Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 90 (1999)

Heft: 12

Artikel: Netzrückwirkungen verursacht durch Streuströme von Strassenbahnen

Autor: Pfister, Werner / Rist, Hans

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-901957

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 13.07.2025

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

Netzrückwirkungen verursacht durch Streuströme von Strassenbahnen

Ein Teil der Rückströme von mit Gleichspannung betriebenen Strassenbahnen floss schon immer als sogenannter Streustrom über elektrisch leitende Werkleitungen zur speisenden Gleichrichteranlage zurück. Durch vermehrten Einsatz von Kunststoffrohren bei Gas- und Wasserleitungen verringert sich deren Längsleitfähigkeit zunehmend. In Zürich wurden die Netzrückwirkungen untersucht, welche entstehen, wenn man die PEN-Leiter des elektrischen Energieversorgungsnetzes über Drainagen (Dioden) mit dem Minuspol der Bahngleichrichter verbindet. Aufgrund der negativen Einflüsse auf die Versorgungsqualität, aber auch aus Sicherheitsgründen, werden solche Drainagen strikte abgelehnt. Zur Lösung der Streustromproblematik müssen die Traktionsströme konsequent über bahneigene Rückleitersysteme zurückgeführt werden.

■ Werner Pfister und Hans Rist

Ausgangslage

Die Verkehrsbetriebe der Stadt Zürich werden über 45 EWZ-Gleichrichterstationen mit einer Gleichspannung von 600 V_{DC} versorgt. Der Pluspol der Gleichspannung ist auf den Fahrdraht geführt. Die Rückströme fliessen über die Schienen und über sogenannte Rückleiterkabel zum Minuspol des Gleichrichters zurück. Der Minuspol der Gleichrichter (GR) ist in der Station nicht mit der Anlagenerde verbunden.

Da die Schienen im Tragbetonkörper erdfühlig verlegt sind, fliesst ein Teil des Rückstromes auch über andere, elektrisch leitende Materialien (z.B. Gas- und Wasserleitungen, metallische Umhüllungen der Netzkabel) in Richtung der Gleichrichterstation zurück. Diese sogenannten Streuströme treten an einer Stelle in die Werkleitung ein, benutzen diese über eine bestimmte Länge und treten dann an geeigneter Stelle wieder aus. An dieser Austrittstelle findet an der Werkleitung die Streustromkorrosion statt. Neuere Messungen ergaben, dass verrostete Ryf-Ringe einen Übergangswiderstand von einem Rohrabschnitt zum andern von bis zu 6 Ohm verursachen.

Adresse der Autoren
Werner Pfister und *Hans Rist*
Arbeitsgruppe Erdungsfragen
EWZ, Elektrizitätswerk der Stadt Zürich
Postfach
8050 Zürich

In den 80er Jahren hatte man in Zürich starke Rohrschadenkonzentrationen festgestellt. Einerseits barsten wegen der Druckerhöhung im Wasserleitungsnetz die korrodierten Schwachstellen, und andererseits begann der vermehrte Einbau von Kunststoffrohren. In der Folge wurde eine spezielle technische Kommission gegründet, um die Streustromproblematik koordiniert anzugehen. Die im Rohrnetz durchgeführten Messungen zeigten Streuströme bis 180 A_{DC}. Notabene: Ein dauernder Streustrom von einem Ampère löst jährlich rund 10 Kilogramm Eisen auf! Als Gegenmassnahme erstellte man 56 Streustromdrainagen (Bild 1), die sich bewähren und wesentlich mithelfen, die Anzahl der Rohrschäden zu stabilisieren.

Mit Hilfe der gerichteten Streustromdrainage wird die Korrosion bei intakter metallischer Verbindung verhindert, weil sich an der Austrittstelle zwischen Leitung und Erdreich keine chemischen Elemente bilden können, da der Streustrom über eine elektrisch leitende Verbindung zur Schiene zurückgeführt wird. Gas- und Wasserleitungen werden seit einigen Jahren vorwiegend mit Kunststoffrohren gebaut bzw. erneuert, was dazu führt, dass deren elektrische Längsleitfähigkeit in Zukunft immer geringer wird. Diese Umstände führen dazu, dass neue Möglichkeiten für die Rückführung der Streuströme gesucht werden.

