



Hochschule
Zittau/Görlitz
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Aktuelle Erkenntnisse und Entwicklungen zur Resonanz-Sternpunkterdung in Verteilnetzen

Argumente für RESPE. . .

Uwe Schmidt

Dresden, 19.12.2016



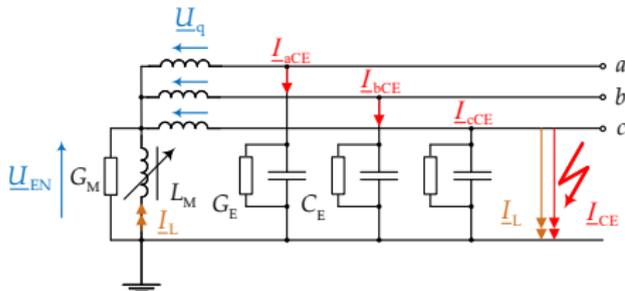
oo Inhalt

- Resonanz-Sternpunkterdung
 - Gründe der Auswahl
- Obergrenze des Erdschluss-Reststromes
 - Wertung
- Obergrenze in der Netzplanung
 - Berührungsspannung
 - Beeinflussung von Telekommunikationsanlagen
- Harmonische im Erdschluss-Reststrom
 - Resonanzstellen
 - Frequenzabhängige Impedanzen
 - Reale Erdschluss-Restströme
- Entwicklungen
 - Ortung
- Zusammenfassung



01 Resonanz-Sternpunktterdung

Prinzip



- Kompensation des kapazitiven Erdschluss-Reststromes I_{CE}
- vollständige Kompensation:

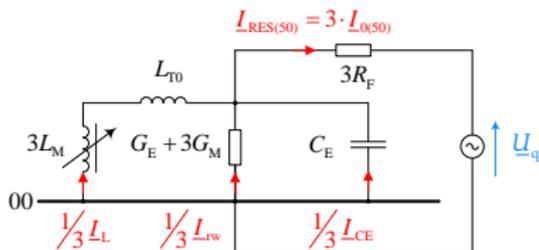
$$3 \cdot \omega \cdot L_M = \frac{1}{\omega \cdot C_E}$$

- Verstimmungsgrad v :

$$v = \frac{I_{CE} - I_L}{I_{CE}}$$

01 Resonanz-Sternpunktterdung

Prinzip



- Dämpfung d :

$$d = \frac{I_{rw}}{I_{CE}}$$

- Erdschluss-Reststrom $I_{RES(50)}$:

$$I_{RES(50)} = I_{CE} \cdot \sqrt{d^2 + v^2}$$

01 Resonanz-Sternpunktterdung

Gründe der Auswahl

Vorteile	Nachteile
Erdschluss-Lichtbögen verlöschen von selbst.	Transiente Überspannungen bei Fehlereintritt
Netz kann im 1poligen Fehlerfall betrieben werden.	Im 1poligen Fehlerfall wirksame stationäre Verlagerungsspannung.
Berührungsspannungen U_T sind unkritisch	Subharmonische/Kippschwingungen sind möglich
Beeinflussungsspannungen sind unkritisch	Verlagerungsspannung im Normalbetrieb bei Unsymmetrie
Wiederzünden des Lichtbogens wird verhindert.	Hohe Aufwendungen für Kompensationsanlagen

Schegner P.;
Sternpunktbehandlung und Erdung in Kabelnetzen; NEXANS-Kabelseminar; 2014; Hannover



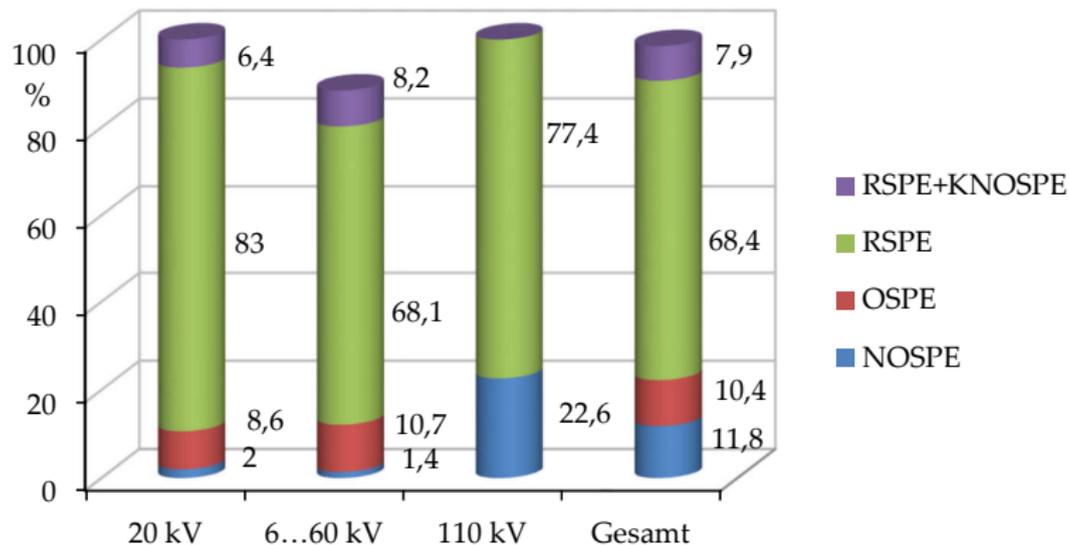
01 Resonanz-Sternpunktterdung

Kriterien der Auswahl

- Die Häufigkeit von Erdfehlern steigt in den niedrigen Spannungsebenen
 - 380/220-kV-Netz ca. 2 Erd-Kurzschlüsse $1/100 \text{ km}\cdot\text{a}$
 - 110-kV-Netz ca. 5 ... 10 Erd-Kurzschlüsse $1/100 \text{ km}\cdot\text{a}$
 - MS-Netze bis zu 400 Erd-Kurzschlüsse $1/100 \text{ km}\cdot\text{a}$
- In 110-kV- und MS-Netzen mit Resonanzsternpunktterdung verlöschen eine große Anzahl von Erdschlüssen von selbst (Erdschlusswischer).
 - 50 % bis 70 % der Erdschlüsse verlöschen nach ca. 0,2 s.
 - 90 % der Erdschlüsse verlöschen nach ca. 1 s.
- Die Zeitdauer zur Ortung von Erd- bzw. Doppelerdschlüssen kann mehrere Stunden betragen.
 - Gefahr durch die Schritt- und Berührungsspannung
 - Gefahr durch das direkte Berühren stromführender Teile
 - Folgefehler, Brandgefahr

