

Zusammenschluss der Bahn- und Netzerdung

16,7-Hz-Wechselstrombahnen mit dem 50-Hz-Netz vermaschen

Höhere Triebfahrzeugleistungen sowie die Verdichtung der Fahrpläne können sich negativ auf bahnfremde Erdungssysteme und Versorgungseinrichtungen auswirken. Die Problematik der Bahnrückstromführung verlangt angepasste Massnahmen. In vielen Fällen ist ein stark vermaschter Zusammenschluss zwischen der Bahnerde und dem Erdungssystem der öffentlichen Stromversorgung die geeignete Lösung. Mit einem engmaschigen Potenzialausgleichssystem werden die Erdungssysteme auf ein einheitliches Potenzial gelegt. Die Ausführung ist vergleichbar mit dem Hauptpotenzialausgleich (HPA), der in jedem Gebäude gefordert wird. Der Hauptpotenzialausgleich dient dem Zweck, die Körper elektrischer Betriebsmittel und fremde leitfähige Teile auf gleiches oder annähernd gleiches Potenzial zu bringen, um den Schutz und die Sicherheit zu erhöhen. Die Erkenntnisse in Dietlikon zeigen die durchwegs positiven Betriebserfahrungen über 20 Jahre auf.

Eine dauerhaft wirksame Trennung der Erdungssysteme der Bahn und des öffentlichen Netzes ist nur auf dem Papier möglich, kaum in der Realität. Es bestehen immer unbekannte Verbindungen, die

René Mathys

unbewusst bei Arbeiten und Änderungen gemacht werden. Die Netzbetreiber sollten die Bahn-/Netzerdungsverhältnisse in ihrem Gebiet genau kennen. Keine oder unvollständige Erdungsunterlagen sowie Unsicherheiten über den Zustand können sich negativ auf die einwandfreie Funktion und die Betriebssicherheit der Anlagenteile und Versorgungseinrichtungen auswirken.

In der Praxis erreichen die Potenzialdifferenzen bei getrennten Erdungssystemen beachtliche Werte. Bei bahngeerdeten Gebäuden, die vom öffentlichen Stromversorgungsnetz versorgt werden, kann das Potenzial bei der Durchfahrt eines Zuges zwischen der Bahn- und Netzerde von 0 bis über 50 V variieren, abhängig vom Bahnrückstrom. Bei gleich-

zeitiger Berührung von elektrisch leitfähigen Teilen der getrennten Erdungssysteme ist eine Gefährdung von Personen durch die anstehende Berührungsspannung möglich. Bei ungewollten bzw. zufälligen Verbindungen der getrennten Erdungssysteme sind in bahngeerdeten Gebäuden und Einrichtungen – ohne verlässliche Überwachung der Trennung – vor allem die Schutzleiter mit kleinen Leiterquerschnitten durch Überhitzung brandgefährdet. Im öffentlichen Stromversorgungsnetz sind besonders die PEN- und PE-Leiter $< 10 \text{ mm}^2$ von Strassen-/Wegbeleuchtungsanlagen im Nahbereich der Bahn sowie bei der Wasserversorgung die metallischen und elektrisch durchverbundenen Leitungen in Strassen entlang des Bahntrassees gefährdet.

Dietlikon vor 1987

Bei der Wasserversorgung von Dietlikon ereigneten sich vor 1987 vermehrt Schäden an älteren Gusswasserleitungen (Nennweite 125 mm Ø, mit guter elektrischer Längsleitfähigkeit). Diese sind mit

