

# Prüfen von Schutzgeräten nach dem Wanderwellen- und Delta-Größen-Prinzip

Christopher Pritchard, Heinz Lampl, Thomas Hensler, OMICRON electronics GmbH  
Klaus, Austria

## Zusammenfassung

Die neuesten Schutzrelais nutzen Delta-Größen und auf Wanderwellen basierende Elemente, um einen extrem schnellen Leitungsschutz zu realisieren. Dies stellt die Prüfung des Schutzes vor neue Herausforderungen. Einfaches Einspeisen von stationären Strömen und Spannungen reicht nicht aus, um diese Elemente auszulösen.

Für die unterschiedlichen Prüfarten, ob sie nun beim Hersteller im Labor oder während der Inbetriebnahme in einer Schaltanlage durchgeführt werden, ergeben sich verschiedene Anforderungen. Abnahmeprüfungen und Prüfungen der Leistungsfähigkeit erfordern möglichst realistische Signalformen und eine automatisierte Prüfumgebung. Feldtests hingegen benötigen einen praktikablen Aufbau und die Möglichkeit, End-to-End-Prüfungen durchzuführen.

In diesem Paper werden die unterschiedlichen Möglichkeiten diskutiert, wie solche Relais geprüft werden können. Zur realistischen Simulation von Wanderwellen ist ein genaues Modell für Übertragungsleitungen erforderlich, das die frequenzabhängigen Effekte sowie die wechselseitig wirkenden Impedanzen bei Mehrphasensystemen korrekt berücksichtigt. Die Simulation muss mit Abtastraten über 1 MHz durchgeführt werden, um Transienten mit Wanderwellen zu erhalten.

Andererseits verfügen die heutzutage für die Schutzprüfung eingesetzten Stromverstärker nicht über die erforderliche Bandbreite, um solche Signale einzuspeisen. Eine praktische Lösung für das Prüfen im Feld ergibt sich durch die Simulation einzelner Wanderwellen-Pulse mit dem richtigen Timing. Werden solche Wanderwellen-Pulse Strom- und Spannungssignalen geringerer Bandbreite überlagert, lassen sich alle Relaiselemente integriert prüfen, ohne dass während der Inbetriebnahme Relaiseinstellungen geändert werden müssen.

Damit ist selbst eine End-to-End-Prüfung mit mehreren zeitsynchronisierten Prüfgeräten möglich. Prüfgeräte, synchronisiert über GPS-Uhren mit einer Präzision von weniger als einer Mikrosekunde, bieten hierfür eine ausreichende Zeitgenauigkeit, um auch auf Wanderwellen basierende Elemente zu prüfen.

**Stichworte:** Delta-Größen, Wanderwellen, Schutzrelais, Schutzprüfung, End-to-End-Prüfung

## 1. Einleitung

Schutz- und Fehlerortungsrelais, die mit Delta-Komponenten (englisch: superimposed quantities oder incremental components) und Wanderwellen (englisch: travelling waves) arbeiten, bieten eine Reihe von Vorteilen, die sie für Energieversorger sehr attraktiv machen. Bei der Einführung einer neuen Technologie ist aber stets die erste Frage, wie diese geprüft werden kann. Um die möglichen Prüflösungen und deren Vorteile sowie auch deren Grenzen zu kennen, muss man die Grundprinzipien von Delta-Größen und Wanderwellen verstehen. [1] und [2] geben eine umfassende Einführung in die Prinzipien und Algorithmen von Schutzrelais, die mit Signalen im Zeitbereich arbeiten. In [3] werden die unterschiedlichen Schutzelemente für Delta-Größen, Distanzelement mit Delta-Größen (TD21, TD = Time Domain) und Richtungselement mit Delta-Größen (TD32) sowie wanderwellenbasierte Elemente, Wanderwellen-Differenzialelement (TW87, TW = Traveling Wave) und Wanderwellenrichtungselement (TW32) detailliert erklärt.

## 2. Anforderungen an die Schutzprüfung für Element mit Delta-Größen und Wanderwellen

Die Anforderungen für die Prüfung von Schutz- und Fehlerortungsgeräten, die mit Delta-Größen und Wanderwellen arbeiten, hängen stark von der Art der Prüfung ab. Laut der Norm IEEE C37.233-2009 wird zwischen folgenden Prüfungen unterschieden:

- Zertifizierungsprüfung (einschließlich Prüfung auf Konformität und der Performanz)
- Anwendungsprüfung
- Prüfung bei der Inbetriebnahme
- Wartungsprüfung

Für Zertifizierungsprüfungen, ob beim Hersteller oder während der Abnahme am Einsatzort, ist eine genaue Untersuchung der einzelnen Schutzelemente mit möglichst realistischen Prüfsignalen erforderlich. Diese Tests werden meist in einem Labor durchgeführt, in dem alle zu

prüfenden Geräte leicht zugänglich sind und diese sogar mit alternativen Signalpfaden getestet werden können, wie z.B. über Kleinsignal- oder digitale Eingänge direkt zu den Schutzelementen. Für die einzelnen Relaiselemente werden spezifische Prüfungen durchgeführt. Das Prüfen im Labor umfasst in der Regel viele einzelne Prüfschritte, sodass eine Umgebung für die automatisierte Durchführung der Prüfung erforderlich ist.

Darüber hinaus müssen Inbetriebnahme- und Wartungsprüfungen im Feld durchgeführt werden, wobei der Aufwand für die Prüfung und das Prüfgerät auch wirtschaftlich gerechtfertigt sein sollte. Solche Prüfungen werden durchgeführt, um sicherzustellen, dass die Geräte richtig installiert und eingestellt wurden und den Anforderungen entsprechend funktionieren. Im Feld müssen jedoch die Prüfsignale, die üblicherweise von tragbaren Prüfgeräten erzeugt werden, in die herkömmlichen Spannungs- und Stromeingänge der am Standort installierten Schutzgeräte eingespeist werden. Für ein End-to-End-Schutzsystem bedeutet dies eine End-to-End-Prüfung mit zeitsynchronisierten Prüfgeräten, damit beide Enden, einschließlich aller Kommunikationskanäle, geprüft werden. Zudem sollten bei Inbetriebnahme- und Wartungsprüfungen die Relaiseinstellungen nicht verändert und die Prüfungen aller Schutzelemente gleichzeitig erfolgen.

