

# NETZSCHUTZ

Das Magazin für Schutztechnik

03 2017

## 06 Theorie & Praxis

Hintergründe & Methoden  
Neues aus der  
Energietechnik

## 28 Schutzgerätetechnik

Mehr Flexibilität & Präzision  
bei der Fehlerortung

## 58 Prüfgerätetechnik

Reale Messgrößengewinnung  
durch Netzsimulation

# ERDSCHLUSS SCHUTZ

Zuverlässige Detektion mit  
innovativen Technologien





# SPRECON

## AUTOMATISIERUNG & NETZSCHUTZ

Mit SPRECON bietet Sprecher Automation eine einheitliche und prozessunabhängige Automatisierungs- und Schutzplattform für den sicheren und stabilen Netzbetrieb in der Energieübertragung und Energieverteilung.

- Digitale Netzschutzgeräte, Kombinierte Netzschutz- und Leittechnikgeräte (SPRECON-E-P)
- Leittechnik- und Fernwirkgeräte (SPRECON-E-C und SPRECON-E-T3)
- Erweiterte gerichtete Erdschluss- und Kurzschlussanzeige (SPRECON-EDIR)
- Durchgängige Prozessvisualisierung (SPRECON-V)

SPRECON erfüllt die neuen Standards für IT-Sicherheit in kritischen Infrastrukturen und ist daher für den Einsatz in Übertragungs- und Verteilnetzen bestens geeignet.

Sprecher Automation und seine Unternehmensprozesse sind nach ISO 27001 zertifiziert.

# INHALT



### ERDSCHLUSSSCHUTZ

Sternpunktbehandlung und Erdschlusschutz gehen immer einher und gehören im deutschsprachigen Raum wohl zu den meistdiskutierten Bereichen der Netz- und Schutztechnik. Vor allem die mehrheitlich kompensierten Mittel- und 110-kV-Netze, die sich durch ihre hohe Versorgungssicherheit und geringen Ausfallzeiten auszeichnen, treiben die Entwicklungen von neuen Ortungsmethoden und Zusatzeinrichtungen seit genau 100 Jahren voran.

Dazu gibt es auf dem Schutzgebiet aktuell einige Veränderungen. Beispielhaft genannt sei die Umstellung von resonanz- auf resistanzgeerdete Netze in manchen städtischen Gebieten mit altem Kabelbestand. Oder der Effekt von geringen oberwellenbehafteten Erdschlussströmen aufgrund von Umrichtereinspeisungen. Die Liste der zu beachtenden Kriterien ist lang, wenn es um die Wahl der richtigen Erdschlusschutzzeineinrichtung geht.

### THEORIE & PRAXIS

- 06** Paradigmenwechsel in der Prüftechnik
- 16** Oberwellenverfahren 3. vs. 5. Harmonische
- 22** Zukunft der Netz-Sicherheit

### SCHUTZGERÄTE

- 28** Etappen der Innovation Der Wert der Nullleistung
- 34** Fahrgastsicherheit mit Hilfe der Knospe
- 40** Neue Herausforderungen, neue Lösungen
- 46** Digitale Schutzgeräte erfassen Erdschlüsse präzise
- 52** Eindeutige Fehlerortung trotz ständig wachsender Verkabelung

### PRÜFGERÄTE

- 58** Reale Messgrößengewinnung durch Netzsimulation

### AKTUELLES/TERMINE

- 64** Konferenzen, Tagungen, Seminare
- 64** Impressum



## Netzschutztechnik

Aus der Reihe Anlagentechnik für elektrische Verteilungsnetze

Der Netzschutztechniker und Betreiber elektrischer Verteilungsnetze findet in diesem Band Ratschläge für die Praxis. Neben der Beschreibung der Funktion der Leitungs-, Transformatoren- und Anlagenschutzeinrichtungen, der selektiven Erdschlusserfassung, Spannungs- und Verstimmungsgradregelung werden Hinweise für die Auswahl, Inbetriebsetzung und Betriebsführung gegeben. Besonderer Wert wird auf allgemein gültige Einstellregeln und Prüfpfehlungen gelegt. Behandelt sind auch Messwandler, Hilfsenergieversorgung und Schaltfehlerschutz sowie Kennzeichnungssystematiken für Betriebsmittel und Schaltungsunterlagen. Es wurden in der 5. Auflage Aktualisierungen und Ergänzungen vorgenommen. Diese betreffen insbesondere die Anforderungen an den Schutz bei regenerativen Erzeugern durch die Einführung der VDE-Anwendungsregeln für Einspeiser im Mittelspannungs- und 110-kV-Netz, Auswirkungen auf den Staffelpfad und die Schutzprüfung. Erkenntnisse beim Einsatz von Integrierten Schutz- und Steuereinheiten, Hinweise zum Netzwiederaufbau nach einem Blackout, und Prüftechnologien für die Inbetriebnahme- und Turnusprüfung von Wandlern und Schutzrelais sowie die Berücksichtigung des Standes der IEC 61850 sorgen für eine Anwendung des neusten Standes der Technik. Mit diesem Fachbuch soll dem für den Netzschutz verantwortlichen Praktiker – und hier insbesondere dem „Einzelkämpfer“ in kleineren Unternehmen – Hinweise für seine tägliche Arbeit gegeben werden. Aber auch der mit der Planung, Inbetriebnahme und dem Betrieb Beauftragte ist angesprochen. Ebenso ist der Band für die Ausbildung zur Erlangung der Schaltberechtigung und als Nachschlagewerk für den Netzdispatcher und das Schaltpersonal gedacht.

### Inhalte

- Aufgaben der Schutztechnik
- Fehlerarten
- Begriffe, Relaisstypenschlüssel, Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen
- Wirkungsweise von Schutzsystemen
- Messwandler
- Leitungsschutz
- Transformatorenschutz
- Erdschlussspulenschutz
- Kupplungsschutz
- Sammelschienen- und Anlagenschutz
- Kondensatorenschutz
- Erdschlussschutz
- Einsatz digitaler Schutzrelais
- Automatisierungseinrichtungen
- Schutz in Kleinkraftwerken und dezentrale Einspeisungen
- Schaltfehlerschutz und Synchrocheck
- Nebenanlagen
- Prüfungen
- Schaltpläne und Kennzeichnungen in Schaltanlagen
- Störwerterfassung und Fehlerortung
- Normen und Vorschriften



EW Medien und Kongresse GmbH

**Netzschutztechnik**  
Rolf Rüdiger Cichowski (Hrsg.)  
Walter Schossig | Thomas Schossig  
6. Auflage 2016, 11,2 x 16,5 cm,  
312 Seiten vierfarbig, kartoniert  
38,40 €  
ISBN 978-3-8022-1163-8

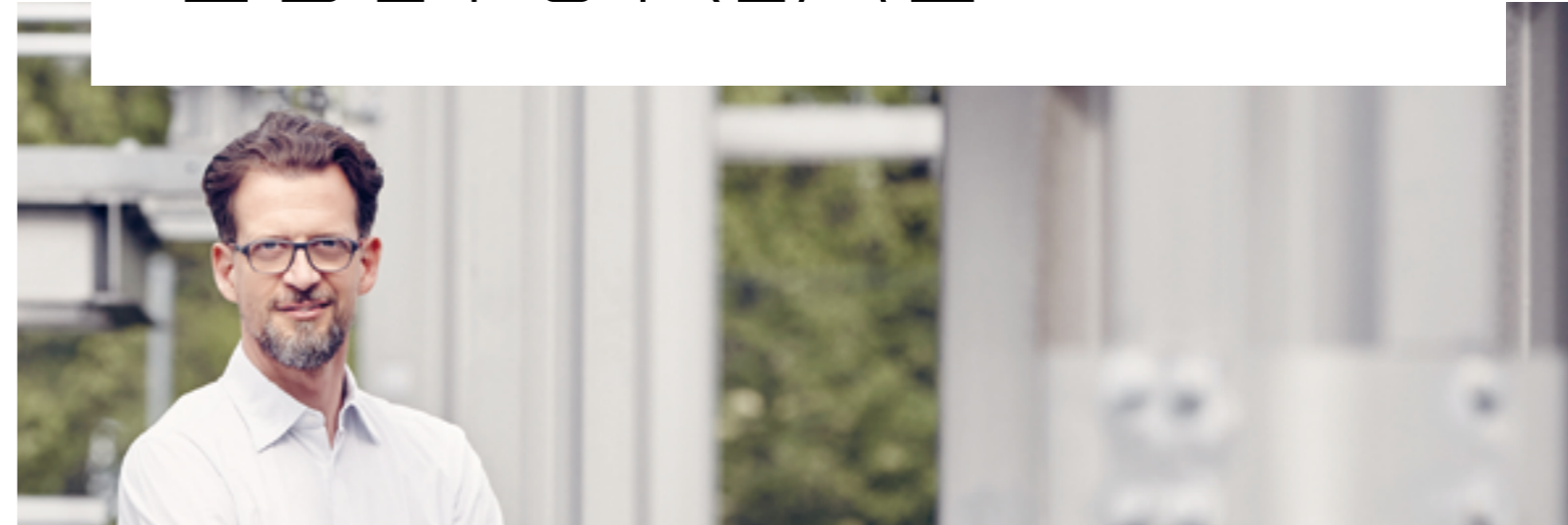
Auch als E-Book erhältlich!

Digitale Text und Abbildung  
können Sie anfordern unter:  
[alexandra.linke@ew-online.de](mailto:alexandra.linke@ew-online.de)

EW Medien und Kongresse GmbH  
Buchverlag | Fachinformationen  
Montebruchstraße 20  
45219 Essen  
Telefon: 0 20 54.924-150  
Telefax: 0 20 54.924-139  
E-Mail: [alexandra.linke@ew-online.de](mailto:alexandra.linke@ew-online.de)  
Internet: [www.ew-online.de](http://www.ew-online.de)  
Shop: [www.energie-fachmedien.de](http://www.energie-fachmedien.de)

Wissen ist unsere Energie.

# EDITORIAL



**Peter Schitz**

Herausgeber und  
Chefredakteur

Liebe Kolleginnen und Kollegen,

rechtzeitig vor Jahresende 2017 melden wir uns bei Ihnen mit der dritten Ausgabe unseres Magazins zum Thema Erdschlussschutz.

In meiner persönlichen Praxis hat dieser Bereich der Schutztechnik wohl am längsten gebraucht, um Zugang zu finden – und es hat die meiste Erfahrung erfordert, um zu den tatsächlichen Ursachen und Zusammenhängen des Erdschlussschutzes und seiner fehlerfreien Feststellung sowie Ortung vorzudringen. Gewiss keine Geheimwissenschaft und doch fast geheimnisvoll durch das Zusammenwirken unterschiedlichster Faktoren und Umstände.

Vielleicht ist es die „Königsdisziplin“ unserer Branche, jedenfalls bietet der Erdschlussschutz jede Menge spannenden Stoff zur Lektüre durch seine außergewöhnliche Vielseitigkeit. Zusätzlich bereichert wird dieses Kapitel durch neue Schutzgeräteentwicklungen und neue geografische Einsatzbereiche. Die Autoren und das Netzschutz-Team haben sich in dieser Ausgabe große Mühe gegeben, Ihnen Informationen zur Verfügung zu stellen, zu denen Sie in dieser Form und Aufbereitung in keinem anderen Medium Zugang finden werden.

Den Autoren dieser Ausgabe gilt daher mein besonderer Dank. Denn nur durch ihre Offenheit und Bereitschaft, ihr Wissen zu teilen, ist die Herausgabe dieses Magazins möglich. Wenn Sie als Lesende Fragen oder Ergänzungen zu einem Artikel haben, freuen wir uns über Ihre Nachricht. Eine Auswahl dieser Beiträge stellen wir online zur Diskussion auf unserer „Frage & Antwort“-Seite.

Zugleich geht mein Dank an Sie, liebe Abonnenten und Abonnentinnen! Mit Ihrer Abo-Bestellung tragen Sie den entscheidenden Teil zum Bestehen der Informationsplattform NETZSCHUTZ – das Magazin für Schutztechnik bei.

Am Ende des Editorials und des Kalenderjahres möchte ich Ihnen einen erfolgreichen beruflichen Abschluss des alten und einen angenehmen Wechsel in das neue Jahr wünschen. Die nächste Ausgabe ist dem Lichtbogen-schutz gewidmet und erscheint im März 2018 – alles Gute bis dahin!



# IMMER BESSER INFORMIERT

NUR IM ABO  
ERHÄLTlich!

Mit dem Jahres-Abo erhalten Sie  
- 4 Papier-Ausgaben für bis zu  
5 KollegInnen an einer Adresse und  
- Online Zugang zu allen bisher  
erschienenen Artikeln für 1 Jahr

Bestellungen unter  
[www.netzschutz-magazin.com](http://www.netzschutz-magazin.com)  
oder mit dem nebenstehenden  
Bestellformular per Mail an  
[abo@netzschutz-magazin.com](mailto:abo@netzschutz-magazin.com)

Das Magazin für Schutztechnik



## THEMEN 2018

- Lichtbogenschutz**  
März 2018
- Überstromzeitschutz**  
Juni 2018
- Stromwandler**  
September 2018
- Transformatordifferentialschutz**  
Dezember 2018

NETZSCHUTZ

# NETZSCHUTZ

Das Magazin für Schutztechnik

## JA, ICH MÖCHTE ABONNIEREN!

Mit einem Abonnement ist der Bezug von bis zu 5 Ausgaben pro Erscheinung und Lieferadresse möglich. Dazu einfach die weiteren EmpfängerInnen eintragen und Heft kommt auf den Tisch. **Online-Zugang inklusive.**

Anrede / Akad. Titel	_____	Rechnungsadresse	_____
Vor- / Nachname	_____	Strasse	_____
Position	_____	PLZ	_____
Firma	_____	Stadt	_____
Außenstelle / Filiale	_____	Bundesland	_____
E-Mail	_____	Land	_____
UID Nummer	_____	Telefonnummer Festnetz	_____
		Telefonnummer Mobil	_____

2. EmpfängerIn		4. EmpfängerIn	
Anrede / Akad. Titel	_____	Anrede / Akad. Titel	_____
Vor- / Nachname	_____	Vor- / Nachname	_____
3. EmpfängerIn		5. EmpfängerIn	
Anrede / Akad. Titel	_____	Anrede / Akad. Titel	_____
Vor- / Nachname	_____	Vor- / Nachname	_____

Vermerk / Hinweise

Lieferadresse	<input type="checkbox"/> wie Rechnungsadresse	<input type="checkbox"/> Ich habe die <b>Allgemeinen Geschäftsbedingungen</b> gelesen und akzeptiere diese vollinhaltlich.
Andere Lieferadresse	_____	<b>Abopreise:</b>
Strasse	_____	<b>Österreich</b> EUR 158,00 netto (EUR 189,60 brutto inkl. Versand)
PLZ	_____	<b>Deutschland</b> EUR 158,00 netto (EUR 199,20 brutto inkl. Versand)
Stadt	_____	<b>Schweiz</b> EUR 158,00 netto (EUR 166,00 brutto inkl. Versand)
Bundesland	_____	
Land	_____	

Ort, Datum \_\_\_\_\_ Unterschrift \_\_\_\_\_

Das ausgefüllte und unterschriebene Abonnementformular senden Sie bitte an:  
NETZSCHUTZ Magazin - EET Verlag GmbH, Westbahnstraße 7/6a, 1070 Wien,  
Österreich oder per Mail an [abo@netzschutz-magazin.com](mailto:abo@netzschutz-magazin.com)



Mit diesem QR-Code werden Sie zu unserem  
Online-Formular geleitet.



# PARADIGMEN- WECHSEL IN DER PRÜFTECHNIK



**Lothar H. Fickert,** geb. 1949, promovierte an der Technischen Universität Wien, danach 25 Jahre lang Schutz- und Anlagentechniker in Netzplanung und Betrieb. Seit 1998 Professor und Vorstand des Institutes für Elektrische Anlagen an der Technischen Universität Graz mit den Forschungsschwerpunkten elektrische Energiesysteme, Versorgungssicherheit und Schutztechnik. Er arbeitet in verschiedenen nationalen und internationalen Organisationen (IEC, CIGRE, CIRED, VDE, ÖVE usw.) mit und hat acht Patente. Seit 1. Oktober 2017 emeritierter Universitäts-Professor.

Die Prüfung eines gesamten Schutzsystems umfasst das Testen der Funktionalität der Hardware-Komponenten ebenso wie das der Einstellwerte. Grundlegend für die Anforderungen an Prüfungsumfang und Risikosicherheit ist die gewählte Schutzphilosophie sowie ein geschärftes Verständnis der Unterschiede zwischen klassischem Kurzschlusschutz und komplex programmiertem Erdschlussschutz.

Ein Kernthema beim Testen der Funktionalität der Hardware-Komponenten ist die Überprüfung der Einhaltung der Funktionsparameter der einzelnen Schutzfunktionen (Schutzrelais), wie z. B. Ansprechwerte, Verzögerungen, Steuerung durch externe Binärsignale, Auslösekontakte. Die Hardware-Kontrolle externer Einrichtungen ist vollständig, wenn sie die korrekte Ansteuerung der Leistungsschalter („Ausschaltprobe“, „AWE-Prüfung“), deren Rückmeldungen, die Erfassung der Strom- und Spannungssignale („Wandlerprüfung“) und die Meldungs-Übertragung und Visualisierung z. B. in Leitstellen („Meldungskontrolle“) umfasst.

Schwieriger ist die Überprüfung der vorgegebenen Einstellwerte entsprechend einer gewählten netzspezifischen Schutzphilosophie. In vielen Fällen können bewährte Regeln angewendet werden. Doch ihre Gültigkeit ist begrenzt. Nimmt man den Kurzschlusschutz in radial gespeisten Mittelspannungsnetzen ohne Zwischeneinspeisungen in Form eines Überstrom-Zeit-Staffelschutzes her, erkennt man die Zwiespältigkeit „bewährter Rezepte“. Denn ändert sich das Netzsystem, z. B. durch stromstarke Zwischeneinspeiser von Kurzschlussströmen, ist die netzspezifische Schutzphilosophie unbedingt mitanzupassen. Das kann so weit gehen, dass neben Hardware-Komponenten auch deren Einstellwerte und fallweise sogar

die gesamte Schutzphilosophie verändert werden muss, um die Schutzziele befriedigend einzuhalten.

In die Wahl der Schutzphilosophie fließt ein dichtes Bündel von Maßgaben ein. Sie orientiert sich an den Anforderungen an Schutzzumfang, Selektivität, Betriebserfordernissen – einschließlich Risiko-Analysen – und berücksichtigt die im Störfall auftretenden Fehlerbilder, die auftretenden Ströme und Spannungen sowie die historischen Gegebenheiten und finanziellen Restriktionen.

Vorausgeschickt sei, dass in diesem Artikel unter Erdschlussschutz diejenigen Schutzeinrichtungen und -systeme verstanden werden, die einen einpoligen Isolationsverlust eines strombegrenzend geerdeten Mittel- oder Hochspannungsnetzes – gelöscht, teilkompensiert, strombegrenzend geerdet – erfassen.

## ÜBERPRÜFUNG DER EINZELNEN ERDSCHLUSSSCHUTZFUNKTIONEN – RELAISPRÜFUNG

Hierbei werden die Erdschlussschutz-Funktionen auf Geräte-Ebene durch Einspeisung von – in der Regel – Summenstrom oder Summenströmen und – je nach Schutzverfahren – einer Verlagerungsspannung geprüft. Funktionskontrollen im Sinne einer Grobprüfung

beschränken sich auf das Ansprechen oder Nicht-Ansprechen und werden oft mittels Prüftastern durchgeführt.

Inbetriebnahme- oder Turnusprüfungen kontrollieren hingegen, ob die Ansprechwerte und – wiederum je nach Schutzverfahren – allfällige Verzögerungszeiten den vorgegebenen Einstellwerten entsprechen. Sie werden oft mittels mobiler Strom-/Spannungsquellen realisiert. Dabei ist von Fall zu Fall laut Angaben des Geräteherstellers vorzugehen.

Das zeigt sich am Beispiel der wattmetrischen Erfassung – wattmetrisches Relais in cos-phi-Schaltung: Für eine solche Prüfung werden bei der Funktionskontrolle eine Verlagerungsspannung und ein mit der Verlagerungsspannung annähernd gleichphasiger Summenstrom im Auslösesinn bzw. im Sperrsinne eingespeist und so wird die „JA/NEIN“-Entscheidung geprüft. Bei der Inbetriebnahme- oder Turnusprüfung werden diese Werte laut dem produktspezifischen Auslöse- und Sperrdiagramm in verschiedenen grenzwertigen Kombinationen mit feinen Variationen eingespeist und wird das Ansprechverhalten geprüft. Wesentlich ist, dabei netzrelevante und realistische Werte zu verwenden.

Der Vorteil dieser Prüfverfahren liegt in der verhältnismäßig einfachen Handhabung; als Nachteil, besonders bei der Ansprechwertprüfung, ist der Aufwand an geschultem Personal und komplexen Prüfgeräten anzuführen.

### PRAKTISCHE NOTWENDIGKEIT DER SYSTEMBASIERTE PRÜFUNG DER ERDSCHLUSSSCHUTZFUNKTION

Nach den jahrzehntelangen Erfahrungen des Verfassers liegt das Problem einer unbefriedigenden Funktion von Erdschlussschutz-Einrichtungen aber nicht im Bereich der Gerätetechnik, sondern in Schwächen im Systemkonzept des Erdschlussschutzes, also im Erdschluss-Engineering, einer systemischen Herangehensweise basierend auf der Methodik der symmetrischen Komponenten, speziell des Nullsystems.

An dieser Stelle ist mir wichtig, den Gegensatz vom „klassischen“ Kurzschlussschutz zum Erdschlussschutz und dessen Komplexität herauszustellen.

### Funktionalität des klassischen Kurzschlussschutzes

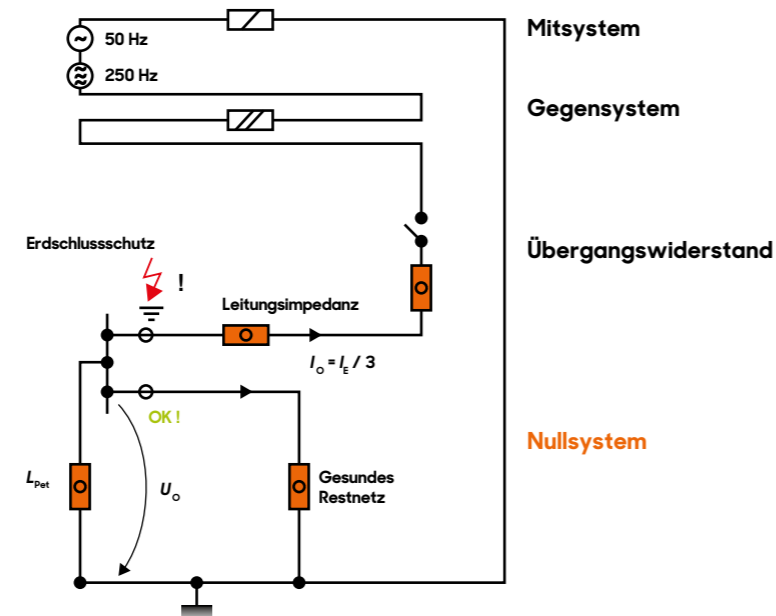
- Fehlerbilder: Phase-Phase-Fehler am gleichen Fehlerort
- Fehlerstrom ist deutlich größer als der maximale Betriebsstrom
- schutztechnisch relevante Fehlerschleife
  - Spannungsquelle (vorgelagertes Netz)
  - Einspeisetrafo
  - (kurzgeschlossene) Leiterschleife

Im Wesentlichen bestimmt beim Kurzschlussschutz das Netz zwischen der Schutzeinrichtung und dem Fehlerort („in Vorwärtsrichtung“) das Verhalten der Schutzeinrichtung!

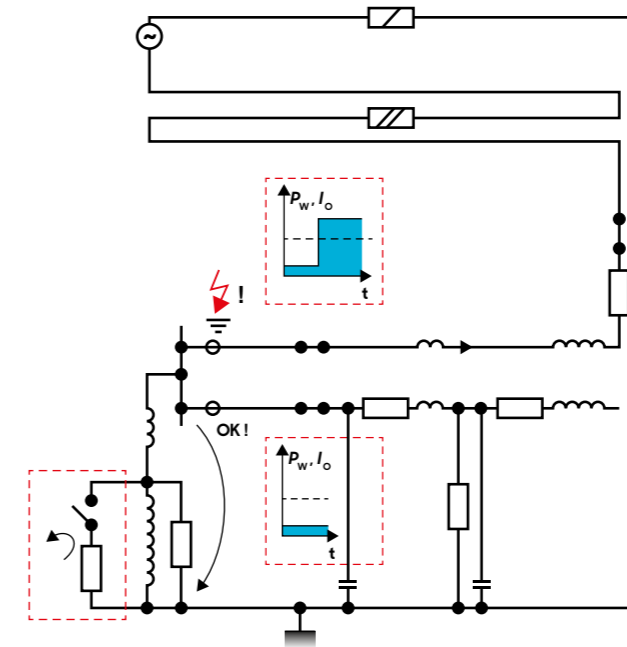
### Funktionalität des Erdschlussschutzes

Anders ist es beim Erdschlussschutz (**Abb. 1**).

- Fehlerbilder: Phase-Erde-Fehler (Isolationsverlust) am gleichen Fehlerort
- Fehlerstrom ist nicht größer als der maximale Betriebsstrom
- schutztechnisch relevante Elemente
  - Spannungsquelle (vorgelagertes Netz samt Oberschwingungen)
  - Einspeisetrafo
  - Sternpunktbildung (eigener Sternpunktbildner bzw. für die Ausbildung eines Nullsystems geeigneter Transformator)
  - Löschkspule bzw. Strombegrenzungswiderstand/-drossel
  - Daten der fehlerbehafteten Leiterschleife, speziell im Nullsystem
  - Übergangswiderstand
  - gesundes Restnetz



**Abb. 1** Für den Erdschlussschutz relevante Komponenten eines Netzes (Fehler auf Stickleitung)



**Abb. 2** Detailliertes Komponenten-Ersatzschaltbild für das wattmetrische Verfahren mit Wattreststrom-Erhöpfung

Komplexer sind die Verhältnisse beim Summenstrom: Hier ist in erster Linie die Parallelschaltung von

- Löschkspule
- Verlustwiderständen im Nullsystem
- Netzkapazitäten

maßgeblich. Anders als beim Kurzschlussschutz, bei welchem das Netz zwischen Schutzeinrichtung und Fehlerort das Verhalten der Schutzeinrichtung bestimmt („in Vorwärtsrichtung“), ist es hier: Beim Erdschlussschutz bestimmt im Wesentlichen das Netz im Rücken der Erdschluss-Schutzeinrichtung deren Verhalten!

In zweiter Linie beeinflusst ein allfälliger Übergangswiderstand im Sinne eines stromreduzierenden Vorwiderstandes den Summenstrom, wobei hier realistischerweise auf Erde liegende, gerissene Leiterseile zu erwähnen sind.

Eine weitere stromreduzierende Wirkung kommt der Schleifenimpedanz zwischen Einbauort der Erdschluss-Schutzeinrichtung und Fehlerort zu: Diese Impedanz wirkt sich erst bei stromstarken Erdschlüssen zufolge einer niederohmigen Sternpunktbehandlung aus.

Diese Abhängigkeit des Verhaltens der Erdschluss-Schutzeinrichtung von Systemparametern des im Rücken der Schutzeinrichtung liegenden Netzes wird wiederum, wie oben, am Beispiel (**Abb. 2**) der wattmetrischen Erfassung gezeigt (wattmetrisches Relais).

Die relevanten Elemente sind in **Abb. 1**, getrennt nach Mit-, Gegen- und Nullsystem, wiedergegeben.

