Beeinflussug der Schwachstromanlagen

Autor(en): **Lüthi, P.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **73 (1982)**

Heft 13

PDF erstellt am: **28.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-904980

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Beeinflussung der Schwachstromanlagen

P. Lüthi

621.316.95:621.382;

Die konzentrierte Anordnung von Fernmelde-, Steuer-, Fernwirk- und Starkstromanlagen stellt besondere Probleme der elektromagnetischen Verträglichkeit. Es wird über die für die Schwachstromanlagen getroffenen Massnahmen und die abschliessenden Beeinflussungsmessungen berichtet.

La disposition concentrée d'installations de télécommunication, commande, téléaction et d'installations à courant fort pose des problèmes de compatibilité électromagnétique. Description des dispositions prises pour les installations à courant faible et des mesures finales des influences.

1. Allgemeines

Im Gotthard-Strassentunnel wurden die verschiedensten elektrischen Anlagen auf engstem Raume installiert. Fernwirk-, Steuer- und verschiedene Telefonkabelanlagen verlaufen über eine Länge von 17 km parallel mit Starkstromanlagen. Die Tunnel-Portalbauwerke liegen im Hochspannungsbereich der Kraftwerke und 220-kV-Schaltstationen Lucendro und Göschenen. Im weiteren verläuft der Strassentunnel im Einflussbereich der Gotthardbahn. Der elektromagnetischen Verträglichkeit der installierten Schwachstromsysteme kommt deshalb grosse Bedeutung zu.

Auf der Starkstrom- wie auf der Schwachstromseite mussten Massnahmen getroffen werden, um die ohmschen und induktiven Einkopplungen in den Schwachstromanlagen auf tolerierbare Werte zu begrenzen. Anlässlich von Beeinflussungs- und Erdungsmessungen wurden die getroffenen Schutzmassnahmen überprüft [1; 2; 3].

Ziel dieses Aufsatzes ist es, aufzuzeigen, mit welchen elektromagnetischen Einwirkungen gerechnet werden musste, welche Gegenmassnahmen getroffen wurden und was für Resultate die abschliessenden Beeinflussungsmessungen zeigten.

2. Beeinflussung durch Bahnanlagen

Fernmeldeanlagen im Einflussbereich von Bahnen werden durch die Traktions- und Erdschlußströme der Bahnanlage beeinflusst. Die Folge davon sind induktive Einkopplungen von Längs- und Geräuschspannungen in Schwachstromanlagen, die zu Funktionsstörungen, Personengefährdungen und zur Zerstörung von Anlagen führen können. Verursacher der induktiven Kopplungen ist das magnetische Wechselfeld, hervorgerufen durch den über die Erde zur Stromquelle zurückfliessenden Strom (Fig. 1).

Für die Berechnung der auf die Schwachstromleitungen einwirkenden induzierten Längsspannung gilt folgende Beziehung:

$$E_i = \omega\, M\, I\, l\, r$$

Zu den einzelnen bestimmenden Faktoren kann folgendes gesagt werden:

– *Gegeninduktivität M:* Es handelt sich um die zwischen dem Kreis Fahrleitung/Erde und dem Erdkreis der Fernmeldeleitung auftretende Gegeninduktivität. Sie hängt ab vom gegenseitigen Abstand der beiden Leitungen, der Bodenleitfähigkeit und der Frequenz.

– *Strom I:* Es ist der höchste im Normalbetrieb auftretende Traktions- oder Erdkurzschlußstrom unter Berücksichtigung der Speiseverhältnisse und des projektierten Bahnausbaues einzusetzen.

– *Länge der beeinflussten Strecke l:* Die im Strassentunnel verlegten Schwachstromkabel liegen auf ihrer ganzen Länge (16,3 km) im Einflussbereich der Bahnanlagen. Im Nordabschnitt überkreuzt der Strassentunnel den Bahntunnel. Der mittlere Abstand zwischen den beiden Tunnels beträgt in diesem Abschnitt rund 240 m.

– *Gesamtreduktionsfaktor r:* Dieser Faktor berücksichtigt die spannungsreduzierende Wirkung geerdeter, metallener Leiter und ist das Produkt mehrerer Einzelreduktionsfaktoren, die teilweise schwierig zu erfassen sind. Im vorliegenden Fall sind dies: der Kabelmantelreduktionsfaktor r_k, der Schienenreduktionsfaktor r_s sowie der Bebauungsfaktor r_b.