Zu den gemeinsamen Prüfanforderungen gehört die Prüfung aller Schutzelemente bei Fehlern innerhalb der Schutzzone (in der der Schutz auslösen soll) sowie außerhalb der Schutzzone, wie beispielsweise bei Fehlern in rückwärtiger Richtung oder auf einer parallelen Leitung (auf der der Schutz stabil bleiben soll). Zusätzlich sollten Prüfungen zur Validierung der Fehlerortungsfunktion durchgeführt werden; diese Prüfungen sollten die Genauigkeit der Fehlerortung sowohl für doppelseitige als auch für einseitige Fehlerortungsverfahren überprüfen.

### 3. Technische Anforderungen für die Prüfung von Elementen, die mit Delta-Größen arbeiten

Schutzfunktionen, die auf Delta-Größen beruhen, lassen sich mit dynamischen Prüfungen überprüfen, bei denen der Übergang von einem Vorfehler zum eigentlichen Fehlerzustand richtig simuliert wird. Dies lässt sich mit einer simulationsbasierten Prüfung erreichen, bei der das Stromnetz in einer Software modelliert wird (geschützte Leitung und Einspeisungen an jedem Ende). Die Software berechnet die einzuspeisenden Prüfsignale für einen Fehler, der zu einem vordefinierten Zeitpunkt eintritt. Diese Signale können mit herkömmlichen Relaisprüfgeräten an die zu prüfenden Geräte ausgegeben werden. Ein Beispiel für einen solchen Testfall ist in Abbildung 1 dargestellt, wo die eingespeisten Strom- und Spannungssignale mit der Reaktion der Elemente TD21 und TD32 zu sehen sind. Die Änderung des Stroms von Vorfehler zu Fehler beinhaltet die korrekte DC-Verlagerung. Die Abbildung zeigt auch die berechneten Delta-Größen.

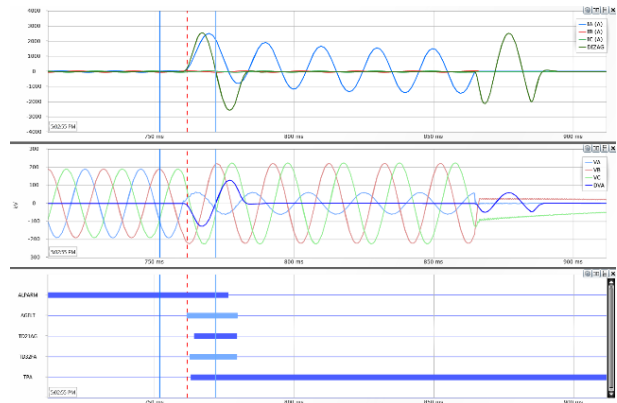


Abb. 1: Prüfung von Schutzelementen nach dem Prinzip von Delta-Größen

Mit einer simulationsbasierten Prüfung ist es einfach, überlagerten Lastfluss oder Prüfungen mit unterschiedlichen Einspeisebedingungen zu simulieren (z.B. mit unterschiedlichen Verhältnissen der Quellimpedanzen (SIR – Source Impedance Ratio), sodass eine umfangreiche Prüfung des Verhaltens der TD-Elemente möglich ist und die Einstellwerte überprüft werden können (siehe [4] für weitere Details). Die Relais verhalten sich wie im Feld, wenn keine Wanderwellen vorhanden sind. Das ist bei Fehlern der Fall, die in der Nähe eines Spannungsnulldurchgangs auftreten.

Um am Ende einer Prüfung unerwünschte Relaisreaktionen zu vermeiden, sollte auch die korrekte Fehlerklärung simuliert werden. Hierzu gehört auch eine realistische Simulation des Öffnens der Schalterpole, so dass der Fehler beim Stromnulldurchgang erlischt.

### 4. Herausforderungen bei der Prüfung von Wanderwellen-Elementen

Das Prüfen und die Simulation von Wanderwellen stellen eine größere Herausforderung dar. Da Wanderwellen Signale mit sehr hohen Frequenzen sind, muss eine Simulation mit sehr hohen Abtastraten (größer als 1 MHz) durchgeführt werden und die Prüfsignale müssen diese Bandbreite haben, was einen erheblichen Rechen- und Speicherbedarf erfordert.

Um realistische hochfrequente Phänomene in einem Netz zu simulieren, ist zudem ein realistisches und detailliertes Modell erforderlich. Die Simulation von Netzen bei Nennfrequenz ist gut etabliert. Die Simulation hochfrequenter Phänomene erfordert jedoch wesentlich detailliertere und komplexere Modelle aller beteiligten Elemente, einschließlich geeigneter Modelle für Übertragungsleitungen, Kabel und aller abschließenden Elemente.

Um solche hochfrequenten Prüfsignale an die zu prüfenden Geräte auszugeben, benötigt das Prüfgerät auch eine Bandbreite im MHz-Bereich. Derzeit sind Prüfgeräte und Verstärker erhältlich, die Nenngrößen von 100 V/5 A bei

einer Nennfrequenz von 50/60 Hz in die Strom- und Spannungsanschlüsse des Relais einspeisen. Heutzutage haben diese Verstärker jedoch eine begrenzte Bandbreite im zweistelligen kHz-Bereich. Die Anforderungen an Leistungsverstärker mit einer Bandbreite im dreistelligen kHz-Bereich führen zu höheren Kosten und mehr Komplexität bei der Implementierung. Zudem würden diese Anforderungen zu überaus großen Geräten führen, die für Feldprüfungen nicht mehr geeignet sind.

