

| | |
|---------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Zeitschrift: | Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses |
| Herausgeber: | Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen |
| Band: | 88 (1997) |
| Heft: | 21 |
| Artikel: | Distanzschutz bei schwierigen Netzbedingungen : der Netzschatz im 1125-V-Fahrleitungsnetz der Jungfraubahn |
| Autor: | Zimmerli, Roland |
| DOI: | https://doi.org/10.5169/seals-902254 |

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 26.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Die Eigenschaften und die Einsatzweise der Triebfahrzeuge einer Bergbahn stellen hohe Anforderungen an die Energieversorgung des Fahrleitungsnetzes und insbesondere an den Netzschatz. Der vorliegende Artikel beschreibt das Vorgehen bei der Neukonzeption und der Realisierung eines neuen Fahrleitungsschutzes bei der Bahn auf das Jungfraujoch unter Verwendung von numerischen Standard-Schutzgeräten.

Distanzschutz bei schwierigen Netzbedingungen

Der Netzschatz im 1125-V-Fahrleitungsnetz der Jungfraubahn

■ Roland Zimmerli

In den vergangenen zwei Jahren wurde der Fahrleitungsschutz der Jungfraubahnen neu konzipiert und anschliessend nach diesem neuen Konzept auf der Basis von numerischen Standard-Schutzgeräten realisiert und in Betrieb genommen. Die spezielle Netzkonstellation und die Eigenschaften der im Einsatz stehenden Triebfahrzeuge führen dazu, dass die Betriebsströme ähnlich hohe Werte erreichen können wie die Fehlerströme. Dies stellt entsprechend hohe Anforderungen an den Netzschatz und verlangt in der Projektierung des Schutzes nach speziellen Abklärungen und Untersuchungen. Insbesondere mussten die Fahrleitungsparameter messtechnisch bestimmt werden. Nachfolgend wird näher auf die durchgeführte Schutzstudie und die Überprüfung des realisierten neuen Schutzkonzeptes mittels künstlich eingelegter Kurzschlüsse auf allen Fahrleitungsabschnitten der Jungfraubahn eingegangen.

Allgemeine Angaben zur Jungfraubahn

Das Konzessionsgesuch für die Erstellung der Jungfraubahn, ausgehend von der Kleinen Scheidegg, wurde 1891 von Adolf Guyer eingereicht und 1892 bewilligt.

Das Konzept sah aus Finanzierungsgründen eine etappenweise Realisierung des Projektes über sieben Jahre mit einem Finanzaufwand von 10 Mio. Franken vor. Letztendlich dauerte die Realisierung 16 Jahre mit Gesamtkosten von knapp 15 Mio. Franken. Die Triebfahrzeuge waren von Anbeginn her mit elektrischem Antrieb vorgesehen.

Unter dem Eindruck der elektrotechnischen Ausstellung von 1891 in Frankfurt wählte man für die Traktionsstromversorgung ein Dreiphasensystem mit einer Frequenz von 40 Hz. Die Fahrleitungsspannung wurde auf 650 V festgelegt. Die Übertragung der Energie von den eigens erstellten Kraftwerken in Lauterbrunnen und Burglauen mit einer Leistung von anfänglich 2600 PS und 5400 PS erfolgte – mittels Freileitungen hinauf zur Kleinen Scheidegg und weiter im Tunnel zum Jungfraujoch – auf einem Spannungsniveau von 7,5 kV, entsprechend den Generatorspannungen.

Im Jahre 1918 wurde mit den Bernischen Kraftwerken (BKW) ein Energieleverungsvertrag (Energiebezug und -abgabe, je nach Tages- und Jahreszeit) abgeschlossen. Die Kopplung der beiden Netze geschah anfänglich nur hydraulisch, indem die einzelnen Turbinen und Generatoren entweder auf das eine Netz mit 40 Hz oder das andere Netz mit 50 Hz synchronisiert wurden. 1938 wurde ein zwischenkreisloser Quecksilberdampf-Umrichter, ein sogenannter Mutator, in Betrieb genommen. Diese Weltneuheit erlaubte eine elastische elek-

Adresse des Autors

Roland Zimmerli, ZET Zimmerli Energietechnik, Rütihubelweg 1, 4812 Mühlthal

Bahnnetz

trische Kupplung beider Netze mit Energiefluss in beiden Richtungen. Diese Apparatur scheint sich aber letztendlich nicht bewährt zu haben.

Es entstand langsam der Druck, das Übertragungsnetz von 40 Hz auf 50 Hz und von 7,5 kV auf 16 kV umzustellen. Entsprechend wurde die Fahrleitungsspannung um den Faktor $\sqrt{3}$ auf 1125 V angehoben. Die entsprechenden Umstellungsarbeiten erfolgten schrittweise und waren 1960 abgeschlossen.

Der Bau der Bahn begann im Juli 1896 mit einer Spurweite von 1000 mm, die erste Etappe mit der Eröffnung der Station Eigergletscher wurde im September 1898 erreicht. Die Eröffnung der letzten Station, der Station Jungfraujoch auf 3454 m ü.M. und 9336 m von der Kleinen Scheidegg entfernt, erfolgte am 1. August 1912.

Heute sind noch drei unterschiedliche Triebfahrzeuggenerationen im Einsatz: fünf Lokomotiven vom Typ He aus den Jahren 1910–1920 mit einer Leistung von 284 kW, zehn Triebwagen vom Typ BDhe 2/4 aus den Jahren 1950–1965 mit einer Dauerleistung von 440 kW und vier Doppeltriebwagen vom Typ BDhe 4/8 aus den Jahren 1992/93 mit einer Dauerleistung von 800 kW und einer maximalen Geschwindigkeit von 27 km/h.