Die Fahrstromspeisung der Gotthardbahn erfolgt ab den Stationen Airolo und Göschenen. In der Tunnelmitte ist eine Schutzstrecke eingebaut, die im Störungsfalle überbrückt werden kann. Die heute auftretenden mittleren Traktionsströme betragen ca. 450 A. Spitzenwerte von 900 A sind aber keine Seltenheit. Dem Ausbau der Bahnanlage wurde Rechnung getragen, indem bei den Traktionsströmen ein geplanter Wert von 1,8 kA, beim Erdkurzschlußstrom ein solcher von 7,8 kA berücksichtigt wurden.

Die Berechnungsresultate ergaben, dass auf ungeschützten Schwachstromleitungen Längsspannungen in der Grössenordnung von 62 V (Langzeit) und 265 V (Kurzzeit) auftreten können. In welchem Ausmass diese Spannungen zu Störungen führen können, hängt u.a. vom Erdungskonzept der Schwachstromanlage und von der Symmetrie der an die Leitungen angeschlossenen Apparate ab. Verwendet wurden u.a. einseitig geerdete Anlagen, bei denen die volle Längsspannung am nicht geerdeten Ende der Übertragungsleitung auftritt.

Für einen Teil der vorgesehenen Schwachstromanlagen waren die zu erwartenden Beeinflussungsspannungen zu hoch. Insbesondere der Pegelabstand zwischen Nutz- und Störspannung hätte zu Betriebsstörungen geführt, weshalb mittels Spezialkabel mit kleinem Reduktionsfaktor die Einwirkspannungen gesenkt wurden.

Der Kabelmantelreduktionsfaktor ist für die verwendeten Kabelaufbauten und für die vorliegende Beeinflussungsart wie folgt definiert:

$$r_k = \frac{R_M}{R_M + j\omega\,(L_M + L_E)}$$

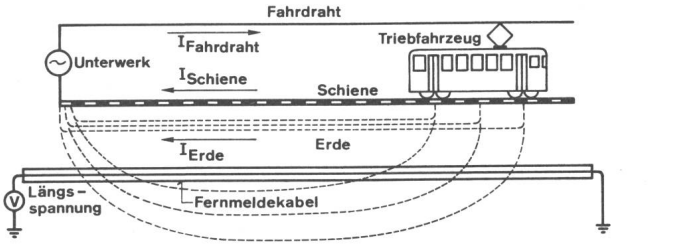

Fig. 1 Einkopplung von Längsspannungen durch Bahnanlagen

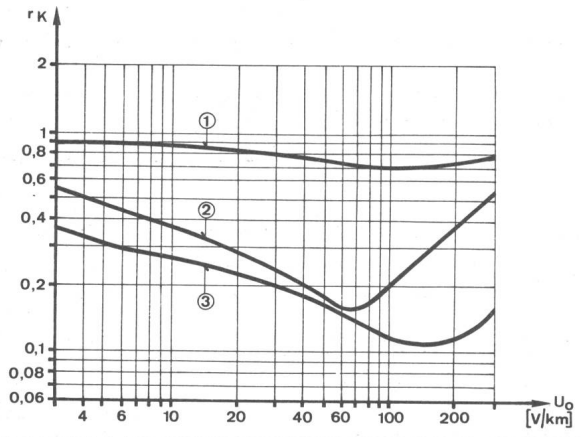

Fig. 2 Reduktionsfaktoren der Schwachstromkabel bei $16^2/_3$-Hz-Beeinflussung
(1) Tunnelinternes Telefonkabel
(2) Mittelwert der Fernwirkkabel
(3) PTT-12R-Koaxialkabel