Gerade bei gelöschten Netzen sind die Querzweige, nämlich die Petersen-Spule(n) und die Kapazitäten des gesunden Restnetzes, die bestimmenden Elemente: Wenn das Netz gut kompensiert ist, stellt resultierende Parallelschaltung eine äußerst „wirksame“ Strombremse dar.

Denn die Verlagerungsspannung wird durch den Spannungsteiler

- Übergangswiderstand
- (hochohmige) Parallelschaltung bestimmt.

Der Reststrom enthält folgende Komponenten.

- Blindreststrom, 50 Hz
- Wirkreststrom, 50 Hz, im Beispiel durch eine Wattreststrom-Erhöpfung verstärkbar
- Oberschwingungsstrom

In der nachfolgenden Abbildung ist der im Zuge eines Erdschlussversuchs aufgezeichnete Strom an der Fehlerstelle wiedergegeben (**Abb. 3**).

In **Abb. 3** ist der gesamte Erdschlussstrom dargestellt (rot) und die 50-Hz-Komponente als schwarze Linie herausgefiltert. Man erkennt, dass im realen Fehlergeschehen dieses Netzes die 5. und 7. Oberschwingung überwiegen und



# 100% PRAXIS 100% TAUGLICH

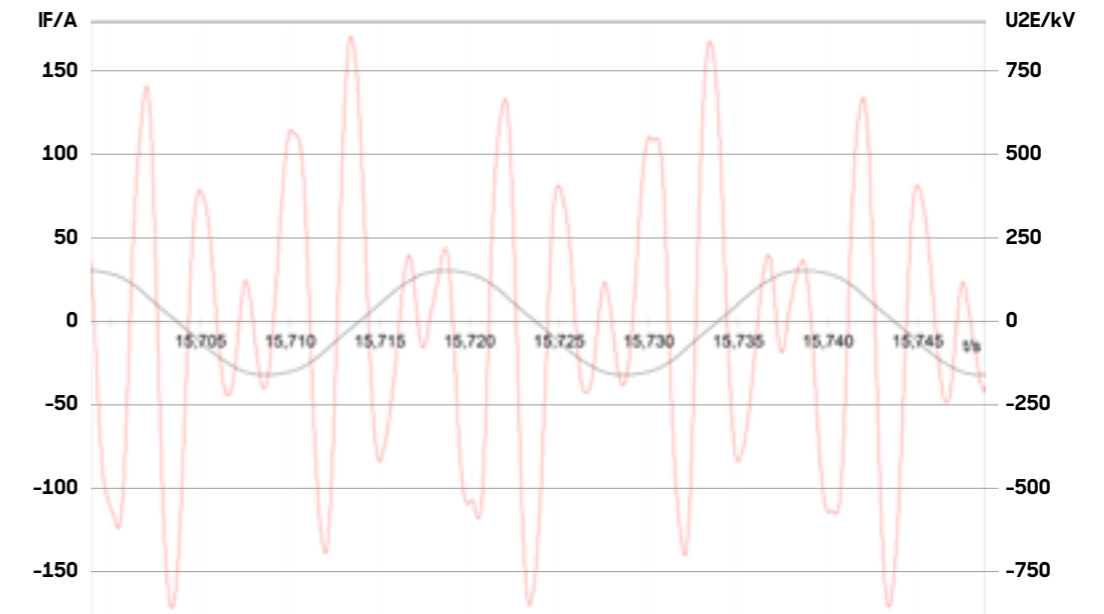
HOCH-  
SPANNUNG  
MIT  
SICHERHEIT

Erhältlich ausschließlich im Jahres-Abo.  
**Jetzt direkt online bestellen!**  
[www.netzschutz-magazin.com](http://www.netzschutz-magazin.com)

Die NETZSCHUTZ-Redaktion ist ein junges Team mit Sitz in Wien und einem ganz besonderen Verhältnis zur Technik, das es einprägsam mit Text und Grafik in Szene setzt – durch klare Gestaltung, reine Formen und frische Farben. Weil visueller Ansprechwert die Lesbarkeit erhöht und die Neugier weckt.

NETZSCHUTZ

Abb. 3 Real gemessener Summenstrom (Erdschlussstrom) in einem 110-kV-Netz



die 50-Hz-Komponente von der Schutzeinrichtung durch analytische Verfahren bestimmt werden muss.

Erst nach der Filterung wird die relative Phasenlage der 50-Hz-Komponente des Stroms zu der 50-Hz-Komponente der Verlagerungsspannung bestimmt: Wie man aus **Abb. 2** ersieht, wird im Nullsystem die Wirkleistung von der Serienschaltung Mit- und Gegensystem über die Fehlerstelle in Rückwärtsrichtung über die Erdschluss-Schutzeinrichtung zu den Wirkleistungsverbrauchern im Rücken der Erdschluss-Schutzeinrichtung eingespeist. Physikalisch heißt das nichts anderes, als dass durch die (symmetrische) Quelle in den mit Erde leitend verbundenen Netzelementen, wie z. B. der Petersen-Spule, den Wattreststromerhöhungswiderständen und beidseitig geerdeten stromführenden Kabelschirmen, Wärme erzeugt wird, also elektrische Wirkleistung umgesetzt wird.

Wenn die Verschiebung größer als  $90^\circ$  ist, d. h. Nullsystem-Wirkleistung in Richtung Sammelschiene transportiert wird, wird auf „Auslösung“ entschieden. Im Gegenzug bedeutet ein Winkel kleiner als  $90^\circ$ , dass der Erdschluss in Rückwärtsrichtung liegt (**Abb. 4**).

Und genau dieser Richtungsentscheid  $90^\circ \pm \delta$  hängt von parasitären, in der Regel nicht durch die Schutzprojektierung festgelegten Parametern wie Eisen- und Kupferverlusten in der Petersen-Spule sowie den Schirmerwärmungen ab!

Im Allgemeinen sind die Wattrestströme, verglichen mit den sonstigen Blindströmen, sehr klein, sodass der entscheidende Winkel  $\delta$  sehr klein ist. Noch verschlimmert wird die Situation dadurch, dass wegen der zwischen Einbauort der Erdschluss-Schutzeinrichtung und Fehlerort zufließenden kapazitiven Ströme im Nullsystem im Summenstrom die induktive Komponente mit zunehmender Fehlerentfernung weiter zunimmt und der Winkel  $\delta$  noch kleiner wird.

Ein Zahlenbeispiel veranschaulicht diesen Zusammenhang: Ein 20-kV-Netz mit beträchtlichem Anteil an Kabeln mit einem spezifischen Erdschlussstrom von  $I_{CE}' = 2,5 \text{ A/km}$  habe einen kapazitiven Gesamt-Erdschlussstrom von  $I_{CE} = 400 \text{ Amp}$ . Die Überkompensation betrage  $v = 4 \% = 0,04 \text{ [p.u.]}$ . Der Fehlerort wird in  $I_F = 12 \text{ km}$  Entfernung angenommen. Die Petersen-Spule habe Wärmeverluste von  $P_{\text{Verlust}} = 30 \text{ kW}$ .

Damit ergibt sich für den (induktiven) 50-Hz-Blindstrom an der Fehlerstelle selbst ein Wert von  $I_F = 400 \text{ A} \times 0,04 = 16 \text{ A}_{\text{induktiv}}$ .

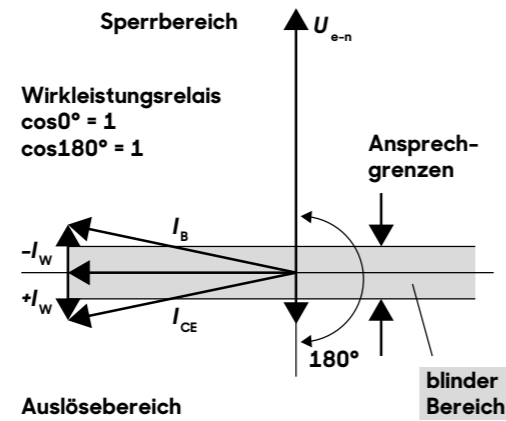
Durch die Zwischeneinspeisung von  $12 \text{ km} \times 2,5 \text{ A/km} = 30 \text{ A}_{\text{kapazitiv}}$  beträgt der 50-Hz-Strom am Sammelschienenabgang allerdings schon  $I_{\text{Relaisblind}} = 16 + 30 = 46 \text{ A}_{\text{induktiv}}$ .

Der Watterstrom der Petersen-Spule ergibt sich als  $I_{\text{Watt}} = P_{\text{Verlust}} / U_{\phi 2} = 30000 / (20000 / \sqrt{3}) = 2,6 \text{ A}$ , und der Verschiebungswinkel  $\delta = \arctan(I_{\text{Watt}} / I_{\text{Relaisblind}}) = \arctan(2,6 / 46) = 3,2^\circ$ . Für eine sichere Diskriminierung sollte der Ansprechwert um 50 % kleiner als das Nutzsignal sein, also  $1,6^\circ$  betragen. Im Zeitbereich entspricht das einer Genauigkeit von  $89 \mu\text{s}$ , die durch Filterung aus einem wie in **Abb. 3** dargestellten Signal realistisch innerhalb von  $0,5 \text{ s}$  gewonnen sein muss, ganz zu schweigen von den Wandlergenauigkeiten.

Man erkennt an diesem Beispiel die Problematik der Erdschlussrichtung, welche *nicht* durch die Kleinheit des Wirkstroms, der immerhin  $2,6 \text{ A}$  ausmacht, sondern durch die systembedingte Herabsetzung des relevanten Winkels hervorgerufen wird. Noch kritischer wird die Situation, wenn durch fehlerinduzierte Abschaltungen bereits Kapazitäten aus dem Netz entfallen sind.

Die Abhängigkeit der Erdschluss-Schutzeinrichtung von Systemgrößen liegt auch bei anderen Verfahren zur Ortung des Erdschlusses vor:

- Bei den Wischerverfahren bestimmen die verschiedenen Kapazitäten der gesunden Leitungen die Anzahl der resultierenden Eigenfrequenzen des Netzes und determiniert der Eintrittsmoment die Amplitudensituation.
- Beim Oberschwingungsverfahren wirkt sich die Mischung von Kabel- mit Freileitungstrecken, speziell in ländlichen Mischnetzen, oft in kritischer Weise auf die Funktionalität der Erdschluss-Schutzeinrichtungen aus.
- Bei Pulsortungsverfahren können Netzzubauten durch Kabel oder Abschaltungen von Kabelstrecken das Verhalten der Schutzeinrichtungen negativ beeinflussen.
- Selbst bei stromstarken Ortungsmethoden, z. B. Distanzschutz bei niederohmigen Sternpunkten, kann die Netzkapazität die Richtungsentscheidung, je nach Art der Richtungsbestimmung, stören.



**Abb. 4 Auslösebereich (-winkel) und Sperrbereich (-winkel) beim wattmetrischen Erdschlussortungsverfahren**

Um diese Unsicherheiten bei einem gegebenen Netz für ein gewähltes Erdschlussschutz-System auszuschließen, empfiehlt sich folgende Vorgangsweise:

Stufe 1: Schutztechnische Analyse des Netzes im Hinblick auf bekannte kritische Punkte mittels Erdschluss-Engineering.

Stufe 2: Systembasierte Prüfung mit Strömen und Spannungen durch Simulation kritischer Fälle mittels eines Systemsimulators.

Ein solcher Systemsimulator kann z. B. ein hardwaremäßig realisiertes Netzmodell sein. Solche Netzmodelle sind allerdings nur bis zu einer eingeschränkten Komplexität handhabbar.

Bei komplexeren Netzen und Fragestellungen gibt es in jüngerer Zeit auch entsprechende Relais-Simulations-Software, welche in Verbindung mit Digital-Analog-Wandlern den Schutzeinrichtungen ein realistisches Fehlerbild vorgibt. Diese hat den Vorteil, verschiedene Systemkonfigurationen effizient nachzubilden und die Netzparameter einfach zu variieren.

#### ERDSCHLUSSVERSUCHE ALS TEST FÜR DIE GANZHEITLICHKEIT DES ERDSCHLUSS-ENGINEERING

Die vorstehend beschriebenen Prüfverfahren – Einzelprüfung der Erdschluss-Schutzeinrichtung, systembasierte Prüfung im Labor oder am Testplatz – haben eine immanente Schwachstelle: Was nicht durch den Netzschutz-Ingenieur, die Netzschutz-Ingenieurin konzipiert wurde, wird übersehen und nicht überprüft.

Erdschlussversuche sind die einzige Abhilfe im Sinne von ganzheitlichen Typentests für das Erdschluss-Engineering. Denn dieses umfasst wesentlich mehr als die Festlegung der Schutz-funktions-Parameter, nämlich die

- zu erwartenden typische Fehlersituationen,
- grenzwertigen Fehlersituationen,
- Hilfe bei der Abgrenzung, welche Fehlersituationen als nicht mehr selektiv erfasst werden sollen,
- Einbeziehung der Primärdaten- Ungenauigkeiten (Leitungsparameter, Wandler, ...),
- Einbeziehung der Funktionsgrenzen der Schutzgeräte,
- Berücksichtigung der Handhabbarkeit durch das Netzführungspersonal.

Durch den gesamtheitlichen Funktionsnachweis des Erdschlusserfassungs-Systems gestattet ein Erdschlussversuch die (stichprobenartige) Überprüfung großer Teile sowohl der Primärtechnik (Stromwandler etc.) als auch der Sekundärtechnik (Meldesysteme etc.) sowie des Menschen als Fehlerquelle.

Erdschlussversuche durchzuführen birgt das Risiko, dass es im Zuge des Versuchs zu einem Doppelerdschluss kommt. Die Gefahr besteht, doch es muss einem auch bewusst sein:

1. Statistische Wahrscheinlichkeit und Versuchsdauern von  $200 \text{ ms}$ : Die technische Argumentation beruht auf der Tatsache, dass früher die Messungen durch Ablesen von Messgeräten erfolgt sind und speziell die Sicherstellung einer gefahrlosen Strommessung (Kurzschließen der Amperemeter) sowie das Eintragen in Messlisten zeitaufwendig gewesen ist. Mit der heutigen Messtechnik sind Versuchsdauern von  $200 \text{ ms}$  ausreichend, um aussagefähige Ergebnisse zu erzielen. Durch diese kurze Zeit kommt es erfahrungsgemäß und auch auf Grund von Statistiken betreffend die Zeit zwischen dem Eintritt eines Erdschlusses und dem Übergang zu einem Doppelerdschluss zu *keinem* Doppelerdschluss mit all seinen unerwünschten Folgen. Diese Aussage wird durch Statistiken betreffend die Zeit zwischen dem Eintritt eines Erdschlusses und dem allfälligen Übergang in einen Doppelerdschluss unterstützt.

Kalkulierbares Risiko: Eine weitere Argumentation stellt auf die Pflicht des Netzbetreibers ab, das Netz (einschließlich der Schutzeinrichtungen) optimal funktionsfähig zu gestalten und zu erhalten. Gerade hier stellen erfahrungsgemäß Störungen aufgrund von Erdschlüssen einen beachtenswerten Punkt dar. Ein Erdschlussversuch unter den Bedingungen

- Bereitstellung von zusätzlichem Betriebspersonal,
- Bekanntheit von Fehlerart und Fehlerort,
- rasche Möglichkeit, qualifiziert einzugreifen,
- Sicherung der Fehlerstelle

ist als Beispiel für positives Risikomanagement zu werten. Er ist ein kalkulierbares Risiko, bei dem der Erkenntnisgewinn in Relation zu unerwarteten und u. U. nicht plangemäß verlaufenden Erdschlussstörungen oft überwiegt.





Die Beachtung folgender Punkte wird dazu empfohlen:

- Bestimmung einer typischen und kritischen Konfiguration, wobei die kritischen Konfigurationen je nach Verfahren unterschiedlich sind (s. vorstehender Abschnitt).
  - Die typische Konfiguration dient der Kalibrierung und Kontrolle der Grundeinstellungen.
  - Die kritische Konfiguration, z. B. bei Sonderschaltzuständen, prüft die Toleranz des Erdschlussschutzsystems bezüglich Parameterabweichungen.
- Begrenzung der Erdschlussdauer auf typ. 200 ms.
  - Die kurze Zeit verhindert erfahrungsgemäß einen Doppelerdschluss.
  - Die Zeitspanne von 200 ms entspricht 10 Perioden Fehlergeschehen, was für weitere Auswertungen (Fourieranalyse, ...) ausreicht. Auch sind alle Einschwingvorgänge abgeklungen.
- Verwendung von Schreibern mit durchgehender Aufzeichnung.
  - Dadurch entfallen Triggerprobleme, und die menschliche Ablesezeit entfällt.
- Verwendung von einigen Kanälen, falls realisierbar, bei Schreibern an der Fehlerstelle zur Dokumentation der Erdpotenziale an ausgewählten Stellen in der Umgebung (Potentialtrichter).
  - In der jüngeren Vergangenheit treten Erdungsfragen, z. B. nach der Spannungsverschleppung bei Erdschlüssen in Ortsnetzstationen, in den Vordergrund. Erdschlussversuche sind hier unschätzbare Informationsquellen!

## ZUSAMMENFASSUNG

Im Gegensatz zum Kurzschlusschutz bestimmt beim Erdschlussschutz im Wesentlichen das Netz im Rücken der Erdschluss-Schutzeinrichtung deren Verhalten. Das hat zur Folge, dass im Fehlerfall eine Vielzahl von Netzparametern schutztechnisch wirksam wird, welche im Erdschluss-Engineering bei der Konzeption des Erdschlussschutz-Systems zu berücksichtigen sind.

Der Nachweis der Funktionalität eines Erdschlussschutz-Systems besteht aus drei Stufen:

- der Einzelprüfung der Erdschluss-Schutzeinrichtung.
- der simulationstechnischen Überprüfung des Gesamtsystems mittels entsprechender Relais-Simulations-Software, welche in Verbindung mit Digital-Analog-Wandlern den Schutzeinrichtungen ein realistisches Fehlerbild vorgibt.
- Erdschlussversuche an kritischen Stellen, welche durch die stichprobenartige Überprüfung großer Teile der Primär- und der Sekundärtechnik den Funktionsnachweis eines erfolgreichen Erdschluss-Engineerings erbringen. Hier ist neben einer durchgehenden Aufzeichnung die Kürze eines Fehlerzustandes entscheidend: Eine Versuchsdauer von 200 ms stellt erfahrungsgemäß sicher, dass es zu keinem gleichzeitigen weiteren Fehler (Doppelerdschluss) kommt.

# OBERWELLEN- VERFAHREN 3. VS. 5. HARMONISCHE



**Oliver Skrbinjek,**  
geb. 1971, absolvierte  
eine Ingenieurausbil-  
dung mit der Fachrich-  
tung Elektrotechnik so-  
wie ein Studium mit  
dem Schwerpunkt Au-  
tomatisierungstechnik.  
Beschäftigt bei Energie  
Steiermark und für die  
Sekundärtechnik ver-  
antwortlich. Aktuelle  
Themenschwerpunkte:  
Standardisierung in der  
Sekundärtechnik mit  
schutztechnischen und  
systemübergreifenden  
Prinzipien sowie sekun-  
därtechnischen Grund-  
satzkonzepten.

#### Co-Autoren

Uwe Schmid, (Universität  
Zittau/Görlitz)  
Peter Schegner  
(TU-Dresden)  
Lothar Fickert (TU-Graz)  
Gernot Druml (Sprecher  
Automation GmbH)

**Abb. 1**  
Sternpunktbehandlung  
in Deutschland:  
■ Petersen-Spule  
■ starr geerdet  
■ isoliert

Gesetzliche Rahmenbedingungen und aktuelle Anforderungen an den Netzbetrieb fordern zunehmend eine schnellere und zuverlässigere Lokalisierung von 1-poligen Fußpunkten in kompensiert und isoliert betriebenen Verteilernetzen. Die Lokalisierung sollte so schnell wie möglich durchgeführt werden und der Fehlerstrom an der Fehlerstelle sollte keine signifikante Höhe annehmen.

In der Vergangenheit wurde bei den Erdschlussortungsverfahren die 3. harmonische Schwingung grundsätzlich nicht für die Erdschlussrichtungserfassung herangezogen, da sie in der verketteten Spannung von Verteilernetzen im gesunden Netzzustand so gut wie nicht vorkommt. In den aktuell betriebenen vermaschten 110-kV-Netzen mit sehr großen Ausdehnungen funktionieren meist nur transiente Relais korrekt, die den Fehlereintritt erfassen. Der Nachteil dieser Verfahren ist, dass sie im Zuge von Eingrenzungsschaltungen keine weitere Anzeige mehr liefern.

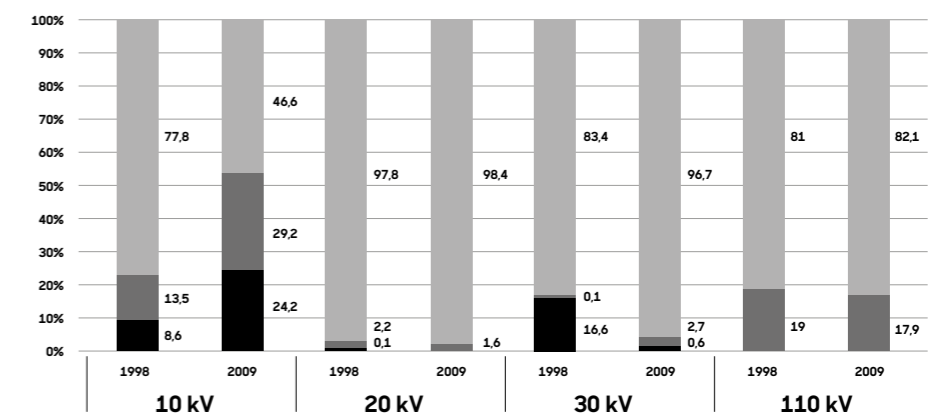
Durch viele Messungen und deren Analysen konnte in der Vergangenheit aber der Effekt beobachtet werden, dass sich das Spektrum der Oberschwingungen in der Netzspannung im Erdschlussfall verändert und es zu einem charakteristischen Anstieg der 3. Harmonischen kommt. In diesem Beitrag werden die Vorteile bei der Verwendung der 3. Harmonischen im Vergleich zur bereits etablierten Ortung mit der 5. Harmonischen vorgestellt.

#### DER ERDSCHLUSS IM NETZBETRIEB

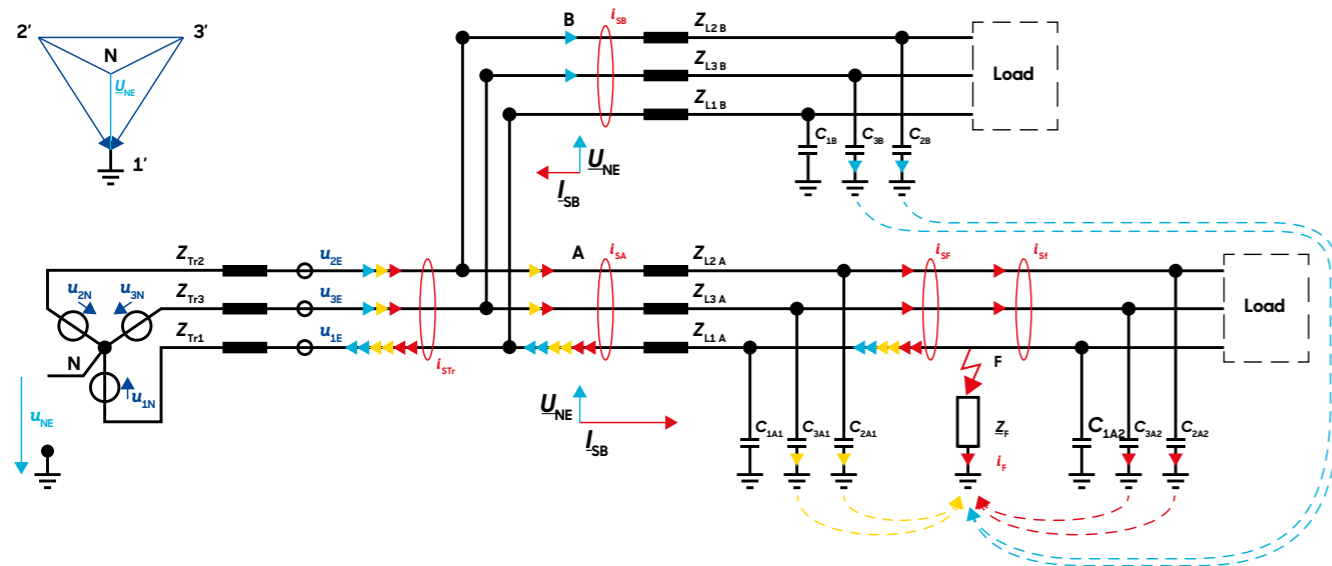
In **Abb. 1** ist die Verteilung der Sternpunktbehandlung in Deutschland dargestellt, welche vergleichbar ist mit jener in Österreich und in der Schweiz. Der Vorteil der korrekten Erdschlussstromkompensation ist, dass der Kunde während eines 1-poligen Fehlers weiter versorgt wird und sich dadurch keine Beeinflussung auf Kennwerte wie SAIDI oder ASIDI ergibt. Fortführende Beschreibungen zu Vor- und Nachteilen der einzelnen Verfahren der Sternpunktbehandlung finden sich in [1, 2].

In **Abb. 2** ist schematisch ein 1-poliger Fehler im isolierten Netz im Abzweig „A“ dargestellt. Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass mit Fehlereintritt zwei voneinander unabhängige Vorgänge beginnen, die aber zeitlich betrachtet eine unterschiedliche Dauer besitzen und gemeinsam in einem stationären Zustand enden. Dies sind:

- die sehr rasche Entladung des fehlerbehafteten Außenleiters innerhalb von Millisekunden,
- der im Vergleich dazu länger andauernde Vorgang des Aufladens der beiden gesunden Außenleiter.







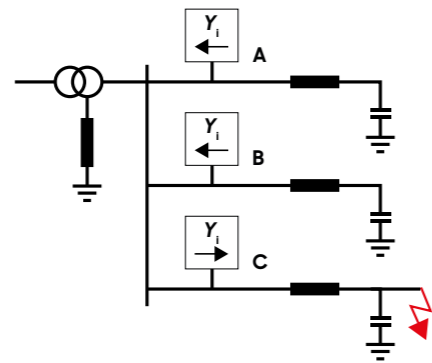
Im stationären Zustand fließen alle kapazitiven Ströme (Leiter-Erde-Kapazität) aller gesunden Leitungsabzweige über den Transformatorsternpunkt zum fehlerhaften Außenleiter und schließen ihren Stromkreis über die Fehlerstelle. Im fehlerbehafteten Abzweig fließt der Strom demnach genau entgegengesetzt. Der Nullsystemstrom der gesunden Leitungsabzweige ist somit in Bezug auf die 50-Hz-Nullsystemspannung (Verlagerungsspannung) kapazitiv, der des fehlerbehafteten Abzweigs induktiv. Aus diesem Bezug lässt sich für Netze mit isoliertem Sternpunkt eine abzweigselektive Erdschlussortung ableiten.

Für kompensierte Netze muss diese Betrachtung erweitert und überdacht werden. Dazu kann man sich für eine einfache Darstellung eine Petersen-Spule (regelbare Induktivität) am Transformatorsternpunkt vorstellen. Im 1-poligen Fehlerfall steigt die Spannung am Transformatorsternpunkt an und treibt über die Petersen-Spule einen Strom, welcher sich ebenfalls über die Fehlerstelle kurzschließt. Dieser induktive Strom überlagert an der Fehlerstelle den kapazitiven Strom der gesunden Leitungsabzweige. Als Summe wirkt an der Fehlerstelle nur mehr ein reduzierter Strom, welcher bei korrekt abgestimmter Resonanzregelung im Bereich von wenigen Ampere liegt.