dem Netz-PEN-Leiter verbunden und befinden sich im Nahbereich der Bahn, in den Strassen entlang des Bahntrassees. Die Schäden verursachten erheblichen Kostenaufwand. Die Ursachen für die Korrosionsangriffe waren hauptsächlich auf Wechselstrombeeinflussungen durch Streuströme der Bahn zurückzuführen. Infolge Wechselstromkorrosion mit einer hohen Wechselstromdichte (kritischer Wert $> 30 \text{ A/m}^2$) an den Angriffsstellen sind metallische, elektrisch längsleitfähige Wasserleitungen, aber auch andere Rohre aus metallischen Werkstoffen erhöht gefährdet. Das typische Schadensbild unter Ausbildung von Mulden- und Lochfrass mit relativ geringer Fläche (ca. 1 bis 5 cm^2) wurde jedes Mal festgestellt. Der undefinierte Stromdurchgang zwischen den metallischen Wasserleitungen und dem Erdboden (Metall/Elektrolyt) ist mit elektrochemischen Reaktionen verbunden, die zu Korrosion bzw. Materialabtrag und schliesslich zu Lochfrass führen. Bei den Reparaturarbeiten an den Wasserleitungen war es unbedingt erforderlich, vor dem Heraustrennen der defekten Stelle die Wasserleitung mit einer Erdungsgarnitur zu überbrücken. Ohne diese Überbrückungsmassnahmen entstanden gefährliche Funkenübersprünge durch Bahnrückströme über die Wasserleitung, was die Reparaturmannschaft in Gefahr brachte.

Im bahngeerdeten Bahnhofsgebäude, das an die öffentliche Stromversorgung angeschlossen ist, war die metallene Netzwasserleitung durch ein Isolierstück von den internen Hauswasserleitungen elektrisch getrennt. Bei der Durchfahrt der Züge traten zwischen den getrennten Wasserleitungen Spannungen von 30 bis über 50 V auf, der zulässige Grenzwert von 50 V wurde von schweren Güterzügen und Mehrfachzugskompositionen überschritten. Sobald in einer Anlage kritische Werte der Berührungsspannung auftreten, sollten wirksame Massnahmen für eine dauerhafte Reduzierung getroffen werden.

In Bild 1 sind die Beeinflussungen der getrennten Erdungssysteme dargestellt. Die Streuströme der Bahn fliessen unkontrolliert durch bahnfremde Erdungs-

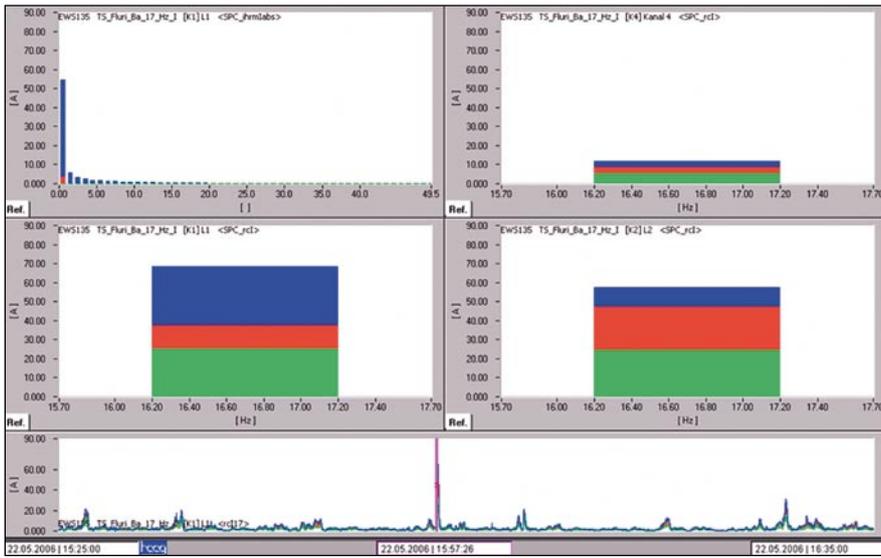


Bild 3 Wie sich der Bahnrückstrom in der Transformatorstation des EW Dietlikon verteilt
58 A (Mitte rechts) fließen in die Erdungsschirme der Mittelspannungskabel, der Rest von 12 A (im Bild oben rechts) in die Netz-PEN-Leiter der NS-Kabel

hergestellt sein. Die neuen Verbindungen müssen auf die betrieblichen Auswirkungen durch die Bahnrückströme mit Messungen überprüft werden. In Transformatorstationen und Verteilkabinen ist zusätzlich eine Netzqualitätsmessung von Vorteil. Weitere Verbindungen sollten raschmöglichst, bei jeder sich bietenden Gelegenheit, erstellt werden, sodass ein stark vermaschtes Potenzialausgleichssystem zwischen den Erdungssystemen der Bahn und der öffentlichen Stromversorgung entsteht. Weiter kann darauf hingewiesen werden, dass durch Parallelschaltung von gut leitfähigen Nebenpfaden

den zum Netz-PEN-Leiter die Wirksamkeit der Nullung in doppelter Hinsicht verbessert werden kann, indem gleichzeitig eine Verminderung der Fehlerspannung und eine Vergrößerung des Fehlerstroms erreicht wird. Alle diese Massnahmen wirken sich auf das Stromversorgungsnetz vorteilhaft aus.

