

Hochspannungstechnik beim Aufbau des Bahnstromnetzes in der Schweiz

Thomas Aschwanden, Innertkirchen; Martin Aeberhard, Zollikofen; Reinhold Bräunlich, Zürich

Im Verlauf des ersten Jahrhunderts des elektrischen Vollbahnbetriebes in der Schweiz konnte die heutige Fachkommission für Hochspannungsfragen wichtige Beiträge zur Lösung der jeweils anstehenden Hochspannungsprobleme leisten. In den Anfängen waren das in erster Linie externe Einflüsse in Form atmosphärischer Überspannungen, die Messungen und Entwicklungsversuche notwendig machten. In jüngster Zeit spielen zunehmend auch Einflüsse der Bahnstromversorgungsanlagen auf die Umwelt und auf andere technische Einrichtungen eine Rolle.

HIGH-VOLTAGE TECHNOLOGY IN ESTABLISHING THE ELECTRIC RAIL NETWORK IN SWITZERLAND
During the first century of electric standard gauge rail operations in Switzerland, the present Technical Commission for High Voltage Testing and Engineering Commission succeeded in making major contributions to solving high voltage problems. Initially, these problems primarily involved external influences such as atmospheric surges, which required measurements and development tests. In recent times, the influences of traction current supply systems on the environment and on other technical facilities have played an increasing role.

TECHNIQUES DE LA HAUTE TENSION DANS L'ÉDIFICATION DU RÉSEAU DE COURANT DE TRACTION EN SUISSE

Durant le premier siècle de l'électrification totale du réseau ferroviaire en Suisse, l'actuelle commission d'étude des questions relatives à la haute tension a contribué substantiellement à résoudre les problèmes apparus au fil du temps par rapport à la haute tension. Au début, il s'agissait essentiellement d'influences externes sous forme de surtensions atmosphériques, nécessitant maintes mesures et tests de développement. Ces derniers temps, d'autres facteurs d'influence sont réputés jouer un rôle croissant, tels les effets des équipements d'alimentation en courant de traction sur l'environnement et sur d'autres appareillages techniques.

Fortsetzung und Schluss zu eb 11/2013 Seiten 634–639.

4 Überspannungsschutz und Isolationskoordination

4.1 Technische Entwicklung

Der Überspannungsschutz wurde bei den Bahnen seit Beginn ihrer Elektrifizierung besonders beachtet. Weit verbreitet waren damals Funkenhörner zur Spannungsbegrenzung und Drosselspulen als Strombegrenzer bei Transformatoren.

Bereits 1923 wurde der Einsatz von eigentlichen Überspannungsableitern, so genannten *Oxide Film Arresters* zum Schutz von 66-kV-Kabeln beschrieben [11]. Aufgrund von Schwierigkeiten und Fehlern mit solchen Ableiterelementen im Betrieb führten die SBB im Jahr 1930 Netzversuche durch, um die Wirksamkeit solcher 66-kV- und 132-kV-Überspannungsableiter nachzuweisen. Dabei wurden die Ableiter im SBB-Unterwerk Puidoux eingebaut und mit einem improvisierten Stoßgenerator, bestehend aus einem Gleichrichter und zwei großen Kabelrollen als

Stoßkondensatoren, zum Ansprechen gebracht. Die Stoßversuche führten wohl zum Ansprechen der Ableiter, jedoch war die Schutzwirkung völlig ungenügend. In der Folge ließen die SBB alle diese Ableiter in den Unterwerken entfernen.

Als dann Ende der 1940er Jahre als Resultat der Blitzforschung die maßgebenden Größen der Blitzströme prinzipiell bekannt waren und gesicherte Erkenntnisse über die auftretenden Überspannungen im Netz vorlagen, setzte in der Industrie auf dem Gebiet der Überspannungsableiter für Hochspannungsnetze eine intensive Entwicklung ein. Dabei spielte die *Forschungskommission für Hochspannungsfragen* (FKH, Hintergrund 2) mit ihrem selbst entwickelten mobilen Stoßgenerator mit der damals beachtlichen Ladespannung 640 kV und Ladeenergie 26 kJ eine wichtige Rolle, indem Ableiterversuche direkt im Netz durchführbar wurden (Bild 6). Schon ab 1937 verfügte die FKH zudem in ihrer Versuchsstation in Däniken über stationäre Prüfeinrichtungen, wo Ableiter- und Schalterversuche mit direkter Speisung aus dem 50-kV-Netz möglich waren. Bei der Entwicklung der Überspannungsableiter, zunächst Funkenstreckenableiter mit Siliziumkarbid-Widerständen und später Metalloxid-Ableiter, wurden die

FKH-Prüfeinrichtungen von den damaligen schweizerischen Herstellern *BBC* und *Sprecher & Schuh* regen genutzt. Dank direktem Netzschluss war eine hohe Prüfleistung über mehrere Perioden der Netzspannung verfügbar, um vor allem Typprüfungen unter praxisnahen Bedingungen durchzuführen.