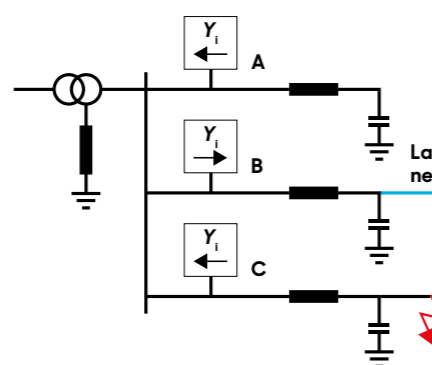
Dieser an der Fehlerstelle reduzierte Fehlerstrom wird nicht nur auf 2–3 % des kapazitiven Anteils reduziert, sondern er verändert in Bezug auf die Nullsystemspannung auch seine Phasenlage.

Aus der vorherigen Überlegung ist ersichtlich, dass es im kompensierten Netzbetrieb andere Anforderungen für die Erdschlussrichtungsbestimmung gibt. Die wattmetrische Methode  $[\cos(\phi)]$  ist sehr empfindlich gegenüber Winkelfehlern von Nullsystemstrom und Nullsystemspannung. Da der zu erfassende Nullsystemstrom in der Regel sehr klein ist, ist es messtechnisch schwierig,

**Abb. 2 Beispiel eines 1-poligen Fehlers im isolierten Verteilernetz im Abzweig „A“**



**Abb. 3 Richtung der 5. Harmonischen bei homogenen Netzstrukturen**



**Abb. 4 Richtung der 5. Harmonischen bei inhomogenen Netzstrukturen und Unterschreiten der Serienresonanz**

diesen betrags- und vor allem winkelgetreu zu bestimmen. Ebenso haben Betrags- und Winkelfehler von Strom- und Spannungswandlern einen erheblichen Einfluss auf das Messergebnis und somit auf die Richtungsbestimmung im Erdschlussfall. In vermaschten Verteilernetzen entsteht, u. a. durch Phasensplitting, ein zusätzlicher Kreisstrom, welcher wiederum als „wattmetrischer“ Anteil im Nullsystem zu einem Überansprechen von Ortungsrelais führen kann.

Im Vergleich dazu sind die Anforderungen im zuvor beschriebenen isolierten Verteilernetz wesentlich geringer. Hier kann bei Winkelfehlern von  $\pm 30^\circ$  in der Grundschwingung von Nullsystemstrom und Nullsystemspannung noch zuverlässig die Richtungsbestimmung durchgeführt werden. Nachdem in der DACH-Region aber entsprechend **Abb. 1** die Kompensation dominiert, sind hierfür aufgrund immer geringerer Wirkanteile im Nullsystemstrom andere Methoden als die wattmetrische in Erwägung zu ziehen. Eine dieser Methoden ist z. B. die Schaffung von annähernden Rahmenbedingungen für das Nullsystem im kompensierten Betrieb, wie es auch im isolierten vorherrscht. Diese Methode der Ortung mit einer vielfachen Harmonischen wird im fortführenden Verlauf beschrieben.

## DIE ERDSCHLUSSORTUNG MIT DER 5. HARMONISCHEN

Im Verteilernetz bilden sich durch Nichtlinearitäten, welche einerseits durch Verbraucher, aber auch durch z. B. Ortsnetztransformatoren hervorgerufen werden, im Strom Oberwellen (ganzzahlige Vielfache der Grundschwingung) aus. Dieser oberwellenbehaftete Strom verursacht im Transformator, an der Transformatorimpedanz einen zusätzlichen Spannungsabfall und beeinflusst somit die vom Transformator abgegebene verkettete Spannung. An der Mittelspannungssammelschiene eines Umspannwerks kann daher die Summe aller Oberwellenbelastungen gemessen werden.

Damit für das kompensierte Netz bei der Erdschlussortung eine ähnliche Voraussetzung gilt wie für das isolierte Netz, muss der Sternpunkt „virtuell“ isoliert werden. Dies erreicht man, indem man nicht die Grundschwingung betrachtet, für die das gesamte System bemes-

sen ist, sondern eine höhere Frequenz wie bis dato üblich, z. B. die 5. Harmonische. Für diese Frequenz von 250 Hz (in einem 50-Hz-Netz) erhöht sich die Impedanz der Löschspule um den Faktor 5 und wirkt somit wesentlich höherohmiger (näherungsweise isoliert). Ebenso wirkt sich die 5. Harmonische auf die Impedanz der Leiter-Erde-Kapazität mit dem Faktor 5 reduzierend aus. Messtechnisch wird daher vom gemessenen Nullsystemstrom und von der gemessenen Nullsystemspannung nur der 250-Hz-Anteil für die Richtungsbestimmung verwendet. Durch diese angenäherten Verhältnisse an ein isoliertes Netz kann auch die dafür geeignete Methode  $[\sin(\phi)]$ , jedoch nur mit den Anteilen der 5. Harmonischen, angewendet werden, und die Anforderungen an Strom- und Spannungswandler sowie an die Signalverarbeitung sind dadurch wesentlich reduzierter.

In gemischten Netzstrukturen entstehen jedoch zunehmend Serienschwingkreise, welche für die Erdschlussortung eine neue Herausforderung darstellen. Bis dato wurde die Längsinduktivität von Leitungen vernachlässigt. Freileitungen besitzen im Vergleich zu Kabeln eine höhere Längsinduktivität (3:1) und eine kleinere Leiter-Erde-Kapazität (1:50). Durch den Netzausbau werden zunehmend Netzbereiche verkabelt. Wenn diese Netzbereiche Netzausläufer darstellen, dann wirkt die Freileitung als Induktivität und das umgebaute Netzgebiet als Kapazität eines Serienschwingkreises.

Bei homogenen Freileitungsnetzen (**Abb. 3**) liegt die Resonanzfrequenz wesentlich über 250 Hz und mit dem Oberwellenverfahren können gute Ortungsergebnisse erreicht werden. Bei inhomogenen Netzstrukturen, wenn Netzausläufer durch lange Kabelsysteme (**Abb. 4**) erweitert werden, wirkt diese Kabelkapazität für die 5. Harmonische wie ein Kurzschluss gegen Erdpotenzial. Dies bewirkt, dass das Ortungsgerät, wie in **Abb. 5** dargestellt, im Abzweig „B“ mit der  $\sin(\phi)$ -Methode einen induktiven Strom registriert und diesen als den fehlerbehafteten Abzweig „C“ erfolgt ebenfalls eine Umkehr der Richtung.

In inhomogenen Netzstrukturen kann die Resonanzfrequenz des Serienschwingkreises die

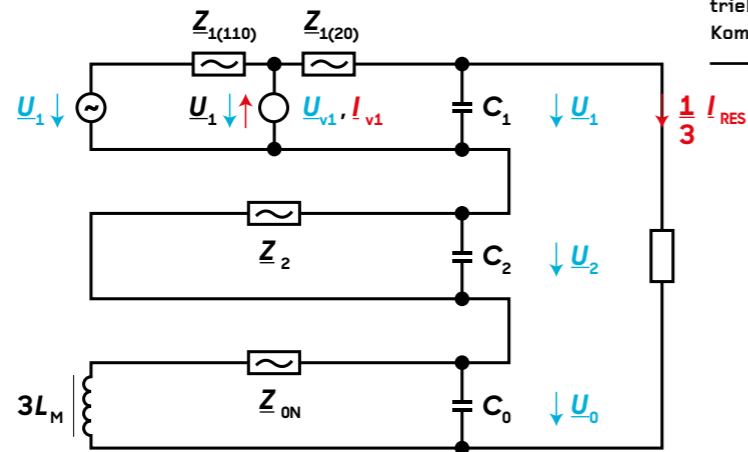


Abb. 5 Vereinfachte Darstellung eines 1-poligen Fehlers im kompensierten Netzbetrieb in symmetrischen Komponenten

5. harmonische Schwingung unterschreiten und es kommt zu Über- und Unterfunktionen bei der Erdschlussrichtungsbestimmung nach der  $\sin(\phi)$ -Methode.

Die Erdschlussortung mit der 5. Harmonischen kann im kompensierten Netzbetrieb angewendet werden, sie zeigt aber bei bestimmten Netzkonfigurationen Über- bzw. Unterfunktionen. Eine Möglichkeit, dieses Problem zu verbessern, ist, mehr Abstand zur Grenzfrequenz bei Aufrechterhaltung der Rahmenbedingungen für das „virtuelle“ isolierte Netz zu gewinnen. Dies kann man z. B. durch die Verwendung der 3. Harmonischen für die Erdschlussortung erreichen.

#### HARMONISCHE SCHWINGUNGEN VOR UND WÄHREND DES ERDSCHLUSSES

Ein Effekt, der in der Vergangenheit immer öfter beobachtet werden konnte, ist, dass sich die Anteile der harmonischen Schwingungen in den verketteten Spannungen vor und während eines 1-poligen Fehlers im kompensierten Netzbetrieb verändern. Im normalen Netzbetrieb sind das Mit-, das Gegen- und das Nullsystem mehr oder weniger entkoppelt. Im 1-poligen Fehlerfall erfolgt eine Kopplung der drei symmetrischen Komponenten an der Fehlerstelle (Abb. 5). In Abb. 6 sind die Anteile vor und in Abb. 7 die Anteile während eines Erdschlusses von einem Netzbereich dargestellt. Die Veränderungen durch den 1-poligen Netzfehler sind bemerkenswert auffällig und nicht zu vernachlässigen.

Von der 3. Harmonischen wurde angenommen, dass sie im Netzbetrieb eigentlich gar nicht vorhanden ist, da sie von den Dy-Transformatoren und Transformatoren mit Delta-Ausgleichswicklung kurzgeschlossen wird. Dieser Kurzschluss wird aber von der Impedanz der Verteilnetztransformatoren sowie von der Leitungsimpedanz begrenzt und die 3. Harmonische kann sich, wie in Abb. 7 ersichtlich ist, ausbilden. Ein weiterer Grund für das Auftreten der 3. Harmonischen ist die Zunahme von 1-phasigen Lasten im Niederspannungsbereich, die durch die unsymmetrische Belastung von Dy-Transformatoren an der Oberspannungsseite ebenfalls Harmonische generieren können.

#### DIE ERDSCHLUSSORTUNG MIT DER 3. HARMONISCHEN

Der überwiegende Teil des 110-kV-Netzes im D-A-CH-Raum wird mit Freileitungen betrieben. Umfangreiche Feldtests haben gezeigt, dass eine 110-kV-Freileitung, die auf eine Wiese fällt, nicht als konstante lineare Impedanz angenommen werden darf. An dem am Boden liegenden Seil bilden sich viele Lichtbögen zum Erdbereich hin aus. Diese schmelzen den Untergrund und dieser wiederum vergrößert seine Impedanz. Dadurch entstehen an neuen Stellen, die eine kleinere Seil-Erd-Impedanz aufweisen, neue Lichtbögen. Dies bewirkt ein permanentes Wandern der Lichtbögen entlang des am Boden liegenden Seils und somit eine Nichtlinearität des Fehlerwiderstandes über die Zeit betrachtet. Die Fehlerimpedanz

#### Quellen

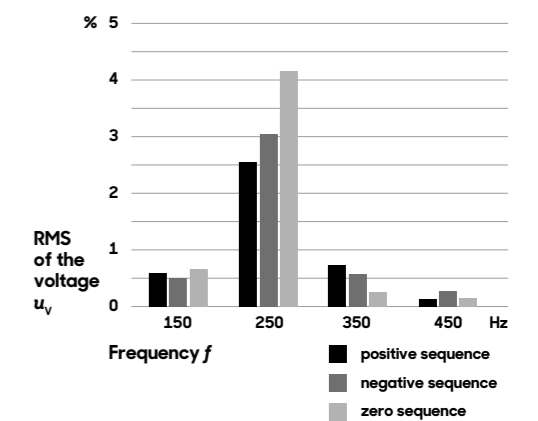
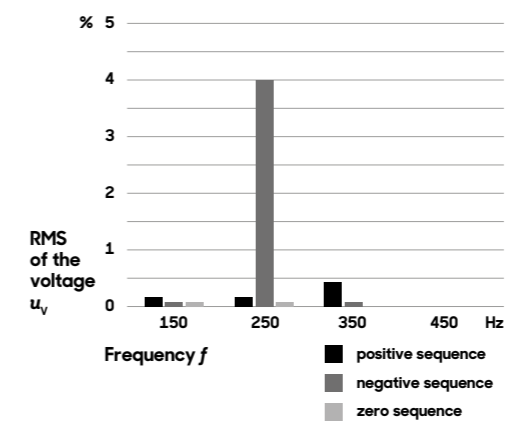
H. Melzer et al., Die aktuelle Situation der Sternpunktbehandlung in Netzen bis 110 kV (D-A-CH), ETG-Fachbericht 132, VDE Verlag GmbH, Berlin, Offenbach 2012

P. Schegner; U. Schmidt; K. Frowein, Influences on the neutral point treatment caused by changing general requirements and new network concepts, ETG-Fachbericht 151, VDE Verlag GmbH, Berlin, Offenbach 2017

G. Druml, Innovative Methoden zur Erdschlussortung und Petersen-Spulen-Regelung, Thesis, Institute of Electrical Power System, Graz

#### Abb. 6 links: Harmonische der Nullsystemspannung vor dem Erdschluss

#### Abb. 7 rechts: Harmonische der Nullsystemspannung während des Erdschlusses



ist auch von der Abstimmung der Petersen-Spule abhängig.

Diese Fehler haben durch das Rückzünden im fehlerbehafteten Außenleiter einen Spannungsverlauf, der am ehesten durch ein Rechtecksignal beschrieben werden kann. Ein Rechtecksignal beinhaltet eine 3. Harmonische, wodurch auch auf eine 3. Harmonische im fehlerbehafteten Außenleiter rückgeschlossen werden kann. Daher kann festgehalten werden, dass eine auf eine Wiese gefallene Freileitung an der Fehlerstelle anteilig ihre eigene 3. harmonische Schwingung erzeugt, die für die selektive Erdschlussortung benötigt wird. Der wesentliche Vorteil der Erdschlussortung mit der 3. Harmonischen ist, dass sich diese gegenüber der 5. Harmonischen näher bei der Grundschiwingung befindet und sich dadurch ein größerer Abstand zu möglichen Serienresonanzen ergibt. Dies ist aus heutiger Sicht unter Berücksichtigung der Netzausbauplanung für eine zuverlässige längerfristige stabile Erdschlussortung bei zunehmender Verkabelung notwendig. Zusätzlich nimmt die Wahrscheinlichkeit von falschen Richtungsentscheidungen ab.

U. Schmidt; K. Frowein; G. Druml et al., New Method for Calculation of the Harmonics in the Residual Earth Fault Current in Isolated and Compensated Networks, Proc. PQ2016 Conf., Tallinn 2016

K. Frowein; U. Schmidt; G. Druml et al., New model for the calculation of harmonics in the residual earth fault current of medium voltage systems, Proc. CIRED 2017 Conf., paper 1062, 2017

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

#### ZUSAMMENFASSUNG

In heutigen vermaschten Netzstrukturen kann mit der  $\cos(\phi)$ -Methode keine zufriedenstellende Ortung mehr erreicht werden. Dies ist mitunter auch auf die kleinen wattmetrischen Komponenten zurückzuführen. Transiente Erdschlussortungsrelais funktionieren hingegen zuverlässig.

Für die stationäre Auswertung wurde alternativ zur  $\cos(\phi)$ -Methode nur die 5. Harmonische verwendet. Die 3. Harmonische wurde nicht beachtet, da sie im Mitsystem aufgrund der Dy-Ortsnetztransformatoren nicht vorhanden ist. Es kann jedoch gezeigt werden, dass die 3. Harmonische im 1-poligen Fehlerfall vorhanden ist, insbesondere bei Erdberührungen mit Rückzündungen.

Die Methode der 3. Harmonischen kann zur Erdschlussrichtungsbestimmung in kompensierten Netzstrukturen als stationäre Methode verwendet werden. Der Vorteil gegenüber der 5. Harmonischen liegt in der Reduktion des Einflusses von Serienresonanzen und der damit besseren Handhabung von größeren Verteilnetzstrukturen.

In Österreich ist die Methode der 3. Harmonischen schon seit mehreren Jahren im Praxiseinsatz. In einem Vergleich von Erdfehler-richtungsergebnissen von unterschiedlichen Ortungsmethoden haben die Algorithmen nach  $q_{u2}$ ,  $q_{i2}$  und 3. Harmonische die zuverlässigsten Ergebnisse geliefert.



# ZUKUNFT DER NETZ-SICHERHEIT



Das NETZSCHUTZ Magazin hat für Sie die 12. GMA/ETG-Fachtagung Netzregelung und Systemführung sowie den Austrian Standard IoT-FACHKONGRESS 2017: BIG DATA, CLOUD, DATENSCHUTZ & CO besucht. Bei beiden Veranstaltungen ging es trotz der unterschiedlichen Materien um Bewusstseinsbildung für den bereits stattfindenden Umbruch und sehr viel um die Frage „Zentral oder dezentral?“. Einzelne Vorträge werden in der Folge kurz beschrieben.

## 12. GMA/ETG-Fachtagung Netzregelung und Systemführung

Mit seiner Einleitung, in der er die Zukunft der Netzregelung vom Prinzip der Watt'schen Dampfmaschine ableitete (**Abb. 1**), spannte der wissenschaftliche Tagungsleiter H. Weber/ Universität Rostock einen richtungsweisenden Bogen für die 2-tägige Fachtagung in Berlin.

## LANGFRISTIGE ENERGIESZENARIEN

Für Prof. Brauner/TU Wien stellt die Energiewende einen Evolutionsprozess dar, der nur bedingt prognostizierbar und planbar ist. Zukünftig sind durch Effizienzsteigerung und einen hohen regenerativen Elektrifizierungsgrad etwa 60 % des heutigen Primärenergiebedarfs einzusparen, um eine auf Potenzialen und Leistbarkeit basierende nachhaltige Energieversorgung zu ermöglichen (**Tab. 1**).

## NEUE KOMPONENTEN DER NETZREGELUNG

Im Zuge der Energiewende hin zu hohen Anteilen erneuerbarer Energie wird erwartet, dass Speichersysteme eine entscheidende Rolle in verschiedenen Anwendungen spielen werden.

### Batteriespeicher

Für die Frequency Containment Reserve (FCR), auch als Primärregelung bekannt, werden bereits heute elektrische Energiespeicher wie Batteriespeicher oder Schwungradspeicher eingesetzt. Die deutschen Übertragungsnetzbetreiber haben die bisherigen Präqualifikationskriterien um Vorgaben für den Einsatz von sogenannten „Technischen Einheiten mit

Energieanwendung	Anteil	Sektoren des Energiebedarfs			
		%	Industrie	GHD	Haushalt
mechanisch	43,3/20	6,6	4,2	2,6	30/7
Heizwärme	26,1/5	2,3	5,8/0,5	17,9	0,1
Prozesswärme	23,1/15	18,8/10	2,9	17,9/2	0,1
Warmwasser	5	0,3	1,5	3,2	0
Beleuchtung	2,4/2	0,5	1,3	0,5	0,1
<b>Summe</b>	<b>100/47</b>	<b>28,5/19,7</b>	<b>15,7/10</b>	<b>25,6/9,7</b>	<b>30,2/7</b>

**Tab. 1 Energiebedarf und Effizienzpotenzial nach Sektoren und Anwendungsarten mit Einsparpotenzialen**

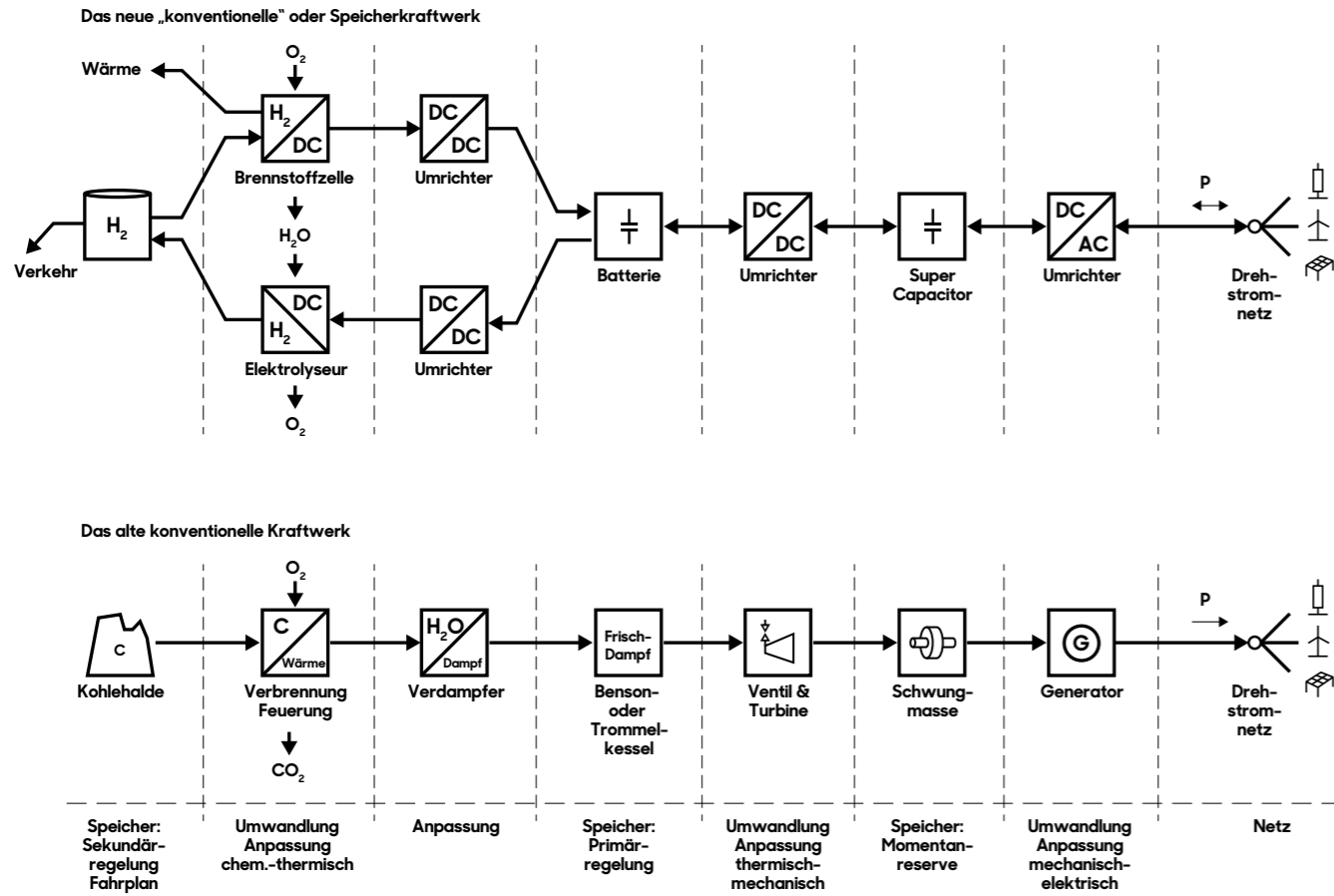


Abb. 1 Das neue „konventionelle“ oder Speicher-Kraftwerk

Speicherbegrenzung\* für die FCR erweitert. Bei hohen Anteilen von elektrischen Speichern an der FCR-Vorhaltung könnten diese Vorgaben jedoch unerwünschte Effekte verursachen, die bei einem Rückgang der netzsynchronen rotierenden Massen und des Netzselbstregel-effekts umso stärker zu Tage treten (H. Lens/IFK, Universität Stuttgart).

Thermische Speicher

Neben den Batteriespeichern wurden auch Varianten von thermischen Energiespeichern zur Netzregelung vorgestellt (D. Schlipf, G. Schneider/enolcon gmbh).

In der Kraftwerksplanung stellen Maßnahmen wie z.B. Wärmespeicher und strompreisgetriebener Aussetzungsbetrieb der Gas- und Dampfturbinen-Kraftwerke (GuD) ebenso wie die Kombination bestehender Anlagen mit Elektroböilern, neben den erforderlichen Anpassungen der Strommarktrandbedingungen, Regularien und Gesetzen, eine der größten Herausforderungen der Energiewende dar (U. Schulz/Vattenfall Wärme Hamburg GmbH).

Regelfähigkeit von Windparks

Über die Regelfähigkeit sowie Zu- und Abschaltbarkeit von On- und Offshore-Windparks und Innovationen in diesem Bereich berichteten T. Haase, DONG Energy Wind Power Germany GmbH (Offshore) und S. Wachtel, GE Renewable Energy (Onshore)

**TECHNISCHE MÖGLICHKEITEN UND RÜCKWIRKUNGEN VON UMRICHTERANLAGEN**

Umrichterregelung

Um Netzinstabilitäten zu vermeiden, müssen elektrische Erzeugungsanlagen ein Spannungsquellen-Verhalten aufweisen. In Folge muss – bei einem weiterhin steigenden Anteil umrichterbasierter Erzeugung und sinkender Einspeisung aus konventionellen Turbosätzen – das Verhalten von Umrichtern am Netz zwingend spannungseinprägend sein. Die bisherigen Standardanwendungen sind überwiegend stromeinprägend ausgeführt.

Im Paper von B. Engel, S. Laudahn, Fl. Rauscher/ TU Braunschweig wurde die synthetische

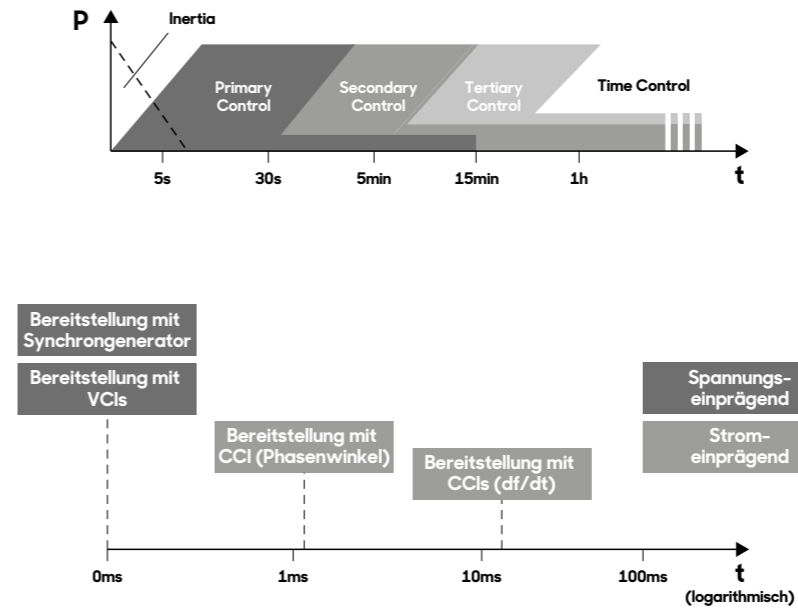


Abb. 2 Klassische Regelleistungsprodukte mit Ergänzung der Momentanreserve

Abb. 3 Frühestmögliche Bereitstellung von Momentanreserve nach ihrer Technologie

Schwungmasse als elektrische Funktionsweise der Momentanreserve von Synchronmaschinen und ihre Überführung in eine spannungseinprägende Wechselrichterregelung beschrieben. Zudem wurden verschiedene Verfahren zur Bereitstellung von Momentanreserve aus stromeinprägenden Wechselrichtern dargelegt und verglichen (Abb. 2 und 3).

Neuartiger Regelansatz

Die neuen, über Umrichter an das Drehstromnetz angeschlossenen Speicherkraftwerke müssen alle Aufgaben der konventionellen Kraftwerke übernehmen. Das kann mit konventioneller Frequenzregelung (netzstützende Maßnahmen) oder aber mit neuartiger Winkelregelung (netzbildende Maßnahmen) geschehen (H. Weber/ Universität Rostock).