Zur Prüfung von Wanderwellen-Elementen können zwei unterschiedliche Ansätze verwendet werden. Im Labor und in der Entwicklung ist es möglich, hochfrequente Abtastsignale mit Kleinsignalen oder sogar mit digitalen Signaleingängen einzuspeisen. Im Feld ist ein Ansatz mit einem speziellen Prüfgerät zum Einspeisen von Wanderwellen-Pulsen möglich; diese Pulse simulieren die extremen Änderungen von Strömen und Spannungen durch das Eintreffen einer Wanderwelle. Die Schutzeinrichtung erkennt die Wanderwelle nach Filterung dieser abrupten Änderungen, wodurch sich die Wanderwellen-Elemente anregen lassen. Die genauen Ankunftszeiten der Wanderwellen-Pulse werden aus der Wanderwelle extrahiert. Daher muss das Prüfgerät in der Lage sein, die Wanderwellen-Pulse mit einer zeitlichen Auflösung im Nanosekundenbereich einzuspeisen, auch für die Einspeisung an verteilten Enden eines End-to-End-Systems im Feld.

## 5. Die Simulation von Wanderwellen-Transienten

Wanderwellen können mit Electromagnetic Transient Program (EMTP™) mit Zeitschritten über 2 MHz simuliert werden. In EMTP stehen detaillierte Modelle für die Simulation langer Übertragungsleitungen zur Verfügung, die die Ausbreitungszeit für Wanderwellen auf Leitungen (Travelling wave line propagation time – TWLPT) korrekt simulieren. Da mehrphasige Übertragungsleitungen unterschiedliche charakteristische Wellenwiderstände (ZC) und Ausbreitungsgeschwindigkeiten für den Aerial- und Ground-Modus aufweisen und die Frequenzabhängigkeiten von Übertragungsleitungen einen erheblichen Einfluss auf die Form der Wanderwellen-Signale haben, sollte ein erweitertes Modell für die Übertragungsleitung wie das JMARTI-Leitungsmodell verwendet werden [5]. Darüber hinaus ist es notwendig, alle angrenzenden Leitungen und abschließenden Elemente (wie Transformatoren, Parallelleitungen, Drosseln usw.) korrekt zu modellieren, damit realistische Signale für die reflektierten und übertragenen Wanderwellen berechnet werden.

Ein Beispiel für eine EMTP-Simulation ist in Abbildung 2 dargestellt. Die Topologie modelliert eine parallele Leitung mit benachbarten Leitungen an den beiden Enden (links und rechts) mit konstanten Spannungsquellen.

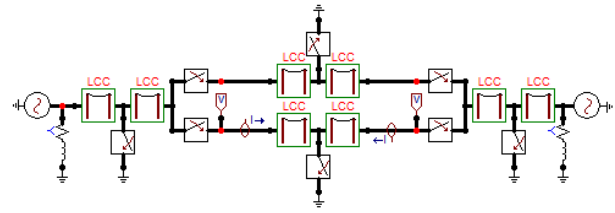


Abb. 2: Topologie für die Simulation von Wanderwellen mit EMTP

Bild 3 zeigt die resultierenden Strom- und Spannungssignale für beide Enden der geschützten Leitung beim Auftreten eines einpoligen Leiter-Erde-Fehlers bei 30 Prozent der geschützten Leitung vom linken Ende aus.

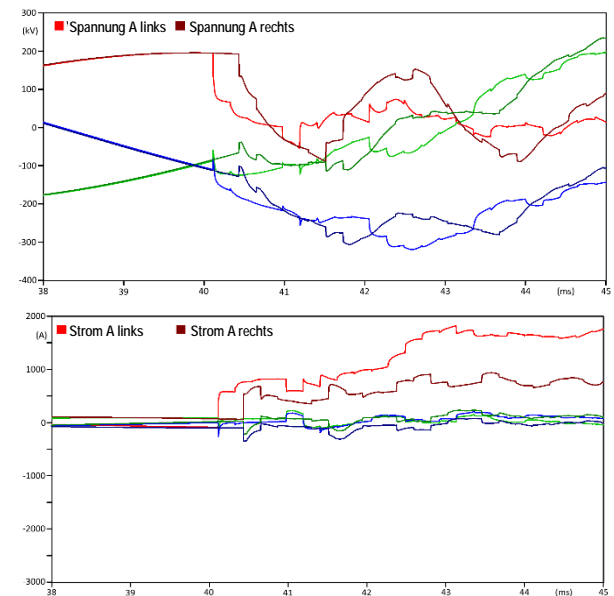


Abb. 3: Simulierte Spannungs- (oben) und Stromsignale (unten) erstellt mit EMTP

Der Fehlereintritt wurde bei 90 Grad der L1-Phasen-Spannung simuliert. Das Eintreffen der ersten Wanderwelle wird als plötzliches Zusammenbrechen der L1-Phasen-Spannung erkannt, wobei die Zeitverzögerung zwischen dem linken und rechten Ende dem unterschiedlich weit entfernten Fehlerort entspricht. Für die Ströme ist ein starker Anstieg zu beobachten. Zusätzlich ankommende Wanderwellen sind auf die unterschiedlichen Reflexionen an allen Unstetigkeitsstellen (Sammelschienen, Quellen und der Fehlerort selbst) im simulierten Netz zurückzuführen.

Als Ergebnis der EMTP-Simulation erhält man Spannungs- und Stromsignale mit einer Abtastrate von 2 MHz oder mehr. Diese Spannungs- und Stromsignale lassen sich dann mit speziellen Kleinsignalgeneratoren an die zu prüfenden Schutzrelais ausgeben. Dieser Ansatz und die Nutzung einer Vielzahl simulierter Prüffälle ermöglicht eine umfassende Prüfung in einer Laborumgebung.

## 6. Simulation von Wanderwellen-Signalen

Das Schutzgerät erkennt die Wanderwelle nach dem Filtern als Strom- und Spannungspulse. Es ist möglich, die Wanderwellen-Elemente durch Einspeisen von Strom- und Spannungspulsen mit steilen Flanken anzuregen. Zur Pulserzeugung kann ein spezielles Gerät verwendet werden, das dreiphasige Strom- und Spannungspulse mit präzisiertem Timing erzeugen kann.

