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: 73 (1982)

Heft: 13

Artikel: Der Kurzschluss- und Erdschlussschutz des 20-kV-Netzes

Autor: Egli, E.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-904984

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: 10.12.2025

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

Der Kurzschluss- und Erdschlußschutz des 20-kV-Netzes

E. Egli

621.3.064.1:621.316.99;

Nach Zusammenstellung allgemeiner und im Pflichtenheft verlangter Anforderungen an die Schutzeinrichtungen werden für je einen typischen Kurzschluss- und Erdschlussfall auf einer Leitung die Strom- und Spannungsverhältnisse an den Relaiseingängen dargestellt und die Grundsätze der elektronischen Richtungsbestimmung erläutert. Der Reserveschutzplan führt an die Grenzen der Zeitstaffelsysteme, hingegen erlaubt die Drahtkupplung, alle Leitungs- und Sammelschienenfehler mit 0,1 s Kommandozeit abzuschalten. Die Funktionstüchtigkeit wurde in Kurzschluss- und Erdschlussversuchen nachgewiesen.

Après un exposé des exigences génerales et des prescriptions du cahier des charges sur les équipements de protection, le principe de la détermination de la direction d'un défaut, au moyen de l'électronique, est expliqué. Pour un cas typique de court-circuit et de défaut à la terre, la tension et le courant, aux entrées du relais, sont représentés par un graphique. La protection directionelle, avec couplage de signaux de blocage, permet d'éliminer sélectivement, dans un temps rapide de 0,1 s, les défauts sur les lignes et les jeux de barres. Ce système garantit également une protection de réserve directionnelle, dont les limites sont mises en évidence par un plan d'échelonnement. Des essais ont montré la fiabilité de ce système.

1. Aufgabe der Schutzeinrichtungen

Jede elektrische Installation weist eine gewisse Störanfälligkeit auf. Ursachen können sein: Alterung; Material-, Herstellungs- oder Montagefehler; Umwelteinflüsse wie mechanische Beschädigungen oder Verstaubung. In Tunnelanlagen sind ohne gezielte Gegenmassnahmen besonders hohe Feuchtigkeit, extreme Temperaturen durch Bergwärme und Lüftung sowie Verschmutzung durch Abgase zu befürchten. Durch alle diese Einflüsse können Isolationsfehler auftreten, welche zu einem einpoligen Erdschluss oder zu einem zwei- oder dreipoligen Kurzschluss führen.

Kurzschluss- und Erdschluss-Schutzeinrichtungen haben die Aufgabe, *nach Eintreten* eines Isolationsfehlers genau den oder die der Fehlerstelle am nächsten liegenden Schalter, welche Fehlerstrom führen, zum Ausschalten zu veranlassen. Dies wird als Selektivschutz bezeichnet (Fig. 1). Weiter entfernte Schalter dürfen nur bei Versagen des Hauptschutzes oder eines diesem zugeordneten Schalters ausgelöst werden (Reserveschutz, Fig. 4).

Der hohen Bedeutung entsprechend, welche der Zuverlässigkeit der elektrischen Energieversorgung für Sicherheit und Komfort des Tunnelbetriebes zukommt, schrieb das Pflichtenheft für die Schutzeinrichtungen des Gotthardtunnels u. a. vor:

«Für das 20-kV-Netz der Stromversorgungsanlage im Tunnel ist ein selektiver Richtungsschutz für mehrpolige Kurzschlüsse wie für einpolige Erdschlüsse vorzusehen. Leitungen und Apparate sind gegen Überlast zu schützen.

Das 20-kV-Tunnelnetz ist in der Regel an der Kantonsgrenze aufgetrennt. Bei Störungen in den Leitungen zwischen den Lüftungszentralen resp. bei Stromausfall in einer der 50-kV-Stationen kann jedoch ein beliebiger Schaltzustand herrschen. Der Anlageschutz ist so auszulegen, dass das gesamte 20-kV-Netz in jedem beliebigen Schaltzustand einwandfrei gesichert ist. Der Erdschlußschutz hat sämtliche Anlagen und Apparate, die mit dem 20-kV-Netz galvanisch verbunden sind, zu erfassen. Der vorgesehene Schutz nach dem Richtungsvergleichsprinzip soll auch zum Schutz der Stationen (Sammelschienenschutz) angewendet werden. Dabei herrscht die Vorstellung, dass die gleichen Anrege- und Richtungsrelais zu verwenden sind.

Die Schutzrelaisausrüstung hat auch die Aufgabe des Reserveschutzes zu übernehmen. Dies soll in der Wahl von verschiedenen Zeitstufen erfolgen.

Für das Schutzsystem sind Drahtkupplungen unumgänglich. Die verschiedenen Sperr- und Freigabesignale der Schutzanlage sind so zu disponieren, dass möglichst wenig Aderpaare benötigt werden.»

Für die Schutztechniker bot sich bei dieser Anlage eine willkommene Gelegenheit, beim Aufbau eines ganzen Netzes von Anfang an dabei zu sein und gewisse längst gehegte Ideen in zeitgemässer Form zu verwirklichen.