Subsynchrone Resonanzen

Diese können zur ernsthaften Gefährdung des Wellenstrangs in Kraftwerksturbosätzen führen (S. Exnowski/Fachhochschule Südwestfalen). Neuere, selbstgeführte HGÜ-Systeme können zur Dämpfung von Torsionsschwingungen

beitragen. Bei unzureichender elektrischer Dämpfung im Frequenzbereich von Wellenstrangresonanzen müssen Abhilfemaßnahmen getroffen werden (A. Krontiris/ABB AG). Bei Spannungszwischenkreisumrichtern stellt eine mögliche Anregung von subsynchronen Torsionsschwingungen in sehr vielen Fällen kein Problem dar, da die Dämpfung der Eigenschwingung ausreichend ist. In Einzelfällen muss die Regelung des Spannungszwischenkreisumrichters angepasst werden. Die Überwachung von subsynchronen Torsionsschwingungen kann das Risiko von Wellenschäden weiter reduzieren (D. Audring, P. La Seta, K. Trunk/Siemens AG).

**NETZPLANUNG UND BETRIEB – HEUTE UND MORGEN**

Technische Anschlussregeln des VDE-FNN

Innerhalb der europäischen Netzkodizes (EU Network Codes) formulieren die Connection Network Codes die Anforderungen für den Netzanschluss. Die größte Zahl von Interessengruppen ist vom NC RfG (Requirements for Generators) betroffen. Am Beispiel von Fault-Ride-Through wurden die inzwischen vielseitigen Anforderungen aufgezeigt, wenn mehrere Ereignisse gleichzeitig oder direkt aufeinanderfolgend eintreten. Um die Systeme nicht zu komplex und den Prüfaufwand nicht zu hoch werden zu lassen, ist die Entwicklung von Regelungsverfahren für wechselrichterbasierte Generatoren wünschenswert, bei denen mehr inhärentes Verhalten analog zu Synchroneratoren enthalten ist (H. Abele/TransnetBW GmbH, L. Hankel/FNN im VDE, J. Jahn/TenneT TSO GmbH, R. Pfeiffer/Amprion GmbH, J. Weidner/50Hertz Transmission GmbH).

Sicherstellung der Schutzfunktion in AC-Netzen

Für einen ordnungsgemäßen Betrieb und zur Sicherstellung einer zuverlässigen Schutzfunktion ist ein gewisses Maß an natürlichem Verhalten aller Betriebsmittel nicht nur für die Grundschiwingung, sondern auch bei höheren Frequenzen erforderlich. Ähnlich wie sich bei unsymmetrischen Kurzschlüssen Gegensystemströme ausbreiten können müssen, müssen auch Oberschwingungsströme fließen können, die sich aufgrund nichtlinearer Kennlinien von Betriebsmitteln ergeben. Irgendwann wird diese, einem großen Netz eigene „Qualität“ aufgebraucht sein und wir werden uns Gedan-



ken machen müssen, welche Eigenschaften leistungselektronische Betriebsmittel in Bezug auf Grundsicherungen, Obersicherungen und symmetrische Komponenten (hier insbesondere im Gegensystem) in Zukunft haben sollen (H. Kühn/TenneT TSO GmbH).

#### IoT-Fachkongress von Austrian Standards

Der Kongress spannte den Bogen von politisch-gesellschaftlichen Vorgaben über bestehende Gefahren von bekannten Zwischenfällen und anhand eines Live-Hacks bis hin zu Diskussionen um Ansätze im Standardisierungsprozess und rechtlichen Bereich. Hier möchten wir zwei Vorträge besonders hervorheben:

#### BLACKOUT

H. Saurugg, Sicherheitsspezialist, sieht die Voraussetzungen für ein Blackout von mehr als 12 Stunden als gegeben. Er befürchtet Systemversagen durch häufige Überlastungen der Versorgungsnetze. Durch die prinzipiell chaotische Vernetzung steigt die Komplexität und Verwundbarkeit von Systemen und unserer Gesellschaft. Das Problem-Bewusstsein ist v. a. unter Technikern gering. Und das, obwohl bereits im Grunddesign von IT-Lösungen entsprechend anzusetzen sei.

Die Phasen eines langen Großausfalls werden wie folgt definiert:

Phase 1 – totaler Stromausfall – worst case in Österreich bei 24 Stunden, mehrere Tage im europäischen Schnitt

Phase 2 – Wiederherstellung mit wochenlangen Versorgungsengpässen bei Nahrung und Wasser

Grundlegende Lösungsansätze zur Risikominimierung:

- Generelle Energie- und Ressourcenbedarfssenkung
- Systemdesign mit gesamtheitlicher Betrachtung
- Einfache Systeme

Komplexe Systeme mit hierarchischer Top-Down-Struktur werden Probleme bereiten. Das systematische Risiko sei durch die Vernetzung überhaupt erst entstanden.

#### SICHERHEIT IM INDUSTRIAL INTERNET OF THINGS

In diesem Vortrag von Thomas Pfeiffer/Linz Strom Netz wurde auf die Qualitätsmanagement-Norm für Security IEC 27001 und der Annex A IEC 27002 verwiesen und wurden Schutzziele definiert:

- Vertraulichkeit: Informationen dürfen nicht in falsche Hände geraten
- Integrität: Verfälschung von Daten unmöglich
- Verfügbarkeit

Beispielhaft wurden konkrete Empfehlungen genannt:

- Trennung von IoT und Industrial-IoT
- Segmentierung/Zoning/Conduits sind Sicherheitsmaßnahmen, wie z. B. im industriellen Bereich IT-Netzwerk-, SPS- und Sensor-Ebene.
- Wenn in einem Bereich keine Standards verfügbar sind, dann gilt es, erprobte Lösungen einzusetzen. V. a. Sachverständige orientieren sich im Schadensfall daran.

#### ZUSAMMENFASSUNG

Die Inhalte der ETG-Tagung zeigten einmal mehr deutlich: Die Energiewende bis 2050 ist eingetaktet. Es geht in der nächsten Zeit darum, die diversen Konzepte zur Lösung der Herausforderungen insbesondere von Höchstspannungs- und HGÜ-Trassen sowie von thermischen und elektrischen Speicherlösungen im Großformat bis hin zu kleinen, dezentralen Varianten zu testen. Überregionale Netzentwicklungspläne der ENTSO-E sind dabei zu berücksichtigen.

Die Energiewende ist nur mit Hilfe der Informationstechnologie und dem Internet of Things realisierbar. Der IoT-Fachkongress von Austrian Standard zeigte die bereits aktuellen Risiken durch Überlastungen bestehender Infrastruktur und die logische Folge von Blackouts sowie die Notwendigkeit der Standardisierung für Sicherheit und Interoperabilität von IT-Systemen. An erster Stelle steht derzeit noch immer die Bewusstseinsbildung unter Technikern, da den Bedrohungen nur mit einem entsprechenden Sicherheits-Grunddesign begegnet werden kann.

#### Quellen

Alle Inhalte und Abbildungen: TG-Fb. 153: Energiewende in der Stromversorgung – Systemstabilität und Systemsicherheit  
ISBN: 978-3-8007-4481-7

# Nehmen Sie doch einfach den SVERKER 900



## SVERKER900

### Schaltanlagen 3-phasig prüfen

Mehr als eine Alternative! Mit dem Color-Touchscreen des SVERKER 900 werden Ihre dreiphasigen Sekundär- und Primärprüfungen einfacher, intuitiver, effizienter. Einphasig nutzen Sie bis 105 A AC oder 900 V AC. Die Strom- und Spannungsquellen schließen Sie in Reihe oder parallel. Amplitude, Phasenwinkel und Frequenz sind einzeln einstellbar u.v.m. Über 20.000 verkaufte Geräte machen die SVERKER-Produktserie (früher von Programma) zum beliebtesten Schutzprüfsystem weltweit.

- Einphasig 900 V und 105 A
- Stand-Alone einsetzbar
- Drei Ströme, vier Spannungen
- Sekundär- und Primärprüfungen

Entdecken Sie die Welt der Megger Mess- und Prüftechnik:  
[www.megger.at](http://www.megger.at)

**Megger**<sup>®</sup>  
Power on

# ETAPPEN DER INNOVATION

## DER WERT DER NULLLEISTUNG

Das Problem der Sternpunktterdung hat die Pioniere der elektrischen Kraftübertragung bereits mit der Inbetriebnahme der ersten elektrischen Energieübertragung beschäftigt. Bei der ersten Drehstromübertragung von Lauffen a. N. nach Frankfurt a. M. im Jahre 1891 sind die Sternpunkte des Generators und des Transformators in Lauffen (**Abb. 1**) und in Frankfurt starr geerdet worden. [1]

Kommt es zum Seilbruch im Leiter 1, so dass eine Erdberührung entsteht, führt das Schmelzen der Sicherung  $F_1$  zu einer Spannungs- und Stromunterbrechung. Durch die Sicherung  $F_0$  im Transformatorsternpunkt ist praktisch sogar ein

Reserveschutz gegeben. Während in den USA und in England die Erdung der Generator- und Transformatorsternpunkte die Regel wurde, war dies in Deutschland wegen der Posttelegrafie von der Postverwaltung untersagt. Der geschichtliche Rückblick zeigt, dass in den deutschsprachigen Ländern die Mittelspannungsnetze zunächst mit freiem Sternpunkt betrieben worden sind. Diese Betriebsweise lag nahe und man

hatte auch infolge der geringen Netzausdehnung (geringer Erdschlussstrom) und der großen Reserve im Isolationsniveau der Geräte keine besonderen Schwierigkeiten. Mit dem Ansteigen der Erdschlussströme wesentlich über 50 A

ist es aber nicht mehr zum Verlöschen der Erdschlusslichtbögen gekommen. 1917 gelangt dann bei der Kraftwerk Altwürttemberg A.-G., Wasserkraftwerk Pleidelsheim, die erste Petersen-Spule zum Einsatz. [2]

### Messgrößengewinnung zur Ermittlung des Erdschlusses

Charakteristisch für einen Erdschluss im isolierten oder kompensierten Netz ist das Verhalten der Leiter-Erde-Spannungen  $U_{1N}$ ,  $U_{2N}$  und  $U_{3N}$ . Während die verketteten Spannungen  $U_{12}$ ,  $U_{23}$  und  $U_{31}$  voll erhalten bleiben, bricht die Span-

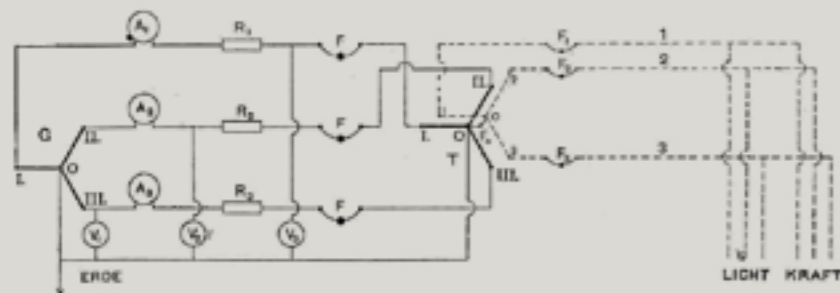


Abb. 1 Station Lauffen (1891)

Abb. 2 Spannungsummenschaltung zur Erdschlusserfassung

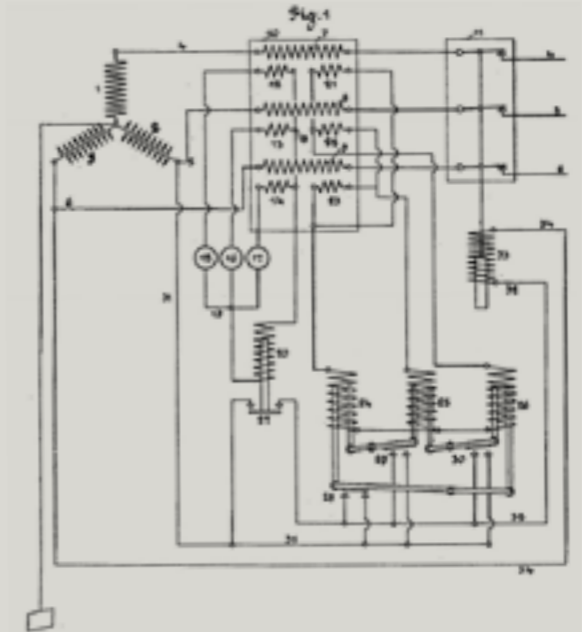


Abb. 3 Erdschlussermeldung, 1915

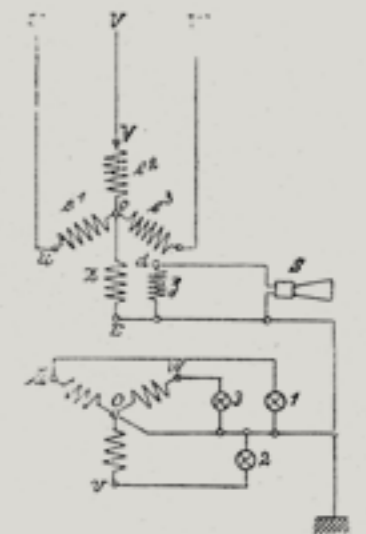


Fig. 23 a.

nung im erdschlussbehafteten Leiter gegen Erde bis auf 0 zusammen und die Spannung der gesunden Leiter steigt bis zum Betrag der Dreiecksspannung an. Wobei dies nur für den eingeschwungenen Zustand gilt. Bei Erdschlusseintritt können im kompensierten Netz Überspannungen bis zum 2,5fachen und im isolierten Netz sogar bis zum 3,5fachen zustande kommen.

Zur Erdschlusserfassung verwendet Schuckert im Jahre 1903 in seinem Patent DRP 160069 „Sicherungsvorrichtung für Wechselstromanlagen“ eine Spannungsummenschaltung (**Abb. 2**).

Eine Erdschlusserfassung aus dem Jahr 1915 zeigt **Abb. 3**.

Ein Erdspannungs-Asymmetrier von Schmittutz, Gossen (**Abb. 4**), zeigt die Verschiebung des Netzsternpunktes gegen das Erdpotenzial sehr anschaulich. Es besitzt als Skalenschild ein gleichseitiges Dreieck, das das Spannungsdreieck versinnbildlicht. Eine kleine runde

Abb. 4 Erdspannungs-Asymmetrier System Schmittutz-Gossen





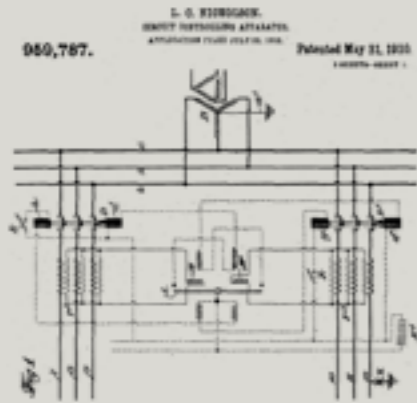


Abb. 5 Patent  
Nicholson, ein-  
gerichtet 1908

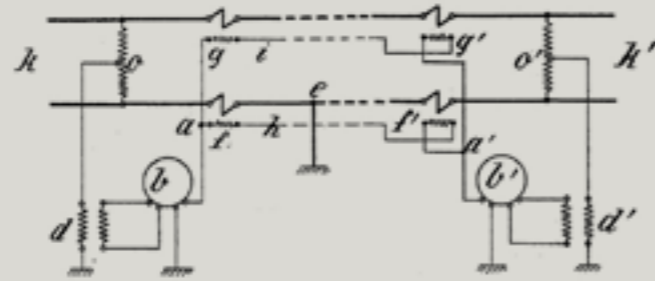
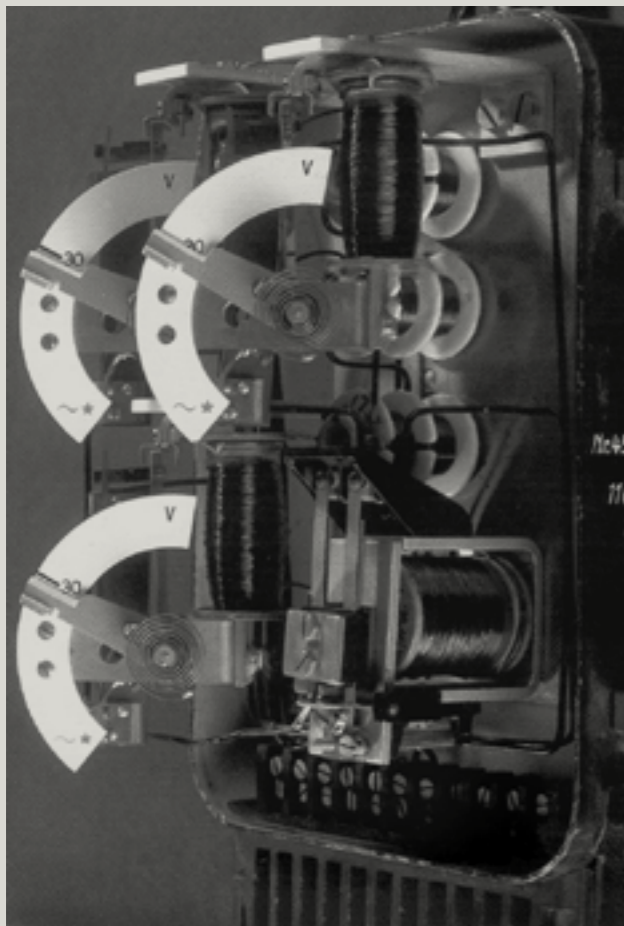


Abb. 6 Erdschluss-  
richtungser-  
fassung, AEG



Geräte mit Geschichte, EVS  
Dreiphasiges Erdschlussrelais, S&H, um 1930

Scheibe, die über dem Skalenblatt schwebt, stellt die Lage des Erdpotenzials dar. Die Drehbewegung von 3 Spannungsmesssystemen wird über Kokonfäden auf die kleine Erdpotenzialscheibe übertragen. Die Lage der Scheibe entspricht dadurch jeweils der Lage des Erdpotenzials im Spannungsdreieck. [3]

In einem Patent aus dem Jahre 1922 stellt *P.v.d. Sterr, V & H*, die messtechnischen Lösungen zur Ermittlung der Nullspannung vor:

In der Praxis haben sich die Lösungen als „offene Dreieckswicklung“ und als zusätzliche Spannungsmesswicklung in den Petersen-Spulen durchgesetzt.

Der Wahl der Bemessung der e-n-Wicklung, heute da-dn-Wicklung, von 100/3 V verdanken wir es, dass bei einem satten Erdschluss eine Verlagerungsspannung von 100 V (für 100 %) gemessen wird. [7]

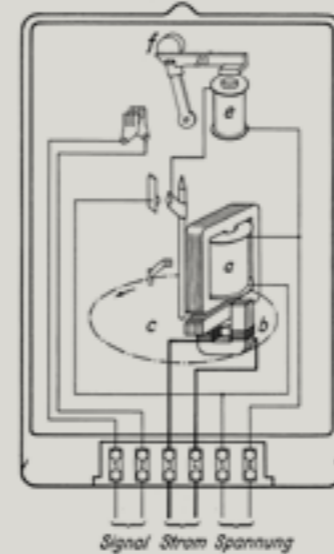


Abb. 7  
PI Nr 109237,  
Innenschaltung,  
AEG, 1928

Mit dem Anschluss eines Überspannungsrelais an die Erdschlusshilfswicklung erfolgt die unselektive Erdschlussmeldung.

Ein weiteres Kriterium für einen Erdschluss ist der Erdschlussstrom (auch „amperemetrisches“ oder „amplitudisches“ Verfahren genannt). Zur Erfassung dieses Nullstromes gelangt die sogenannte „Holmgrenschtaltung“ (1911) zur Anwendung. In der Literatur wird häufig „Holmgreenschtaltung“ geschrieben. Aber eigentlich waren es *Schuckert* 1903 bzw. *Nicholson* (in der deutschsprachigen Literatur auch *Nickolson* geschrieben – **Abb. 5**) 1908 und *Zachrisson* 1909.

Durch unterschiedliche Betrags- und Winkelfehler der Stromwandler insbesondere auch durch unterschiedliche Bebürdung ist es zu sogenannten „Falschströmen“ gekommen. [5] Eine Verbesserung und Erhöhung der Empfindlichkeit ist mit dem System Fer-

ranti-Howkins [6], heute bekannt als Kabelumbauwandler, erreicht worden.

Während die Hauptwandler Nennströme von mehreren 100 A besitzen, hat sich als Kabelumbauwandler der 60/1 A als Standardlösung herauskristallisiert. Dabei ist weniger der Betragsfehler, sondern bei der Erdschlussrichtungsermittlung der geringe Winkelfehler ausschlaggebend.

### Selektive Erdschluss- erfassung

Am Anfang ist ein Erdschluss nur durch die manuelle Beobachtung der Leiter-Erde-Spannungen bzw. der relai-technischen Erfassung der Verlagerungsspannung durch Messung der Spannung zwischen nichtgeerdetem Sternpunkt oder Gehäuse gegen Erde erkannt worden. Später hat man die offene Dreieckswicklung, an welcher ebenfalls die Nullspannung erscheint, erfunden. Man hat wegen der geringen Ströme meist genügend Zeit gehabt, um die Feh-

lerstelle zu ermitteln. Die Erzählung von *Rühle* verdient auch hier erwähnt zu werden, der, als er vor dem Ersten Weltkrieg noch im Kraftwerk Rheinfelden beschäftigt gewesen ist, mit einem Hund die Leitungsstrecken abgegangen ist, und wenn der Hund gebellt hat, hat er gewusst, dass er die Erdschlussstelle gefunden hat. [8]

Zur Ermittlung der erdschlussbehafteten Leitung schlägt *Holmgren* bereits 1911 Erdschlussleistungsrelais vor.

### Wattmetrisches Erd- schlussrichtungsverfahren

In den 20er Jahren des vergangenen Jahrhunderts hat sich zur selektiven Erdschlusserfassung die sogenannte wattmetrische Erdschlussortung durchgesetzt, bei der aus dem Produkt von Verlagerungsspannung und Nullstrom die Nulleleistungsrichtung ermittelt wird. Der Begriff „wattmetrisches Verfahren“ bezieht sich auf die Auswertung der Leistung des Nullsystems. Während im isoliert gefahrenen Netz (OSPE Ohne Sternpunktterdung) der kapazitive Erdschlussstrom überwiegt, steht im kompensierten Netz (RESPE Resonanzsternpunktterdung) nur noch überwiegend der Ohm'sche Erdschlussreststrom zur Verfügung. So ist im isolierten Netz die sin-Phi-Schaltung mit Auswertung der Nulleleistungs-Blindleistung und im kompensierten Netz die cos-Phi-Schaltung mit Auswertung der Wirkleistung zur Anwendung gekommen. Der Begriff „wattmetrisch“ für beide Verfahren ist darauf zurückzuführen, dass man früher auch die Blindleistung in Watt, z. B. BkW, angegeben hat.

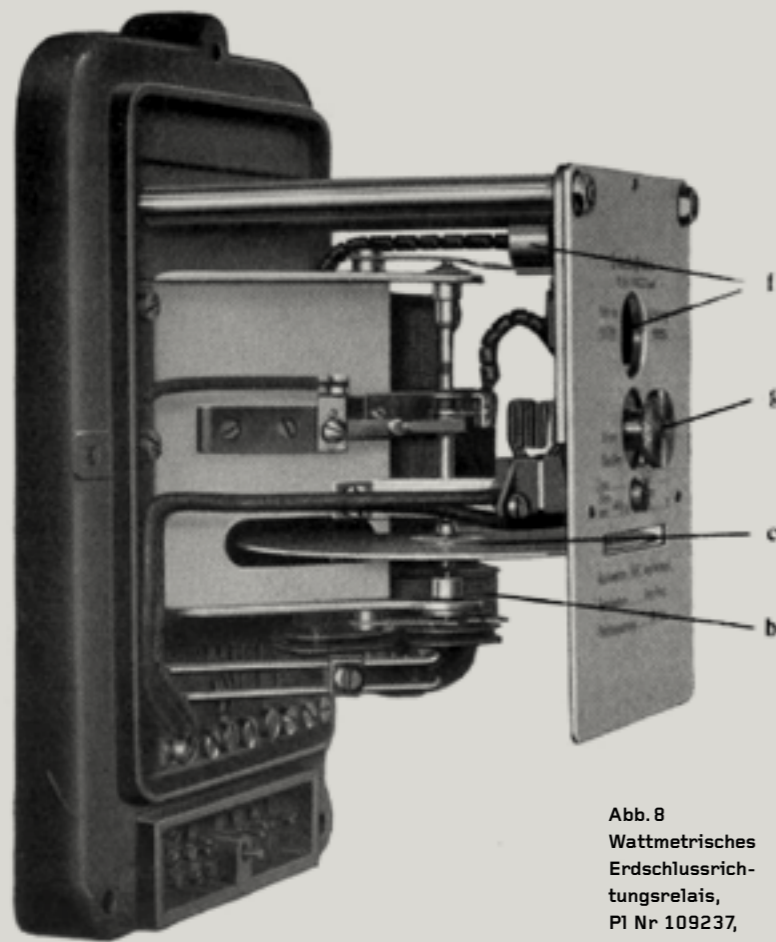


Abb. 8  
Wattmetrisches  
Erdschlussrich-  
tungsrelais,  
PI Nr 109237,  
AEG, 1928



Abb. 9 cos-Phi-  
Relais, Siemens

So fertigt 1924 die AEG nach DRP 336210 (Abb. 6) das Erdschlussrichtungsrelais PI Nr 69046 und PI Nr 109227 [24] und ASEA die Relais RMS und RE [9]. Abb. 7 und 8 zeigen die Innenschaltung und die Ansicht mit der beim Zähler schon länger angewandten Ferraris-Scheibe des PI Nr 109237 aus dem Jahre 1928.

Das von *Schleicher* und *Garz*, Siemens, entwickelte cos-Phi-Relais zeigt Abb. 9. [10]

BBC fertigt 1960 das Erdschlussrichtungsrelais Typ CG26i BBC (Abb. 10) [11] 1969 fertigt BBC das Erdschlussrichtungsrelais CE für kompensierte Netze und CE90 für isolierte Netze sowie das Erdschlussanzeigerelais VE3.

Ein Blick in das Relaisbuch von 1930 (Abb. 11) zeigt die üblichen Schaltungen zur Erdschlussrichtungsbestimmung.

### Erdschlusswischer- verfahren

Im Jahre 1936 gibt *Neugebauer*, Siemens, ein neuartiges Prinzip zum Erfassen von



Abb. 10  
Erdschluss-  
richtungsrelais  
CG26i, BBC, 1960

Erdschlusswischern an und verwendet Zweifachröhrenschtaltung zur Polaritätsbestimmung (Abb. 12 und 13). [12]

Die weitere Entwicklung bis in unsere Zeit sowie sämtliche Quellenangaben können Sie der Langversion auf unserer Website entnehmen:

→ [www.netzschutz-magazin.com](http://www.netzschutz-magazin.com)

### Walter Schossig,

geb. 1941, Autor des Buches „Netzschutztechnik“ und der History-Serie in der PAC World. Als Absolvent der Ingenieurschule Elektroenergie Zittau arbeitete er über 40 Jahre als Elektroingenieur, von 1967 an war er bei der Thüringer Energie AG, Erfurt, für Relaischutz verantwortlich. Mitarbeit im VDEW-AA „Relais- und Schutztechnik“, im Normenausschuss DKE K434 „Messrelais und Schutzeinrichtungen“ und im Bayernwerk-AK „Schutzeinrichtungen“. Bis heute aktiv im VDE AK.