Verwendung des PEN-Leiters als zusätzlicher Rückleiter?

Zur Abklärung der Streustromverhältnisse in der Stadt Zürich wurde von der städtischen Streustromkommission (Vorsitz Wasserversorgung Zürich) eine umfassende Messkampagne auf der Tramstrecke Schaffhauserplatz–Weinbergstrasse–Haldenegg in Zürich veranlasst. An den Messungen und Untersuchungen waren die folgenden Unternehmungen beteiligt:

- **VBZ** Verkehrsbetriebe der Stadt Zürich
- **SGK** Schweizerische Gesellschaft für Korrosionsschutz
- **HIU** Helbling Ingenieurunternehmung AG, Abt. Aktiver Korrosionsschutz
- **ESTI** Eidgenössisches Starkstrominspektorat
- **EWZ** Elektrizitätswerk der Stadt Zürich

Die Messkampagne soll aufzeigen, inwieweit bereits heute Streuströme der mit Gleichstrom betriebenen Strassenbahn über den PEN-Leiter (Schutz- und Neutralleiter) der Elektrizitätsversorgung fliessen und welche Netzrückwirkungen dabei zu erwarten sind. Als weiteres Resultat soll abgeklärt werden, ob eine direkte Drainage der Streuströme über entsprechende Dioden zwischen PEN-Leiter und dem Minuspol des Tramgleichrichters (GR) zulässig ist oder ob eine Erhöhung des Gleichstromes auf dem PEN-Leiter zu unzulässigen Netzrückwirkungen führt. Die Messungen im Gelände wurden nach entsprechenden Vorbereitungen in der Zeit vom 7. bis 9. April 1997 durchgeführt.

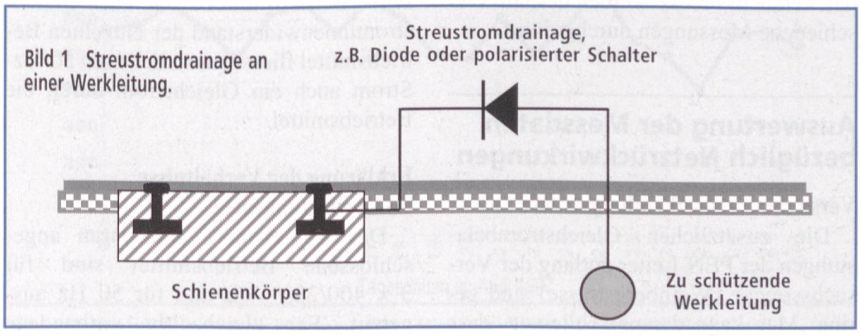


Bild 1 Streustromdrainage an einer Werkleitung.

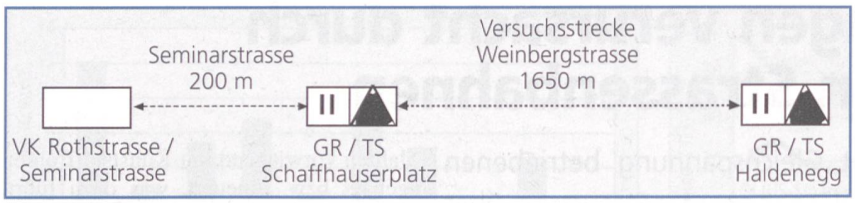


Bild 2 Schematischer Situationsplan.