Für die unterschiedlichen Prüffälle, ebenso wie für unterschiedliche Fehlerarten und Fehlerorte (Fehler innerhalb und außerhalb der geschützten Leitung), muss das Gerät in der Lage sein, unterschiedliche Wanderwellen-Pulse für alle Strom- und Spannungsphasen mit den richtigen Polaritäten zu simulieren. Für ein End-to-End-Schema müssen zwei separate Prüfvorrichtungen diese Wanderwellen-Pulse mit einer sehr präzisen Zeitgenauigkeit einspeisen; dies kann mit hochpräzisen zeitsynchronisierten GPS-Geräten erreicht werden.

Die Wanderwellen-Elemente können nur durch Einspeisen von Wanderwellen-Pulsen angeregt werden. Die TD-Elemente arbeiten hingegen mit Delta-Größen, sonst werden andere Überwachungsfunktionen (z.B. die Aktivierungslogik) nicht anregen und dann die Wanderwellen-Elemente blockieren. Deshalb bieten einige Relais einen Testmodus an, mit dem Wanderwellen-Elemente nur mit Wanderwellen-Pulsen verwendet werden können.

Ziel der Inbetriebnahme- oder Wartungsprüfung ist es aber, alle aktiven Schutzelemente parallel wie im Normalbetrieb zu prüfen und zu verifizieren. Aus diesem Grund ist es manchmal nicht erlaubt oder erwünscht, die Relaiseinstellungen zu ändern oder das Relais in den Testmodus zu schalten. Eine Prüfung mit Wanderwellen-Pulsen, die den konventionellen Signalen überlagert sind, ermöglicht eine gleichzeitige Prüfung aller TD- und TW-Elemente mit den Einstellungen und Bedingungen genau so, wie sie während des Normalbetriebs bestehen.

### 7. Netzsynchrone Überlagerung von Wanderwellen-Pulsen (Point-on-Wave)

Abbildung 4 zeigt ein Beispielaufbau für eine gleichzeitige Prüfung aller TD- und TW-Elemente.

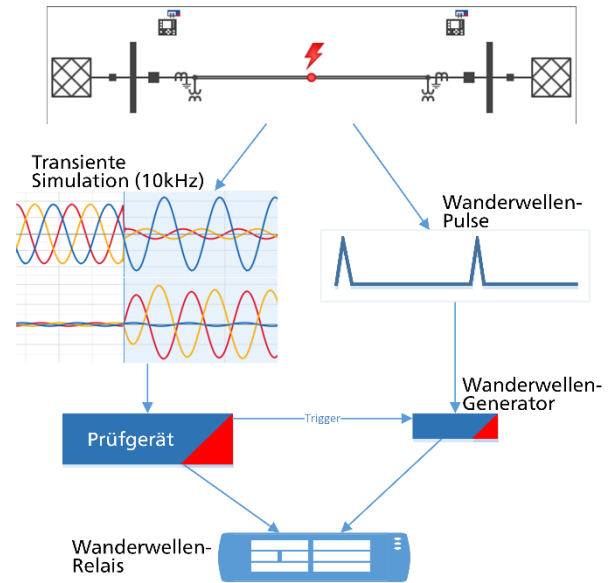


Abb. 4: Wanderwellen-Pulse auf konventionelle Signale überlagert

Die auf einem PC laufende Software für simulationsbasierte Prüfungen steuert sowohl die transiente Simulation der konventionellen Signale mit einer Abtastrate von 10 kHz als auch die Simulation der Wanderwellen-Pulse. Die simulierten gesampelten Signale – (Abtastrate 10 kHz) – werden mit einem herkömmlichen Schutzprüfgerät eingespeist (links in Abb. 4), ähnlich wie bei einer Prüfung von nur TD-Elementen. Die Wanderwellen-Pulse werden mit einem separaten Wanderwellen-Generator (TW Injector) erzeugt, gesteuert vom Relaisprüfgerät. Dies ermöglicht ein präzises Timing der Wanderwellen-Pulse, damit die Wanderwelle netzsynchrong (point-on-wave) mit Signalen niedriger Bandbreite übereinstimmt.

In Abb. 5 sind die Ergebnisse der Prüfsignale so dargestellt, wie sie von den zu prüfenden Relais aufgezeichnet wurden.

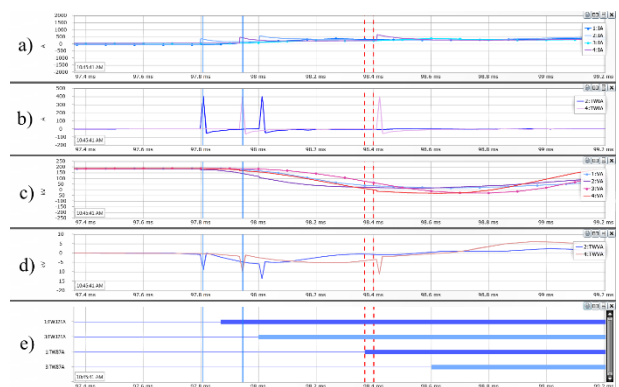


Abb. 5: Prüfsignale mit point-on-wave überlagerten Wanderwellen-Pulsen

Abbildung 5(a) zeigt die Ströme bei Fehlereintritt sowie den ersten eintreffenden und den ersten reflektierten

Wanderwellen-Puls auf beiden Leitungsenden. Abbildung 5(b) zeigt die Wanderwellen-Stromsignale nach der Filterung (Differenzierer-Glättungsfilter). Für die weitere Verarbeitung werden die gefilterten Signale mit einem Zeitstempel versehen. In Abbildung 5(c) und 5(d) ähneln sich die Spannungssignale, außer, dass die Wanderwellen-Pulse die entgegengesetzte Polarität aufweisen.