Geeignete Anschlussstellen für den Zusammenschluss der beiden Erdungssysteme sind vorwiegend Transformatorstationen und Kabelverteilkabinen. Die Verbindung zur Bahnerde wird über die Netz-PEN-Leiterschienen im öffentlichen Stromversorgungsnetz hergestellt.

Hier gilt ganz besonders: Je mehr Verbindungen mit den entsprechenden Leiterquerschnitten erstellt werden, desto besser, engmaschiger und problemloser sind die Erdungssysteme.

Baustromanschlüsse, temporäre Anlagen und Krane im Bahnspannungsbereich können in den meisten Fällen mit beiden Erdungssystemen sowie den entsprechenden Leiterquerschnitten ($\geq \text{Cu } 95 \text{ mm}^2$) verbunden werden. Grosse Aufmerksamkeit muss dem Aspekt gewidmet werden, dass Fehlerströme metallene Strompfade zurück zum Sternpunkt der Stromquelle zur Verfügung haben und nicht nur über das Erdreich bei Schutzerdung (TT-System) zurückfliessen. Alle Anschlüsse müssen mit getrennten Neutral- und Schutzleitern, also im TN-S-System, erstellt werden. Auch für die Sicherstellung des Personenschutzes ist das die ideale Lösung. Diese Massnahmen sind selbstverständlich unter den Betriebsinhabern zu vereinbaren und schriftlich festzuhalten.

Besondere Massnahmen sind zum Teil bei Kandelabern von öffentlichen Beleuchtungsanlagen erforderlich, die nur mit der Bahnerde verbunden sind, z.B. Fusswegüberführungen. Die PEN- bzw. PE-Leiter der Kabelanlagen müssen für die zusätzlichen Bahnrückströme ausgelegt sein. Leiterquerschnitte unter 10 mm^2 sind infolge von Bahnrückströmen durch Überlastung gefährdet. Wenn ein Zusammenschluss der Erdungssysteme vorerst nicht möglich ist, weil beispielsweise keine grösseren Kabel verlegt werden können, so ist dafür zu sorgen, dass die Schutzbedingungen vollumfänglich erfüllt werden. Der Idealzustand wird erst erreicht, wenn die Bahn- und Netz-erde mit den entsprechenden Leiterquerschnitten zusammengeschlossen ist.

Für Wohn-/Gewerbe- und Industriebauten mit grossflächigen Fundamentarmierungen in der Nähe der Bahn oder Betriebe mit Gleisanschluss sowie für Gewerbebetriebe mit empfindlichen Einrichtungen ist es zweckmässig, wenn zusätzlich die Gebäudearmierungen mit kleinen Maschenweiten von etwa 10–15 m in das vermaschte Erdungssystem der Bahn-/Netzerde einbezogen werden. Dicht beieinanderliegende Stahlbetonfundamente, die miteinander verbunden werden, können wie eine Stahlplatte wirken. Je enger die Maschen sind, desto günstiger wird deren Einfluss auf die EMV (kleinere Impedanz). Alle elektrischen Installationen und Anlagen in den Gebäuden müssen ausnahmslos im TN-S-System, mit getrennten Neutral- und Schutzleitern, erstellt werden. Fortschrittliche Netzbetreiber verwenden bei allen

