

Erdungsmessungen in Unterwerken der Schweizerischen Bundesbahnen

Reinhold Bräunlich, Günther Storf, Zürich
Max Sigg, Zollikofen

Die Schweizerischen Bundesbahnen haben an allen Hochspannungsschaltanlagen Erdungsmessungen durchführen lassen. Der Beitrag beschreibt eine in der Praxis erprobte Erdungsmesstechnik für Wechselstrom-Bahnunterwerke und präsentiert Erfahrungen und Ergebnisse aus der Untersuchung von 44 Erdungssystemen.

Earthing measurements in substations of Swiss Federal Railways

Swiss Federal Railways have ordered measurements of earthing systems in all high-voltage switch yards. The paper describes an approved earthing measuring technique for AC railway substations and presents experiences and results based on the investigation of 44 substation earthing systems.

Mésures d'installations de mise à terre dans les sous-stations de Chemins de Fer Fédéraux Suisses

Les Chemins de Fer Fédéraux Suisses ont commandé des mesures de l'installations de mise à terre des toutes leurs sous-stations à haute tension. L'article décrit des techniques de mesure de mise à terre éprouvées pour le courant alternatif des sous-stations ferroviaires. En plus, ils y sont rapportés les expériences et les résultats de 44 systèmes de mise à terre.

1 Einführung

Bau und Instandhaltung von Bahnstrom-Unterwerken (UW) der Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) unterliegen der *Verordnung über elektrische Anlagen von Bahnen – VEAB* und zugehörigen Ausführungsbestimmungen (AB-VEAB)

[1; 2]; ferner gelten für sie die Vorschriften der *Starkstromverordnung* [3]. Diese schreibt vor, dass die Wirksamkeit der Erdungssysteme nach Erstellung und Umbauten von Starkstromschaltanlagen sowie periodisch alle zehn Jahre experimentell zu überprüfen ist.

Massgebend für die Ausführung von Erdungsmessungen in der Schweiz ist die SEV-Regel 3755 (1999-03) Kapitel 12 [4], welche bereits auf die europäische Vornorm für die Ausführung von Starkstromanlagen prEN 50179 [5] abgestimmt ist.

Die *Fachkommission für Hochspannungsfragen* (FKH) wurde von den SBB beauftragt, Erdungsmessungen in allen UW, Kraftwerken und anderen Hochspannungsschaltstationen durchzuführen. Seit 1996 wurden 44 Anlagen untersucht.

Erdungssysteme von Bahnstromanlagen haben im Wesentlichen folgende Funktionen:

- Gewährleistung der Personensicherheit durch Abführen gefährlicher Betriebs- und Fehlerströme,
- Sicherstellung eines niederohmigen Potenzialausgleichs für fehlerfreies Funktionieren aller Primär- und Sekundäranlagen,
- Rückführung der Betriebsströme aus Traktion und ortsfesten Verbrauchern.

Erdungsanlagen von Bahnunterwerken unterscheiden sich von Erdungssystemen der öffentlichen Stromversorgung prinzipiell durch folgende zwei Besonderheiten: Erstens stehen sie stets mit einem weiträumigen geerdeten Schienensystem in Verbindung, zweitens fliessen in Bahnerdungssystemen auch betriebliche Ströme in Form von

Gleisrückströmen. Diese beiden Aspekte sind bei Messung und Beurteilung der Erdungen von Bahnunterwerken besonders zu berücksichtigen.

2 Ziel der Erdungsmessungen

Erdungsmessungen dienen in erster Linie dem Sicherheitsnachweis von Erdungsanlagen, indem sie die genannten Funktionen überprüfen. Ausserdem zeigen sie weitere Eigenschaften auf. Im übrigen können aus den Resultaten viele Informationen über die betrieblichen Merkmale von Erdungssystemen unterschiedlicher Anlagen abgeleitet werden.

Im Einzelnen sollen Erdungsmessungen folgende Aussagen über die Anlage zulassen:

- Feststellung, ob alle gesetzlichen Kriterien bezüglich Personensicherheit, also Einwirkspannungen eingehalten werden,
- Angabe der Reserve bezüglich der im Fehlerfall auftretenden Erdkurzschlussströme, bei welchen die zulässigen Einwirkspannungen noch eingehalten werden,
- Angabe der bezüglich Einwirkspannungen zulässigen Traktionsströme,
- Bestimmung des Erdungswiderstands,
- Erfassung von Schwachstellen und von hochbelasteten geerdeten Leitern aller Art.

Der Begriff Einwirkspannung ist hier gemäss Literatur als Oberbegriff für Berührungs-, Schritt- und Differenzspannung verwendet.

Der letzte Punkt gibt Aufschluss über das längerfristige Verhalten

des Erdungssystems. Insbesondere resultieren Informationen über die Auswirkungen von allfälligen Erhöhungen von Betriebs- und Fehlerströmen, von möglichen Alterungsprozessen an den Erdleitern bis zu Unterbrechungen und von zukünftigen Anlagenmodifikationen.

3 Erdungssysteme von Bahnunterwerken

3.1 Netzkonfigurationen

Das SBB-Bahnstromnetz besteht aus dem Hochspannungsnetz 2 AC 66 kV oder 132 kV 16,7 Hz für die Energieübertragung von den Kraftwerken zu den UW und dem Oberleitungsnetz 1 AC 15 kV 16,7 Hz für die Traktionsenergieverteilung von den UW zu den Zügen als Verbrauchern. Leitungen der beiden Hochspannungsnetze werden im Folgenden als *Bahnstromleitungen* bezeichnet. Diese Systeme unterscheiden sich bezüglich der Erdung wesentlich:

- Die meist älteren 66-kV-Bahnstromleitungen werden mit isoliertem, die 132-kV-Leitungen dagegen mit geerdetem Sternpunkt betrieben.
- Anders als im Hochspannungsnetz fließen im Traktionsnetz nicht nur Fehlerströme, sondern auch Betriebsströme durch alle Erdleiter, die Gleisanlagen und den Erdboden, wodurch Erdungsmessungen stark beeinträchtigt werden können.

Gemäss der Fachliteratur und den eigenen Erdungsmessungen in SBB-UW wird der Erdschlussrückstrom vorwiegend vom Gleissystem aufgefangen, fliesst also über das Schienenstromrückführungssystem zurück. Auch bei der Fehlerstromeinspeisung über eine Bahnstromleitung zwischen zwei UW tritt nur ein kleiner Anteil, meist weniger als 25% und typischerweise 10% vom Erdreich direkt auf die UW-Erdung über. Bei einem Erdkurzschluss an der Oberleitung übernehmen die Gleise einen noch grösseren Anteil des Fehlerstroms. Dieser lag bei Schleifenstromuntersuchungen mit Einspeisung über eine weit entfernt

geerdete Oberleitung stets über 90% und in einigen Fällen über 95%. Deshalb sind bei Messungen die Einwirkspannungen in der Umgebung eines UW niedriger, wenn der Erdschlussstrom über die Oberleitung als wenn er über eine Bahnstromleitung eingespeist wird. So wurden bei Erdungsmessungen an einem Bahn-UW im ländlichen Gebiet bezogen auf den Referenz-erdschlussstrom 1 kA während experimentellen Erdschlüssen auf Bahnstromleitungen die zwei- bis dreifachen Werte der Einwirkspannungen festgestellt wie bei Erdschlüssen auf der Oberleitung.