Die Erzeugung konventioneller Signale (10 kHz Abtastrate) und das Timing der überlagerten Wanderwellen-Pulse werden durch das Prüfgerät gesteuert, das mit einer präzisen Zeitquelle synchronisiert ist. Für eine End-to-End-Prüfung wird eine externe GPS-Uhr zur Synchronisation verwendet, wie im nächsten Abschnitt erläutert.

### 8. Prüfaufbau im Feld

Eine End-to-End-Prüfung im Feld erfordert die Einspeisung von Prüfsignalen an beiden Leitungsenden, wobei sich die Einspeisungen geografisch an unterschiedlichen Standorten befinden (lokale und ferne Umspannwerke). Dennoch ist eine integrierte Prüfung des gesamten Schutzsystems mit einer einzigen Prüfanwendung möglich. Die Software ermöglicht es, alle Einspeisungen an alle Leitungsenden gleichzeitig zu steuern, sowohl die konventionellen Signale als auch die überlagerten Wanderwellen-Pulse.

Ein exemplarischer Prüfaufbau für eine Übertragungsleitung mit 2 Enden ist in Abbildung 6 dargestellt.

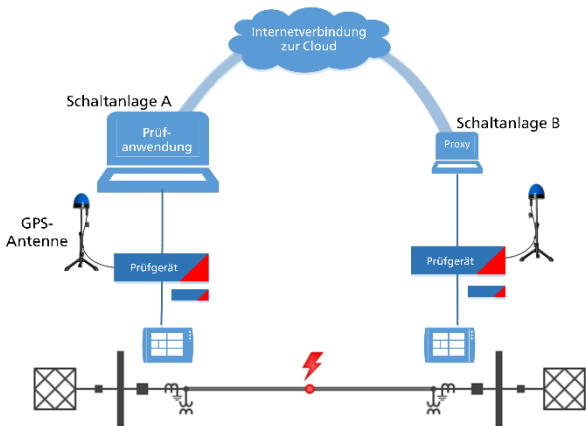


Abb. 6: Prüfaufbau für eine End-to-End-Prüfung im Feld

Links in Abb. 6 ist die Steuerungssoftware, die auf einem PC in der Anlage A läuft, dargestellt. Sie führt alle Prüf-fall-Simulationen durch und berechnet alle eingespeisten Signale. Der PC steuert das lokale Prüfgerät direkt, einschließlich der Wanderwellen-Einspeisung. Für das Prüfgerät in der entfernten Station und dessen Wanderwellen-Einspeisung kann der PC eine Netzwerkverbindung zur entfernten Anlage oder eine Cloud-Verbindung über das Internet nutzen, die von einer kleinen Proxy-Anwendung auf einem zweiten PC mit Internetzugang in der Anlage B [6] zur Verfügung gestellt wird.

Über diesen Fernzugriff auf das Prüfgerät werden zunächst alle berechneten Prüfsignale auf die Prüfgeräte hinuntergeladen. Um einen präzisen zeitsynchronen Start der Ausgabe zu gewährleisten, ist die GPS-Synchronisation der Prüfgeräte mit einer Uhr erforderlich, die eine Genauigkeit von 100 ns oder besser hat.

### 9. Erfahrungen mit Wanderwellen-Pulsen

Um besser verstehen zu können, wie die TD- und Wanderwellen-Schutzelemente in diversen Fehler-Szenarien zusammenarbeiten, werden im folgenden Abschnitt unterschiedliche Prüffälle vorgestellt. Die simulierten Signale werden in Verbindung mit der Reaktion jedes der Relais-elemente dargestellt.

Das erste Szenario ist ein Fehler auf der geschützten Leitung bei 30 Prozent Leitungslänge vom linken Ende aus (Abbildung 7).



Abb. 7: Topologie eines Prüffalls mit einem Fehler auf der geschützten Leitung

Die als erstes eintreffenden Wanderwellen werden mit positiven Wanderwellen-Pulsen bei Strömen und negativen Wanderwellen-Pulsen bei Spannungen (für einen Fehlereintrittswinkel bei +90 Grad) simuliert, damit die TW32-Elemente an beiden Leitungsenden den Fehler in Vorwärtsrichtung erkennen (siehe Abb. 8). Nach der TWLPT gibt es keine Wanderwelle mehr, die die geschützte Leitung verlässt, so dass die TW87-Elemente entsprechend auslösen. Zudem erkennen die TD32-Elemente den Fehler in Vorwärtsrichtung (aufgrund der Delta-Größen der eingespeisten konventionellen Signale), deshalb werden beide Schutzelemente aktiv.

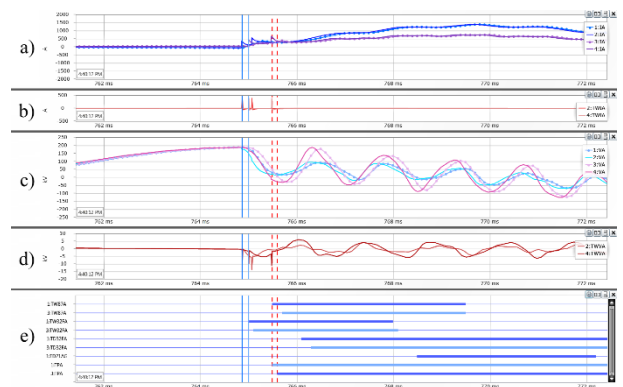


Abb. 8: Prüfsignale und die Reaktion des Relais bei einem Fehler auf der geschützten Leitung

Die Simulation an beiden Leitungsenden der als erstes eintreffenden Wanderwelle erfolgt mit einer Zeitverzögerung von 136 µs zwischen dem linken und dem rechten



Ende. Dies entspricht genau der Laufzeitdifferenz aufgrund des Fehlerortes (bei einer Leitungslänge von 100 km). Zudem werden die ersten reflektierten Wanderwellen simuliert, vom Fehlerort zurück zum Relais einbauort an beiden Leitungsenden, damit sowohl doppelendige als auch einendige Fehlerortungselemente gleichzeitig geprüft werden können. Das Bewley-Diagramm (Abbildung 9) zeigt, wie die ein- und die zweiendige Fehlerortung übereinstimmen.