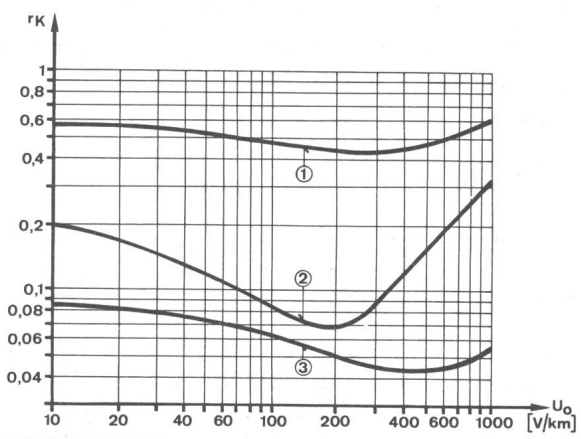

Fig. 4 Reduktionsfaktoren der Schwachstromkabel bei 50-Hz-Beeinflussung
(1) Tunnelinternes Telefonkabel
(2) Mittelwert der Fernwirkkabel
(3) PTT-12R-Koaxialkabel

Die Reduktionswirkung wird also um so günstiger, je kleiner der Längswiderstand (R_M) und je grösser die Induktivität (L_M) des metallenen Kabelmantels ist. Mit L_E wird die Induktivität des Erdkreises bezeichnet; normalisierter Wert: 2 mH/km. Die Induktivität (L_M) ändert entsprechend der Permeabilität des verwendeten Armierungsstahles. Figur 2 zeigt die ausgemessenen Reduktionsfaktorkurven der verwendeten Kabel für die Bahnbeeinflussung.

3. Beeinflussung durch die tunnelinterne Hochspannungsanlage

Analog der Beeinflussung durch Bahnanlagen werden die Schwachstromanlagen durch die Erdkurzschlußströme der parallel verlaufenden Hochspannungsanlagen beeinflusst. Bei der vorliegenden Anlage sind speziell die engen Kopplungsverhältnisse (Fig. 3) der Kabelanlagen und die Parallelführungslänge über 17 km zu beachten.

Die Starkstromversorgung des Strassentunnels erfolgt ab den Kraftwerken Göschenen und Lucendro. Die Stromversorgung im Tunnel übernehmen die Nord- und Südportalstationen mittels eines 20-kV-Systems, das in der Tunnelmitte aufgetrennt ist. In speziellen Betriebsfällen ist ein Parallelbetrieb oder die einseitige Speisung des gesamten Tunnels möglich.

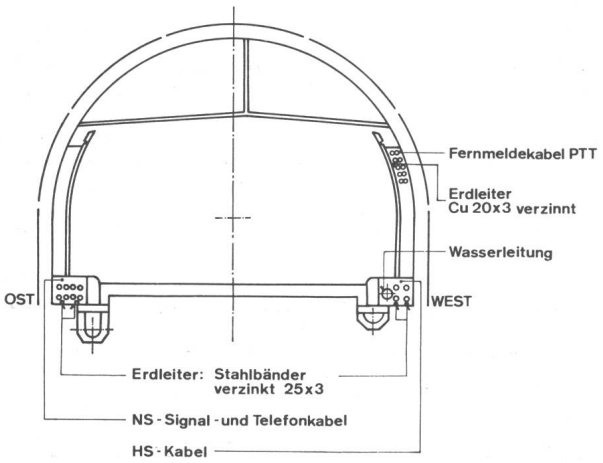

Fig. 3 Anordnung der Kabelanlagen und Erdbänder im Strassentunnel

Bei einpoligen Erdschlüssen (häufigste Störungsart) wird der Fehlerstrom durch die über Widerstände geführte Nullpunkterdung auf ein ungefährliches Mass begrenzt und zudem innerhalb von weniger als 1 s abgeschaltet. Die Wahrscheinlichkeit des gleichzeitigen Auftretens eines zweipoligen Erdschlusses wird als gering erachtet, kann aber nicht ausgeschlossen werden.

Der bezüglich Beeinflussung kritischste Fall tritt bei einem Doppelerdschluss im Parallelbetrieb auf. Die Ausschaltzeit beträgt 0,2 s, der Erdschlußstrom ca. 4,4 kA. Ohne spezielle Schutzmassnahmen würde die induktiv eingekoppelte Beeinflussungsspannung auf einer Länge von 17 km ca. 11,3 kV betragen.