Konzept der Energieversorgung des Fahrleitungsnetzes

Die nachfolgenden Erläuterungen konzentrieren sich auf das heutige 1125-V-Fahrleitungsnetz von der Kleinen Scheidegg bis zum Jungfraujoch. Die Energie wird aus dem 16-kV-Netz in das 1125-V-Fahrleitungsnetz aus gesamthaft acht Transformatorenstationen mit einer total installierten Trafoleistung von 11 000 kVA eingespeist. Die Phasen L1 und L3 werden über die beiden Fahrleitungsdrähte geführt, die Phase L2 ist mit dem Gleis verbunden. Das 1125-V-Fahrleitungsnetz kann deshalb als Netz mit isoliertem Sternpunkt betrachtet werden, das mit permanentem Erdschluss einer Phase betrieben wird.

Die gesamte Fahrleitungsstrecke ist elektrisch in einzelne Abschnitte unterteilt. Jeder dieser Abschnitte wird aus den Transformatorenstationen jeweils von beiden Enden her über entsprechende Abgangsfelder in den Trafostationen mit Energie versorgt. Das Grundkonzept der Energieversorgung des Fahrleitungsnetzes ist in Bild 1 schematisch dargestellt. Aus Sicht des selektiven Netzschatzes ist erforderlich, dass bei einem Fehler auf einem Leitungsabschnitt einerseits nur dieser Abschnitt abgeschaltet wird und

andererseits auch bei hohen Lastströmen auf einem Abschnitt keine Fehlauslösungen auftreten.

Betriebsbedingungen bei der Jungfraubahn

Normalbetrieb

Die vier in den Jahren 1992 und 1993 beschafften neuen Doppeltriebwagen vom Typ BDhe 4/8 mit einer Dauerleistung von 800 kW (Bild 2) und einer maximalen Geschwindigkeit von 27 km/h sind die leistungsstärksten Triebfahrzeuge im Fuhrpark der Jungfraubahn. Die Antriebseinheit dieser Doppeltriebwagen basiert auf der Stromrichtertechnik (6-pulsi-ge Thyristorbrücke) in Kombination mit Mischstrom-Kollektor-Fahrmotoren.

Die maximal auftretenden Phasenströme bei einem Doppeltriebwagen allein liegen in der Größenordnung von knapp 700 A und werden direkt beeinflusst durch die Trasseeneigung, das individuelle Verhalten der Lokomotivführer, die Beschleunigung und die Geschwindigkeit der Fahrzeuge. Aufgrund der Stromrichtertechnik ist einerseits der Leistungsfaktor $\cos \varphi$ nicht konstant (in der Anfahrphase bergwärts ungefähr 0,3, mit zunehmender Geschwindigkeit steigend bis gegen 0,95) und treten andererseits Oberwellen auf. Bei der Talfahrt können die Fahrzeuge Energie ins Netz zurückspeisen.

Wegen des regen Publikumsverkehrs und des klar definierten Fahrplanes verkehren in der Regel nicht einzelne Triebfahrzeuge, sondern mehrere Triebfahrzeuge paketweise mit rund 100 m Abstand zwischeneinander auf der Strecke gemeinsam berg- oder talwärts. Dies führt dazu, dass die maximalen Ströme auf einem Fahrleitungsabschnitt in der Größenordnung von 1500 A liegen können. Dieser Strom wird entsprechend von den an beiden Enden des Fahrleitungsabschnittes einspeisenden beiden Trafostationen geliefert, so dass nie ein einzelner Abgangsschalter den vollen Laststrom liefern muss.

Fehlerfall

Da das Netz mit isoliertem Sternpunkt und geerdeter L2-Phase betrieben wird, führt jeder Fehler Fahrleitung–Fahrleitung oder Fahrleitung–Erde zu einem zweipoligen oder dreipoligen Kurzschluss. Für die Dimensionierung der Anlagen ist der maximal auftretende Kurzschlussstrom bei dreiphasigem Kurzschluss relevant. Dieser maximale Strom tritt dann auf, wenn der Kurzschluss in der Trafostation direkt im Abgangsfeld eintritt.