2. Messprinzip der Kurzschluss- und Erdschluss-Richtungsrelais

2.1 Eingangsgrössen der Relais

Figur 2a zeigt das Ersatzschaltbild eines kleinen Netzausschnittes. Station A sei die Speisestation, B eine erste Zwischenstation; für diese sind die Strom- und Spannungswandler und die Eingangsstromkreise der Kurzschluss- und Erdschlussrelais eingezeichnet. In den Figuren 2b, c, d sind die Strom-, Spannungs- und Phasenbeziehungen gezeigt für den Fehlerfall F_1 (Kurzschluss mit Fehlerwiderstand R_F zwischen den Phasen S und T am Ausgang der Station B). Die Figuren 2e, f, g stellen die Beziehungen für den Fehler F_2 dar (Erdschluss der Phase R auf der von B abgehenden Leitung). Die Figuren 2b und 2e enthalten die symmetrischen Spannungen für ungestörtes Netz, die Figuren 2c und 2f die für die beiden Fehlerfälle typischen

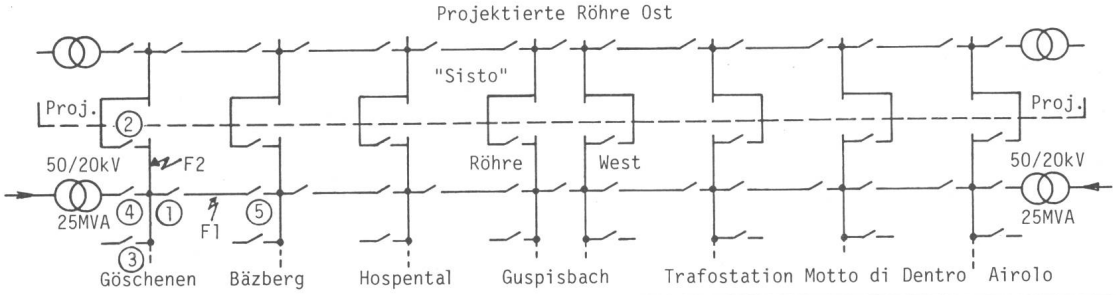

Fig. 1 Prinzipschema des 20-kV-Netzes

Das Schutzsystem ist für den Vollausbau mit zwei Tunnelröhren geplant. Der Abgang Sicherheitsstollen «Sisto» in Guspisbach Nord wurde für die Kurzschluss- und Erdschlussversuche (Abschnitt 5) benützt.

Selektivschutz: Ein Kurzschluss in F_1 darf nur durch die Schalter ① und ⑤ abgeschaltet werden. Ein Sammelschienenfehler in F_2 darf nur durch den Schalter ④ und je nach Schaltzustand, ①, ② und ③ abgeschaltet werden.

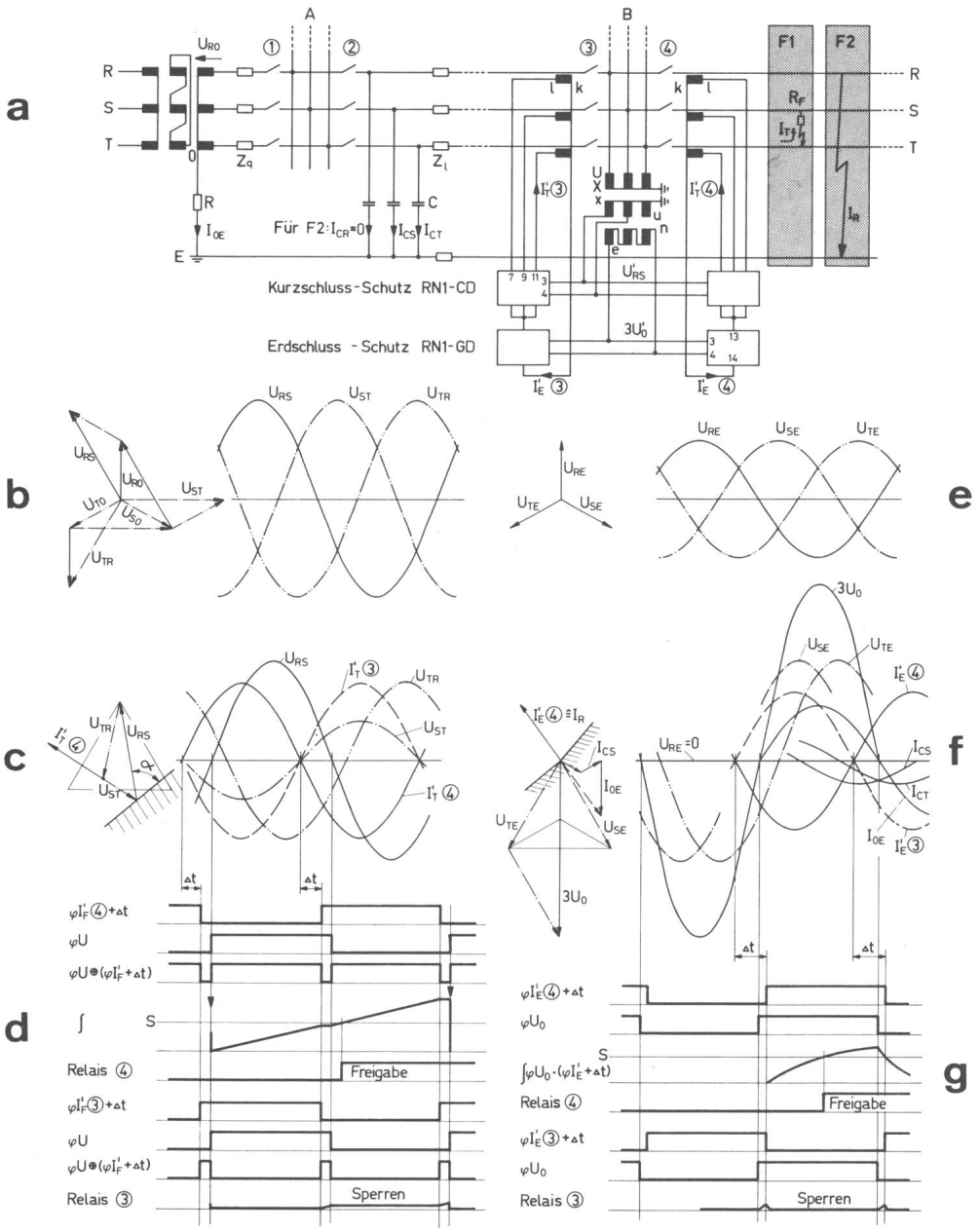

Fig. 2 Messprinzip des Schutzes

2a Ersatzschaltbild eines Anlageausschnittes Speisetransformator 50/20 kV
①, ② Eingangs- bzw. Ausgangsschalter der Schaltstation A
③, ④ Eingangs- bzw. Ausgangsschalter der Schaltstation B
mit eingezeichneten Strom- und Spannungswandlern sowie den Schutzrelais

