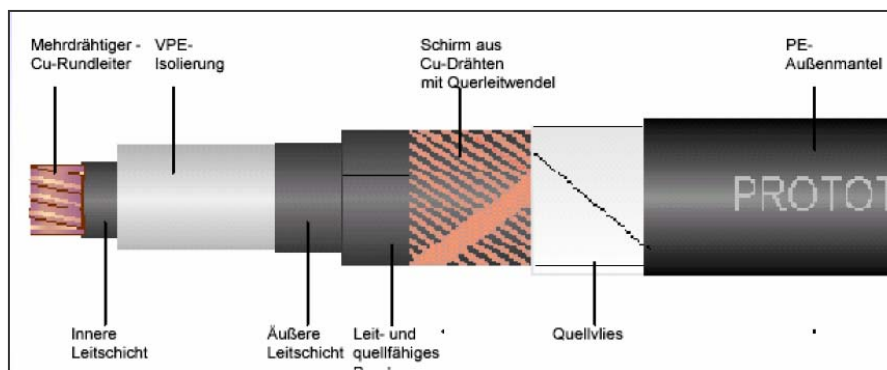


## Technische Grundlagen

### 1. Quelle der kapazitiven Stromanteile im Erdschlussfall

Mit zunehmendem Kabelanteil in den Mittelspannungs-Verteilnetzen steigt die Bedeutung des Themas „Erdschluss“. Ursache dafür ist, dass parallel zur Zunahme der Länge der verlegten Mittelspannungskabel die Höhe der kapazitiven Fehlerströme im Erdschlussfall zunimmt.

Kunststoffisolierte Mittelspannungskabel weisen eine typische dreischichtige Isolation auf (s. Figur 1), bestehend aus innerer Leitschicht auf dem Leiter, der effektiven Isolation aus vernetztem Polyäthylen (20 kV Kabel: Dicke 5 mm) und der äusseren Leitschicht.



Figur 1: konstruktiver Aufbau eines kunststoffisolierten Mittelspannungskabels

Dieser Aufbau der Isolation entspricht einem typischen Zylinderkondensator. Der Wert der Kapazität des Kabels hängt insgesamt von der Konstruktion des Kabels ab (Leiterdurchmesser, Isolationsmaterial, Spannungsreihe des Kabels).

Der typische Kapazitätswert eines 20 kV-Kabels mit XLPE-Isolation und Leiterquerschnitt 150 mm<sup>2</sup> liegt bei ca. 0.27 uF / km.

Bei Freileitungen sind die Leiter gegeneinander und gegen Erde weit distanziert. Dies führt dazu, dass die Kapazitätswerte von Freileitungen gegenüber den Kapazitätswerten von Kabeln nahezu vernachlässigbar gering sind.

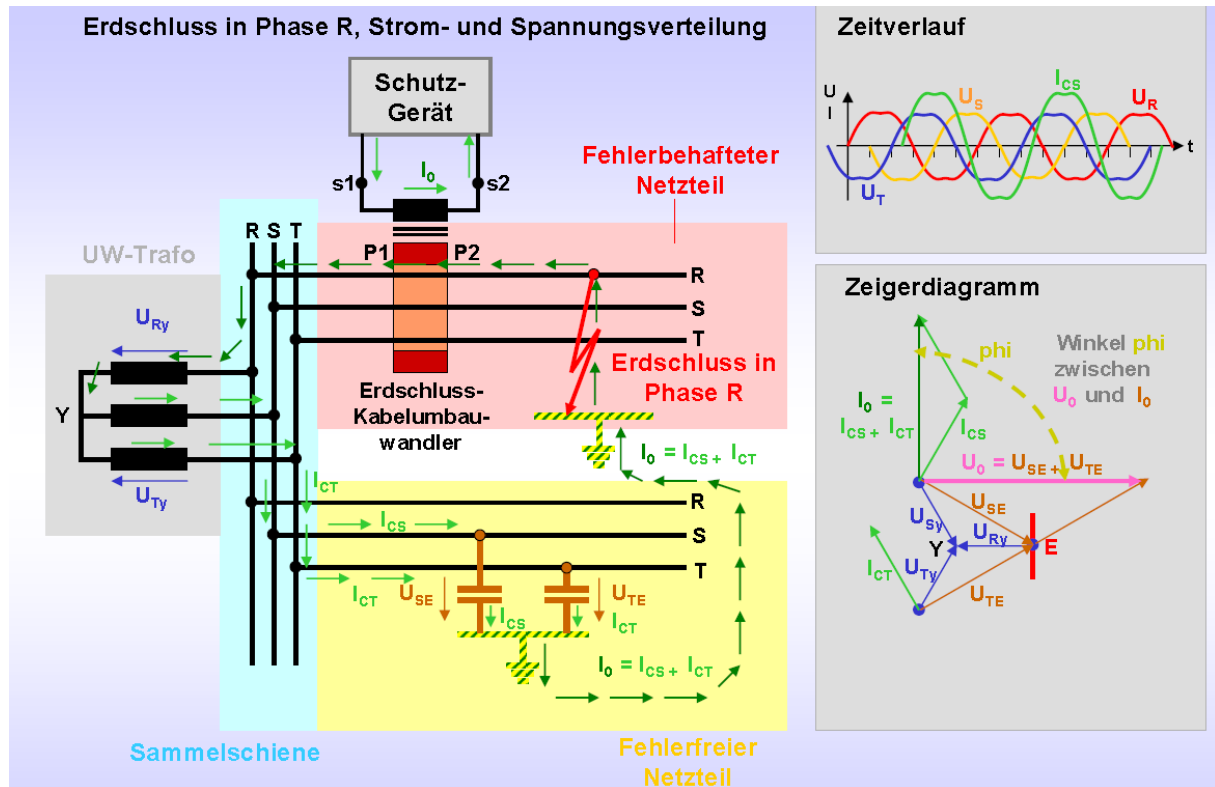
### 2. Wirkung der Kabelkapazitäten

Diese Kabelkapazitäten wirken sich wie folgt aus:

. Normalbetrieb: im Normalbetrieb fließt pro km Kabellänge (abhängig von Kabelkonstruktion und Betriebsspannung, bei beispielsweise 16 kV: ) ca. 1.5 A kapazitiver Ladestrom. Dieser Ladestrom überlagert sich dem normalen Laststrom, der in der Regel induktiven Charakter hat. Der kapazitive Ladestrom wird deshalb in der Regel nicht explizit wahrgenommen. Spürbar wird dieser Ladestrom erst dann, wenn ein weit ausgedehntes Kabelnetz besteht und der Laststrom gering und nahezu ohm'sch ist.

. Erdschluss-Fall: Im Erdschluss-Fall führen die Kabelkapazitäten dazu, dass selbst bei isoliertem Sternpunkt an der Fehlerstelle ein Fehlerstrom mit kapazitivem Charakter fließt.