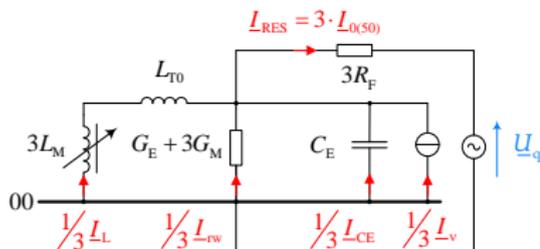
01 Resonanz-Sternpunktterdung

Anteile RESPE - Verteilnetze



Quelle: ETG-Fachbericht 132; Die aktuelle Situation der Sternpunktbehandlung in Netzen bis 110 kV (D-A-CH), 2011

02 Obergrenze des Erdschluss-Reststromes Einfluss von Oberschwingungsanteilen



- Dämpfung d :

$$d = \frac{I_{rw}}{I_{CE}}$$

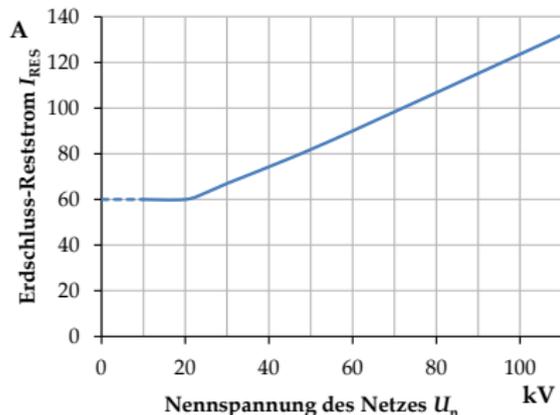
- Erdschluss-Reststrom I_{RES} :

$$I_{RES} = I_{CE} \cdot \sqrt{d^2 + v^2 + \sum i_v^2}$$

02 Obergrenze des Erdschluss-Reststromes

Normative Vorgabe - DIN VDE 0845-6-2

Obergrenze des Erdschluss-Reststromes (DIN VDE 0845-6-2)



- für 20-kV-Netze:

$$I_{RES} = 60 \text{ A}$$

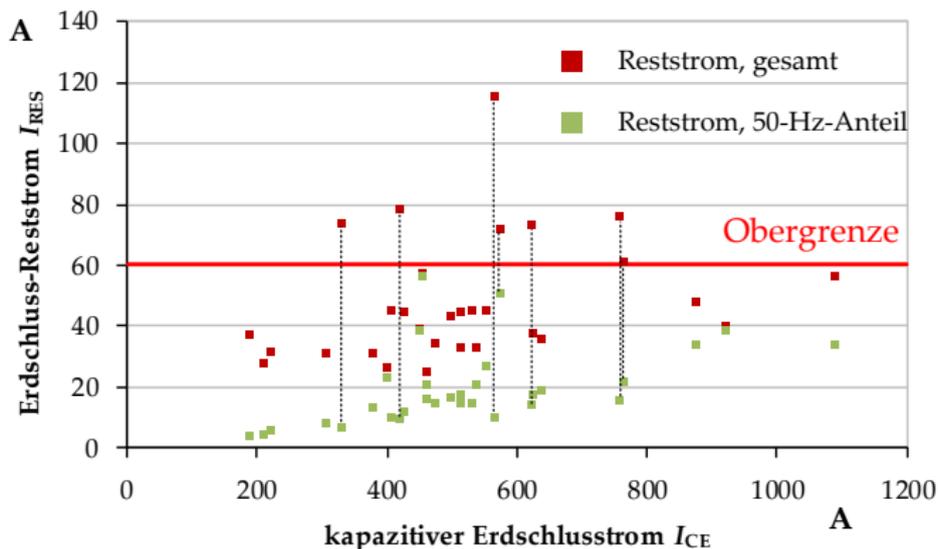
- ohne bekannte Werte:

$$I_V = 0,1 \cdot I_{CE}$$

- für 110-kV-Netze:

$$I_{RES} = 200 \text{ A}$$

02 Obergrenze des Erdschluss-Reststromes Ergebnisse von Messungen in 20-kV-Netzen



02 Obergrenze des Erdschluss-Reststromes Historie Lichtbogenlöschung - Ergebnisse von G. Meyer (1931)

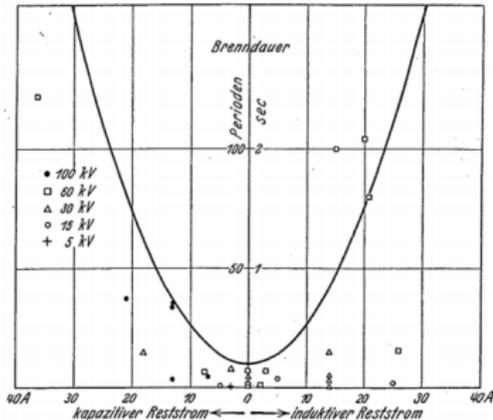


Abb. 2. Brenndauer der Erdschluss-Lichtbögen in Abhängigkeit vom Reststrom.

1. Brenndauer unabhängig von der Nennspannung U_n
2. Brenndauer abhängig von der Verstimmung ν

Meyer G.;

Die Brenndauer von Erdschlusslichtbögen in kompensierten Netzen; 1931; etz-Archiv

02 Obergrenze des Erdschluss-Reststromes

Historie - Ergebnisse von Erich & Heinze (1963)

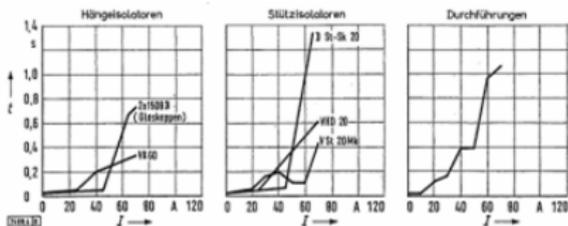


Bild 4. Mittlere Löszeit t verschiedener Isolatortypen für 20 kV in Abhängigkeit vom induktiven oder kapazitiven Lichtbogenstrom I .

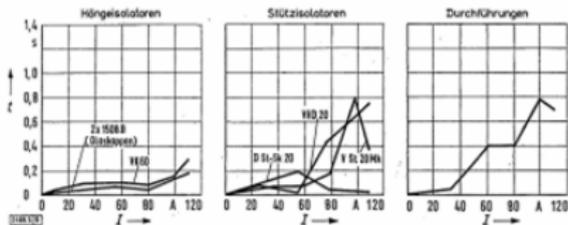


Bild 5. Mittlere Löszeit t verschiedener Isolatortypen für 20 kV in Abhängigkeit vom ohmschen Lichtbogenstrom I .

