstieg des zu löschrerisenden kapazitiven Erdschlussstromes, zu einer Änderung der Verstimmung  $v$  und somit zu einer Änderung des Betriebspunktes der Löschrerise.

Abbildung 5-2 zeigt die maximale Ausbaugrenze für den Löschrerise SS2 für das Umspannwerk 14. Eine negative Verstimmung  $v$  bedeutet einen überkompensierten Betrieb, eine positive einen unterkompensierten Betrieb. Die Erdschlusslöschreriseeinrichtung besitzt eine sehr große Löschrerise und wird derzeit überkompensiert betrieben (Tabelle 5-3). Die Spule ist stufenlos regelbar und kann auf jede gewünschte Verstimmung  $v$  eingestellt werden. Das bedeutet, dass bei einer Änderung des Betriebszustandes (Änderung der Erdkapazitäten), die Löschrerise automatisch, innerhalb ihrer technischen Grenzen, durch einen Regler, auf die gewünschte Verstimmung nachgestimmt wird, die Überkompensation wird beibehalten. Dies erklärt den Verlauf der Löschrerise in Abbildung 5-2. zwischen den Punkten (1) und (2).

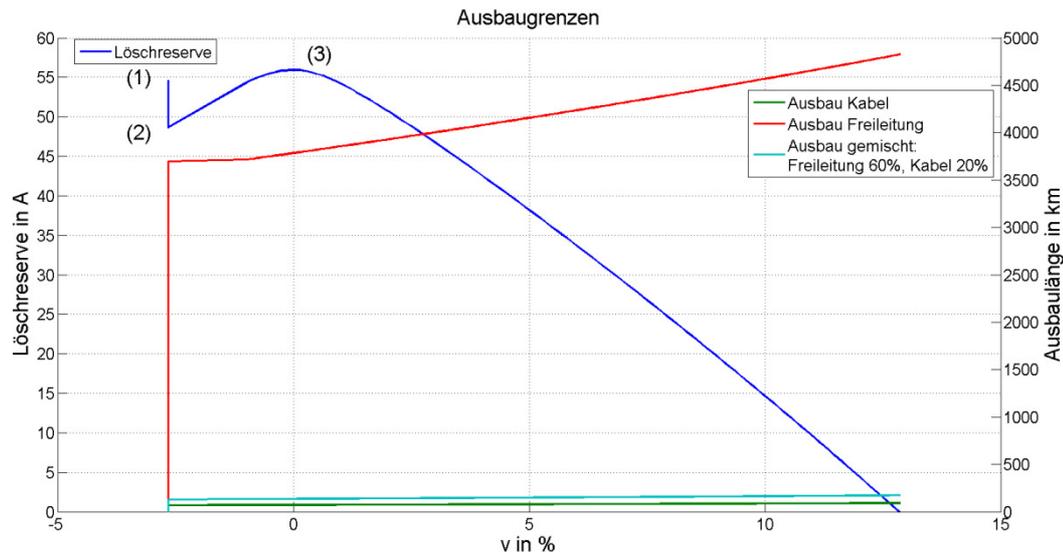


Abbildung 5-2: Löschreserve in Abhängigkeit von der Ausbaulänge, UW 14, SS2

Durch die automatische Nachstimmung der Löserspule, ergibt sich bei einem Netzausbau keine Änderung der Verstimmung  $v$ , lediglich die Löschreserve sinkt durch die Zunahme des kapazitiven Erdschlussstromes und der damit verbundenen Erhöhung des Erdschlussreststromes. Erst durch eine Ausbaulänge, bei der der kapazitive Erdschlussstrom annähernd den maximalen Löserspulenstrom erreicht, beginnt sich die Verstimmung  $v$  zu ändern. Die Verstimmung geht vom überkompensierten Betrieb in den Resonanzpunkt über ( $v = 0$ , Abbildung 5-2, Punkt (3)), welches das Wiederansteigen der Löschreserve erklärt (Kapitel 4.3.9). Bei einer weiteren Zunahme des Netzausbaues wandert die Verstimmung vom Resonanzpunkt in den unterkompensierten Betrieb und die Löschreserve wird aufgezehrt.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass die Löscheinrichtungen im Mittelspannungsnetz der KNG für zukünftige Netzausbauten, unter Berücksichtigung der Löschgrenze, gerüstet sind. Jedoch bedarf es genaueren Untersuchungen bei Schaltzuständen, die vom Normalbetrieb abweichen, da sich in solchen Fällen die Parameter eines Löscherbezirkes drastisch ändern können. Zu erwähnen ist, dass Oberschwingungen und Oberschwingungsresonanzen nicht berücksichtigt sind.

## 6 Analyse des Störungsgeschehen der KNG

Durch die Vielfältigkeit von auftretenden Störungen in einem Mittelspannungsnetz, ist es wichtig, diese Fehler zu unterscheiden, um Entscheidungen hinsichtlich Versorgungssicherheit der Kunden und der Vorgangsweise bei der Fehlerbeseitigung zu treffen. Untersucht wurde das gelöscht betriebene 20-kV-Verteilernetz der KNG.

### 6.1 Störungsstatistik

In dieser Statistik wurden die Häufigkeiten der unterschiedlichen Fehler, sowie die betroffenen Leitungsarten und der Fehlerort untersucht. Von den Erdschlüssen werden nur jene mit einer Dauer > 3 sec. durch das Netzleitsystem erfasst, d.h. Erdschlusswischer mit einer geringeren Fehlerdauer sind in der Statistik nicht enthalten.

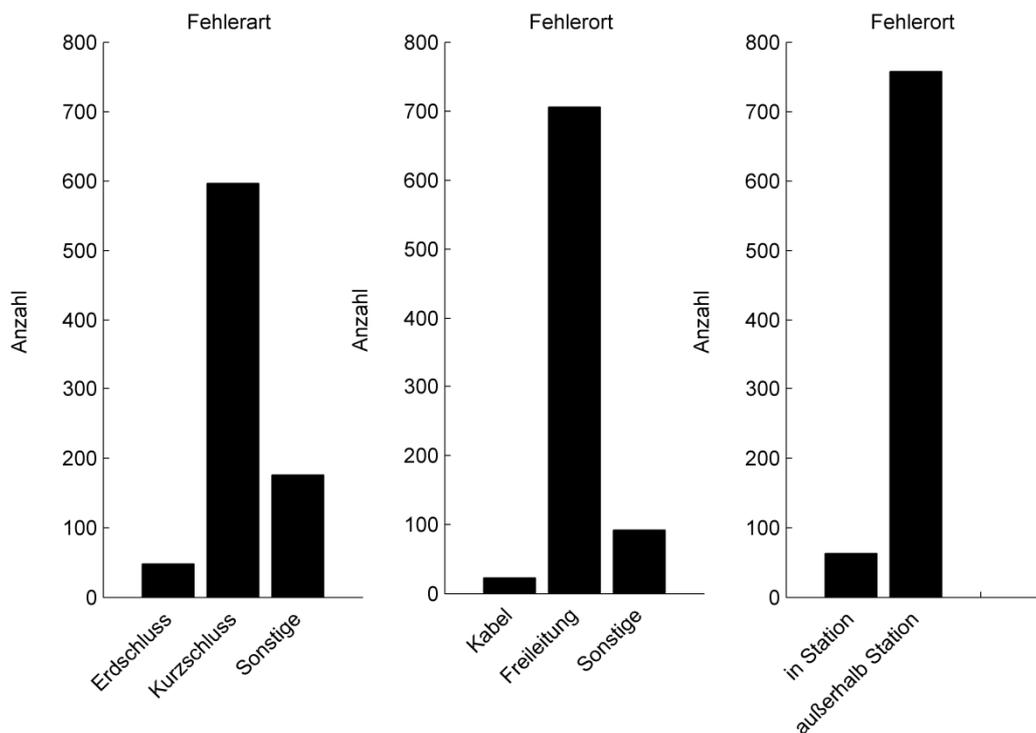


Abbildung 6-1 Fehlerarten, betroffene Leitungsart und Fehlerort, pro Jahr

In Abbildung 6-1 sind die unterschiedlichen Fehlerarten, die betroffene Leitungsart und die Fehlerorte ersichtlich. Man erkennt dass die Anzahl der Kurzschlüsse jene der Erdschlüsse mit einer Fehlerdauer  $\geq 3$  sec. bei weitem überwiegt. Berücksichtigt man jedoch die im Netz auftretenden Erdschlusswischer (< 3 sec.), welche in der Störungsstatistik nicht erfasst werden, kommen lt. einer überschlägigen Hochrechnung in der Kategorie Erdschluss zusätzlich noch ca. 560 Störungen hinzu.

In einem niederohmigen oder starr geerdeten Netz würde jeder Erdschluss bzw. Erdschlusswischer zu einer Abschaltung des betroffenen Netzteiltes führen. Durch den kompensierten Betrieb eines Verteilernetzes kann somit die Ausfallhäufigkeit wesentlich reduziert werden.

Die hohe Anzahl von Störungen ist grundsätzlich durch den hohen Freileitungsanteil sowie die zahlreichen durch atmosphärische Einflüsse bedingten Einwirkungen im Bereich des Verteilernetzes der KNG zu erklären.

## 7 Netzbetrieb der KNG

### 7.1 Allgemein

Der normale Betriebszustand eines Netzes ist beschrieben durch

- eine unterbrechungsfreie Versorgung aller Netzkunden
- einen intakten Isolationszustand
- einen von der Betriebsführung gewollten Schaltzustand
- intakte Betriebsmittel
- einer Nennspannung innerhalb der Toleranzgrenzen

Eine ungewollte Änderung dieses normalen Betriebszustands wird als Fehler bezeichnet, der zu einer Störung führt [23].

Teilweise geplante oder ungeplante Abschaltungen von Anlagenteilen, welche zu einer Versorgungsunterbrechung führen, sind vom Netzbetreiber auf das Minimum zu reduzieren. Durch koordinierte Schaltvorgänge bei geplanten Abschaltungen von Betriebsmitteln ist es meist möglich, die Versorgung des Netzkunden aufrechtzuhalten. Solche Handlungen sind somit als unkritisch zu bewerten. Versorgungsunterbrechungen von Netzkunden durch ungeplante Abschaltungen, hervorgerufen durch unvorhersehbare Störungen, müssen vom Netzbetreiber möglichst reduziert werden. Solche Unterbrechungen verursachen Kosten in Form von entgangenem Netznutzungsentgelt und Produktionsausfällen von Industrie- und Gewerbekunden und können somit zu einem starken Imageschaden des Netzbetreibers führen [24, 25]. Unter diesen Gesichtspunkten ergeben sich heute die Herausforderungen an die Betriebsführung, an das zu wählende Erdschlusserfassungskonzept und den Schutzkriterien. Aus diesem Grund wurde das Erdschlusserfassungskonzept des 20-kV-Verteilernetzes der KNG untersucht.

### 7.2 Schutztechnik

Die Aufgabe der Schutztechnik ist es, den Betriebszustand von elektrischen Netzen und Anlagen zu überwachen. Sie ist so auszulegen, dass im Fehlerfall die Aufrechterhaltung der Energieversorgung der nicht betroffenen Anlagen- und Netzteile gewährleistet ist. Das bedeutet, dass der Fehler schnellstmöglich zu erfassen und die Fehlerstelle selektiv abzuschalten ist.

Anforderungen an die moderne Schutztechnik:

- Selektivität
- Schnelligkeit

- Genauigkeit, Empfindlichkeit
- Zuverlässigkeit
- Elektromagnetische Verträglichkeit
- Wirtschaftliche Angemessenheit

Durch die Komplexität und Gegensätzlichkeit der Anforderungen muss für jedes zu lösende Schutzproblem, um die beste Lösung zu finden, ein den Randbedingungen angepasster Kompromiss getroffen werden [12].

Wird ein Verteilernetz erdschlusskompensiert betrieben, haben auftretende Erdschlüsse zu 90% keine Auswirkung auf die Energieversorgung, da sie von selbst verlöschen. Erst bei einem stehenden Erdschluss kommt es, um die Fehlerbehebung vor Ort durchzuführen, zu einer damit verbundenen Abschaltung [14]. Jedoch kann das gelöschte Netz bis zu diesem Zeitpunkt weiterbetrieben werden und somit der Netzkunde versorgt werden. Die durch kurzzeitige atmosphärische Überspannungen (Blitzschlag) oder z.B. Astabfall entstehenden Kurzschlüsse bei Freileitungsnetzen können in den überwiegenden Fällen durch Schutzauslösungen und eine AWE-Einrichtung bereinigt werden. Die Erfolgsquote liegt hier bei ca. 80%, das bedeutet, durch die Schutzauslösung und automatische Wiedereinschaltung wird der Kurzschluss beseitigt, man spricht von einer erfolgreichen AWE. Durch diese Maßnahmen ist das Netz gegenüber kurzzeitigen äußeren Einflüssen sehr gut geschützt und eine hohe Versorgungssicherheit gewährleistet [24].

Bei bleibenden Schäden durch äußere Einwirkungen oder bei der Zerstörung von Anlagenkomponenten können keine solche Schutzmechanismen eingreifen. In diesem Fall kommt es zur selektiven Abschaltung des betroffenen Leitungsstücks, welches vor Ort von geschulten Leitungsmonteuren wieder in Stand gesetzt werden muss. Während der Instandsetzung wird versucht, durch Schalthandlungen, einen neuen Schaltzustand des Netzes herbeizuführen, mit dem im Idealfall alle Netzkunden wieder versorgt sind.

### **7.2.1 Methoden der Erdschlusserfassung**

In gelöschten Netzen ist es notwendig, auftretende Erdschlüsse zu erfassen, um zur Aufrechterhaltung der Versorgungssicherheit Maßnahmen zu treffen. Insbesondere bei stehenden Erdschlüssen ist eine Erfassung notwendig, da diese nicht mehr selbstlöschend sind und vom Störungspersonal geortet und beseitigt werden müssen.

Für die Erdschlusserfassung gibt es prinzipiell zwei zu messende Parameter

- Messen der Verlagerungsspannung
- Messen des Summenstroms

Nachfolgend wird die praktische Umsetzung der beiden Erfassungsmöglichkeiten erläutert.

### 7.2.1.1 Erfassung der Verlagerungsspannung

Die Sternpunktverlagerungsspannung  $U_{NE}$  ist im idealen symmetrischen Netz gleich null. Durch die kapazitive Unsymmetrie von realen Netzen ergeben sich Spannungswerte von einigen wenigen Prozent der Leiter-Erde-Spannung, sie ist indirekt ein Maß für Unsymmetrie. Bei einem Erdschluss kommt es zu einer Erhöhung der Verlagerungsspannung, welche bei einem satten Erdschluss bis auf die Leiter-Erde-Spannung ansteigen kann. Die Spannung ist im gesamten galvanisch verbundenen Netz (Löschbezirk) messbar und somit ortsunabhängig vom Erdschluss. Somit ist eine hohe Verlagerungsspannung ein Anzeichen für einen Erdschluss im Netz [26].

Zur Messung der Verlagerungsspannung  $U_{NE}$ , werden verschiedene Spannungswandlerschaltungen eingesetzt. Eine der am meisten verbreiteten Schaltungen, ist die Dreiphasen-Erdungsspannungswandler-Schaltung mit Hilfswicklung in offener Dreiecksschaltung.

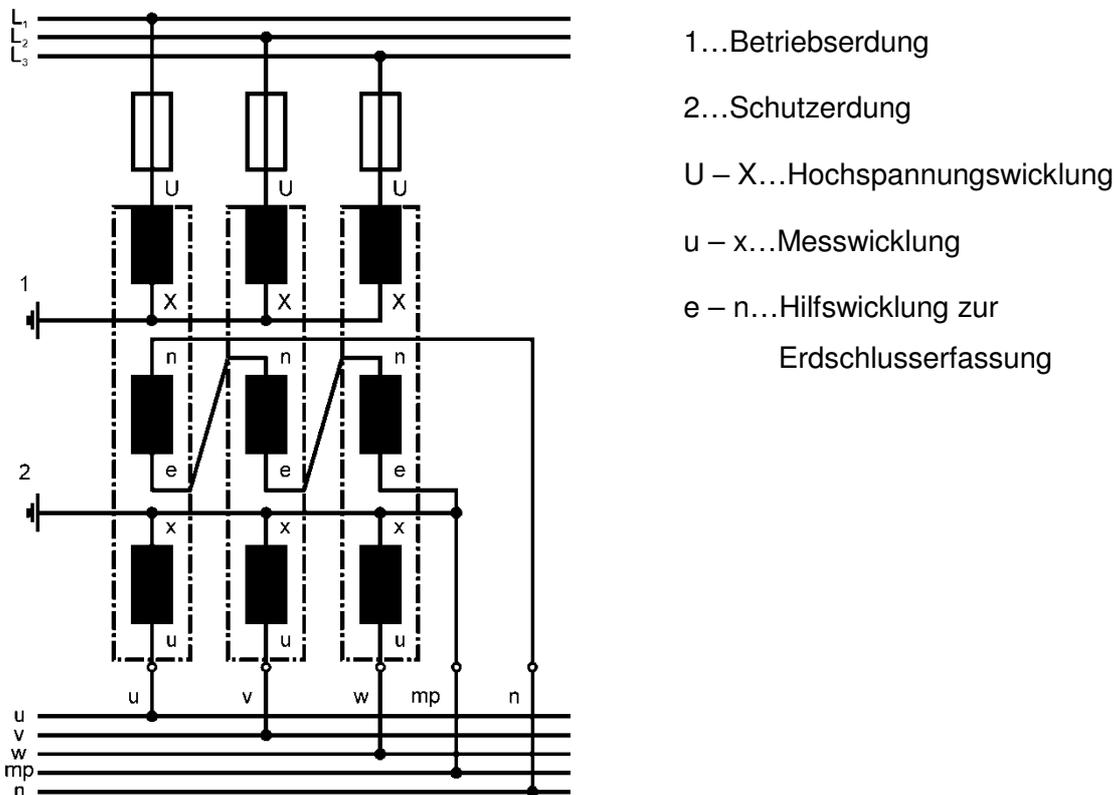


Abbildung 7-1: Dreiphasen-Erdungsspannungswandler mit Hilfswicklung in offener Dreiecksschaltung [6]

Die Übersetzungsverhältnisse je Spannungswandler sind so gewählt, dass im Normalbetrieb an den Hilfswicklungen n-e die Spannung  $U_{ne} = 33 V \left( \frac{100V}{3} \right)$  auftritt und an den Sekundärwicklungen  $U_{xu} = 57,8 V \left( \frac{100V}{\sqrt{3}} \right)$  auftritt.

Im Fehlerfall wird die Leiter-Erde-Spannung der kranken Phase zu null, die gesunden Leiter-Erde-Spannungen erhöhen sich um den Faktor  $\sqrt{3}$ , somit steigen die Spannungen der Hilfswicklungen in den gesunden Phasen auf  $U_{ne} = 57,8 V \left( \frac{100V}{3} \cdot \sqrt{3} \right)$ . Zwischen den

Sekundärklemmen stellt sich nun als geometrische Summe die Verlagerungsspannung  $U_{mpn} = U_{NE} = \sqrt{3} \cdot 57,8 \text{ V} = 100 \text{ V}$  phasenrichtig ein. Die Strangspannungen in den Sekundärwicklungen der gesunden Phasen erhöhen sich auch um den Faktor  $\sqrt{3}$ , zu  $U_{xu} = 100 \text{ V} \left( \frac{100\text{V}}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{3} \right)$  [6].

Spannungen	Normalbetrieb			Erdschluss in Phase R		
	R	S	T	R	S	T
$U_{xu}$	$\left(\frac{U_L}{\sqrt{3}}\right)$	$\left(\frac{U_L}{\sqrt{3}}\right)$	$\left(\frac{U_L}{\sqrt{3}}\right)$	0 V	$U_L$	$U_L$
$U_{xu}$	$\left(\frac{100\text{V}}{\sqrt{3}}\right)$	$\left(\frac{100\text{V}}{\sqrt{3}}\right)$	$\left(\frac{100\text{V}}{\sqrt{3}}\right)$	0 V	100 V	100 V
$U_{ne}$	$\left(\frac{100\text{V}}{3}\right)$	$\left(\frac{100\text{V}}{3}\right)$	$\left(\frac{100\text{V}}{3}\right)$	0 V	$\left(\frac{100\text{V}}{\sqrt{3}}\right)$	$\left(\frac{100\text{V}}{\sqrt{3}}\right)$
$U_{uv}$	100 V			100 V		
$U_{vw}$	100 V			100 V		
$U_{wu}$	100 V			100 V		
$U_{mpn}$	0 V			100 V		

Tabelle 7-1: Primär und Sekundärspannungen am Spannungswandlersatz bei Erdschluss nach Abbildung 7-1 [6]

### 7.2.1.2 Erfassung des Summenstroms

Um den Summenstrom  $I_M$  eines Dreileitersystems zu erfassen, müssen die drei Phasenströme geometrisch addiert werden. Der Summenstrom ist, wenn man von gleich großen Leiter-Erde-Kapazitäten ausgeht, im idealen symmetrischen und fehlerfreien Netz gleich null.

$$I_M = \underline{I}_1 + \underline{I}_{1E} + \underline{I}_2 + \underline{I}_{2E} + \underline{I}_3 + \underline{I}_{3E} = 0 \quad (7-1)$$

Bei einem Erdschluss in Phase x wird der kapazitive Strom  $\underline{I}_{xE}$  zu null, somit ist die Summe der Ströme ungleich null. Ergibt die Messung des Summenstroms ungleich Null, ist das ein Hinweis für einen Erdschluss im Netz [26].