Allerdings sind die Beträge der Erdfehlerströme im Oberleitungsnetz häufig höher als auf Bahnstromleitungen. In 65% aller untersuchten Fälle ist deshalb der Fehler an der Oberleitung ausschlaggebend für den Grenzwert der Berührungsspannungen. Bild 1 zeigt einen Vergleich der maximalen Erdfehlerströme für beide Fälle. Im UW Zürich [6] beispielsweise beträgt der maximal mögliche Erdschlussstrom hochspannungsseitig 27,4 kA und oberleitungsseitig 34,4 kA, der maximal zulässige Dauerstrom hochspannungsseitig 17,9 kA.

Da bei Impedanzmessungen von Bahnstromleitungen nur eine einphasige Stromquelle benötigt wird,

ist die Messung der Null- und Mitimpedanzen gegenüber Drehstromnetzen deutlich einfacher.

3.2 Frequenz

Wegen der wesentlich tieferen Frequenz 16,7 Hz breiten sich die Erdströme anders aus als bei 50 Hz: Infolge der weniger stark ausgeprägten Stromverdrängungseffekte dringen die Ströme weiter in das Erdreich ein. Dadurch ist bei Fehlern an Bahnstromleitungen der Erdrückstrom weniger eng an die Leitungstrassen gebunden, welche den Erdschlussstrom führen. Spannungsfall und Beeinflussungen durch Erdströme müssen demnach bei Bahnanlagen in einem weiteren Umfeld als bei 50-Hz-Anlagen erwartet werden.

3.3 Rückwirkungen

Bei Fehlerstromeinspeisung in Bahnstromleitungen, die parallel zu Bahnstrecken führen, können als Folge des Fahrbetriebs hohe Ströme in der Erdschlusschleife induziert werden, was deren nutzbare Länge begrenzt. Bei Freileitungen, die circa 50 km oder länger entlang von Bahnlinien verlaufen oder welche auf Masten gemeinsam mit anderen Freileitungssystemen geführt werden, kann es Probleme infolge Rückspeisung in die Versuchs-

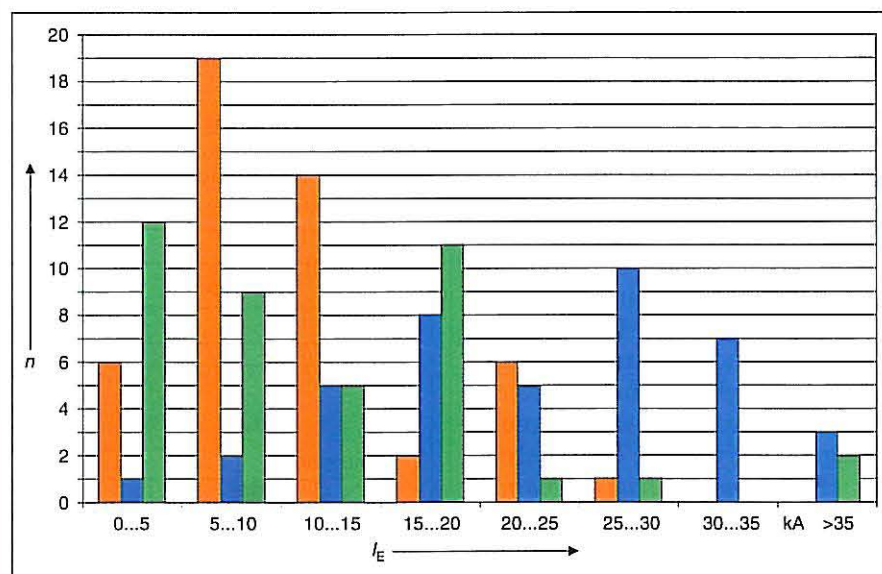


Bild 1: Verteilung der maximal möglichen Erdfehlerströme von 44 Bahnunterwerken.

rot Hochspannungsnetz 66 kV und 132 kV

blau Oberleitungsnetz 15 kV

grün zum Vergleich: maximal zulässige Traktionsströme, für die der Grenzwert für Dauerberührungsspannung 50 V eingehalten wird

Summen $\neq$ 44, weil vier Anlagen 66 und 132 kV, drei Anlagen ohne 15 kV

stromquelle geben. Die unter diesen Bedingungen induzierten Ströme können einige 10% der eingespeisten Erdschlussströme erreichen.

Auch wegen der hohen Schienenrückströme, die über Teile des Bahnerdungssystems zu den UW-Transformatoren zurückfließen, müssen bei Erdungsmessungen in Bahn-UW Betriebsspannungen und -ströme wirksam unterdrückt werden. In der Regel sind die verfügbaren Messströme, die teilweise über die gleichen Erdungsleiter fließen, deutlich geringer als die betrieblichen Erdungsströme.

In der Literatur werden für Erdungsmessungen mehrere Methoden zur Eliminierung von betrieblichen Erdungsströmen beschrieben [7; 8; 9]. Bei den in Bahnanlagen vorliegenden extremen Pegelverhältnissen versagen jedoch die meisten publizierten Verfahren.

Bei den von der FKH ausgeführten Erdungsmessungen hat sich deshalb folgende Methode bestens bewährt: Der Messstrom wird mit einer von der Netzfrequenz abweichenden, leicht erhöhten Messfrequenz eingespeist, bei Bahn-UW circa 24 Hz. Dies erlaubt eine einfache und wirkungsvolle Trennung aller durch den Versuchsstrom erzeugten Messgrößen von den durch den Betrieb hervorgerufenen Größen. Bei der Auswertung ist dann zu berücksichtigen, dass die Erdungsimpedanzen und die Einwirkspannung in gewissem Masse frequenzabhängig sind. Es ergeben sich circa 10% höhere Einwirkspannungen als bei Betriebsfrequenz 16,7 Hz. Für eine entsprechende Korrektur können noch Vergleichsmessungen bei zum Beispiel 12 Hz vorgenommen werden.

Als Messgerät für Berührungs-, Differenz- und Schrittspannungen wird ein tragbares, batteriebetriebenes frequenzselektives Voltmeter basierend auf einem FFT-Analysator (*Fast Fourier Transformation*) eingesetzt. Dieses Gerät wertet selektiv nur messfrequente Spannung aus, unterdrückt aber mit circa 60 dB betriebsfrequente Komponenten sowie Einflüsse aus dem 50-Hz-Netz, sodass selbst kleine Nutzsignale im 10-mV-Bereich zuverlässig erfasst werden.