Abb. 11  
Nullgrößen-  
gewinnungen

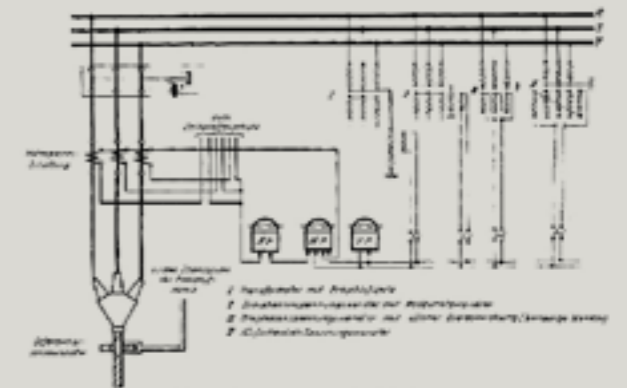


Abb. 12  
Erdschlusswischer-  
erfassung, Neuge-  
bauer, 1936

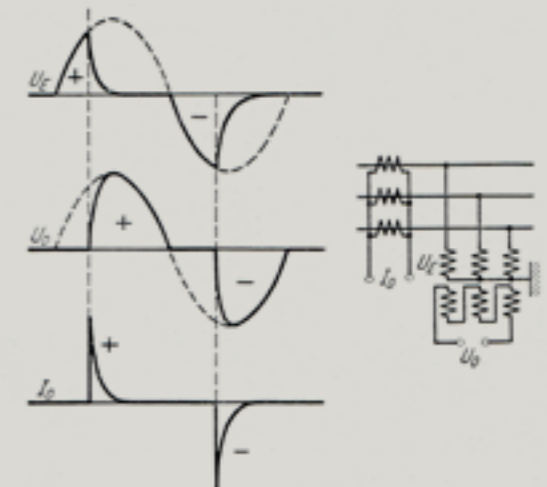
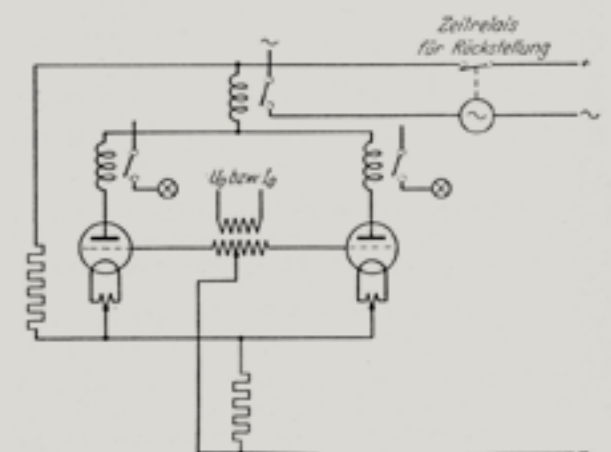
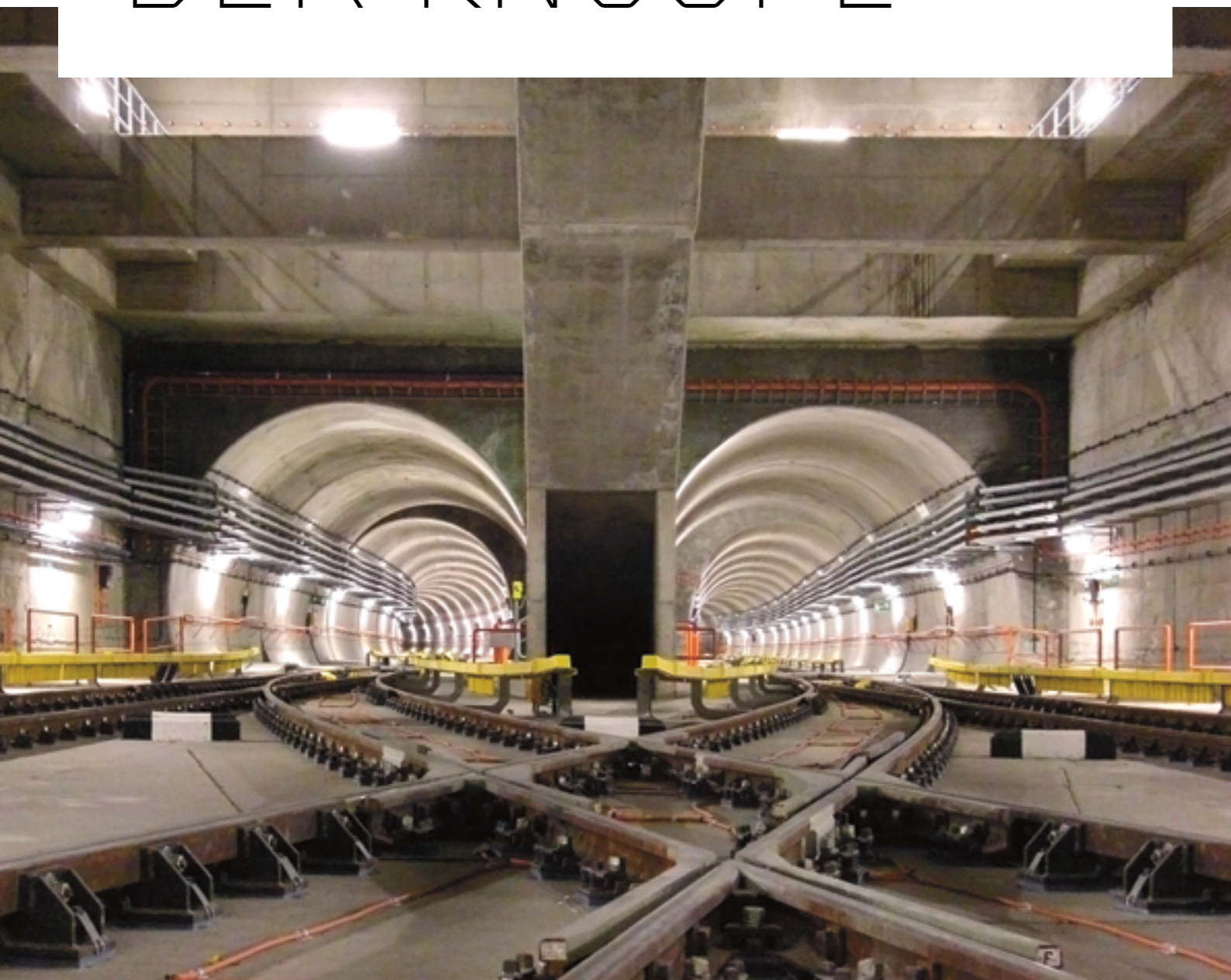


Abb. 13  
Erdschlusswischer-  
erfassung mit  
Zweifachröhren-  
schaltung





# FAHRGAST- SICHERHEIT MIT HILFE DER KNOSPE



Schienenkreuz im Tunnel © ELIN GmbH & Co

**Thomas Paluselli**, geb. 1970, Absolvent der HTL Schellinggasse, Fachrichtung Elektrotechnik, seit 1990 bei der Fa. ELIN GmbH & Co KG zuerst als Projektleiter, nun als Abteilungsleiter für den Bereich Mittelspannung, Schutz- und Automatisierungstechnik, Elektroinstallationen und öffentliche Beleuchtung tätig.

**Vedran Suljkanovic**, geb. 1979, Diplomstudium der Elektrotechnik an der Universität Tuzla, Bosnien und Herzegowina, und TU Wien. Als Project Engineer für MS Anlagen bis 2016 bei ABB beschäftigt. Aktuell als Energie- und Schutztechnikspezialist bei ELIN GmbH & Co KG angestellt.

Das 20-kV-Netz der Wiener U-Bahn ist in den letzten Jahrzehnten massiv gewachsen. Die Erkennung und rasche Abschaltung von Erdschlüssen ist aufgrund der massiven Rauchentwicklung im Tunnelbereich bei Kabelbränden eines der wichtigsten Kriterien für eine sichere Beförderung von 1,2 Millionen Fahrgästen pro Tag.

Die U-Bahn Wien ist neben der S-Bahn, der Straßenbahn, dem Autobusnetz sowie der Badner Bahn Bestandteil des öffentlichen Personennahverkehrs der österreichischen Bundeshauptstadt Wien und hat 2015 rund 440 Millionen Passagiere im Jahr befördert. Das Wiener U-Bahn-Netz besteht zurzeit aus fünf U-Bahn-Linien (U1-U4 und U6), ist 78,5 Kilometer lang und verfügt je nach Zählweise über 93 bzw. 104 Stationen. Es gibt neun Umsteigestationen zwischen zwei sowie eine zwischen drei Linien. Die fünf Linien verkehren alle auf ihrer eigenen Strecke (**Abb. 1**).

Die Firma ELIN ist jahrzehntelang für die Planung, Errichtung sowie Inbetriebnahme des 20-kV-Netzes der Wiener U-Bahn zuständig. In den letzten Jahren wurden von der Firma ELIN

- 500 Stk. gasisolierte Mittelspannungsschaltanlagen bzw. Schaltfelder
- 1.000 Stk. Schutzgeräte
- 150 Stk. Transformatoren sowie
- 300 km 20-kV-Mittelspannungskabel

erfolgreich geplant, geliefert und in Betrieb gesetzt. Der Umfang ist schematisch in **Abb. 1** ersichtlich. Jede U-Bahn-Linie wird vom lokalen Verteilnetzbetreiber Wiener Netze versorgt. Dies erfolgt über zwei Haupt- und eine Nebeneinspeisung sowie eine 20-kV-Ersatzstromanlage mit einer Leistung von ca. 4,5 MVA.

## SCHUTZKONZEPT

Im Bereich der Wiener Linien werden zur Versorgung MS-Kabelnetze verwendet, die überwiegend aus halogenfreien 20-kV-Kabeln bestehen. Diese sind entlang der Fahrstrecke in einem Betonkabelkanal verlegt und bilden den 20-kV-Versorgungsring.

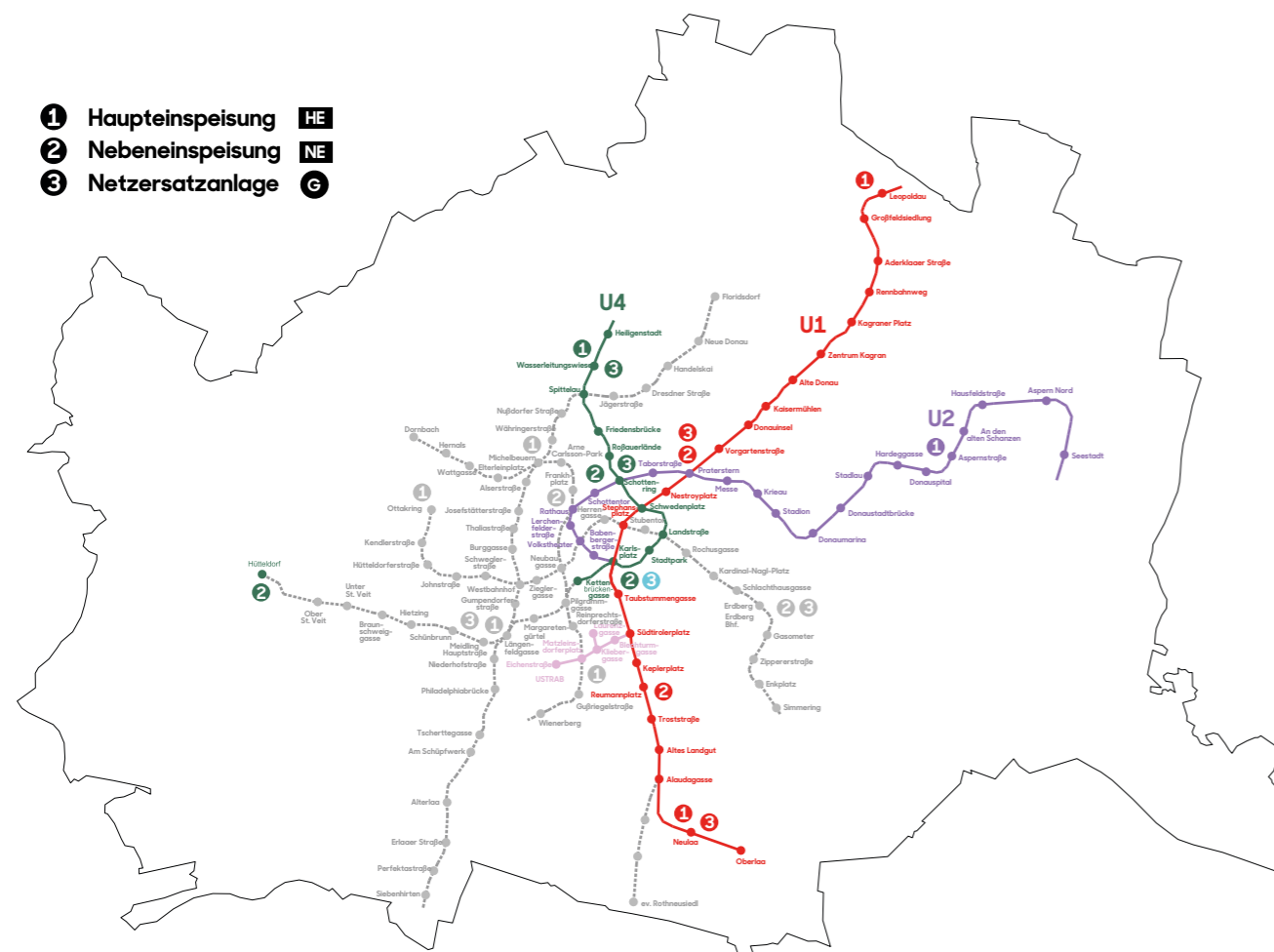
Das Schutzkonzept einer U-Bahn-Station sowie des dazugehörigen 20-kV-Kabelringes ist in **Abb. 2** dargestellt.

Als Hauptschutz verfügen die 20-kV-Kabelstrecken über Kabeldifferentialschutzeinrichtungen, die 20-kV-Stationen über einen Hochimpedanz-Differentialschutz als Sammelschienenschutz bzw. Anlagenschutz. Weiters wird ein Überstromzeitschutz als Hauptschutz für Transformatoren und Abgänge zu Unterstationen und als Reserveschutz für die 20-kV-Kabelstrecken eingesetzt. Ein Generatorschutz dient als Schutz für die Notstromgeneratoren.

Im Folgenden ein paar Anforderungen an den Stationsschutz sowie die Schaltautomatik:

- Bei Stationen ohne Haupt- und Nebeneinspeisungen (Zwischenstationen) sind alle Kabelabgänge sowie Kupplungen in der Verbrauchergruppe so zu schalten, dass ein geschlossener 20-kV-Ring entsteht.





- Bei Ausfall einer Anspeisung wird auf den zweiten Transformator umgeschaltet, sofern auf der einspeisenden Unterwerkssammelschiene Spannung vorhanden ist.
- Im Falle der Stromversorgung über das 4-MVA-Notstromaggregat werden sämtliche Stationstransformatoren sekundär weggeschaltet und primärseitig mit dem Generatorhochlauf mitmagnetisiert.
- Der bei jedem der im Parallelbetrieb befindlichen 20/0,4-kV-Transformatoren vorhandene Rückleistungsschutz auf der 400-V-Seite garantiert das selektive Abschalten des fehlerhaften Transformators und die sichere Weiterversorgung durch die restlichen Transformatoren.
- Bei Stationen, welche als Haupteinspeisungen ausgelegt sind, erfolgt unter anderem auch eine Meldungsprotokollierung der KNOSPE (kurzzeitige niederohmige Sternpunktterdung). Die Schutzauslösungen der KNOSPE werden äquivalent zu anderen Schutzauslösungen in der Automatikfunktion weiterverarbeitet.

#### KNOSPE-NETZ – DIE BRÄNDE IN TUNNELANLAGEN SIND SEHR GEFÄHRLICH

In MS-Netzen wird der Sternpunkt häufig über eine Petersen-Spule kompensiert betrieben. D. h., einpolige Erdschlüsse müssen nicht sofort abgeschaltet werden bzw. es erfolgt keine Unterbrechung der Energieversorgung. In Kabelnetzen und insbesondere in GIS-Schaltanlagen sollten Erdschlüsse möglichst rasch erkannt und selektiv abgeschaltet werden. Bei Erdschlussfehlern in Kabelanlagen entsteht eine ionisierte Strecke, welche in weiterer Folge zu einem Störlichtbogen führt. Der Lichtbogen brennt daher an dieser Stelle und kann bei längerer Dauer zu einem Kabelbrand führen, welcher im Tunnelbereich äußerst gefährlich ist. Hierbei sind oft auch benachbarte Phasen betroffen, wodurch es zu einem dreipoligen Kurzschluss mit größeren Fehlerströmen kommen kann.

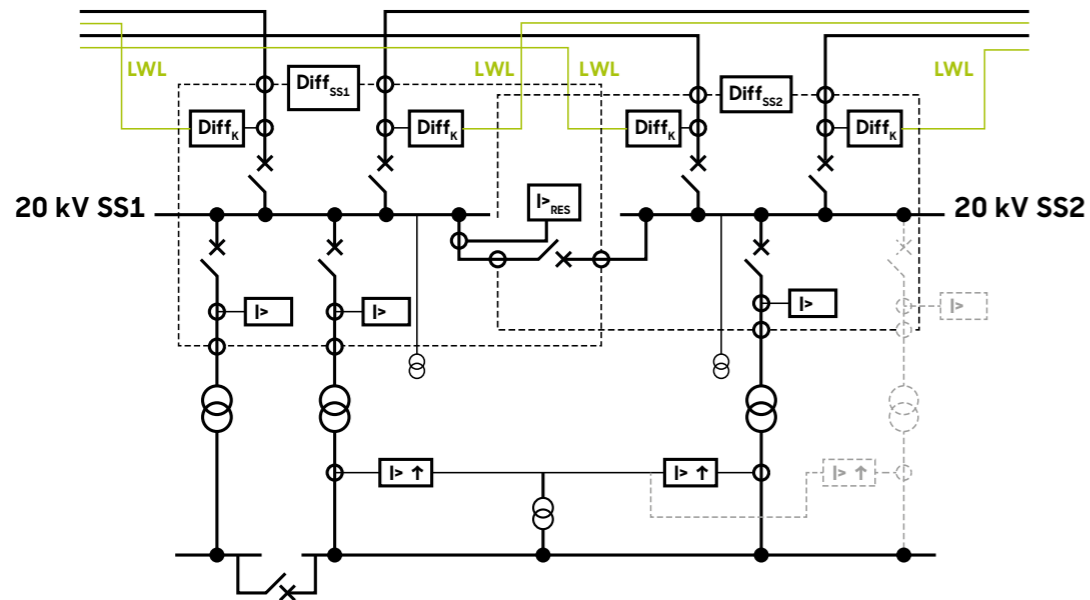
In jedem Fall ist es günstig, Erdschlüsse in gekapselten Anlagen sowie in Kabelanlagen, die nicht unmittelbar von selbst verlöschen, möglichst rasch zu orten und sofort die betroffenen Anlagenabschnitte selektiv abzuschalten.

Abb.1 Linienplan der Wiener U-Bahn (farbig sind die Linien mit einem 20-kV-Netz)





Diff<sub>SSx</sub> Sammelschienendifferentialschutz  
 Diff<sub>K</sub> Kabeldifferentialschutz  
 I> Überstromzeitschutz



Wegen der Risiken, die mit einem inneren einpoligen Fehler verbunden sind, insbesondere aber wegen der Brandgefahr, welche als Folge dieser Fehler auftritt, wurde 2007 das Widerstand-geerdete 20-kV-Netz zusätzlich mit einer KNOSPE erweitert.

Das KNOSPE-Verfahren mit Wattstromerfassung als Ortungsverfahren ermöglicht ein sicheres Ansprechen der Selektivitätsschutzeinrichtungen, erhöht dabei aber den Erdschlussstrom.

Hierbei wird bei einem Erdschluss über einen Schalter ein zweiter Widerstand zum bestehenden Fix-Widerstand dazugeschaltet. Die Erhöhung des Fehlerstromes führt ein gezieltes Erkennen durch die Schutzgeräte herbei und damit ein sicheres Ansprechen des Schutzes. Damit kann erreicht werden, dass die Schutz- und Schaltereigenzeiten in ausreichend großem Sicherheitsabstand unterhalb der Durchschmelzzeit der Anlage liegen bzw. dass die thermische Belastung der Fehlerstelle von Kabeln gering gehalten wird.

Wegen der kurzen Einwirkungsdauer sind auch höhere Berühr- und Schrittspannungen zulässig, wodurch der Aufwand bei den Erdungsanlagen geringer gehalten werden kann.

Die Fehlerausschaltzeit setzt sich aus folgenden Anteilen zusammen:

$t_0 = 20-50$ ms	Kommandozeit des Nullspannungsrelais
$t_g = 50-80$ ms	Einschaltzeit für die Kurzzerdung
$t_d = 20-50$ ms	Kommandozeit des Leitungsschutzes
$t_a = 50-120$ ms	Auschaltzeit des LS

Daraus ergibt sich eine gesamte Abschaltzeit bei einem einpoligen Fehler im MS-Netz von 140 bis 300 ms.

Bei den Einspeisetransformatoren wurde die Schaltgruppe YNyn0d1 gewählt. Dadurch ergeben sich deutlich kleinere Trafo-Nullimpedanzwerte gegenüber normalen YNyn0-Transformatoren, wodurch ein verbessertes Erdschlussengineering entsprechend dem Stand der Technik erzielt wird.

Abb. 2 Schutzkonzept einer typischen 20-kV-Station

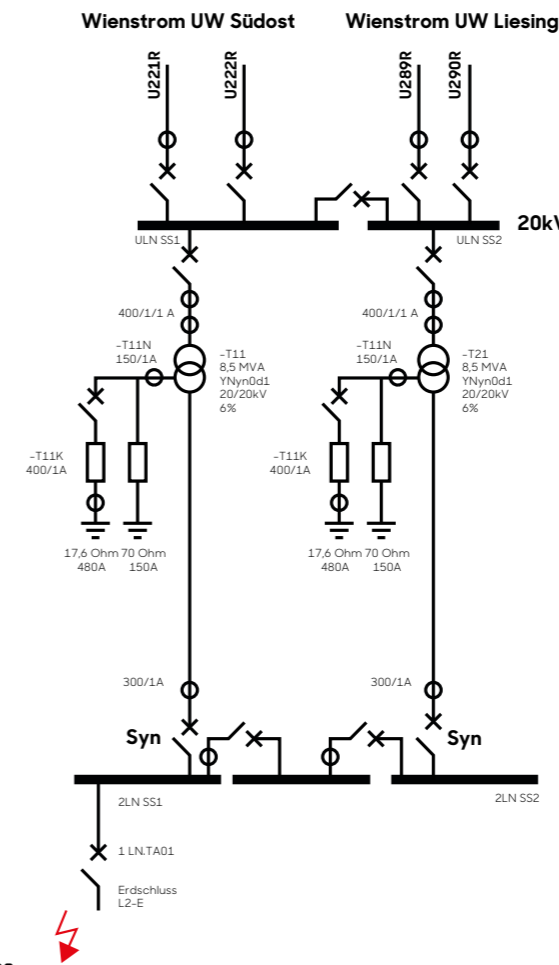


Abb. 3 Einspeisetransformatoren mit permanentem Sternpunktwidderstand und KNOSPE

### WARUM ÜBERGANG AUF KNOSPE

Beim Übergang zu einem Betrieb mit kurzzeitiger niederohmiger Sternpunktterdung werden bei entsprechender Einstellung der Schutzsysteme einpolige Fehler erkannt und in kurzer Zeit abgeschaltet. Durch die sehr kurze Einwirkungszeit bis zur Schutzauslösung bleibt das Brandrisiko gering. Weiterhin kann aufgrund der Schutzauslösung das fehlerhafte Betriebsmittel rasch erkannt und damit auch schnell repariert werden.

Die vorhandenen Schutzeinrichtungen können für die selektive Fehlerabschaltung verwendet

werden. Es sind lediglich an den Sternpunkt-bildern Schalter nachzurüsten, mit denen niederohmige Sternpunktwidderstände zugeschaltet werden können (als Anregelkriterium wurde die Verlagerungsspannung des Sternpunktes verwendet).

Insgesamt erscheint im Vergleich mit anderen Erdschlussortungsverfahren die kurzzeitige niederohmige Sternpunktterdung einfacher und kostengünstiger in ihrer technischen Realisierung sowie sicherer und schnell wirkend in ihrer selektiven Fehlerabschaltung zu sein.

# NEUE HERAUS- FORDERUNGEN, NEUE LÖSUNGEN



Advertorial

**Gernot Druml,**  
geb. 1956, Dr. techn.,  
Studium der Elektro-  
technik an der Universi-  
tät Graz mit Schwer-  
punkt Regelungstechnik.  
Seit 1990 im Bereich  
Erdschluss tätig.  
2013 Dissertation in  
Graz zum Thema  
„Innovative Methoden  
zur Erdschlussortung  
und Petersen-Spulen-  
Regelung“.  
Nun Produktmanager  
für Erdschlussschutz  
bei Sprecher Auto-  
mation GmbH in Linz/  
Österreich.

Erdschlusserfassung und -ortung gehören mit zu den schwierigsten Aufgaben in der Schutz-  
technik. Bei einem Kurzschluss fließen kA über  
die Fehlerstelle, die relativ leicht zu bewerten  
sind. Bei einem Erdschluss fließen hingegen in  
einem gelöschten Netz nur wenige Ampere  
über die Fehlerstelle, die teilweise um den Fak-  
tor 100 kleiner sind als der Laststrom.  
Beispiele für die neuen Herausforderungen an  
die Erdschlussortung, die sich teilweise durch  
die Energiewende ergeben, sind:

- Durch die Dezentralen Energieerzeu-  
gungs-Anlagen (DEA) ergeben sich an-  
dere Energieflüsse, wodurch gerichtete  
Erdschluss- und Kurzschlussanzeiger er-  
forderlich werden.
- Inselnetze: Durch ungewollte Inselbildungen  
ergeben sich in der Insel andere Rahmen-  
bedingungen für die Erdschlussortung.
- duale Netzplanung mit n-1 Sicherheit für die  
bestehenden hochverfügbaren Netze und  
n-0 Netze für DEAs
- neue Ansätze für eine automatische Ver-  
schiebung der Trennstelle in Netzen, die als  
offene Ringe betrieben werden, um eine  
schnellere Fehlereingrenzung durchzu-  
führen
- Erdschluss-Distanz-Abschätzung. Bisher  
konnte man nur den erdschlussbehafteten  
Abgang identifizieren.

Durch die Energiewende sind neue Anforderungen an die Regelung von  
Petersen-Spulen, die Erdschlusserfassung und die Erdschlusseingrenzung  
entstanden. Durch die rasanten Entwicklungen in der Mikroprozessor-  
technik und der Messtechnik sind nun neue Algorithmen zur Lösung dieser  
Herausforderungen umsetzbar.

- Verwendung von vorhandenen kapazitiven  
Sensoren in den Ortsnetzstationen
- Im Freileitungsbereich wird die Erkennung  
von Erdschlüssen mit einer Übergangsimpe-  
danz bis in den Bereich von 20 kΩ gefordert.
- Für wiederzündende Fehler in Kabelab-  
schnitten bzw. für Fehler mit nichtlinearer  
Fehlerimpedanz wird eine eindeutige Rich-  
tungsanzeige gefordert, die mit den bishe-  
rigen  $\cos(\phi)$ -Relais nicht möglich ist.

Die oben angeführten Herausforderungen er-  
fordern neue Algorithmen zur raschen Feh-  
lereingrenzung und möglichst ohne Versor-  
gungsunterbrechung für die Kunden.  
Im Folgenden werden einige neue Verfahren  
kurz beschrieben, die im EDIR-Funktionsmo-  
dul von Sprecher Automation eingebaut sind.  
Diese neue EDIR-Funktionalität ist sowohl in den  
Kombigeräten der SPRECON-P-Serie als auch  
im Einzelgerät SPRECON-EDIR verfügbar.

## TRANSIENTE ERDSCHLUSSORTUNG

Die Einschränkungen der analogen Wischer-  
relais bestehen darin, dass der Übergangswi-  
derstand der Fehlerstelle 50 Ω nicht überschrei-  
tet und der Ausgleichsvorgang innerhalb der  
ersten Periode abgeschlossen ist. Die direkte  
Digitalisierung würde eine Abtastrate von ca.  
20 kHz benötigen.

© Denis Tangney Jr. / iStock by Getty Images



Erst durch die Einführung neuer Algorithmen (qu und qu2), die mit einer Abtastrate von 2 bis 4 kHz auskommen, wurden die transienten Verfahren wieder interessant. Durch die neue Prozessortechnologie kann man nun auch historische Informationen verarbeiten und dadurch wesentlich höherohmige Fehler erkennen. Die einzige Randbedingung ist, dass der Zündzeitpunkt des Erdschlusses im Aufzeichnungsbereich des Relais liegt. Der neueste Algorithmus qu4 verwendet eine Vorgeschichte von 20 Perioden und ermöglicht eine transiente Auswertung bis in den Bereich von 25 kΩ in einem 100-A-Netz. Alle qu-Verfahren sind in der EDIR-Funktion von Sprecher Automation inkludiert.