1. Brenndauer abhängig von der Verstimmung ν

2. Brenndauer abhängig vom Aufbau der Isolierung

Erich & Heinze;
Löschung von Erdschlusslichtbögen in Mittelspannungsnetzen; 1963; etz-Archiv

02 Obergrenze des Erdschluss-Reststromes Historie - Ergebnisse von Koch (1981)

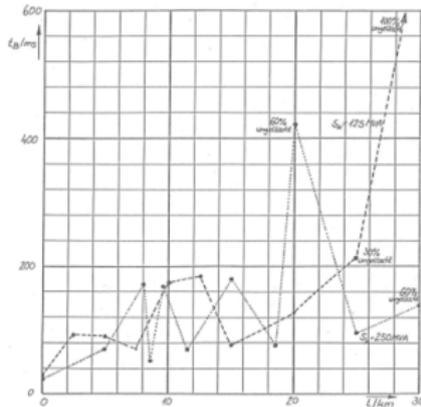


Bild A5 Mittlere Lichtbogenbrenndauer der gelöschten Versuche in Abhängigkeit von der Leitzuglänge und der Kurzschlussleistung mit der Netzschaltung entsprechend Bild A4

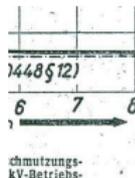
Erdschlussstrom $I_g = 260$ A
Kompensationsgrad $k = 0,8$
Zuschaltwinkel $\varphi = 90^\circ$

1. Brenndauer abhängig vom Erdschlussort

Koch K.;

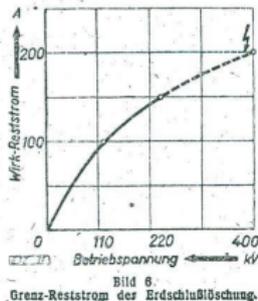
Versuche in kompensierten Mittelspannungsnetzen zur Ermittlung der Brenndauer von Erdschlusslichtbögen bei unterschiedlichem Oberschwingungsgehalt im Reststrom; 1981; FGH

02 Obergrenze des Erdschluss-Reststromes Historie - Aussage von Roser (1931)



Das Bild 6 zeigt Erfahrungswerte aus der deutschen Praxis für die Löschgrenze im 100 und 200 kV-Netz. Es ist anzunehmen, daß bei 400 kV ein Reststrom von 200 A als oberste Löschgrenze eingehalten werden muß. Dieser Grenz-betrag wird im 400 kV-Betrieb voraussichtlich bei einer zusammenhängenden Netz-länge von etwa 1000 km erreicht. Falls Netze mit einer größeren Ausdeh-

nung miteinander vermascht werden sollen, so ist dies nur durch galvanische Trennung oder selektives Auftrennen der Netze im Erdschlußfall (Erdschlußfortschaltung) möglich. Im übrigen kann bei Auftreten unerwarteter Schwierigkeiten und bei etwaiger Nichtbewährung der Erdschlußkompensation jederzeit ein Übergang zur festen Sternpunktterdung erfolgen.



Roser H.;

Die technischen Probleme der Drehstrom-Übertragung mit 400 kV; 1931; ETZ

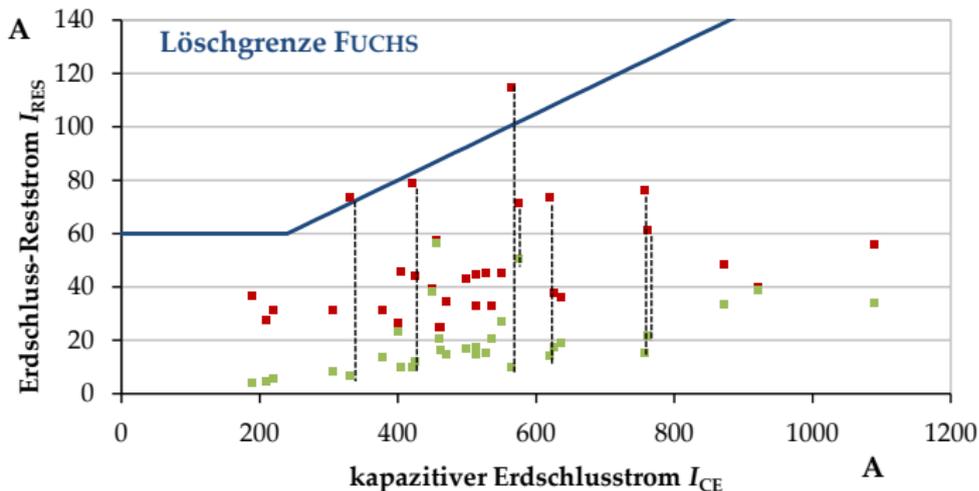


02 Obergrenze des Erdschluss-Reststromes Dissertation Emanuel Fuchs (2013)



1. Analyse der Erdschlussmessungen von Erich & Heinze und Koch
2. Vorschlag neuer „Löschgrenze“

02 Obergrenze des Erdschluss-Reststromes Löschgrenze nach E. Fuchs für 20-kV-Netze

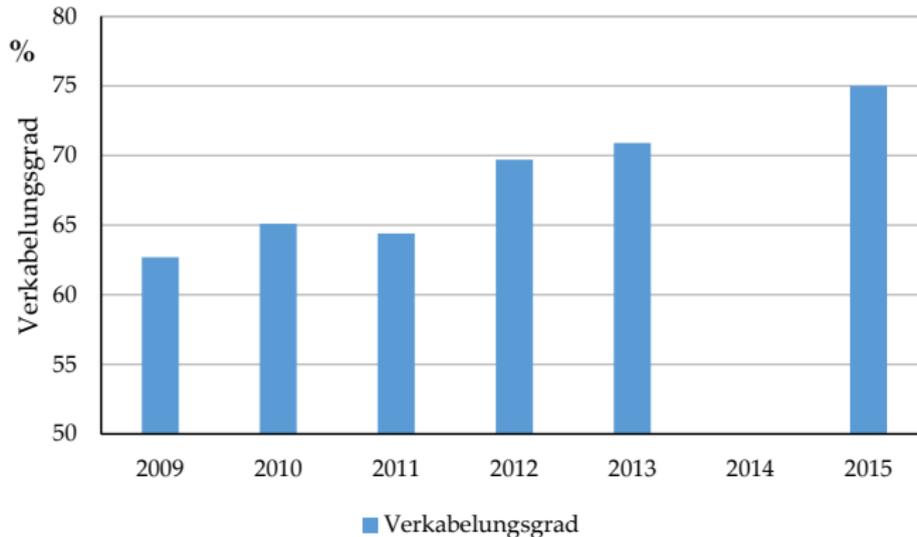


- Messung auf Sammelschiene des UW!