Aufgrund der Erdschlusskompensation im gelöschten Netz und unter der Annahme eines vollkompensierten Betriebes, fließt an der Fehlerstelle nur noch ein kleiner Wirkreststrom (Wattreststrom). Diese Tatsache bereitet vielen Erdschlusserfassungsmethoden Probleme, da die Ströme nur ungenau ermittelt werden können [7].

Zur Messung des Summenstroms werden zwei verschiedenen Methoden verwendet.

- Holmgreen-Schaltung
- Kabelumbauwandler

Die Holmgreen-Schaltung wird vorwiegend in Freileitungsnetzen eingesetzt. Sie besteht aus drei Außenleiterstromwandlern, welche auf beiden Klemmen der Sekundärwicklung im Stern geschaltet sind (Abbildung 7-2). Zwischen den beiden Sternpunkten fließt der Summenstrom

$I_M$ . Jedoch besitzen Stromwandler einen Amplituden- und Winkelfehler, somit weicht die Stromsumme auch im fehlerfreien Betrieb von Null ab.

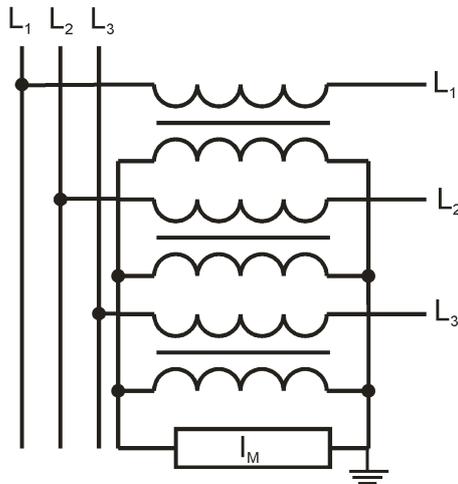


Abbildung 7-2: Holmgreen Schaltung [12]

Der Kabelumbauwandler (Abbildung 7-3) kommt bei Kabelnetzen bzw. bei Freileitungsnetzen mit Kabeleinführungen zum Einsatz. Er wird nachträglich um ein isoliertes Kabel angebracht. Ein Eisenkern mit Wicklungen umschließt die drei Phasen eines Kabels, bei einem Erdschluss wird ein dem Summenstrom proportionaler Fluss erzeugt, welcher in der Sekundärwicklung durch Induktion ein Abbild des Summenstroms hervorruft. Ein Fehler bei der Messung wie bei der Holmgreen-Schaltung beschrieben ist, tritt beim Kabelumbauwandler nicht auf.

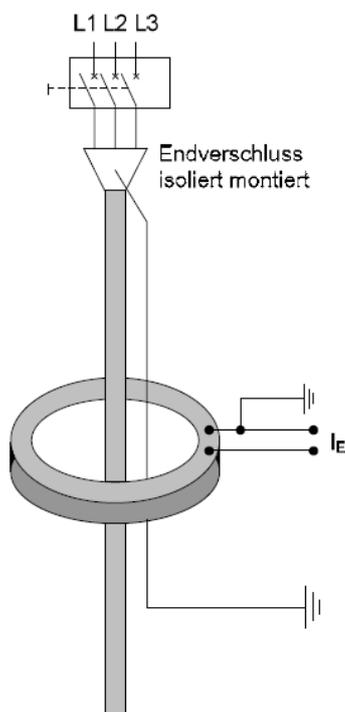


Abbildung 7-3: Kabelumbauwandler,[27]

Wie bereits beschrieben, kann durch die messtechnische Erfassung der Sternpunktverlagerungsspannung nur ein Erdschluss im gesamten galvanisch verbundenen Netz festgestellt werden. Wenn man abzweigsselektive Erdschlüsse erfassen möchte muss der Summenstrom der einzelnen Abzweige gemessen werden. Eine Aussage über den genauen Ort des Erdschlusses (Fehlerstelle) kann nicht getroffen werden. Dies jedoch ist für die Fehlereingrenzung durch den Netzbetreiber höchst wünschenswert.

### **7.2.2 Erdschlusserfassung und -ortung bei der KNG**

Das 20-kV-Verteilernetz der KNG wird als gelöschttes Netz betrieben. Dieses ist aufgeteilt in sogenannte Löschezirke, ein Löschezirk besteht aus einer Sammelschiene mit mehreren Abgängen. Jeder Löschezirk besitzt mindestens eine Kompensationsspule, mit der der auftretende kapazitive Erdschlussstrom im Fehlerfall begrenzt wird. Bei stehenden Erdschlüssen, also solchen die nicht selbst erlöschen, muss es nach der Ortung zu einer Abschaltung kommen, um die Fehlerstelle durch Montagepersonal zu reparieren. Dabei ist das Erfassen des fehlerbehafteten Abzweiges sehr bedeutsam, da dadurch das Montagepersonal schneller den Fehler eingrenzen, finden und bereinigen kann. Die KNG erfasst das Auftreten von Erdschlüssen anhand der Sternpunktverlagerungsspannung, die Fehlerortung wird konventionell durchgeführt. Bei einem stehenden Erdschluss erfolgt eine sogenannte Sammelschienenenumlegung der einzelnen Abgänge. Besteht diese Möglichkeit nicht, werden die einzelnen Abgänge nacheinander von der Sammelschiene abgetrennt und wieder zugeschaltet. Der erdschlussbehaftete Abzweig ist dann gefunden, wenn nach der Trennung von diesem, der Schwellwert der Verlagerungsspannung auf der speisenden Sammelschiene unterschritten ist und das Erdschlussmelderrelais somit keine Erdschlussmeldung mehr anzeigt. Ist dieser Abzweig gefunden, wird, durch eingrenzende Schalthandlungen des Montagepersonals vor Ort versucht, den genauen Fehlerort am Abzweig zu lokalisieren. Dies geschieht nach dem gleichen Prinzip wie die Suche nach dem fehlerhaften Abzweig. Der Monteur schaltet solange Teilstücke des Abganges frei, bis das Erdschlussmelderrelais keinen Erdschluss mehr anzeigt bzw meldet.

Solch ein Ortungsverfahren besitzt mehrere Nachteile:

- Zweitaufwändige Sammelschienenenumlegungen
- Im ungünstigsten Fall, Abschalten des Abzweiges

Aus diesem Grund werden nachfolgend, Erdschlussortungsmethoden auf ihre praktische Umsetzung und ihr Einsatzgebiet untersucht. Ziel ist es, Möglichkeiten zu finden, um im Erdschlussfall sofort, ohne weitere Schalthandlungen, den betroffenen Abgang selektiv zu erfassen. Das Problem der weiteren Tiefenortung soll hier außer Betracht gelassen werden.

## 7.3 Methoden zur Erdschlussortung

Es sollen die einzelnen Methoden zur Erdschlussortung, welche derzeit Stand der Technik sind, erläutert und hinsichtlich Aufwand, Einsatzgebiet und Kosten untersucht werden.

### 7.3.1 Erdschlussmelderelais

Die durch einen Erdschluss bedingte Erhöhung der Verlagerungsspannung  $U_{NE}$  wird als Kriterium zur Erfassung des Erdschlusses herangezogen.

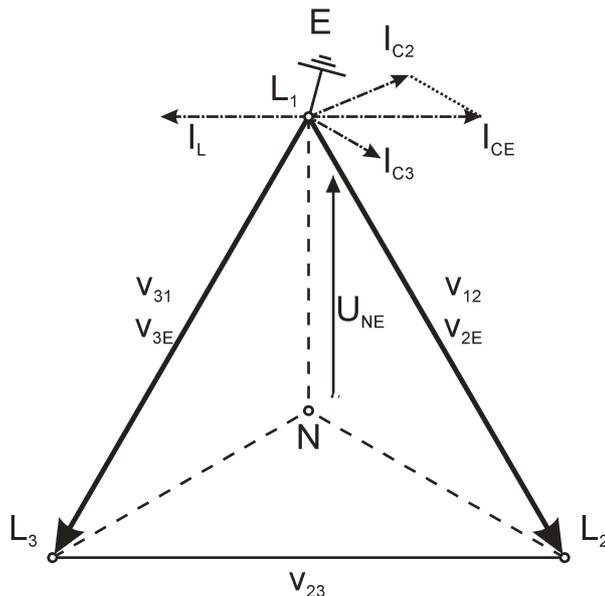


Abbildung 7-4: Einpoliger Erdschluss, mit Verlagerungsspannung  $U_{NE}$

Das Erdschlussmelderelais erfasst die Verlagerungsspannung  $U_{NE}$ . Erreicht diese einen Schwellwert, spricht das Relais an und meldet zeitverzögert (ca. 3 s) einen Erdschluss. Der Schwellwert muss so gewählt werden, dass aufgrund der kapazitiven Unsymmetrie und der damit verbundenen Verlagerungsspannung im fehlerfreien Betrieb, es zu keinem Ansprechen des Erdschlussmelderelais kommt. Aus betriebstechnischer Sicht hat sich ein Schwellwert von ca. 20-30% der Leiter-Erde-Spannung als günstig erwiesen [28][11].

Vorteil:

- Verlagerungsspannung tritt bei einem Erdschluss im gesamten Löschbezirk auf. Erdschluss kann flächendeckend erfasst werden.

Nachteil:

- Keine Selektivität, Fehlerort muss durch Ortungsverfahren oder eingrenzende Schaltmaßnahmen gefunden werden.
- Bei hochohmigen Fehlern tritt nur eine kleine Verlagerungsspannung auf, es treten Probleme bei der Erfassung auf, es kommt zu Anregeproblemen.

## 7.3.2 Erdschlusswischerverfahren

Bei einem Erdschluss kommt es gleichzeitig zu zwei Effekten, dem Entladevorgang des fehlerhaften Leiters und dem Aufladevorgang der beiden gesunden Leiter. Diese beiden Effekte ergeben Umladevorgänge mit hoher Frequenz, welche Zündschwingungen genannt werden. Bezüglich dieser hochfrequenten Vorgänge ist die Erdschlusslöschspule wegen ihrer hohen Induktivität unwirksam. Aus physikalischen Gründen hängt die Amplitude der Zündschwingung vom Zeitpunkt des Erdschlusseintritts ab [29][11].

### 7.3.2.1 Wischerverfahren:

Beim Wischerverfahren wird der Aufladevorgang bzw. der Entladevorgang ausgewertet. Es werden die Verlagerungsspannung und der Erdschlussstrom messtechnisch erfasst. Der zeitliche Verlauf der Verlagerungsspannung ist im gesamten Netz gleich, hingegen ist das Vorzeichen des Erdschlussstromes abhängig vom Ort der Fehlerstelle. Diese örtliche Abhängigkeit der Polarität des Stromes nutzt das Wischerverfahren aus. Es werden die Polaritäten zeitgleicher Augenblickswerte der beiden Messgrößen miteinander verglichen. In den gesunden Abgängen besitzen Verlagerungsspannung und Erdschlussstrom dieselbe Polarität, im fehlerbehafteten Abgang hingegen entgegengesetzte Polarität [26, 30].

In Abbildung 7-5 ist zum besseren Verständnis des Standard-Wischerverfahrens das dreiphasige Ersatzschaltbild, für ein Umspannwerk mit drei Abgängen dargestellt. Es zeigt den Fall eines einpoligen Erdschlusses im Abgang A, mit ideal abgestimmter Erdschlusskompensation ( $v = 0$ ); weiters sind die auftretenden Ströme und die Verlagerungsspannung eingezeichnet.

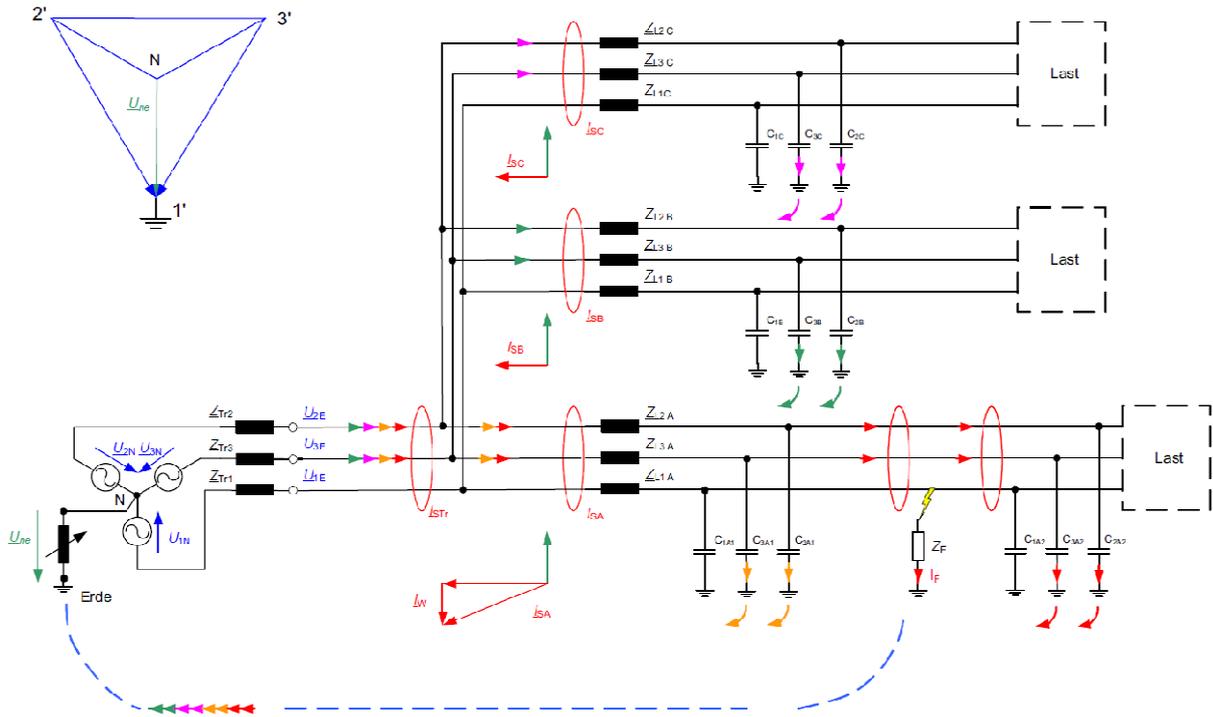


Abbildung 7-5: Ideal abgestimmte Erdschlusskompensation [30]

In den nachfolgenden Abbildungen sind die transienten Vorgänge von Nullspannung und Nullstrom bei einem einpoligen Erdschluss im Abgang A dargestellt. Sie sollen die Funktionsweise der Standard-Wischerverfahren veranschaulichen.

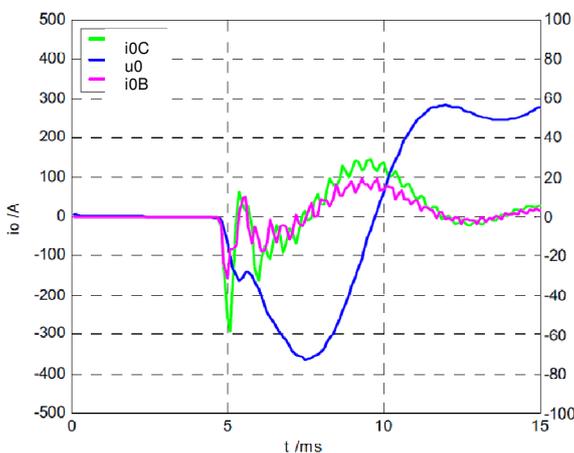


Abbildung 7-6: Gesunde Abgänge[30]

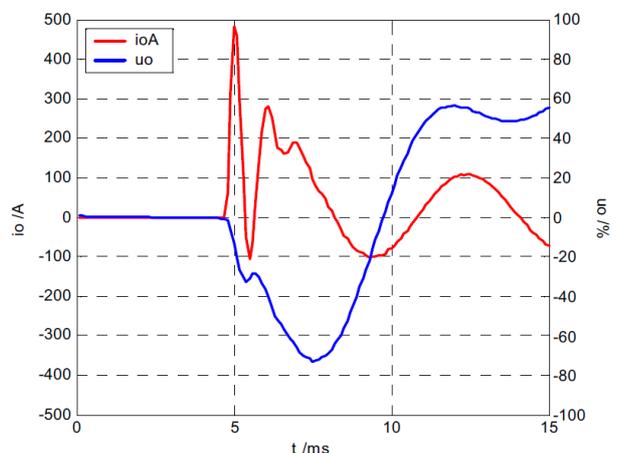


Abbildung 7-7: Erdschlussbehafteter Abgang[30]

In Abbildung 7-6 sind die Nullströme und die Nullspannung der gesunden Abgänge aufgetragen, man erkennt, dass die Ströme und die Spannung beim Eintreten des Erdschlusses die gleiche Polarität besitzen.

In Abbildung 7-7 ist der fehlerbehaftete Abgang dargestellt. Eindeutig zu erkennen ist die entgegengesetzte Polarität von Strom und Spannung.

### Vorteile:

- Holmgreen-Schaltung anwendbar
- Eindeutige Anzeige bei dezentralen Erdschlussstellen

### Nachteile:

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

### Einsatzgebiet:

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

### 7.3.2.2 Wischerverfahren mit qu-Algorithmus

Wischerrelais mit qu-Algorithmus nutzen die Tatsache, dass die fehlerfreien Leiter, um den Faktor  $\sqrt{3}$ , auf die verkettete Spannung aufgeladen werden. Der zeitliche Verlauf der Nullspannung  $U_0$  für den gesunden Abgang B in Abbildung 7-5 wird folgendermaßen beschrieben.

$$u_0(t) = u_0(t_0) + \frac{1}{C_{eqB}} \int_{t_0}^t i_{0B}(\tau) d\tau \quad [28](7-2)$$

mit  $t_0 = 0$ ;  $u_0(t_0) = 0$  [21]

Aus Formel [28](7-2) ist ersichtlich, dass sich eine Verlagerungsspannung erst aufbauen kann, wenn ein Strom beginnt, die Leiter-Erde-Kapazität aufzuladen. Das Integral des Stroms entspricht der Ladung  $q$ , somit sind die Spannung und die Ladung proportional zueinander. Trägt man nun in einem Diagramm die Ladung  $q$  über der Spannung  $u_0$  auf, erhält man eine Gerade, dessen Steigung dem Kehrwert der Leiter-Erde-Kapazität entspricht. Für einen fehlerbehafteten Abgang ist dieses Modell nicht mehr gültig, somit kann anhand eines qu-Diagramms zwischen gesunden und kranken Abzweigen unterschieden werden (siehe Abbildung 7-8, Abbildung 7-9).

Erst durch die Ausstattung der Erdschlussmelderrelais mit genügend großem Speicher ist diese Technik möglich, da bei einem Ansprechen des Relais, durch Auftreten einer Verlagerungsspannung, auf die Daten in der Vergangenheit zurückgegriffen werden muss. Das bedeutet, beim Ansprechen geht das Relais im Speicher bis zum Nulldurchgang der Verlagerungsspannung zurück und beginnt von dort an mit der Integration des Nullstroms. Durch die Möglichkeit, Daten aus der Vergangenheit auszuwerten, sind auch hochohmige Fehler (1 bis 2 k $\Omega$ ) erkennbar. In diesem Fall beginnt man mit der Integration noch weiter in der Vergangenheit.

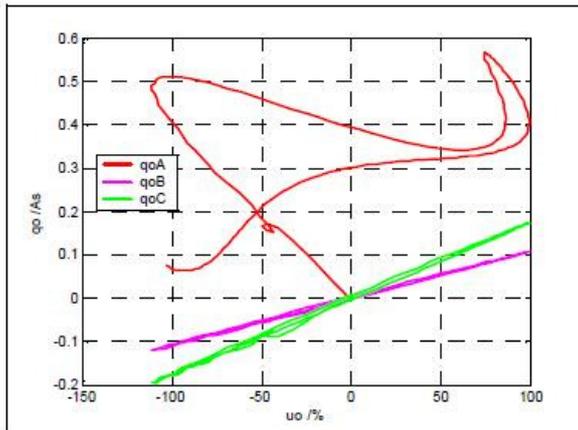


Abbildung 7-8: qu-Diagramm bei niederohmigen Fehlern[28]

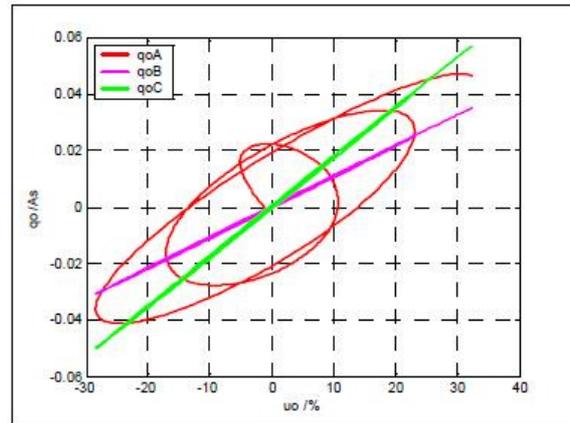


Abbildung 7-9: qu-Diagramm hochohmiger Fehler (2000  $\Omega$ )[28]

#### Vorteile:

- 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:

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

#### Einsatzgebiet:

Der qu-Algorithmus schließt Fehlinterpretationen aus und ist gegenüber dem Standard-Wischerverfahren vorzuziehen. Das Verfahren eignet sich sehr gut für Stichleitungen und meist für Parallelleitungen, bei mehrfach gespeisten und vermaschten Netzen ist eine Feststellung des fehlerhaften Abganges nicht mehr möglich.