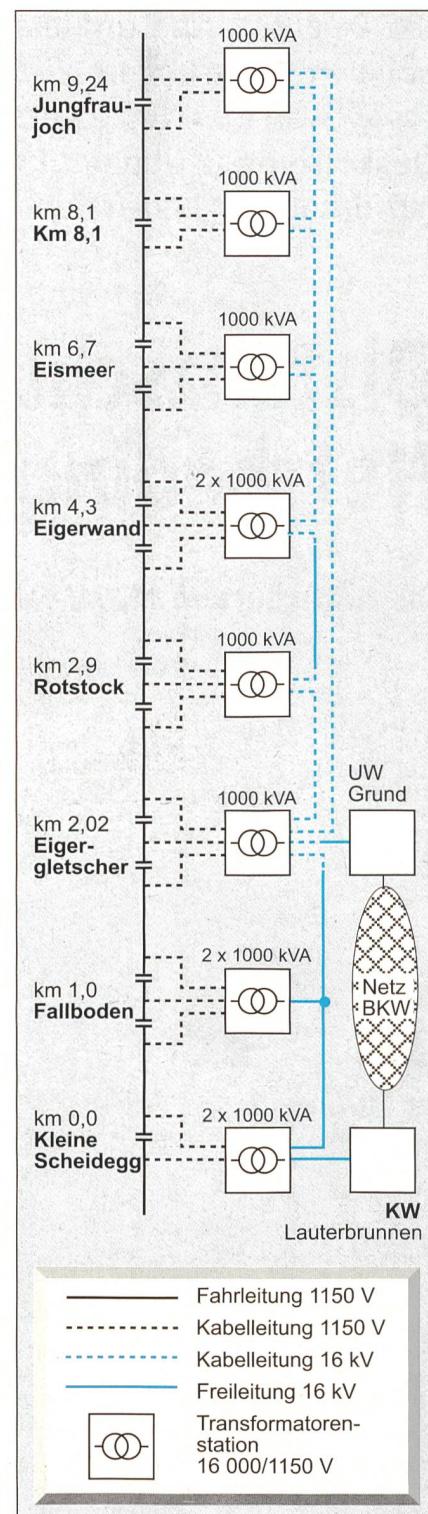


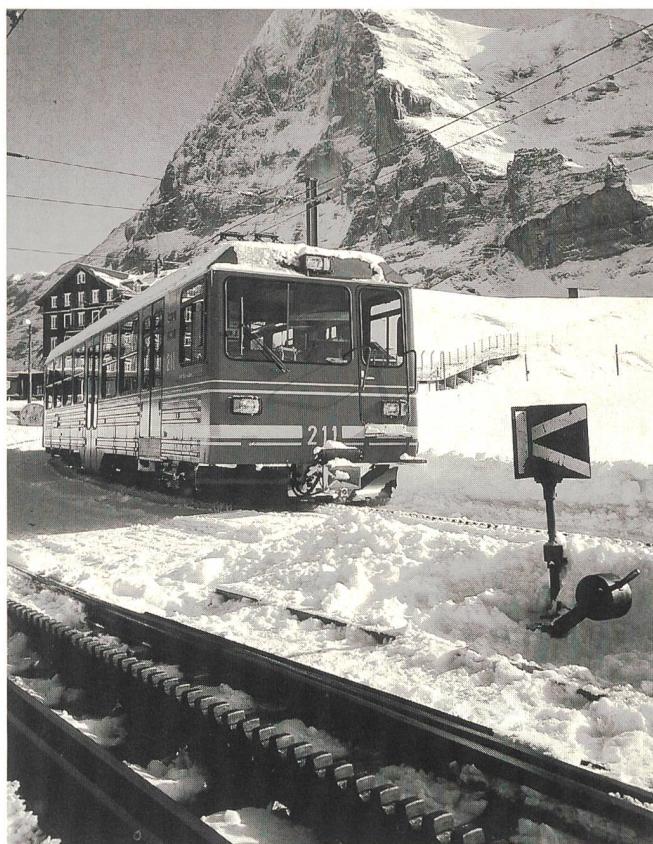
Bild 1 Energieversorgung des Fahrleitungsnetzes der Jungfraubahn

Grundkonzept der Energieversorgung mit den beiden Spannungsebenen 16 kV und 1125 V

Für den Netzschatz von Bedeutung sind jedoch die minimal zu erwartenden Fehlerströme. Aus der Perspektive des Abgangsfeldes in der Trafostation treten diese dann auf, wenn am entfernten Ende des angespeisten Fahrleitungsabschnittes ein zweipoliger Kurzschluss auftritt.

Bild 2 Doppeltriebwagen des Typs BDhe 4/8 der Jungfraubahn

Ersichtlich sind die beiden Fahrleitungsdrähte und im Hintergrund ein Ausschnitt der eindrücklichen Bergkulisse der Jungfrau-region.



Diese minimalen Fehlerströme liegen in der Größenordnung von knapp 1100 A.

Die Netzschutzstudie

Schutzproblematik

Aus den im Abschnitt «Betriebsbedingungen» geschilderten Randbedingungen ergibt sich, dass die maximalen Lastströme für einen Leitungsabgang in der Trafostation ähnlich hoch liegen wie die minimal zu erwartenden Kurzschlussstromwerte.

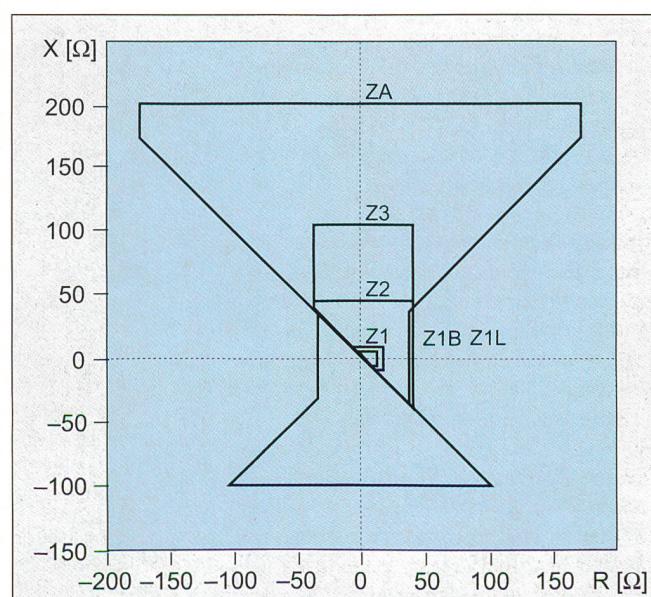
Im Gegensatz zu Elektrizitätsversorgungsunternehmen, deren primäre Aufgabe die sichere und zuverlässige Übertragung und Verteilung von elektrischer Energie ist, muss die Jungfraubahn als Transportunternehmen den sicheren und zuverlässigen Transport der Fahrgäste in den Vordergrund stellen. Die elektrische Energie ist in diesem Sinne lediglich ein Hilfsmittel zur Wahrnehmung dieser Aufgabe. Deshalb wird bei der Parametrierung der Schutzgeräte ein zu spätes unselektives Abschalten eines Kurzschlusses mittels Thermoschutz einer Falschauslösung infolge hohen Laststromes vor gezogen.