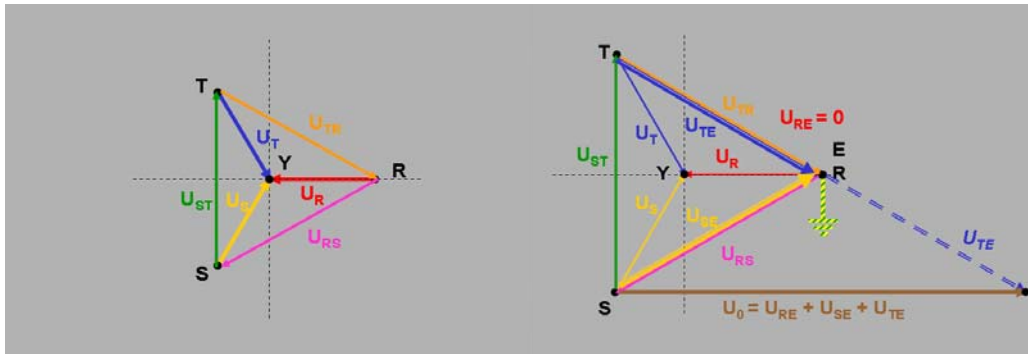
Die Ursache dafür soll anhand der Darstellung in Figur 2 (Erdschluss im Mittelspannungsnetz mit isoliertem Sternpunkt) erläutert werden:



Figur 2: Erdschluss-Ströme im Mittelspannungsnetz mit isoliertem Sternpunkt

Figur 2 zeigt schematisch ein Netz, bestehend aus einem Unterwerktrafo, einer Sammelschiene im Unterwerk und zwei Leitungsabgängen. In einem Leitungsabgang trete in Phase R ein Erdschluss auf.

Dieser Erdschluss in Phase R führt dazu, dass im Netz mit isoliertem Sternpunkt die Spannungen der „gesunden“ beiden Phasen gegenüber Erde auf den Wert der verketteten Spannung steigen, s. Figur 3.



Figur 3: Vektorielle Darstellung der Spannungsverhältnisse im Dreiphasensystem  
a: Netz im symmetrischen Normalbetriebszustand  
b: Erdschluss in Phase R: Die Phasenspannungen gegenüber Erde steigen für die gesunden Phasen S und T. Der Sternpunkt Y weist gegenüber Erde die Spannung  $U_R$  auf

Aus Figur 2 ist nun die Wirkung der Kabelkapazitäten im Falle eines Erdschlusses ersichtlich:

Die Leiter der Kabel der „gesunden“ Phasen S und T liegen gegenüber Erdpotential auf dem Niveau der verketteten Spannung. Somit erzeugen diese Kabel kapazitive Stromanteile, die über das Erdreich (s. Figur 2) zur Fehlerstelle fließen und sich dort zum Erdschluss-Strom an der Fehlerstelle überlagern.

Zum kapazitiven Fehlerstrom an der Erdschluss-Stelle tragen alle Kabelkapazitäten bei, die galvanisch zusammenhängend im selben Netzteil liegen.

Der Erdschluss-Strom lässt sich wie folgt berechnen:

$$I_e = \sqrt{3} * U * 2 * \pi * f * C$$

wobei: U: Netzspannung in [V] (verkettet, z.B. 16'000 V)

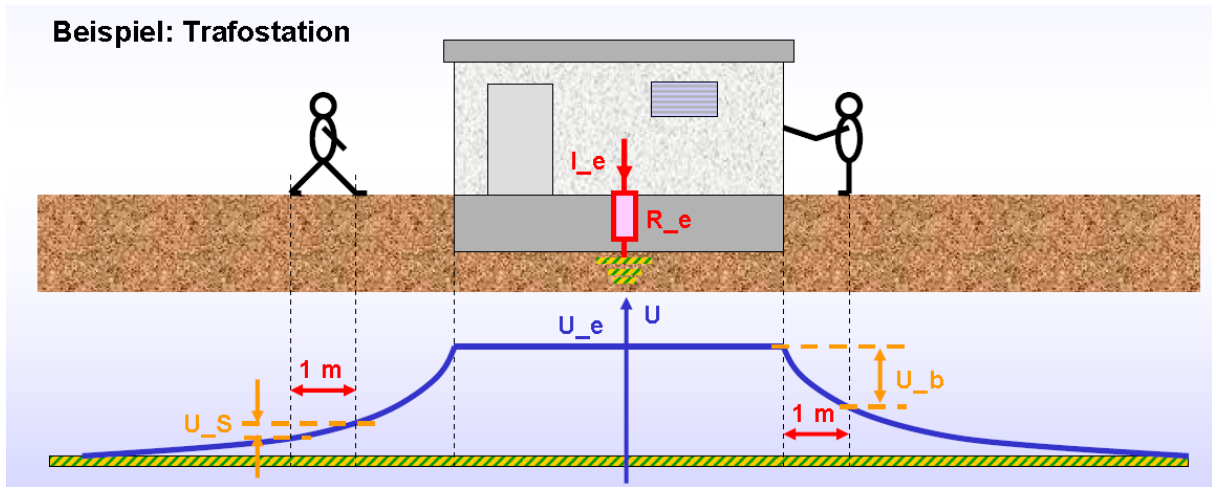
f: Frequenz (50 Hz)

C: Kabelkapazität (z.B.  $C' = 0.27 \mu\text{F}/\text{km}$ ; bei 1 km Systemlänge;  $C = 2.7 \mu\text{F}$ )

ergibt:  $I_e = 1.73 * 16'000 * 314 * 1 * 0.27 = 23.5 \text{ A}$

Grob lässt sich somit für die Spannungsebene 16 kV aussagen: jeder km Kabel (Systemlänge) trägt rund 2.5 A zum Erdschlussstrom bei.