Beispiel für Fehlersituation
F_1: *Kurzschluss zwischen Phasen* $S+T$ mit Lichtbogenwiderstand R_F, Leitungsimpedanz Z_1, Quellenimpedanz Z_q
Treibende Spannung $\underline{U}_{ST} = \underline{U}_{S0} - \underline{U}_{T0}$
Von den Überstromrelais RN1-CD ausgewerteter Strom: I_T; ausgewertete Spannung: U_{RS}

2b Ungestörte, verkettete Spannungen

2c Strom und Spannungen in Station B bei Fehler F_1
α: vom Relais RN1-CD für diesen Fehlerfall gewählter Arbeitswinkel, ergibt die Zeit Δt der Fig. 2d.
Schraffierte Fläche: Sperrbereich der Relais RN1-CD

2d In den Relais RN1-CD benutzte Phasensignale Erläuterungen in Abschnitt 2.3
S: Schaltpegel des zum Integrator S gehörenden Komparators
↓: Null-Setzen des Integrators

Beispiel für Fehlersituation
F_2: *Erdschluss der Phase R* ($Z_q + Z_1 \ll R$ bzw. $1/\omega C$)
mit Erdschlußstrom $\underline{I}_E = -(\underline{I}_{0E} + \underline{I}_{CS} + \underline{I}_{CT})$
vom Relais ausgewertete Spannung $3\,\underline{U}_0 = \underline{U}_{RE} + \underline{U}_{SE} + \underline{U}_{TE}$
vom Relais ausgewerteter Strom $3\,\underline{I}_0 = \underline{I}_E = \underline{I}_R + \underline{I}_S + \underline{I}_T$
(Im Normalbetrieb oder bei Fehlern ohne Erdberührung und Netz mit nur einem Erdungspunkt ist stets $\underline{I}_R + \underline{I}_S + \underline{I}_T = 0$; U_0 klein)

2e Ungestörte Phasenspannungen gegen Erde

2f Ströme nnd Spannungen in Station B bei Fehler F_2:
$\underline{U}_{TE} = \underline{U}_{T0} - \underline{U}_{R0}$; $\underline{I}_{CT} = \underline{U}_{TE} \cdot j\omega C$; $\underline{I}_{0E} \approx -\underline{U}_{R0}/R$

2g In den Relais RN1-GD benutzte Phasensignale Erläuterungen in Abschnitt 2.2.

Zeiger- und Linienbilder für die Station B, mit den Bezugssinnen nach Figur 2a. Die Eingangsgrössen für die Relais ④, Auslöserichtung, sind ausgezogen gezeichnet, der Strom für die Relais ③, Sperrichtung, gestrichelt.

Im *Kurzschlussfall* wird der Strom I_T der Phase T betrachtet, da er im Meßsystem des RN1-CD bevorzugt behandelt wird. Es ist zu beachten, dass dieser Kurzschlußstrom I_T gross ist gegenüber den normalen Lastströmen und sehr gross gegenüber dem Erdschlußstrom I_E, da $(Z_q + Z_1) \ll R$ bzw. $1/\omega C$ ist. Der Kurzschlußstrom kann darum von der Fehlerstelle bis zur Quelle im wesentlichen unverändert (gelegentlich auf parallele Leitungen aufgeteilt) verfolgt werden. Das Bild der Spannungen hingegen ändert bedeutend: In der Quelle (dem Transformator) werden die induzierten Spannungen nur unwesentlich verändert, während an der Fehlerstelle das Spannungsdreieck im allgemeinen bedeutend verformt ist. Im Fall eines Kurzschlusses R–S ohne Widerstand R_F kann die Eingangsspannung U_{RS} des Relais ④ sehr klein werden.

Im *Erdschlussfall* wird für die oben angegebenen Impedanzverhältnisse das gleichseitige Dreieck der verketteten Spannungen kaum gestört, hingegen wird dessen Mittelpunkt um den negativen Vektor der erdgeschlossenen Phasenspannung verschoben. Daraus resultieren für das ganze galvanisch zusammenhängende Netz die Spannungsverhältnisse nach Figur 2f.

Die Spannung U_{R0} treibt einen Strom I_{0E} durch den Sternpunktwiderstand R, die Spannungen U_{SE} bzw. U_{TE} je einen kapazitiven Strom durch die Leitungskapazitäten. In Figur 2f ist die Zusammensetzung dieser drei Ströme zum Meßstrom I_E ③ bzw. ④ gezeigt. An den Meßstellen ① und ② (Fall der Lüftungszentrale Göschenen beim gegenwärtigen Ausbauzustand) ist praktisch kein kapazitiver Strom vorhanden; die Funktion des Meßprinzips ist jedoch sichergestellt durch den Sternpunktwiderstand R.

Diese auf den ersten Blick verwirrenden Verhältnisse können analytisch mit der Theorie der symmetrischen Komponenten elegant behandelt werden, woraus sich auch die angegebene Wandlerschaltung herleitet. Damit ergeben sich unabhängig davon, welche Phase Erdschluss aufweist, stets Relaiseingangsgrössen in der Art der ausgezogenen Spannung $3 \cdot U_0$ und des ausgezogenen Stromes I_E' ④ für Auslöserichtung bzw. des gestrichelten Stromes I_E' ③ für Sperrichtung.