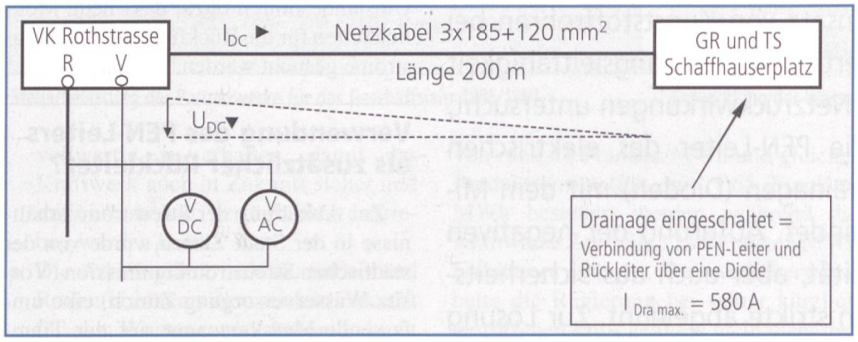


Bild 3 Messanordnung.

Messprogramm

Es wird vereinbart, dass an drei aufeinanderfolgenden Werktagen dieselben Messungen an denselben Messorten und während denselben Zeitperioden durchgeführt werden. Damit können die unterschiedlichen Gleichstrom- und Korrosionsbelastungen bei drei verschiedenen Drainageschaltzuständen festgehalten werden (bestehende Werkleitungsdrainagen im Versorgungsbereich der beiden Gleichrichter werden vorgängig ausgeschaltet).

Die Messresultate sind im Bericht 221-9376, SGK / HIU, vom 28. Mai 1997 festgehalten und werden hier nicht mehr aufgeführt (erhältlich bei Wasserversorgung Zürich, Herrn B.C. Skarda, Postfach, 8023 Zürich). Es sei jedoch erwähnt, dass die Drainagen zwischen PEN-Leiter und Minuspol des GR die Korrosionsgefährdungen an den Werkleitungen durchwegs vermindern.

Das EWZ hat seinerseits Interesse, mit den eigenen Messgeräten für Netzrückwirkungen die Gleichstrombeeinflussungen im Wechselstromnetz zu erfassen und auszuwerten. In den GR-Stationen und in den Verteilkabinen (VK) entlang der Versuchsstrecke werden deshalb verschiedene Messungen durchgeführt.

Auswertung der Messdaten bezüglich Netzrückwirkungen

Versuchsstrecke Weinbergstrasse

Die zusätzlichen Gleichstrombelastungen der PEN-Leiter entlang der Versuchsstrecke (Weinbergstrasse) sind gering. Man kann daraus schliessen, dass die Längsleitfähigkeit in der Weinbergstrasse durch die Tramgeleise und die vorhandenen Werkleitungen recht gut ist und somit nur ein kleiner Teil der Rückleiterströme auf die PEN-Leiter des Versorgungsnetzes ausweicht.

Messanordnung

Die folgenden Auswertungen beziehen sich auf die Messungen vom 9. April 1997 in der Verteilkabine Rothstrasse/ Seminarstrasse. Diese befindet sich etwa 200 m entfernt von der Gleichrichter- und Trafostation (TS) Schaffhauserplatz, und zwar in entgegengesetzter Richtung zur Weinbergstrasse.

Der Messort ist gewählt worden, weil die PEN-Leiter der Netzkabel, welche aus der Trafostation in Richtung der Verteilkabine speisen, hohe Gleichstromanteile von bis zu 15 A_{DC} führen, die jedoch nicht zwingend aus dem Fahrbetrieb der Versuchsstrecke stammen.

Aus Bild 3 ist ersichtlich, dass der Gleichstrom I_{DC}, welcher auf dem PEN-Leiter von der VK zur TS Schaffhauserplatz fliesst, eine Gleichspannung U_{DC} in der Verteilkabine erzeugt. Diese Gleichspannung steht parallel zur Wechselspannung an den Klemmen aller angeschlossenen Betriebsmittel an. Je nach Gleichstrominnenwiderstand der einzelnen Betriebsmittel fliesst zusätzlich zum 50-Hz-Strom auch ein Gleichstrom durch die Betriebsmittel.