Die Ursache des Erdschluss-Stromes ist somit beschrieben. Die Wirkung dieses Erdschluss-Stromes lässt sich am einfachsten am Beispiel einer Trafostation zeigen (s. Figur 4):



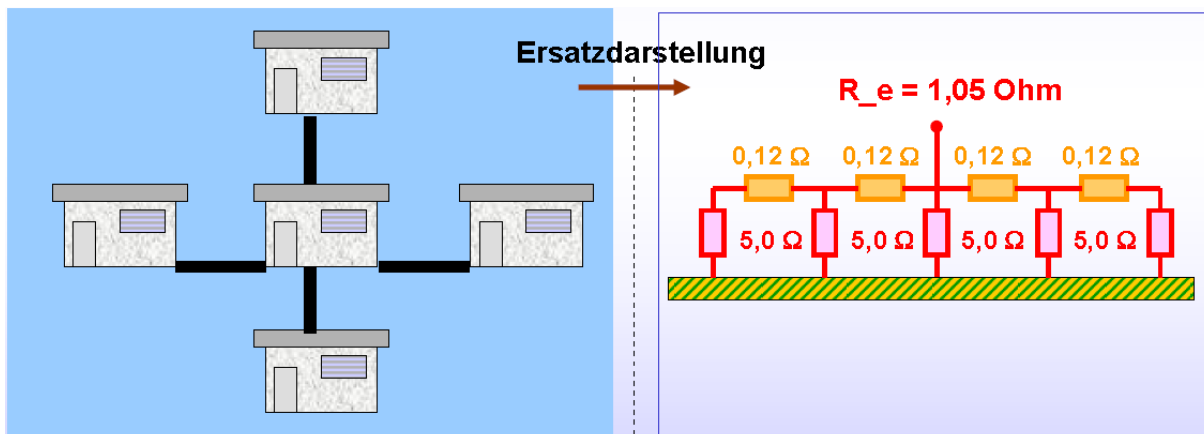
Figur 4: Wirkung des Erdschluss-Stromes am Beispiel einer Trafostation

Eine Trafostation ist typischerweise ausgerüstet mit einer Mittelspannungs-Schaltanlage, einem Netztrafo und einer Niederspannungsverteilung.

Diese Trafostationen sind häufig als vorfabrizierte Betonstation gebaut. Diese Station wird auf einem armierten Betonfundament aufgebaut, das gleichzeitig als Fundamenterder dient.

Abhängig vom Untergrund und von der Grösse des Fundamentes liegen die Erdungswiderstandswerte  $R_e$  eines Fundamenterders im Bereich von 2 bis 20 Ohm.

Da ebenfalls die Kabelschirme an die Erdung angeschlossen werden, somit Erdungssysteme von Nachbaranlagen ins Erdungssystem mit einbezogen werden (s. Figur 5), reduziert sich der Erdungswiderstandswert deutlich. Typische Werte liegen dann im Bereich von 1 bis 2 Ohm.



Figur 5: Wirkung der Vermaschung von Erdungssystemen benachbarter Trafostationen über beidseitig geerdete Kabelschirme von Verbindungskabeln

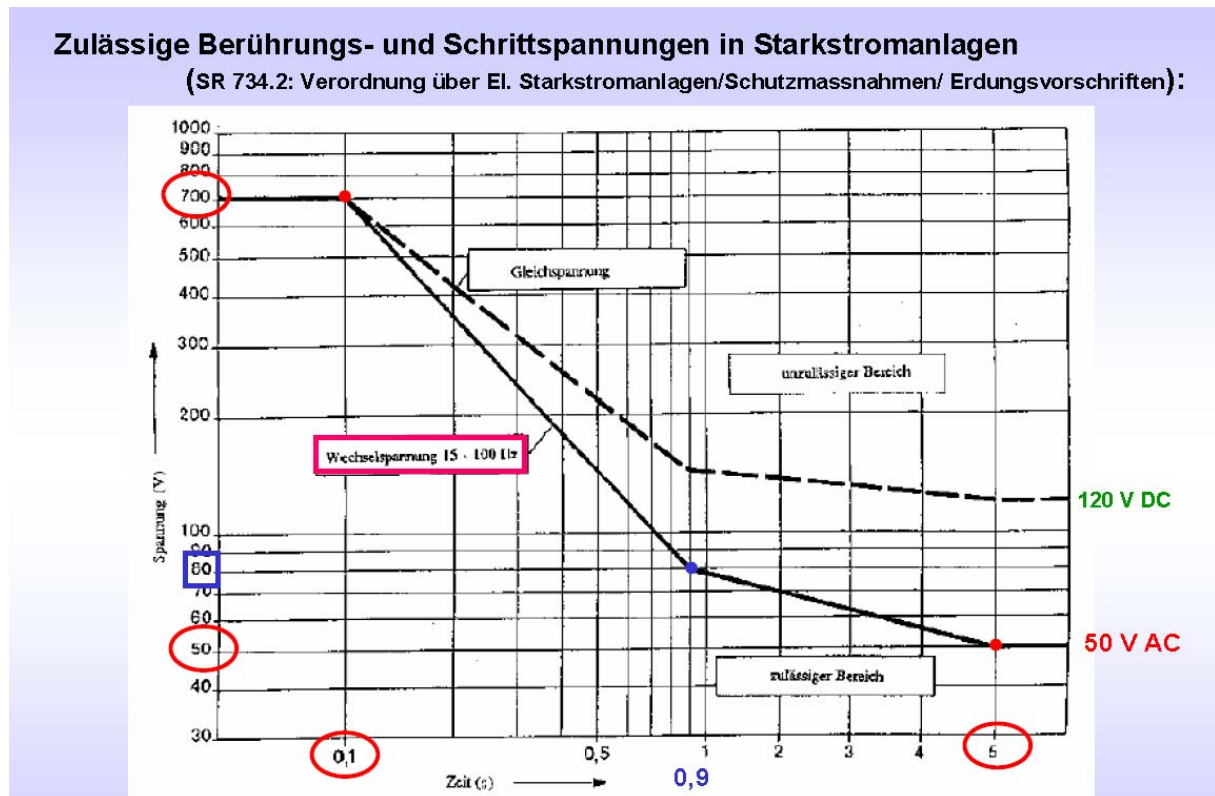
Häufigste Ursache von Erdschlüssen sind Fehler im Bereich der Kabelendverschlüsse.

Die Trafostation habe gegenüber Ideal-Erde einen Erdungswiderstand  $R_e$ . Dieser Erdungswiderstand ist für jede Anlage mittels Erdungsmessung zu bestimmen. Fließt nun aufgrund eines Erdschlusses des Mittelspannungsnetzes in dieser Anlage (z.B. Fehler in einem Endverschluss) ein Erdschlussstrom  $I_e$  über die Erde, bildet sich die Erdungsspannung  $U_e$  (s. Figur 4).

Abhängig von der Art der Erdung (Fundamenterder, Ringerder) bildet sich im Umfeld der Trafostation ein Spannungstrichter. Eine Person im Nahbereich der Trafostation kann im Erdschlussfall somit der Berührungsspannung  $U_b$  oder der Schrittspannung  $U_s$  ausgesetzt sein.

Bezüglich Höhe und Dauer dieser Spannungsbeanspruchung von Personen bestehen klare gesetzliche Limiten, definiert in der Verordnung über El. Starkstromanlagen. Diese Grenzkurve ist in Figur 6 dargestellt.

Diese Grenzkurve ist in Figur 4 dargestellt.



Figur 6: Grenzkurve der zulässigen Berührungs- und Schrittspannungen

Dieser Kurvenverlauf zeigt für AC-Beanspruchung zwei Extremwerte: Spannungen  $>700$  V sind unzulässig, Spannungen  $<50$  V sind bezüglich Einwirkdauer nicht limitiert.