Die weitere Verarbeitung dieser Eingangsgrössen soll anhand der Figuren 2d und 2g und der Blockschemata Figur 3 gezeigt werden.

2.2 Das Erdschluss-Richtungsrelais

In der Funktionseinheit GD (Fig. 3) werden die Amplituden von U_0 und I_E in einer Komparatorkombination nach der angedeuteten Charakteristik bewertet: Liegt der Arbeitspunkt im 1. Quadranten rechts und oberhalb der dicken Linie, geht ein logisches «1»-Signal an das Und-Tor. Vom Phasenkomparator φ muss im Relais ④ für Freigabe ebenfalls eine «1» geliefert werden. Diese wird nach Figur 2g gebildet: Mit einem Nulldurchgang-Komparator wird aus der Spannung $3 \cdot U_0$ die Rechteckspannung φU_0 gebildet. Analog entsteht aus I_E' ④ eine Rechteckspannung, jedoch wird diese um die feste Zeit Δt verzögert verwendet. (Δt ist massgebend für die Art der Charakteristik: 0^0, 45^0, 90^0.) Die beiden Rechteckspannungen führen auf ein Und-Tor, welches für die Zeit, während der beide «1» betragen, einen näherungsweisen Integrator speist. Ist die Koinzidenzzeit lang genug, wird der Schaltpegel S erreicht und ein Freigabesignal durchgeschaltet: «1» am Ausgang des Und-Tores.

Liegen die Eingangsgrössen im Sperrbereich wie für Relais ③, kommt $\varphi I_E'$ ③ mit φU_0 nur ganz kurze Zeit zur Überlappung; S wird nicht erreicht, das Relais bleibt gesperrt.

Das Ausgangssignal «1» des erwähnten Und-Tores wird zur Steuerung des Ausgangsrelais A, des Zeitkreises t_{CE} und der Hilfslogik H_2 verwendet. Diese Funktionen werden später erläutert.

2.3 Das Überstrom-Richtungsrelais

Die Funktionseinheit CD enthält für jeden der drei Phasenströme einen Amplitudenkomparator I_{CE}, welcher bei Überschreiten des Einstellwertes I_{CE} ein logisches Signal «1» abgibt. Aus diesen Informationen identifiziert der Phasenkomparator φ den vorliegenden Fehlerfall und wählt den für die Richtungsbestimmung aussichtsreichsten Strom und den bezüglich Toleranzen günstigsten Verzögerungswinkel α nach Figur 2c aus, im vorliegenden Beispiel I_T und $\alpha = 60^0$.

Im Gegensatz zum Erdschluss-Richtungsrelais, welches erst im Fehlerfall markante Spannung U_0 erhält, gibt es beim Kurzschlußschutz Fälle, in welchen die Referenzspannung U_{RS} sehr klein werden kann. Um trotzdem einen brauchbaren Richtungsentscheid zu ermöglichen, ist der Spannungseingang mit einem schwach gedämpften Aktivfilter ausgerüstet, welches so lange ausschwingt, bis ein Richtungsentscheid getroffen ist. Dieser Entscheid wird zur allfällig späteren Verwendung im «Richtungsspeicher» M für ca. 2 s gespeichert bzw. bei wiederkehrender Spannung nachgeführt. War vor dem Einschalten auf einen satten Kurzschluss keine Spannung vorhanden, wirkt das Relais als ungerichtetes Überstromrelais. Bei der Spannungsempfindlichkeit von $0{,}001 \times U_n$ genügen indessen bei den vorliegenden Kurzschlussverhältnissen wenige Meter Abstand vom Kurzschlussort, um einen einwandfreien Richtungsentscheid zu erhalten.

Aus Toleranzgründen wird der Richtungsentscheid hier mit wesentlich aufwendigeren Mitteln gebildet als beim Erdschlussrelais. Die wie erwähnt für das vorliegende Beispiel aus dem Strom I_T mit Δt entsprechend $\alpha = 60^0$ Phasenverschiebung gebildete Rechteckspannung $(\varphi I_F'$ ④ $+ \Delta t)$ wird mit der Rechteckspannung φU zusammen auf ein Exkl. Oder-Tor gegeben. Die Funktion $(\varphi I_F' + \Delta t)$ $(+)$ φU bedeutet, dass der Ausgang genau dann «1» beträgt, wenn einer, aber nur einer der Eingänge «1» hat. Diese Ausgangsspannung wird integriert, und zwar so, dass der Integrator bei jedem 2. Nulldurchgang von U_{RS} auf null gesetzt wird. Wird innerhalb dieser Zeit der Schaltpegel S erreicht, erfolgt Freigabe. Das Freigabesignal wird über den Richtungsspeicher M und weitere Torschaltungen und Stufenschalter auf die Ausgangsrelais d1 und d2 geschaltet und ausserdem in der Hilfslogik H2 weiterverarbeitet.

3. Zeitstaffelung, Reserveschutz

Die einfachste Weise, Selektivität zwischen in Serie geschalteten Schaltern zu erreichen, besteht darin, dass der dem Fehler am nächsten liegende Schalter auf die kürzeste Verzögerungszeit t_{CE} eingestellt wird und jeder weiter entfernt liegende um die «Staffelzeit» t von 0,15...0,2 s länger verzögert wird. Bei einem Kurzschluss starten alle Relais gleichzeitig ihre Zeitwerke; das schnellste löst seinen Schalter aus, die anderen kehren in die Ruhelage zurück.