### 7.3.2.3 Wischerverfahren mit qu2-Algorithmus

Vermaschte Netze oder Ringnetze stellen ein Problem für die Erdschlussortung dar. Durch unterschiedliche Längsimpedanzen der Phasen treten bereits im gesunden Netz, unterschiedlich große Phasenströme auf. Daraus entstehen im gesunden Betrieb Nullströme, die unabhängig von der Verlagerungsspannung sind. Diese Unabhängigkeit stellt für die voran gegangenen Wischerverfahren ein Problem dar, da diese von einem Zusammenhang zwischen Verlagerungsspannung und Nullstrom ausgehen. Die Lösung beruht auf den bereits beschriebenen qu-Algorithmus, jedoch wird eine Linearisierung um den Arbeitspunkt und eine adaptive Störunterdrückung in den Eingangssignalen durchgeführt [30].

#### Vorteile:

- 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:

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

#### Einsatzgebiet:

- Der qu2-Algorithmus schließt Fehlinterpretationen aus. Das Verfahren eignet sich sehr gut für Stichleitungen und Parallelleitungen, bei mehrfach gespeisten und vermaschten Netzen oder Ringnetzen wird die Erkennung des Fehlerortes erhöht [30].

### **7.3.3 Wattmetrisches Verfahren**

Dieses Verfahren setzt einen stehenden Erdschluss im eingeschwungenen Zustand voraus. Das Verfahren erfasst den Wirkanteil des Erdschlussreststromes (Wattreststrom) mit Hilfe einer sogenannten  $\cos(\varphi)$ -Schaltung und bestimmt daraus die Wirkleistungsrichtung. Die Richtung des Wattreststromes gibt den Fehlerort an, da dieser über den fehlerbehafteten Abgang fließt. Dabei erschwert der Umstand des geringen Erdschlussreststroms in einem gelöschten Netz die Erfassung des Wirkstromes. Hierfür müssen winkelgetreue oder winkelkorrigierte Strom- und Spannungswandler eingesetzt werden, um den geringen Wirkstrom vom gesamten Summenstrom zu unterscheiden. Wird der Winkelfehler nicht berücksichtigt, entstehen scheinbare Wirkströme die zu einer Fehlortung führen [29, 30][11].

#### **7.3.3.1 Wattreststromerhöhung**

Um die Ortungssicherheit des Wattmetrischen Verfahrens zu verbessern, besteht die Möglichkeit der Erhöhung des Wirkanteils des Erdschlussreststroms [11].

In der Praxis gibt es dafür verschiedene Herangehensweisen

- Dauerhafte Wattreststromerhöhung um 5 bis 10 A
- Wattreststromerhöhung von 5 A bis 20 A während des gesunden Betriebes, bis einige Sekunden nach Erdschlusseintritt
- Kurzzeitige Wattreststromerhöhung auf bis zu 300 A



- Technischer Aufwand
- Nur für niederohmige Fehler geeignet

### Einsatzgebiet

Funktioniert nicht bei Parallelleitungen und vermaschten Netzen, ein Stichbetrieb ist notwendig [29].

### **7.3.4 Pulsortung**

Im Erdschlussfall ändert man den Kompensationsgrad in Richtung Vollkompensation und damit den Blind- und Summenstrom an der Erdschlussstelle. Die Änderung erfolgt durch zyklisches Zuschalten eines Kondensators an die Leistungshilfswicklung der Erdschlusslöschspule (Abbildung 7-11). Dabei muss das gelöschte Netz überkompensiert sein, dadurch ändert sich beim Zuschalten des Kondensators der Betriebspunkt in Richtung Vollkompensation ( $\nu = 0$ ). So verringert sich der Summenstrom im fehlerbehafteten Abgang und steigt in den gesunden Abgängen. Der fehlerhafte Abgang ist von der pulsierenden Verstimmung am stärksten betroffen, da der Summenstrom im Vergleich zu den gesunden Abgängen am stärksten schwankt. Ausgewertet werden die Mittelwerte der betriebsfrequenten Summenströme über eine Periode (200ms) [31][11].

Durch Variation der Taktung erlaubt die Pulsortung eine Fehlererkennung für niederohmige und hochohmige Fehler. Bei niederohmigen Fehlern würde eine periodische symmetrische Taktung von ca. 0,5 Hz genügen. Dadurch ändert sich der Nullstrom über die Erdschlusslöschspule und dieser kann bei einem niederohmigen Fehler nur über die Fehlerstelle fließen. Die Leiter-Erde-Spannungen der gesunden Abgänge bleiben bei kleinen Übergangswiderständen konstant, wodurch auch die Summenströme konstant bleiben. Somit ist der fehlerhafte Abgang eindeutig erfassbar. Bei hochohmigen Fehlern kommt es zu einer Beeinflussung der Verlagerungsspannung  $U_{NE}$ . Durch den pulsierenden Strom an der Erdfehlerimpedanz ändert sich die Verlagerungsspannung. Dadurch ändern sich an den gesunden Abgängen die Leiter-Erde-Spannungen und mit ihnen die kapazitiven Ströme gegen Erde. Durch eine periodische unsymmetrische Taktung (Tastverhältnis 2:5) können auch hochohmige Fehler geortet werden. Hierbei ist die Änderung des resultierenden Stroms im gesunden Abzweig invers, zur Änderung im kranken Abgang [32].

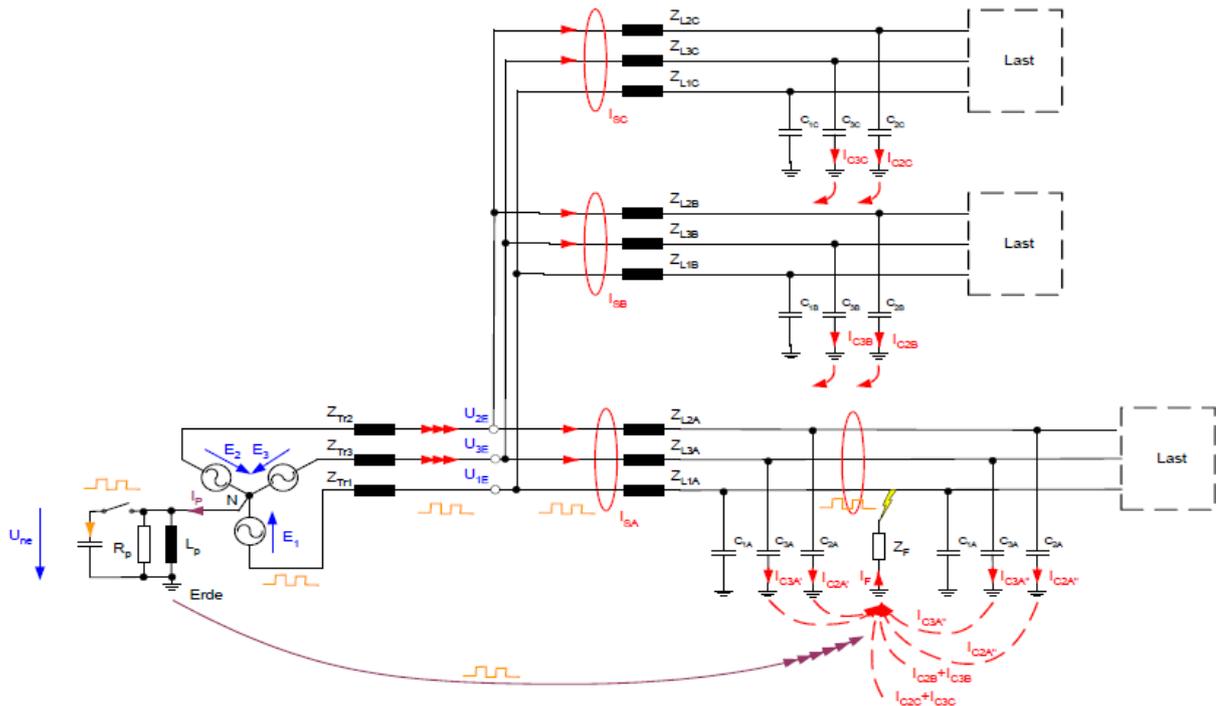


Abbildung 7-11: Prinzip der Pulsortung [30]

Die Änderung des Stroms muss natürlich ausreichend groß sein um den Verstimmungsgrad in die Nähe der Vollkompensation zu ändern, damit die Pulsung bis zur Fehlerstelle erkennbar ist. Diese geforderte Stromänderung liegt bei ca. 2% bis 3% des kapazitiven Erdschlussstroms. Ist dies der Fall, können nicht nur fehlerhafte Abgänge erfasst werden, sondern, durch entlang der Abgänge verteilte Relais, auch einzelne fehlerbehaftete Segmente. Somit ist eine einfache Tiefenortung möglich [30].

#### Vorteile:

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

#### Nachteile:

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

#### Einsatzgebiet:

- Stichbetrieb

### 7.3.5 Oberschwingungsverfahren

Durch nichtlineare Lasten in einem Netz entstehen Spannungs-Oberschwingungen, welche, im Zusammenhang mit den im Erdschlussfall resultierenden Oberschwingungs-Erdschlussströmen, als Kriterium für Oberschwingungsverfahren herangezogen werden. Für das Verfahren betrachtet man im Allgemeinen die 5. Oberschwingung. Für diese ist die Erdschlusslöschspule im Verhältnis zu den Impedanzen der Leiter-Erde-Kapazitäten hochohmig und kann somit vernachlässigt werden. Ein gelöstes Netz kann somit als ein isoliertes Netz betrachtet werden. Bei einem Erdschluss erzeugen die in der verketteten Spannung enthaltenen Oberschwingungsanteile einen Oberschwingungsstrom an der Fehlerstelle. Da das Netz als isoliert angesehen wird, sind die Oberschwingungsströme in den gesunden Abgängen kapazitiv und im fehlerbehafteten Abgang induktiv [32][11].

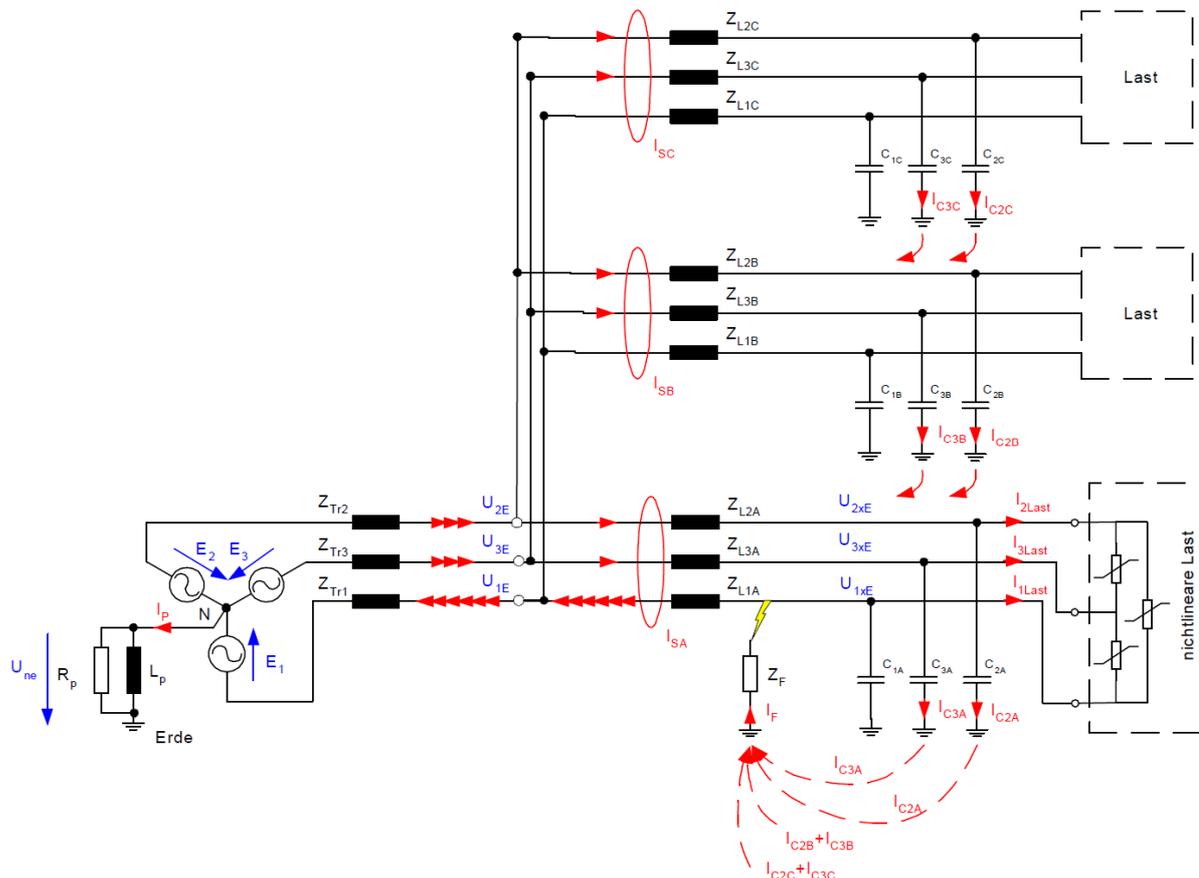


Abbildung 7-12: Oberschwingungsströme in den einzelnen Phasen bei einpoligem Erdschluss[30]

In Abbildung 7-12 sind die Oberschwingungsströme der einzelnen Phasen eingezeichnet, es ist ersichtlich, dass im fehlerbehafteten Abgang die Summe der Oberschwingungsströme der gesunden Abgänge fließt.

Es ergeben sich somit zwei Kriterien zur Bestimmung des fehlerhaften Abgangs

- Der kranke Abgang weist den größten zu messenden Oberschwingungsstrom auf.

- Der Oberschwingungsstrom im kranken Abgang, bezogen auf die Spannungs-Oberschwingung ist induktiv [33]

Für die Erdschlussortung genügt ein Blindleistungsrelais ( $\sin(\varphi)$ -Schaltung) mit vorgeschaltetem 250-Hz-Filter. Es kann die selektive Erfassung des fehlerbehafteten Abgangs durch die Messung der Oberschwingungsströme erfolgen. Der fehlerbehaftete Abgang ist dann der mit dem höchsten Oberschwingungsnullstrom. Eine andere Möglichkeit zur selektiven Ortung, ist die Messung der Phasenlage zwischen dem Summenstrom und der Verlagerungsspannung der Oberschwingungen. Ist ein induktives Verhalten zu erkennen, ist der fehlerbehaftete Abgang gefunden [33][11].

Das Verfahren ist in reinen Freileitungs- und Kabelnetzen sehr zuverlässig, bei gemischten Netzen treten Probleme durch Serienresonanzen auf. Durch Serienresonanzen kann es zur Stromumkehr der Fehlerstelle kommen, insbesondere bei Freileitungen mit nachfolgend großen Kabelstrecken ist der Resonanzpunkt schnell überschritten [30].

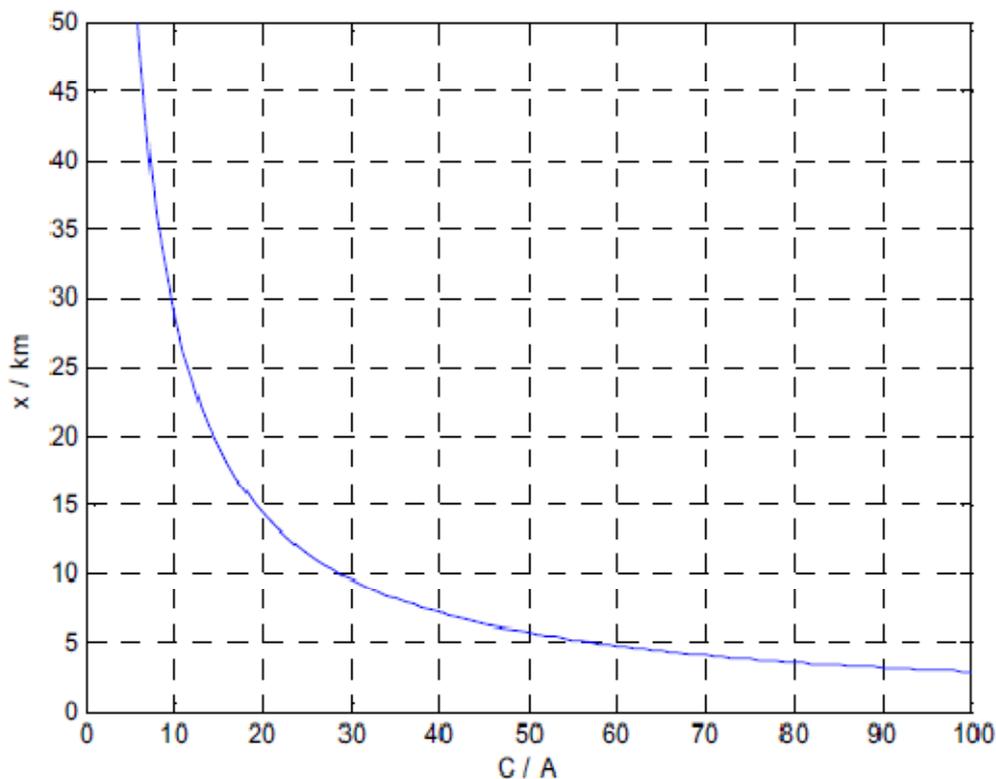


Abbildung 7-13: Resonanzfrequenz 250 Hz [30]

In Abbildung 7-13 ist die Länge des 20-kV-Verteilernetzes und die Kabelkapazität aufgetragen. Solange man sich mit der Netztopologie links der Kurve bewegt, funktioniert das Oberschwingungsverfahren.

Das Oberschwingungsverfahren setzt einen genügend großen Oberschwingungspegel voraus. Ist der Pegel zu gering, kann durch eine Rundsteueranlage bei Erdschlusseintritt eine Frequenz in der Nähe von 250 Hz eingespeist werden [32].

#### Vorteile:

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

#### Nachteile:

- Holmgreen-Schaltung nicht anwendbar
- Nur für niederohmige Fehler geeignet
- Werden die Oberschwingungsstrompegel miteinander verglichen, wird eine interne Kommunikation notwendig

#### Einsatzgebiet:

- Stichtrieb, mit reinen Kabel- oder Freileitungsnetzen.

### **7.3.6 Zusammenfassung:**

Die vorgestellten Verfahren zu Erdschlusserfassung und Ortung zeigen, dass es keine optimale Methode zur Erfassung und Ortung für alle Netzformen und -ausführungen gibt. Dies zeigt auch die Praxis. Die Kombination verschiedener Methoden ist zu bevorzugen, um die Vorteile der einzelnen Verfahren zu erhalten. Wichtig ist auch die konsequente Analyse des zu schützenden Netzes. Erst durch ein detailliertes Erdschluss-Engineering lassen sich geeignete Maßnahmen für die Erdschlusserfassung ableiten [31, 32].

## 8 Simulation mit MATLAB/Simulink

### 8.1 Allgemein

Die zuvor vorgestellten Erdschlussortungsverfahren werden mit Hilfe einer Simulationsumgebung mittels Simulink-SimPowerToolBox auf ihr Einsatzgebiet untersucht. Speziell für den Einsatz im Umspannwerk zur Erkennung des fehlerhaften Abzweiges, im Falle eines Erdschlusses, sollen ihre Eigenschaften untersucht werden. Hierfür wurden drei Musternetze erstellt, welche jeweils verschiedenen Schaltzuständen eines elektrischen Verteilernetzes entsprechen (siehe Abbildung 8-1).

### 8.2 Musternetz

Als Grundmodell für das Musternetz wurde das Umspannwerk 28 aus Punkt 5.3 ausgewählt. Es wurde von diesem Umspannwerk die zweite Sammelschiene mit ihren 4 Abzweigen nachgebildet. Mit diesem Modell können nun auf dem ersten Abzweig (willkürliche Nummerierung) unterschiedliche Fehlerorte mit unterschiedlichen Fehlerübergangswiderständen in einem erdschlusskompensierten Netz simuliert werden.