02 Obergrenze des Erdschluss-Reststromes

Verkabelungsgrad - MITNETZ STROM GmbH





02 Obergrenze des Erdschluss-Reststromes

Wertung

1. Kein direkter Zusammenhang zwischen Nennspannung und Lichtbogenlöschung, siehe auch Poll (1984)
2. starker Zusammenhang zwischen Verstimmungsgrad v und Lichtbogenlöschung
3. Abhängigkeit der Lichtbogenlöschung vom Erdschlussort
4. Lichtbogenlöschung im 110-kV-Netz nicht wissenschaftlich abgesichert
5. Zunehmender Verkabelungsgrad führt zu „unnötiger“ Löschgrenze

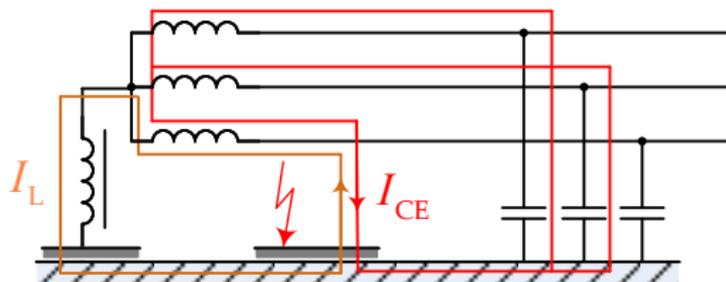
03 Obergrenze in der Netzplanung

Berührungsspannung U_{Tp} der DIN EN 50522

Erdung von Starkstromanlagen mit Nennwechselspannungen über 1 kV

$$Z_E = \frac{2 \cdot U_{Tp}}{r_E \cdot I_{RES}} = \frac{160 \text{ V}}{60 \text{ A}} = \underline{\underline{2,7 \Omega}}$$

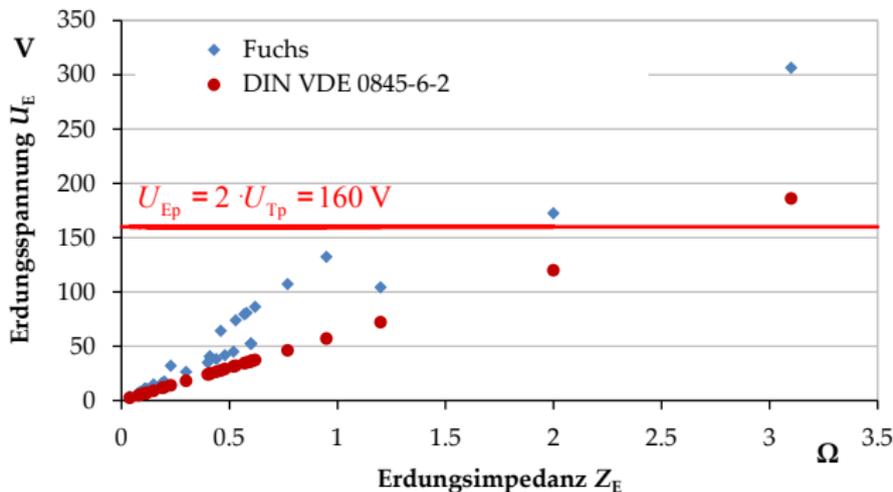
r_E - Reduktionsfaktor



Erdschlusskompensation

03 Obergrenze in der Netzplanung Berührungsspannung - Gemessene Erdungsimpedanzen Z_E

Vergleich der Erdungsspannungen bei Ansatz neuer Löschgrenze nach E. Fuchs



03 Obergrenze in der Netzplanung Beeinflussung - Prüfung der Notwendigkeit der Untersuchung

5	Netze mit isoliertem Sternpunkt oder Erdschlusskompensation oder vorübergehender Sternpunktterdung	Freileitung	Normalbetrieb	(+) ³⁾	-
6			Erdschluss bzw. Erdkurzschluss	-	+ ¹⁾
7			Doppelerdschluss ²⁾	(+)	(+)
8		Kabel	Normalbetrieb	(+)	-
9			Erdschluss bzw. Erdkurzschluss	-	+ ¹⁾
10			Doppelerdschluss ²⁾	(+)	(+)
<p>Bedeutung der Zeichen:</p> <p>- keine Untersuchung erforderlich</p> <p>(+) Untersuchungen nur in besonders ungünstigen Fällen erforderlich.</p> <p>+ Untersuchung erforderlich, wenn der Abstand kleiner als der Grenzabstand ist.</p>					
<p>¹⁾ Nur in denjenigen Anlagen der Netze mit vorübergehender niederohmiger Sternpunktterdung, in denen diese Erdung durchgeführt wird</p>					
<p>²⁾ In Netzen, in denen die Löschgrenze nach Bild 1 eingehalten wird, wird der Doppelerdschluss wegen der Seltenheit grundsätzlich nicht berücksichtigt. Liegen jedoch betriebliche Erfahrungen in Kabel- bzw. gemischten Kabel-/Freileitungsnetzen vor (z. B. Störungsstatistik), dass diese Seltenheit nicht gegeben ist, ist der Doppelerdschluss bei der Auslegung von Schutz- bzw. Abhilfemaßnahmen zu berücksichtigen.</p>					
<p>³⁾ z. B. Luftkabel am Hochspannungsgestänge.</p>					



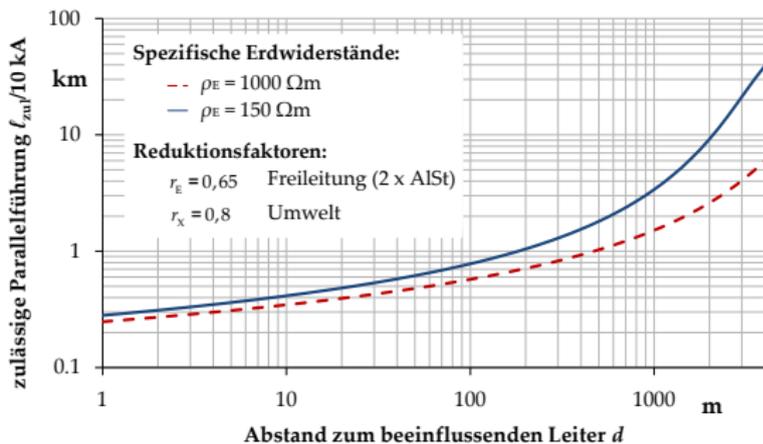
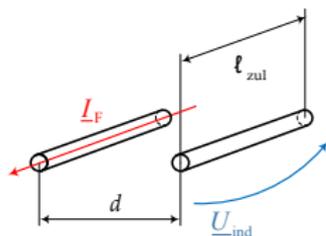
03 Obergrenze in der Netzplanung

Berücksichtigung des Doppelerdschlusses

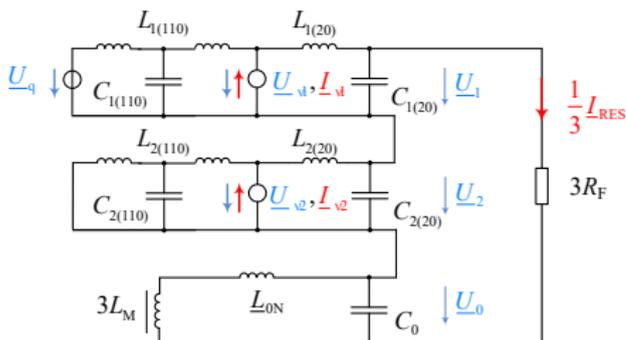
1. Bei Verletzung des Richtwertes, Berücksichtigung des Doppelerdschlusses (im Freileitungsnetz)
2. Bei Kabelanteil ist „strenggenommen“ der Doppelerdschluss in jedem Fall zu berücksichtigen (Lichtbogen verlischt im Kabel nicht!).
3. Zulässige induzierte Spannung (DIN VDE 0845-6-2):

$$U_{\text{ind}(p)} = 650 \text{ V} \quad (0,2 \text{ s} \leq t_F \leq 0,5 \text{ s})$$