4 Messverfahren

4.1 Allgemeines Vorgehen

Da Einwirkspannungen und Sicherheitsfragen sowohl bei Erdfehlern in Schaltanlagen und auf Bahnstromleitungen als auch bei Kurzschlüssen im Oberleitungsnetz betrachtet werden müssen, ist ein vollständiger Nachweis der Zulässigkeit aller Einwirkspannungen relativ aufwändig.

Um die vorschriftsgemäße Funktion des Erdungssystems möglichst einfach und rationell nachzuweisen, wird für Erdungsmessungen in Bahn-UW zuerst eine Messung mit Fehlerstromeinspeisung über eine ausser Betrieb gesetzte Bahnstromleitung vorgenommen (Bild 2). Dies liefert in der

Regel höhere Einwirkspannungen als wenn der Fehlerstrom über eine Oberleitung eingespeist wird.

Wenn die Hochrechnungen auf die möglichen realen Fehlerströme an der Bahnstromleitung noch zulässige, an der Oberleitung jedoch unzulässig hohe Einwirkspannungen ergeben, so ist eine weitere Messung mit Einspeisung über die abgeschaltete Oberleitung erforderlich (Bild 3). Dabei können Einwirkspannungen niedriger werden, weil wie gezeigt ein höherer Rückstromanteil in den Schienen fließt.

Im Einzelnen umfassen die Erdungsmessungen an einem UW mehrere Schritte.

Zunächst wird die *Stromverteilung* in den Schienenrückführungen und eventuell in Schienen und Erd-

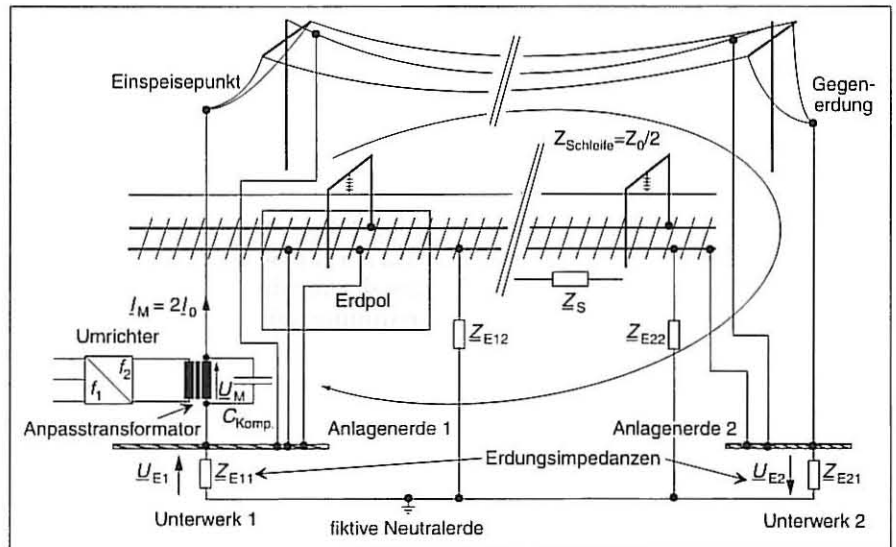


Bild 2: Prinzip Erdungsmessung mittels Erdschlusschleife über Hochspannungsleitungs-Phasenseile.

Stromanteil über Erdungsnetze Z_{E11} ; Z_{E21} typischerweise $\approx 10\%$

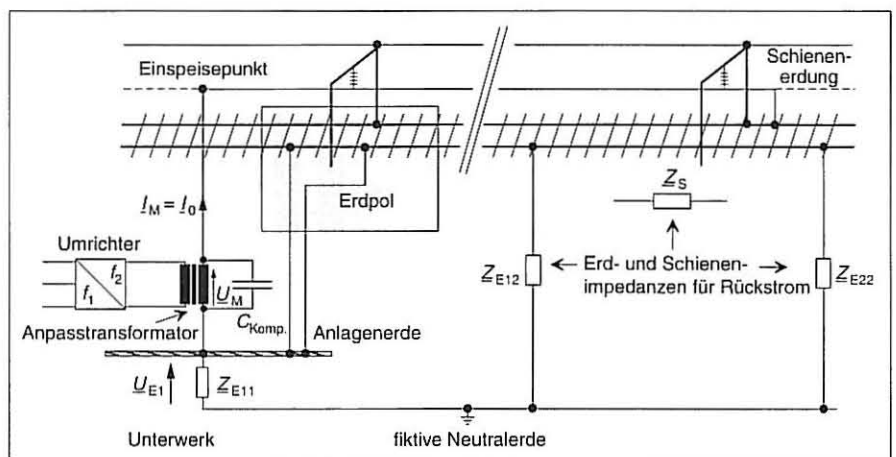


Bild 3: Prinzip Erdungsmessung mittels Erdschlusschleife über Oberleitung.

Stromanteil über Erdungsnetz Z_{E11} typischerweise $< 10\%$

seilen gemessen. Dadurch wird überprüft, ob alle Erdleiter intakt sind, und es kann die Erdungsimpedanz des UW alleine, also ohne Schienenstromrückführungen abgeschätzt werden. Ausserdem können sich weitere Informationen über die Erdungsverhältnisse und Hinweise über allfällig zu treffenden Maßnahmen ergeben.

Sodann wird ein *Potenzialprofil* bei stationärer Fehlerstromspeisung ausgehend vom Potenzial der Erdung bis in den Neutralbereich hinaus gemessen, mindestens jedoch über 300 m Länge. Bei unübersichtlichen Erdungsverhältnissen mit möglichen Potenzialbeeinflussungen wird zur Kontrolle ein zweites Spannungstrichterprofil aufgezeichnet. Die Trichterendspannung wird dann auf die maximalen Erdkurzschlussströme sowohl an der Hochspannungs- wie an der 15-kV-Sammelschiene hochgerechnet. Wenn für diese beiden Fehlerfälle die bewertete Trichter-

endspannung unterhalb der für die vorhandenen Ausschaltzeiten geforderten Grenze für Berührungsspannungen liegt, kann die Messung beendet werden, da keine unzulässig hohen Werte auftreten können.

Anderenfalls müssen Einwirkungsspannungen gemessen werden, zunächst mit 24 Hz und eventuell auch mit einer Frequenz unter 16,7 Hz.

Wenn auch Erdkurzschlüsse an der Oberleitung experimentell untersucht werden (Bild 3), sind die Auswirkungen eines Erdfehlers im Hochspannungsnetz (Bild 2) und diejenigen eines Fehlers im Traktionsnetz getrennt zu bewerten.

Liegen alle hochgerechneten Berührungs- und Differenzspannungen unterhalb der gesetzlichen Grenzwerte, kann das Erdungssystem als ausreichend wirksam angesehen werden, sonst sind Abhilfemassnahmen erforderlich.

4.2 Einspeisung und Erdschlussstromschleife

Messungen in Hochspannungsschaltanlagen werden nach der Strom-Spannungs-Methode durchgeführt [7]. Dabei wird ein experimenteller Erdschlussstrom I_M in eine Erdschluss-Schleife gemäß Bild 2 oder Bild 3 eingespeist.