Der Betreiber eines Netzes hat sicherzustellen, dass diese Vorschrift bezüglich Einwirkspannung und Einwirkdauer im Erdschluss-Fall nicht verletzt wird.

Mögliche Massnahmen dazu sind:

- . Einwirkspannung reduzieren, durch
  - .. Reduktion des Erdschluss-Stromes an der Fehlerstelle:
    - ... (a) Sternpunktbehandlung am Leistungstrafo
    - ... (b) Schaltmassnahmen, um die Fehlerstelle vom Strom zu entlasten
  - .. (c) Reduktion Erdungswiderstand
- . Einwirkdauer reduzieren, durch
  - .. (d) Schutzgeräte, die den Fehler erkennen und abschalten

Diese vier unterschiedlichen Massnahmen werden nachfolgend detaillierter betrachtet.

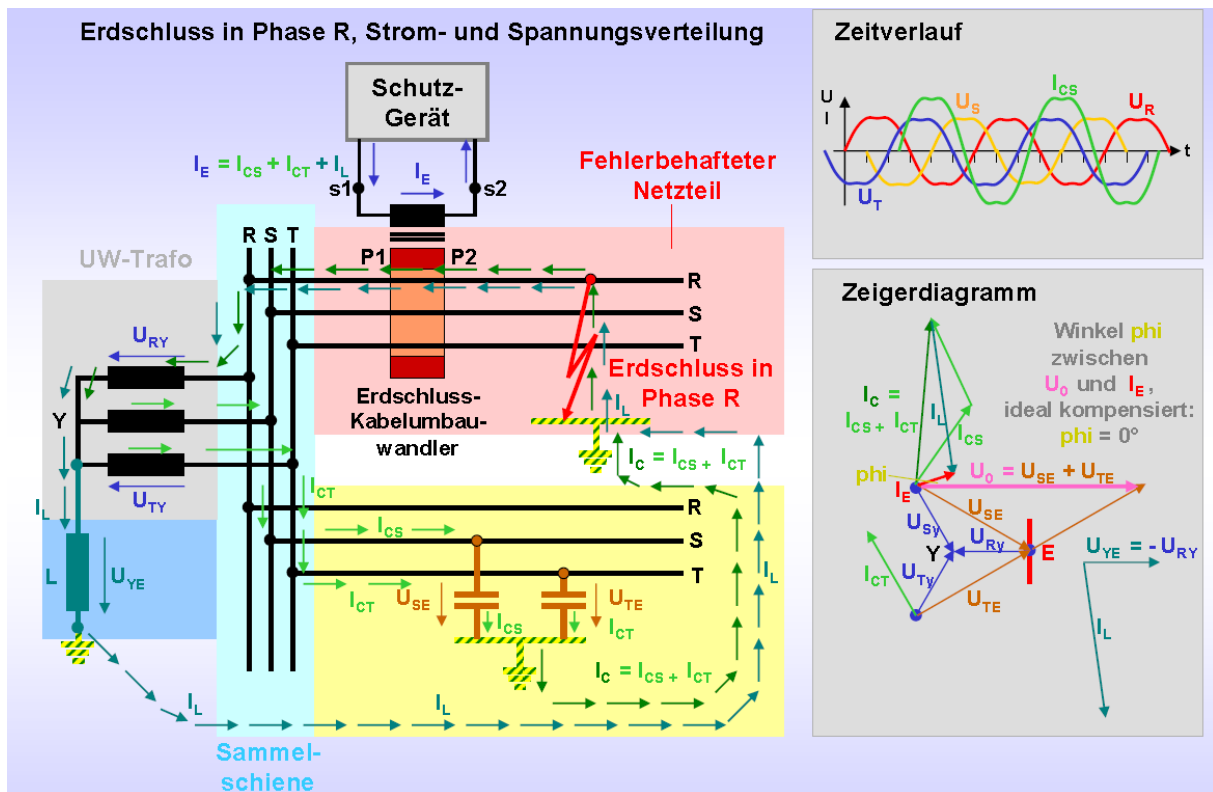
### **3. Massnahmen zur Einhaltung der Vorschriften im Erdschlussfall**

In Kapitel 2 wurden vier mögliche Massnahmen aufgezeigt, um im Erdschlussfall die gesetzlichen Vorgaben und Sicherheitsbedingungen einhalten zu können.

Diese werden nachfolgend detaillierter betrachtet.

#### **3.1 Sternpunktbehandlung am Leistungstrafo**

Die Beschaltung des Sternpunktes des Leistungstrafos im Unterwerk kann dazu benutzt werden, um die Erdschluss-Fehlerstelle vom kapazitiven Erdschluss-Strom zu entlasten. Das Grundprinzip besteht darin, den kapazitiven Erdschluss-Strom durch einen zusätzlichen induktiven Strom zu überlagern und so zu erreichen, dass der an der Fehlerstelle fliessende Summenstrom aus kapazitivem Strom (aus den Kabeln) und induktivem Strom (aus der Sternpunktbeschaltung) relativ gering wird, s. Figur 7.



Figur 7: Drossel im Sternpunkt des Leistungstrafos: im Erdschlussfall steigt die Spannung des Sternpunktes Y auf die Höhe der Phasenspannung. Diese Spannung führt über die Induktivität L im Strnpunkt dazu, dass ein induktiver Kompensationsstrom in das Erdsystem gespeist wird, der sich an der Fehlerstelle mit dem kapazitiven Fehlerstrom des Kabelnetzes überlagert. Dies führt dazu, dass an der Fehlerstelle ein relativ geringer Summenstrom übrig bleibt

Das Konzept für die Wahl der Grösse dieser Kompensationsdrossel kann im Wesentlichen auf zwei unterschiedliche Arten festgelegt werden:

#### . Erdschluss-Löschung

Bei der Erdschluss-Löschung besteht die Absicht, den Induktivitätswert der Spule so zu variieren, dass der kapazitive Fehlerstrom nahezu vollständig kompensiert wird. Übrig bleibt dadurch an der Fehlerstelle im Wesentlichen der ohm'sche Reststromanteil (Nichtidealität der Kabel und der Löschspule). Typische Reststromwerte liegen im Bereich von wenigen Ampère.

Die Kompensationsspule, auch genannt „Löschspule“ (weil der kapazitive Erdschluss-Strom durch den Spulenstrom an der Fehlerstelle nahezu ausgelöscht wird) oder „Pedersen-Spule“ (nach ihrem Erfinder), wird über eine Regeleinrichtung jeweils den kapazitiven Netzverhältnissen nachgeführt.

Durch den geringen Reststromwert an der Fehlerstelle entsteht eine geringe Erdungsspannung die in der Regel unterhalb 50 V liegen wird, entsprechend (s. Figur 6) ist es nicht mehr erforderlich, den Erdschluss sofort abzuschalten, sondern es wird dadurch ermöglicht, den Fehlerort zu lokalisieren (Typische Zielsetzung der Betreiber solcher Netze: Fehler soll innerhalb 2 Stunden eruiert werden) und selektiv vom Netz zu trennen.