Aufgrund umfassender Vorausberechnungen durch die Ingenieurunternehmung wurden u.a. auf der Starkstromseite die folgenden Massnahmen getroffen:

– Die Bewehrungen der Hochspannungskabel wurden zusätzlich mit geerdeten Kupferdrahtschirmen (25 bzw. 16 mm²) versehen.
– Die Druckwasserleitung im Tunnel wurde aus Metall mit elektrisch leitenden Verbindungsmuffen erstellt.
– Alle Erdleiter und Kabelmäntel der Schwach- und Starkstromanlagen wurden mindestens bei allen PTT-Nischen untereinander vermascht.

Dies hat zur Folge, dass ca. 90% des Fehlerstromes im Erdschlussfall leitergebunden zur Quelle zurückfliessen. Der im Abschnitt 2 erwähnte Reduktionsfaktor (Bebauungsfaktor r_b) trägt also wesentlich zur Verringerung der induzierten Längsspannung bei. Die für Schwachstromanlagen zulässige max. Längsspannung von 500 V_{eff} konnte durch die genannten Massnahmen allein aber nicht realisiert werden, weshalb die Schwachstromkabel zusätzlich mit Spezialarmierungen versehen wurden. Der im Erdschlussfall noch über die Armierungen der Schwachstromkabel fliessende Reststrom übt eine kompensierende Wirkung aus und vermindert die induzierte Längsspannung in den Adern. Figur 4 zeigt die Reduktionswirkung der Kabelarmierung für die 50-Hz-Beeinflussung.

4. Erdungskonzept

Bestimmend für das Erdungskonzept sind die unmittelbare Nähe der Bahn sowie die Kraftwerke Lucendro und Göschenen mit ihren relativ hohen Erdschlußströmen I_E. Damit die Be-

rührungsspannungen an und zwischen den einzelnen ineinandergreifenden Stark- und Schwachstromanlagen auf ungefährliche Werte beschränkt werden konnten, wurde das Prinzip der Vermaschung gewählt: Der Tunnel, die Portalbauwerke, Kraftwerke, Bahnen und die Dörfer Göschenen und Airolo mit ihren vielfältigen Installationen sind erdungsmässig miteinander vermascht und bilden einen Werkbereich.

Die erdungsmässige Integration der diesen Bereich durchquerenden bzw. im Bereich endigenden Schwachstromanlagen ist in der Schwachstromverordnung geregelt. Bleibt die Erdungsspannung des Werkbereiches kleiner als 500 V_{eff}, so steht der Vermaschung Starkstromerdung–Schwachstromerdung nichts im Wege. Übersteigt die Erdungsspannung U_E den Wert von 500 V, so müssen die Schwachstromanlagen im gefährdeten Gebiet speziell geschützt werden. Schutzmassnahmen konnten aus praktischen Gründen infolge der Grösse des Gebietes (ca. 1700 Teilnehmer) nicht in Betracht gezogen werden. Die Erdungsimpedanz der gesamten Erdungsanlage durfte deshalb im Maximum den Wert von $Z_E = U_E/I_E$ betragen, damit ein Zusammenschluss der Schwach- und der Starkstromerdungen und ein Verzicht auf Schutzmassnahmen möglich wurde. Um diesen Wert zu erreichen, wurden folgende Erder im Erdungskonzept miteinbezogen:

- Fundamentarmierungen
- Leitplanken
- Blitzschutzerdungen
- Alle leitfähigen Gebäudeteile (Druckwasserleitung)
- Alle metallischen Umhüllungen von Stark- und Schwachstromkabeln
- Erdbänder der Stark- und Schwachstromanlagen

Figur 5 zeigt das Erdungskonzept des nördlichen Tunnelabschnittes und die auftretenden Erdschlußströme. Die Verhältnisse auf der Tunnelsüdseite sind mit Ausnahme der Grösse des Erdschlußstromes des KW Lucendro gleichwertig.

5. Beeinflussungsmessungen

Ziel der Untersuchungen war, die im ungünstigsten Betriebsfall auftretenden Beeinflussungsspannungen zu erfassen und die getroffenen Massnahmen auf ihre Zweckmässigkeit zu überprüfen. Insbesondere mussten die Erdungsspannungen der Portalzonen sowie die in die Schwachstromkabel eingekoppelten Längsspannungen gemessen werden.