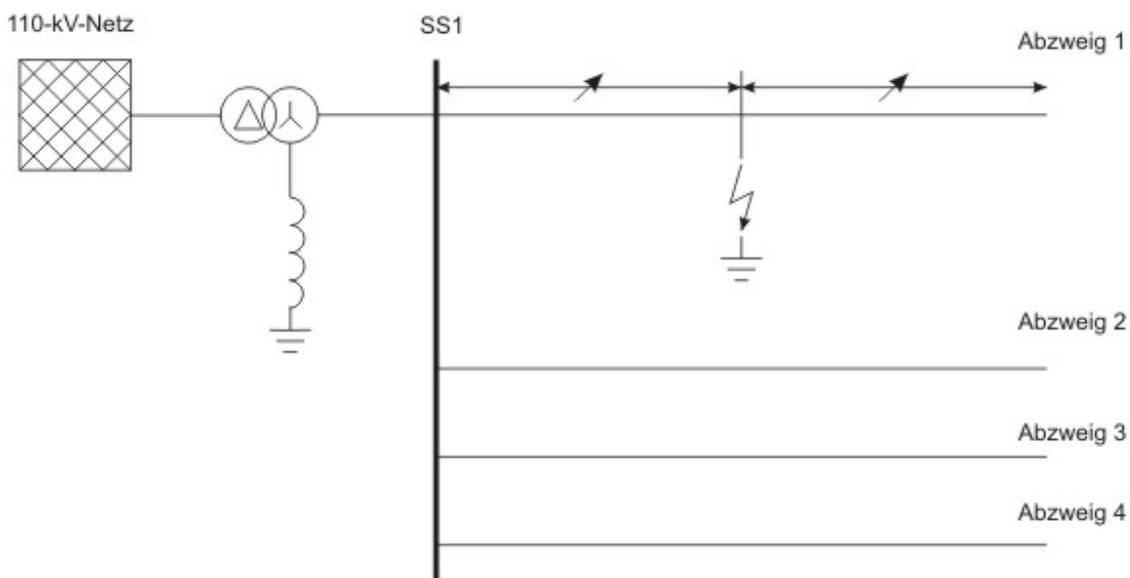


Abbildung 8-1: Grundmodell für Simulation bzw. Stichbetrieb

Die Abzweige 1 und 3 bestehen aus Freileitungs- und Kabelstrecken. Diese zwei Abzweige sind in mehrere Segmente unterteilt. Über die ganze Länge eines Abzweiges folgt auf ein Freileitungsstück ein Kabelstück und daraufhin wieder ein Freileitungsstück usw. Dies ergibt somit über die Länge des Abzweiges eine gleichartige Verteilung der Erdkapazitäten. Die Abzweige 2 und 4 bestehen aus reinen Kabelstrecken. Dieses Basismodell ist auch gleich das erste Musternetz, welches einen Stichbetrieb darstellt.

Ein weiterer Schaltzustand ist ein Ringbetrieb der Abzweige eins und zwei (siehe Abbildung 8-2), sowie ein vermaschtes Netz (siehe Abbildung 8-3).

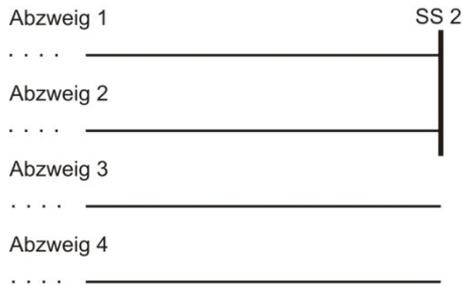


Abbildung 8-2: Parallelbetrieb

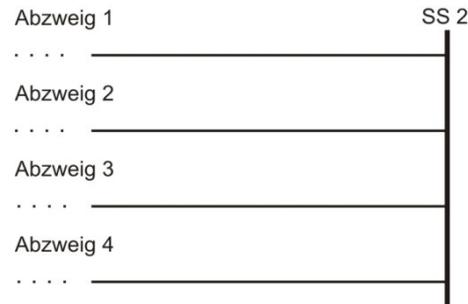


Abbildung 8-3: Vermaschtes Netz

### 8.2.1 Simulationsdaten

Für die Simulation werden Leitungsparameter eines gängigen Kabel- und Freileitungstyps der KNG herangezogen.

Bezeichnung	Typ	R in $\Omega/\text{km}$	$X_L$ in $\Omega/\text{km}$	$C_B$ in nF/km	$I_{CE}$ in A/km
<b>ALD 3x95 mm<sup>2</sup></b>	20-kV-Freileitung	0,358	0,379	9,63	0,0524
<b>A2YHCY 3x 150mm<sup>2</sup></b>	Kabel	0,206	0,121	254	2,76

Tabelle 8-1: Betriebsparameter des Herstellers

Die für die Erdschlussberechnung benötigten Daten des Nullsystems können, aufgrund fehlender Parameter, nicht vollständig exakt angegeben werden. Grund dafür sind die veränderlichen Größen wie Temperatur, Ausdehnung, Feuchtigkeit und Erdwiderstand, welche bei einer genaueren Berechnung nur eine Aufnahme des Ist-Zustandes widerspiegeln würden. Bei Kabeln kommen noch im Erdreich zusätzliche metallische Einbauten zum Tragen, in denen die Rückströme fließen, welche zusätzlich eine Berechnung erschweren. Zuverlässige Werte für die Nullimpedanzen sind nur durch Messungen zu erhalten [1, 8].

Durch Vereinfachung ergeben sich jedoch recht gute Abschätzungen für die mittleren Nullimpedanzen, welche anhand von Erfahrungswerten sehr realitätsnah sind (Punkt 3) [1, 4, 8].

Berechnung der spezifischen Leitungs- und Kabelparameter für das Simulationsmodell

Freileitung:

$$R'_{Fr} = R = 0,358 \left[ \frac{\Omega}{\text{km}} \right] \quad (8-1)$$

$$L'_{Fr} = \frac{X_L}{j\omega} = \frac{0,379}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 1,20 \cdot \left[ \frac{mH}{km} \right] \quad (8-2)$$

$$C'_{Fr} = C_B = 9,626 \left[ \frac{nF}{km} \right] \quad (8-3)$$

$$R'_{Fr} = R + 3 \cdot 50 \frac{m\Omega}{km} \cdot l = 0,358 + 0,150 = 0,508 \left[ \frac{\Omega}{km} \right] \quad (8-4)$$

$$L'_{Fr} = 3,3 \cdot L^1 = 3,98 \left[ \frac{mH}{km} \right] \quad (8-5)$$

$$C'_{Fr} = \frac{C_B}{2} = 4,81 \left[ \frac{nF}{km} \right] \quad (8-6)$$

Kabel:

$$R'_K = R = 0,206 \left[ \frac{\Omega}{km} \right] \quad (8-7)$$

$$L'_K = \frac{X_L}{j\omega} = \frac{0,121}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 385,155 \left[ \frac{\mu H}{km} \right] \quad (8-8)$$

$$C'_K = C_B = 254 \left[ \frac{nF}{km} \right] \quad (8-9)$$

$$\underline{Z}'_K = Z'^1 \cdot (3 \cdot k_0 + 1) \quad (8-10)$$

$$\text{mit } \underline{Z}'_K = (0,206 + j 0,121) \left[ \frac{\Omega}{km} \right] \quad (8-11)$$

$$\underline{Z}'_K = (0,7 + j 0,0376) \left[ \frac{\Omega}{km} \right] \quad (8-12)$$

$$R'_K = 0,7 \left[ \frac{\Omega}{km} \right] \quad (8-13)$$

$$X'_K = 0,0376 \left[ \frac{\Omega}{km} \right] \quad (8-14)$$

$$L'_K = \frac{X'_K}{j\omega} = 119,91 \left[ \frac{\mu H}{km} \right] \quad (8-15)$$

Nachfolgende Tabelle enthält die, in der Simulation verwendeten, längenabhängigen Leitungsparameter.

Typ	R <sup>1</sup> in Ω/km	L <sup>1</sup> in H/km	C <sup>1</sup> in F/km	R <sup>0</sup> in Ω/km	L <sup>0</sup> H/km	C <sup>0</sup> F/km
<b>Freileitung ALD 3-95 mm<sup>2</sup></b>	0,358	1,206 10 <sup>-3</sup>	9,626 10 <sup>-9</sup>	0,508	3,98 10 <sup>-3</sup>	4,813 10 <sup>-9</sup>
<b>Kabel A2YHCY 3-150mm<sup>2</sup></b>	0,206	385 10 <sup>-6</sup>	2,54 10 <sup>-7</sup>	0,7	120 10 <sup>-6</sup>	254 10 <sup>-9</sup>

**Tabelle 8-2: Leitungsparameter für Simulink Modell**

Das Modell ist symmetrisch aufgebaut, somit sind die Leitungen als phasensymmetrisch anzusehen.

## 8.2.2 Betriebszustand Erdschlusslöschspule

Der Arbeitspunkt der Erdschlusslöschspule ist für alle Simulationsfälle mit einer Verstimmung von  $v=-5\%$  überkompensiert eingestellt, dies entspricht der gängigen Verstimmung in den Verteilernetzen der KNG. Die Parametrierung der Erdschlusslöschspule gelingt entweder durch die rechnerische Ermittlung der benötigten Reaktanz der Erdschlusslöschspule, oder durch kontinuierliches Variieren der Reaktanz, bis an der Fehlerstelle der geringste Strom auftritt ( $v=0$ ). Die Abstimmung wurde für jedes Modell und für jeden Fehlerort manuell durchgeführt, was dem Abstimmungsvorgang beim stationären Erdschluss durch den Regler in der Praxis entspricht, wenn die Nichtlinearitäten der Erdschlusslöschspulen vernachlässigbar sind [7].

Für das Musternetz ergibt sich ein Erdschlussstrom von  $I_{CE} = 85\text{ A}$ ; dieser Wert stimmt mit dem berechneten Wert überein.

## 8.3 Simulation der Musternetze

Um eine überschaubare Anzahl von Simulationsergebnissen zu erhalten, ist die Anzahl der zu simulierenden Fehlerorte auf drei markante Fehlerorte beschränkt worden.

- Fehlerort nahe der Sammelschiene
- Fehlerort in der Mitte des Abzweiges
- Fehlerort am Ende der Leitung

Diese drei Varianten des Fehlerortes genügen, um das Verhalten der einzelnen Erdschlussortungsverfahren im Groben qualitativ, jedoch nicht quantitativ, zu analysieren.

Die Anzahl der Fehlerübergangswiderstände  $R_F$  wurde ebenfalls auf drei begrenzt.

- $R_F = 1 \cdot 10^{-6}\ \Omega \approx 0\ \Omega$
- $R_F = 30\ \Omega$
- $R_F = 1000\ \Omega$

Nachfolgende Werte sind für die Simulation relevant (Abbildung 8-4).

$R_P = 2800\ \Omega$                       Last 2 = 1,6 MW

$X_L = 123\ \Omega$                       Last 3 = 1,3 MW

Last 1 = 0,6 MW                      Last 4 = 1,6 MW

Die Werte für die jeweiligen Lasten der einzelnen Abzweige entsprechen den mittleren Lasten des Umspannwerkes 28 der KNG.

### 8.4 Umspannwerk mit Stichleitungen

In Abbildung 8-4 ist das Simulink-Modell für ein Umspannwerk, dessen Abzweige als Stichleitungen betrieben sind, dargestellt. Es besteht aus mehreren Modellblöcken. Man erkennt, das übergeordnete 110-kV-Netz, welches zur Versorgung des Umspannwerkes dient, weiters den Transformator (Schaltgruppe Dy), die Erdschlusslöschspule und die 4 Abgänge. Am Transformator ist an der Sekundärseite der Sternpunkt ausgeführt, an diesem ist die Erdschlusslöschspule mit dem zugehörigen Ersatzwiderstand gegen Erde angeschlossen. Die Sammelschiene besitzt vier Abzweige, am 1. Abzweig ist das Fehlermodul angeschlossen, das den einphasigen Erdschluss verursacht. Fehlermodul und die Erdschlusslöschspule sind intern über Erde miteinander verbunden.

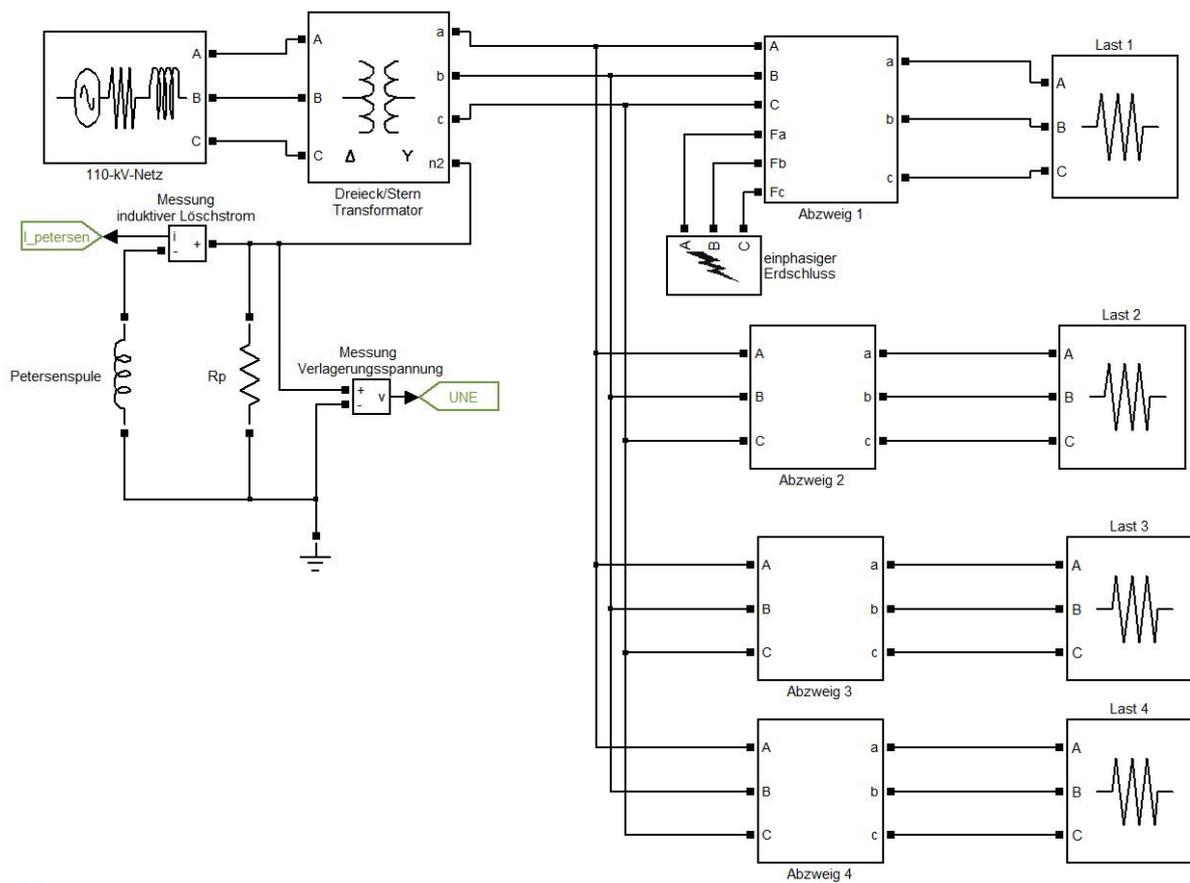


Abbildung 8-4: Musternetz mit Stichbetrieb

In Abbildung 8-5 ist vom 1. Abzweig das detaillierte Simulink Modell ersichtlich. Der Abzweig besteht aus vier  $\pi$ -Gliedern, welche insgesamt die Leitung darstellen. Am Anfang und am Ende des Abzweiges ist jeweils ein Messelement in Serie geschaltet. Diese Module messen die Phasen-Erde-Spannungen und die Ströme aller drei Phasen. In der Mitte des Abzweiges befindet sich der Anschluss für das Fehlermodul. Somit ist es möglich, durch unterschiedliche Längenvorgaben der einzelnen  $\pi$ -Glieder, den Fehlerort am Abzweig zu variieren.

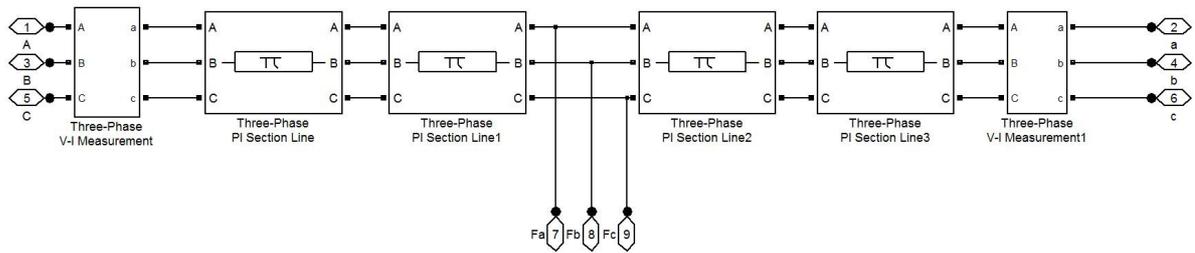


Abbildung 8-5: detailliertes Simulink-Modell des 1 Abzweiges

Die weiteren Abgänge wurden, bis auf den Abzweig für das Fehlermodul, auf die gleiche Art modelliert.

Dieses Simulink-Modell bildet für die nachfolgenden Betrachtungen und Modelle die Basis.

### 8.4.1 Erdschlussortungsverfahren

Die folgenden Erdschlussortungsverfahren wurden mit Hilfe des Modells auf ihre Tauglichkeit bzw. auf ihr Einsatzgebiet überprüft. Anhand der Simulationsergebnisse kann festgestellt werden, dass für einen Stichbetrieb mit allen untersuchten Ortungsverfahren eine eindeutige selektive Erfassung des Abzweiges möglich ist.

#### Wischerverfahren

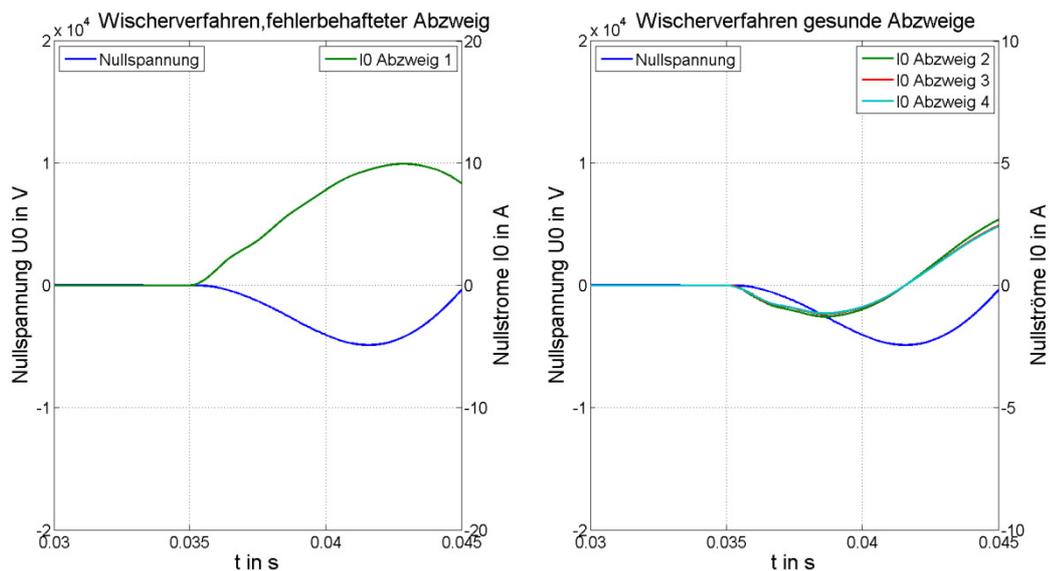
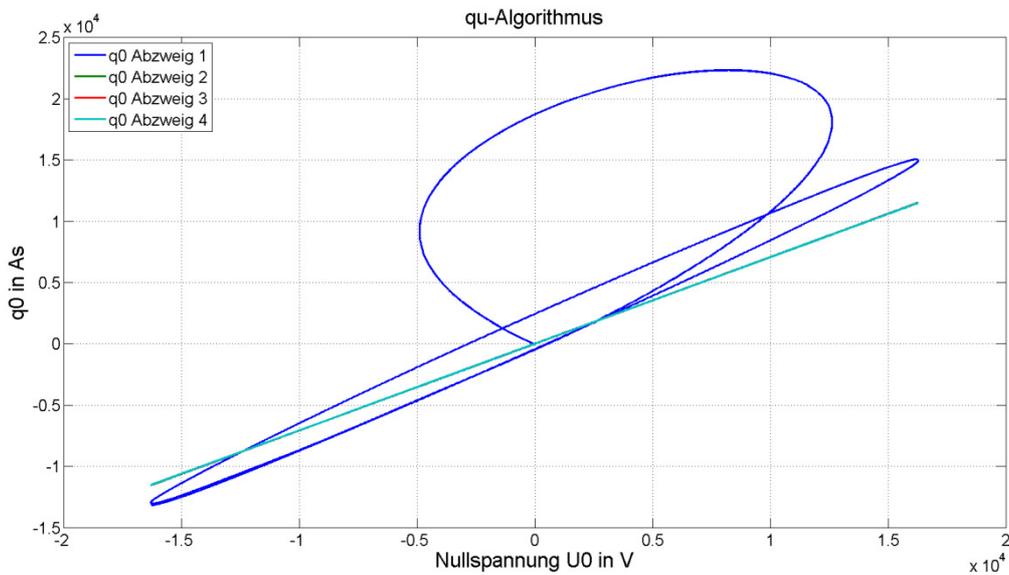


Abbildung 8-6: Standard Wischerverfahren

Es ist eindeutig zu erkennen, dass die erste Halbwelle der Nullströme der gesunden Abzweige die gleiche Polarität wie die erste Halbwelle der Nullspannung besitzt (Abbildung 8-6, links). Hingegen weist die erste Halbwelle des Nullstroms des fehlerbehafteten Abzweiges eine entgegengesetzte Phasenlage gegenüber der Verlagerungsspannung auf (Abbildung 8-6, rechts).