4.2.1 Einspeisequelle

Für die Erdungsmessungen wird eine mobile Anlage eingesetzt (Bild 4 und 5), in der ein statischer Frequenzumrichter den Versuchstrom bei Bahn-UW mit circa 24 Hz erzeugt. Als einphasige Leistung haben sich 400 V 40 kVA als ausreichend erwiesen. An unterschiedliche Impedanzen der Erdschlusschleife wird die treibende Spannung U_M mit einem Transformator so angepasst, dass der eingepreßte Versuchstrom zwischen 100 und 300 A liegt. Um auch bei langen Freileitungen mit ihrer entsprechend großen Schleifeninduktivität

ARCAS

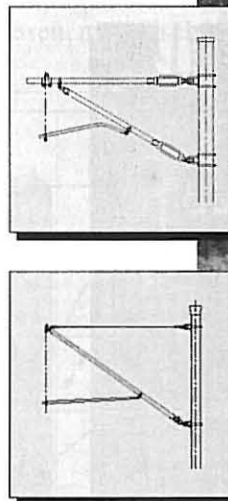
**ARCAS – das modulare Ausleger-system für Bahn und Strassenbahn.
Bis DC 3 kV und AC 25 kV.**

- modulares Baukastensystem
- Tragwerke in allen gebräuchlichen Materialien
- für hochbelastbare wie auch leichte Tragwerke
- umfangreiche Hilfsmittel für die Projektierung und die Montage
- integrierbar in bestehende Systeme
- wirtschaftliche Planung
- effiziente Montage
- einfache Lagerhaltung

Die Dokumentation liegt für Sie bereit

Kummler+Matter

Kummler+Matter AG
Hohlstrasse 176, Postfach, CH-8026 Zürich
Tel. +41-1-247 47 47, Fax +41-1-247 47 77
E-Mail: kuma@kuma.ch



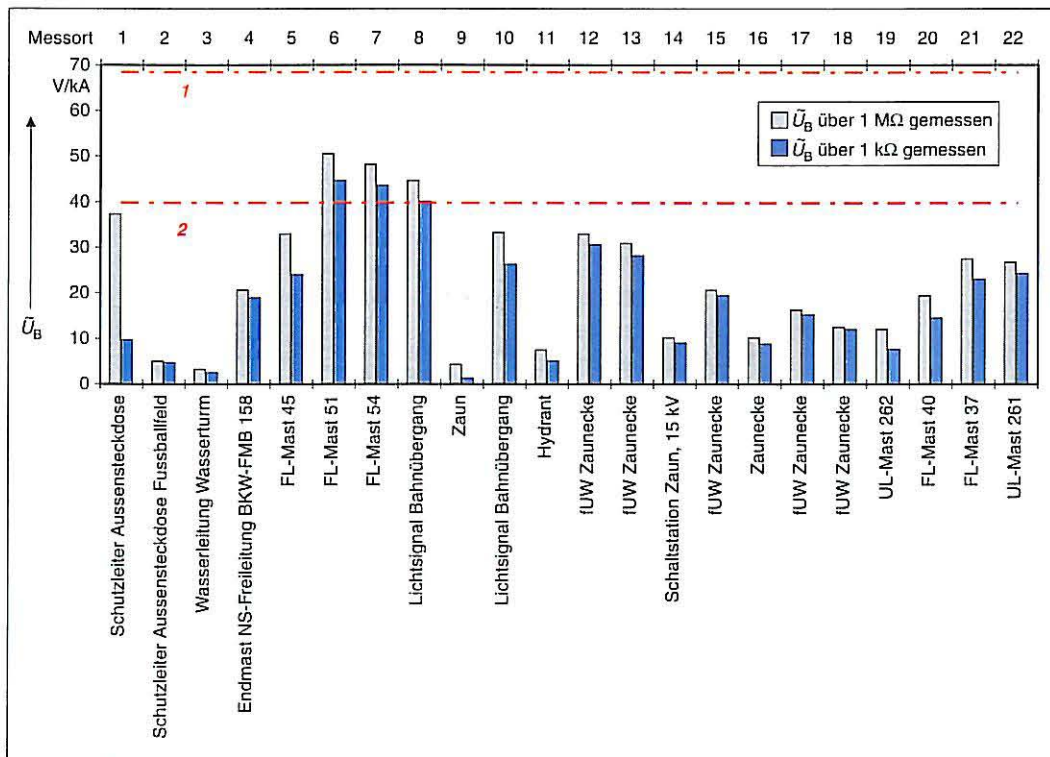


Bild 8: Messergebnisse Berührungsspannung U_B an Messorten 1 bis 22 in Bild 6.

maximal zulässige strombezogene Berührungsspannung:

1 bei Erdschluss hochspannungsseitig

BKW-FMB örtliche Energieversorgungsunternehmen
fUW fahrbares Unterwerk

2 bei Erdschluss oberleitungsseitig

FL Fahrleitung NS Niederspannung
UL Hochspannungs-Uebertragungsleitung

und damit der tatsächlich an der Messstelle vorhandene Wert gemessen. Bei der zweiten wird diesem ein 1-k Ω -Widerstand parallel geschaltet und damit der Widerstand des menschlichen Körpers nachgebildet [4; 5]. Diese unter Belastung gemessene Spannung wird als der für Einwirkspannungen relevante Wert angesehen. In den Messberichten werden deshalb die Spannungswerte mit und ohne 1 k Ω Belastung ausgewertet.

Bild 8 zeigt ein Beispiel für eine zweckmässige Darstellung der Messergebnisse. Hierbei liegen zwei der gemessenen Berührungsspannungen für Erdschlüsse auf der Oberleitung bei maximal möglichem Fehlerstrom im unzulässigen Bereich. In fast allen solchen Fällen ist verhältnismässig einfache Abhilfe möglich, zum Beispiel Standortisolierung durch Aufschotterung oder Verlegung von Steuer Elektroden.

4.6 Stromverteilung

Für eine aussagekräftige Analyse von Erdungssystemen empfiehlt sich eine systematische Ermittlung

der Stromverteilung über sämtliche Leiter, die mit der Anlagenerde in Berührung stehen und diese verlassen oder zu deren Erdung dienen. Bei SBB-UW sind dies vor allem:

- Schienenstromrückführungen (Erdpole),
- Erdseile,
- beidseitig geerdete Schirme von Hochspannungskabeln,
- Anschlussgleis des UW.

ne weiteren Verbindungen zwischen der Umgebungs- und der Anlageerde bestehen, ergibt ihre vektorielle Summe den eingespeisten Schleifenstrom. Die Aufteilung des Erdungsstroms für den realen Kurzschlussfall kann auf diese Weise ermittelt und kontrolliert werden. In der Regel treten jedoch circa 10 % des Erdungsstroms via Erdungsnetz direkt ins Erdreich über.