4.2 Isolationskoordination

In der Schweiz wurden die ersten Regeln zur praktischen Koordinierung des Überspannungsschutzes mit der Isolation von Hochspannungsanlagen im Jahre 1948 in Kraft gesetzt. Diese Regeln des SEV fanden damals auch im Bahnstromnetz Anwendung.

Grundsätzlich unterscheidet sich heute die Isolationskoordination in den Bahnstromsystemen der SBB recht deutlich von derjenigen der gleichfalls mit 16,7 Hz betriebenen Bahnen der DB in Deutschland und ÖBB in Österreich. Das Konzept der Isolationskoordination in den 66-kV- und 132-kV-Schaltanlagen der SBB sieht nur an ausgewählten Stellen den Einsatz von Überspannungsableitern vor. Bei SBB-Freiluftanlagen wird die Höhe der Überspannungen nur an den Hochspannungsanschlüssen der Transformatoren durch entsprechend dimensionierte Ableiter begrenzt. In den übrigen Bereichen des SBB-Hochspannungsnetzes verfügen die Hochspannungsapparate auch heute noch über ein Isolationsniveau mit großen Reserven. Die Freileitungsisolatoren haben jedoch ein tieferes Isolationsniveau. Deshalb führen hohe Überspannungen bei Blitzeinschlägen in die Freileitungen schon bei den Leitungs-Isolatoren zu Überschlägen und erreichen die Schaltanlagen gar nicht, weshalb Ausfälle von Hochspannungsapparaten in Folge atmosphärischer Überspannungen auf Freileitungen äußerst selten auftreten.

In Zusammenhang mit der Beschaffung von so genannten *Hybridschaltkombinationen* hat die SBB die Isolationskoordination in den schweizerischen Bahnstromanlagen im Jahre 2011 zusammen mit der FKH überprüft. Dabei ging es vor allem um die Frage, ob die Isolationsanforderungen an die Hochspannungsschaltanlagen so angeglichen werden können, dass Netzkomponenten mit den Spezifikationen von DB und ÖBB eingesetzt werden könnten. Eine vollständige Angleichung ist wegen der unterschiedlichen Nennspannungen und der verschiedenen Behandlung der Mittelpunkte nicht möglich. Für die Neubeschaffung solcher Schaltapparate wurde jedoch ein Kompromiss gefunden, welcher eine gemeinsame Spezifikation ermöglicht.

Der Kompromiss besteht in einer Bemessungsspannung von 145 kV, welche zwischen den bei SBB (170 kV) einerseits und DB und ÖBB (123 kV) andererseits sonst üblichen Werten liegt, sowie für die

HINTERGRUND 2

Die *Forschungskommission des SEV und des VSE für Hochspannungsfragen* wurde 1937 als Verein auf unbestimmte Zeit gegründet. Anlässlich einer Revision der Statuten änderte sich 1991 der Name in *Fachkommission für Hochspannungsfragen* (FKH). Ihre heutigen Ziele liegen in der technischen Forschung und Entwicklung sowie in Dienstleistungen auf dem Gebiet der elektrischen Energieversorgung und der Hochspannungstechnik. Sie betreibt mit 16 Mitarbeitenden eine Geschäftsstelle in Zürich sowie eine eigene Hochspannungsversuchsstation und Logistikstation in Däniken. Durch ihre Tätigkeit soll in Zusammenarbeit mit den technischen Hochschulen auch der Ingenieur-nachwuchs mit einem Angebot praxisorientierter Arbeiten gefördert werden.