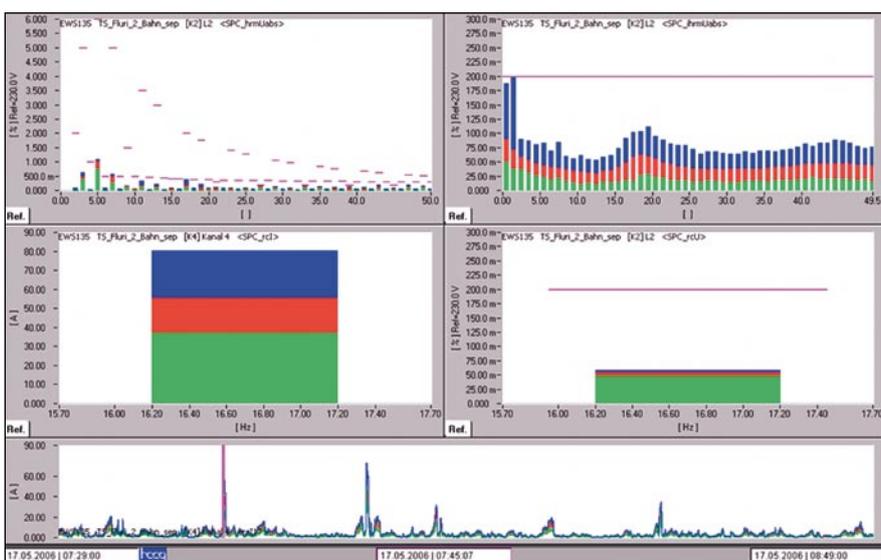


Bild 4 16,7-Hz-Anteil im EW-Netz
Die 16,7-Hz-Spannung beim Höchstwert des Bahnrückstroms erreicht im Maximum 0,06% bei einem Grenzwert von 0,2% für zwischenharmonische Spannungen (Mitte rechts). Kein Grenzwert bis zur 50. harmonischen und 49,5. zwischenharmonischen Spannung wird durch die Maximalwerte der Bahnrückströme überschritten (im Bild oben links und rechts).



Bild 5 Vermaschte Verteilkabine einer Wohnüberbauung

Neubauten für die Hausanschlüsse ein Fünfleiterkabel. Der Netzanschluss im TN-S-System bietet die optimale Gewähr für einen dauerhaften, störungsarmen Betrieb.

Beurteilung von Netzurückwirkungen

Bei der 16,7-Hz-Bahnfrequenz kann der Grenzwert in Bezug auf die Netzurückwirkungen sinngemäss wie eine Zwischenharmonische/Subharmonische²⁾ bewertet werden. Die Pegel für zwischenharmonische Spannungen dürfen nach

der Norm VDE 0839 Teil 2-2 und 2-4 in öffentlichen Netzen und Netzen der EMV-Umgebungsklassen 1 und 2 maximal $0,2\% = 0,46\text{ V}$ betragen.

Eine Transformatorstation vom EW Dietlikon steht ca. 12 m von der Gleisachse entfernt an einer viel befahrenen Bahnstrecke auf privatem Grund. Der Anschluss an die Bahnerde erfolgt mit einem 150-mm^2 -Kupferleiter direkt an ein Ende der PEN-Leiterschienen in der Niederspannungsverteilung. Alle Erdungen auf der PEN-Leiterschienen sind an einem Punkt angeschlossen, nahe beieinander. Vom Hauptanteil des Bahnrückstroms

wird somit nur ein kleiner Teil der PEN-Leiterschienen durchflossen. Auf diese Weise können die elektromagnetischen Felder wirksam reduziert werden. Von dieser Transformatorstation werden seit Jahren folgende unterschiedliche Kunden mit Niederspannung (400/230 V) sicher versorgt, ohne Beeinflussung durch die Bahnrückströme:

- Fabrikgebäude mit empfindlichen Fräsaufmaschinen für den Formenbau und mit elektronischen Steuerungen für die Produktionsabläufe
- Diverse Gewerbebetriebe mit sensiblen Einrichtungen der Informationstechnik
- Kleingewerbebetriebe
- Wohnsiedlung
- Lichtsignalanlage ferngesteuert

Während 2 Wochen wurden mit dem Netzanalysator Haag Combi-Quant die Bahnrückströme gemessen und die Netzqualität überwacht. Alle relevanten Merkmale der Spannungsqualität nach den technischen Regeln zur Beurteilung von Netzurückwirkungen, D-A-CH-CZ-Verträglichkeit (L-N), wurden von den 16,7-Hz-Bahnrückströmen eingehalten. Aufgetretene EM-Störungen sind keine bekannt,

Bahnen uneinig, Starkstrominspektorat dafür

Die Schweizer Bahnen handhaben den Zusammenschluss respektive die Trennung der beiden Erdsysteme unterschiedlich. Rund ein Drittel der Erdsysteme ist mit den lokalen Energieversorgern verbunden, zwei Drittel der Schweizer Bahninfrastruktur ist getrennt, isoliert vom Netz der Elektrizitätswerke. Eine saubere Trennung sei möglich, versichern die Vertreter der SBB, die an einer gemeinsamen Sitzung das Thema diskutierten. Es sei aber darauf zu achten, dass keine unautorisierten Verbindungen zwischen den Erdsystemen erstellt würden, zum Beispiel bei Installationen im Niederspannungsbereich.