## . Teilkompensation

Bei der Teilkompensation wird der Wert der Drossel im Sternpunkt auf einen fixen Wert eingestellt, so dass nur ein Teil des kapazitiven Fehlerstromes kompensiert wird. Dies hat den Effekt, dass der Erdschluss-Strom an der Fehlerstelle einerseits deutlich reduziert wird und andererseits, dass der Fehlerstrom den kapazitiven Charakter behält.

Der Fehlerstrom bleibt aber in der Regel so hoch, dass ein Weiterbetrieb über Minuten hinweg nicht möglich ist (wie bei der Löschung), sondern dass eine Abschaltung innerhalb von ca. 1 sec zu erfolgen hat. Diese Reaktionszeit erlaubt es, entsprechende Schutzgeräte (s. Kap. 3.4) im Netz zu installieren und den Fehler selektiv abzuschalten.

## 3.2 Schaltmassnahmen, um die Fehlerstelle vom Strom zu entlasten

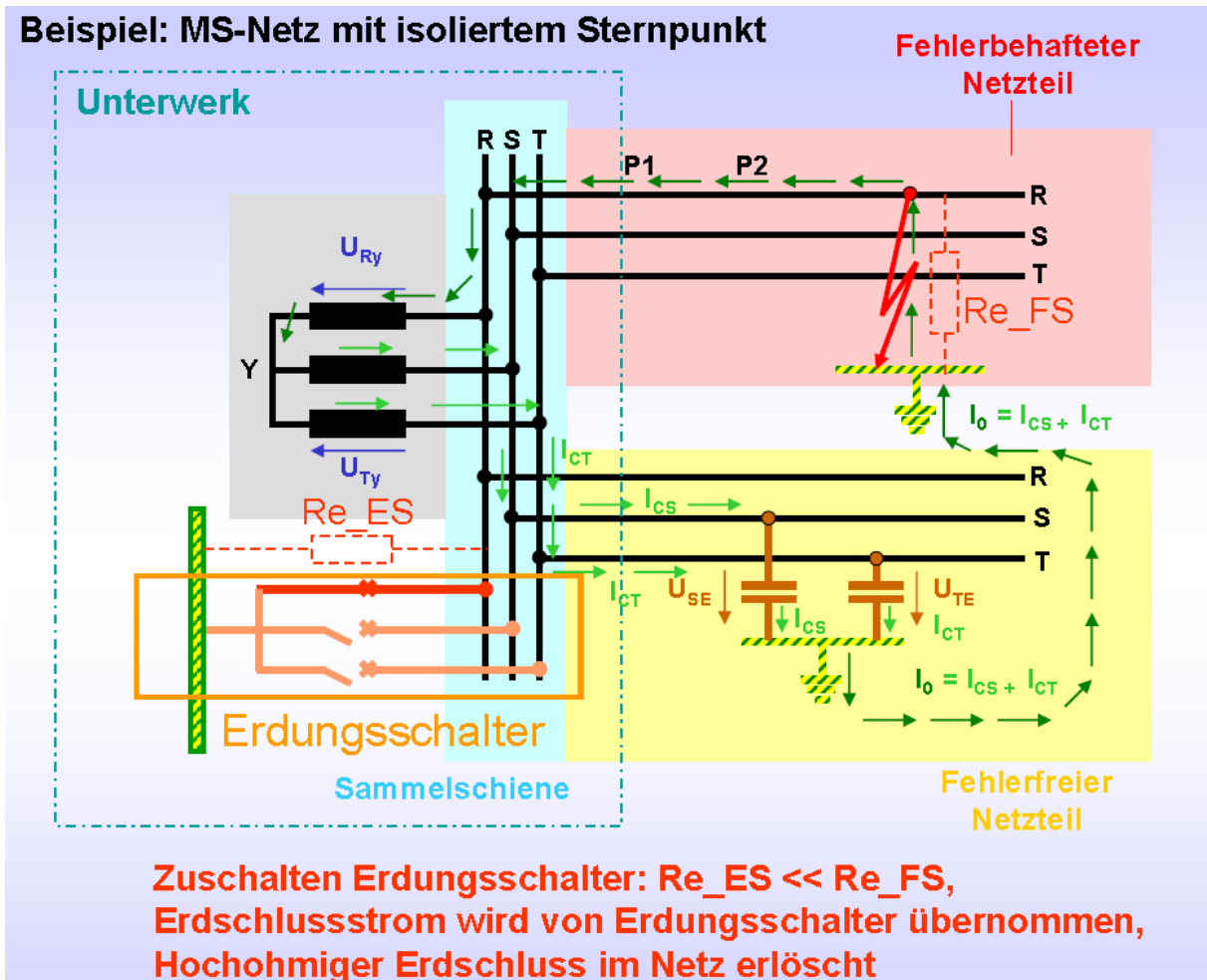
Das Grundkonzept dieser Methode ist, den Erdschluss-Strom von der Fehlerstelle zu einem definierten Erdschlusspunkt „umzuleiten“.

Zu diesem Zweck wird ein einpolig schaltbarer Leistungsschalter an der Sammelschiene im Unterwerk installiert. Dieser Schalter wird mit Polerdungsschalter (auch Shunt-Schalter oder „Erdungsschalter“ genannt) bezeichnet.

Sobald die Steuerung dieses Leistungsschalters einen Erdschluss in einer Phase erkennt, wird der entsprechende Pol des Erdungsschalters zugeschaltet (s. Fig. 8).

Dies führt dazu, dass aufgrund der niederohmigen Erdverbindung des Polerdungsschalter-Poles der Strom von der Fehlerstelle durch den Erdungsschalter übernommen wird.

In der Fortsetzung ist der Erdschluss-Ort auf dem fehlerbehaftete Leitungsabgang zu eruieren und vom Netz zu trennen.