03 Obergrenze in der Netzplanung Beeinflussung - Berücksichtigung des Doppelerdschlusses



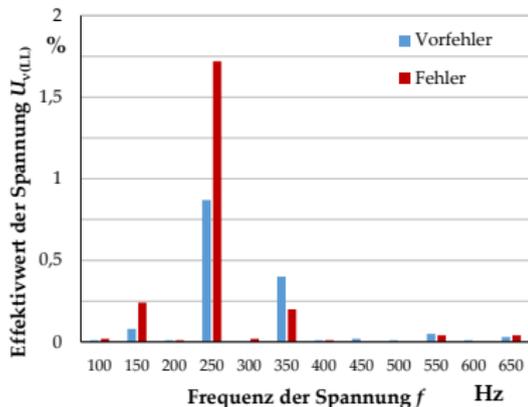
04 Harmonische im Erdschluss-Reststrom Ursachen



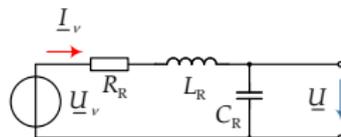
- Reihenschaltung von Mit-, Gegen- und Nullsystem
- Parallel- und Reihenresonanzen
- dominierende Reihenresonanz:

$$f_{e(R)} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{L_0 + 2L_1}{2L_1 \cdot L_0 \cdot C_0 + L_0 \cdot L_1 \cdot C_1}}$$

04 Harmonische im Erdschluss-Reststrom Resonanzen - gemessene Spannungen

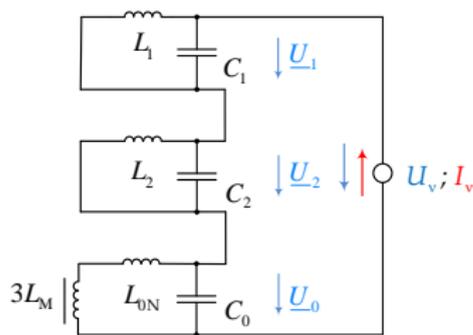
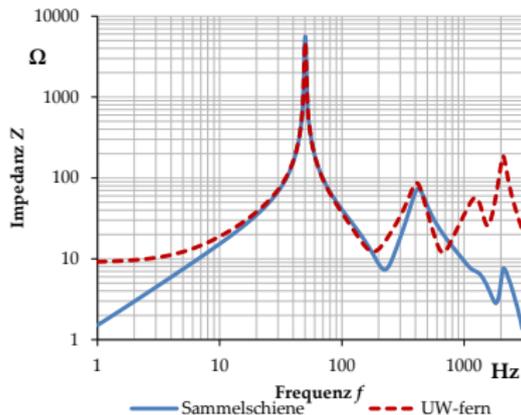


- Reihenschwingkreis wird im Erdschlussfall wirksam
- Spannungen über den Elementen L und C werden größer
- frequenzabhängige Impedanz $Z(\omega)$ des 20-kV-Netzes wird kleiner



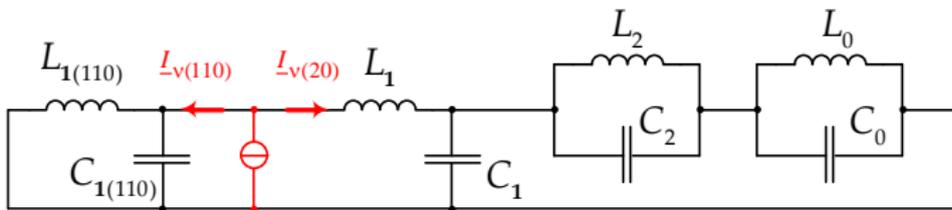
04 Harmonische im Erdschluss-Reststrom Resonanzstellen eines realen 20-kV-Netzes

Aus der Sicht des Fehlerortes:



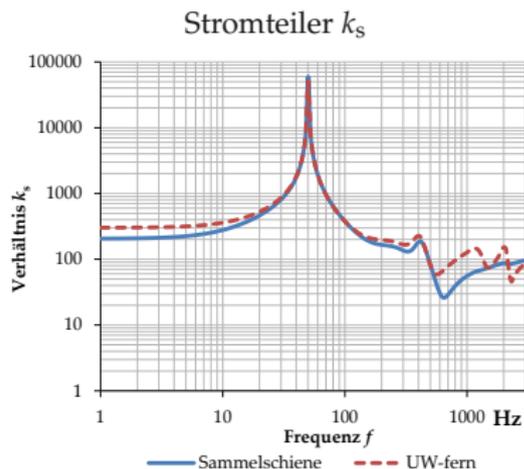
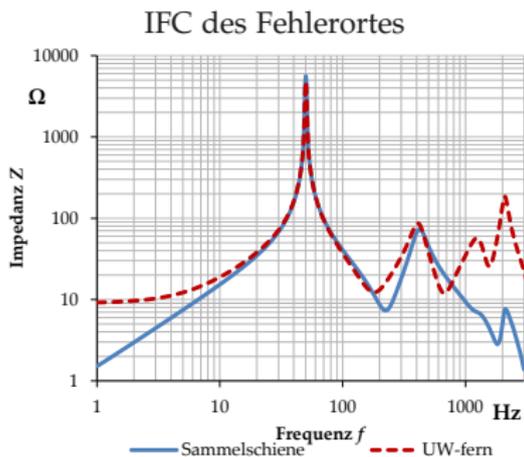
04 Harmonische im Erdschluss-Reststrom Resonanzstellen eines realen 20-kV-Netzes

- Aus der Sicht des Strom- oder Spannungsquelle werden zwei Parallelschwingkreise wirksam
- Netzimpedanz des 110-kV-Netzes hat Einfluss auf den Stromeintrag in das 20-kV-Netz



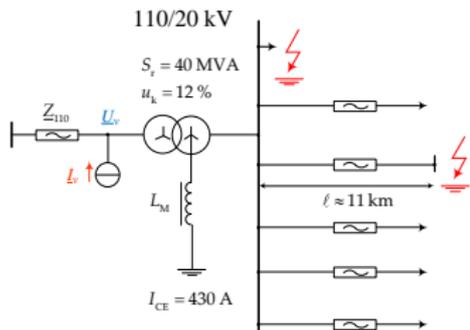
04 Harmonische im Erdschluss-Reststrom

Wirksame Impedanz - Gesamtes Netz



Frowein K.;
Beschreibung von Oberschwingungsquellen für die Berechnung des Erdschluss-Reststromes bei
Resonanz-Sternpunktterdung; Diplomarbeit; 2015; TU Dresden