Erklärung der Verhältnisse im Versorgungsnetz

Das Einheitsnetz und daran angeschlossene Betriebsmittel sind für 3 × 400/230 Volt und für 50 Hz ausgelegt. Für gleichzeitig vorhandene Gleichstromanteile bestehen keine direkten Normen. Wenn Gleichströme im Einheitsnetz fliessen, dann können die Auswirkungen in Form von Gleichspannungsüberlagerungen und diese mit Hilfe der Fourieranalyse sichtbar gemacht werden.

Da Gleichstrom- und Gleichspannungsanteile in den Wechselstrom-Versorgungsnetzen kleingehalten werden müssen, sind die zulässigen geradzahligen Oberschwingungs-Spannungspegel in der Norm IEC 1000-2-2 (VSE Empfehlung 2.72-97, Tabelle 5-1) sehr restriktiv bemessen worden.

Gleichstromanteile in Versorgungsnetzen können folgende Auswirkungen haben:

- zusätzliche Erwärmung der Bauteile in Betriebsmitteln
- zusätzliche, einseitige Magnetisierung von Eisenkernen (Spulen, Trafos)
- Erzeugung von zusätzlichen Brummgeräuschen bei induktiven Betriebsmitteln (Telefon, HiFi-Anlagen, Umwälzpumpen usw.)
- Beeinträchtigung von Schutzeinrichtungen (FI-Schalter usw.)
- zusätzliche Belastung der PEN-Leiter und der metallischen Umhüllungen der Netzkabel auch bei ausgeschalteten 50-Hz-Netzteilen (→ Arbeitssicherheit!)

Messdaten in der VK Rothstrasse/ Seminarstrasse

Als Betriebsmittel für die Versuchsmessungen wurde ein Kleintrafo 230/100 Volt mit einer Glühlampenlast gewählt. In Bild 4 werden die Stromkurven und die Oberschwingungsanteile des netzseitigen Trafostromes gezeigt.

Die Stromkurve auf Bild 4 entspricht dem typischen Verlauf eines symmetrischen Magnetisierungsstromes, während Bild 5 den Leerlaufstrom des Trafos unter zusätzlichem Einfluss der Gleichspannung zeigt. Hier ist deutlich zu erkennen, dass die positiven und negativen Stromhalbschwingungen nicht mehr gleich gross sind. Durch die überlagerte Gleichspannung wird der Eisenkern des Trafos einseitig vormagnetisiert, und der Magnetisierungsstrom nimmt als Folge der magnetischen Sättigung erheblich zu.

In den zugehörigen Balkendiagrammen erkennt man die Oberschwingungsanteile des Leerlaufstromes. In Bild 4 sind lediglich sehr kleine geradzahlige Oberschwingungsströme vorhanden (< 0,3% I_n). Somit sind im Strom keine Gleichstromanteile enthalten, und der Eisenkern des Trafos wird symmetrisch magnetisiert.