Die Vereinsmitglieder kommen aus der Energieversorgung, der Elektroindustrie, den Bahnen, den Ingenieurbureaus und den Branchenverbänden. Die FKH berät und unterstützt die Vereinsmitglieder und externe Auftraggeber bei hochspannungstechnischen Problemen und Aufgaben. Dafür stehen ein breites Angebot an Dienstleistungen und in Däniken ein Hochspannungs-Freiluftprüffeld und ein akkreditiertes Labor für Isolierölanalysen zur Verfügung. Ferner sind dort die mobilen Prüf-anlagen stationiert. Die meisten Prüf- und Diagnostikdienstleistungen werden heute vor Ort in Netzanlagen oder in Kraftwerken erbracht.
Informationen: <http://www.fkh.ch>

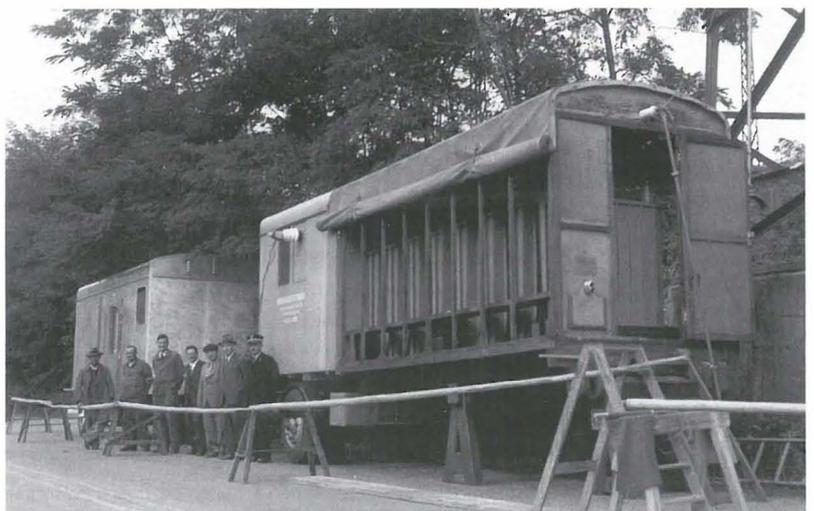


Bild 6:

Straßenfahrbare Stoßgenerator der damaligen Forschungskommission für Hochspannungsfragen (FKH) beim Einsatz im SBB-Unterwerk Puidoux um 1940 (alle Fotos: FKH).

Anwendungen im Netz der SBB in einem zusätzlichen Schutz durch Überspannungsableiter an den Freileitungsabgängen.



Bild 7: Erdungsmessungen an Fernleitungsabzweig in SBB-Unterwerk mit straßenfahbarem Messanhänger der FKH mit 50-kVA-Umrichter, Kompensationseinheit und Messeinrichtungen (Bild 8).

Für die 15-kV-Schaltanlagen der SBB haben die Untersuchungen der FKH gezeigt, dass bei Bemessung nach Spannungsreihe 24 kV statt bisher 36 kV und Einsatz eines entsprechenden Überspannungsschutzes kein Anstieg der Ausfallrate zu erwarten ist. Da aber die SBB auf offener Strecke im Freiluftbereich grundsätzlich keine Überspannungsableiter einsetzt, ist die Anwendung von Betriebsmitteln und Apparaten mit tieferem Isolationsniveau und mit Überspannungsschutz auf Innenraumanlagen begrenzt.

5 Weitere Untersuchungen und Prüfungen im Bahnstromnetz

5.1 Allgemeines

Mit der großen Zunahme der Schienennetzauslastung und der damit verbundenen Erweiterung der Energie- und Netzressourcen sind bei der SBB im Hochspannungsnetz neue technische Anforderun-

gen hinzu gekommen, die Studien und Prüfungen zur Qualitätsverbesserung und zur Klärung von Sicherheitsfragen notwendig machten. Im Folgenden werden ausgewählte Aktivitäten der FKH im Bahnstrombereich beschrieben.

5.2 Erdungsmessungen

Die Ausführung und die Instandhaltung von Bahnstrom-Unterwerken unterliegen der *Verordnung über Bau und Betrieb der Eisenbahnen* (Eisenbahnverordnung, EBV, SR 742.141.1). Zusätzlich sind auch die Vorschriften der *Starkstromverordnung* (Verordnung über elektrische Starkstromanlagen, SR 734.2) einzuhalten, welche vorschreiben, die Wirksamkeit der Erdungssysteme von Starkstromanlagen periodisch alle zehn Jahre experimentell zu überprüfen (Bild 7).