Wahl des Schutzkonzeptes

Aufgrund der Randbedingung, dass die maximalen Lastströme und die minimalen Kurzschlussströme ähnlich hoch

sind, scheiden Überstrom-Zeit-Relais für die Realisierung eines selektiven Fahrleitungsschutzes aus. Ebenfalls nicht anwendbar ist das Richtungsvergleichsschutzprinzip, da im Gegensatz zu traditionellen Anwendungen dieses Schutzprinzips auf dem zu schützenden Leitungsabschnitt Energie von den Triebfahrzeugen bezogen wird.

Bild 3 Anregecharakteristik des Distanzschutzgerätes



Anregepolygon mit ausgespartem Bereich bei tiefen Lastwinkeln (hoher ohmscher Anteil). Erfasste R/X-Werte, die innerhalb ZA liegen, führen zur Anregung des Distanzschutzgerätes. Relevante Parameter für das Auslöseverhalten (s. Bild 6)

Für die nicht einfachen Randbedingungen des Einsatzes im Fahrleitungsnetz der Jungfraubahn ist jedoch die Funktionalität der Distanzschutzgeräte mit der Möglichkeit der Unterimpedanz- oder Überstromanregung geeignet, da mit solchen Geräten der unterschiedliche Impedanzcharakter eines zweipoligen Kurzschlusses und eines Doppeltriebwagens im Normalbetrieb für die Erkennung eines abzuschaltenden Fehlers im Netz als Entscheidungskriterium beigezogen werden kann.

Für den Kurzschlusschutz der nur einfach angespeisten Stationsabschnitte der Fahrleitung werden konventionelle Überstrom-Zeit-Relais verwendet.

Schutzgerätewahl

Distanzschutzgeräte werden von unterschiedlichen Herstellern angeboten. Bei der Auswahl des später zu installierenden Typs wurden verschiedene Kriterien gewichtet und in die Entscheidung einbezogen. Wichtig war einerseits eine alphanumerische Anzeige auf der Gerätefront, damit bei einer Leitungsausschaltung der Lokführer eines vorbeifahrenden Zuges kurz anhalten und die Auslöseursache ohne zusätzlichen tragbaren PC ablesen kann. Entsprechend lässt sich unter Rücksprache mit der Leitstelle der Schalter wieder einschalten. Andererseits wurde vor allem auch im Hinblick auf die Inbetriebsetzungsphase auf die Möglichkeit einer komfortablen Stördatenerfassung und -auswertung Wert gelegt.

Die Wahl fiel schliesslich auf das Distanzschutzgerät vom Typ 7SA511 der Firma Siemens mit kombinierter Unter-

Bahnnetz

impedanz-/Überstromanregung, zusätzlichem Thermoschutz und der Möglichkeit der Signalkopplung über Lichtwellenleiter zweier korrespondierender Relais am Anfang und am Ende eines Leitungsabschnittes. Im Fahrleitungsnetz wurden 14 Geräte dieses Typs integriert. Eine rudimentäre signalmässige Kopplung mit einem seit Jahren betriebenen Netzeleitsystem erfolgt über die standardmäßig im Gerät vorhandenen Hilfskontakte.

Fahrleitungsparameter und Parametrierung der Schutzgeräte

Bestimmung der Fahrleitungsparameter

Die im letzten Abschnitt geschilderte Schutzproblematik verlangt, dass die elektrischen Kennwerte der Fahrleitungsabschnitte mit guter Genauigkeit bekannt sind. Aus früheren Netzuntersuchungen waren einige theoretisch berechnete Werte bekannt. Um die Parametrierung der Schutzgeräte jedoch auf zuverlässigen Grunddaten abzustützen zu können, wurde beschlossen, abschnittsweise die Fahrleitungsdaten messtechnisch zu bestimmen.

Erschwerend wirkt sich dabei die Randbedingung aus, dass zwei Phasen über je eine Fahrleitung geführt sind und die dritte Phase mit dem erdfühlig verlegten Gleis verbunden ist. Dadurch ist eine direkte, standardmässige Bestimmung der Mit- und Nullimpedanzwerte nicht möglich. Deshalb wurden auf allen Leitungsabschnitten mit dreiphasiger Spannungseinspeisung bei gleichzeitiger messtechnischer Erfassung der Ströme und Phasenwinkel die Kennwerte der dreiphasigen Leiteranordnung, der Leiterschleife Fahrleitung–Fahrleitung und der Leiterschleife Fahrleitung–Gleis bestimmt.

Aus diesen Messwerten wurden anschliessend rechnerisch die für die Parametrierung der Distanzschutzgeräte erforderlichen elektrischen Kennwerte hergeleitet. Es hat sich gezeigt, dass bei den Leitungskennwerten die Widerstandswerte ähnlich hoch liegen wie die Reaktanzwerte und deshalb der charakteristische Winkel der Leitungsabschnitte in der Größenordnung von 45° liegt.