Für den derzeitigen Ausbauzustand des Gotthardtunnels könnte mit Zeiteinstellungen nach Figur 4 einwandfreie Selektivität erreicht werden. Beispielsweise würde ein Fehler zwischen Hospental und Guspisbach in Hospental mit 1,0 s und, falls durchgeschaltet, in Guspisbach mit 0,6 s abgeschaltet. Ein Nachteil dieses Systems besteht in der Addition der Staffelzeiten in Richtung Speisung. Im vorliegenden Fall sind in Göschenen und Airolo maximal 0,8 s Abschaltzeit zulässig. Damit kann im Normalbetrieb (Kuppelschalter Guspisbach offen) ein genügender *Reserveschutz* nach den gestrichelten Linien in Figur 4 hergestellt werden. Bei anderen Schaltzuständen ist dagegen nur teilweise Selektivität vorhanden. Es wurde deshalb eine andere, nachfolgend beschriebene Lösung gewählt.

4. Das Signalkupplungssystem

Dank den von Anfang an eingeplanten Signalleitungen konnten weitere Kriterien beigezogen und damit das Schutzsystem mit geringem Aufwand vollselektiv gestaltet werden. Die erwähnte Verlängerung der Abschaltzeit gegen die Speisung hin kann vermieden werden, indem jedes Relais, das zum Ansprechen kommt, seinem speiseseitigen Nachbarn ein Sperrsignal zukommen lässt. Die einzigen Relais, welche bei einem Fehler kein Sperrsignal bekommen, sind dann die dem Fehler zunächst liegenden. Diese haben möglichst schnell auszulösen, im vorliegenden Fall mit $t_{SE} = 0{,}1$ s.

Die Arbeitsweise der Signalkupplungs-Einrichtung geht aus Figur 5 hervor. Die Signalkupplungsschleife für Sperrung des Relais ② vom Relais ③ her funktioniert z. B. wie folgt:

Das Relais ② speist mit seiner internen +15-V-Spannung eine Schleife, bestehend aus einem 10-kΩ-Widerstand, einer Signalader nach Relais ③, einem 10-kΩ-Widerstand über dem offenen Anregekontakt «Fehler Richtung Sammelschiene» und zurück über die zweite Signalader zum internen 0-Pol des Relais ②. Bei intakter Signalleitung bekommt der Doppelkomparator Richtung Leitung des Relais ② ungefähr 8 V (je nach Widerstand der Signalleitungen), das Signalkupplungssystem

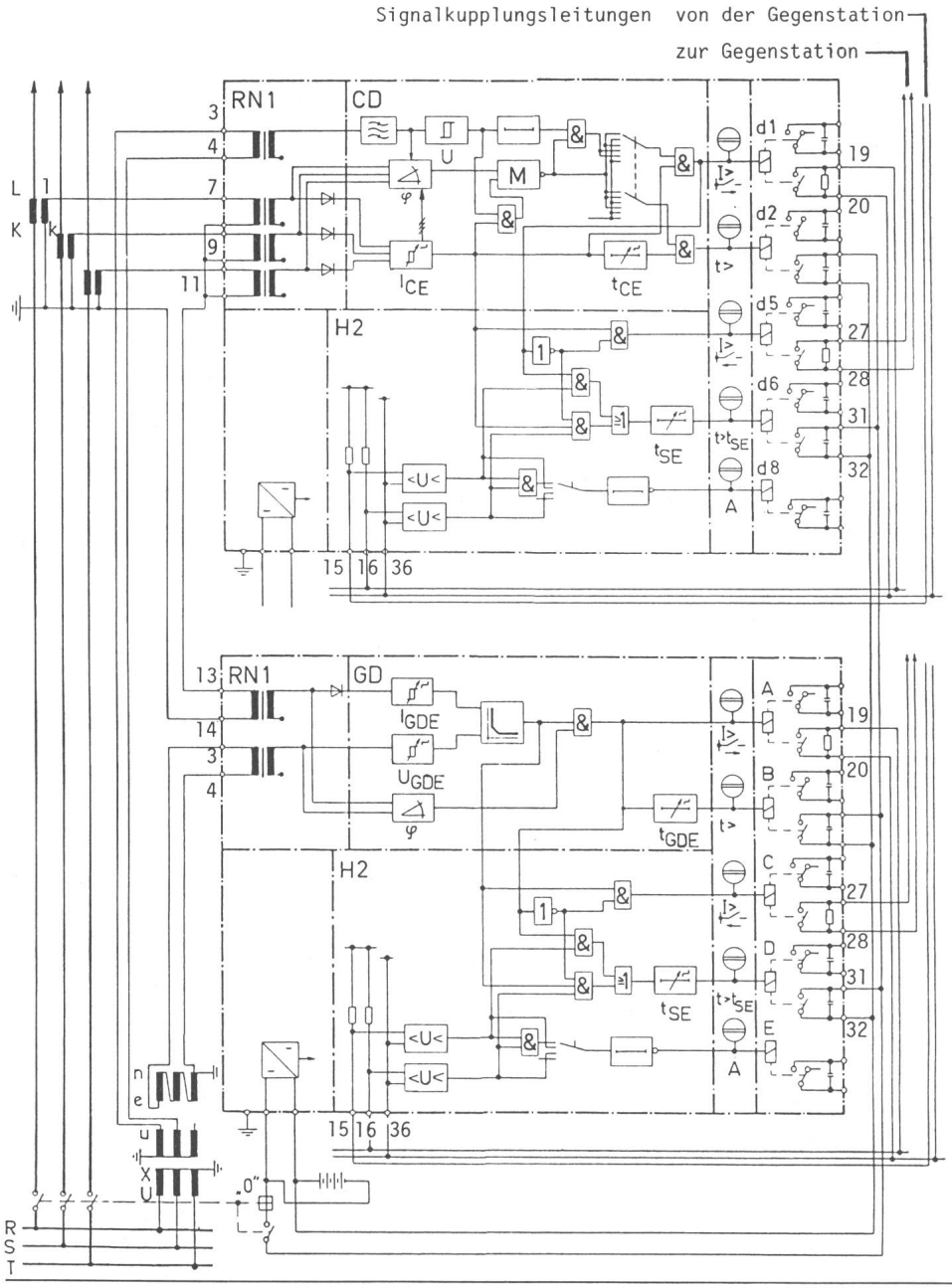

Fig. 3
Vereinfachte Block- und Anschlussschemata der Überstrom- und Erdschlussrelais mit Signalkupplung