Ein weiterer Vorteil dieser neuen Algorithmen ist, dass der Einfluss von 50-Hz-Kreisströmen, Oberschwingungsströmen und natürlichen Unsymmetrien kompensiert wird.

Beim Erdschlusseintritt können zwei Vorgänge unterschieden werden [2][3]:

- Entladung des erdschlussbehafteten Leiters
- Aufladung der beiden gesunden Leiter

Beim Entladen des erdschlussbehafteten Leiters bilden sich Wanderwellen aus. Es gibt bei Sprecher Automation neue Ansätze, die Laufzeit dieser Wanderwellen auszuwerten und die Distanz bis zum Fehler zu schätzen. [1][5]

Zugleich mit der Entladung des fehlerhaften Leiters beginnt die Aufladung der beiden gesunden Leiter auf die verkettete Spannung.

Bei Standard-Wischerrelais, die bei Überschreitung eines Schwellwertes ein Stromfenster für ca. 100 μs öffnen und die Polarität des Stromes bewerten, kann es durch die überlagerten Entlade- und Aufladeschwingungen zu Fehlanzeigen kommen. Detail sind zu finden in [2].

#### Transienter Vorgang

##### Satter Erdschluss (Erdkurzschluss)

Beim qu-Verfahren wird der Strom als integraler Wert mindestens bis zum Spannungsmaximum der Nullspannung verwendet. Der Zusammenhang zwischen  $u_0$  und  $i_0$  ist in der folgenden Gleichung für den gesunden Abgang dargestellt.

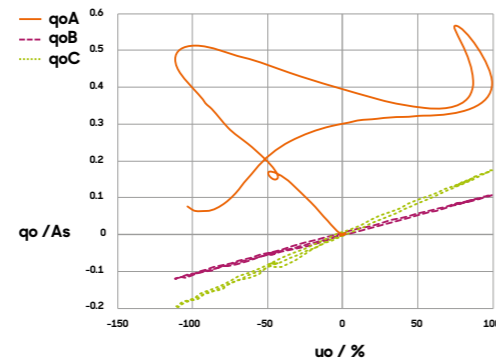


Abb. 1 qu-Auswertung des niederohmigen Erdschlusses

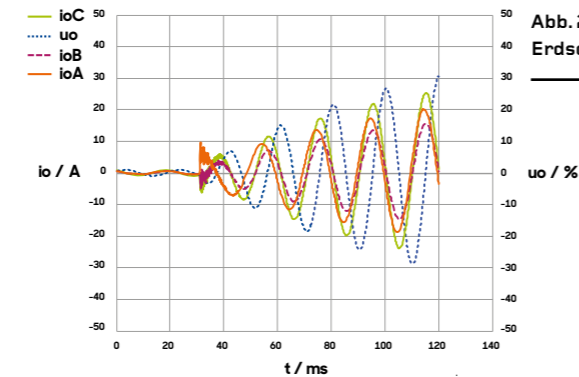


Abb. 2 Hochohmiger Erdschluss

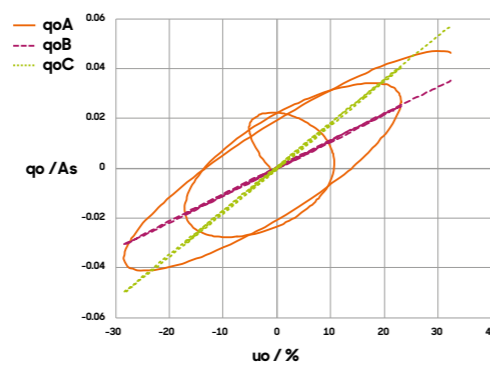


Abb. 3 qu-Diagramm des hochohmigen Erdschlusses

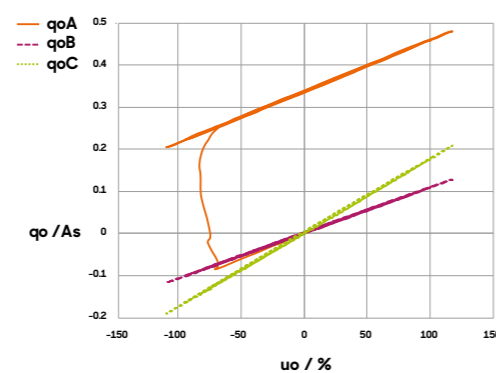


Abb. 4 qu-Diagramm des wiederzündenden Fehlers

$$u_0(t) = u_0(t_0) + \frac{1}{C_{eqB}} \int_{t_0}^t i_{0B}(\tau) d\tau$$

Wird die Verlagerungsspannung auf der x-Achse aufgetragen und der aufintegrierte Strom (Ladung q) der drei Abgänge auf der y-Achse, so erhält man das qu-Diagramm für die drei Abgänge, siehe **Abb. 1**.

Aus **Abb. 1** ist erkennbar, dass die gesunden Abgänge Geraden darstellen und der erdschlussbehaftete Abgang nur am Beginn eine Gerade ist und die Kurve mit einer negativen Steigung beginnt.

#### Lineare hochohmige Fehlerimpedanz bis in den Bereich von 25 kΩ

Liegt ein sehr hochohmiger Fehler vor, so können die beiden gesunden Leiter nur langsam aufgeladen werden, wie aus **Abb. 2** erkennbar ist.

Als vereinfachte Annahmen können Fehler, wie z. B. ein Leiterseil auf einer Wiese oder auf einem Baum, als lineare Resistenzen betrachtet werden.

#### Wiederzündender Fehler durch eine nichtlineare Fehlerimpedanz

Erfolgt in einem Kabel ein Überslag, so entstehen wiederzündende Fehler, Details siehe [1][2]. Dieser wiederzündende Vorgang wiederholt sich bis zur Abschaltung des fehlerhaften Segmentes.

Das zugehörige qu-Diagramm ist in **Abb. 4** dargestellt.

Fehlerklassifizierung mit den qu-Algorithmen  
Mit den qu-Verfahren der EDIR-Funktion ist eine Fehlerklassifizierung möglich. Der wiederzündende Fehler, **Abb. 4**, kann nur im Kabel, in Kabelendverschlüssen oder Muffen auftreten. Die Suche in gemischten Netzen kann daher bei diesem Fehlerbild auf Kabelabschnitte eingeschränkt werden.

Die Praxis hat gezeigt, dass die erreichbare Wahrscheinlichkeit der korrekten gerichteten Fehlererkennung bei Fehlern im Kabelsegment über 99,5 % und bei Fehlern im Freileitungsbereich im Bereich von 95 % liegt. Im Freileitungsbereich stellt sich die Frage, welche Fehler keine Wischer sind, denn diese können durch transiente Verfahren nicht erkannt werden.

## SPRECON-EDIR

Erweiterte gerichtete Erdschluss- und Kurzschlussanzeige



### Zusammengefasst

SPRECON-EDIR wird unter Verwendung und Auswertung unterschiedlicher Verfahren für die permanente Überwachung in kompensierten, isolierten oder niederohmig geerdeten Mittelspannungsnetzen eingesetzt. Die einzelnen Erdschlussortungsverfahren, welche gleichzeitig ausgeführt werden, können dabei priorisiert zu einer Einzelmeldung zusammengefasst werden.

#### HAUPTMERKMALE

- Verlässliche Richtungsanzeige von wiederzündenden Kabelfehlern
- Priorisierung der Richtungserkennungsverfahren:  
stationäre und wiederzündende Verfahren, Oberschwingungs- und Wischerverfahren (bis 25 kΩ), Pulsortung, schnelle Pulsortung (<1 s)
- komplexe Pulsortung bis 5 kΩ
- Pulsortung für unterkomp. Netze
- Doppelerdschlusserkennung



## STATIONÄRE VERFAHREN

Viele Erdschlussversuche haben gezeigt, dass die stationären 50-Hz-Methoden in der Praxis eigentlich keine sichere gerichtete Erdschluss-Anzeige liefern.

Für die Oberschwingungen wird aus dem gelöschten Netz ein isoliertes Netz, und das  $\sin(\phi)$ -Verfahren für die jeweilige Oberschwingung liefert sehr gute Ergebnisse. Am günstigsten sind Verfahren, die Frequenzen verwenden, die im natürlichen Drehstrom-System nicht vorhanden sind. Aus diesem Grunde sind bei SPRECON-EDIR die Oberschwingungs-Frequenzen frei wählbar.

## QUASISTATIONÄRE ERDSCHLUSS-ORTUNG

Durch Variation der Petersen-Spule, z. B. durch zyklisches Zuschalten eines parallel geschalteten Kondensators, wird der Blindstrom über die Fehlerstelle verändert. Aus **Abb. 5** ist erkennbar, dass diese Änderung nur vom Taktgenerator bis zur Fehlerstelle messbar ist.

Das übliche Pulsortungsverfahren arbeitet nur bis zu einer Fehlerimpedanz von ca. 200  $\Omega$  und einer Verlagerungsspannung über 80 %. Durch eine komplexe Auswertung des Nullstromes durch die EDIR-Funktion ergeben sich die folgenden Vorteile:

- Durch die komplexe Auswertung funktioniert die Pulsortung bis in den Bereich von 5 k $\Omega$ .
- Die bisher erforderliche Betriebsart des Netzes mit Überkompensation ist nicht mehr notwendig. Dies ist ein großer Vorteil bei der heutigen stark zunehmenden Verkabelung. Mit den neuen Relais wird sogar die Betriebsart mit Unterkompensation ohne Umschaltung eines Parametersatzes möglich.
- Da es ein quasistationäres Verfahren ist, kann die Ortung des hochohmigen Fehlers jederzeit wiederholt werden.
- In Ringen und vermaschten Netzen erhält man mit dem neuen Algorithmus eine gerichtete Information zur Fehlerstelle.

## PRIORISIERUNG DER METHODEN

SPRECON-EDIR kann bis zu 15 Erdschlussortungs-Methoden gleichzeitig ausführen. Durch eine Priorisierung der Methoden kann die Signalisierung bei Bedarf auf zwei Meldungen reduziert werden.

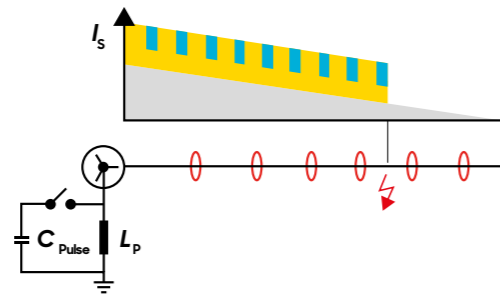


Abb. 5 Prinzip der Pulsortung

## ERDSCHLUSS-DISTANZ-ORTUNG

In Bezug auf Erdschluss-Distanz-Abschätzungen in gelöschten Netzen sind die ersten positiven Ergebnisse verfügbar.

Sobald auch aus den Ortsnetzstationen Abschätzungen über die Erdschluss-Fehlerentfernung zur Verfügung gestellt werden, ergeben sich völlig neue Konzepte zur Fehlereingrenzung.

## ZUSAMMENFASSUNG

Dieser Bericht zeigt, dass bereits heute viele der Herausforderungen, die durch die Energiewende gestellt werden, lösbar sind, wie z. B.:

- gerichtete Erkennung von Erdschlüssen mit Fehlerimpedanzen bis in den Bereich von 25 k $\Omega$  (qu2, qu4)
- gerichtete Erkennung von wiederzündenden Fehlern in Kabelsegmenten, Muffen und Kabelendverschlüssen (qui2)
- Klassifizierung der Fehlerart in gemischten Netzen: Fehler im Kabelabschnitt bzw. im Freileitungsabschnitt. Durch diese Zusatzinformation kann die Fehlereingrenzung wesentlich beschleunigt werden.
- neue Pulsortungsalgorithmen, die bis in den Bereich von einigen k $\Omega$  funktionieren, jederzeit wiederholbar sind und keine Überkompensation erfordern
- Die neue Pulsortung kann in Zukunft eine wesentliche Komponente bei der automatischen Fehlereingrenzung von hochohmigen Erdschlüssen werden.
- Durch die hochohmige Anbindung an die kapazitiven Sensoren in den Ortsnetzstationen sind nun gerichtete Erdschluss- und Kurzschlussanzeiger auch in den Ortsnetzstationen einfach realisierbar.

Mit der SPRECON-E-Serie und dem SPRECON-EDIR Gerät bietet Sprecher Automation die beschriebenen Algorithmen und Verfahren zur Lösung der oben beschriebenen Aufgaben an.

## Quellen

- 1 G. Druml; U. Schmidt; P. Schegner, Effects of the non-linear Arc of a 20-kV-net single-line cable fault on the Earth-Fault-Detection and -Control, PAC World, Ljubljana 2016
  - 2 G. Druml, Innovative Methoden zur Erdschlussortung und Petersen-Spulen-Regelung, Dissertation, Technische Universität Graz, 2013
  - 3 H. Melzer. et al., Die aktuelle Situation der Sternpunktbehandlung in Netzen bis 110 kV (D-A-CH), ETG-Fachbericht 132, VDE Verlag GmbH, Berlin, Offenbach 2012
  - 4 Ch. Tengg; K. Schoaß; R. Schmaranz, M. Marketz; G. Druml; Neue Erdschluss-Ortungsverfahren im Praxistest, Beitrag zur ETG Fachtagung STE 2011 in Erfurt, ETG-Fachbericht 129, VDE-Verlag GmbH, Berlin, Offenbach 2011
- Weitere Quellen – siehe Online Version unter [netzschutz-magazin.com](http://netzschutz-magazin.com)**







# DIGITALE SCHUTZGERÄTE ERFASSEN ERDSCHLÜSSE PRÄZISE

Advertorial

## Klaus Böhme,

geb. 1963, promovierte an der Technischen Universität Berlin. Seit 1992 bei Siemens AG in Berlin als Projektleiter für die Entwicklung digitaler Schutzgeräte. Schwerpunkte Leitungs-, Abzweigschutzgeräte und Maschinenschutz. Seit 2012 Experte für Definition und Design neuer Schutzfunktionen.

## Thomas Liebach,

geb. 1959, promovierte an der Technischen Hochschule Leipzig. Seit 1992 im Vertrieb von Schutz- und Stationsleittechnik tätig, danach in der Entwicklung von Schutzgeräten bei der Siemens AG in Nürnberg. Ab 2004 Leitung Vertrieb für die Power T&D in Russland. Seit 2015 technischer Berater für Schutztechnik bei der Siemens AG in Deutschland.

Digitale Schutzeinrichtungen gestatten durch eine hohe Flexibilität und Leistungsfähigkeit mit verschiedenen Funktionen, die auf modernen Algorithmen beruhen, Erdschlüsse richtig zu erfassen. Nachfolgend werden einige Verfahren, deren sinnvolle Kombinationen sowie Erfahrungen aus dem praktischen Einsatz beschrieben.

Das Thema Erdschluss bleibt insbesondere in Verteilungsnetzen auch im Zeitalter der Energiewende ein aktuelles Thema, was durch eine anhaltend hohe Zahl von Anfragen aus den Energieversorgungsunternehmen, der Diskussion in Schutzarbeitskreisen und auf Fachtagungen, aber auch in Veröffentlichungen unterstrichen wird.

Die Erdschlusserkennung und -eingrenzung wird erschwert durch falsche Richtungsbestimmungen, Nichtansprechen von Schutzeinrichtungen wegen zu geringer Fehlerströme, den Meldeschwall bei intermittierenden Fehlern oder auch das Fehlansprechen von Erdschlussschutz-einrichtungen durch andere Fehlerursachen. Die Nutzung der digitalen Schutztechnik führt zu einer wesentlich zuverlässigeren Erkennung und Lokalisierung von Erdschlüssen. Dabei helfen neben einer Vielzahl flexibel einsetzbarer Funktionen eine hochgenaue Abtastung der Fehlergrößen Strom und Spannung, die Störschreibung und die Speicherung der Schutzreaktionen. Der technische Fortschritt in der Gerätetechnik und neue Ideen der Entwickler haben in den letzten Jahren zum Einsatz erweiterter und verbesserter Algorithmen geführt.

### UNTERSCHIEDLICHE ERDSCHLUSSEVERFAHREN STEHEN ZUR VERFÜGUNG

Die Auswahl der geeigneten Erdschlussschutzfunktion hängt von der Art des Netzes (isoliert / kompensiert / Freileitung / Kabel ...), den Fehler-

bedingungen und auch den Erfahrungen des Anwenders ab.

Die einfachsten Schutzfunktionen arbeiten ungerichtet und werten die Nullsystemspannung  $U_0$  (Verlagerungsspannung) oder den Nullsystemstrom  $3I_0$  aus. Mit den genannten Verfahren ist eine Erkennung des Erdschlusses möglich, nicht aber die Eingrenzung des Erdschlussortes auf der Grundlage der Fehlerrichtungsbestimmung.

Die Erweiterung der Schutzfunktion um die Auswertung der Phasendifferenz zwischen  $U_0$  und  $3I_0$  erlaubt die Bestimmung der Richtung des Erdschlusses. Zu den am häufigsten verwendeten Verfahren zählt in kompensierten Netzen das wattmetrische Verfahren. Die Richtungsbestimmung wird durchgeführt, wenn der Erdfehler eine ausreichend lange Zeit bestehen bleibt, damit nach dem Abklingen der transienten Vorgänge im Netz der Schutzalgorithmus zu einer sicheren Richtungsidentifikation kommt. Dieses Verfahren findet außerdem Anwendung im U-I-Phi-Verfahren und auch bei der Richtungsbestimmung mit höheren Harmonischen. Bei kurzzeitigen, nicht beständigen Erdschlüssen ist die Richtungsbestimmung über die Phasendifferenz nicht möglich.

Für schnell wieder verlöschende oder auch häufiger wiederkehrende Erdfehler bedarf es anderer Verfahren, die eine zuverlässige Richtungsbestimmung gestatten.

Kabel nach Erdschluss © Siemens AG

Erdschlussfunktion										
Netztyp	$U_0 >$	$I_0 >$	$Y_0 >$	cos/sin	$G_0/B_0$	U, I Phi	Wischer	Intrn.	Harm.	Pulse
Isol. Netz	0	0	0	-/(sin)	-/(B0)	+	+	0	+	-
Komp. Netz	0	0	0	+(cos)/-	+(G0)/-	+	+	0	+	+
vermaschtes Netz	0	0	0	-	-	-	+	0	0	-
Kabelnetz	0	0	0	+	+	+	+	+	0	-
Fehlerart	$U_0 >$	$I_0 >$	$Y_0 >$	cos/sin	$G_0/B_0$	U, I Phi	Wischer	Intrn.	Harm.	Pulse
Intermitt. Fehler	0	0	0	0	0	-	0	+	0	-
Hochohm. Fehler	0	0	0	0	0	0	+	-	0	-
Transient. Fehler	-	-	-	0	0	0	+	0	-	-
Dauererdschluss	0	0	0	+	+	+	0	-	+	+

Ein weithin bekanntes Verfahren bildet die Erdschlusswischerfunktion. Weniger verbreitet ist das Pulsortungsverfahren, das zur Erdschlussortung keine Spannungen erfasst, aber einen zusätzlichen Pulsgenerator erfordert. Heute werden von unterschiedlichen Schutzgerätheherstellern multifunktionale Schutzeinrichtungen angeboten, die u. a. auch verschiedene Erdschlussschutzfunktionen beinhalten. Das Angebot mehrerer, verschiedener Verfahren deutet an, dass es zur Erdschlusserfassung nicht die „eine Lösung“ gibt. Für den Betreiber ergibt dies die Herausforderung, das beste Verfahren für sein Verteilungsnetz auszuwählen, einzusetzen und im Falle eines Erdschlusses daraus die richtigen Schlüsse abzuleiten. Die **Tab. 1** zeigt, welches Verfahren zur „empfindlichen Erdschlusserfassung“ in welchen Fällen besondere Stärken hat.

Die nachfolgend beschriebenen Verfahren zeichnen sich durch eine hohe Leistungsfähigkeit bei der Erdschlusserkennung aus. Auf der Basis neu entwickelter Algorithmen werden diese in Schutzgeräten der Produktreihe SIPROTEC 5 genutzt. [1]

#### Erdschlusswischerverfahren

Die Erdschlusswischerfunktion ermittelt aus den transienten Vorgängen, die zum Beginn eines jeden Erdschlusses in kompensierten und isolierten Netzen auftreten, die Richtung

des Fehlerortes. Bei einem Erdschluss tritt in den ersten 5..10 ms des Fehlervorganges der sogenannte „Wischereffekt“ auf. Die Zeit und die Frequenz der Transienten sind im Wesentlichen abhängig von den Netzkapazitäten [2], der Art des Fehlers (hochohmig, niederohmig) und der Dauer des Fehlers. Bei der Entladung der Leitungskapazitäten im fehlerbehafteten Leiter und der Aufladung der Kapazitäten der fehlerfreien Leiter [3] entsteht ein charakteristischer Strom- und Spannungsverlauf. Die Aufladeschwingung kann mit hohen Abstraten (mindestens 8 kHz) zuverlässig erfasst werden. Mit der Analyse der elektrischen Größen Strom und Spannung während der kurzen Zeit des Umladevorganges wird es möglich, die Fehlerrichtung zu ermitteln.

Bereits analoge Erdschlusswischerrelais nutzen die Analyse des Einschwingvorganges zur Fehlerrichtungsbestimmung. Bedingt durch die begrenzten technischen Möglichkeiten kam und kommt es wiederholt zu fehlerhaften Ergebnissen bei der Richtungsbestimmung mit analogen Messprinzipien. Das Verfahren ist bei niederohmigen Fehlern sicherer als bei hochohmigen.

Die gerichtete Erdschlusswischerfunktion mittels digitaler Messgrößenverarbeitung wertet den Wischereffekt innerhalb einer kurzen Phase nach Fehlereintritt aus und trifft eine sichere Richtungsentscheidung auch bei hochohmigen Fehlern.

**Tab. 1 Eignung von Erdschlussverfahren bezogen auf die Netztypen und Fehlerarten**

In den Schutzgeräten der SIPROTEC 5 Produktreihe wird zur Bestimmung der Erdschlussrichtung die Wirkleistung im Nullsystem als Kriterium verwendet (siehe **Gl. 1** und **2**). Diese repräsentiert den Ohm'schen Anteil im Signal. Da über die gesamte Zeit des Umladevorganges der Wirkleistungsanteil existiert, kann man diesen auch ab dem Fehlereintritt integrieren. Es wird folglich die Wirkenergie im Nullsystem ausgewertet (siehe **Gl. 3**)

**Gl. 1**

$$p_0 = u_0(k)i_0(k)$$

**Gl. 2**

$$p_a(k) = \frac{1}{T} \int_{k-T}^k p_0(k). dt$$

**Gl. 3**

$$E_0(k) = \int_0^k p_a(k). dt$$

Die berechnete Wirkenergie vergleicht der Schutzalgorithmus mit Schwellwerten. Das Überschreiten des positiven Schwellwertes bestimmt den Erdschluss in Rückwärtsrichtung, das Unterschreiten des negativen Schwellwertes hingegen in Vorwärtsrichtung.

Die in SIPROTEC 5 Geräten integrierte Erdschlusswischerfunktion ist seit 2013 im Einsatz und erhielt von vielen Energieversorgungsunternehmen sehr gute Bewertungen in Hinblick auf die Empfindlichkeit und real 100 % Zuverlässigkeit bei der Richtungsbestimmung.

#### Pulsortung

Beim „Pulsortungs-Verfahren“ wird ein Puls muster über die Kompensationsspule, durch zeitweises Parallelschalten eines Kondensators, auf den Erdstrom moduliert. Die Kompensation wird dabei mit dem zu erkennenden Muster zeitweise verstimmt. Das Puls muster erzeugt Erdstromimpulse im Sekundenbereich. Tritt ein Erdschluss im Netz auf, ist dieser Puls nur in der fehlerhaften Leitung von den im Netz vorhandenen Schutzgeräten messbar. Hinter dem Erdschlussort ist er nicht mehr zu erkennen. Damit kann in Strahlennetzen der Erdschluss eingegrenzt und geortet werden. In vermaschten Netzen wird es notwendig, vor Einleitung der Pulsortung die Maschen durch Schaltmaßnahmen zu öffnen. Das Verfahren ist nur sinnvoll einsetzbar, wenn über eine längere

Zeit der Erdschluss besteht und die Primärtechnik zur Erzeugung der Pulse vorhanden ist. Dank der Integration des Pulsortungsverfahrens in die Schutzgerätereihe SIPROTEC 5 kann bei vorhandenem Puls generator ohne Zusatzgerät die Puls mustererkennung als zusätzliches Fehlererkennungskriterium genutzt werden.

#### Erdschlussrichtungsbestimmung mit höheren Harmonischen

Die bislang betrachteten Verfahren verwenden die Grundschwingung von Strom und Spannung zur Richtungserkennung. Auch die im Netz vorhandenen Oberschwingungsanteile bieten sich für die Erdfehlerermittlung an. In den heute bekannten Verfahren werden die 3., 5. und 7. Oberschwingung bewertet. Für den Stromfrequenzbereich ab 150 Hz ist die Petersen-Spule hochohmig. Dadurch verhält sich das kompensierte Netz wie im Fall eines isolierten Sternpunktes. Der Anteil des kapazitiven Stromes wird durch die höhere Frequenz größer. Die genannten Verfahren sind folglich auch bei hochohmigen Fehlern hochempfindlich.

#### KOMBINATION VON VERFAHREN

Da alle Verfahren ihre Stärken und Schwächen haben, liegt es nahe, mehrere Verfahren parallel einzusetzen und deren Ergebnisse geeignet zu kombinieren. In den meisten Fällen ist hier eine ODER-Verknüpfung ausreichend. Diese wird in der empfindlichen Erdschlussfunktion in den SIPROTEC 5 Geräten automatisch auf Basis der Richtungsergebnisse der verwendeten Stufen (die die unterschiedlichen Erdschlussverfahren enthalten) in der „Erdschlussmeldung“ gebildet.

Eine der am häufigsten einzusetzenden Kombinationen ist die von Erdschlusswischerverfahren und wattmetrischer Erdschlusserfassung. Dabei bestimmt die Erdschlusswischerfunktion am Anfang des Fehlers die Richtung und das wattmetrische Verfahren nach Abklingen des transienten Einschwingvorganges die Bestätigung für einen, ggf. vorhandenen, Dauererdschluss. In **Abb. 1** sind die Ergebnisse beider Funktionen eines Störschriebes dargestellt. Die Erdschlusswischerfunktion liefert auch bei empfindlicher Einstellung und hochohmigen Fehlern zuverlässige Ergebnisse.

Zusätzlich sind in den Binärsignalen die Position des Messfensters der Wischerfunktion (letztes Binärsignal) und die erkannte Fehlerlöschung



(erstes Signal) in der Störschrieaufzeichnung erkennbar.

Weiterführende, auch komplexere Funktionsverknüpfungen lassen sich unter Verwendung der integrierten anwenderdefinierbaren Logiken (z. B. der CFC-Logik bei den SIPROTEC 5 Geräten) mit geringem Zusatzaufwand realisieren. Es können so z. B. 2 aus 2 Entscheidungen realisiert werden (UND-Verknüpfung der beiden Vorwärtsentscheidungen) oder auch andere Erdschlussverfahren gesperrt werden, wenn ein intermittierender Erdschluss vorliegt. Die Umsetzung der zusätzlichen Logiken macht dann Sinn, wenn vorher Analysen aufgezeichneter Erdschlüsse durchgeführt wurden. Zusätzlich werden dabei auch die langjährigen Erfahrungen der Spezialisten in den Energieversorgungsunternehmen und von Herstellerseite herangezogen, um optimierte Lösungen zu entwerfen.