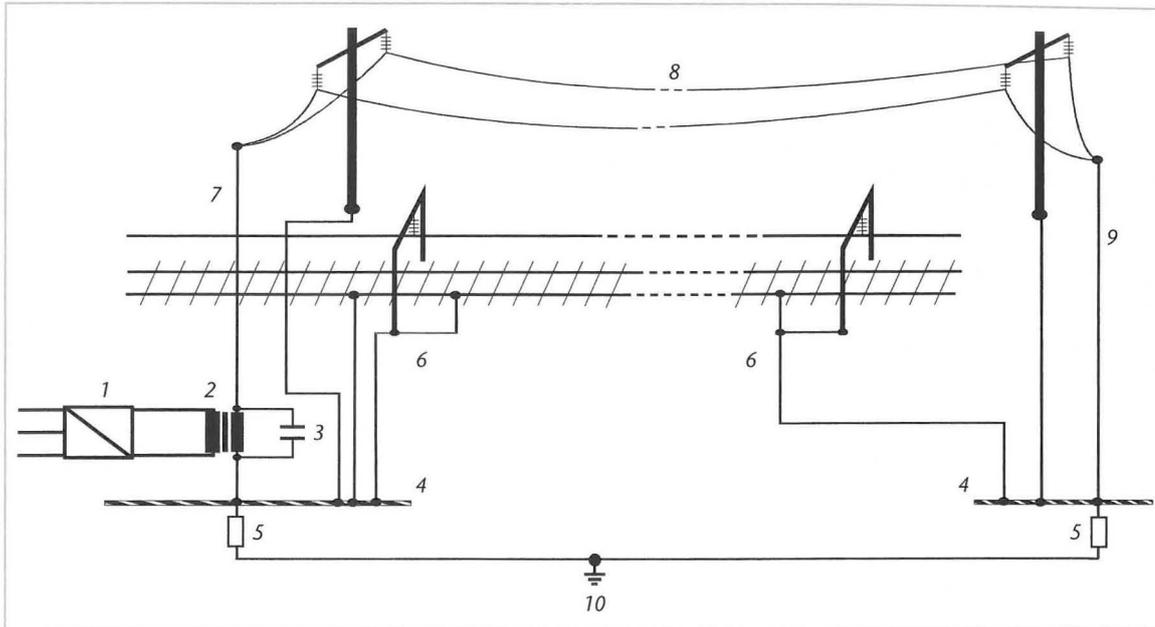
Die anzuwendenden Messverfahren müssen den Besonderheiten des 16,7-Hz-Bahnstromsystems Rechnung tragen und den geforderten Nachweis zur Personensicherheit der Erdungssysteme mit vertretbarem ökonomischem Aufwand erbringen. Außerdem sind bei diesen Erdungsmessungen die betrieblichen Erdströme der Bahnanlagen und das mit dem Erdungssystem verbundene ausgedehnte Schienennetz zu berücksichtigen. Die Messungen sollen Aussagen über die Wirksamkeit und den Zustand einer Erdungsanlage zulassen (Tabelle 1).

Mit dem in der Schweiz angewendeten Messverfahren können die Bahnunterwerke während der Erdungsmessungen in Betrieb bleiben. Es treten dabei erhebliche betriebsbedingte Stromüberlagerungen auf, die bei der Messung mit geeigneten Mitteln unterdrückt werden müssen. Zur Fehlerstromspeisung werden im Normalfall Übertragungsleitungen benützt. Da diese Leitungen teilweise parallel zu Bahnstrecken oder anderen Übertragungsleitungen verlaufen, können durch Induktion hohe Ströme in die benutzte Erdschlussschleife eingekoppelt werden. Dieser Umstand macht eine robuste Versuchsstromquelle notwendig und begrenzt die Länge der für solche Untersuchungen nutzbaren Übertragungsleitungen.

TABELLE 1

Zweck der Messungen an Erdungsanlagen und dabei zu ermittelnde Parameter.

Feststellung, ob alle gesetzlichen Kriterien bezüglich Personensicherheit gegenüber Berührungsspannungen eingehalten werden
Ermittlung der Reserve bezüglich der im Fehlerfall auftretenden Erdkurzschlussströme, bei welchen die zulässigen Berührungsspannungen eingehalten werden
Ermittlung der zulässigen Fahrleitungs-Dauerstromstärke zur Einhaltung der zulässigen Berührungsspannungen entlang der Bahntrassen
Ermittlung der Erdungsimpedanzen
Ermittlung des allgemeinen elektrischen Zustands der Anlagenerdung
Bestimmung der Mit- und Nullimpedanzen der für die Erdschlusspeisung verwendeten Übertragungsleitung durch Messungen bei 12 Hz, 24 Hz und 35 Hz und quadratische Interpolation auf 16,7 Hz


Bild 8:

Prinzipschema für Erdungsmessungen in Bahnstrom-Unterwerken (alle Grafiken: FKH).