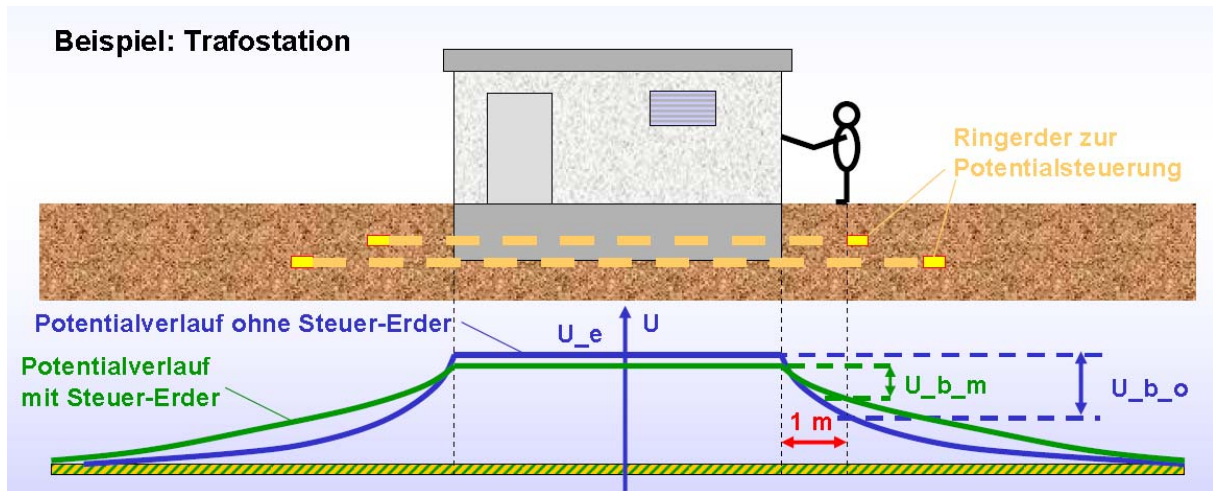
Figur 8: Erdungsschalter an der Sammelschiene des Unterwerkes

### 3.3 Reduktion des Erdungswiderstandes bzw. der Berührungs- und Schrittspannungen

Eine Reduktion des Erdungswiderstandes führt direkt zu einer tieferen Erdungsspannung. Aufgrund der grossen Anzahl Trafostationen in einem Netz und den relativ hohen Kosten für eine Reduktion des Erdungswiderstandes (Grabarbeiten) pro Anlage resultieren jedoch hohe Gesamtkosten, weshalb diese Methode nur in Einzelfällen im Vordergrund steht.

Anstelle der Reduktion des Erdungswiderstandes insgesamt ist auch denkbar, den Potentialverlauf (s. Figur 9) im Umfeld der Trafostation durch Verlegen von Steuerelektroden (Ringerder) zu verflachen und so die Berührungs- und Schrittspannungen zu reduzieren.

Aber auch hierfür gilt: diese Massnahmen sind relativ teuer.



Figur 9: Reduktion der Berührungs- und Schrittspannungen durch Installation von zusätzlichen Ringerdern zum Zwecke der Potentialsteuerung.

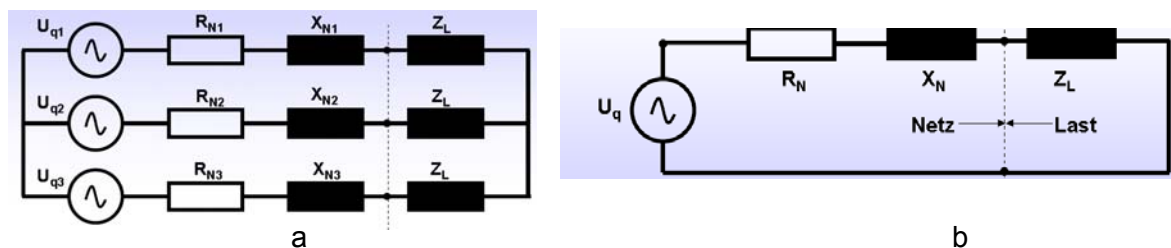
### 3.4 Schutzgeräte, die den Fehler erkennen und abschalten

Eine weitere Massnahme zur Einhaltung der gesetzlichen und sicherheitstechnischen Randbedingungen besteht darin, die Einwirkzeit auf die maximal zulässige Zeit (s. Fig. 6) zu begrenzen.

Die Randbedingungen des Einsatzes der dazu erforderlichen Schutzgeräte und deren Funktionalität wird im Hauptbeitrag im Detail behandelt.

## 4. Symmetrische Komponenten

Ein symmetrisches Dreiphasennetz lässt sich als Ersatzschaltung als Einphasensystem darstellen (s. Figur 10). Auf Basis dieser einpoligen Darstellung vereinfachen sich die Berechnungen entsprechend.



Figur 10:

a: symmetrisches Dreiphasensystem

b: einpolige Ersatzschaltung des symmetrischen Dreiphasensystemes

Für die Analyse eines unsymmetrisch belasteten Dreiphasennetzes wurde die Methode der „Symmetrischen Komponenten“ entwickelt.

Das Prinzip dabei ist, dass ein unsymmetrisches Dreiphasennetz in drei jeweils für sich symmetrische Teilsysteme überführt wird.

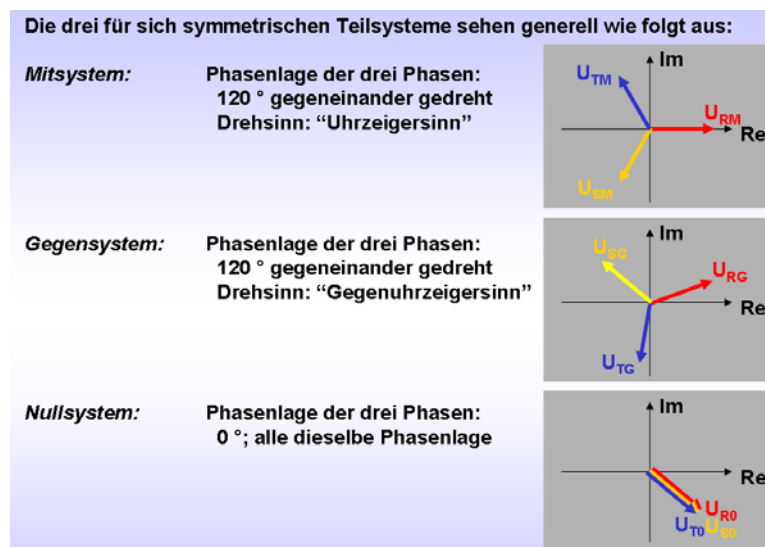
Diese symmetrischen Teilsysteme werden mit „Mitsystem“, „Gegensystem“ und „Nullsystem“ bezeichnet (s. Figur 11). Diese Methode macht selbst komplizierte Belastungs- und Netzsituationen einer systematischen Berechnung zugänglich.

Diese Methode wird auch von numerischen Berechnungsprogrammen verwendet.

Entsprechend müssen die Netzdaten in den drei Teilsystemen auch dem Berechnungsprogramm vorgegeben werden.