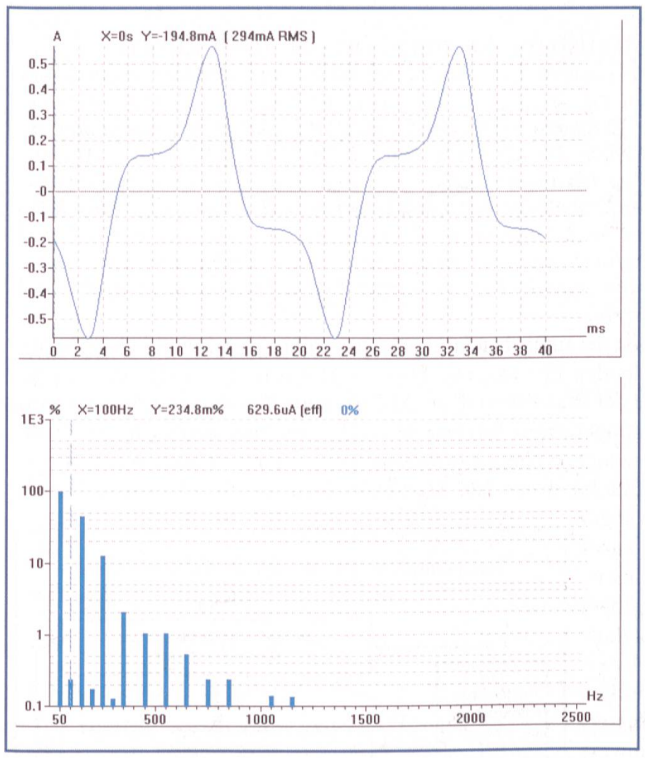


Bild 4 Verteilkabine Rothstrasse/Seminarstrasse, 9. April 1997, mit eingeschalteten Drainagen (Strom des leer laufenden Kleintrafos, ohne Gleichstrombeeinflussung; oben: Zeitdarstellung, unten: Frequenzspektrum).

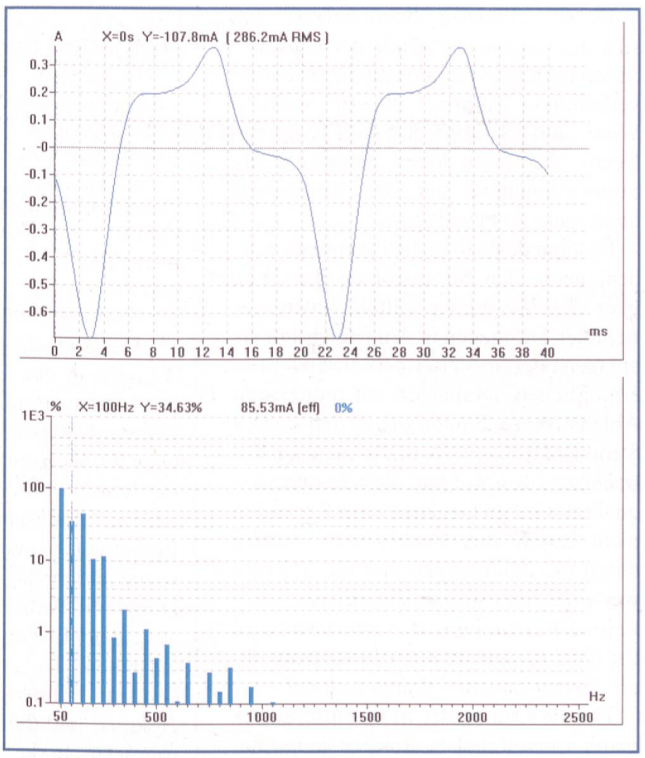


Bild 5 Verteilkabine Rothstrasse/Seminarstrasse, 9. April 1997, mit eingeschalteten Drainagen (Strom des leer laufenden Kleintrafos, mit Gleichstrombeeinflussung; oben: Zeitdarstellung, unten: Frequenzspektrum).

Die Messung für Bild 5 wurde zu einem Zeitpunkt aufgenommen, in welchem auf dem PEN-Leiter ein Gleichstrom-Rückstrom in Richtung Trafostation Schaffhauserplatz floss. Dieser Gleichstrom I_{DC} erzeugt auf dem PEN-Leiter des Netzkabels einen Längsspannungsabfall U_{DC}. An der Verbindungsstelle PEN-Rückleiter in der Trafostation ist diese Spannung sehr klein (Kurzschluss durch die Diode).

Je weiter man sich von diesem Kurzschlusspunkt in Richtung Verteilkabine entfernt, desto grösser wird die Gleichspannung. In der Verteilkabine konnte zwischen den einzelnen Polleitern und dem Anschluss des PEN-Leiters mit dem Voltmeter eine Gleichspannung von U_{DC} = 1,9 V_{DC} gemessen werden. Diese Gleichspannung in der Grössenordnung von weniger als ein Prozent der 50-Hz-Nennspannung hat bereits deutliche Auswirkungen auf induktive Betriebsmittel.