Das Eidgenössische Starkstrominspektorat stellt die zunehmende Vermaschung der Erdsysteme der Bahnen und der Elektrizitätswerke fest. Damit könne der Berührungsschutz einfacher erfüllt werden, da keine grossen Spannungsdifferenzen mehr auftreten könnten. Die steigenden Traktionsleistungen der Bahn sowie die steigenden Anschlussleistungen der Gebäude würden einen Zusammenschluss der Erdsysteme zunehmend erzwingen, da die erforderlichen Nullungsbedingungen bei getrennten Systemen oft nicht mehr eingehalten werden könnten.

Beim Zusammenschluss der Erdsysteme müssen drei Punkte beachtet werden: mögliche EMV-Probleme, ausgehend von den Bahnrückströmen, der Personenschutz und die Dokumentation. Rund ein Drittel des Stroms, den die Lokomotive verbraucht, fliesst ins Erdreich zurück. Wenn die Erdsysteme zusammengeschlossen werden, fliesst ein Teil über das Netz des EWs. Durch die steigenden Traktionsströme werden die EMV-Probleme

immer bedeutender und zwingen zu Gegenmassnahmen, insbesondere im bewohnten Gebiet. In der Verordnung über nicht ionisierende Strahlung (NISV, SR 814.710) ist für das magnetische Feld ein Grenzwert von $1\text{ }\mu\text{T}$ einzuhalten.

Der Personen- und Sachschutz gilt sowohl im normalen Betrieb als auch bei einem Störfall. Sind die Erdsysteme getrennt, müssen alle geerdeten, leitenden Teile des EW-Potenzials entweder vor Berührung geschützt werden oder so weit entfernt sein, dass nicht beide Systeme gleichzeitig berührt werden können (1,75 m Distanz). Werden die Erdsysteme verbunden, muss das EW auch bei einem Erdschluss den gesamten Strom ableiten können, ohne dass Stromspitzen lokale Installationen beschädigen. Ein allfälliger Zusammenschluss der Erdsysteme muss vom EW und der Bahn schriftlich festgehalten werden, damit die Situation genau dokumentiert ist und bei der Erhaltung und späteren Arbeiten oder Problemen keine Missverständnisse entstehen.

Ein Zusammenschluss ist also grundsätzlich möglich bei Wechselstrombahnen (dies gilt jedoch nicht für Gleichstrombahnen, die immer spezielle Massnahmen benötigen). Dabei müssen allerdings die lokalen Bedingungen eruiert und beurteilt werden. Zurzeit untersucht die SBB den Zusammenschluss der Erdungssysteme insbesondere in Bezug auf die Verschleppung der Traktionsströme in EW-Netze. Über die Ergebnisse wird später berichtet, nach Abschluss und Auswertung der laufenden Messungen.



Bild 6 Die mit der SBB-Erde verbundene Lichtsignalanlage arbeitet seit 1997 störungsfrei

von den Bahnrückströmen werden die Grenzwerte vollumfänglich eingehalten.

In Bild 3 ist ein über den Bahnerdungsanschluss in die Transformatorstation fließender Bahnrückstrom von 70 A (Bild unten und Mitte links) dargestellt. Davon teilen sich 58 A (Bild Mitte rechts) in die Erdungsschirme der Mittelspannungskabel bis zur nächsten an die Bahnerde angeschlossenen Transformatorstation auf und der Rest von 12 A (im Bild oben rechts) in die Netz-PEN-Leiter der NS-Kabel. Die Bandbreite des 16,7-Hz-Bahnrückstroms weitet sich auch auf die 0,5. Zwischenharmonische (25 Hz) mit etwa 55 A aus (Bild oben links).