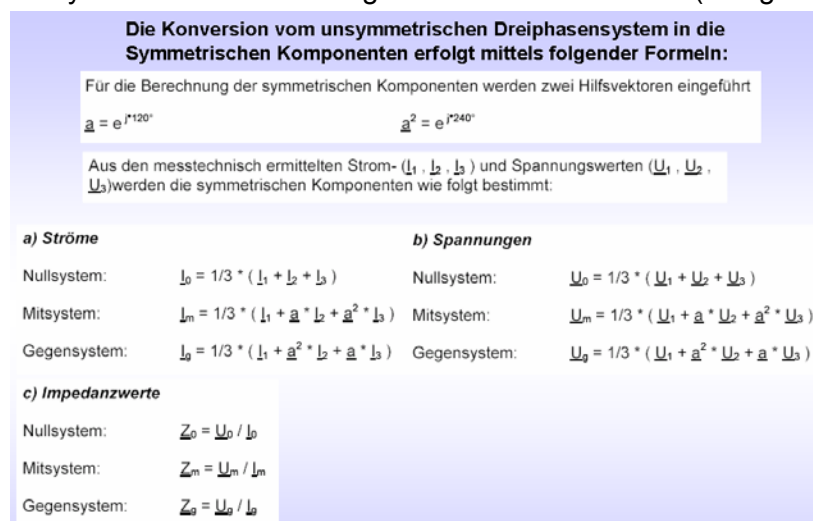
In jedem dieser drei Teilsysteme werden nun die Berechnungsergebnisse bestimmt.

Das Ergebnis des unsymmetrischen Dreiphasensystems erhält man dann als Überlagerung der drei Teilergebnisse aus den drei Teilsystemen.



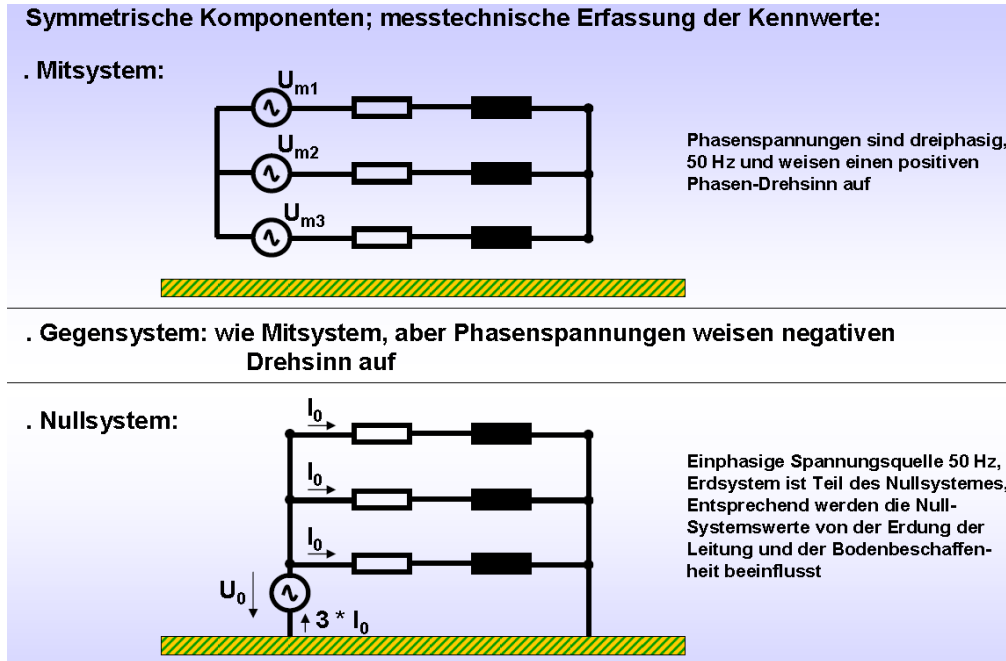
Figur 11: Symmetrische Teilsysteme

Es bestehen relativ einfache Formeln, auf Basis derer die Umwandlung vom Dreiphasensystem in die symmetrischen Teilsysteme und zurück vorgenommen werden kann (s. Figur 12).



Figur 12: Umwandlungsformeln

Die Kennwerte der drei Teilsysteme von beispielsweise Leitungen lassen sich messtechnisch relativ einfach bestimmen (s. Figur 13)



Figur 13: messtechnische Bestimmung der Leitungseigenschaften in den Symmetrischen Teilsystemen

Im Zusammenhang mit dem Einsatz von Erdschluss-Schutzgeräten sind folgende Zusammenhänge von Bedeutung:

Für die Erkennung von Erdschlüssen im Netz stehen die drei Phasenspannungen ( $U_{L1}$ ,  $U_{L2}$ ,  $U_{L3}$ ), die drei Phasenströme ( $I_{L1}$ ,  $I_{L2}$ ,  $I_{L3}$ ) und die sich daraus ableitbaren Größen von „Erdschluss-Spannung“ und Erdschluss-Strom zur Verfügung.

Die Zusammenhänge sind auf Basis der Theorie der Symmetrischen Komponenten wie folgt gegeben:

$$U_{L12} = U_{L1} - U_{L2}$$

$$U_{L23} = U_{L2} - U_{L3}$$

$$U_{L31} = U_{L3} - U_{L1}$$

$$U_{L12} + U_{L23} + U_{L31} = 0 \quad \text{bei Netz-Normalbetrieb}$$

Aus der Theorie der Symmetrischen Komponenten abgeleitet gilt:

$$U_o = 1/3 (U_{L1} + U_{L2} + U_{L3})$$

$$I_o = 1/3 (I_{L1} + I_{L2} + I_{L3})$$

Es gilt ebenfalls die Definition:

$$U_{en} = 3 * U_o = U_{L1} + U_{L2} + U_{L3}$$

$$I_E = -3 * I_o = -(I_{L1} + I_{L2} + I_{L3})$$

In der Folge ist deshalb bei der Betrachtung von Angaben der Hersteller bezüglich Relais-Funktion immer darauf zu achten, welche Grössen verwendet werden, weil gilt

$$U_{en} = 3 * U_o$$
$$I_E = - 3 * I_o$$

wobei vor allem bei der Beziehung zwischen  $I_E$  und  $I_o$  das Minuszeichen eine zentrale Rolle spielt.

Mit einem Kabelumbauwandler wird die Summe der drei Phasenströme gemessen. Ein Kabelumbauwandler liefert somit als Ausgangsgrösse den

$$\text{Wert : } (I_{L1} + I_{L2} + I_{L3}) = 3 * I_o = - I_E$$

In der Fortsetzung werden nun die Begriffe  $U_{en}$  und  $I_E$  verwendet.

Ausgehend von den zentralen Messgrössen  $U_{en}$  und  $I_E$  werten die Schutzgeräte je nach Funktionalität aus:

- . Amplitude  $U_{en}$
- . Amplitude  $I_E$
- . Phasenwinkel zwischen  $U_{en}$  und  $I_E$
- . spezifische Frequenzanteile im Stromsignal  $I_E$  (z.B. 5. Harmonische)
- . Einschwingverhalten der Signale im Moment des Erdschlusseintrittes

Unter Verwendung der symmetrischen Komponenten lässt sich die Situation eines Erdschlusses als Ersatzschaltung darstellen, s. Figur 14.