Parametrierung der Schutzgeräte

Neben den messtechnisch bestimmten Parametern der Fahrleitung ist auch das elektrische Verhalten der leistungsfähigsten Triebfahrzeuge auf der Strecke, der stromrichtergetriebenen Triebfahrzeuge vom Typ BDhe 4/8, bei der Parametrierung der Schutzgeräte von Bedeutung.

Weltweit werden aber nur noch vier Bahnen mit einer dreiphasigen Energieversorgung betrieben. In der Schweiz ist dies neben der Jungfraubahn die Gornergratbahn. Derselbe Hersteller wie bei der Jungfraubahn lieferte auch vier Triebfahrzeuge in derselben Technologie für die Gornergratbahn. Aufgrund der relativ

geringen Anzahl hergestellter Triebfahrzeuge sind nur eingeschränkte Daten bezüglich ihres elektrischen Verhaltens beim Anfahren oder bei der Fahrt mit maximaler Geschwindigkeit verfügbar.

Orientierende Messungen mit den stromrichtergetriebenen Fahrzeugen in unterschiedlichen Betriebszuständen ha-

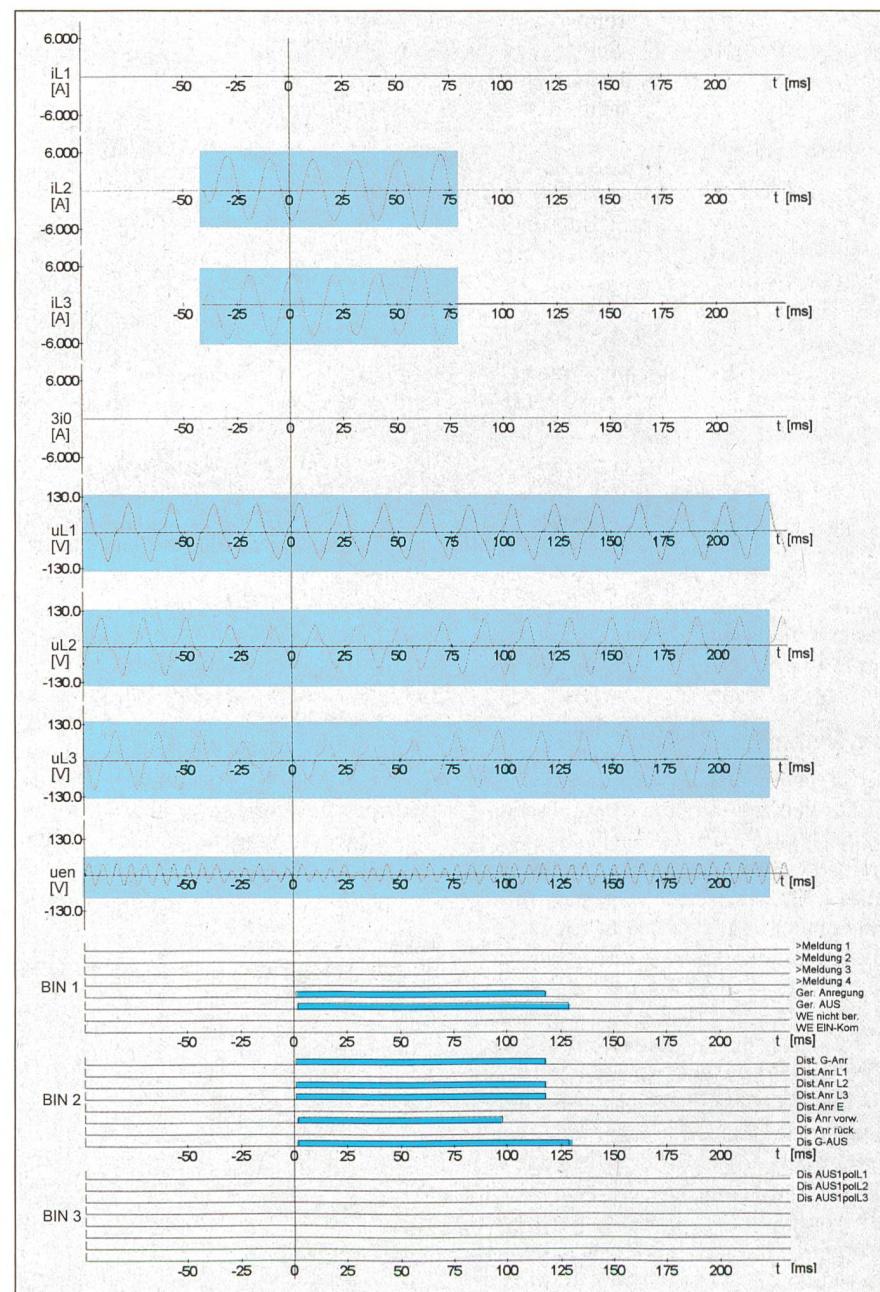


Bild 4 Störschreibung eines Kurzschlussversuches

Störschreibung für den Leitungsabschnitt Eigerwand–Rotstock, erfasst vom Distanzschutzgerät in der Anlage Eigerwand. Der zweipolare Kurzschluss Phase L2–L3 wurde innerhalb von ungefähr 110 ms bereinigt.