Bild 4 zeigt ein Bahnrückstrom von etwa 80 A (im Bild Mitte links). In der Regel dauert der Stromdurchfluss während der Durchfahrt eines Zuges etwa 20–30 Sekunden, danach fällt der Strom bis gegen null ab (im Bild unten). Die 16,7-Hz-Spannung (Zwischenharmonische) beim Höchstwert des Bahnrückstroms erreicht im Maximum 0,06% bei einem Grenzwert von 0,2% für zwischenharmonische Spannungen (im Bild Mitte rechts). Kein Grenzwert bis zur 50. harmonischen und 49,5. zwischenharmonischen Spannung wird durch die Maximalwerte der Bahnrückströme überschritten (im Bild oben links und rechts). Die

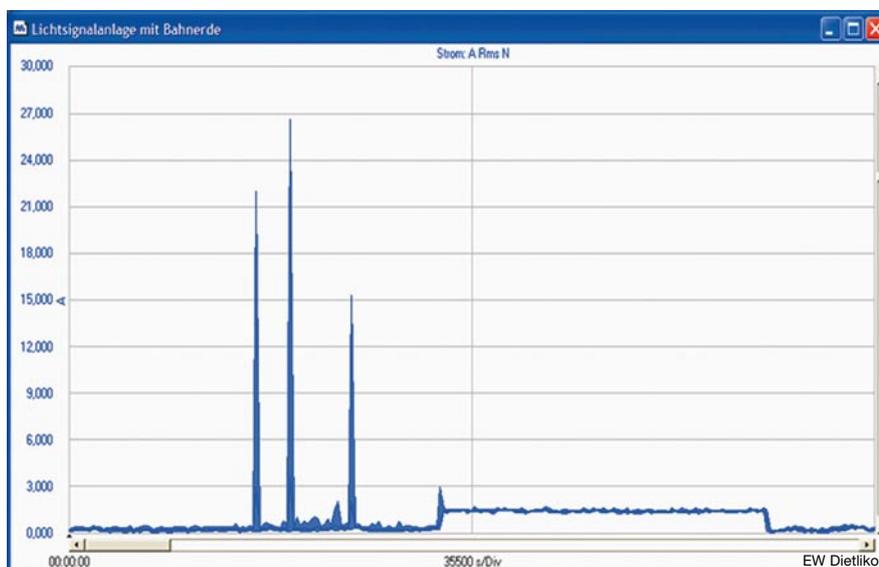


Bild 7 Bahnrückströme, die in die Lichtsignalanlage fließen

Grenzwerte sind mit roten Balken dargestellt.

Kabelverteilkabine und Lichtsignalanlage

Die Kabelverteilkabine in Bild 5 mit einem 150-mm²-Anschluss an die Bahnerde versorgt Wohn- und Einfamilienhausüberbauungen in der Nähe der Bahnlinie. Die Höchstwerte der Bahnrückströme erreichen etwa 50 A bei der Durchfahrt von Güterzügen und Mehrfachzugskompositionen. Die Bahnrückströme teilen sich über die starken Netz-PEN-Leiter der NS-Kabel bis zum nächsten Bahnerdungsanschluss auf. In derselben Kabelverteilkabine sind in einem separaten Abteil TV-Verstärker sowie sensible Übertragungseinrichtungen und Wandler für das Internet untergebracht. Beeinflussungen und Störungen an diesen empfindlichen Betriebsmitteln sind keine aufgetreten, und in den bahnnahen Wohnungen sind weder Internetstörungen noch TV- und PC-Bildschirmbeeinflussungen durch die Bahnrückströme entstanden.

Das Joch der ferngesteuerten Lichtsignalanlage beim Bahnviadukt in Bild 6 ist direkt mit einem 50-mm²-Cu-Leiter mit der Bahnerde und der Netz-PEN-Leiterschiene der speisenden Kabelverteilkabine verbunden (seit 1997). Die gemessenen Bahnrückströme erreichen Werte bis 27 A (Bild 7). Auswirkungen für die an der Kabelverteilkabine angeschlossenen Kunden sind keine bekannt. Die Lichtsignalanlage funktioniert einwandfrei, es sind keinerlei Störungen aufgetreten.