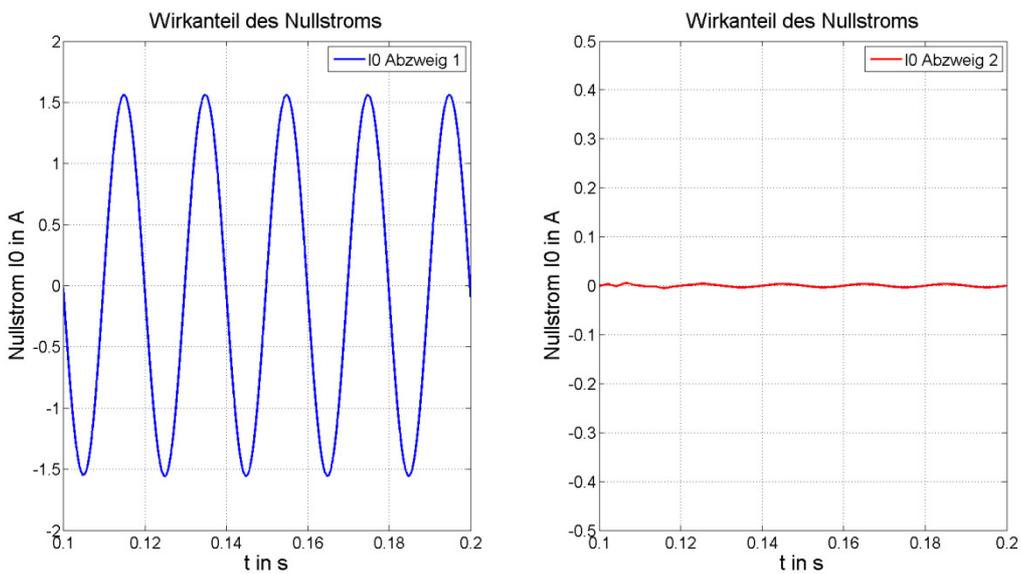
**Wischerverfahren mit qu-Algorithmus**



**Abbildung 8-7: Wischerverfahren mit qu-Algorithmus**

Die gesunden Abzweige unterscheiden sich eindeutig mit ihrem linearen Verlauf vom kranken Abzweig ( $q_0$  des 2. und 3. Abzweiges sind ähnlich dem 4. Abzweig).

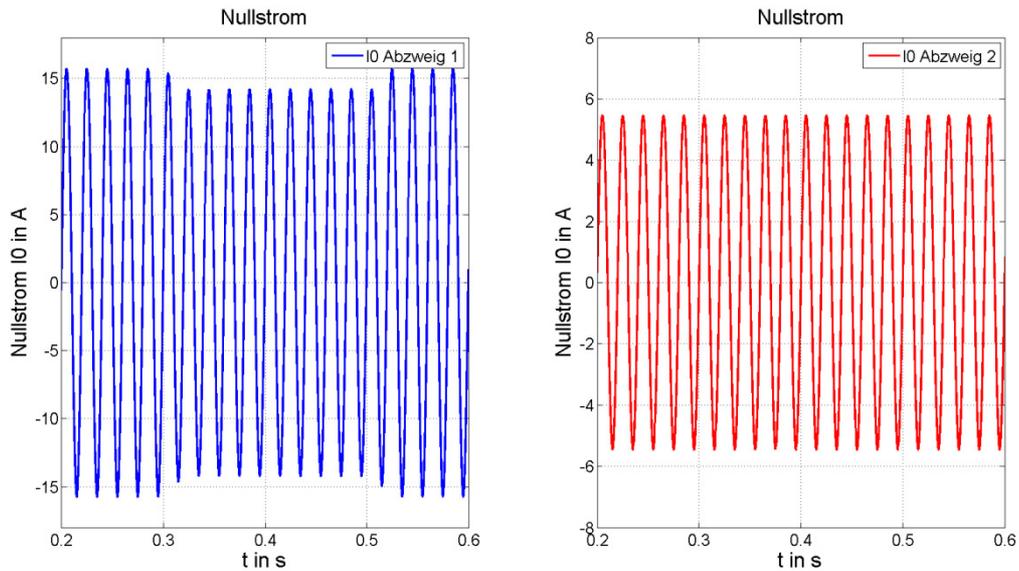
**Wattmetrisches Verfahren**



**Abbildung 8-8: Wattmetrisches Verfahren**

Das Wattmetrische Verfahren zeigt anhand des Wirkanteils der Nullströme eindeutig den fehlerbehafteten Abgang an (Abbildung 8-8).

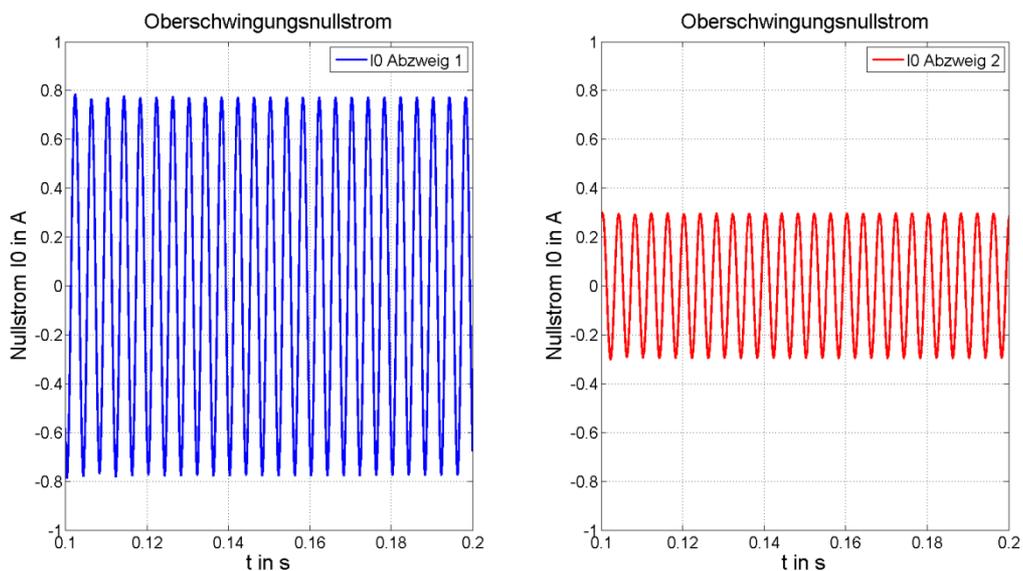
**Pulsortungsverfahren**



**Abbildung 8-9: Pulsortungsverfahren**

Durch das zyklische Zuschalten eines Kondensators zur Erdschlusslöschspule, wird der Verstimmungsgrad geändert. Der fehlerbehaftete Abgang ist jener, dessen Summenstrom die größte Schwankung aufweist (Abbildung 8-9). Der Kondensator zur Änderung der Verstimmung  $v=-5\%$  (überkompensiert) auf  $v=0\%$  (Vollkompensation) ist entsprechend dimensioniert.

**Oberschwingungsverfahren**



**Abbildung 8-10: Oberschwingungsverfahren**

Jener Abzweig mit dem höchsten Oberschwingungsanteil ist der fehlerbehaftete Abzweig, durch die Messung des Oberschwingungsnullstromes kann eindeutig auf diesen Abzweig rückgeschlossen werden (Abbildung 8-10).

## 8.5 Umspannwerk mit Ringleitung

In Abbildung 8-4 ist das Simulink Modell für ein Umspannwerk mit einer Ringleitung dargestellt. Das Modell gleicht dem vorigen, jedoch ist der 1. Abzweig mit dem 2. Abzweig zu einem Ring geschaltet. Mit dem Fehlermodul wird wieder am 1. Abzweig der einphasige Erdschluss verursacht.

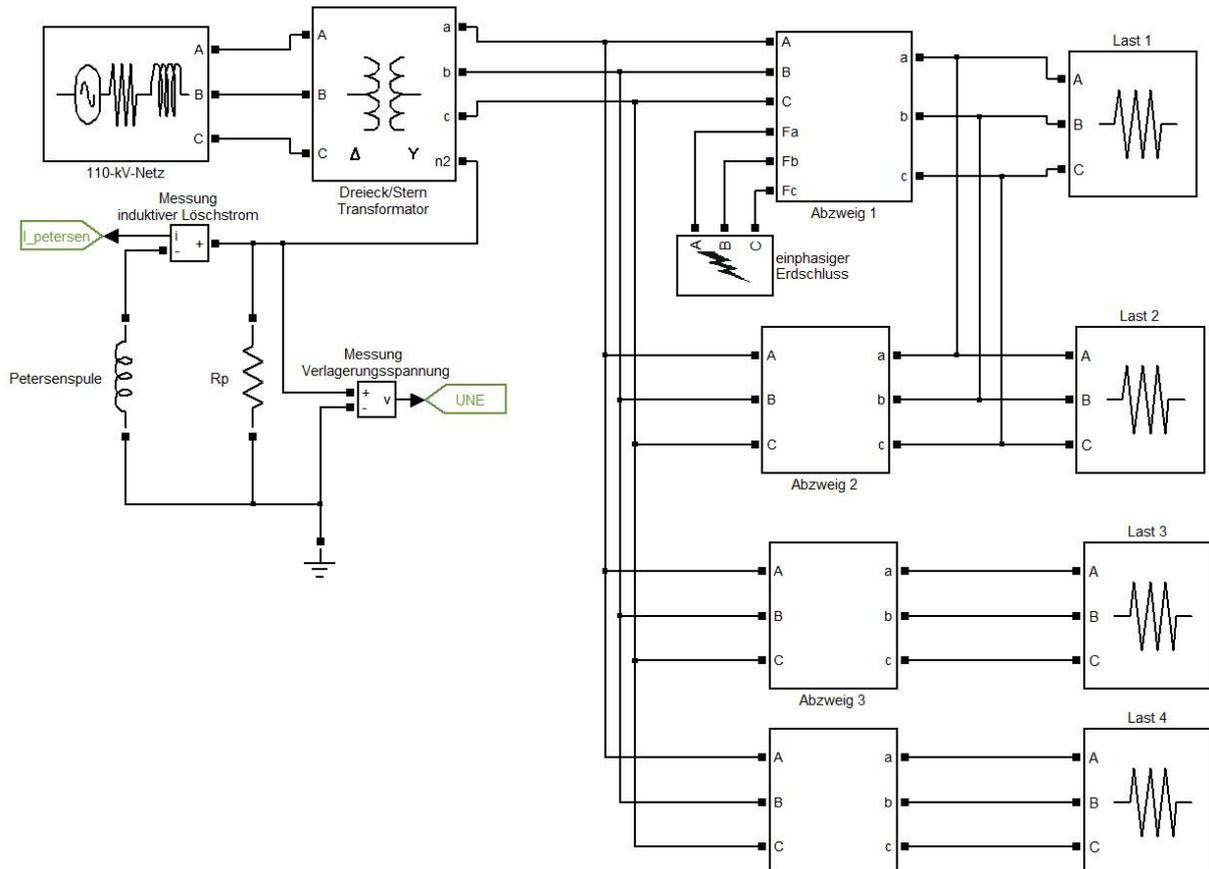


Abbildung 8-11: Musternetz mit Ringleitung

### 8.5.1 Erdschlussortungsverfahren

Die folgenden Erdschlussortungsverfahren wurden mit Hilfe des Modells auf ihre Tauglichkeit, den fehlerhaften 1. Abzweig der Ringleitung selektiv zu erfassen, überprüft. Anhand der nachfolgenden Simulationsergebnisse ist ersichtlich, dass eine exakte selektive Ortung des fehlerhaften Abzweiges in der Ringleitung nicht möglich ist.

#### Wischerverfahren

Es zeigt sich, dass der Fehler an der Ringleitung erkannt wird, jedoch ist es nicht möglich, den betroffenen Abzweig selektiv zu erkennen (Abbildung 8-12).

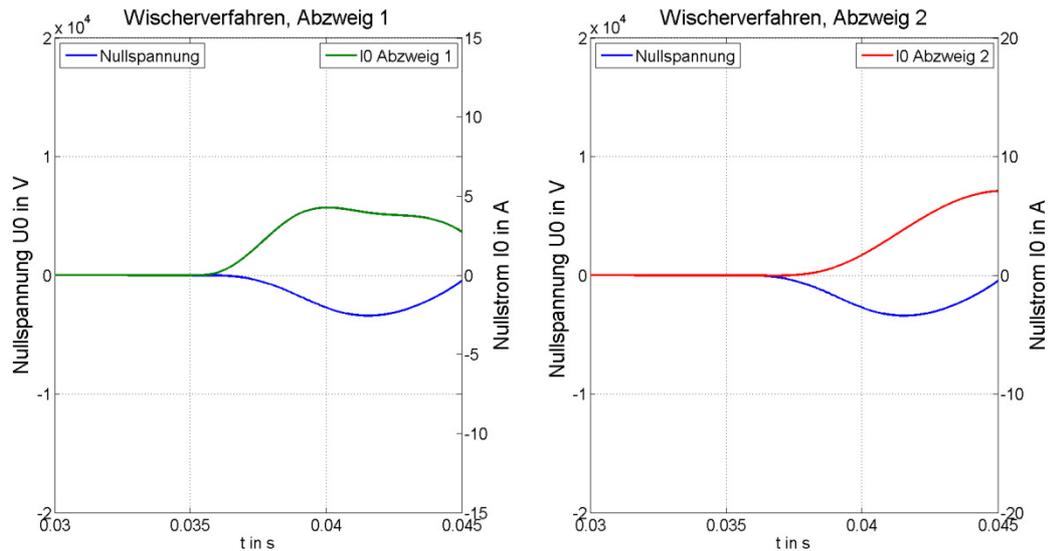


Abbildung 8-12: Wischerverfahren Abzweig 1 und 2

Bei Erdschlüssen nahe der Sammelschiene, sprich am Anfang des Abzweiges, ist eine eindeutige Erfassung des fehlerbehafteten Abzweiges möglich (Abbildung 8-13).

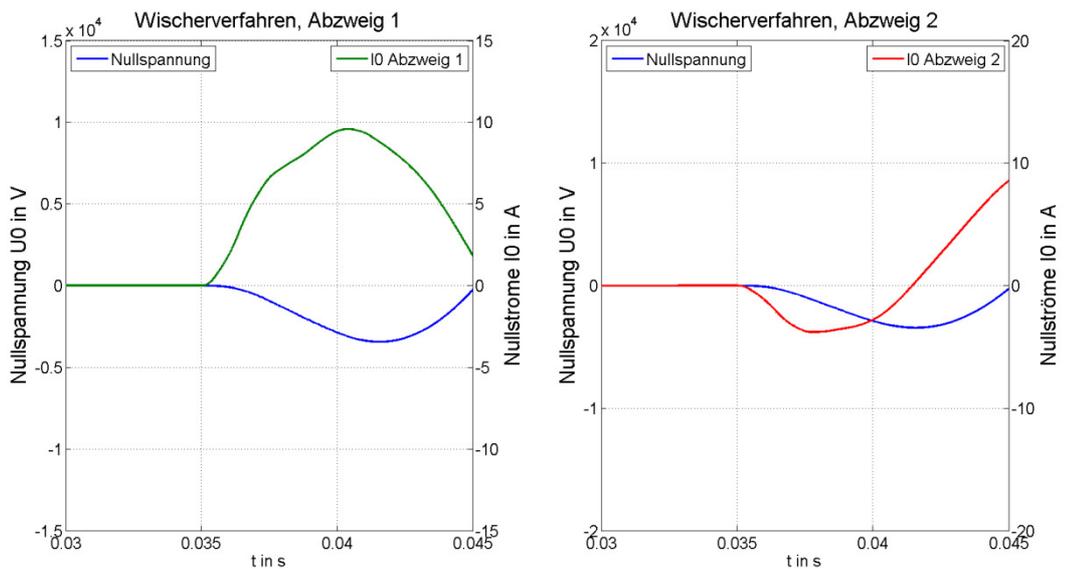
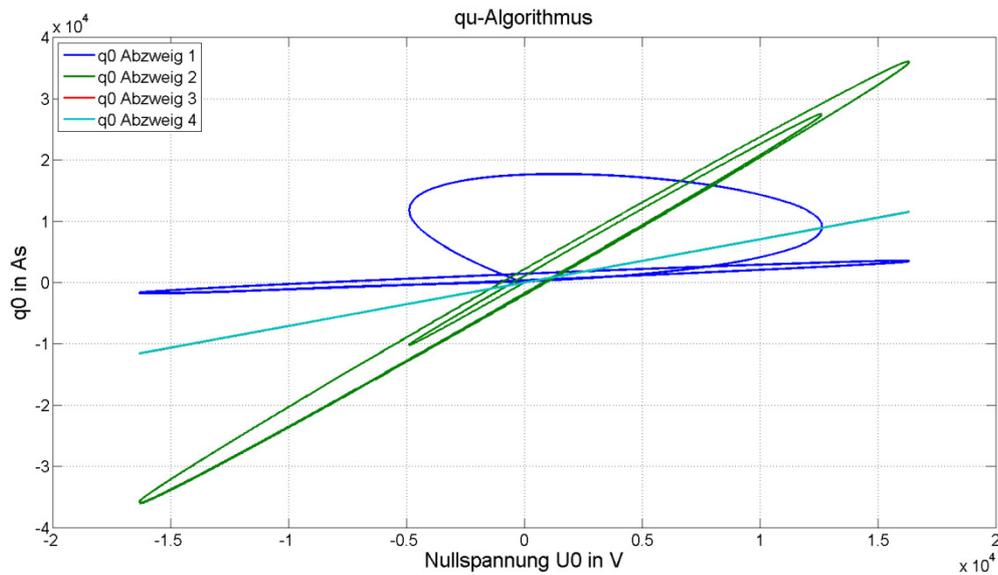


Abbildung 8-13: Wischerverfahren, Fehler am Anfang der Leitung

Der große grundsätzliche Nachteil des Wischerverfahrens ist, dass eine wiederholbare Ordnung nicht möglich ist. Somit kann das Verfahren, bei einer Öffnung des Ringes und dem daraus resultierenden Stichbetrieb, nicht zu einer selektiven Auswahl des betroffenen Abzweiges herangezogen werden.

## Wischerverfahren mit qu-Algorithmus

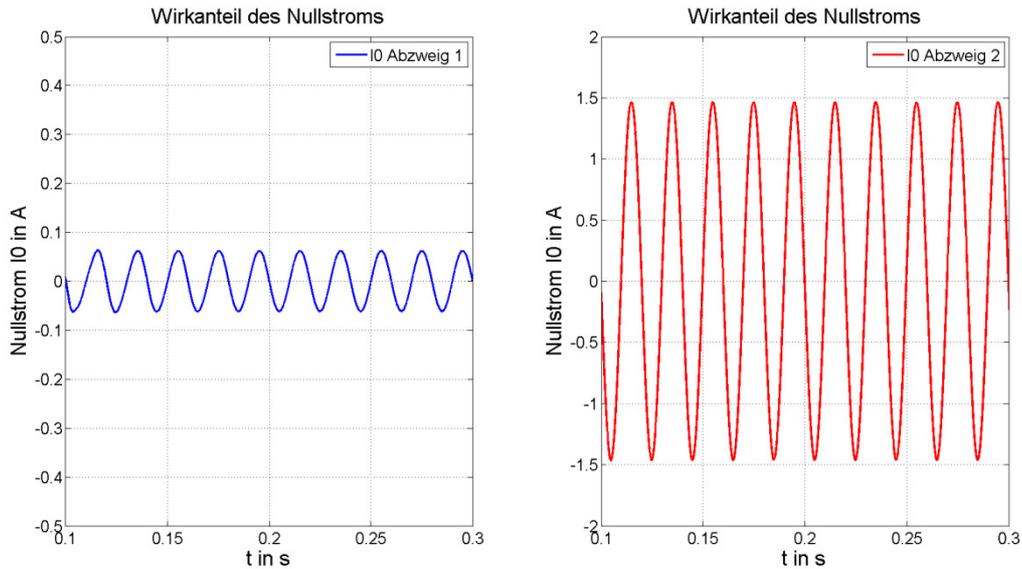


**Abbildung 8-14: Wischerverfahren mit qu-Algorithmus**

Da das qu-Verfahren auf dem Wischerverfahren aufbaut, ist es auch nicht möglich den fehlerbehafteten Abzweig zu erfassen. Lediglich die Ringleitung kann bei einem Fehler erfasst werden (Abbildung 8-14). Eine Öffnung der Ringleitung würde auf Grund der Nicht-Wiederholbarkeit des Verfahrens keine Verbesserung bringen.