CD Überstrom-Richtungs-Funktionseinheit
- U Referenzspannungsüberwachung
- φ Phasenkomparator
- I_{CE} Stromamplitudenkomparator, 3phasig
- t_{CE} richtungsabhängige Zeitauslösung, für Reserveschutz Richtung Leitung

H2 Drahtkupplungs-Hilfslogik
- $< U <$ Doppelkomparator, hat «1» am Ausgang, falls U zwischen 5 und 10 V beträgt
- t_{SE} Schnellauslösung, falls Überstrom vorhanden und aus der Fehlerrichtung kein Sperrsignal anstehend

GD Erdschluss-Richtungs-Funktionseinheit
- I_{GDE} Strom-Amplitudenkomparator, 1phasig
- U_{GDE} Spannungs-Amplitudenkomparator, 1phasig
- φ Phasenkomparator

gibt eine Auslösung Richtung Leitung frei. Bei einem Kurzschluss auf der Sammelschiene zwischen ③ und ④ tritt bei beidseitiger Speisung in den Relais ①, ②, ③ und ④ Überstrom auf, und zwar sehen die Relais ①, ③ und ④ den Fehler in Richtung Sammelschiene, Relais ② hingegen in Richtung Leitung. Relais ③ schliesst den erwähnten Anregekontakt «Fehler Richtung Sammelschiene», die Spannung am Doppelkomparator Richtung Leitung des Relais ② sinkt auf deutlich weniger als 5 V, die Schnellauslösung mit der Zeit $t_{SE} = 0{,}1$ s wird gesperrt. Analog arbeitet der Kontakt «Anregung bei Fehler Richtung Leitung» des Relais ②. Er schliesst die «Sperrschiene Kurzschluss» der oberen Anlage kurz, womit allen auf diese Sammelschiene einspeisenden Schaltern die Schnellauslösung gesperrt wird. Das Relais ① seinerseits sperrt in analoger Funktion das Relais am Anfang seiner Speiseleitung usw. – Genau entsprechend reagiert das Relais ④ für die Speiserichtung von unten. Relais ⑤ an einem Abgang, der nicht zurückspeisen kann, bleibt in Ruhe. Die einzigen Relais, welche *kein* Sperrsignal bekommen, sind die beiden dem Fehler unmittelbar benachbarten Relais ③ und ④; sie lösen mit Schnellzeit $t_{SE} = 0{,}1$ s aus.

Liegt der Kurzschluss im Abgang des Relais ⑤, so schliesst dieses die «Sperrschiene Kurzschluss» kurz, so dass die Relais ③ und ④ nicht auslösen. Entsprechend ist der Vorgang bei einem Fehler auf einer Leitung: Nur die beiden angrenzenden Relais bekommen kein Sperrsignal und lösen mit t_{SE} aus. Alle anderen sind bezüglich Schnellauslösung blockiert.

Die Funktionseinheit H2 für Signalkupplung und Sammelschienenschutz

Die Funktionseinheiten CD bzw. GD nach Figur 3 (Abschnitt 2.3 bzw. 2.2) «sehen» nur Fehler in Richtung Leitung. Für einen relativ schnellen Sammelschienenschutz wird auch ein Signal bei Fehler Richtung Sammelschiene benötigt. Dieses wird durch die Und-Funktion aus dem Amplitudensignal und dem invertierten Richtungssignal der Einheiten CD bzw. GD gebildet und geht auf das Ausgangsrelais d5 bzw. C. Deren Kontakte 19–20 bzw. 27–28 bilden die Sender für die erwähnten Sperrsignale. Die Signale der als Empfänger wirkenden Doppelkomparatoren werden über Und-Tore mit dem zugehörigen Anregesignal verknüpft, so dass eine Anregung das Schnellauslöseglied t_{SE} nur erreichen kann, wenn aus der zugehörigen Richtung ein Freigabesignal ansteht.

Die Signalleitungsüberwachung basiert auf folgendem Gedanken: Jedes Abschaltprozedere, für welches das vorliegende Schutzkonzept entwickelt wurde, ist nach spätestens 2 s beendet. Steht ein Sperrsignal länger als etwa 2,5 s an, liegt folglich eine Störung im Signalkupplungs- oder übrigen Schutzsystem vor: Das Alarmrelais d8 bzw. E zieht an.

Das in Figur 5 erläuterte Signalkupplungssystem hat die Nachteile, dass pro Schutzkanal 4 Signaladern erforderlich sind und dass die Spannungsfestigkeit der Relais d1 und d5 auf 2 kV/50 Hz begrenzt ist. Diese Nachteile werden bei Anwendung des Signalkupplungsgerätes RN1-S1 vermieden, welches dank für 4 kV isolierten Kontakten und Spannungsquellen mit 1 Aderpaar pro Schutzsystem und Leitung auskommt (Fig. 6).