Schlussfolgerungen

Die dauerhafte Wirksamkeit und lückenlose Trennung der beiden Erdungssysteme von Bahn und Netz ist schwer beherrschbar und auch mit erheblichem Betriebsaufwand sowie umfangreichen Überwachungseinrichtungen nicht vorbehaltlos gewährleistet. Die Messung der getrennten Erdungsanlagen kann erstaunlich tiefe Impedanzen aufweisen, sodass nur noch ein geordneter Zusammenschluss in Frage kommt.

Die gezielten Massnahmen für die Bahnrückstromführung durch den Zusammenschluss der Bahn- und Netzerde sind zweckmässig und zukunftssicher. Die Betriebserfahrungen erwiesen sich als durchwegs positiv. Der Zusammenschluss vor 20 Jahren hat sich in Dietlikon bestens bewährt.

Durch den Zusammenschluss werden die Erdungssysteme auf ein einheitliches Potenzial gelegt und verkleinern zudem im 50-Hz-Stromversorgungsnetz den

Gesamterdungswiderstand. Schäden an bahnfremden Anlagen und Einrichtungen konnten mit dem Zusammenschluss praktisch ganz verhindert werden. Nachfolgende Schäden und Störungen sowie Beeinflussungen, die auf die Bahnrückstromführung durch die vermaschten Erdungssysteme zurückzuführen sind, sind keine bekannt. Manche rätselhaften EMV-Phänomene sowie Schäden an Anlagen und Versorgungseinrichtungen, verbunden mit den entsprechenden zeitlichen sowie finanziellen Aufwendungen, können damit meistens vermieden werden.

Referenzen

- [1] Manfred Lörtscher: Gezielte Rückstromführung in Bahnstromanlagen, Bulletin SEV/VSE 21/1996
- [2] Wilhelm Rudolph und Otmar Winter: EMV nach VDE 0100, VDE-Schriftenreihe Band 66, VDE Verlag

Angaben zum Autor

René Mathys ist seit 1976 in der Energieversorgung tätig. Seit 1981 ist er bei den Gemeindewerken Dietlikon Betriebsleiter-Stv., zuständig für die Strom- und Wasserversorgung. Seine Spezialgebiete:

Spannungsqualität/Netzzrückwirkungen sowie elektrische Versorgungsnetze und die Erdungsproblematik. Gemeindewerke Dietlikon, 8305 Dietlikon, rene.mathys@dietlikon.ch

¹⁾ In der Schweiz ist im Zusammenhang mit dem Zusammenschluss der Erdsysteme insbesondere die Norm EN 50122-1 zu beachten: Bahnanwendungen – Orts-

festen Anlagen. Teil 1: Schutzmassnahmen in Bezug auf elektrische Sicherheit und Erdung.

²⁾ Zwischenharmonische oder auch Interharmonische sind sinusförmige Spannungen, deren Frequenz zwischen denen der Oberschwingungen liegt. Ihre Frequenz ist kein ganzzahliges Vielfaches der Grundschwingungsfrequenz. Die nicht ganzzahligen Anteile unterhalb der Netzfrequenz von 50 Hz werden auch Subharmonische genannt. Subharmonische müssen die Anforderungen für zwischenharmonische Spannungen erfüllen.

Résumé

Réunion de la terre ferroviaire et du réseau

Chemins de fer à courant alternatif 16,7 Hz maillés au réseau 50 Hz. L'augmentation de puissance des véhicules tracteurs et les horaires de plus en plus denses peuvent avoir des effets néfastes sur les systèmes de mise à la terre et d'alimentation étrangers aux chemins de fer. Le problème du courant de retour ferroviaire exige des mesures appropriées. Dans bien des cas, une interconnexion à mailles serrées entre la terre ferroviaire et le système de mise à la terre de l'alimentation électrique publique représente la solution appropriée. Un système d'équipotentialité à mailles serrées met les systèmes de terre à un potentiel unifié. L'exécution est semblable à la liaison équipotentielle principale exigée dans chaque bâtiment. La liaison équipotentielle principale a pour but de mettre les corps de moyens électriques d'exploitation et autres pièces conductrices à peu près au même potentiel afin d'améliorer la protection et la sécurité. Les résultats obtenus à Dietlikon présentent les expériences très positives faites en exploitation durant 20 années.