- | | | | |
|---|------------------------|----|---|
| 1 | Frequenzumrichter | 6 | Gleiserdung |
| 2 | Anpasstransformator | 7 | Einspeisung in Übertragungsleitung |
| 3 | Kompensationskapazität | 8 | Übertragungsleitung zwischen zwei Unterwerken |
| 4 | Anlagenerde | 9 | Gegenerdung |
| 5 | Erdungsimpedanz | 10 | fiktive Neutralerde |

In den 1990er Jahren wurde von der FKH eine Erdungsmessanlage entwickelt und aufgebaut, die alle beschriebenen Bedingungen erfüllt [12]. Das Prinzip ist in Bild 8 dargestellt. Die Versuchsstromquelle besteht aus einem IGBT-Frequenzumrichter mit 50 kVA Nennleistung, der bei Frequenzen von 0 bis 500 Hz an den Ausgangsklemmen maximal 400 V Spannung liefern kann. Um die Einflüsse von 16,7-Hz-Betriebsströmen zu eliminieren, werden die Erdungsmessungen mit 24 Hz durchgeführt. Dabei werden im Mittel nur um wenige Prozente höhere Berührungsspannungen gemessen als bei 16,7 Hz. Zur Anpassung an die jeweiligen Impedanzverhältnisse wird zwischen Frequenzumrichter und Erdschluss-Einspeisestelle ein Anpasstransformator geschaltet. Um auch über lange Freileitungen mit entsprechend großer Schleifeninduktivität und Nullimpedanz einspeisen zu können, setzt die FKH zur Kompensation der Blindlast eine Kondensatorbank ein, die bei 24 Hz bis zu 280 kVAr kapazitive Blindleistung liefern kann.

5.3 Vor-Ort-Spannungsprüfung

Die hohen Anforderungen an die Zuverlässigkeit der Bahnstromversorgung erfordern bei wichtigen Teilsystemen und Komponenten des Hochspannungsnetzes wie Schaltanlagen, Kabeln und Transformatoren nach der Montage eine aussagekräftige Hochspannungsprüfung vor Ort. In den 1980er Jahren hat die FKH zusammen mit der ETH eine leis-

tungsfähige mobile Hochspannungsprüfanlage nach dem *Serienresonanz*-Prinzip entwickelt [13]. Diese Prüfanlagen wurden zuerst bei Vor-Ort-Hochspannungsprüfungen von gasisolierten Schaltanlagen (GIS) eingesetzt, der Anwendungsbereich wurde aber schon bald auf solche Prüfungen an kunststoffisolierten Hochspannungskabeln ausgedehnt [14].

5.4 Hochspannungsprüfung der 132-kV-Kabel im Simplontunnel

Die Simplon-Südrampe wird ausschließlich über zwei jeweils rund 20 km lange 132-kV-Kabelschleifen durch die Tunnelröhren versorgt. Diese wurden bei der Sanierung des Simplontunnels komplett erneuert. Die Anforderungen an die Zuverlässigkeit dieser Hochspannungskabel sind entsprechend hoch [15].

An der ersten dieser beiden 132-kV-Kabelanlagen sind im Sommer 2013 vor der Inbetriebsetzung Hochspannungsprüfungen durchgeführt worden. Bei diesen Vor-Ort-Prüfungen kam eine modulare Serienresonanzanlage der FKH zum Einsatz. Dabei wurden die beiden Phasenkabel nacheinander je 15 min lang mit Wechsellspannung 190 kV 41,2 Hz gegen den Mittelpunkt beansprucht. Diese Prüfspannung entspricht der 2,2-fachen, mit 87 kV spezifizierten Leiter-Erde-Spannung der aus Normmaterial für 150 kV bestehenden Anlage. Um 115 A kapazitiven Ladestrom für die sehr hohe Prüfleistung von 22 MVar aufzubringen, wurden in der Prüfschal-