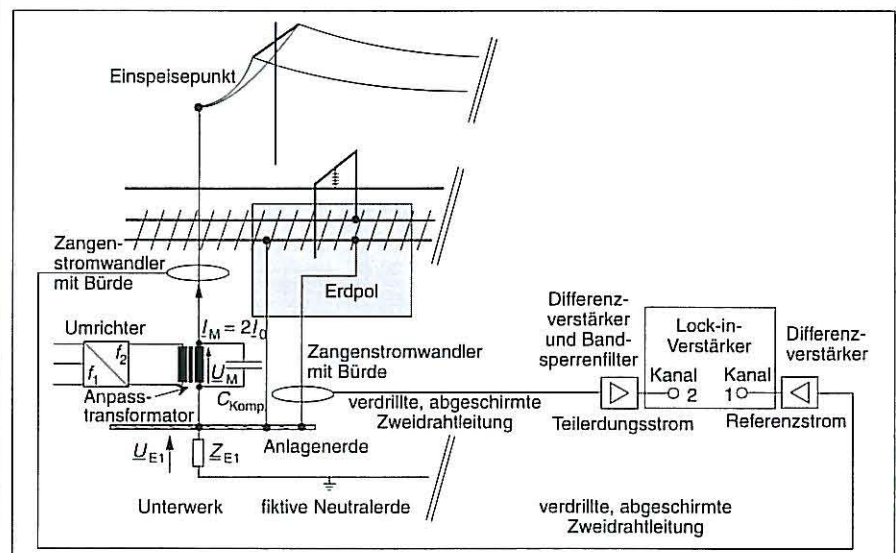


Bild 9: Prinzipschema für Messung eines Teilerdungsstromes bei Einspeisung wie in Bild 2.

Falls vorhanden, sind auch andere Erdleiter wie Steuer- und Signalleitungen mit geerdeten Schirmen oder metallische Wasser- und Gasleitungen mit zu betrachten.

Da solche Messungen von so genannten Teilerdungsströmen gleichzeitig mit der Berührungsspannungsmessung erfolgen, verlängern sie die Abschaltzeiten für die Bahnstromleitung oder die Oberleitung nicht.

Das Prinzip der Messung von Teilerdivergenzströmen ist in Bild 9 dargestellt. Wenn die Messströme aller abgehenden Leiter in Betrag und Phase vollständig erfasst werden und kei-

Dieser Anteil ist normalerweise einer direkten Messung nicht zugänglich und erscheint in der Erdungsstrombilanz als Restbetrag.

Die Ermittlung der Erdungsstromverteilung dient aber insbesondere der Beantwortung folgender wichtiger Fragen:

- Sind alle Erdverbindungen intakt und genügend niederohmig ausgeführt?
- Gibt es Energie-, Nachrichten- oder andere Erdverbindungen, die in einem Erdschlussfall unverhältnismässig hoch mit Erdungsströmen belastet werden, wodurch Störungen, Überspannungen oder gar thermische Überlastungen auftreten könnten?
- Bestehen unerwünschte Verbindungen zwischen isolierten Leitern auf Nullpotential und Erde

wie offene Kabelschirme, Sondererder und Ähnliches?

Für die Messung der einzelnen Stromanteile werden Zangenstromwandler mit 100 mm Durchmesser eingesetzt, sodass auch Leiter grösseren Querschnitts wie einpolige Hochspannungskabel umfasst werden können. Die Wandler-Bürdenspannungen werden zur Vermeidung von Störeinkopplungen mit abgeschirmten und verdrehten Signalkabeln zum Messplatz übertragen (Bild 10).

Bei Erdungsverbindungen mit Querschnitt über 100 mm oder bei Metallrohren stehen Rogowskispulen, das sind Toroidspulen ohne Eisenkern mit Durchmessern bis über 2 m zur Verfügung (Bild 11), die zur Umschliessung festmontierter Leiter und Rohre

geöffnet werden können. Die darin induzierte Spannung steht im festen Verhältnis zum Strom in den umschlossenen Leitern. Um am Oszilloskop den erfassten Stromverlauf frequenzunabhängig und ohne Phasenverschiebung darstellen zu können, werden analoge, rauscharme Integratoren eingesetzt.

Für Messung und Auswertung der einzelnen Erdströme wird in der Regel ein Empfangverstärker oder Synchrongleichrichter (*lock-in-amplifier*) eingesetzt, der Amplitude und Phase hochselektiv messen kann (Bild 12), oder ein Digital-Oszillograph mit eingebautem Drucker und Auswertesoftware. Mittels solcher Spezialgeräte lassen sich zuverlässige Messungen auch bei großen Anlagen mit den kleinen Versuchsströmen problemlos durchführen.

Die Bestimmung der Phasenlage von Erd-

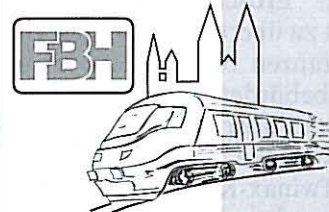


Bild 10: Messung von Erdleiterströmen in der Schienenstromrückführung mit kleinem Rogowski-Stromwandler.

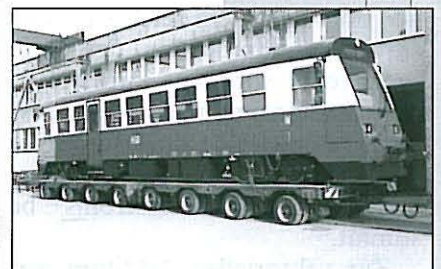


Bild 11: Messung des Erdseilstromes am Mastfuss mit grosser Rogowski-Spule.

Mit uns
fahren
Sie gut!



Schienenfahrzeuge aus Halberstadt



➤ Projektierung
➤ Konstruktion
➤ Neubau / Umbau
➤ Modernisierung
➤ Instandhaltung
von Schienenfahrzeugen

Deutsche Bahn **DB**

Fahrzeugbau Halberstadt
Magdeburger Straße 29
D-38820 Halberstadt

Telefon: 0 39 41 / 52 388
Telefax: 0 39 41 / 52 492
Internet: www.fbhbs.de
e-mail: info@fbhbs.de

stromanteilen in Erdleitern und Kabelmänneln erfordert, ein Referenzsignal des versuchsmässig eingespeisten Erdschlussstroms zum Messort zu übertragen. Dieses wird bei Distanzen bis etwa 100 m mit einem bebürdeten Stromwandler erfasst und über eine abgeschirmte und verdrehte Zweidrahtleitung (IBM Twinax-Kabel) zum Messplatz übertragen, wo die Phasenverschiebung zwischen dem Referenzstrom und dem gemessenen Teilstrom bestimmt wird.

Bei größere Distanzen bis circa 1 km zwischen Messort und Einspeisestelle wird das Referenzsignal per Funk übertragen. Diese Technik wird nur in Spezialfällen angewendet, zum Beispiel wenn Kabelführungen von Freileitungen mit weit entfernten Endmasten vorhanden sind. Bei jedem detektierten positiven Nulldurchgang des Referenzstroms wird ein kurzer Synchronisationsimpuls an den Messplatz gesendet und dort durch Vergleich mit diesem die Phasenverschiebung des Messstroms bestimmt.