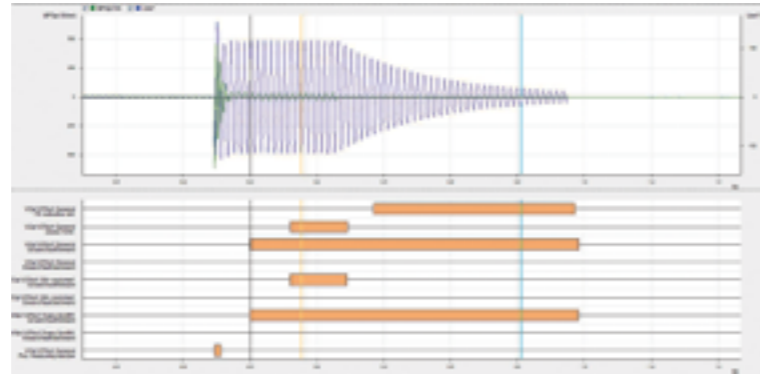
#### PRAKTISCHE ERFAHRUNGEN

Zwei ausgewählte Beispiele aus der Praxis können darstellen, wie die Thematik sinnvoll umgesetzt wurde.

##### Beispiel 1:

Bei analogen Erdschlusswischerrelais gab es Probleme, den Ansprechstrom so einzustellen, dass die Erdschlüsse in den eigenen 20-kV-Netzen zuverlässig und korrekt erkannt wurden. Beim Einsatz der digitalen Erdschlusswischerfunktion der SIPROTEC 5 Geräte ist dieses Problem behoben. Es wird nur noch der Ansprechwert der Erdschlussspannung eingestellt. Die Funktion arbeitet unabhängig von der Erdstromhöhe und sichert zu 100 % korrekte Richtungsentscheide. In diesem Jahr traten in den sehr ausgedehnten, vorgeordneten 110-kV-Netzen und im eigenen 20-kV-Netz eines deutschen Stadtwerks mehr als 230 Erdschlüsse auf. Bei 18 im Netz vorhandenen SIPROTEC 5 Geräten mit integrierter Erdschlusswischerfunktion gab es folglich 4140 korrekte Richtungsanzeigen.

Die Erdschlusswischererfassung wurde mit dem klassischen Verfahren für kompensierte Netze, der wattmetrischen Erdschlusserfassung, kombiniert.



##### Beispiel 2:

In einem 2. Beispiel wird von einem Energieversorgungsunternehmen das wattmetrische Verfahren im Netz eingesetzt. Überraschend trat ein Schwall von Meldungen nach der Modernisierung der Schutzgeräte auf. Die Analyse ergab, dass es sich bei den Fehlern um intermittierende Erdschlüsse handelte, die vorwiegend in Kabelnetzen auftreten. Daraufhin wurde das wattmetrische Verfahren um die Erdschlusswischerfunktion und den intermittierenden gerichteten Erdschlusschutz ergänzt. Diese drei Funktionen stehen nun zur Analyse bei auftretenden Erdschlüssen zur Verfügung. Zwei Verfahren werden dem Wartpersonal aktuell je Abzweig auf einem Monitor dargestellt. Auf Basis dieser Informationen besteht mehr Sicherheit bei der Fehlerinterpretation und der Einleitung von Folgemaßnahmen.

#### ZUSAMMENFASSUNG

Durch die Integration verschiedener Erdschlusschutzfunktionen in einem multifunktionellen digitalen Schutzgerät ist es heute möglich, Erdschlüsse in kompensierten und isolierten Netzen sicher zu erfassen und zuverlässig den Fehlerort einzugrenzen. Durch die Einbindung der Schutzgeräte in die Kommunikationsinfrastruktur des Betreibers verkürzen sich Reaktionszeiten, verringern sich Risiken für die Fehlerausdehnung und erhöht sich die Versorgungssicherheit für die Verbraucher.

**Abb. 1 Störschrieb  
Kombination cos/sin  
mit Erdschlusswischer**

# WER SUCHET, DER FINDET

#### Eine Ausgabe - ein Thema

Der Erdschluss ist in unseren Netzen oft schwer zu orten und lange war das nur mit teurer Ausrüstung möglich. Jetzt erobert eine neue Generation von Geräten den Markt, die kostengünstig und effizient sind. In dieser Ausgabe von NETZSCHUTZ – Das Magazin für Schutztechnik stellen wir

Insider-Wissen und technisches Know-how zum Einsatz der Erdschlusschutzgeräte und ihrer Funktionen vor – unter Berücksichtigung der von Netz und Verkabelung bedingten Phänomene.

[www.netzschutz-magazin.com](http://www.netzschutz-magazin.com)

# EINDEUTIGE FEHLERORTUNG TROTZ STÄNDIG WACHSENDER VERKABELUNG

Advertorial

## Gerd Kaufmann,

geb. 1977, Studium elektrische Energietechnik an der TU Ilmenau, Diplomarbeit bei der ABB Schweiz im Bereich Leistungselektronik. Arbeitsstätten: envia-m, Valeo und die ABB Schweiz AG. Seit 2006 bei A. Eberle GmbH & Co. und seit 2012 Produktmanager für den Bereich Erdschlussortung und -Regelung.

© Gerd Kaufmann / A. Eberle GmbH & Co.

Durch Verkabeln steigt die Netzkapazität enorm. Doch zugleich sinkt durch die Minimierung der Verlagerungsspannung und die Symmetrierung der Leiter-Erd-Kapazität die Möglichkeit der sauberen Spulenregelung. Effiziente und geräteschonende Abhilfe schafft HPCI, das Konzept der gezielten Stromeinspeisung insbesondere für kompensierte Mittelspannungsnetze. In einer neuen Version ist es für alle Netzgrößen adaptierbar und wartet mit Extras wie der schnellen Pulsortung auf.

Schwerpunkt dieser Anwendung ist das kompensiert betriebene 20-kV-Mittelspannungsnetz. Dabei wird auf die Art der Regelung der Petersen-Spule und auf das Konzept der Fehlerortung im Erdschlussfall eingegangen. Von Seiten der TEN Thüringer Energienetze GmbH & Co. KG (ein Unternehmen der TEAG Thüringer Energie AG) stand uns Herr Dr. Thomas Töppler zur Seite. Bekanntlich wird für Netze mit Resonanzsternpunktterdung eine Kompensationsspule benötigt.

### PETERSEN-SPULE UND DIE TÜCKEN BEI DER REGELUNG

Die Aufgabe der Netzführung ist es, die verwendete Petersen-Spule richtig auf die Leiter-Erd-Kapazitäten im Netz einzustellen. Ziel ist ein kleiner Reststrom an einer möglichen Fehlerstelle. Außerdem soll das Netz im Fehlerfall weiter betrieben werden, bis die Fehlerstelle eingegrenzt ist.

Die Regelung der Spule kann manuell erfolgen oder automatisch mit Hilfe von Kompensationsreglern. Die Herausforderung hierbei stellt die Netzentwicklung in Richtung erhöhten Kabelanteil dar.

Mit zunehmender Verkabelung der Netze erfolgte auf natürliche Weise eine Symmetrierung der Leiter-Erd-Kapazitäten und Erhöhung. [2]

Vor der Herausforderung der sauberen Abstimmung der Petersen-Spule stehen zunehmend auch die TEN. In einigen Netzgebieten ist die resultierende Verlagerungsspannung so klein, dass

- über das klassische Verstellen der Spulenposition kaum noch ein sauberes Abstimmen der Spule möglich ist;

- die Störung auf der Messgröße der Verlagerungsspannung so groß ist und zu häufig eine neue Suche gestartet wird. Das sorgt für eine zu schnelle Alterung des Motorantriebes der Petersen-Spule.

Die Suche nach einem neuen Resonanzpunkt nach einer Netzumschaltung wird durch eine Änderung der Verlagerungsspannung getriggert. Ein typischer Wert sind 20 % Änderung des Momentanwertes der Verlagerungsspannung. Bei unruhiger Verlagerungsspannung sind Änderungen von 100 % bis 400 % keine Seltenheit. D. h., es wird eine Suche ausgelöst, die nicht notwendig wäre (**Abb. 2**).

Um in solchen Situationen noch regeln zu können, gibt es verschiedene Möglichkeiten. Die TEN haben sich für das Konzept der Stromeinspeisung entschieden.

### DIE STROMEINSPEISUNG UND DIE HPCI

Die sogenannte Stromeinspeisung ist eine Unterstützung für den Petersen-Spulen-Regler REG-DP. Das Besondere ist, dass die Resonanzkurve durch Einspeisen eines Stromsignals (typisch an der Leistungshilfswicklung der Petersen-Spule) berechnet wird. Ein Verstellen der Spule und damit ein Arbeiten des Motorantriebes sind nicht mehr nötig.

Die Frequenzen beim Einspeisen werden so gewählt, dass eine Änderung des 50-Hz-Messwertes keinen Einfluss auf das Rechenergebnis hat. Seit über zehn Jahren wird hierfür das Zwei-Frequenz-Verfahren verwendet. [1] Die Stromeinspeisung kann im Bedarfsfall an jeden REG-DP bzw. REG-DPA nachgerüstet werden. Mit der neuen Version der Stromeinspeisung



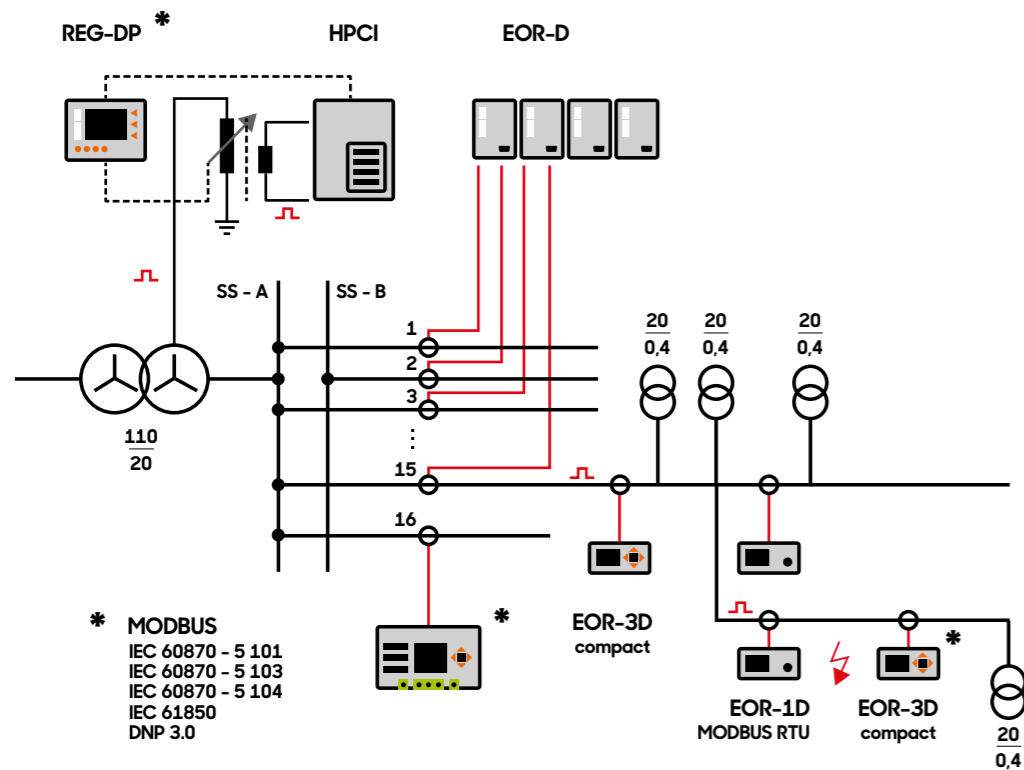


Abb. 1 links: Konzeptübersicht: REG-DP, HPCI, EOR-D, EOR-3D und EOR-1D

ist nun auch eine automatische Anpassung des eingespeisten Stromes an die Netzgröße möglich. Die Standardversion kommt dabei in Netzgrößen von 20 A bis 800 A kapazitivem Strom zum Einsatz. Seit Kurzem sind auch Ausführungen der Stromeinspeisung für 50-kV- bzw. sogar 110-kV-Netze verfügbar.

#### DIE HPCI

High Power Current Injection. Mit der Stromeinspeisung stellte sich die Frage, was ein weiterer Anwendungsfall sein könnte. Die Thüringer Energienetze setzen in einigen Umspannwerken die sogenannte Pulsortung ein. Das Pulssignal kann von der Spule bis zur Fehlerstelle verfolgt werden (Abb. 2).

Bisher war dafür ein Taktschrank mit Kondensatoren notwendig.

Die HPCI kombiniert beide Schaltschränke und Funktionen. Im gesunden Netzzustand wird die Stromeinspeisefunktion zum sauberen Regeln verwendet. Im Fehlerfall wird mit erhöhter Leistung getaktet. Die Energie wird dabei über die Leistungshilfswicklung aus dem Netz bezogen. Taktleistungen bis 90 kVAr sind verfügbar. Die Kombination aus Stromeinspeisung und Taktschrank spart Platz und natürlich auch Geld. Im Erdschlussfall können das klassische Pulssignal und ein deutlich schnelleres Pulssignal gleichzeitig erzeugt werden. Das hat den Vorteil,

dass herkömmliche Pulsanzeiger und Anzeiger mit der schnellen Pulsortung gleichermaßen unterstützt und betrieben werden können.

#### ERDSCHLUSSORTUNG

Die TEN betreiben ihre Netze in offenen Ring- oder Stickleitungen. Es sind sehr häufig Mischnetze aus Freileitungen und Kabeln. Zur Erdschlussortung kommen hauptsächlich das Wischerverfahren und vereinzelt die Pulsortung zum Einsatz. In den Geräten EOR-D und EOR-3D ist das sehr zuverlässige qu2-Verfahren zur Wischererkennung integriert. [2] Zur gerichteten Erkennung wiederzündender Fehler kommt das sogenannte qui-Verfahren zum Einsatz. [3] Beide Verfahren geben sofort bei Erdschlusseintritt eine gerichtete Information.

Soll die Fehlerstelle noch weiter eingegrenzt werden, kommt zur Nachortung die Pulsortung zum Einsatz. Auf Ringleitungen können gezielt Trennstellen verlagert werden, um den Fehler einzugrenzen. Auf Stickleitungen wird die Anzahl der installierten Geräte entsprechend der gewünschten Auflösung erhöht. Vorteil der Pulsortung ist es, dass nur der Strom zur Ortung ausgewertet wird. Das reduziert den Installationsaufwand. Die Anforderungen an die Messgenauigkeit sind wesentlich geringer als beim wattmetrischen Verfahren. Das spart

Abb. 5 rechts: Schnelles Pulssignal innerhalb 1 Sekunde, Orange =  $U_0$ , Grau =  $3I_0$

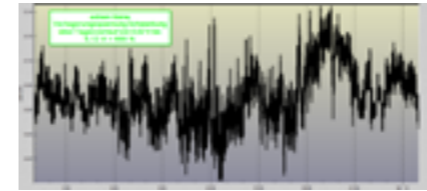


Abb. 2 oben: Verlauf der Verlagerungsspannung über 24 Stunden

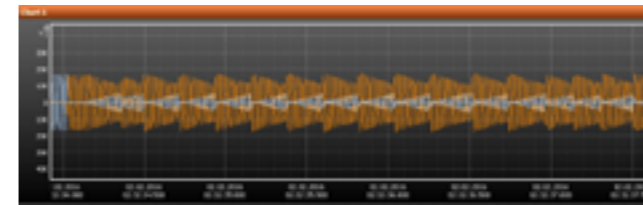


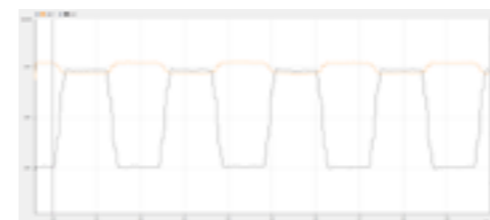
Abb. 3 rechts: Störschrieb der Leiter-Erd-Spannungen bei wiederzündendem Fehler aus EOR-3D

Adventorial

Kosten bei der Auslegung der Messwandler. Im Umspannwerk werden EOR-D und EOR-3D in der Hutschienenversion eingesetzt. In Schwerpunktstationen können EOR-3D in der Einbauversion verwendet werden. Soll die Auflösung der Erdschluss- und Kurzschlussortung noch weiter erhöht werden, kommen kombinierte Erd- und Kurzschlussanzeiger EOR-1D zum Einsatz.

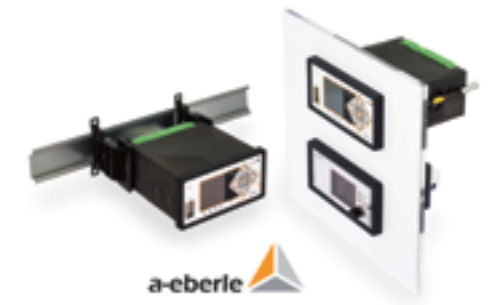
Im EOR-1D wurde für die Pulserkennung ein neuer Algorithmus implementiert. Gerade am Ende einer Leitung oder bei kurzen Leitungsausschnitten konnte es bisher zur Unteranregung kommen. Besonders, wenn der Wirkanteil im Fehlerstrom gleich bzw. sogar höher als der verbleibende kapazitive Teil des Fehlerstromes ist.

Im EOR-1D entfällt der Kabelumbauwandler. Durch Auswertung des Phasenstromes (Betrag und Phase) entfällt auch die Bedingung der Überkompensation für die Petersen-Spule.



## EOR-3D COMPACT UND EOR-1D

Viel mehr als ein Kurzschlussanzeiger



### Zusammengefasst

Für eine schnellere Fehlerlokalisierung bieten die EOR-3D compact vielfältige Installationsmöglichkeiten. Neben klassischen Messwandlern können auch Sensoren angeschlossen werden. Das EOR-1D hält es einfach. Reduzierte Funktion auf das Wesentliche zum attraktiven Preis.

#### EOR-3D COMPACT

- Fehlerortung für alle Netzformen
  - Wiederzündende Fehler, schnelle Pulsortung u.v.m.
  - UMZ-Prinzip zweistufig für KS-Anzeige
- Flexible Störschriebeaufzeichnung
- Kommunikation über
  - IEC 61850 GOOSE
  - IEC 60870-5- 104, - 103, - 101
  - MODBUS RTU, TCP/IP; DNP 3.0

#### EOR-1D

- Gerichtete und ungerichtete Kurzschlussanzeiger
- Pulsortungsanzeiger (kein Kabelumbauwandler, keine Überkompensation erforderlich)
- Störschriebeaufzeichnung
- MODBUS RTU
- Bis zu 32 GB SD-Speicher
- Keine Bediensoftware notwendig

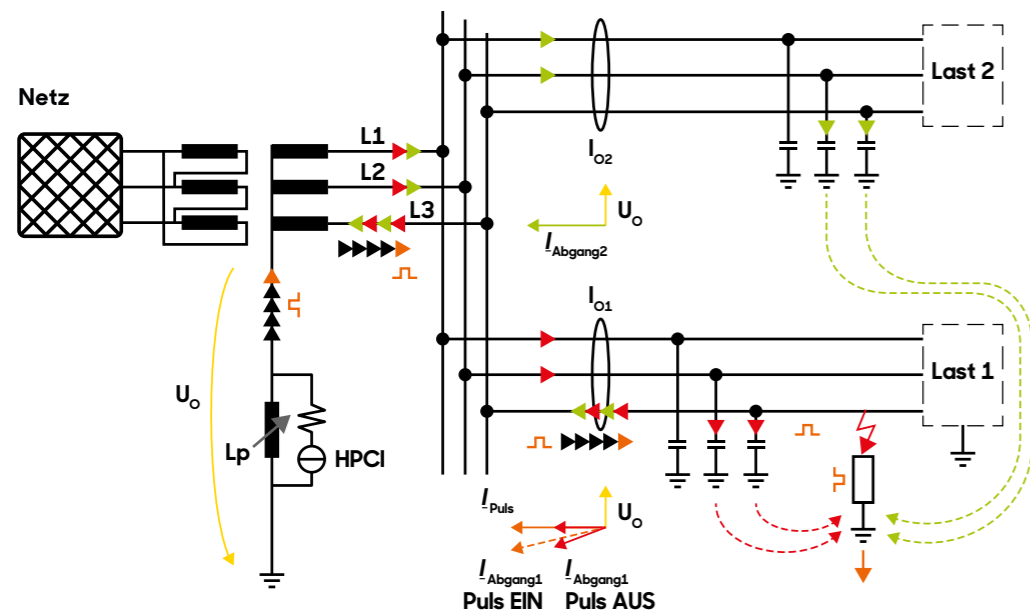


Abb. 4 Weg des Puls-signals von HPCI bis zur Fehlerstelle

#### DIE SCHNELLE PULSORTUNG

Zur Erhöhung der Empfindlichkeit (hoher Fehlerwiderstand) kann im EOR-3D die schnelle Pulsortung aktiviert werden. Das Signal wird von der HPCI erzeugt.

In **Abb. 5** ist die Verlagerungsspannung  $U_o$  und der Nullstrom  $3I_o$  im fehlerhaften Abgang gezeigt. Es ist sichtbar, dass auch  $U_o$  (orange) pulst. Mit zunehmendem Fehlerwiderstand reduziert sich der Puls im Nullstrom. Allerdings erhöht sich der Pulshub in der Verlagerungsspannung. Die Spannung pulst dabei im fehlerhaften Abgang immer antiproportional zum Strom. Im Abgang ohne Fehler pulsen beide Größen proportional zueinander.

D. h., berechnet man aus  $3I_o$  und  $U_o$  den Admittanzwert, so gibt es einen klaren Unterschied.  $Y_o$  im fehlerhaften Abgang taktet in der Frequenz des Pulssignals.  $Y_o$  im gesunden Abgang ist ein konstanter Wert.

Im Vergleich zur klassischen Admittanzmethode ist die Anforderung an die Messgenauigkeit wesentlich geringer. Es können Phasenstromwandler zur Strommessung und kapazitive Spannungsanzeiger zur Spannungsmessung verwendet werden.

Bedenkt man, dass für Wischerverfahren ebenfalls geringe Anforderungen an die Messgenauigkeit nötig sind, lassen sich diese beiden Methoden sehr gut kombinieren.

Die Kombination aus Wischererfassung und Pulsortung zur Nachortung wird bei den TEN verwendet.

#### ZUSAMMENFASSUNG

Den Herausforderungen im kompensierten Netz von heute begegnen die TEN mit gezieltem Einsatz neuer Technik. Das Regeln der Petersen-Spule mit Hilfe der Stromeinspeisung führt zur massiven Reduzierung von unnötigen Suchauslösungen. Der Motorantrieb der Petersen-Spule wird geschont. Das spart erheblich Wartungskosten.

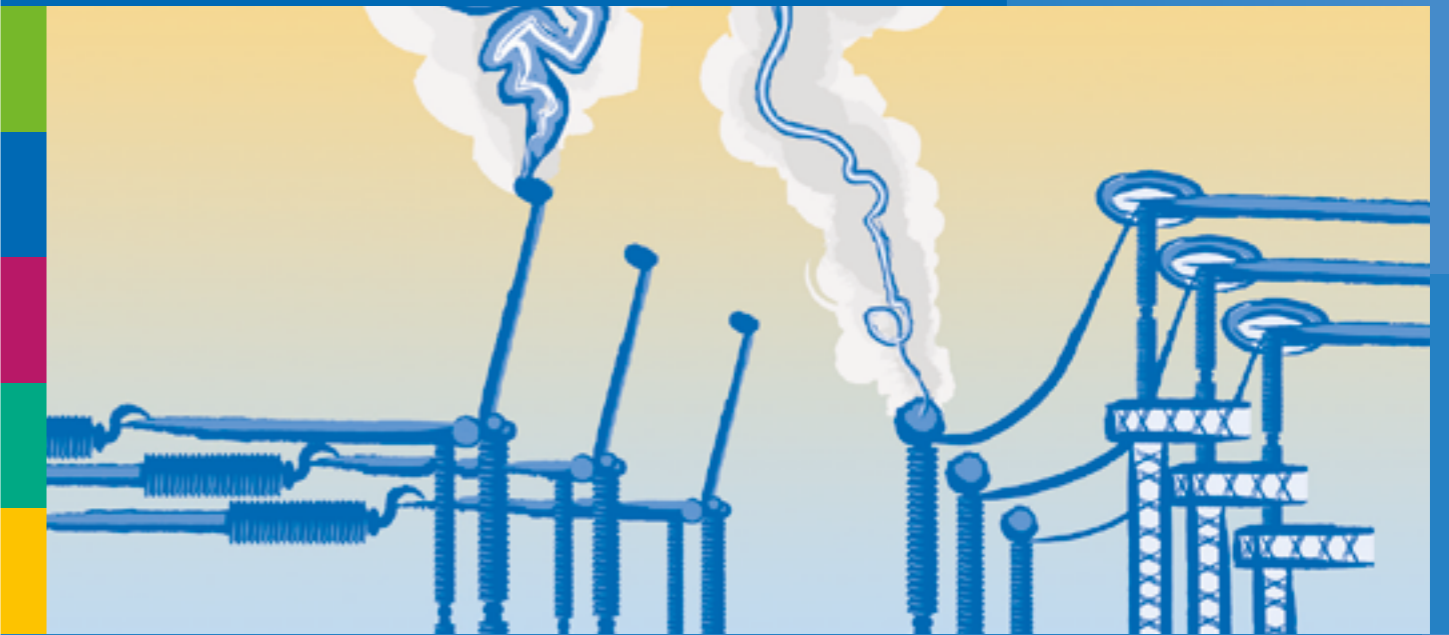
Die Stromeinspeisung wurde in ihrer Funktion um das Pulssignal für den Erdschlussfall erweitert. Das reduziert den Platzbedarf im Umspannwerk, die Hardwarekosten und den Installationsaufwand.

Für die Erdschlussortung kommen Verfahren zum Einsatz, die sehr robust sind und sehr geringe Anforderungen an die Messgenauigkeit stellen. Das verringert die Zeit der Fehlersuche und die Kosten für die benötigten Spannungs- und Stromwandler. Es kommen auch Kleinsignalwandler/Sensoren zum Einsatz.

#### Quellen

- 1 G. Druml, New Method to Control Petersen Coils By Injection Of Two Frequencies. In: CIRED 18th International Conference, Turin 2005
- 2 G. Kaufmann; T. Maisel, Sensitive ground fault detection in compensated systems (ASC) what is influencing the sensitivity. In: SEAPAC2017DOC\_104\_Kaufmann, Melbourne 2017
- 3 G. Druml, Infobrief Nr. 18: Wischerrelais für hochohmige, intermittierende und wiederzündende Erdschlüsse (Teil 2), A. Eberle GmbH & Co. KG, 12.04.2013, [www.a-eberle.de/sites/default/files/media/info\\_19.pdf](http://www.a-eberle.de/sites/default/files/media/info_19.pdf)

## TUTORIAL



# SCHUTZ- UND LEITTECHNIK 2018

## 10. FNN-/ETG-Tutorial

20. bis 21. Februar 2018, Maritim Hotel Berlin

Rund 600 nationale und internationale Experten diskutieren die Konsequenzen der künftigen Entwicklung der Netze für die Schutz- und Leittechnik.

Schwerpunkte sind:

- Schutztechnik sicher beherrschen
- Sichere Kommunikation
- Digitalisierung in der Schutz- und Leittechnik
- Erfahrungen aus realisierten Projekten

➔ Anmeldung und Informationen unter [www.schutz-leittechnik.de](http://www.schutz-leittechnik.de)  
Infoline +49 69 710 46 87-477 | [jana.kittelmann@ew-online.de](mailto:jana.kittelmann@ew-online.de) ◀

Hauptsponsor:



FNN

ETG

VDE



# REALE MESSGRÖSSEN- GEWINNUNG DURCH NETZ- SIMULATION



Advertorial

**Christopher Pritchard**, geb. 1982, Diplomstudium der Elektrotechnik an der University of Applied Science in Dortmund. Anschließend arbeitete er zunächst in der Entwicklung für Applikationssoftware bei OMICRON electronics, spezialisiert auf Prüflösungen für Schutz- und Messsysteme. Aktuell ist er als Produktmanager verantwortlich für Applikationssoftware im Schutzprüfbereich.