Die Erdungsmessungen erfolgten, unter Anwendung der Schwebungsmethode mit einer Frequenz von 49,5 Hz, nach der in [4] beschriebenen Art. Der Erdstrom wurde auf 100 A einreguliert, so dass ein genügender Störpegelabstand zu den vorhandenen, betriebsmässigen 50- und $16^2/_3$-Hz-Erdströmen und Spannungen resultierte. Im weitern wurde der Strom zur eindeutigen Identifizierung periodisch ein- und ausgeschaltet. Die Spannungsmessungen erfolgten infolge der erheblichen Bahnbeeinflussung frequenzselektiv. Die Messwerte wurden zur Bestimmung der Erdungsspannung linear auf den tatsächlichen Erd-Kurzschlußstrom umgerechnet. Bei den Längsspan-

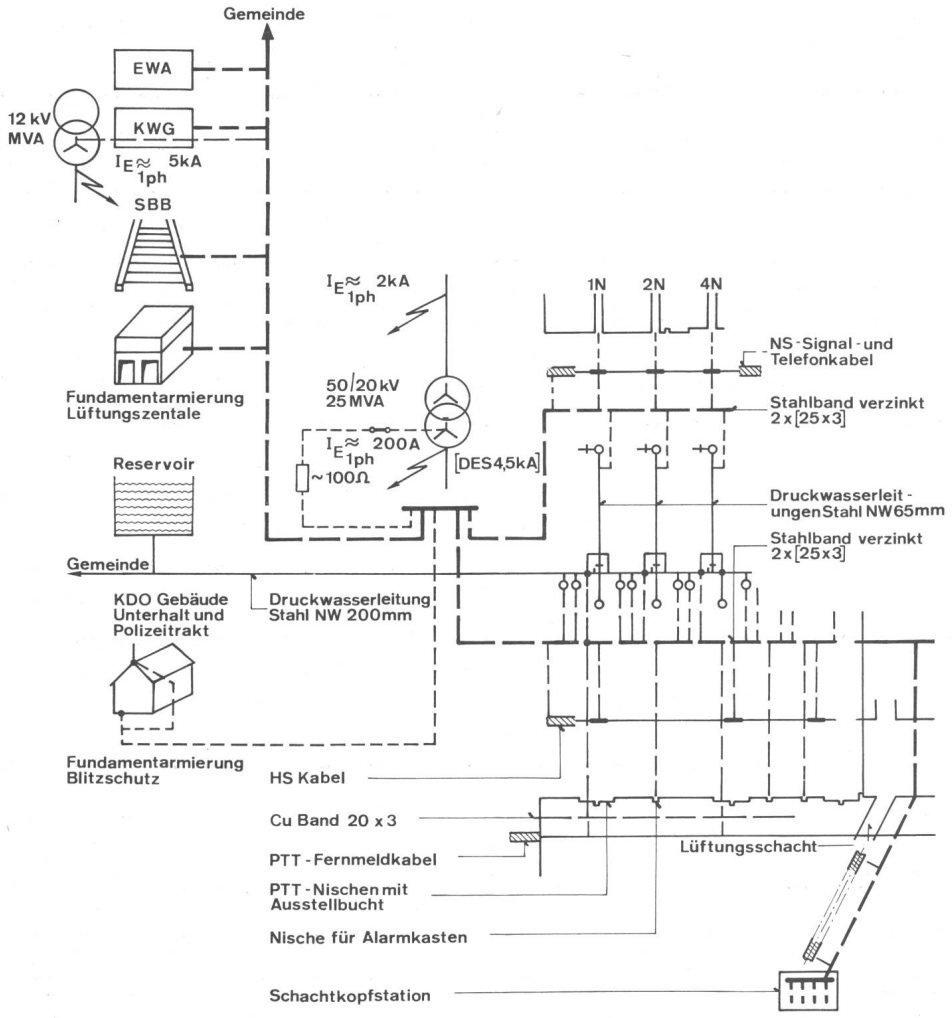

Fig. 5
Erdungskonzept der Tunnelinstallationen
EWA Elektrizitätswerk Altdorf
KWG Kraftwerke Göschenen

nungen musste zusätzlich der nichtlineare Kabelmantelreduktionsfaktor berücksichtigt werden. Gemessen wurden die folgenden Beeinflussungsgrössen:

a) Beeinflussungsspannung U_B: Diese kann über eine einseitig an Erde gelegte Kabelader gemessen werden. U_B gefährdet die tunnelinternen Schwachstromanlagen und setzt sich aus $U_B = U_I + U_E$ zusammen.