$i_{L1} \dots i_{L3}$ Phasenströme L1, L2 und L3

$3I_0$ Nullstrom

$u_{L1} \dots u_{L3}$ Phasenspannungen L1, L2 und L3

u_{en} Nullspannung

Die Darstellung aus dem Auswerteprogramm des 7SA511 zeigt, dass der Kurzschluss zum Zeitpunkt $t = 0$ als Fehler erkannt wurde. Folgende Signale wurden generiert (Zustand 1): binärer Meldeblock 1 (BIN 1): gerichtete Anregung, gerichtetes AUS. Binärer Meldeblock 2 (BIN 2): Distanzschutz-Generalanregung, Distanzschutz-Anregung Phase L2, Distanzschutz-Anregung Phase L3, Distanzschutz Anregung vorwärts, Distanzschutz general AUS. Binärer Meldeblock 3 (BIN 3): keine Meldungen aktiv.

ben gezeigt, dass der Lastwinkel starken Schwankungen unterworfen ist. In der Anfahrphase kann der $\cos \varphi$ bei 0,3 liegen und sich kontinuierlich bis gegen 0,95 erhöhen. Bei Fahrten mit maximaler Geschwindigkeit und maximaler Passagierzahl liegt der $\cos \varphi$ zwischen 0,9 und 1,0.

Bei der Talfahrt wird Energie rekuperiert. Bei dieser Rekuperation ist der Lastwinkel negativ; der Stromwert ist jedoch für die Funktion des Schutzes nicht kritisch, so dass dies bei der Parametrierung nicht explizit berücksichtigt werden muss.

Die polygonale Anregecharakteristik des Gerätes vom Typ 7SA511 (Bild 3) erlaubt eine Aussparung des Bereiches mit tiefen Lastwinkeln und damit eine selektive Abgrenzung der Anregung bei Kurzschluss (Winkel aufgrund der Leitungscharakteristik in der Größenordnung von 45°) und eine Nichtenregung bei tiefen Lastwinkeln (Winkel aufgrund der Lastcharakteristik der Triebfahrzeuge in der Größenordnung von 20°).

Die Auslöseparameter (R - und X -Werte) werden nach folgendem allgemeinem Denkansatz festgelegt: Die Werte der ersten Stufe reichen bis 85% des zu schützenden Fahrleitungsabschnittes. Die zweite Stufe ist unter Berücksichtigung des Einspeisefaktors aufgrund der Energieeinspeisung der nächstfolgenden Trafostation auf ungefähr Mitte des anschliessenden Fahrleitungsabschnittes eingestellt.

Sobald die gegenwärtig in der Realisierungsphase sich befindende Lichteiterkupplung der gegenüberliegenden Schutzgeräte eines Fahrleitungsabschnittes abgeschlossen ist, wird die bei Ausfall der Signalkupplung wirksame Übergreifstufe von 120% implementiert werden.

Inbetriebsetzung, Prüfung der Schutzfunktionen

Randbedingungen der Kurzschlussversuche

Nach dem mechanischen Einbau der Schutzgeräte und deren Verdrahtung wurden die Geräte parametriert und bezüglich Funktionalität mit Sekundäreinspeisung geprüft. Um jedoch die gesamte Funktionalität des Netzschatzes unter realen Randbedingungen zu überprüfen, haben die Jungfraubahnen beschlossen, Kurzschlussversuche im Fahrleitungsnetz durchzuführen.

Die Randbedingungen dieser Versuche wurden so gewählt, dass keine Beschädigung von Anlagen oder Einrichtungen fahrlässig provoziert wurde. Deshalb wurde auf jedem Fahrleitungsabschnitt

| Kanal | Amplitude | Effektivwert | Dimension | Phi/° | Offset/° |
|----------------|-----------|--------------|-----------|--------|----------|
| iL1 / Strom | 0,000 | 0,000 | A | 0,0 | 0,0 |
| iL2 / Strom | 5,837 | 4,127 | A | -169,4 | 0,0 |
| iL3 / Strom | 5,837 | 4,127 | A | 10,5 | 0,0 |
| 3I0 / Strom | 0,000 | 0,000 | A | 0,0 | 0,0 |
| uL1 / Spannung | 88,4 | 62,5 | V | -32,7 | 0,0 |
| uL2 / Spannung | 71,6 | 50,7 | V | -165,9 | 0,0 |
| uL3 / Spannung | 61,2 | 43,3 | V | 87,6 | 0,0 |
| uen / Spannung | 4,9 | 3,4 | V | -29,7 | 0,0 |

Impedanzberechnung Leiter 2 – Leiter 3:
 Spannung L2 : uL2 / Spannung Strom L2 : iL2 / Strom
 Spannung L3 : uL3 / Spannung Strom L3 : iL3 / Strom

Impedanz : 9,127 Ohm
 Wirkwiderstand : 7,293 Ohm
 Blindwiderstand : 5,487 Ohm

Bild 5 Fehlerstromgrößen eines zweipoligen Kurzschlusses

Fehlerstromgrößen des zweipoligen Kurzschlusses auf dem Leitungsabschnitt Eigerwand–Rotstock, erfasst vom Distanzschutzgerät in der Anlage Eigerwand; die Messwertdarstellung aus dem Auswerteprogramm des 7SA511 zeigt, dass der Fehlerstrom in der Größenordnung von 4,12 kA_{eff} bzw. 5,8 kA_{peak} lag. Die ermittelte Fehlerimpedanz liegt bei $R = 7,29 \Omega$, $X = 5,48 \Omega$.

jeweils in der Mitte ein zweipoliger Kurzschluss Fahrleitung–Erde eingeleitet. Bei dieser Versuchsanordnung war mit Fehlerströmen im Bereich von ungefähr 3 bis 4 kA zu rechnen.