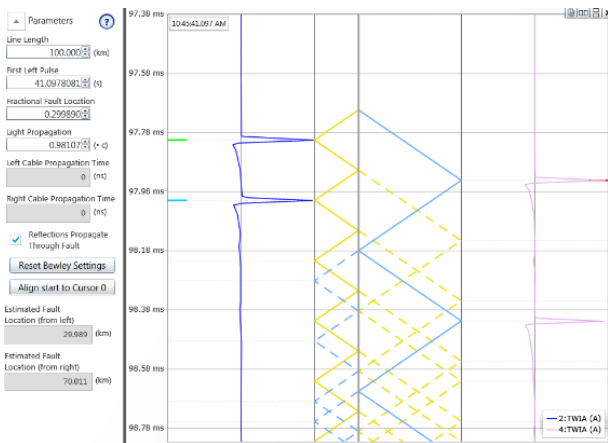


Abb. 9: Fehlerortung für zweiendige und einendige Fehlerortung.

Das zweite Szenario ist ein Fehler außerhalb der Zone hinter dem linken Ende der geschützten Leitung (Abbildung 10).

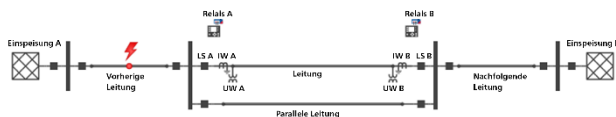


Abb. 10: Topologie eines Prüffalls mit außerhalb liegendem Fehler (rückwärts)

Die ersten Wanderwellen, die am linken Ende ankommen, werden mit negativer Polarität für Strom und Spannung simuliert, sodass das TW32-Element des Relais am linken Ende den Fehler in rückwärtiger Richtung erkennt (Abbildung 11).

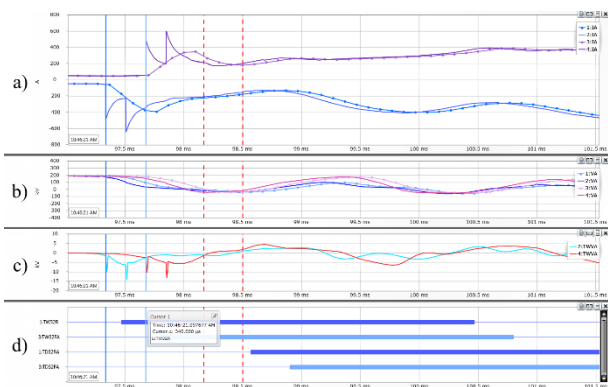


Abb. 11: Prüfsignale und Relais-Reaktionen für einen außerhalb liegenden Fehler (rückwärts)

Am rechten Ende werden die Wanderwellen-Pulse für den Strom mit positiver Polarität und für die Spannung mit negativer Polarität simuliert, daher meldet das TW32-Element den Fehler in Vorwärtsrichtung. Die Richtung des Fehlers wird von den TD32-Elementen auf die gleiche Weise erkannt. Bei diesem Fehler ist jedoch die Zeitverzögerung zwischen dem linken und dem rechten Ende genau die Laufzeitverzögerung der Leitung (340  $\mu$ s), so dass das TW87-Element nicht anregt und damit das Relais nicht auslöst.

Der letzte Fall zeigt einen Fehler außerhalb der Zone auf der Parallelenleitung bei 30 Prozent der Leitungslänge vom linken Ende aus (Abbildung 12).



Abb. 12: Topologie des Prüffalls mit einem Fehler auf der parallelen Leitung (außerhalb)

Die Polarität des Wanderwellen-Pulses wird auf beiden Leitungen mit negativen Strömen und negativen Spannungen simuliert, sodass beide TW32-Elemente in Rückwärtsrichtung erkennen. Die gleiche Richtung wird durch die TD32-Elemente angegeben. Zusätzlich ist der sich ausbreitenden Wanderwelle ein zweiter Wanderwellen-Puls an jedem Leitungsende zugeordnet, genau 340  $\mu$ s nach der ersten Wanderwelle, so dass die TW87-Elemente stabil bleiben und das Relais nicht auslöst (Abbildung 13).

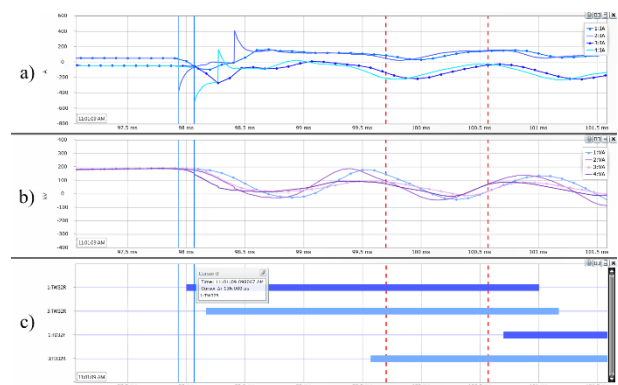


Abb. 13: Prüfsignale und die Reaktion des Relais auf einen Fehler auf der parallelen Leitung

Wie in den Beispielen dieses Abschnitts aufgezeigt wurde, ist es möglich, alle TD- und TW-Elemente integriert zu prüfen, indem Wanderwellen-Pulse den simulierten herkömmlichen Prüfsignalen überlagert werden. Es ist auch möglich, verschiedene Fehlerarten (zweipolige und dreipolige Fehler) mit simultanen Wanderwellen-Pulsen und den dazugehörigen Polaritäten sowohl in den fehlerbehafteten als auch in den nicht fehlerbehafteten Phasen zu simulieren.