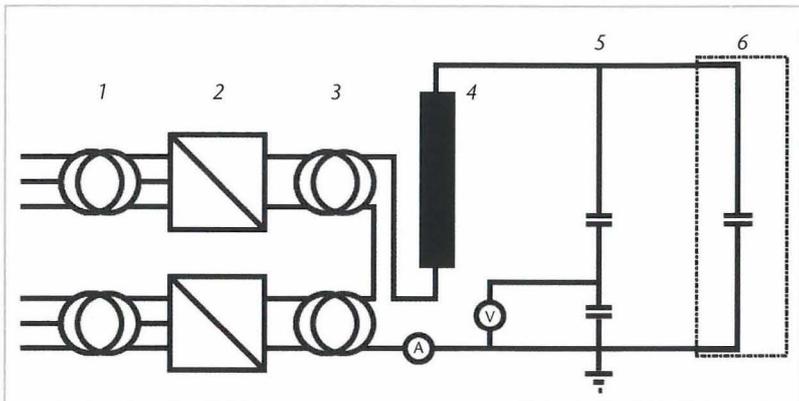


Bild 9:

Schaltung für Hochspannungsprüfung der 132-kV-Kabelverbindung im Simplontunnel.

- 1 Trenntransformatoren
- 2 Umrichter 2 x 180 kVA
- 3 Hochspanntransformatoren je 180 kVA
- 4 Resonanzinduktivität 6,35 H bestehend aus 13 parallelen Drosselspulen
- 5 kapazitiver Spannungsteiler
- 6 Kapazität des Prüfobjekts

13 Hochleistungs-Resonanzdrosseln parallel geschaltet (Bilder 9 und 10). Der Resonanzkreis wurde durch zwei synchron betriebene 180-kVA-Frequenzumrichter gespeist. Die Hochspannungsprüfungen der beiden Phasen konnten innerhalb eines Tag abgewickelt werden. Dabei hat die rund

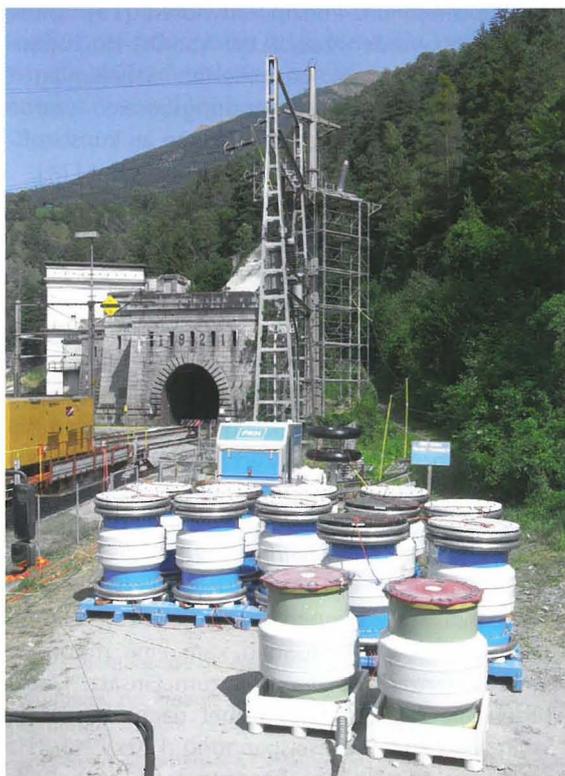


Bild 10:

Hochspannungsprüfung der 132-kV-Kabelverbindung durch den Simplontunnel, Aufstellung der Prüfanlage vor dem Tunnelportal Brig; rechts Mast mit Kabelendverschlüssen und Anschluss der Prüfspannung, vorn Prüfanlage mit Hochleistungs-Resonanzdrosseln, Hintergrund FKH-Messanhänger (Bild 7).

20 km lange Kabelstrecke die angelegte Prüfspannung problemlos gehalten. Dieses anspruchsvolle Beispiel zeigt, dass mit der Serienresonanzmethode Vor-Ort-Isolationsprüfungen auch bei sehr langen Hochspannungskabel-Verbindungen effizient und kostengünstig abgewickelt werden können.