b) Längsspannung U_I: Diese induktiv eingekoppelte Spannung kann über Adern eines Transitkabels gemessen werden, vorausgesetzt, dass das Kabel im Hochspannungsbereich isoliert verlegt ist (Fig. 6).

c) Erdungsspannung U_E: Diese ohmsche Spannungskomponente wurde über eine im Hochspannungsbereich isoliert verlegte Messleitung bestimmt. Bei der Verlegung der Messleitung wurde darauf geachtet, dass die induktive Einkopplung vernachlässigt werden konnte. Die Erdungsspannung gefährdet Schwachstromanlagen, die aus dem Hochspannungs- in den neutralen Bereich führen. Die tunnelinternen Schwachstromanlagen werden entsprechend den Potentialdifferenzen zwischen den beiden Erdschlußstellen beansprucht (Fig. 7).

d) Geräuschspannung U_{PS}: Diese infolge der Erdungsunsymmetrie zwischen den einzelnen Adern auftretende Querspannung wurde mit einem Psophometer an entsprechend dem Verwendungszweck abgeschlossenen Aderpaaren gemessen.

6. Beeinflussungsspannungen $16^2/_3$ Hz

Tabelle I gibt die gemessenen Bahn-Beeinflussungsspannungen wieder. Die Spannungsmittelwerte beziehen sich auf einen mittleren Traktionsstrom von $I_T = 420$ A. Der Einfluss der Kabelmäntel auf die Beeinflussungsspannung ist augenfällig, wenn man die gemessenen Werte der Kabel mit denen des Messdrahtes vergleicht. Nach dem Ausbau der Bahnanlagen ist mit einem Traktionsstrom von 1,7 kA zu rechnen. Rechnet man die gemessenen Spannungen linear um, so sieht man, dass mit einer mittleren Langzeit-Beeinflussungsspannung von ca. 14 V bzw. mit Spitzenwerten von 40 V zu rechnen ist, was aufgrund der verwendeten Systeme zulässig ist.

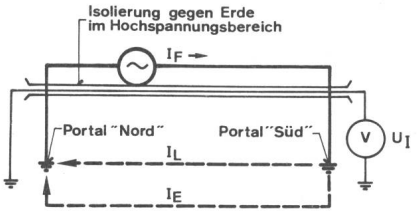

Fig. 6 Prinzip der Messung der induktiv eingekoppelten Längsspannung
I_F Fehlerstrom
I_L Leitergebundener Rückstrom
I_E Erd-Rückstrom
U_E Erdungsspannung
U_L Längsspannung

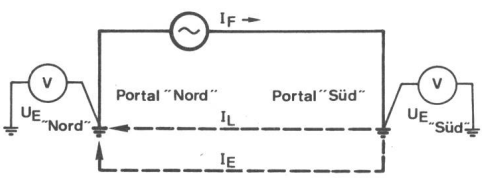

Fig. 7 Prinzip zur Messung der Erdungsspannung

Gemessene Beeinflussungsspannungen $16^2/_3$ Hz — Tabelle I

Kabel	Beeinflussungs-spannungs-Mittelwerte U_B bei $I_T = 420$ A	Querspannungs-Maximalwerte U_{PS}
Tunnelinternes Telefonkabel	3,5 V	0,18 mV
Nationalstrassen-Telefonkabel	3,1 V	0,27 mV
Fernwirk- und Hilfskabel	1,0 V	–
Messdraht ($r_k = 1$)	9,3 V	–

7. Messresultate der Erdungsspannung

Die Erdungsspannungen der Kraftwerke Lucendro (Airolo) und Göschenen wurden durch die Forschungskommission des SEV und des VSE für Hochspannungsfragen (FKH) sowie die PTT Anfang der siebziger Jahre bestimmt. Vor der Vermaschung der Tunnel- mit den Kraftwerkerden musste in Airolo bei einem Erdschlußstrom von 11 kA mit einer Erdungsspannung von 880 V, in Göschenen bei 5 kA mit 500 V gerechnet werden. Durch die Realisierung des beschriebenen Erdungskonzeptes konnten diese Werte wesentlich gesenkt werden. In Airolo muss heute noch mit knapp 300 V, in Göschenen mit knapp 400 V Erdungsspannung gerechnet werden.