## 10. Zeitliche Genauigkeit

Die zeitliche Genauigkeit der Wanderwellen-Pulse ist wichtig, da ein Fehler im Bereich von 1  $\mu\text{s}$  eine Ungenauigkeit von etwa 300 m für den Fehlerort zur Folge haben kann. Bei praktischen Prüfungen kann die Zeitdifferenz zwischen zwei mit GPS-Uhren synchronisierten Prüfgeräten im Nanosekundenbereich gehalten werden (Abbildung 14).

Die in Abbildung 14 dargestellten Messungen zeigen einen Offset-Fehler (Tofs) von ca. 20 ns (entspricht 6 m) und einen Timing-Jitter zwischen den beiden Prüfgeräten über einen langen Zeitraum von  $\pm 40$  ns. Dies ist eine ausreichende Genauigkeit, um das korrekte und genaue Verhalten von Wanderwellen-Schutz- und Fehlerortungsfunktionen zu überprüfen.

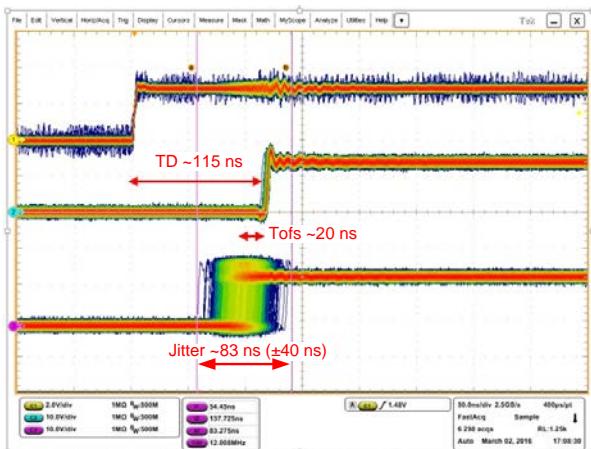


Abb. 14: Jitter von Wanderwellen-Pulsen für zwei synchronisierte Prüfgeräte

## 11. Fortgeschrittene Prüffälle

Auch für weiter fortgeschrittene Prüffälle ist der Ansatz mit simulationsbasierter Software auf einem PC geeignet. Dabei wird ebenfalls die Topologie des Netzes modelliert und aus einer Netzsimulation werden die konventionellen Prüfsignale (Abtastrate von 10 kHz) und die einzuspeisenden überlagerten Wanderwellen-Pulse (einschließlich Timing und Polarität) abgeleitet. Es lassen sich jede beliebige Topologie mit verschiedenen Leitungs- und Kabelsegmenten modellieren und zudem die Laufzeiten für die verschiedenen Abschnitte individuell festlegen. Dies ermöglicht die Schutzprüfung bei inhomogenen Übertragungsleitungen wie auch bei gemischten Freileitungs- und Kabelverbindungen.

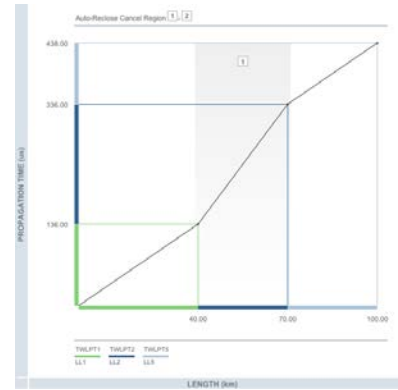


Abb. 15: Relais, das für eine inhomogene Leitung mit zwei Freileitungs- und einem Kabelsegment konfiguriert wurde

Wie in Abbildung 15 dargestellt, können die Relais für unterschiedliche Leitungssegmente mit verschiedenen Wanderwellen-Laufzeiten konfiguriert werden. Darüber hinaus können Schutzgeräte den Fehlerort auf Kabelsegmenten erkennen und die automatische Wiedereinschaltung blockieren (über ein dezidiertes Relaisausgangssignal ARC - Auto reclose cancel). Um solch ein Relais zu prüfen, müssen dieselben Leitungskonfigurationen entsprechend in der Prüfsoftware modelliert werden. Wie in Abb. 16 dargestellt, ist es innerhalb der Prüfsoftware möglich, Fehler an jeder beliebigen Stelle der inhomogenen Leitung zu platzieren und zu prüfen, ob sich die Blockierung der Wiedereinschaltung für Fehler im Kabelsegment korrekt verhält.



Abb. 16: Topologie eines Prüffalles mit einem Fehler auf einem Kabelsegment

Die Simulationssoftware ermöglicht es auch, Serienkapazitäten an jedem beliebigen Ort zu modellieren. Obwohl Serienkapazitäten keine zusätzliche Zeitverzögerung für die Wanderwellen bewirken, ist dies ein wichtiger Prüffall für die Elemente TD21 und TD32. Mit einem einfachen Algorithmus können die Ankunftszeiten für die simulierten Wanderwellen-Pulse auf dem kürzesten Weg zwischen Fehlerposition und Relaisposition berechnet werden. Dieses Prinzip kann sogar auf mehrere Enden ausgedehnt werden (z.B. zum Schutz einer Leitung mit 3 Enden mit einem erweiterten Differenzschema auf Basis von Schutzelementen im Zeitbereich).

## 12. Fazit

Die Prüfung von TD- und TW-basierten Leitungsschutzelementen bringt neue Herausforderungen mit sich. Im Labor ist eine transiente Simulation von Wanderwellen bei Abtastraten von 1 MHz und mehr mit EMTP-Softwaretools möglich. Diese hochfrequenten Signale können jedoch nicht ohne weiteres in konventionelle Strom- und Spannungseingänge von Schutz- und Fehlerortungsgeräten eingespeist werden, die typischerweise an die Strom- und Spannungswandler angeschlossen sind.

Die Einspeisung von Wanderwellen-Pulsen, die entsprechend dem simulierten Prüfscenario exakt getimed sind, kann die Wanderwellen-Elemente innerhalb der Relais anregen. Bei der Prüfung nur mit Wanderwellen-Pulsen muss das Relais in den Prüfmodus versetzt werden, da die Wanderwellen-Elemente von anderen Funktionen und Elementen überwacht werden, die mit grundlegenden Größen arbeiten.