Das Kernstück bildet die isolierte Speisung ① mit maximal 30 V/13 mA, welche die Signalleitungsschleife speist. Im Ruhezustand (kein Sperrsignal anstehend) sind die Kontakte ② offen, die Relais ③ sind angezogen, ihre Kontakte ebenfalls

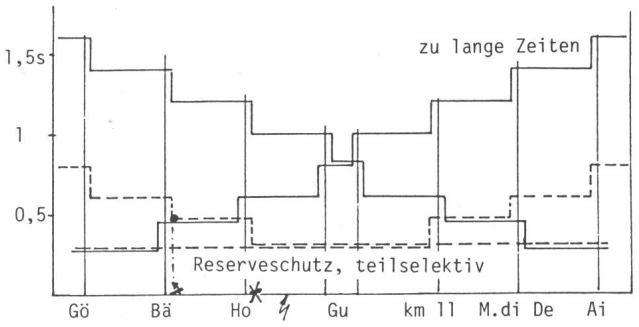

Fig. 4 Zeitstaffelung

Ausgezogene Linien: Für reine Zeitstaffelung durch den ganzen Tunnel benötigte Zeiteinstellungen t_{CE} bzw. t_{GDE}

Gestrichelte Linien: Plan der Reservezeiten t_{CE} bzw. t_{GDE}. Bei einem Fehler zwischen Hospental und Guspisbach und Versagen des Schalters in Hospental wird z. B. in Bäzberg nach 0,45 s ausgeschaltet

offen und die Signaleingänge der richtungsabhängigen Überstromrelais entsprechend dem zu Figur 5 Gesagten mit 10 kΩ abgeschlossen. Wenn z. B. das untere Richtungsrelais ein Sperrsignal mit seinem d5-Kontakt abgibt, bekommt der zugehörige Doppelkomparator des unteren Signalkupplungs-

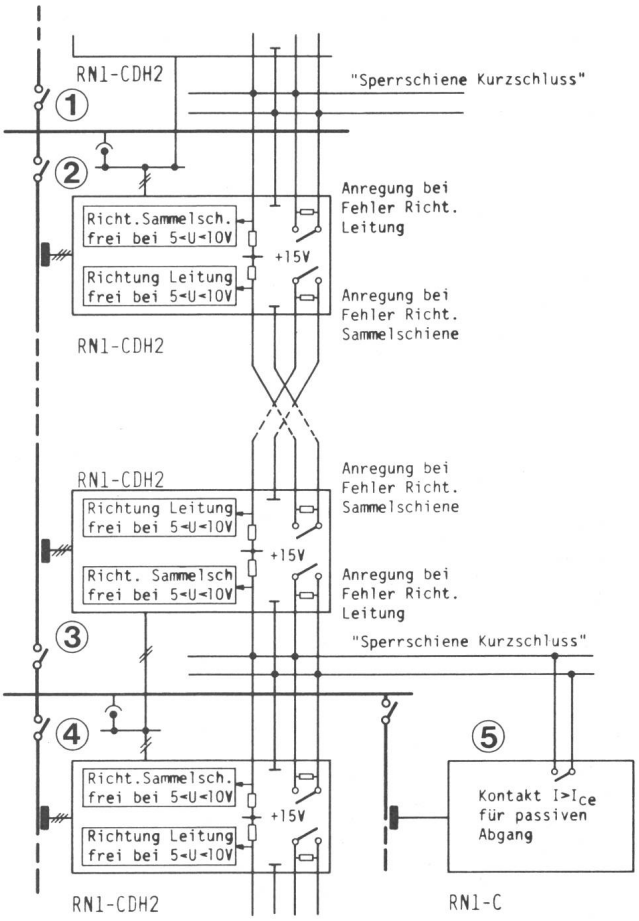

Fig. 5 Prinzip der Signalkupplung des 20-kV-Leitungs- und Sammelschienenschutzes

Richtung Leitung frei bei $5 < U < 10$ V bedeutet: Doppelkomparator, welcher die Schnellauslösestufe (z. B. mit Zeit $t_{SE} = 0{,}1$ s) freigibt, wenn die Eingangsspannung zwischen 5 und 10 V beträgt, hingegen die Schnellauslösung sperrt, wenn die Eingangsspannung ausserhalb des angegebenen Intervalls liegt