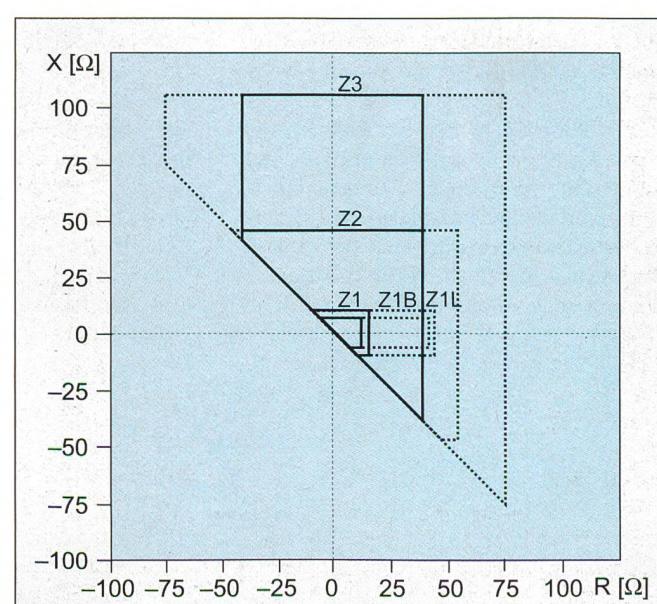
Bei einem Fehlerort in der Mitte ist davon auszugehen, dass beide Distanzschutzgeräte den Fehler in der ersten Stufe erkennen und diesen sehr schnell in der Größenordnung von 0,1 s abschalten. Der Fehlerort in der Mitte des Fahrleitungsabschnittes erlaubt ebenfalls eine zuverlässige Überprüfung der Einstellparameter der Schutzrelais am Anfang und am Ende des fehlerbeaufschlagten Fahrleitungsabschnittes. Die Fehlerart Fahrleitung–Erde stellt für den Netz-

schatz den härtesten Fall dar, sind doch einerseits der Fehlerstrom minimal und andererseits die Impedanzverhältnisse von Gleis und Fahrleitung unterschiedlich. Die Kurzschlüsse selbst wurden durch einen ölarmen Mittelspannungsschalter als Hilfsschalter eingeleitet. Dieser Hilfsschalter war auf einem Güterwagen aufgebaut und somit mobil. Um den Bahnbetrieb durch die Versuche nicht zu stören, wurden diese während der Nacht durchgeführt.

Ergebnisse der Kurzschlussversuche

Die Ergebnisse der Kurzschlussversuche haben die in sie gesetzten Erwartungen voll erfüllt. Die Schutzgeräte haben

Bild 6 Auslösecharakteristik des Distanzschutzgerätes



Z1, Z2, Z3 Impedanzpolygone der ersten, zweiten und dritten Auslöse-Zeitstufe

Z1B, Z1L Übergreifzone der ersten Stufe, Kurzunterbrechung (Z1B) und Langunterbrechung (Z1L) bei Wiedereinschaltung

die Fehler erkannt und (mit einer später geschilderten Ausnahme) abgeschaltet. Die Auswertung der vom Schutzrelais gemessenen Fehlerimpedanzwerte zeigte, dass diese Messwerte mit einer Abweichung von weniger als 10% mit den theoretischen Werten übereinstimmen. Der Ausdruck der schutzgeräteinternen Störschreibung erlaubt auch einen Überblick über das Verhalten des Schutzgerätes während des Fehlers.

Bild 4 zeigt das Störschreibeprotokoll des Schutzgerätes im Leitungsabgang Rotstock in der Anlage Eigerwand während eines Kurzschlussversuches auf dem Leitungsabschnitt Eigerwand–Rotstock. Deutlich zu erkennen ist der Fehlerstrom in den beiden fehlerbehafteten Phasen mit einem Effektivwert von ungefähr 4,13 kA, der während rund 100 ms geflossen ist. Ebenfalls zu erkennen sind der Spannungszusammenbruch in diesen beiden Phasen und die intern generierten Statusmeldungen.

Bild 5 zeigt die ermittelten Strom- und Spannungswerte während des Fehlers und die berechnete Fehlerimpedanz. Die zugehörige Auslösecharakteristik des Schutzgerätes zeigt Bild 6: Liegt ein ermittelter Fehlerimpedanzwert R/X innerhalb eines definierten Zn-Polygons, erfolgt die Auslösung mit der entsprechend zugeordneten Auslösezeitstufe t_n (Parameterwahl: $t_1=0,01$ s, $t_2=0,40$ s, $t_3=0,80$ s). Fest ausgezogen sind die Basispolygone. Diese können erweitert werden durch den Einbezug des zu erwartenden Fehler- bzw. Lichtbogenwiderstandes. Dieser Fehlerwiderstand wirkt sich im wesentlichen auf den gemessenen Widerstandswert aus, entsprechend findet die Erweiterung der Auslösepolygone in R-Richtung statt und ist punktiert im Diagramm dargestellt für die verschiedenen Stufen.

In einem Fall wurde der Kurzschluss nicht durch die Distanzschutzgeräte der Fahrleitung abgeschaltet, sondern einerseits durch die vorgelagerten Mittelspannungsschutzgeräte der Trafos und andererseits durch die Schutzgeräte der benachbarten Leitungsabschnitte. Die

Ursache dafür lag im Zusammenbrechen der Hilfsspannungsversorgung der Schutzgeräte. Dieser Zusammenbruch wurde verursacht durch die parallel zum Trassee der Bahn an der Tunnelwand verlegten Speisekabel der Zugfunkanlagen im Jungfraubahntunnel. Dieses Kabel war mit Überspannungsableitern geschützt. Der Kurzschluss führte zum Ansprechen dieser Ableiter und damit zu einem Kurzschluss auf der Hilfsspannungsverteilung. Die Speisung der Zugfunkanlagen wurde mittlerweile angepasst.