5.5 Elektromagnetische Beeinflussungsfragen

Ein wichtiges Thema für eine enge Zusammenarbeit zwischen den Bahnen und der FKH sind elektromagnetische Beeinflussungen in Bahnsystemen, aber auch in Rohrleitungen wie Öl- oder Gas-Pipelines, die parallel zu Bahnstrecken verlaufen. Hier hat die Frage der Beeinflussung eine besondere Bedeutung, weil infolge der Anteile des Traktionsrückstroms im Erdboden neben der induktiven Beeinflussung auch eine Ohm'sche Beeinflussung der benachbarten Rohrleitungen auftritt. Die maximal möglichen Beeinflussungsspannungen lassen sich für solche Rohrleitungen in der Regel zuverlässig vorausberechnen und die Personensicherheit gegenüber Berührungsspannungen kann durch Maßnahmen der Potentialtrennung, durch Isolation und durch Potentialausgleich gewährleistet werden.

Erst in den 1990er Jahren wurde erkannt, dass beim Überschreiten kritischer Stromdichten bei Teilströmen, die vom Erdboden auf Rohrleitungen übertreten, an den Stromübertrittstellen Wechselstromkorrosion auftreten kann [16]. Diese Tatsache muss besonders bei Gaspipelines berücksichtigt werden, die parallel zu Bahnlinien verlaufen. Die außen angebrachte Isolationsschicht der Rohre ist niemals perfekt und der kathodische Schutz kann diese Form der Korrosion nicht verhindern. Es muss durch andere Maßnahmen sichergestellt werden, dass die kritischen Stromdichten nicht erreicht werden.

Ein weiteres aktuelles Thema sind die niederfrequenten elektrischen und magnetischen Felder (EMF) von Bahnstrom-Unterwerken. Nach Inkrafttreten der *Verordnung zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung* (NISV, SR 814.710) wurde im Jahr 2001 eine ausgedehnte Prinzipstudie für die maximal möglichen Emissionen betriebsfrequenter magnetischer Felder in SBB-Unterwerken durchgeführt.

Dazu wurde ein großes Unterwerk 132-kV- und 15-kV-seitig außer Betrieb genommen, seine Hochspannungs-Freiluftanlage von einer mobilen Messanlage mit einem konstanten Versuchsstrom gespeist und die magnetische Flussdichteverteilung in der Anlage und ihrer Umgebung gemessen. Der Versuchsstrom floss dabei über die eine Sammelschiene bis zum Kuppelfeld und über die andere Sammelschiene zurück zu einem zweiten Abgangsfeld mit kurzgeschlossenen Phasenleitern, wodurch

man mit geringem Leistungsbedarf auskam. In Bild 11 lässt sich diese Messkonfiguration erkennen. Vergleiche der Messergebnisse mit Berechnungen zeigten, dass eine theoretische Ermittlung der magnetischen Flussdichten ausreichend zuverlässige Daten zum Beurteilen der Grenzwerteinhaltung liefern kann (Bild 11). Gewisse Abweichungen bei den gemessenen Werten lassen sich durch den Einfluss von Erdleiterströmen erklären.

6 Schlussbemerkungen

Das Beispiel der schweizerischen Bahnen zeigt, wie durch den Aufbau und die Weiterentwicklung der Bahnstromversorgung immer wieder neue elektrotechnische Fragen auftreten. Viele davon können durch gezielte Versuche, Expertisen und Prüfungen abgeklärt werden, wozu Fachleute zugezogen und geeignete Prüfmittel bereitgestellt werden müssen. Die vor rund 75 Jahren gegründete Institution FKH ist dabei auch heute noch aktiv beteiligt.

Bei öffentlichen Transportmitteln müssen zu allen Zeiten die Qualität der Betriebsmittel sichergestellt und die Personensicherheit durch entsprechende Tests und Prüfungen nachgewiesen werden. Es ist zu erwarten, dass beim weiteren Ausbau der Bahnanlagen, der raschen Zunahme der Infrastrukturauslastung und der zunehmenden Vernetzung mit anderen technischen Infrastrukturen auch weiterhin neue hochspannungstechnische Fragen auftreten. Wenn es gelingt, die entsprechenden Fachkompetenzen langfristig zu sichern, lassen sich auch in Zukunft diese neuen Probleme bei Hochspannungs-Bahnstromsystemen effizient und kostengünstig lösen.

Anmerkung:

Dieser zweiteilige Aufsatz ging aus einem Referat hervor, das der Erstautor anlässlich des 75-jährigen Jubiläums der Fachkommission für Hochspannungsfragen (FKH) am 9. Mai 2012 in Däniken gehalten hat.