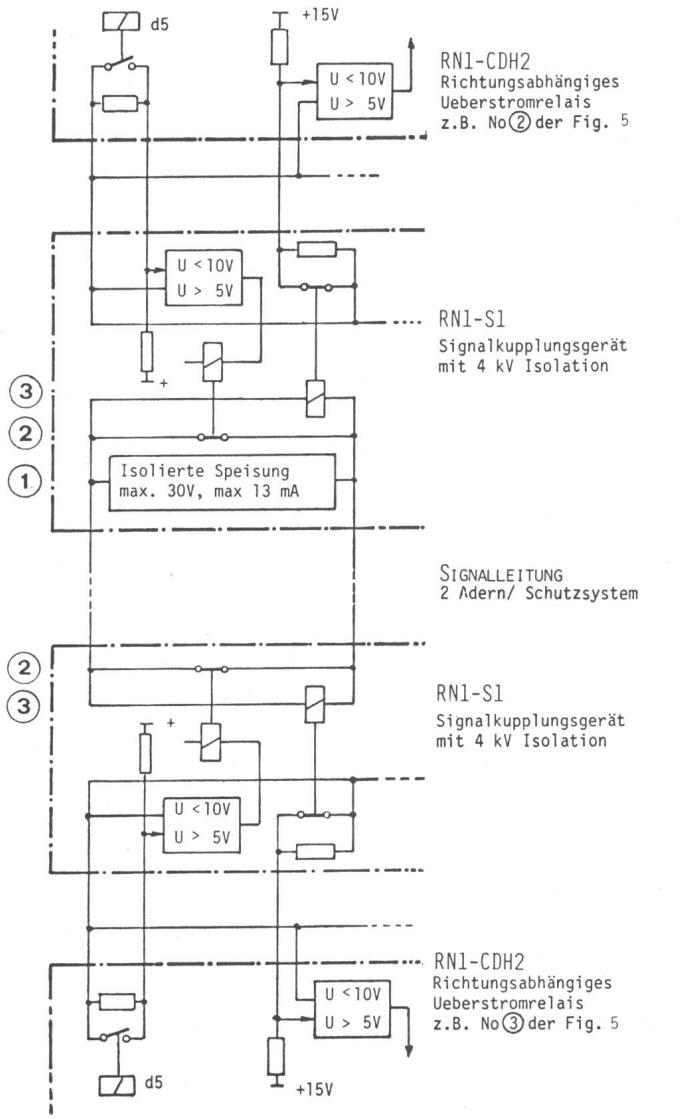

Fig. 6 Prinzip der Signalkupplung mit Gerät RN1-S1

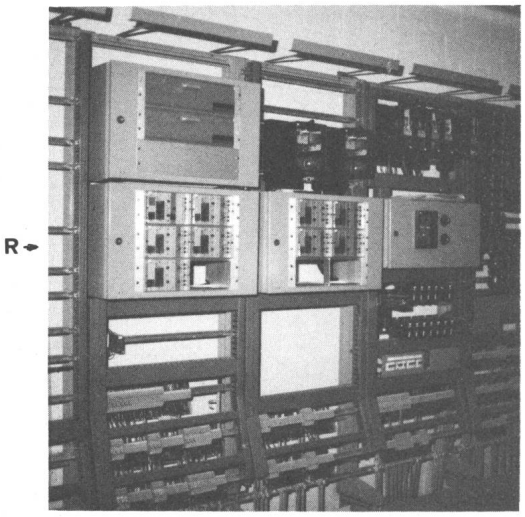

Fig. 7 Teilansicht des Relaisgestells der Lüftungszentrale Göschenen
R Statische Schutzrelais Typ RN1-...

gerätes Spannung null, sein Ausgangsrelais fällt ab, Kontakt ② schliesst die Signalleitungsschleife kurz, die beiden Relais ③ fallen ab, der Sperreingang des oberen Richtungsrelais erhält ebenfalls null usw. Dass auch das untere Richtungsrelais ein Sperrsignal bekommt, spielt wegen der Funktion der Und-Tore in den Sperreingängen keine Rolle. Alle wesentlichen Funktionen in diesem System werden von der Signalleitungsüberwachung der Richtungsrelais erfasst.

5. Kurzschluss- und Erdschlussversuche

Bei den Kurzschluss- und Erdschluss-Schutzsystemen besteht eine grundsätzliche Schwierigkeit bei der Erprobung: In einem sorgfältig aufgebauten und unterhaltenen Netz sind die Kurzschlüsse und Erdschlüsse so selten, dass es Jahrzehnte dauern kann, bis ein installiertes Relais erstmals seine korrekte Funktion unter Beweis stellen kann. Im Gotthardtunnel wurden darum möglichst alle Funktionen in Primärversuchen durchgeprüft. Im Fall des signalgekuppelten 20-kV-Leitungsschutzes waren dazu eigentliche Kurzschluss- und Erdschlussversuche nötig.

Für die *Kurzschlussversuche* wurde am Abgangsschalter «Sisto» in der Station Guspisbach Nord (Fig. 1) eine Strombegrenzungs-Drosselspule angeschlossen, mit welcher ein zweiphasiger Kurzschlußstrom von 800 A eingestellt werden konnte. Mit einem elektronischen Steuergerät wurde ein Oszillograph gestartet und der Schalter «Sisto» ein- und nach 1,2 s wieder ausgeschaltet. Alle Leitungsrelais von Göschenen bis Guspisbach kamen (mit herabgesetzten Einstellwerten) zum Ansprechen. Die Reaktionen wurden an den eingebauten Schauzeichen abgelesen und per Montagetelefon an die Versuchsleitung gemeldet. Durch Eingriffe in das Drahtkupplungssystem und die Relaiseinstellungen konnten verschiedene Störsituationen simuliert und die Relaisfunktionen geprüft werden.

Für die *Erdschlussversuche* wurde Phase *R* des Abgangs «Sisto» mit dem Erdsystem der Tunnelanlage satt verbunden. Die Steuerung und das Programm waren gleich wie bei den Kurzschlussversuchen. Es wurden zwei Serien Erdschlussversuche gefahren: einmal in Normalschaltung mit dem Sternpunkt über 100 Ω geerdet, das zweite Mal mit isoliertem Sternpunkt, wobei die 45°-Charakteristik der eingebauten Erdschluss-Richtungsrelais zum Zuge kam.

Die Versuche verliefen für alle Beteiligten, besonders das Betriebspersonal, recht instruktiv und erbrachten den Beweis des planmässigen Verhaltens der Schutzsysteme. Insbesondere funktionierte der Leitungs- und Sammelschienenschutz mit 0,1 s Kommandozeit einwandfrei selektiv. Im doppelröhrigen Seelisbergtunnel ist das gleiche Schutzsystem installiert; es entspricht etwa dem für den Vollausbau des Gotthardtunnels geplanten. Dort wurde in analogen Versuchen die Funktionssicherheit mit Maschennetzbetrieb und der im 6-kV-Bereich angewendeten Staffelzeit von 0,15 s nachgewiesen.

6. Schlussbemerkung

Zwei Jahre nach Eröffnung des Gotthardtunnels darf mit Befriedigung zur Kenntnis genommen werden, dass der Schutz im 20-kV-Netz richtig arbeitet. Zwei bis heute aufgetretene Fehler, Erdschlüsse, wurden einwandfrei selektiv abgeschaltet.

Adresse des Autors
Ernst Egli, Ingenieur HTL, Mittelspannungsanlagen, Sprecher+Schuh AG, 5034 Suhr.