## Wattmetrisches Verfahren

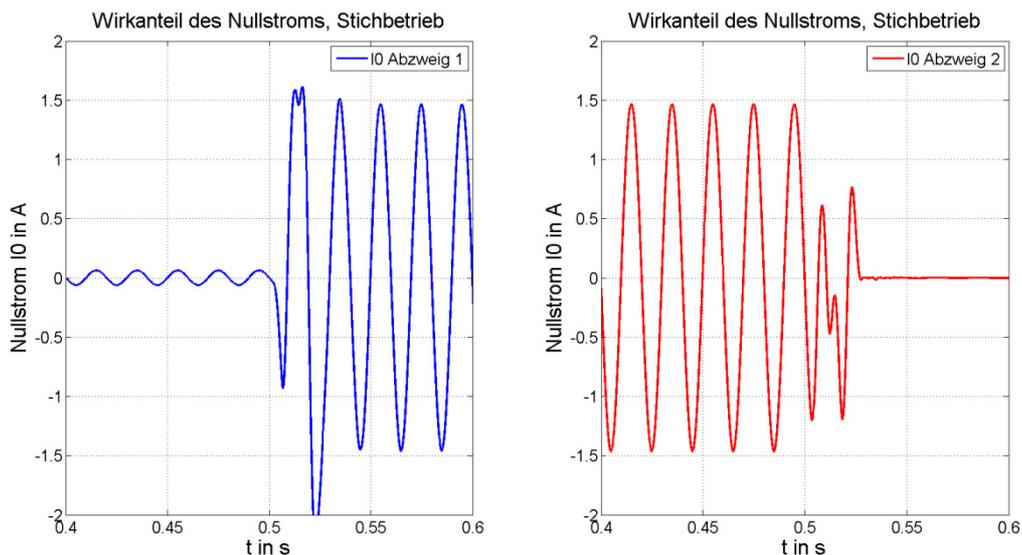
Durch die Ringleitung, kommt es zu einer veränderten Aufteilung der Wirkanteile der Nullströme. Die Aufteilung der Ströme ist abhängig von den Eigenschaften der zusammengeschlossenen Abgänge, speziell im Nullsystem (Impedanzverhältnis). Auf Grund dieser Tatsache ist das Wattmetrische Prinzip zur Erdschlussortung im Ringbetrieb nur bedingt geeignet, es wird wie in Kapitel 7.3.3 beschrieben ein Stichbetrieb vorausgesetzt.



**Abbildung 8-15: Wattmetrisches Verfahren**

Durch die Gegebenheit, dass normalerweise jede Ringleitung geöffnet werden kann und somit zwei Stichleitungen entstehen, ergibt sich jedoch eine Möglichkeit, den fehlerbehafteten Abzweig mittels Wattmetrischem Verfahren festzustellen.

In Abbildung 8-16 sind die Wirkanteile der Nullströme dargestellt. Durch das Öffnen des Ringes zu zwei Stichleitungen ( $t_0=0,500$  s) stellen sich die Ströme neu ein. Ein Erfassen des fehlerhaften Abzweigs ist dadurch möglich. Somit ist wieder eindeutig Abzweig 1 als fehlerhafter Abzweig selektiv erfassbar.

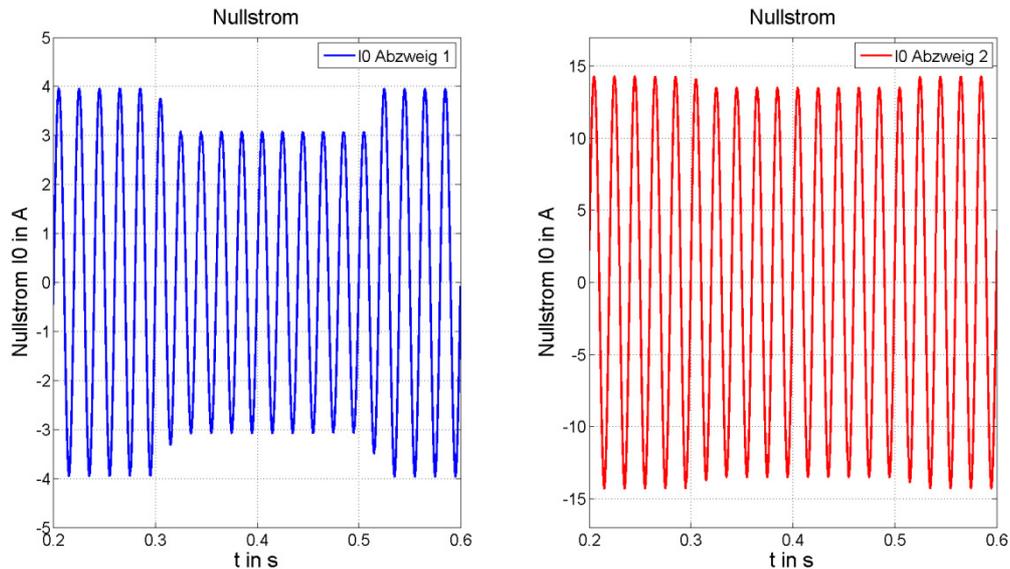


**Abbildung 8-16: Ringleitung zu zwei Stichleitungen geöffnet**

**Pulsortungsverfahren**

Durch die schon erwähnte veränderte Aufteilung der Summenströme auf Grund der Ringleitung ist keine selektive Ortung des fehlerbehafteten Abzweiges möglich. Nur ein

Fehler am Leitungsanfang, ähnlich wie beim bereits erwähnten Wischerverfahren, würde eine selektive Ortung ermöglichen.



**Abbildung 8-17: Pulsortung**

Am Beispiel der Nullströme in Abbildung 8-17 ist ersichtlich, dass eine Bestimmung des erdschlussbehafteten Abzweiges nicht möglich ist, da die Schwankungen des Stroms im fehlerbehafteten Abzweig nicht mehr am stärksten sind, bzw. wie im obigen Fall sogar annähernd gleich groß sind. Erst eine Öffnung des Ringes würde wieder eine genaue Aussage über den erdschlussbehafteten Abzweig ermöglichen.

### **Oberschwingungsverfahren**

Beim Oberschwingungsverfahren ist es nicht möglich innerhalb der Ringleitung, den fehlerbehafteten Abzweig festzustellen. Das Öffnen des Rings zu zwei Stichleitungen würde jedoch eine genaue selektive Erfassung des fehlerbehafteten Abzweiges erlauben.

## 8.6 Umspannwerk mit vermaschten Abzweigen

In Abbildung 8-18 ist das Simulink Modell für ein Umspannwerk mit vermaschten Abzweigen dargestellt. Das Modell gleicht den vorigen, jedoch sind alle Abzweige am Ende zusammengeschaltet, was zum Beispiel einem Schaltwerk mit Parallelanspeisungen entspricht. Mit dem Fehlermodul wird wieder am 1. Abzweig der einphasige Erdschluss verursacht.

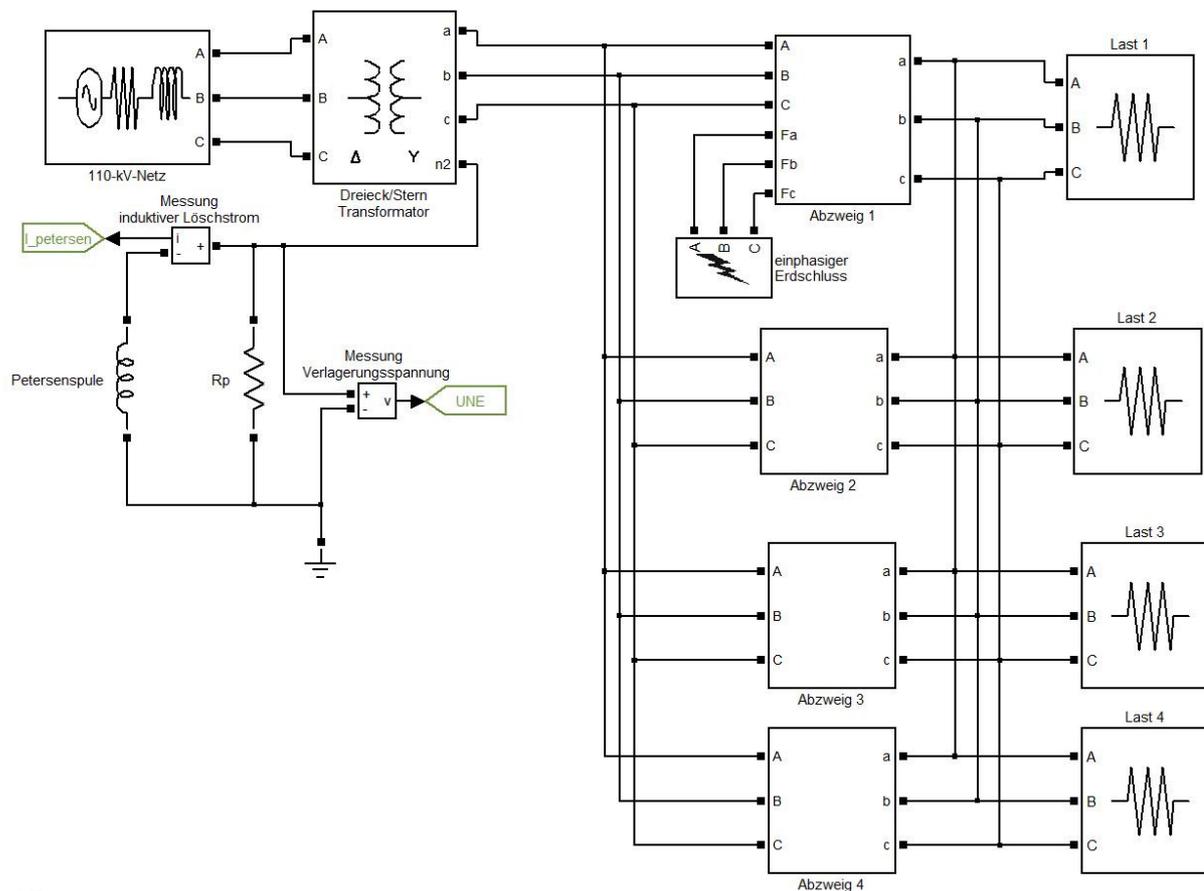


Abbildung 8-18: Musternetz vermascht

### 8.6.1 Erdschlussortungsverfahren

In einem vermaschten Netz treten die gleichen Probleme wie bei einer Ringleitung auf. Es ist nicht mehr möglich mit dem Einsatz der einzelnen Erdschlussortungsverfahren vom Umspannwerk aus den fehlerhaften Abgang selektiv zu bestimmen.

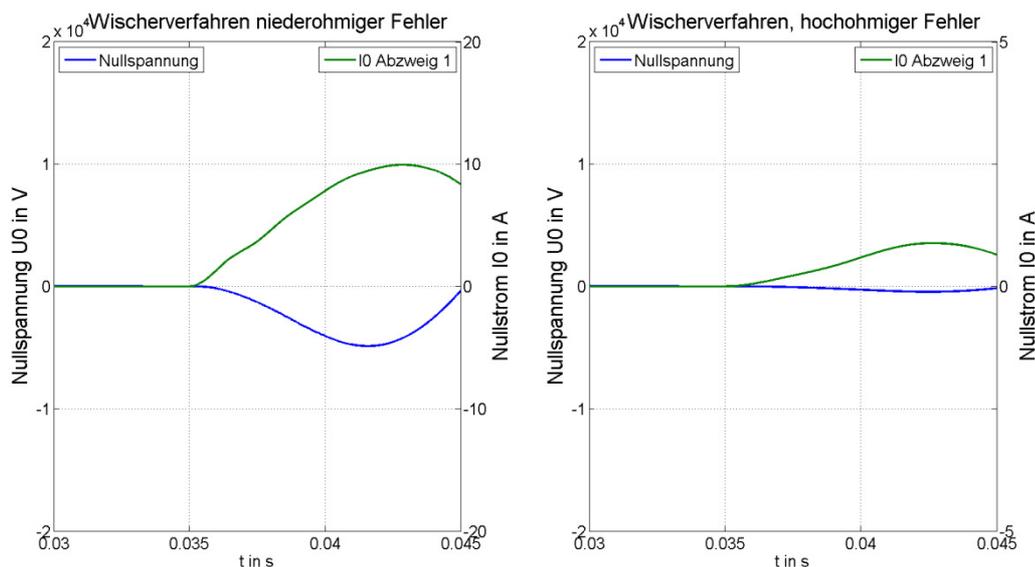
Die einzige Möglichkeit ist, durch Schalthandlungen das vermaschte Netz in ein Netz mit Stichbetrieb überzuführen. Ist dies möglich, kann mit den folgenden Erdschlussortungsverfahren der Abzweig erfasst werden.

- Wattmetrisches Verfahren
- Pulsortungsverfahren
- Oberschwingungsverfahren

Das Standardwischer- und das Wischerverfahren mit qu-Algorithmus scheiden hierfür aus, da diese beiden Verfahren zur Ortung, den transienten Vorgang beim Eintritt des Erdschlusses auswerten und somit bei einem stehenden Erdschluss nicht wiederholbar sind.

## 8.7 Einfluss von Fehlerort und Fehlerübergangswiderstand

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass der Fehlerort des Erdschlusses keinen relevanten Einfluss auf die Ortungsverfahren hat. Es kann jedoch gezeigt werden, dass der Fehlerübergangswiderstand  $R_F$  sehr wohl einen Einfluss auf die Ortungsverfahren besitzt. Mit steigendem Fehlerwiderstand sinkt der Erdschlussstrom, somit sinken die messbaren Summenströme in den Abzweigen bzw. sind diese von den hohen Lastströmen schwer zu unterscheiden. Dies hat zur Folge, dass die eingesetzten Stromwandler der Schutztechnik an ihre messtechnischen Grenzen kommen und somit eine genaue Erfassung nicht mehr garantiert werden kann.



**Abbildung 8-19: Vergleich niederohmiger Fehler zu hochohmigen Fehler**

Abbildung 8-19 stellt einen niederohmigen Fehler ( $R_F = 1 \cdot 10^{-6} \Omega$ ) einem hochohmigen ( $R_F = 1 \text{ k}\Omega$ ) gegenüber. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Nullstrom des hochohmigen Fehlers (Abbildung 8-19, rechts) gegenüber dem des niederohmigen Fehlers (Abbildung 8-19, links) sehr gering ist. Somit ist es verständlich, dass Stromwandler für Schutzzwecke mit einer Gesamtmessabweichung von 5% oder 10% diese geringen Änderungen gegenüber dem Laststrom nicht mehr unterscheiden können; wesentlich ist dabei auch die Wandlerübersetzung [34].

Der Einsatz von Kabelumbauwandlern ist gegenüber der Holmgreen Schaltung, zur Messung des Summenstromes, vorzuziehen, da der Amplitudenfehler geringer ist und speziell Winkelfehler nicht auftreten (Kapitel 7.2.1.2).

Besonders geeignet für hochohmige Fehler sind das Wischerverfahren mit qu-Algorithmus und das Pulsortungsverfahren. Der qu-Algorithmus besitzt jedoch den Nachteil, dass er nicht wiederholbar ist und somit für Suchschaltungen nicht geeignet ist.

Beim Pulsortungsverfahren kommt es bei hochohmigen Erdschlüssen zu einer inversen Änderung des resultierenden Stromes im gesunden Abzweig gegenüber dem fehlerbhafteten Abzweig (Abbildung 8-20).

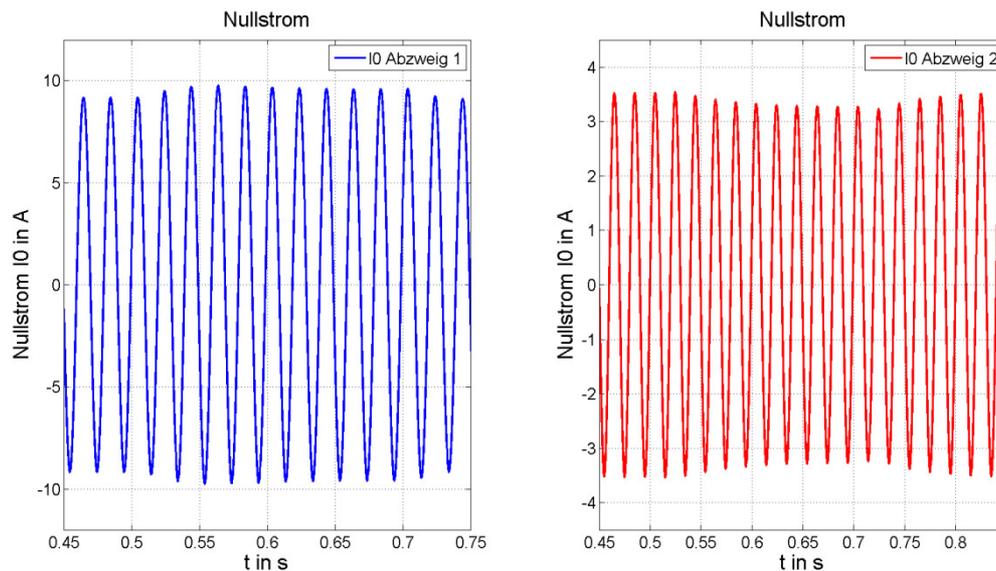


Abbildung 8-20: Pulsortungsverfahren mit hochohmigen Fehler  $R_F = 1\text{k}\Omega$

## 8.8 Bewertung der Erdschlussortungsverfahren

Die Simulation zeigt, dass die Erfassung eines erdschlussbehafteten Abzweiges im Umspannwerk, nicht mit einem einfachen universellen Verfahren zu lösen ist. Durch die große Anzahl von Parametern, welche die Erdschlusskompensation und im speziellen die Erdschlussortung beeinflussen, entsteht eine Komplexität, welche eine allgemeine Lösung des Problems nicht zulässt. Vielmehr bedarf es einer genaueren Betrachtung der einzelnen Komponenten.

Eine Erfassung des fehlerhaften Abzweiges ist von der Topologie des 20-kV-Verteilernetzes abhängig. Sind bei einem Umspannwerk mit Stichbetrieb alle vorgestellten Ortungsverfahren prinzipiell einsetzbar, kommt es bei Ringleitungen und vermaschten 20-kV-Verteilernetzen zur Einschränkung der zu Verfügung stehenden Erdschlussortungsverfahren. Diese Einschränkung erfolgt auf Grund der Tatsache, dass ein Erdschluss an einer Ringleitung oder im vermaschten Netz nicht mehr selektiv erfasst werden kann. Erst durch Schalthandlungen, welche das Verteilernetz in ein Netz mit Stichbetrieb überführen, ist es möglich, den fehlerbehafteten Abzweig selektiv zu erfassen. Da einzelne Ortungsverfahren nicht wiederholbar sind, können diese für solch eine Topologie nicht eingesetzt werden.

### Wiederholbare Verfahren sind

- Wattmetrisches Verfahren
- Pulsortung
- Oberschwingungsverfahren

### Nicht wiederholbar Verfahren sind

- Wischerverfahren
- Wischerverfahren mit qu-Algorithmus

Für einen Stichbetrieb sind alle Ortungsverfahren theoretisch einsetzbar. Jedoch stellen Erdschlüsse mit hohen Fehlerübergangswiderständen ein Problem dar (Kapitel 8.7). Die hierbei auftretenden Summenströme können in der Größenordnung der Wandlerfehler liegen und somit nicht erfasst werden [11].

Die wiederholbaren Verfahren sind eindeutig für vermaschte Verteilernetze einzusetzen. Im Erdschlussfall ist es durch gezielte Schaltvorgänge möglich, ohne Versorgungsunterbrechung, das Netz so aufzutrennen, dass jeder Abzweig nur noch eine Stichleitung darstellt. Durch die Möglichkeit einer wiederholbaren Ortung eines stehenden Erdschlusses, ist nun der Abzweig selektiv erfassbar.

Beim Wattmetrischen-Verfahren ist zu beachten, dass die Amplitude des Wattreststroms vor allem von den Verlusten der Erdschlusslöschspule und nur zu einem Bruchteil von den

Leitungsverlusten abhängt. Die Amplitude kann wieder in der Größenordnung der Wandlerfehler liegen. Abhilfe kann durch eine Wattreststromerhöhung erfolgen, welche unter Einhaltung des Erdschlussreststroms zu dimensionieren ist [11].

Mit dem Pulsortungsverfahren ist zu berücksichtigen, dass die Auslegung der Kapazität genauestens abgestimmt werden muss und bei Änderungen der Erdkapazitäten des Verteilernetzes, zum Beispiel durch einen Netzausbau oder den zyklischen Austausch von Freileitungen durch Kabelstrecken, wiederum neu abgestimmt werden muss, bzw. neu zu dimensionieren ist. Des Weiteren zeigt die Simulation in einem 20-kV-Verteilernetz, dass bei einer Verstimmung von  $v=5\%$  überkompensiert die Stromschwankungen, die durch das Pulsen entstehen, zu gering sind. Für das Pulsortungsverfahren müsste die Verstimmung, unter Berücksichtigung des erlaubten Erdschlussreststroms, größer gewählt werden.

Das Oberschwingungsverfahren setzt einen genügend großen Pegel des Oberschwingungsstroms voraus. Ist dieser im 20-kV-Verteilernetz aufgrund zu geringer nichtlinearer Verbraucher zu klein, kann mit Hilfe einer Rundsteueranlage ein genügend großer Pegel eingespeist werden. Hierbei ist darauf hinzuweisen, dass die Oberschwingungsströme bei der Bewertung des gelöschten Netzes hinsichtlich der erlaubten Berührungsspannungen zu berücksichtigen sind.

Zu erwähnen ist, dass bei der Realisierung einer Wattreststromerhöhung, das Pulsortungsverfahren oder das Oberschwingungsverfahren, außer der Installation der Erdschlussortungsrelais auch zusätzliche bauliche Maßnahmen notwendig sind (Rundsteuerung, Pulsgebereinrichtung, ...). Diese rufen zusätzliche Investitionskosten und bedingt durch die Wartung zusätzliche Wartungskosten hervor.

In Tabelle 8-3 sind die untersuchten Erdschlussortungsverfahren in Bezug auf ihre Einsatzmöglichkeit und den Aufwand gegenübergestellt und zusammengefasst.