04 Harmonische im Erdschluss-Reststrom Erdschlussmessungen - 20-kV-Netz



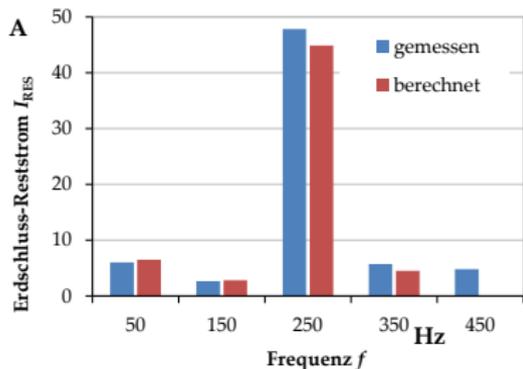
- kapazitiver Erdschluss-Reststrom

$$I_{CE} = 430 \text{ A}$$

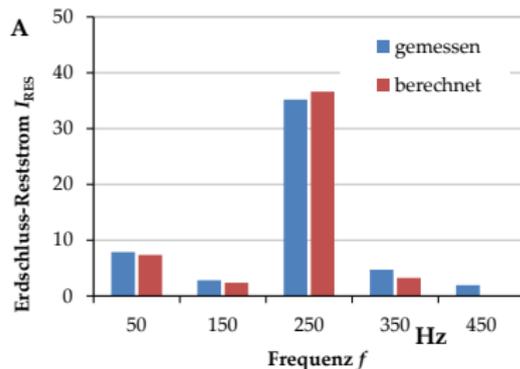
- UW-naher Erdschluss
- UW-ferner Erdschluss

04 Harmonische im Erdschluss-Reststrom Erdschlussmessungen - 20-kV-Netz

Fehler Nähe Sammelschiene



Fehler im Netz



Frowein K.;

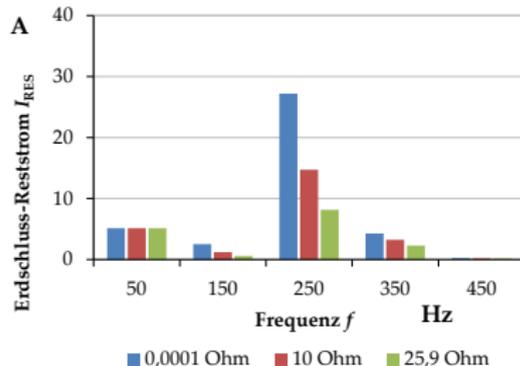
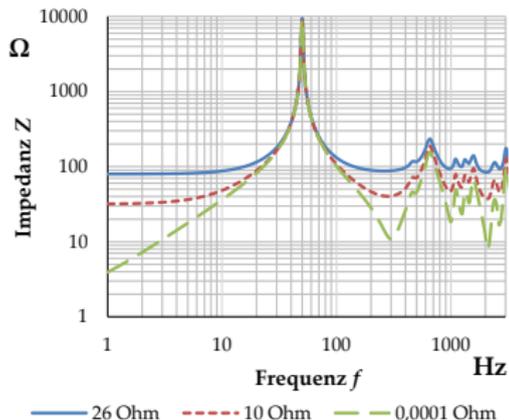
Beschreibung von Oberschwingungsquellen für die Berechnung des Erdschluss-Reststromes bei Resonanz-Sternpunktterdung; Diplomarbeit; 2015; TU Dresden

Dresden, 19.12.2016

Resonanz-Sternpunktterdung in Verteilnetzen

Folie 31 von 45

04 Harmonische im Erdschluss-Reststrom Einfluss des Fehler-/Erdungswiderstandes



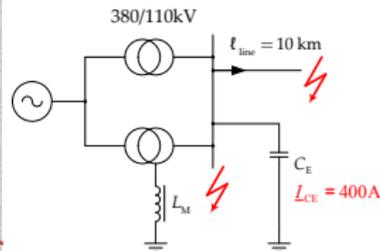
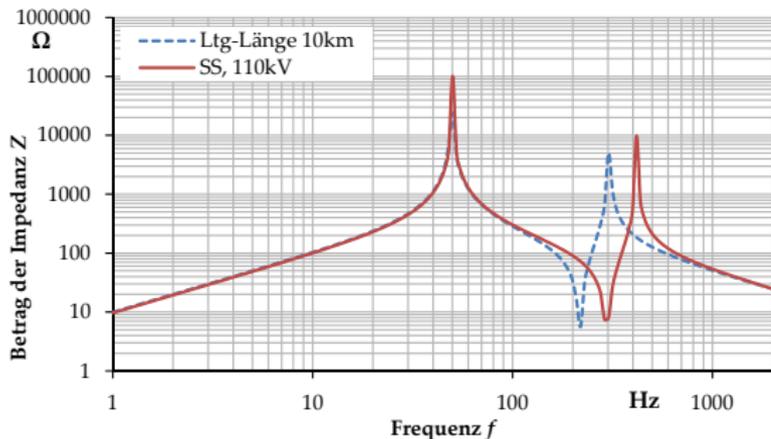
Frowein K.;
Beschreibung von Oberschwingungsquellen für die Berechnung des Erdschluss-Reststromes bei
Resonanz-Sternpunktterdung; Diplomarbeit; 2015; TU Dresden



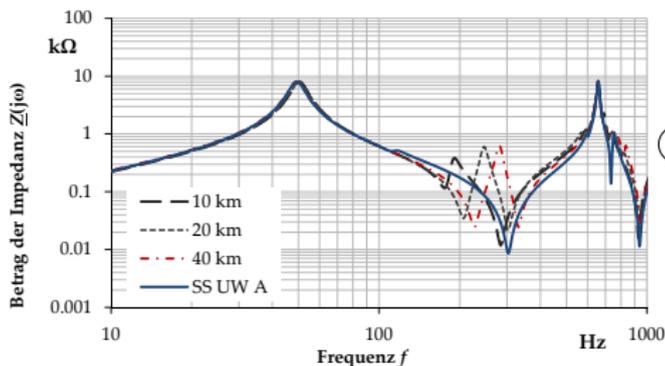
04 Harmonische im Erdschluss-Reststrom Wertung

1. Der Erdschluss-Reststrom eines MS-Netzes kann zuverlässig berechnet werden, wenn die Frequenzabhängigkeit des 110-kV-Netzes berücksichtigt wird.
2. Die Größenordnung der Oberschwingungsanteile im Erdschluss-Reststrom hängen wesentlich von der Fehler-/Erdungsimpedanz ab.
3. Messungen des Erdschluss-Reststromes I_{RES} auf der Sammelschiene der UW-Anlagen eignen sich nur bedingt für die Bestimmung maximaler Berührungsspannungen im Netz.