Zur vektoriellen Addition werden die Erdstromanteile in Real- und Imaginärteil zerlegt. Die Subtraktion ihrer Summe vom eingespeisten Strom ergibt den Stromanteil, der durch den Erdboden fließt



Bild 12: Messeinrichtung zur Erfassung von Schleifenimpedanzen, Erdleiterströmen und Differenzspannungen.

und der Quotient aus der Erdungsspannung U_E und diesem Differenzstrom die Erdungsimpedanz ohne Anteil von Schienenstromrückführungen, Erdseilen und Kabelschirmen. Daran kann dann die im Boden verlegte Erdungsanlage des UW beurteilt werden.

5 Ergebnisse durchgeführter Erdungsmessungen

Die Dokumentationen der bei den SBB-UW durchgeführten Erdungsmessungen beinhalten folgende Informationen:

- Gemessener Verlauf von Potenzialtrichtern zur Abschätzung der Erdungsimpedanz,
- gemessene Einwirkspannungen als Tabelle oder als Säulendiagramm mit einem Planausschnitt, der den Ort der durchgeführten Stichprobenmessungen dokumentiert; Beurteilung der Anlage bezüglich der Zulässigkeit der Einwirkspannungen und der noch vorhandenen Reserve für die maximal möglichen Fehler-Erdschlussströme,
- Mit- und Nullimpedanzwerte der Bahnstromleitung, die für die Einspeisung des Fehlerstroms verwendet wurde,
- Verteilung der Erdfehlerströme in abgehenden Erdleitern wie Schienenstromrückführungen, Erdseilen, geerdeten Kabelschirmen und so weiter,
- Empfehlungen für Abhilfemassnahmen bei Vorliegen potenzieller Personengefährdung durch unzulässige Einwirkspannungen oder bei technischen Unzulänglichkeiten.

Hiernach wurden die Messdaten der 44 untersuchten Erdungssysteme statistisch ausgewertet.

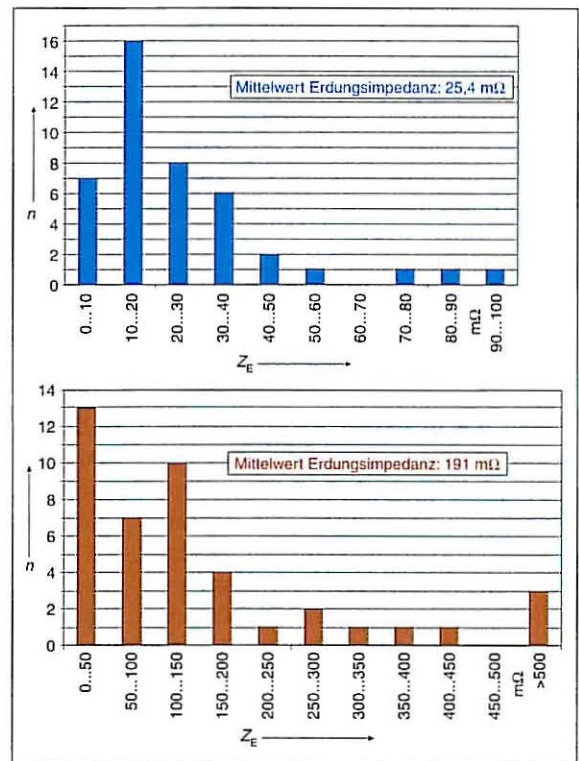


Bild 13: Statistische Verteilung der Erdungsimpedanzen von 44 Bahnunterwerken.

oben gemessen inklusive Wirkung aller abgehenden Erdleiter

unten gerechnet ohne Wirkung der Erdleiter
unterschiedliche Abszissen- und Ordinatenmassstäbe beachten!

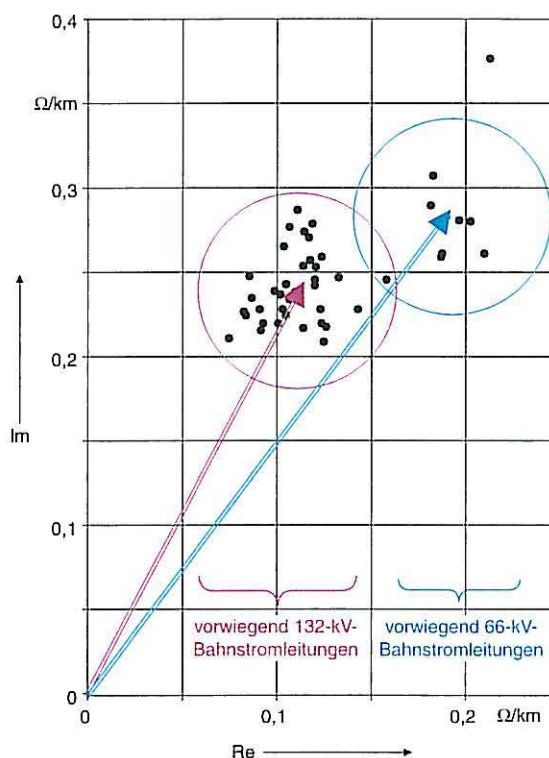
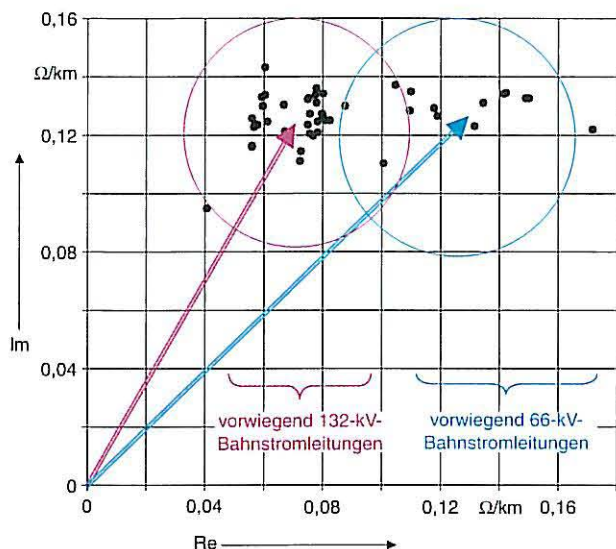
5.1 Erdungsimpedanzen

Die resultierenden Gesamt-Erdungsimpedanzen inklusive Wirkung der Schienenstromrückführungen und anderer abgehender Erdleiter sind bis auf wenige Ausnahmen verhältnismässig konzentriert verteilt (Bild 13). Die geringe Streuung zeigt, dass alle untersuchten Erdungssysteme sehr niederohmig mit dem Schienennetz verbunden sind. Werte über 60 mΩ stammen vornehmlich von fahrbaren UW mit begrenztem Erdungssystem und meist ohne ausgedehnte Gleissysteme.