<b>Erdschlussortungsverfahren</b>	<b>Stichbetrieb</b>	<b>Ringleitung, Vermaschtes Netz</b>	<b>Hochohmiger Fehlerübergangswiderstand</b>	<b>Aufwand</b>
<b>Wischerverfahren</b>	Möglich	-	-	Erdschlussrelais, Wartung
<b>Wischerverfahren mit qu-Algorithmus</b>	Möglich	-	Möglich	Erdschlussrelais, Wartung
<b>Wattmetrisches Verfahren</b>	Möglich	Möglich	-	Erdschlussrelais, Wartung, bei Bedarf Wattreststromerhöhung
<b>Pulsortungsverfahren</b>	Möglich	Möglich	Möglich	Erdschlussrelais, Wartung, Pulsgebereinrichtung
<b>Oberschwingungsverfahren</b>	Möglich	Möglich	-	Erdschlussrelais, Wartung, bei Bedarf Rundsteuerung

Tabelle 8-3: Gegenüberstellung der verschiedenen Ortungsverfahren

## 9 Ergebnisse

Im Hinblick der anfallenden Kosten durch unvorhersehbare Versorgungsunterbrechungen, durch entgangenes Netznutzungsentgelt oder Produktionsausfällen von Industrie- und Gewerbekunden und den damit verbundenen Imageschäden für den Netzbetreiber, bietet ein erdschlusskompensiertes 20-KV-Verteilernetz eine gute Versorgungsqualität. Die Wahl der KNG das 20-kV-Verteilernetz in Kärnten gelöscht zu betreiben ist in Bezug auf die Störungsstatistik die richtige Entscheidung.

Jedoch ergibt sich durch den stetigen Zubau von Erdkabel ein Problem hinsichtlich der Löschgrenze von 60 A, welche nicht überschritten werden darf. Erdkabel besitzen, bedingt durch ihre Bauart, einen um den Faktor 50-70 höheren Erdschlussstrom (A/km) gegenüber Freileitungen. Die Löschréservedifferenz ist die Differenz zwischen derzeitigem auftretenden Erdschlussstrom und dem maximalen, durch den Netzausbau wachsenden zulässigen Erdschlussstrom. Durch vermehrten Einsatz von Kabeln kann diese Löschréservedifferenz rasch aufgezehrt werden. Eine Erfassung der derzeitigen Löschréservedifferenzen ist notwendig, um einen zukünftigen Netzausbau strategisch richtig zu planen bzw. die notwendigen Anschaffungen von Erdschlusslöschspulen mit höheren Löschkapazitäten früh genug zu erkennen. Die Untersuchung der Umspannwerke der KNG zeigt, dass die Löschréservedifferenzen für zukünftige Netzausbauszenarien eine ausreichende Ausbaureserve besitzen.

Die Erdschlusserfassung bzw. -ortung der KNG erfolgt derzeit anhand der Sternpunktverlagerungsspannung. Aus diesem Grund wurden gängige Erdschlussortungsmethoden auf ihr praktisches Einsatzgebiet zur selektiven Ortung des fehlerbehafteten Abzweiges untersucht.

Mit Hilfe eines umfangreichen Simulationsmodells wurden die Methoden für unterschiedliche Netztopologien untersucht und bewertet. Das Ergebnis zeigt, dass keine der heute verfügbaren Erdschlussortungsmethoden alle möglichen Betriebsfälle abdecken kann. Vielmehr zeigt sich, dass auf Grund der Einzigartigkeit jedes Netzes, eine netzspezifische Auswahl einer Ortungsmethode erfolgen muss. Nur durch eine sorgfältige Berechnung und genaue Untersuchung jedes einzelnen Verteilernetzes ist es möglich, eine funktionstüchtige Erdschlusserfassung zu gewähren. Eine Auswahl einer Erdschlussortungsmethode ohne einem vorhergehenden gründlichem Erdschlussengineering ist nicht zu empfehlen.

## 10 Diskussion und Ausblick

Die Untersuchungen der vorhandenen Ausbaureserven der einzelnen Umspannwerke erfolgten auf Basis des Grundwellenstroms, Oberschwingungen wurden nicht berücksichtigt. Wenn die theoretische Löschgrenze ( $I_G = 60 \text{ A}$ ) als Effektivwert nicht überschritten werden soll, müssen die Oberschwingungsströme ebenso berücksichtigt werden. Dies würde eine umfassende Messung in den Umspannwerken erfordern, jedoch auch eine genauere Aussage über die Ausbaureserven zulassen. Erfahrungswerte zeigen jedoch, dass die im 20-kV-Verteilernetz der KNG vorhandenen Oberschwingungen sehr gering sind und somit die Beeinflussung von den Oberschwingungen auf die Ausbaureserve vernachlässigt werden kann.

Für die Ausbaureserve ist das Szenario des konsequenten Austauschs von Freileitungen durch Kabel noch zu untersuchen. Diese Untersuchung ergibt für einen zukünftigen Kabeleinsatz, den theoretisch maximal zulässigen Kabelanteil, unter Einhaltung der Löschgrenze, je Umspannwerk.

Der Einsatz von Erdschlussortungssystemen zur selektiven Erfassung des fehlerbehafteten Abzweiges, würde auch eine Tiefenortung, d.h. Feststellung der Entfernung des Fehlerortes von der Erdschlusserfassungseinrichtung, erlauben. Dies ist jedoch nicht Teil dieser Arbeit, könnte aber mit dem entwickelten Simulationsmodell genauer untersucht werden.

Mit den Erdschlussortungssystemen zur selektiven Erfassung stellt sich eine weitere Frage betreffend der einzusetzenden Stromwandler. Hier bedarf es einer genaueren Untersuchung der einzusetzenden Stromwandlerarten (Holmgreen, Kabelumbauwandler), deren Übersetzungsverhältnissen bzw. deren Übertragungsfunktionen, um im Falle eines stromschwachen Erdschlusses diesen auch wirklich zu erfassen.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1: Beispiel für das Mit-(a), Gegen-(b) und Nullsystem (c) der Ströme [4].....	11
Abbildung 3-2: Ohmsche Komponenten im Nullsystem einer Freileitung mit Neutralleiter[7]	13
Abbildung 3-3: Teilkapazitäten einer Drehstromleitung ohne Erdseil[2].....	15
Abbildung 4-1: Isoliertes Netz – Prinzipersatzschaltbild (einfaches Strahlennetz) .....	18
Abbildung 4-2: Gelöschtes Netz - Prinzipersatzschaltbild (einfaches Strahlennetz) .....	19
Abbildung 4-3: Niederohmig geerdetes Netz - Prinzipersatzschaltbild (einfaches Strahlennetz) .....	21
Abbildung 4-4: Prinzipersatzschaltbild – gelöschtes Netz (einfaches Strahlennetz) .....	24
Abbildung 4-5: Höchst zulässige Berührungsspannung $U_{TP}$ in Abhängigkeit der Stromflussdauer[22].....	29
Abbildung 4-6: Verlagerungsspannung $U_{NE}$ und Erdschlussreststrom $I_{Rest}$ mit zulässigem Betriebsbereich (überkompensiert)[13] .....	29
Abbildung 4-7: Theoretische maximale Netz-Freileitungslänge in Abhängigkeit von $v$ und $d$ , unter Vernachlässigung von Oberschwingungen und Unsymmetrien.....	33
Abbildung 4-8: Theoretische maximale Netz-Kabellänge in Abhängigkeit von $v$ und $d$ , unter Vernachlässigung von Oberschwingungen und Unsymmetrien.....	34
Abbildung 4-9: Ersatzschaltbild für symmetrische Komponenten [7] .....	36
Abbildung 5-1: Löschreserve in Abhängigkeit von der Ausbaulänge, UW8, SS1.....	40
Abbildung 5-2:Löschreserve in Abhängigkeit von der Ausbaulänge, UW 14, SS2.....	41
Abbildung 6-1 Fehlerarten, betroffene Leitungsart und Fehlerort, pro Jahr .....	42
Abbildung 7-1: Dreiphasen-Erdungsspannungswandler mit Hilfswicklung in offener Dreiecksschaltung [6].....	46
Abbildung 7-2: Holmgreen Schaltung [12].....	48
Abbildung 7-3: Kabelumbauwandler,[27].....	48
Abbildung 7-4: Einpoliger Erdschluss, mit Verlagerungsspannung $U_{NE}$ .....	50
Abbildung 7-5: Ideal abgestimmte Erdschlusskompensation [30].....	52
Abbildung 7-6: Gesunde Abgänge[30] .....	52
Abbildung 7-7: Erdschlussbehafteter Abgang[30] .....	52
Abbildung 7-8: qu-Diagramm bei niederohmigen Fehlern[28] .....	55
Abbildung 7-9: qu-Diagramm hochohmiger Fehler (2000 $\Omega$ )[28].....	55
Abbildung 7-10: Prinzip Wattreststromerhöhung[30] .....	57
Abbildung 7-11: Prinzip der Pulsortung [30] .....	59
Abbildung 7-12: Oberschwingungsströme in den einzelnen Phasen bei einpoligem Erdschluss[30] .....	60
Abbildung 7-13: Resonanzfrequenz 250 Hz [30].....	61
Abbildung 8-1: Grundmodell für Simulation bzw. Stichbetrieb.....	63

Abbildung 8-2: Parallelbetrieb .....	64
Abbildung 8-3: Vermaschtes Netz.....	64
Abbildung 8-4: Musternetz mit Stichbetrieb.....	67
Abbildung 8-5: detailliertes Simulink-Modell des 1. Abzweiges .....	68
Abbildung 8-6: Standard Wischerverfahren.....	68
Abbildung 8-7: Wischerverfahren mit qu-Algorithmus.....	69
Abbildung 8-8: Wattmetrisches Verfahren.....	69
Abbildung 8-9: Pulsortungsverfahren .....	70
Abbildung 8-10: Oberschwingungsverfahren .....	70
Abbildung 8-11: Musternetz mit Ringleitung .....	71
Abbildung 8-12: Wischerverfahren Abzweige 1 und 2.....	72
Abbildung 8-13: Wischerverfahren, Fehler am Anfang der Leitung .....	72
Abbildung 8-14: Wischerverfahren mit qu-Algorithmus.....	73
Abbildung 8-15: Wattmetrisches Verfahren.....	74
Abbildung 8-16: Ringleitung zu zwei Stichleitungen geöffnet .....	74
Abbildung 8-17: Pulsortung.....	75
Abbildung 8-18: Musternetz vermascht.....	76
Abbildung 8-19: Vergleich niederohmiger Fehler zu hochohmigen Fehler.....	77
Abbildung 8-20: Pulsortungsverfahren mit hochohmigen Fehler $R_F = 1\text{k}\Omega$ .....	78

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Kennwerte für Freileitung und Kabel .....	17
Tabelle 4-1: Löschgrenzen von Starkstromnetzen gemäß ÖVE-B 1/1976, Tab 22-2 [21].....	28
Tabelle 5-1: Übersicht der ausgewählten 110/20-kV-Transformatoren in den untersuchten Umspannwerken.....	37
Tabelle 5-2: Übersicht der Erdschlusslöscheinrichtungen in den ausgewählten Umspannwerken.....	38
Tabelle 5-3: Löschréserven in den ausgewählten Umspannwerken, Stand August 2009.....	38
Tabelle 5-4: Beschaffenheit der 20-kV-Abzweige der Löschrésbezirke, Stand August 2009.....	39
Tabelle 7-1: Primär und Sekundärspannungen am Spannungswandlersatz bei Erdschluss nach Abbildung 7-1 [6].....	47
Tabelle 8-1: Betriebsparameter des Herstellers .....	64
Tabelle 8-2: Leitungsparameter für Simulink Modell .....	65
Tabelle 8-3: Gegenüberstellung der verschiedenen Ortungsverfahren .....	81

## Literaturverzeichnis

- [1] V. Crastan: "Elektrische Energieversorgung 1", Springer, Deutschland, 2007, 978-3-540-69439-7
- [2] A. Hochrainer: "Symmetrische Komponenten in Drehstromsystemen", Springer-Verlag, Berlin-Göttingen-Heidelberg, 1957
- [3] C. L. Fortescue: "Method of Symmetrical Co-Ordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks", AIEE Transactions, 37, part II, 1918, Seite 1027-1140
- [4] D. Oeding, B. R. Oswald: "Elektrische Kraftwerke und Netze", Springer, Deutschland, 2004, 3-540-00863-2
- [5] F. Bressan: "Untersuchung der Einflussfaktoren bei der Erdschlussortung in gelöschten Netzen", Diplomarbeit am Institut für elektrische Anlagen der Technischen Universität Graz, Graz, 2007
- [6] R. Flosdorff, G. Hilgarth: "Elektrische Energieverteilung", B.G. Teubner, Deutschland, 1979, 3-519-56411-0
- [7] K. Heuck, K. D. Dettmann, D. Schulz: "Elektrische Energieversorgung", vieweg, Deutschland, 2007, 978-3-8348-0217-0
- [8] ABB: "Schaltanlagen", Cornelsen Verlag
- [9] G. Achleitner, C. Obkircher, L. Fickert OVE, M. Sakulin OVE, J. Frei OVE: "Impedanzmessungen an Leitungen", Elektrotechnik & Informationstechnik, 3, 2007, Seite 63-67, 0932-383X
- [10] U. Klapper, A. Apostolov, D. Tholomier, S. Richards: "Korrektur des k-Faktors und mutueeller Kopplung bei asymmetrischen Freileitungen zur Optimierung der Distanzschutz-Zuverlässigkeit", Elektrotechnik & Informationstechnik, 12, 2008, Seite 448-451, 0932-383X
- [11] W. Schossig: "Netzschutztechnik", VDE Verlag, Berlin, 1999, 3-8007-2232-1, <http://www.vde-verlag.de>
- [12]"110-kV-Kabel / -Freileitung - Eine technische Gegenüberstellung, Studie im Auftrag der Oberösterreichischen Landesregierung", Verlag der Technischen Universität Graz, Graz, 2005
- [13] B. R. Oswald: "Elektrische Energieversorgung", Vorlesungsunterlagen zur gleichnamigen Vorlesung am Institut für Energieversorgung und Hochspannungstechnik der Universität Hannover, Deutschland, 2005, [www.iee.uni-hannover.de](http://www.iee.uni-hannover.de)
- [14] C. Obkircher: "Ausbaugrenzen gelöscht betriebener Netze", Dissertation an der Technischen Universität Graz, Graz, 2008, [www.ifea.tugraz.at](http://www.ifea.tugraz.at)
- [15] C. Obkircher: "Probleme beim Einbau von Kabelsystemen in kompensierten Übertragungsnetzen", Diplomarbeit an der Technischen Universität Graz, Graz, 2004, [www.ifea.tugraz.at](http://www.ifea.tugraz.at)

- [16] C. Zachmeier, T. Bruch: "Erdschlusslöschung praxisnah: Vorgehensweise am Beispiel eines Verteilnetzbetreibers", STE 2009/116, Vorträge der ETG Fachtagung, 2009, Seite 89-95, 978-3-8007-3143-5
- [17] N. Geßner: "Sternpunktbehandlung in den Mittelspannungs-Netzen der RWE-Rhein-Ruhr", STE 2009/116, Vorträge der ETG Fachtagung, 2009, Seite 61-66, 978-3-8007-3143-5
- [18] R. Nagy, A. Osterholt: "Erfahrungsbericht eines städtischen Netzbetreibers: Umstellung der Sternpunktterdung von erdschlusskompensiert auf niederohmig", STE 2009/116, Vorträge der ETG Fachtagung, 2009, Seite 83-86, 978-3-8007-3143-5
- [19] C. Obkircher, G. Achleitner, L. Fikert, M. Sakulin: "Ausbaugrenzen der Verkabelungen und zukünftige Möglichkeiten zum weiteren Ausbau gelöschter Netze", Elektrotechnik & Informationstechnik, 124/3, 2007, Seite 51-57
- [20] H. Renner, K. Friedl, A. Gaun, M. Weixelbraun: "Elektrische Energiesysteme Labor", Laborunterlagen zum gleichnamigen Labor am Institut für elektrische Anlagen der Universität Graz, Graz, 2009, [www.ifea.tugraz.at](http://www.ifea.tugraz.at)
- [21] ÖVE-B 1/1976: "Beeinflussung von Fernmeldeanlagen durch Wechselstromanlagen mit Nennspannung über 1kV", ÖVE, Österreich, 1976
- [22] ÖVE/ÖNORM E 8383: "Starkstromanlagen mit Nennwechselspannung über 1kV", ÖVE, Österreich, 2000
- [23] VEÖ: "VEÖ-Störungs- und Verfügbarkeitsstatistik, Anleitung", VEÖ, 2005
- [24] M. Schmidt: "Minimierung der Kundenausfallkosten unter Berücksichtigung der automatischen Wiedereinschaltung", Diplomarbeit an der Technischen Universität Graz, Graz, 2003, [www.ifea.tugraz.at](http://www.ifea.tugraz.at)
- [25] J. Steinbauer: "Erfassung und Beurteilung von Störungen in elektrischen Netzen", Diplomarbeit an der Technischen Universität Graz, Graz, 2001, [www.ifea.tugraz.at](http://www.ifea.tugraz.at)
- [26] H. Karger, G. Druml, W. Haussel, T. Sybel: "messen+regeln in Starkstromnetzen", a-eberle, Deutschland, 2003, [www.a-eberle.de](http://www.a-eberle.de)
- [27] VEÖ, FNN: "Leitfaden für Schutzsysteme in elektrischen Netzen", Verband der Elektrizitätsunternehmen Österreichs, Österreich, 2009
- [28] G. Druml, A. Kugi, O. Seifert: "A New Directional Relay For High Ohmic Earth Faults", CIRED, 17th Conference on Electricity Distribution, Session 3, 2003
- [29] H. Melzer: "Auswirkungen der Sternpunktbehandlung in Verteilnetzen", Schutz und Leittechnik 2008, Vorträge der ETG Fachtagung, 2008, , 978-3-8007-3129-9
- [30] G. Druml: "Neue Methoden zur Erdschlusseingrenzung", STE 2009/116, Vorträge der ETG Fachtagung, 2009, Seite 39-47, 978-3-8007-3143-5
- [31] J. Wagner, U. Mögel, L. Mayer: "Betriebserfahrung mit der Pulsortungsmethode", Elektrizitätswirtschaft Jg. 98, Heft 6, 1999, Seite 42-46

[32] A. Eberle GmbH & Co. KG: "Bedienungsanleitung: Erdschlussortungsrelais EOR-D", A. Eberle GmbH & Co. KG, Deutschland, 2008, [www.a-eberle.de](http://www.a-eberle.de)

[33] A. Eberle GmbH & Co. KG: "Technische Daten: Erdschlussortungsrelais EOR-D", A. Eberle GmbH & Co. KG, Deutschland, [www.a-eberle.de](http://www.a-eberle.de)

[34] ÖVE/ÖNORM EN60044-1: "Messwandler Teil 1: Stromwandler", ÖVE, Österreich, 2002

## Anhang A

Station	Sammelschiene	Spulennennstrom $I_{\text{Spule}}$ in A	Kompensationsstrom $I_L$ in A	Erdschlussstrom $I_{\text{CE}}$ in A	Verstimmung $v$ in %	Löschreserve in A	Notiz
UW 01	SS1(A, B)	520	211	212,62	-0,76%	367,38	
	SS2(A, B)	338	195	199,33	-2,17%	198,67	
UW 02	SS1(A, B)	206	72	109,92	-34,50%	156,08	
	SS2(A, B)						
UW 03	SS1(A, B)			12,99		47,01	isoliertes Netz
	SS2(A, B)	246	197	192,6	2,28%	113,4	
UW 04	SS1(A, B)	512	179	152,04	17,73%	419,96	
	SS2(A, B)						
UW 05	SS1(A, B)	206	157	155,97	0,66%	110,03	
	SS2(A, B)	520	212	206,55	2,64%	373,45	
UW 06	SS1(A, B)			4,38			isoliertes Netz
	SS2(A, B)	206	51	49,4	3,24%	216,6	
UW 07	SS1(A, B)	206	95	288,9	2,11%	377,1	
	SS2(A, B)			6,24			isoliertes Netz
SW BHG	SS1(A, B)	400	200				
	SS2(A, B)						
UW 08	SS1(A, B)	27	27	33,54	-19,50%	53,46	
	SS2(A, B)	306	189	188,35	0,35%	177,65	
UW 09	SS1(A, B)	206	29	28,06	3,35%	237,94	
	SS2(A, B)	520	208	207,53	0,23%	372,47	
UW 10	SS1(A, B)	206	89	92,23	-3,50%	173,77	
	SS2(A, B)						
UW 11	SS1(A, B)	206	42	69,39	-39,47%	196,61	
	SS2(A, B)						
UW 12	SS1(A, B)	206	73	80,78	-9,63%	185,22	
	SS2(A, B)						