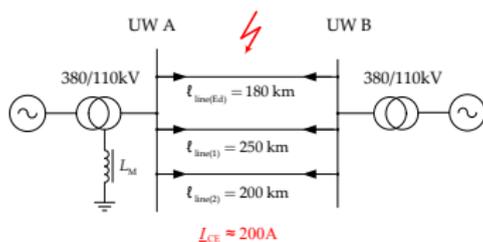
04 Harmonische im Erdschluss-Reststrom Eigenfrequenzen 110-kV-Netz, $I_{CE} = 400 \text{ A}$



04 Harmonische im Erdschluss-Reststrom Erdschluss im 110-kV-Verteilnetz

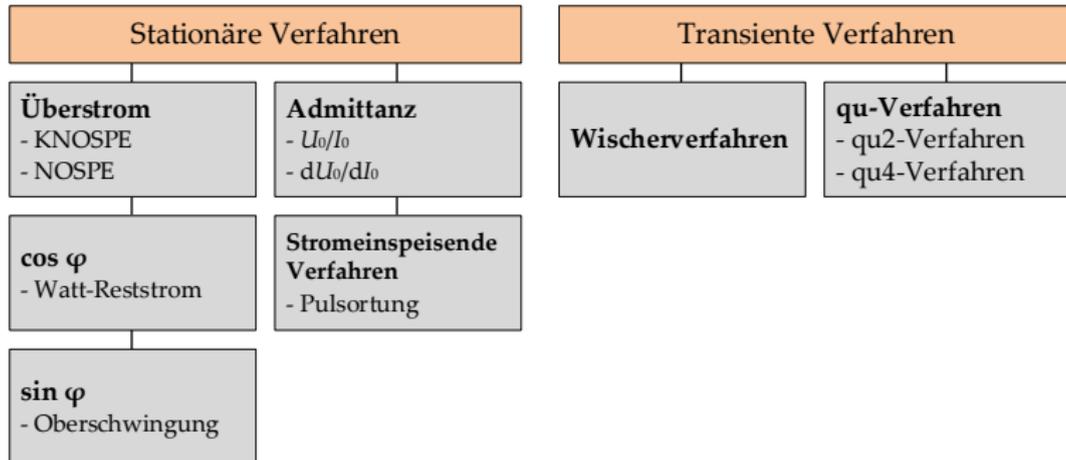


Fehler im Zuge der Freileitung



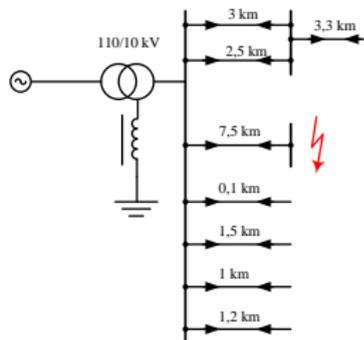
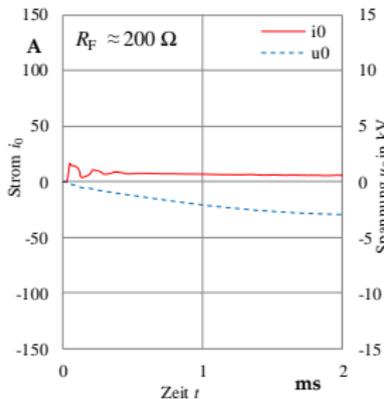
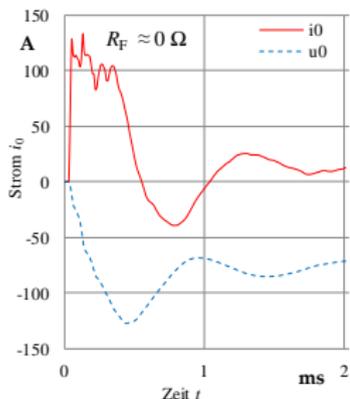
05 Neues und Entwicklungen

Ortung von Erdschlüssen



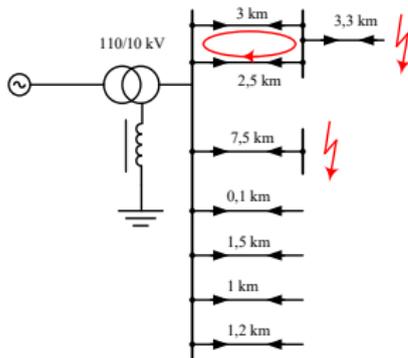
05 Neues und Entwicklungen

Ortung von Erdschlüssen - Wischerverfahren



05 Neues und Entwicklungen

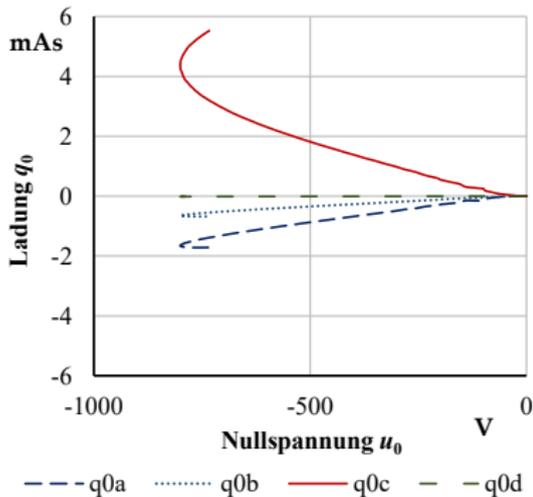
Ortung von Erdschlüssen - Wischerverfahren



- Standard-Wischerverfahren nur bis $R_F \approx 50 \Omega$
- Einsatz bei Kreisströmen (vermaschte Netze) nicht sinnvoll
- Ansprechschwelle (z. Bsp.: 30 %) kann zu später Öffnung des Messfensters zur Bewertung führen
- hohe Fehlerwiderstände:
 - Leiterseile auf Erde (trocken)
 - Bäume Winter: ($R_{F(\text{mess})} \approx 200 \text{ k}\Omega$)
 - Bäume Frühling: ($R_{F(\text{mess})} \approx 20 \text{ k}\Omega$)

05 Neues und Entwicklungen

Ortung von Erdschlüssen - modifizierte Wischerverfahren



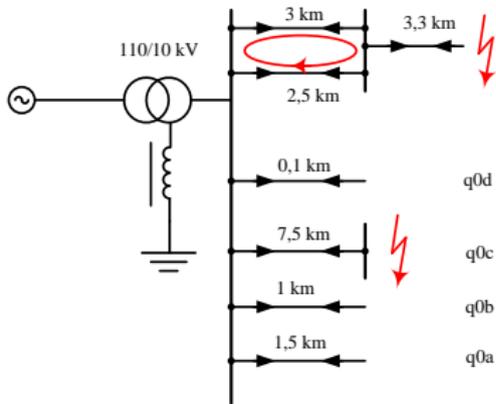
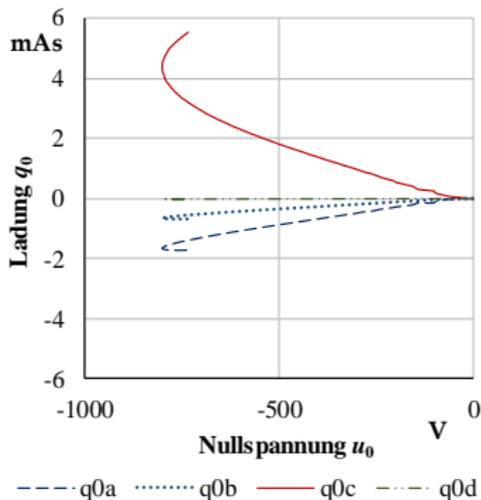
- Bewertung des über der Zeit integrierten Stromes:

$$u_o(t) = u_o(t_o) + \frac{1}{C_{\text{ers}}} \int_{t_o}^{t_e} i_o(t) dt$$

- korrekte Anzeigen bis $R_F \approx 5 \text{ k}\Omega$
- Ortung intermittierender Fehler
- Korrektur unsymmetrischer Lastströme