Literatur

- [11] Habich, H.: Das Kraftwerk Ritom der S.B.B., III Mechanisch-elektrischer Teil. In: Schweizerische Bauzeitung 82 (1923), No. 1, S. 90–93.
- [12] Bräunlich, R.; Storf, G.; Sigg, M.: Erdungsmessung in Unterwerken der Schweizerischen Bundesbahnen. In: Elektrische Bahnen 99 (2001), H. 1-2, S. 64–75.
- [13] Bernasconi, F.; Zaengl, W. S.; Vonwiller, K.: A new high voltage series resonant circuit for dielectric tests. 3rd International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), Mailand 1979, Vol. 2, Paper 43.02.

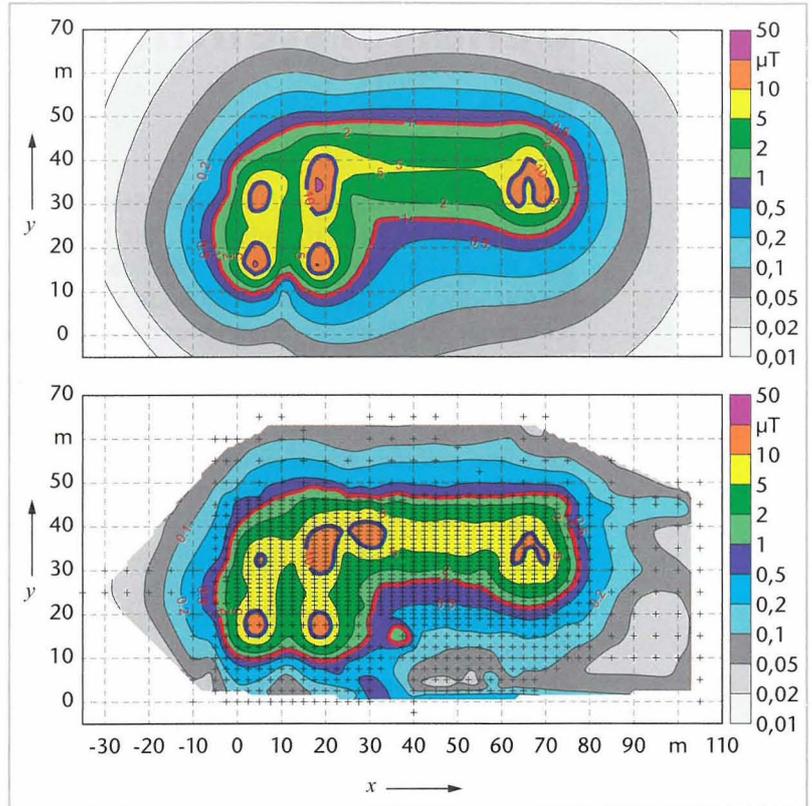


Bild 11:

Magnetische Flussdichteverteilung in der Freiluftanlage eines SBB-Unterwerkes in 1 m Höhe über Erdboden, Bezugsstrom 330 A = Summennennstrom der beiden 21,8-MVA-Transformatoren, berechnet (oben) und gemessen (unten); Draufsicht mit Linien gleicher magnetischer Flussdichte, Isolinie mit Anlagengrenzwert $1 \mu\text{T}$ nach NISV rot eingezeichnet. Versuchsstromfluss: Leitungsfeld mit mobiler Einspeisung ($x=19 \text{ m}$) – Sammelschiene 2 ($y=39 \text{ m}$) – Kuppelfeld ($x=66 \text{ m}$) – Sammelschiene 1 ($y=32 \text{ m}$) – Leitungsfeld mit im Abgang kurzgeschlossenen Phasenleitern ($y=5 \text{ m}$)

- [14] Aschwanden, Th.: Vor-Ort-Prüfung von Hochspannungs-Kabelanlagen. In: Bulletin SEV/VSE 93 (1992), No. 15, S. 31–40.
- [15] Aeberhard, M.; Holderegger, M.; Stoller, L.; Vollenwyder, R.; Eisele, A.: Blindleistungskompensation mit TRAXX-Lokomotiven am Simplon. In: Elektrische Bahnen 109 (2011), H. 9, S. 360–465.
- [16] Bette, U.; Brandl, W.; Schell, G.: Wechselstromkorrosion an Fernrohrleitungen. In: Elektrische Bahnen 111(2013), H.11, S.665–674.

Die Autoren wurden in Teil 1 vorgestellt.

Berichtigung zum ersten Teil: In eb 11/2013 muss auf Seite 635 im HINTERGRUND 1 das Todesjahr von Karl Berger 1993 heißen.