Tabelle A-1, Stand August 2009

Station	Sammelschiene	Spulennennstrom $I_{\text{Spule}}$ in A	Kompensationsstrom $I_L$ in A	Erdschlussstrom $I_{\text{CE}}$ in A	Verstimmung $v$ in %	Löschreserve in A	Notiz
UW 13	SS1(A, B)						
	SS2(A, B)	206	64	93,9	-31,84%	172,1	
UW 14	SS1(A, B)	206	155	146,28	5,96%	119,72	
	SS2(A, B)	206	93	185,76	3,90%	280,24	
SW PÖR	SS1(A, B)						
	SS2(A, B)	200	100				
UW 15	SS1(A, B)	206	62	131,56	0,33%	234,44	
	SS2(A, B)						
SW OBV	SS1(A, B)	100	70				
	SS2(A, B)						
UW 16	SS1(A, B)	206	42	43,96	-4,46%	222,04	
	SS2(A, B)						
UW 17	SS1(A, B)	206	132	96,47	36,83%	169,53	
	SS2(A, B)						
UW 18	SS1(A, B)						
	SS2(A, B)						
UW 19	SS1(A, B)						
	SS2(A, B)						
UW 20	SS1(A, B)	206	168	149,87	12,10%	116,13	
	SS2(A, B)	206	185	165,88	11,53%	100,12	
UW 21	SS1(A, B)						
	SS2(A, B)						
UW 22	SS1(A, B)						
	SS2(A, B)						
UW 23	SS1(A, B)	206	108	106,78	1,14%	159,22	
	SS2(A, B)						

Tabelle A-2, Stand August 2009

Station	Sammelschiene	Spulennennstrom $I_{\text{Spule}}$ in A	Kompensationsstrom $I_L$ in A	Erdschlussstrom $I_{\text{CE}}$ in A	Verstimmung $v$ in %	Löschreserve in A	Notiz
UW 24	SS1(A, B)	206	63	71,44	-11,81%	194,56	
	SS2(A, B)			140,62	-8,97%	69,38	
SW HAN	SS1(A, B)						
	SS2(A, B)	150	128				
UW 25	SS1(A, B)	206	74	62,96	17,53%	203,04	
	SS2(A, B)						
UW 26	SS1(A, B)						
	SS2(A, B)						
UW 27	SS1(A, B)	206	162	140,74	15,11%	125,26	
	SS2(A, B)						
UW 28	SS1(A, B)	206	117	111,67	4,77%	154,33	
	SS2(A, B)	206	78	93,8	-16,84%	172,2	
UW 29	SS1(A, B)	206	123	123,25	-0,20%	142,75	
	SS2(A, B)						
UW 30	SS1(A, B)	512	254	231,51	9,71%	340,49	
	SS2(A, B)						
UW 31	SS1(A, B)	206	75	63,96	17,26%	202,04	
	SS2(A, B)	206	134	223,95	1,81%	192,05	
KW WI	SS1(A, B)						
	SS2(A, B)	150	94				
UW 32	SS1(A, B)	206	56	56,59	-1,04%	209,41	
	SS2(A, B)						
UW 33	SS1(A, B)	206	144	141,43	1,82%	124,57	
	SS2(A, B)	206	125	129,33	-3,35%	136,67	
UW 34	SS1(A, B)	206	150	152,19	-1,44%	113,81	
	SS2(A, B)						

Tabelle A-3, Stand August 2009

Station	Sammelschiene	Spulennennstrom $I_{\text{Spule}}$ in A	Kompensationsstrom $I_L$ in A	Erdschlussstrom $I_{\text{CE}}$ in A	Verstimmung $v$ in %	Löschreserve in A	Notiz
UW 35	SS1(A, B)	206	139	271,59	2,36%		
	SS2(A, B)						
KW FL1	SS1(A, B)	139	139				
	SS2(A, B)						
UW 36	SS1(A, B)	206	129	127,26	1,37%	138,74	
	SS2(A, B)						
UW 37	SS1(A, B)						
	SS2(A, B)						
UW 38	SS1(A, B)	206	72	75,33	-4,42%	190,67	
	SS2(A, B)						
UW 39	SS1(A, B)			12,21		47,79	isoliertes Netz
	SS2(A, B)						
UW 40	SS1(A, B)	206	100	81,32	22,97%	184,68	
	SS2(A, B)						
UW 41	SS1(A, B)	206	41	42,36	-3,21%	223,64	
	SS2(A, B)	27	27	28,88	-6,51%	58,12	
UW 42	SS1(A, B)						
	SS2(A, B)						
UW 43	SS1(A, B)	206	150	151,28	-0,85%	114,72	
	SS2(A, B)						
UW 44	SS1(A, B)	206	71	76,5	-7,19%	189,5	
	SS2(A, B)						
UW 45	SS1(A, B)	206	84	83,41	0,71%	182,59	
	SS2(A, B)						
UW 46	SS1(A, B)	206	165	154,34	6,91%	111,66	
	SS2(A, B)	206	20	16,26	23,00%	249,74	

Tabelle A-4, Stand August 2009

Station	Sammelschiene	Spulennennstrom $I_{\text{Spule}}$ in A	Kompensationsstrom $I_L$ in A	Erdschlussstrom $I_{\text{CE}}$ in A	Verstimmung $v$ in %	Löschreserve in A	Notiz
UW 47	SS1(A, B)	520	184	192,49	-4,41%	387,51	
	SS2(A, B)						
KW DFL	SS1(A, B)	60	20	31,57	-36,65%	88,43	
	SS2(A, B)						
KW DSB	SS1(A, B)			45,07		14,93	isoliertes Netz
	SS2(A, B)			2,32		57,68	isoliertes Netz
KW DLA	SS1(A, B)	65	31	k.A			
	SS2(A, B)						

Tabelle A-5, Stand August 2009

## Anhang B, Tabelle, Teil 1

Nr.:	Fertigungs-Nr.	Erzeugerfirma	Type	Baujahr	Spannung [V]	Nennleistung [kVA]	Stromregelbereich [A]	Betriebsart	Einstellart
1	2128	SPEZIELEKTRA	EOL-1210	1965	12125	1210	40-100	DB	7-stufig
2	3072	SPEZIELEKTRA	EDEUOS-3150/20	1967	12125	2430	80-200	DB	7-stufig
3	7077	AEG	GETF-1252/20	1955	12000	1300	12-108	DB	stufenlos
4	7185	SPEZIELEKTRA	EDEROS-2000/20	1973	12125	2000	20-165/206	DB/KB2h	stufenlos
5	7971	SPEZIELEKTRA	EDEROS-2000/20	1974	12125	2000	20-165/206	DB/KB2h	stufenlos
6	7972	SPEZIELEKTRA	EDEROS-2000/20	1974	12125	2000	20-165/206	DB/KB2h	stufenlos
7	9666	SPEZIELEKTRA	EDEROS-2000/20	1976	12125	2000	20-165/206	DB/KB2h	stufenlos
8	9912	SPEZIELEKTRA	EDEROS-2000/20	1976	12125	2000	20-165/206	DB/KB2h	stufenlos
9	11378	AEG	GEUF-500/20/SP	1955	12120	485	15-40	DB	6-stufig
10	11379	AEG	GEUF-500/20/SP	1955	12120	485	15-40	DB	6-stufig
11	19899	SPEZIELEKTRA	ETD-20/165/2000	1985	12125	2000	20-165/206	DB/KB2h	stufenlos
12	19900	SPEZIELEKTRA	ETD-20/165/2000	1985	12125	2000	20-165/206	DB/KB2h	stufenlos
13	24374	SPEZIELEKTRA	ETD-20/165/2000	1988	12125	2000	20-165/206	DB/KB2h	stufenlos
14	81/25037	AEG	TEF-2000/20	1968	12100	2000	16-165/206	DB/KB2h	stufenlos
15	81/25331	AEG	TEF-2000/20	1969	12100	2000	16-165/206	DB/KB2h	stufenlos
16	26951	AEG	LSTE-6344	1971	12100	2000	16-165/206	DB/KB2h	stufenlos
17	67310	AEG	GEUF-630/20/SP	1956	12000	600	15-50	DB	8-stufig
18	68568	AEG	GETWF-800/20	1959	11561	693	10-60	DB	stufenlos
19	104896	EBG	EOL-2630/20	1962	12120	1050	60-150	DB	7-stufig
20	107672	EBG	EOL-1600/20	1966	12125	1210	40-100	DB	7-stufig
21	109823	EBG	EOL-1000/20	1969	12125	1000	25-65	KB2h	9-stufig
22	120051	EBG	EOL-3150/20	1975	12125	4620	200(400)	DB	2-stufig
23	202102	TRAFO-UNION	LSTE-6344	1978	12125	2000	17-165/206	DB/KB2h	stufenlos
24	202103	TRAFO-UNION	LSTE-6344	1978	12125	2000	17-165/206	DB/KB2h	stufenlos
25	S202104	TRAFO-UNION	LSTE-6344	1978	12125	2000	17-165/206	DB/KB2h	stufenlos

Tabelle B-I-1

Nr.:	Fertigungs-Nr.	Erzeugerfirma	Type	Baujahr	Spannung [V]	Nennleistung [kVA]	Stromregelbereich [A]	Betriebsart	Einstellart
26	202640	TRAFO-UNION	LSTE-6344	1979	12125	2000	17-165/206	DB/KB2h	stufenlos
27	202641	TRAFO-UNION	LSTE-6344	1979	12125	2000	17-165/206	DB/KB2h	stufenlos
28	202642	TRAFO-UNION	LSTE-6344	1979	12125	2000	17-165/206	DB/KB2h	stufenlos
29	202825	TRAFO-UNION	LSTE-6344	1980	12125	2000	17-165/206	DB/KB2h	stufenlos
30	202826	TRAFO-UNION	LSTE-6344	1980	12125	2000	17-165/206	DB/KB2h	stufenlos
31	202827	TRAFO-UNION	LSTE-6344	1980	12125	2000	17-165/206	DB/KB2h	stufenlos
32	203008	TRAFO-UNION	LSTE-6344	1981	12125	2000	17-165/206	DB/KB2h	stufenlos
33	203279	TRAFO-UNION	LSTE-6344	1983	12125	2000	17-165/206	DB/KB2h	stufenlos
34	203350	TRAFO-UNION	LSTE-6344	1984	12125	2000	17-165/206	DB/KB2h	stufenlos
35	203351	TRAFO-UNION	LSTE-6344	1984	12125	2000	17-165/206	DB/KB2h	stufenlos
36	343508	TRAFO-UNION	LSTE-6344	1986	12125	2000	17-165/206	DB/KB2h	stufenlos
37	343509	TRAFO-UNION	LSTE-6344	1986	12125	2000	17-165/206	DB/KB2h	stufenlos
38	343694	TRAFO-UNION	LSTE-6344	1989	12125	2000	17-165/206	DB/KB2h	stufenlos
39	343695	TRAFO-UNION	LSTE-6344	1989	12125	2000	17-165/206	DB/KB2h	stufenlos
40	343696	TRAFO-UNION	LSTE-6344	1989	12125	2000	17-165/206	DB/KB2h	stufenlos
41	343762	TRAFO-UNION	LSTE-6344	1990	12125	2001	17-165/206	DB/KB2h	stufenlos
42	343763	TRAFO-UNION	LSTE-6344	1990	12125	2001	17-165/206	DB/KB2h	stufenlos
43	343764	TRAFO-UNION	LSTE-6344	1990	12125	2001	17-165/206	DB/KB2h	stufenlos
44	343968	TRAFO-UNION	LSTE-6344	1992	12125	2001	17-165/206	DB/KB2h	stufenlos
45	345526	TRAFO-UNION	LSTE-6344	1993	12125	2001	17-165/206	DB/KB2h	stufenlos
46	345821	SIEMENS	LSTE-6344	1997	12125	2000	20-165/206	DB/KB2h	stufenlos
47	345843	SIEMENS	LSTE-6344	1997	12125	2000	20-165/206	DB/KB2h	stufenlos
48	345844	SIEMENS	LSTE-6344	1997	12125	2000	20-165/206	DB/KB2h	stufenlos
49	345856	SIEMENS	LSTE-6344	1997	12125	2000	20-165/206	DB/KB2h	stufenlos
50	345922	SIEMENS	LSTE-6344	1998	12120	2000	20-165/206	DB/KB2h	stufenlos
51	418788	ELIN	L-20004	1952	16165	2100	130	DB	starr
52	535241	ELIN	DJWT-315/20	1960	11500	315	5-27.5	DB	stufenlos

Tabelle B-I-2

Nr.:	Fertigungs-Nr.	Erzeugerfirma	Type	Baujahr	Spannung [V]	Nennleistung [kVA]	Stromregelbereich [A]	Betriebsart	Einstellart
53	535243	ELIN	DJWT-315/20	1960	11500	315	5-27.5	DB	stufenlos
54	535853	ELIN	OCRA-1600/20	1962	11836	1185	40-100	DB	7-stufig
55	535933	ELIN	OCTA-250/20	1962	12125	315	5-27.5	DB	stufenlos
56	560814	ELIN	OCRA-2500/20	1964	11836	1775	60-150	DB	9-stufig
57	561398	ELIN	OCTA-250/20	1965	12125	315	5-27.5	DB	stufenlos
58	561566	ELIN	OCRA-2500/20	1966	11836	1775	60-150	DB	9-stufig
59	579101	BBC	TSFKZ-2455/30	1976	14433	2455	90-170	KB2h	9-stufig
60	1605674	ELIN	OCT-1608/20	1975	12125	2000	20-165/206	DB/KB2h	stufenlos
61	720001/01	HIGHVOLT	LSTE-6344	1998	12124	2000	20-165/206	DB/KB2h	stufenlos
62	720001/02	HIGHVOLT	LSTE-6344	1998	12124	2000	20-165/206	DB/KB2h	stufenlos
63	720001/03	HIGHVOLT	LSTE-6344	1998	12124	2000	20-165/206	DB/KB2h	stufenlos
64	720014/01	HIGHVOLT	LSTE-6344	1999	12124	2000	20-165/206	DB/KB2h	stufenlos
65	720031/01	HIGHVOLT	LSTE-6344	1999	12124	2000	20-165/206	DB/KB2h	stufenlos
66	720072/01	HIGHVOLT	LSTE-6344	2001	12124	2000	20-165/206	DB/KB2h	stufenlos
67	720072/02	HIGHVOLT	LSTE-6344	2001	12124	2000	20-165/206	DB/KB2h	stufenlos
68	720080/01	HIGHVOLT	LSTE-6344	2002	12124	2000	20-165/206	DB/KB2h	stufenlos
69	720098/01	HIGHVOLT	LSTE-6344	2002	12124	2000	20-165/206	DB/KB2h	stufenlos
70	65529	TRENCH	END-20/165/2000	2005	12124	2000	20-165/206	DB/KB2h	stufenlos
71	115382	TRENCH	ENK-20/520/6300	2007	12124	6305	52-520	KB2h	stufenlos
72	115384	TRENCH	ENK-20/165/2000	2007	12124	2001	20-165/206	DB/KB2h	stufenlos
73 <sup>1</sup>	110.785	TRENCH	ELK 20/520/6300	2007	21.000	6.305	52-520	KB2h	stufenlos
74 <sup>1</sup>	110.786	TRENCH	ELK 20/520/6300	2007	21.000	6.305	52-520	KB2h	stufenlos
75 <sup>1</sup>	118.312	TRENCH	ELK 20/520/6300	2008	21.000	6.305	52-520	KB2h	stufenlos
76 <sup>1</sup>	118.313	TRENCH	ELK 20/520/6300	2008	21.000	6.305	52-520	KB2h	stufenlos

**Tabelle B-I-3**

<sup>1</sup> Erdschlusslöschspulen mit integriertem Sternpunktbildner

## Tabelle, Teil 2

Nr.:	Fertigungs-Nr.	Anlagen-Nr.	Außenstelle Wartungszentrum	Anlagenname	Anschaffungs- wert [ATS]	Einbau- Datum	Ausbau- Datum
1	2128	4-0137	SP	SW 1	158.000,00		
2	3072	1-0163	TBKk	SW 2	218.984,00	22.05.2003	
3	7077			Trafowerkstatt			
4	7185	4-0010	TBKI	UW 30 / 1	326.655,00		
5	7971	2-0078	TBKI	UW 7 / 1	303.870,00		
6	7972	6-0372	TBKk	UW 20 / 1	303.870,00		
7	9666	4-0367	TBKf	UW 35 / 1	334.800,00		
8	9912			Trafowerkstatt	334.800,00		24.04.2008
9	11378	6-0190	TBKk	UW 3 / 1	75.305,00		
10	11379	8-0149	VK	SW 3	75.305,00		
11	19899	4-0442	TBKI	UW 24 / 1	450.000,00		
12	19900	5-0005	TBKk	UW 28 / 2	450.000,00		
13	24374	2-1137	TBKI	UW 40	431.300,00		
14	81/25037	8-0753	TBKk	UW 6	210.180,00	Nov. 2005	
15	81/25331	1-0108	TBKk	UW 14 / 1	207.700,00		
16	26951	6-0372	TBKk	UW 20 / 2	299.250,00		
17	67310			Trafowerkstatt	75.305,00		
18	68568	1-0028	TBKk	UST 1	90.000,00		
19	104896	1-0177	TBKk	UW 10 / 2	328.671,00	Nov. 2005	
20	107672			Trafowerkstatt	215.000,00		26.07.2007
21	109823	keine	TBKw	KW 1	14.000,00		
22	120051	2-0084	TBKI	SW 4	40.000,00	22.05.2003	
23	202102	6-0190	TBKk	UW 3 / 1	310.400,00		
24	202103	5-0005	TBKk	UW 28 / 2	310.400,00		
25	S202104	6-1300	TBKk	Trafowerkstatt	310.400,00		20.11.2008

Tabelle B-II-1

Nr.:	Fertigungs-Nr.	Anlagen-Nr.	Außenstelle Wartungszentrum	Anlagenname	Anschaffungs- wert [ATS]	Einbau- Datum	Ausbau- Datum
26	202640	2-0558	TBKI	UW 33 / 1	367.030,00		
27	202641	4-0675	TBKI	UW 31 / 1	367.030,00		
28	202642	1-0529	TBKk	UW 29	367.030,00		
29	202825	7-0206	TBKw	UW 9 / 1	403.200,00		
30	202826	2-0190	TBKI	UW 4 / 1	403.200,00		
31	202827	2-0200	TBKI	UW 1 / 2	403.200,00		
32	203008	4-0276	TBKI	UW 13	403200		
33	203279	7-0723	TBKw	UW 36	527.670,00		
34	203350	4-0285	TBKf	KW 2	546.000,00		
35	203351	8-0001	TBKk	UW 5 / 1	546.000,00		
36	343508	3-0171	TBKI	UW 17	343.000,00		
37	343509			Schrott	343.000,00		07.01.2008
38	343694	4-0675	TBKI	UW 31 / 2	481.000,00		
39	343695	8-0760	TBKk	UW 11	481.000,00		
40	343696	7-0824	TBKw	UW 41 / 1	481.000,00		
41	343762	3-0281	TBKI	UW 43	500.000,00		
42	343763	8-0326	TBKk	UW 27	500.000,00		
43	343764	4-0300	TBKf	UW 15	500.000,00		
44	343968			Trafowerkstatt	620.000,00		17.11.2008
45	345526	1-0108	TBKk	UW 14 / 2	620.000,00		
46	345821	9-0036	TBKI	UW 44			
47	345843	7-0856	TBKw	UW 46 / 1			
48	345844	4-0400	TBKf	UW 16 / KW			
49	345856	6-0200	TNIK	UW 25			
50	345922	1-0001	TNIK	UW 2			
51	418788			Trafowerkstatt			
52	535241			Trafowerkstatt			

Tabelle B-II-2

Nr.:	Fertigungs-Nr.	Anlagen-Nr.	Außenstelle Wartungszentrum	Anlagenname	Anschaffungs- wert [ATS]	Einbau- Datum	Ausbau- Datum
53	535243	2-0078	TBKI	UW 7 / 2		09/2003	
54	535853	4-0110	TBKI	UW 8 / 3	146.200,00	12.08.2003	
55	535933	4-0110	TBKI	UW 8 / 1	334.800,00		
56	560814	4-0001	TBKI	UST 2	180.000,00		
57	561398	7-0824	TBKw	UW 41 / 2	32.000,00		
58	561566	5-0110	TBKI	KW 3	180.000,00	09.12.2002	
59	579101	2-0200	TBKI	UW 1 / 3	33.000,00		
60	1605674	1-0177	TBKk	UW 10 / 1	185.000,00	10.02.2003	
61	720001/01	3-0281	TNIL	UW 43 / 2			
62	720001/02	4-0010	TNIL	UW 30 / 2			
63	720001/03	4-0467	TNIL	UW 23			
64	720014/01	4-1055	TNIL	UW 45			
65	720031/01	6-0500	TNIK	UW 38			
66	720072/01	9-0130	TBKI	UW 32		05.12.2001	
67	720072/02	3-0071	TBKI	UW 12		12.12.2001	
68	720080/01	7-0856	TNIW	UW 46 / 2		Jahr 2002	
69	720098/01	2-1078	TBKI	UW 34		21.10.2002	
70	65529	2-0190	TBKI	UW 4 / 2		Nov. 2005	
71	115382	8-0001	TBKk	UW 5 / 2		24.04.2008	
72	115384	4-0110	TBKI	UW 8 / 2		07.01.2008	
73 <sup>1</sup>	110.785	2/200	TO-B	UW 1 / 1	160.000,00	26.07.2007	
74 <sup>1</sup>	110.786	7/206	TO-B	UW 9 / 2	160.000,00	31.07.2007	
75 <sup>1</sup>	118.312	2/558	TO-B	UW 33 / 2	160.000,00	17.11.2008	
76 <sup>1</sup>	118.313	6/1300	TO-B	UW 47 / 1	160.000,00	20.11.2008	

**Tabelle B-II-3**

<sup>1</sup> Erdschlusslöschspulen mit integriertem Sternpunktbildner