Die Kurzschlussversuche haben somit nicht nur den Zweck der Verifikation der Selektivität der installierten Distanzschutzgeräte unter Ernstfallbedingungen gedient, sondern haben auch einzelne Schwachpunkte im Gesamtsystemverhalten im Fehlerfall offengelegt.

Zusammenfassung

An den selektiven Fahrleitungsschutz der Jungfraubahn werden aufgrund der hohen Laststrommaxima, die ähnlich hoch liegen wie die minimalen Fehlerströme, anspruchsvolle Anforderungen gestellt. Diese Anforderungen lassen sich durch den Einsatz von modernen, numerischen Distanzschutzgeräten in Kombination mit einer anwendungskonformen Parametrierung dieser Geräte erfüllen.

Mit Kurzschlussversuchen im Netz wurde einerseits das selektive Verhalten der Schutzgeräte und andererseits das Gesamtsystemverhalten im Fehlerfall überprüft. Das realisierte Schutzkonzept und die eingesetzten Geräte haben sich im Alltagsbetrieb bei den Jungfraubahnen mittlerweile seit über einem Jahr bewährt.

Protection de distance dans des conditions de réseau difficiles

La protection dans le réseau de traction 1125 V du chemin de fer de la Jungfrau

Ces deux dernières années, la protection des caténaires des chemins de fer de la Jungfrau a été remaniée selon une nouvelle conception puis réalisée en conséquence et mise en service. La constellation spéciale du réseau (triphasé avec deux lignes de contact pour les phases L1 et L3 et la phase L2 reliée à la voie) ainsi que les propriétés des véhicules moteurs utilisés font que les courants de service peuvent atteindre des valeurs presque aussi élevées que les courants de défaut (figures 1 et 2). Cela pose des exigences élevées à la protection du réseau que des appareils de protection numériques peuvent remplir grâce à leur flexibilité (figure 3).

L'étude de la protection décrite dans l'article a exigé des clarifications et examens spéciaux. Il a fallu en particulier mesurer les paramètres déterminants des caténaires, nécessaires au paramétrage des appareils de protection. Un critère aggravant ici était le fait que l'une des trois phases est reliée à la voie faisant office de conducteur en contact avec le sol, cela ne permettant pas une détermination directe et standard des valeurs d'impédance directe et homopolaire. C'est pourquoi on a déterminé sur tous les tronçons alimentés en courant triphasé tout en mesurant simultanément les courants et angles de phase, les caractéristiques des boucles conductrices caténaire-caténaire et caténaire-voie. Une fois la nouvelle protection mise en service, on a contrôlé le comportement sélectif des appareils de protection et de l'ensemble du système en cas de défaut sur tous les tronçons de caténaires à l'aide d'essais de court-circuit (figures 4–6).



**Beispielhaft für
sichere Lösungen**



Viele Fragen — eine Antwort: Ebo-Polyester-Kabelleitern



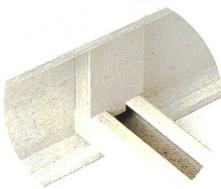
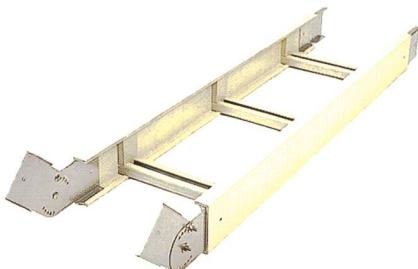
SGS
ISO 9001 / EN 29001
Reg. Nummer 10615-01

Warum Erdungsprobleme auf sich nehmen? Ebo-Polyester-Kabelleitern sind voll isoliert.

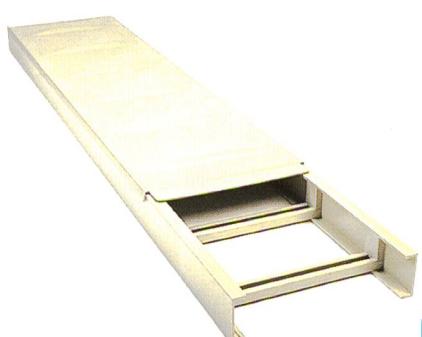
Warum viele Ausleger montieren? Ebo-Polyester-Kabelleitern können bis 5 m freitragend montiert werden.



Warum Verbindungslaschen schrauben? Bei Ebo-Polyester-Kabelleitern wird mit schraubenlosen Verbindungen die Arbeit erleichtert.



Warum Kabelleitern-Abdeckungen individuell anfertigen? Im grossen Ebo-Sortiment sind auch die passenden Deckel vorhanden.



Warum vorgegebene Sprossenabstände kompromisslos akzeptieren? Bei Ebo-Kabelleitern können die Sprossen problemlos jedem Objekt angepasst werden.

Was wünschen Sie sich noch mehr? Entscheiden auch Sie sich für mehr Sicherheit, lange Lebenserwartung und hervorragendste Qualität.



Ebo AG
Zürichstrasse 103
CH-8134 Adliswil

Tel. 01/487 22 11
Fax 01/487 22 99