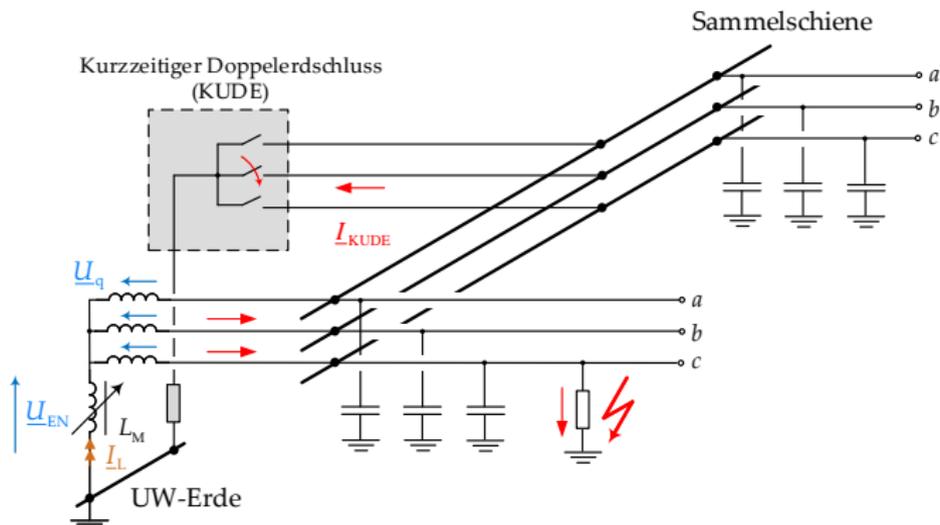
05 Neues und Entwicklungen

Ortung von Erdschlüssen - qu2-, qui-Wischerverfahren



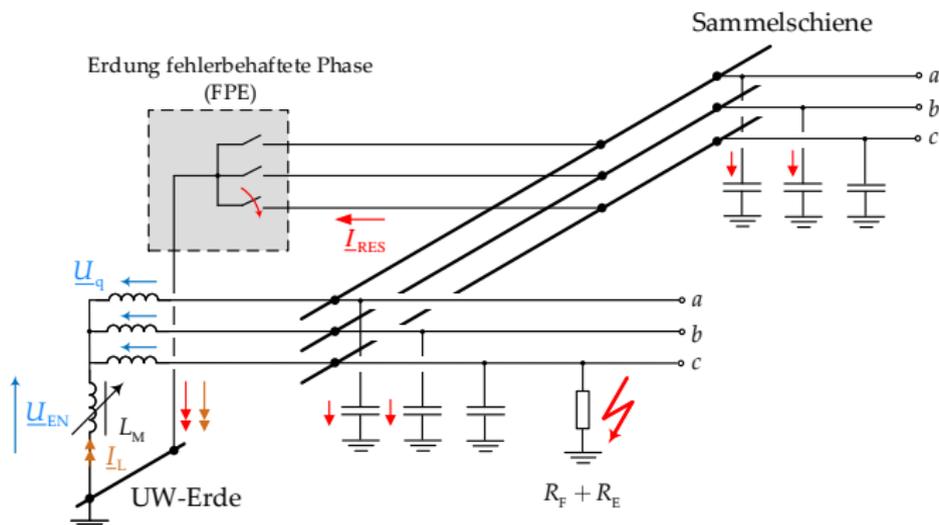
05 Neues und Entwicklungen

Ortung von Erdschlüssen - KUDE



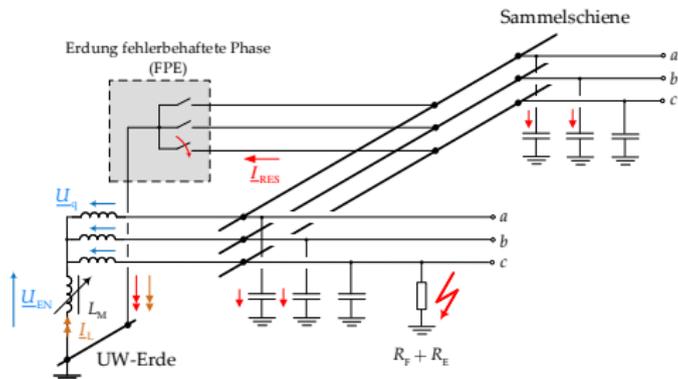
05 Neues und Entwicklungen

Reduzierung von Erdschluss-Restströmen - FPE



05 Neues und Entwicklungen

Reduzierung von Erdschluss-Restströmen - FPE



- Ströme an der Fehlerstelle auf langen Abgängen unklar
- parasitäre Lastströme in Erdungsanlagen?
- Forschungsbedarf

06 Zusammenfassung

1. Verzicht auf „Löschgrenze“/Obergrenze für Einsatz Resonanz-SPE.
2. Verzicht auf „Diskussionen“ um den Doppelerdschluss bei der Betrachtung von Beeinflussungen (DIN VDE 0845-6-2). Übernahme der Festlegungen zur NOSPE.
3. Grenzwerte des Erdschluss-Reststromes sollten aus den Festlegungen zur zulässigen Berührungsspannung U_{Tp} (DIN EN 50522) resultieren.
4. Modifizierte Wischerverfahren verbessern die Zuverlässigkeit der Erdschluss-Ortung.
5. Die „Entlastung“ der Fehlerstelle kann über verhältnismäßig einfache Verfahren realisiert werden (FPE, KUDE). Die Wirksamkeit in großen Netzen ist zu prüfen.



Klug sein besteht zur Hälfte darin, zu wissen, was man
nicht weiß.

Konfuzius (551 - 479 v. Chr.)

Uwe Schmidt

Hochschule Zittau/Görlitz

Fakultät Elektrotechnik und Informatik

Professur Energiesysteme/
Grundlagen der Elektrotechnik

02763 Zittau

Tel.: +49 (3583) 612-4307

E-Mail: uwe.schmidt@hszg.de