Ein geeigneter Ansatz, bei dem die Wanderwellen-Pulse netzsynchron (point-on-wave) den eingespeisten konventionellen Strom- und Spannungssignale überlagert werden, ermöglicht das integrierte Prüfen von Schutzelementen, ohne die Einstellungen zu ändern oder das Schutzgerät in einen Prüfmodus schalten zu müssen. Auf diese Weise können alle Relaiselemente gleichzeitig geprüft werden, was realen Betriebsbedingungen entspricht.

In einer Gesamtlösung für Feldprüfungen kann ein einzelner PC die Prüfsoftware ausführen, um das primäre Netz zu simulieren und alle erforderlichen Signale zu berechnen, einschließlich des Timings und der Polarität der Wanderwellen-Pulse. Derselbe PC und dieselbe Software können mehrere Schutzprüfgeräte steuern, die herkömmliche Verstärkerausgänge für transiente Signale (Abtastrate von 10 kHz) und einen einfachen Wanderwellen-Pulsgenerator zur Überlagerung der Wanderwellen-Pulse verwenden. Um ein präzises Timing sicherzustellen, werden die Schutzprüfgeräte über GPS-Uhren zeitsynchronisiert. Dieser Aufbau eignet sich für End-to-End-Prüfungen und kann auch auf mehrere Enden erweitert werden.

Fortgeschrittene Prüffälle mit inhomogenen und serienkompensierten Leitungen sind möglich, indem die Topologie innerhalb der Simulationssoftware entsprechend modelliert und die Ankunftszeiten der Wanderwellen mit einem Algorithmus auf Basis dieser Topologie berechnet werden. Experimente mit einer solchen Prüflösung und der Einspeisung in Wanderwellen-Schutzrelais haben die Richtigkeit des Ansatzes bewiesen, wobei eine Genauigkeit im Nanosekundenbereich erreicht wurde.

## Literaturverzeichnis

- [1] E. O. Schweitzer, III, B. Kasztenny, A. Guzmán, V. Skendzic, and M.V. Mynam. “Speed of Line Protection – Can We Break Free of Phasor Limitations?”, proceedings of the 68th Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, TX, March 2015.
- [2] E. O. Schweitzer, III, A. Guzmán, M. V. Mynam, V. Skendzic, B. Kasztenny, and S. Marx. “Locating Faults by the Traveling Waves They Launch”, proceedings of the 67th Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, TX, March 2014.
- [3] SEL-T400L Instruction Manual. Available: <https://selinc.com>
- [4] T. Hensler, C. Pritchard, and F. Fink. “New Possibilities for Protection Testing using Dynamic Simulations in the Field”, presented at MATPOST 2015, Lyon, France, November 2015.
- [5] J. R. Marti. “Accurate Modelling of Frequency-Dependent Transmission Lines in Electromagnetic Transient Simulations”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, Issue 1, January 1982, pp. 147–157
- [6] B. Bastigkeit, C. Pritchard, and T. Hensler. “New Possibilities in Field Testing of Distributed Protection Systems”, proceedings of the 5th Annual Protection, Automation and Control World Conference, Zagreb, Croatia, June 2014.

## Autoren



Dipl.-Ing. (FH) Christopher Pritchard wurde 1982 in Dortmund / Deutschland geboren. Sein Diplom in Elektrotechnik erhielt er 2006 an der Fachhochschule Dortmund. Er kam 2006 zu OMICRON electronics, wo er in der Anwendungssoftwareentwicklung im Bereich Prüflösungen für Schutz- und Messsysteme tätig war. Heute ist er der verantwortliche Produktmanager für systembasierte Prüflösungen.

[christopher.pritchard@micronenergy.com](mailto:christopher.pritchard@micronenergy.com)





Dipl.-Ing. Heinz Lampl wurde 1962 in Graz / Österreich geboren. Sein Diplom (Master) in Elektrotechnik erhielt er 1986 an der Technischen Universität Wien. Er kam 1990 zu OMICRON electronics und ist dort in der Hardwareentwicklung von Prüfgeräten für die Schutztechnik tätig.

[heinz.lampl@omicronenergy.com](mailto:heinz.lampl@omicronenergy.com)



Dipl.-Ing. **Thomas Hensler** geboren 1968 in Feldkirch / Österreich. Er studierte Informatik an der Technischen Universität Wien, wo er 1995 sein Diplom (Dipl.-Ing.) erhielt. Seit 1995 arbeitet er für OMICRON electronics in der Software-Entwicklung im Bereich Prüflösungen für Schutz- und

Messsysteme. Zusätzlich ist im Produktmanagement verantwortlich für Anwendungssoftware für die Schutzprüfung.

[thomas.hensler@omicronenergy.com](mailto:thomas.hensler@omicronenergy.com)

OMICRON ist ein weltweit tätiges Unternehmen, das innovative Prüf- und Diagnoselösungen für die elektrische Energieversorgung entwickelt und vertreibt. Der Einsatz von OMICRON-Produkten bietet höchste Zuverlässigkeit bei der Zustandsbeurteilung von primär- und sekundärtechnischen Betriebsmitteln. Umfassende Dienstleistungen in den Bereichen Beratung, Inbetriebnahme, Prüfung, Diagnose und Schulung runden das Leistungsangebot ab.

Kunden in mehr als 160 Ländern profitieren von der Fähigkeit des Unternehmens, neueste Technologien in Produkte mit überragender Qualität umzusetzen. Servicezentren auf allen Kontinenten bieten zudem ein breites Anwendungswissen und erstklassigen Kundensupport. All dies, zusammen mit einem starken Netz von Vertriebspartnern, ließ OMICRON zu einem Marktführer der elektrischen Energiewirtschaft werden.

Mehr Informationen, eine Übersicht der verfügbaren Literatur und detaillierte Kontaktinformationen unserer weltweiten Niederlassungen finden Sie auf unserer Website.