Bei der Bewertung der Erdungsimpedanzen für den Personenschutz vor gefährlichen Berührungsspannungen sind die Erdschlussabschaltzeiten mit maßgebend [3; 4; 5].

Die Erdungsimpedanzen ohne Einbezug von Gleisrückführungen, Erdseilen und geerdeten Kabelschirmen streuen hingegen erheblich (Bild 13), was die sehr unterschiedlichen Erdbodenleitfähigkeiten im schweizerischen Alpenraum

Bild 14: Gemessene Impedanzen von Bahnstromfreileitungen. jeder Punkt = eine als Versuchsstromschleife verwendete Leitung
links Mitimpedanzen
rechts Nullimpedanzen
unterschiedliche Koordinatenmassstäbe beachten!



widerspiegelt. Im Mittel übernehmen bei Erdschlüssen im Hochspannungsnetz die metallischen Leiter 75% des Erdfehlerstroms.

Beim Unterwerk Zürich [6] wurde die Erdungsimpedanz inklusive der Wirkung aller Erdungsverbindungen zu 43 mΩ und ohne diese zu 133 mΩ.

5.2 Mit- und Nullimpedanzen von Bahnstromleitungen

Die Ergebnisse der systematischen Messung der Mit- und Nullimpedanzen aller Bahnstromleitungen, die für die experimentelle Einspeisung des Erdfehlerstroms ver-

wendet wurden, sind in Bild 14 dargestellt. Die Daten betreffen ausnahmslos Freileitungen. Zwischen Einzelsträngen und Gemeinschaftsleitungen wurde nicht unterschieden, sodass die Werte auch hier stärker streuen. Im Wesentlichen können sowohl die Mit- wie die Nullimpedanzen in zwei unterscheidbare Gruppen unterteilt werden. Wegen des meist kleineren Leiterquerschnitts der 66-kV-Freileitungen und den dort teilweise noch vorherrschenden Stahlerdseilen haben diese in der Regel einen höheren Realteil in der Leitungsimpedanz.

5.3 Frequenzabhängigkeit der Erdungssysteme

Um die Unterschiede zwischen Bahnerdungssystemen und 50-Hz-Anlagen bei Erdschlüssen zu kennen wurde die Frequenzabhängigkeit einiger Erdungssysteme untersucht.

Eine Konsequenz der frequenzabhängigen Erdübergangsstromverteilung ist, dass sowohl Erdungs- als auch Einwirkspannungen mit der Messfrequenz zunehmen (Bild 7). Die Messungen zeigten, dass bei einer Frequenzerhöhung um 1 Hz, also 6% von 16,7 Hz die Erdungsimpedanz wie auch die

Wir lassen den ICE rollen...

... damit die Menschen in Deutschland mobil bleiben.
Rund ein Viertel des Bahnstromes in Deutschland
kommt aus unseren beiden Kernkraftwerksblöcken.

Sicher ✓
Saubere ✓
Umweltfreundlich ✓

Ihr GKN

GEMEINSCHAFTSKERNKRAFTWERK
NECKAR GMBH
POSTFACH 11 62
74380 NECKARWESTHEIM
IHRE HOT-LINE ZU UNS:
07133 - 13 32 97
Fax:
07133 / 1 76 45
e-Mail: info@gkn-gmbh.de
Internet: www.gkn-gmbh.de

Einwirkspannungen im Mittel um etwa 1,6% zunehmen. Deshalb darf die Messfrequenz nicht zu sehr von der Betriebsfrequenz abweichen; für eine konservative Bewertung der Einwirkspannung muss sie darüber liegen.

6 Prinzipielle Probleme und Grenzen von Erdungsmessungen

Selbst bei Beherrschung aller messtechnischen Schwierigkeiten wie zum Beispiel die Eliminierung von Störspannungen bleibt bei Erdungsmessungen eine Reihe prinzipieller Probleme bestehen, welche oft erhebliche Unsicherheiten bei der Interpretation der Ergebnisse zur Folge haben. Ebenso sind der Reproduzierbarkeit von Erdungsmessungen Grenzen gesetzt.

Die Hauptursachen dafür liegen in den Eigenschaften des Erdbodens. Dessen spezifischer Widerstand ist zeitlich nicht konstant, sondern schwankt jahreszeitlich mit der Erdbodenfeuchte und der Temperatur [7; 10; 11]. Weil er ferner lokal wechselt, hängen Messergebnisse der Einwirkspannung auch vom genauen Ort der Kontaktstelle mit der Messsonde ab.

Diese Tatsachen schlagen sich in einer Streuung der Werte von Erdungsimpedanzen und vor allem von Berührungsspannungen nieder. Wenn Letztere mit dem Belastungswiderstand 1 k Ω gemessen werden, wird nach dem Spannungsteilerprinzip die Messspannung abhängig vom Übergangswiderstand der Bodenelektrode. Gemäss eigenen Versuchen streuen dadurch die Ergebnisse im Mittel um typisch $\pm 30\%$. Bei neu verlegten erdfühli- gen Leitern reduziert die Verdichtung des Erdreichs in der Umgebung langsam den Erdübergangswiderstand, was normalerweise über viele Monate andauert [7].

Da die Erdbodenleitfähigkeit aus geologischen Gründen zu grösseren Tiefen hin abnimmt, bilden allfällige Erdschlussströme keine kugelsymmetrischen Strömungsfelder um die Erdungsanlagen, sondern fliessen stärker an der Oberfläche

ab. Dieser Effekt erschwert bei der Ausmessung von Potenzialtrichtern die Stabilisierung hin zum neutralen Potenzial. In manchen Fällen ergibt sich kein eindeutiger Endwert [8].

Diese Unsicherheit in der Erdungsimpedanz wird noch dadurch verstärkt, dass die Erdschlussströme Wechselströme sind, die den Stromverdrängungseffekten im Erdboden unterworfen sind und sich nicht beliebig weit ausbreiten, sondern den Erdschlussstromkreis in einer möglichst engen Schleife schliessen wollen. Dadurch entsteht eine stark asymmetrische Erdungsstromverteilung um die untersuchte Erdungsanlage, weil der experimentelle Erdschlussstrom nur von einer Seite her eingespeist wird [8].

Ein weiterer Grund sind ausgelagerte, aber erdungsmässig verbundene Anlagenteile, allem voran das Schienensystem, aber auch beispielsweise Endmasten von Kabelausführungen. Dadurch ist die Erdungsanlage nicht eindeutig begrenzt und die Erdungsimpedanz nicht zuletzt auch aus diesem Grund nicht genau definierbar. Deshalb hängt das Ergebnis der Messungen von Einwirkspannungen von der richtungsabhängigen Stromverteilung der erdschluss-speisenden Leitung ab und der wesentliche Einfluss, den die Auswahl der Bahnstromleitung für die Versuchsstromspeisung hat, ist bei der Beurteilung jeder einzelnen Erdungsmessung zu berücksichtigen.