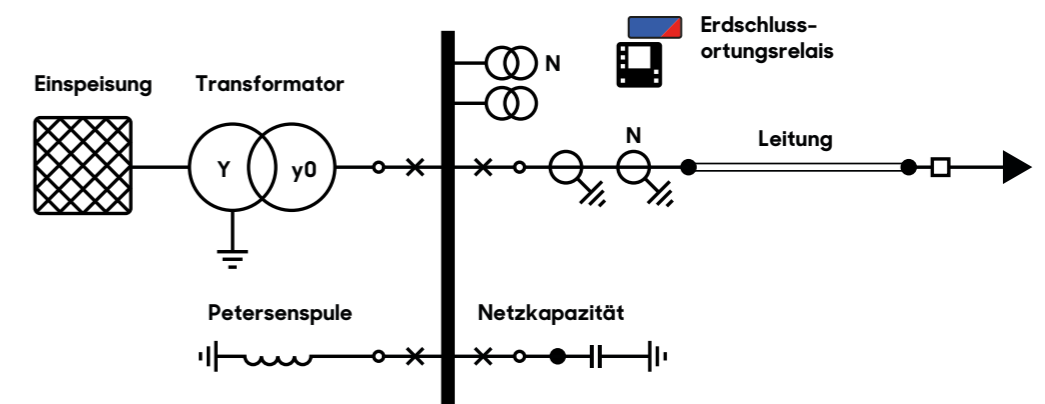
Bei der klassischen Prüfung von Erdschlussrelais kann lediglich die korrekte Verdrahtung und Funktion sichergestellt werden. Mit einer systembasierten Prüfung lassen sich darüber hinaus realistische Prüfsignale generieren, die die korrekte Erdschlussortung am Einbauort sicherstellen.

Wenn man über die Prüfung von Erdschlussortungsverfahren spricht, dann muss zunächst einmal geklärt werden, was das Ziel der Prüfung sein soll. Bei einer Inbetriebnahme oder der Routineprüfung einzelner Ortungsrelais wird häufig nur die Funktion des Relais selbst verifiziert und kontrolliert, ob die Einstellwerte den Vorgaben entsprechen. Hierbei kommen standardmäßig stationäre Prüfmethode zum Einsatz. Besonders anspruchsvoll ist dabei die Herleitung der abstrakten Prüfgrößen, die teils nur wenig mit einem realen Erdschluss gemein haben. Die sichere Ortung eines Erdschlusses ist darüber hinaus nicht ausschließlich von der Funktion des Relais abhängig. Die Herausforderung liegt darin, das Verfahren den Ansprüchen entsprechend auszuwählen und die Parametrierung auf das eigene Netz anzupassen.

Möchte man anschließend sicherstellen, dass die Ortung am Einbauort fehlerfrei funktioniert, empfiehlt sich eine systembasierte Prüfung.

## ERSTELLUNG EINER SYSTEMBASIERTEN PRÜFUNG

Bei einer klassischen Prüfung werden die Ausgabesignale direkt berechnet und basieren häufig auf den Einstellwerten. Dagegen werden bei einer systembasierten Prüfung die Signale realitätsnah durch eine Netzwerksimulation berechnet. Somit hängt dieses Prüfverfahren allein vom Primärsystem ab. Der Schutz bzw. die Erdschlussortung werden als Blackbox geprüft. Zu Beginn steht die Entscheidung, wie groß der Ausschnitt des Netzes sein muss, um eine ausreichend hohe Prüfqualität zu gewährleisten. Das Minimalnetz zur Prüfung eines Erd-

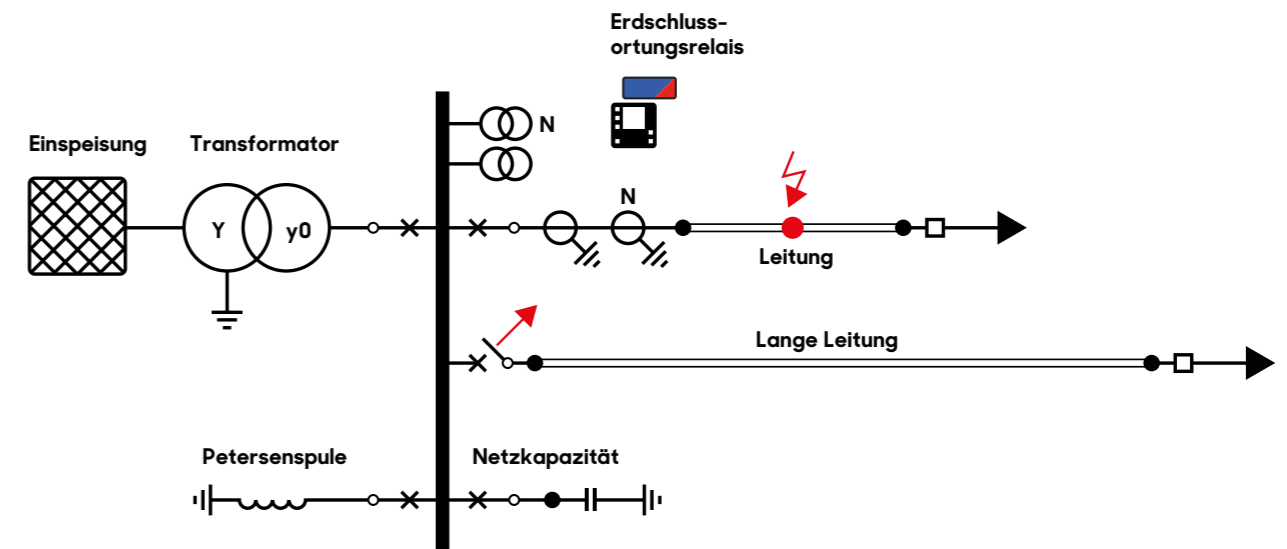


**Abb. 1** Minimal-Netzwerk zur Prüfung eines Erdschlussortungsrelais

© kehef / Adobe Stock



AUF EIN GUTES NEUES JAHR!  
 ES GUETS NEUS!  
 PROSIT  
 NEUJAHR!  
 EN GOOD NEEI JAHR!  
 EN GUETE RUTSCH IS NEUE JAHR!



**Abb. 2 Abschaltung einer langen Leitung**

schlussortungsrelais in einem Abgang eines kompensierten Netzes zeigt **Abb. 1**. Nur bei komplexen Anwendungen müssen größere Abschnitte ausgewählt werden (siehe folgende Abschnitte). Die wesentlichen Daten, welche darüber hinaus gebraucht werden, bleiben überschaubar:

- Leitungs- oder Kabeldaten, welche z.B. vom Kabeltyp und der Länge abgeleitet werden
- Restnetzkapazität, welche sich aus dem Netznullstrom ICE ableitet
- Induktivität der Petersen-Spule, welche sich aus der Verstimmung und dem ICE ableitet
- Übersetzung und Polarität der Wandler

Sobald diese Informationen bereitstehen, ist die Prüffallerstellung deutlich einfacher als in anderen Prüfverfahren. Zur Prüfung der Erdschlussortung muss dann nur noch ein Erdschluss z.B. auf einem Kabel positioniert werden. Die transiente Simulation berechnet die Ausgabe signale automatisch.

#### VERSCHIEDENE ORTUNGSVERFAHREN IN DER SYSTEMBASIERTE PRÜFUNG

Wir beschränken uns in diesem Artikel auf die wichtigsten Verfahren. Wie die folgenden Beispiele zeigen, basiert die systembasierte Prüfung ausschließlich auf der Modellierung des Netzes und ist somit komplett unabhängig von dem zu prüfenden Verfahren. Ergo kann die systembasierte Prüfung auch auf hier nicht beschriebene Verfahren übertragen werden.

#### Wattmetrisches Verfahren

Beim wattmetrischen Reststromverfahren handelt es sich um ein stationäres Verfahren, welches in kompensierten Netzen zum Einsatz kommt. Der messbare Wirkstrom liegt im Bereich von 1–3 % des kapazitiven Nullstroms des Netzes (ICE). Um den Wirkstrom zu messen, wird der Nullstrom mittels  $\cos(\phi)$ -Funktion auf die Nullspannung projiziert. Da die Magnitude des Wirkstroms nur bei ca. 3 % des kapazitiven Nullstroms des Netzes (ICE) liegt, haben Winkelfehler Auswirkungen auf die Richtungsanzeige. Der absolute Fehler kann mit steigendem Blindstrom bis zur Richtungsumkehr führen. Dies bedeutet, dass bei der Auslegung nicht nur die Blindströme bei Standardnetztopologie, sondern auch nach Schalthandlungen berücksichtigt werden müssen. Wird im Rahmen einer Suchschaltung in einem überkompensierten Netz ein stark kapazitiver Abgang (z.B. ein langes Kabel) abgeschaltet, steigt der induktive Blindstrom und erhöht die Wahrscheinlichkeit einer falschen Richtungsanzeige. Diese Phänomene lassen sich hervorragend in einer systembasierten Prüfung nachstellen, bei der in diesem Fall ein größerer Ausschnitt der realen Netztopologie nachgebildet wird (**Abb. 2**).

Es ist hierbei wichtig zu bedenken, dass Winkelfehler, welche im Betrieb vorkommen, sich von einer idealisierten Testumgebung unterscheiden. Ein hochpräzises Prüfgerät erzeugt im Maximalfall einen Winkelfehler von  $0,02^\circ$  und kann hierbei vernachlässigt werden. Bei der Sekundäreinspeisung der Nullspannung ist jedoch



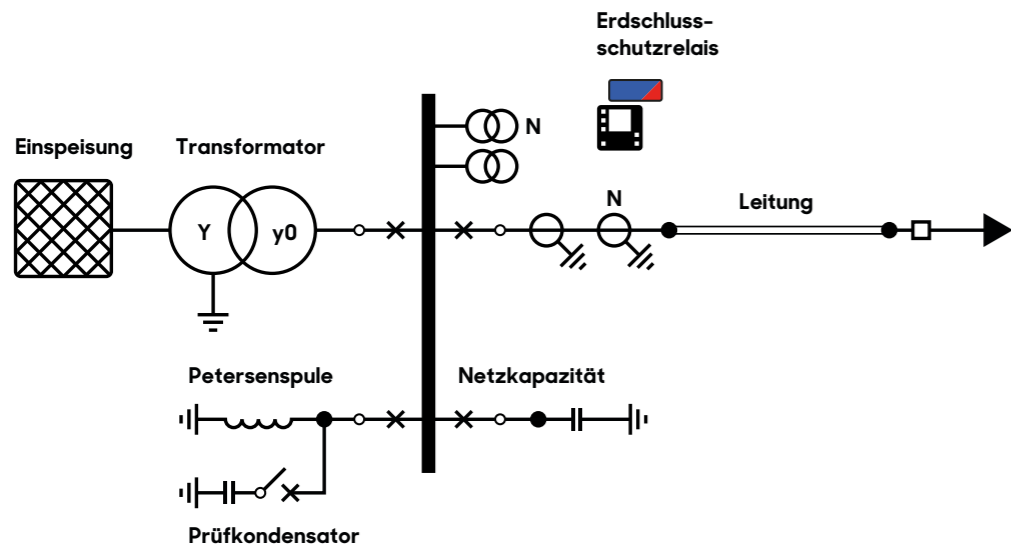


Abb. 3 Pulsortung

der Winkelfehler des realen Spannungswandlers außen vor. Was in der Prüfung grade noch so funktioniert, kann in der Realität bereits zur falschen Anzeige führen. Daher sollte man den durch die Simulation bereits berechneten Winkel auch zusätzlich dahingehend bewerten, ob dieser auch bei maximalem Winkelfehler noch zur sicheren Richtungserkennung führt.

#### Pulsortung

Bei der Pulsortung wird z.B. durch Zuschaltung eines parallel zur Petersen-Spule geschalteten Kondensators eine Blindstromänderung herbeigeführt. Durch ein zyklisches Zu- und Abschalten dieses Kondensators wird ein Pulsmuster auf den Nullstrom moduliert, welches nur am fehlerbehafteten Abgang gemessen werden kann. Auch hier ist die Testdefinition mit klassischen Prüfmethode sehr abstrakt. Bei der systembasierten Prüfung hingegen ist die Testdefinition nur eine Nachbildung des Netzes, es wird also entsprechend der Realität ein Kondensator parallel zur Petersen-Spule geschaltet (**Abb. 3**).

Zwecks Pulsmodulation wird einfach der Leistungsschalter am Kondensator aus- und eingeschaltet. Leider hat auch die Pulsortung ihre Tücken: Wird das Netz nicht ausreichend überkompensiert, kann der Puls deutlich kleiner werden, bis hin zur Auslöschung am Resonanzpunkt (**Abb. 4 und 5**).

#### Transiente Erdschlusswischerverfahren

Auch bei Wischerverfahren gibt es eine Vielzahl an verschiedenen Algorithmen, welche spezifische Vorteile, wie z.B. Kreisströme, bieten.

Prinzipiell lässt sich sagen, dass diese Verfahren den transienten Entladevorgang bei Erdschlusseintritt auswerten. Trotz des irreführenden Adjektivs „transient“ können die meisten Wischerverfahren mit stationären Signalen geprüft werden. Auch hier stellt sich wieder die Herausforderung an den Prüfer, die abstrakten Prüfgrößen richtig zu definieren. Zudem ist die Prüfdeckung eher zweifelhaft. Wird jedoch bei der systembasierten Prüfung eine transiente Simulation im Zeitbereich durchgeführt, ergibt sich ein realistischer Entlade- und Auflade-Vorgang von selbst (**Abb. 6**).

Klassische Wischerverfahren beinhalten potenzielle Fehlerquellen wie z.B. die Anregeschwelle. Wird das Beobachtungsfenster für den Strom zu früh geöffnet, kann es zur falschen Richtungsanzeige führen. Bei einer klassischen Prüfung wird immer knapp über bzw. unter der Anregeschwelle geprüft. Die Validierung des Schwellwertes selbst kann jedoch nur durch eine systembasierte Prüfung stattfinden.

#### TYPISCHE FEHLERQUELLEN BEI DER ERDSCHLUSSORTUNG

Im Folgenden sollen noch weitere wichtige Phänomene gezeigt werden, die bei einer systembasierten Prüfung berücksichtigt werden können.

##### Nullsystemströme im Vorfehler

Nullsystemströme können bereits bei gesunden Netzen auftreten, verursacht durch mutuelle Kopplungen von parallel laufenden Systemen oder unsymmetrische Leiterwiderstände in geschlossenen Ringen, auch Kreisströme ge-

Abb. 4 Pulsmodulation bei Überkompensation



Abb. 5 Pulsmodulation bei Kompensation am Resonanzpunkt

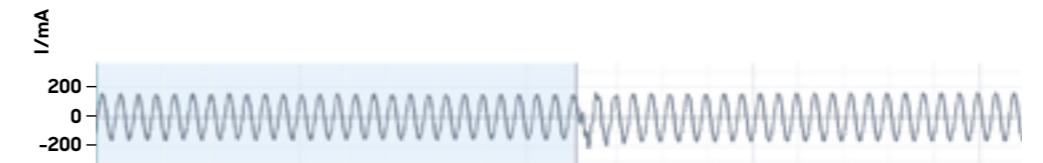


Abb. 6 Transienter Erdschluss

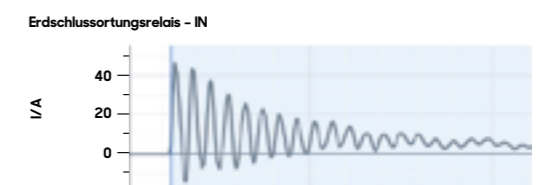
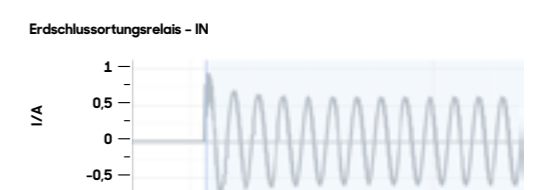
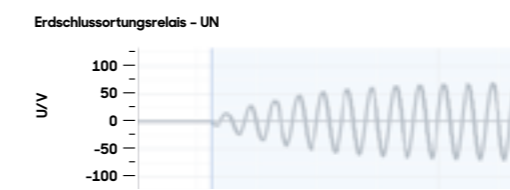


Abb. 7 Aufladevorgang bei 2000 Ohm



Adventorial

nant. Diese Nullsystemströme addieren sich im Fehlerfall zu den Erdschlussströmen hinzu und können je nach Phasenlage zur falschen Richtungsanzeige führen. Einige Verfahren sind in der Lage, diese Nullsystemströme zu kompensieren.

#### Wiederzündende Fehler

Bei nahezu ideal kompensierten Netzen verlöschen Erdschlüsse meist selbstständig. Während sich im Leiter die Spannung langsam wieder aufbaut, kommt es zur Wiederzündung des Fehlers. Dieser Vorgang kann sich mehrmals wiederholen, man spricht auch von intermittierenden Erdfehlern. Da der Spannungshub in der Nullspannung nur gering ausfällt, kann die Anregung bestimmter Verfahren ausbleiben. Spezielle Algorithmen können solche intermittierende Erdfehler sicher erkennen.

#### Übergangswiderstände

Besonders in Freileitungsnetzen und unter speziellen klimatischen Bedingungen können Fehler mit mehreren 100 oder sogar 1000 Ohm

aufreten. Nicht jedes Verfahren ist gleich gut dafür geeignet, solche Erdfehler richtig zu erkennen. **Abb. 7** zeigt, dass der Aufladevorgang nur sehr schwach ist.

#### ZUSAMMENFASSUNG

Bei der Sicherstellung einer korrekten Erdschlussortung liegt, wie die Beispiele zeigen, die Tücke im Detail. Die vorgestellte systembasierte Prüfung kann hierbei einen wichtigen Beitrag leisten, indem sie nicht nur das Relais, sondern auch dessen richtige Anwendung validieren kann.

Anstatt herauszufinden, wie man am einfachsten den Relaisalgorithmus austrickt, fokussiert die systembasierte Prüfung auf die Systemanforderungen, wodurch die Durchführung einer Prüfung in vielen Fällen vereinfacht wird. Darüber hinaus kann die Prüfung leicht zur Prüfung des Schutzsystems weiterentwickelt werden, indem z.B. Doppelerdschlüsse simuliert werden.

# AKTUELLES

## JAN.

23./24.

Workshop „Zellulärer Ansatz“  
VDE-FNN/ETG Konferenz, Nürnberg/  
Deutschland

TAGUNG

## FEB.

20./21.

Schutz- und Leittechnik 2018  
VDE-FNN/ETG Konferenz, Berlin/  
Deutschland

KONFERENZ

21./22.

Schutztechnik  
in Mittelspannungsnetzen  
hdt – Haus der Technik,  
Essen/Deutschland

SEMINAR

## MÄR.

01.

Erfolgreiche Umsetzungsstrategien  
für die neue NIS-Richtlinie  
Austrian Standards Seminar, Wien/  
Österreich

SEMINAR

09.

Sternpunktbehandlung  
und Transformatoren  
TAC – Technische Akademie  
Chemnitz, Chemnitz/Deutschland

SEMINAR

12.–15.

Megger Fachtagung Österreich 2018  
Megger, Red Bull Ring/Österreich

TAGUNG

## APR.

10./11.

Leit- und Netzschutztechnik im  
Nieder- und Mittelspannungsnetz  
hdt – Haus der Technik, Essen/  
Deutschland

SEMINAR

### NETZSCHUTZ

Impressum und Offenlegung

#### Herausgeber und Chefredakteur

Peter Schitz  
Tel: +43 676 972 7269  
Mail: peter.schitz@netzschutz-magazin.com

#### Abo- und Anzeigenverkauf

Beatrix Meindl  
Tel: +43 1 345 12 35  
Mail: office@netzschutz-magazin.com

#### Redaktion

Edith Weinlich

#### Art-Direktion

Capitale Wien / Berlin  
Cora Akdogan, Daniel Perraudin

#### Lektorat

Ewald Schreiber

#### Redaktionsanschrift & Abo-service

Westbahnstraße 7/6a, 1070 Wien, Österreich  
Tel: +43 1 345 12 35  
Mail: office@netzschutz-magazin.com

#### Erscheinungsweise

4-mal jährlich

#### Vertrieb

Ausschließlich im Abonnement

#### Abo-Preise

**Österreich**  
EUR 158,00 netto  
(EUR 173,80 brutto inkl. Versand)

**Deutschland**  
EUR 158,00 netto  
(EUR 187,00 brutto inkl. Versand)

#### Schweiz

EUR 158,00 netto  
(EUR 170,00 brutto inkl. Versand)

#### Eigentümer (100%), Medieninhaber & Herausgeber

EET Verlag GmbH  
Westbahnstraße 7/6a, 1070 Wien, Österreich  
Tel: +43 1 3451235  
Mail: office@netzschutz-magazin.com  
Web: www.netzschutz-magazin.com  
Firmenbuch-Gericht: Handelsgericht Wien  
Firmenbuch-Nr.: FN 471292 b

#### Erfüllungsort und Gerichtsstand

1070 Wien, Österreich

Geschäftsführer: Peter Schitz  
Gesellschaftsanteile (100%): e2solution Schitz  
GmbH, Westbahnstraße 7/6a, 1070 Wien,  
Österreich

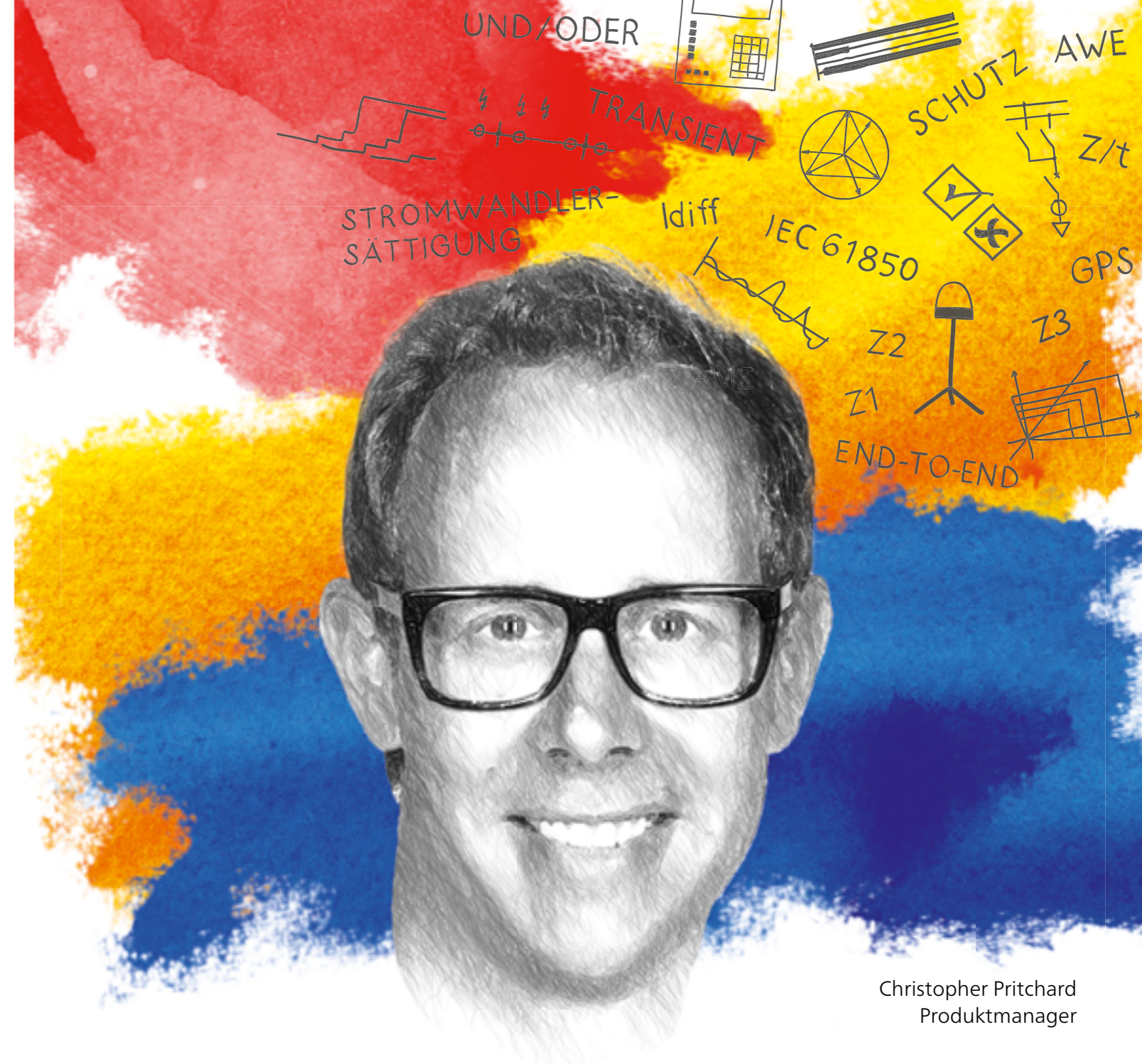
Offenlegung gemäß § 25 Mediengesetz  
Grundlegende Ausrichtung von NETZSCHUTZ  
Fachmagazin zur Information über Wissens-  
stand, Innovationen und Geräteentwicklungen  
im Bereich der Elektrotechnik mit Fokus auf  
Schutztechnik und Netzschutz. Die Inhalte rich-  
ten sich insbesondere an Fachleute aus der  
Schutztechnik und dienen der persönlichen In-  
formation. Eine Haftung ist ausgeschlossen.

Unternehmensgegenstand  
Betrieb eines Magazinverlags und einer Website

#### Herstellung & Druck

Grasl Druck & Neue Medien GmbH  
Druckhausstraße 1, 2540 Bad Vöslau

Alle Rechte an Text, Bild, Grafik & Design  
© Netzschutz. Vor Übernahme von Beiträgen,  
Bildern oder Abbildungen ist die Zustimmung  
des Verlages schriftlich einzuholen. Druck- und  
Satzfehler vorbehalten.



Christopher Pritchard  
Produktmanager

## Qualitätssprung durch systembasierte Schutzprüfung

Systembasierte Schutzprüfung – schon wieder etwas Neues? Ja, unbedingt. Denn mit diesem innovativen Ansatz ist es möglich, die korrekte Funktion des gesamten Schutzsystems zu überprüfen und so die Prüfqualität zu erhöhen. Statt einzelne Relaisinstellungen durchzugehen, werden mit **RelaySimTest** realistische Szenarien im Energiesystem simuliert, um Fehler in den Einstellungen, der Logik und dem Design des Schutzsystems aufzudecken.

[www.omicronenergy.com/relaysimtest](http://www.omicronenergy.com/relaysimtest)



# GEHÖREN SIE DAZU!

**ABONNIEREN  
SIE JETZT!**

**FÜR LESER  
UND LESERINNEN, DIE  
KOMPAKTE INFORMATION  
AUF NEUESTEM STAND  
HABEN WOLLEN.**

**FÜR UNTERNEHMEN,  
DIE IHRE INNOVATIVEN  
PRODUKTE VORSTELLEN  
WOLLEN.**

**FÜR KOLLEGEN UND  
KOLLEGINNEN, DIE  
IHRE SICHT DER DINGE  
IN BEITRÄGEN UND  
FOTOS TEILEN WOLLEN.**

**Die sicherste Verbindung  
zu NETZSCHUTZ**

+43 1 345 12 35  
office@netzschutz-magazin.com  
www.netzschutz-magazin.com

NETZSCHUTZ



## THEMEN 2018

- Lichtbogenschutz**  
März 2018
- Überstromzeitschutz**  
Juni 2018
- Stromwandler**  
September 2018
- Transformatordifferentialschutz**  
Dezember 2018