Die Auswirkungen eines Erdschlusses in den Schaltfeldern der Kraftwerke wurden auch in den Schachtkopfstationen und auf den entsprechenden Tunnelgegenseiten untersucht. Bei den Lüftungsbauwerken konnten nur geringe Potentialanhebungen beobachtet werden, zum Unterschied zu den Tunnelgegenseiten. So steigt z.B. bei einem Erdschluss in Göschenen die Erdungsspannung in Airolo auf einen Wert von 18 V/kA. Dieser Wert zeigt einerseits, dass Erdungsspannungen über grössere Distanzen verschleppt werden können, anderseits bestätigt er die impedanzarme Verbindung und Vermaschung der im Tunnel verlegten Erdleiter und Installationen sowie die schlechte Erdfühligkeit der Installationen innerhalb des Tunnels.

8. Beeinflussungsspannungen 50 Hz

Die gemessenen Beeinflussungsspannungen, welche bei einem Erdschluss in der 20-kV-Tunnelstromversorgungsanlage auftreten, sind aus Tabelle II ersichtlich. Die Werte wurden bei einem Erdstrom von $I_E = 100$ A gemessen. Im Betriebsfall beträgt der einphasige Erdschlußstrom 200 A bzw. der Doppelerdschlußstrom 4,5 kA.

Rechnet man die auf den Kabeln gemessenen Beeinflussungsspannungen unter Berücksichtigung des nichtlinearen Verhaltens der Reduktionsfaktoren auf den einpoligen bzw. zweipoligen Erdschlußstrom um, so sieht man, dass die zulässige Kurzzeitspannung von 500 V bei keinem Kabel überschritten wird.

9. Schlussbemerkungen

In komplexen Bauwerken können durch die engen Kopplungsverhältnisse der verschiedenen elektrischen Stark- und Schwachstromanlagen Beeinflussungsprobleme entstehen. Insbesondere müssen beim Einsatz von modernen elektronischen Anlagen die Fremdspannungseinwirkungen untersucht werden.

Gemessene Beeinflussungsspannungen 50 Hz Tabelle II

Kabel	Beeinflussungs-spannungen U_B bei $I_E = 100$ A
Tunnelinternes Telefonkabel	12,0 V
Nationalstrassen-Telefonkabel	7,0 V
Fernwirkkabel	4,6 V
Hilfskabel	5,3 V
Messdraht ($r_k = 1$)	29,6 V

Unzulässige Einwirkungen lassen sich durch Schutzmassnahmen auf der Stark- und auf der Schwachstromseite verhindern, so dass ein störungsfreier und gefahrloser Anlagebetrieb gewährleistet werden kann.

Das im Gotthardtunnel angewandte Konzept der Verwendung von Hochspannungskabeln mit impedanzarm geerdeten Kupferdrahtschirmen, einer engen Vermaschung aller leitfähigen Bauteile und dem Einsatz von Schwachstromkabeln mit geeigneten Reduktionsfaktoren hat sich als eine technisch wie wirtschaftlich gute Lösung bewährt. Dabei hat das rechtzeitige Erkennen der möglichen Fremdspannungseinwirkungen und die enge Zusammenarbeit aller betroffenen Ingenieure und Ämter auf der Stark- und Schwachstromseite wesentlich mitgeholfen, die Probleme zu lösen.

Literatur

[1] *F. Gallati:* Energieversorgung und Erdungsprobleme. Bull. SEV/VSE 73(1980) 13, S. 630...632.

[2] Erdungs- und Beeinflussungsmessungen vom 9. bis 17. Oktober 1979. Zürich, Elektrowatt-Ingenieurunternehmung AG, 1979.

[3] Beeinflussungsmessungen im Gotthard-Strassentunnel. Bern, Generaldirektion der PTT, November 1979.

[4] *F. Schwab:* Erdungsmessungen in ausgedehnten Anlagen. Bull. SEV/VSE 71 (1980)4, S. 174...177.

Adresse des Autors

Peter Lüthi, Generaldirektion PTT, Sekt. BF 3, Viktoriastrasse 21, 3030 Bern.