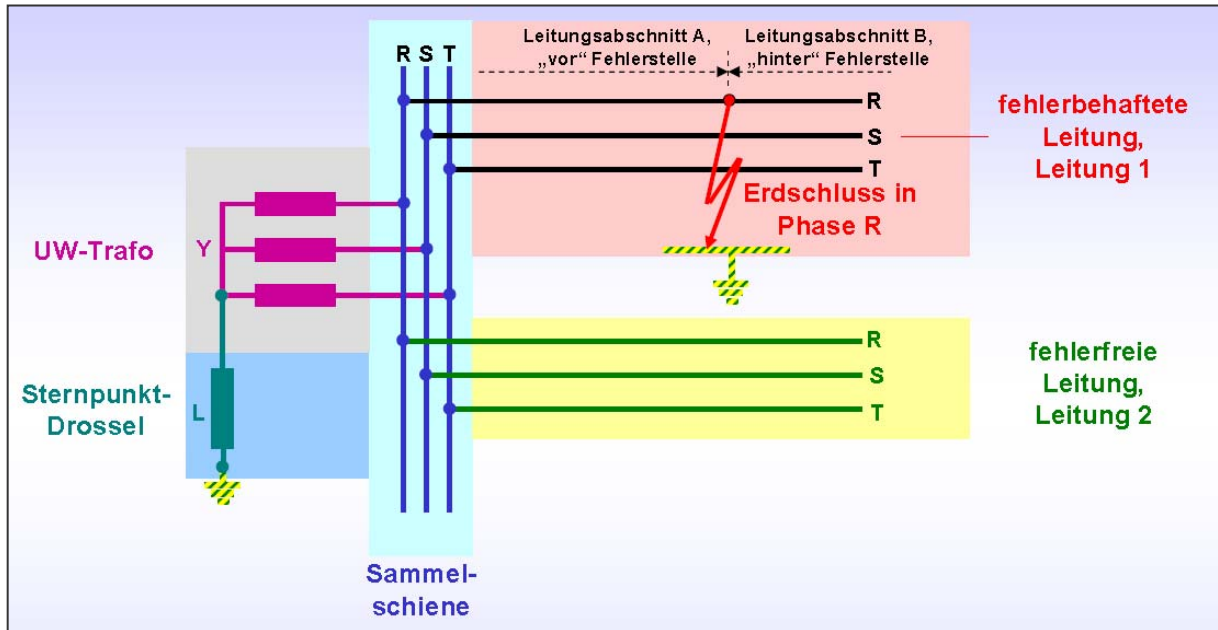
Diese Figur 14 entspricht der prinzipiellen Darstellung aus Figur 7.

Aus Figur 14 ist ersichtlich, wie sich die verschiedenen Netzelemente auf den Strom an der Fehlerstelle auswirken können.

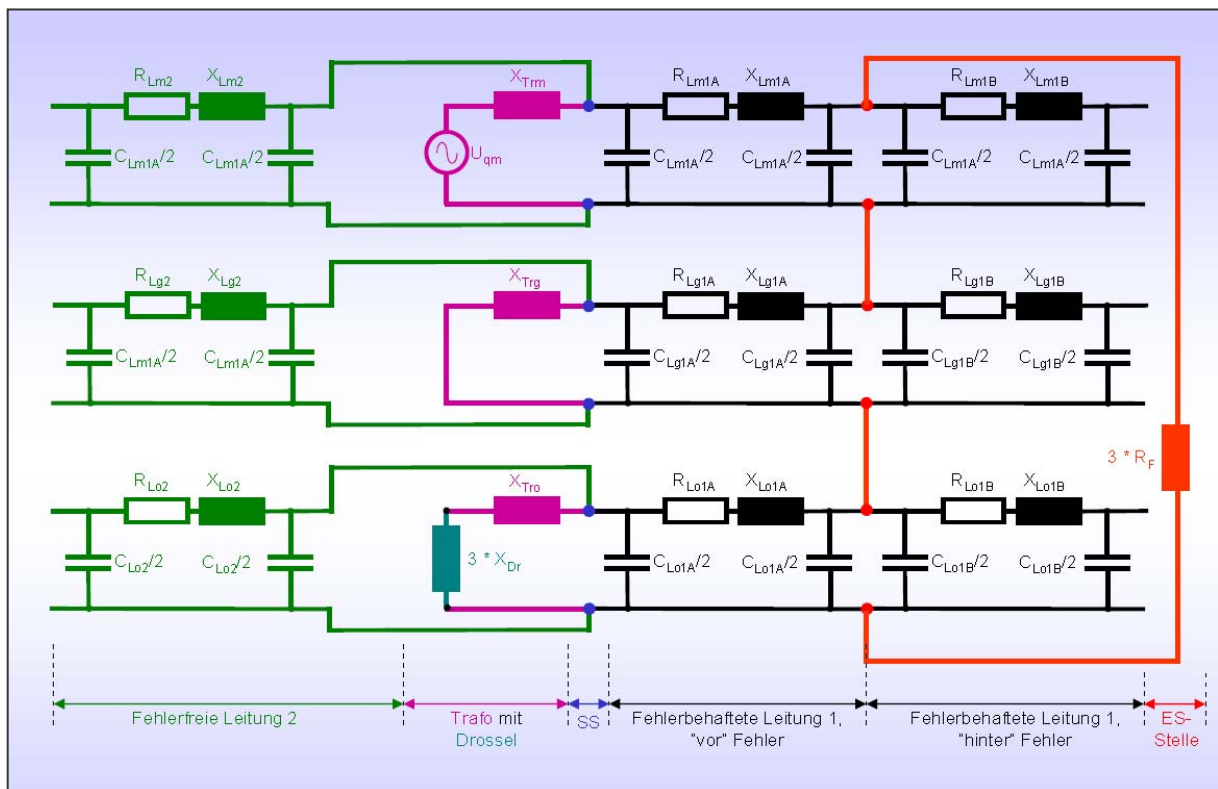
Aus dieser Darstellung ist auch ableitbar, was beim Eintritt eines Erdschlusses auftreten wird:

Es sind zahlreiche, verteilte Induktivitäten und Kapazitäten im Netz vorhanden.

Dies führt dazu, dass bei Fehlereintritt ein Einschwingen stattfinden wird, entsprechend von 50 Hz abweichende Frequenzanteile in Strom und Spannung auftreten werden.



a: Prinzipdarstellung



b: Ersatzschaltung

Figur 14: Ersatzschaltung unter Verwendung von Mit-, Gegen- und Nullsystem für die Situation eines Erdschlusses im

- . Netz mit induktiv beschaltetem Trafo-Sternpunkt
- . zwei Leitungsabgänge ab UW-Sammelschiene
- . Erdschluss im Verlaufe der einen, von der Sammelschiene gespeisten Leitung
- . Erdschluss mit Fehlerwiderstand  $R_F$