Ein richtiges Abbild der Erdschluss-situation würde nur erreicht, wenn die Einspeisung des Erdschlussstroms gleichzeitig über alle erdschluss-speisenden Leitungen erfolgen würde. Eine solche Erdungsmessung ist jedoch in der Praxis wohl nur ausnahmsweise machbar.

Die diskutierten Schwierigkeiten zeigen, dass Erdungsmessungen keineswegs den Anspruch von Präzisionsmessungen erheben können. Für die Abklärung der Gefährdung durch hohe Einwirkspannungen kann allerdings die verhältnismässig grobe Messtechnik akzeptiert werden, denn den experimentellen Unsicherheiten stehen der statistische Charakter des Sicherheits-

problems und die schwer definierbare Gefährdungssituation gegenüber. Ausschlaggebend für die Praxis sind wohldefinierte Messprozeduren, welche die ungünstigsten Gefahrensituationen realistisch nachbilden.

7 Zusammenfassung

Durch erweiterte Messmethoden und speziell entwickelte Messgeräte, insbesondere für die systematische Messung von Erdungsstromverteilungen, kann nebst den Wirkungen des Erdungsstroms im Erdreich auch der in den Schienenstromrückführungen und in anderen geerdeten Leitern fliessende Fehlerstrom untersucht werden. Mit einer für die Erdungsmessung versuchsweise eingerichteten Erdschluss-schleife lässt sich eine Erdschlussstrombilanz erstellen, womit alle Erdungsstromanteile quantifiziert werden können. Dadurch können Fehler und Schwachstellen in der Erdungsanlage ausfindig gemacht werden. Die Stromverteilung gibt überdies nützliche Hinweise auf erhöhte Einwirkspannungen und auf Verbesserungsmassnahmen. Um den ungünstigsten Fall bezüglich der möglichen Berührungsspannungen abzudecken, ist eine Erdungsmessung mit Fehlerstromspeisung in eine Bahnstromleitung einer solchen in das Oberleitungsnetz vorzuziehen.

Bei den Messungen ist mit ohmschen und induktiven Einkopplungen zu rechnen, bei hochohmigen Messgeräten in Freiluftanlagen auch mit kapazitiven. Als Ausweg hat sich die Verwendung von Versuchsströmen mit von der Netzfrequenz abweichenden Frequenzen bewährt, weil dabei einfache Filter Störsignale hoch wirksam unterdrücken können. Eine für diesen Zweck besonders leistungsfähige Filtermethode ist die mit dem Versuchsstrom phasensynchrone Gleichrichtung (Lock-in-Technik oder Einfangverstärkertechnik).

Die Ergebnisse der 44 durchgeführten Erdungsmessungen zeigen, dass der allgemeine Zustand der Bahn-UW-Erdungen ausreichend

war. Nebst einigen lokalen Detailverbesserungen waren nur bei zwei UW nennenswerte Modifikationen des Erdungssystems durch verstärkte Schienenstromrückführungen erforderlich.

Literatur

- [1] Verordnung über elektrische Anlagen von Bahnen (VEAB), SR 734.42, 5.12.1994.
- [2] Ausführungsbestimmungen zur Verordnung über elektrische Anlagen von Bahnen (AB-VEAB), Mai 1995.
- [3] Verordnung über elektrische Starkstromanlagen (Starkstromverordnung) vom 30. März 1994.
- [4] SEV-Regel 3755 (1999-03) Erden als Schutzmaßnahme in elektrischen Starkstromanlagen.
- [5] prEN 50179, Starkstromanlagen mit Nennwechselspannungen über 1 kV.
- [6] Lörtscher, M.; Voegeli, H.: Bahnrückstromführung und Erdung beim Unterwerk Zürich. In: Elektrische Bahnen 99 (2001), H. 1-2, S. 51-63.
- [7] Erdungen in Starkstromnetzen. Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke

m.b.H. – VDEW. Frankfurt am Main: 3. Auflage, 1992.

- [8] Bräunlich R.: Die messtechnische Überprüfung von großen Erdungsanlagen. In: Bulletin SEV/VSE 1995, H. 23, S. 31-39.
- [9] Hoffmann, R.: Neues Messverfahren zur Eliminierung von Fremd- und Störspannungen bei Beeinflussungs- und Erdungsmessungen. In: Elektrizitätswirtschaft 91 (1992), H. 22, S. 1455-1462.
- [10] Wiesinger, J.; Hasse, P.: Handbuch für Blitzschutz und Erdung. Berlin: VDE, 1982.
- [11] Koch, W.: Erdungen in Wechselstromanlagen über 1 kV, Berechnung und Ausführung. Berlin: Springer, 2. Auflage, 1955.



Dr. sc. techn. Reinhold Bräunlich (43), Studium und Promotion im Fach Elektrotechnik an der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) Zürich; nach Industrietätigkeit seit 1990 bei der Fachkommission für Hochspannungsfragen (FKH) und dort heute Geschäftsleiter; Mitglied des Technischen Komitees (TK)

Erdungen und Vorsitzender des TK 81 Blitzschutz im Schweizerischen Elektrotechnischen Komitee CES.

Fon: +41 (0) 1-2 53-62 63,
E-Mail: braeunlich@fkf.ch



Dipl. El.-Ing. ETH Günther Storf (33), Studium Elektrotechnik an der ETH Zürich; seit 1994 bei der Fachkommission für Hochspannungsfragen (FKH).
Fon: +41 (0) 1-2 53-62 63,
E-Mail: storf@fkf.ch

Adresse: FKH, Voltastrasse 9, CH-8044 Zürich;
Fax: +41 (0) 1-2 53-62 60



Dipl. Ing. Max Sigg (57), Elektrotechnikstudium an der Zürcher Hochschule in Winterthur, Abschluss 1967, und später an der ETH Zürich, Abschluss 1978; Chef der Sektion Dimensionierung in der Division Infrastruktur Energie Schweizerische Bundesbahnen (SBB).

Adresse: Industriestrasse 1,
CH-3052 Zollikofen; Fon: +41-5 12-20-36 62,
Fax: -38 25, E-Mail: max.si.sigg@sbb.ch

Spie Enertrans GmbH

Das europäische Unternehmen



Neu- und Umbau von Oberleitungen für die Deutsche Bahn AG inklusive Weichenheizungen, Gründungen, 50 Hz- und Signalanlagen

einige unserer Referenzen:

- ▣ Neu- und Umbau der Oberleitungsanlagen auf der NBS Köln-Rhein/Main im Abschnitt PA 35
- ▣ Umbau der Oberleitungsanlage im Zuge der Einführung der NEITECH - Züge im Abschnitt Camburg-Großheringen auf der ICE-Linie 8 Berlin-München

Spie Enertrans GmbH

13407 Berlin – Reinickendorf ☐ Aroser Allee 62
Telefon: 030 / 414726 – 0 ☐ Telefax: 030 / 414726 – 220
<http://www.spie-enertrans.de>

SPIE

Spie Enertrans