Man erkennt in Bild 5, dass bei der Fourieranalyse des Stromes nun auch geradzahlige Oberschwingungsströme entstanden sind. Der 100-Hz-Strom erreicht hier etwa 35% des 50-Hz-Stromes.

Diese Messung belegt, dass die durch den Rückstrom auf dem PEN-Leiter erzeugte Gleichspannung einen Gleichstrom durch die angeschlossenen Betriebsmittel treibt. Zum selben Ergebnis gelangt man auch, wenn man die Messungen mit angeschlossener Glühlampenlast wiederholt.

Schlussfolgerungen

Da für die elektrischen Erdungen nicht mehr die Wasserleitungen benutzt werden können, weicht man bekanntlich auf die Fundamenterder aus. In Zürich läuft deshalb das Projekt «Erde weg von Wasserleitungen», bei dem in speziellen Fällen auch Tiefenerder eingesetzt werden.

Die Streustromproblematik besteht nach wie vor. Sie dürfte sich in der Zukunft nach Meinung der SGK vermehrt auf die Fundamenterder verlagern. Tritt aus einem Fundamenterder ein Streustrom aus, so führt dies zu Korrosionsschäden an den Armierungen und Betonfundamenten.

Obwohl die PEN-Leiter nicht direkt mit den Rückleitern der Gleichrichter verbunden sind, führen sie bereits heute Gleichstromanteile. Mit zunehmendem elektrischem Widerstand der Wasser- und Gasleitungen, bedingt durch die vermehrte Anwendung von Kunststoffrohren, werden diese Gleichströme im Laufe der Zeit kontinuierlich ansteigen.

Die Messungen haben gezeigt, dass das «PEN-Leiter-Netz» die Streuströme tatsächlich aufnimmt. Im Gleichrichter Schaffhauserplatz wurde der Drainagestrom während 20 Tagen aufgezeichnet. Die Höhe der gemessenen Drainageströme (Maximalwerte) ist beeindruckend.

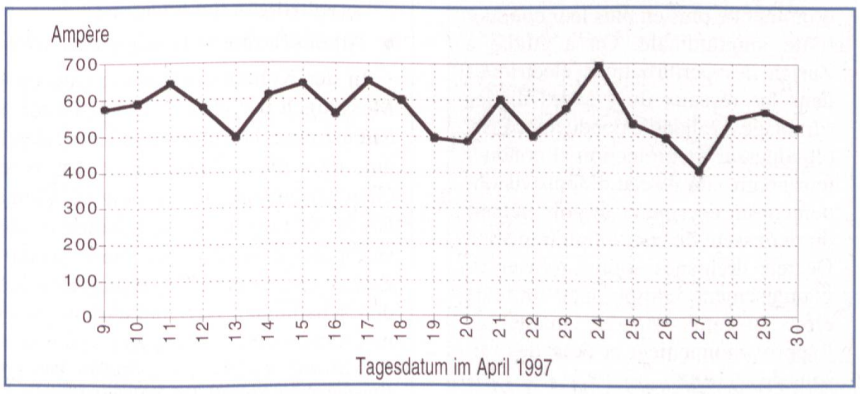


Bild 6 Maximaler Drainagestrom in Ampère: PEN – Minus Gleichrichter Schaffhauserplatz.

Es ist schwierig abzuschätzen, wie sich die Längswiderstände der verschiedenen Leitungssysteme und die Erdungsverhältnisse künftig ändern werden. Wenn am Schluss das «PEN-Leiter-Netz» am besten leitet, dann sind die Streustromanteile auf den Netzkabeln nicht mehr zu bewältigen.

Es kann deshalb nicht zugelassen werden, heute den Streuströmen den Weg über die PEN-Leiter mittels neuen, gerichteten Drainagen in den Gleichrichteranlagen oder im Verteilnetz zusätzlich zu ermöglichen. Drainagen mit reduzierten Ableitströmen können wegen den starken Stromänderungen ebenfalls nicht in Betracht gezogen werden; die Versorgungsqualität wird im Gegensatz zur Korrosion nicht durch die Mittelwerte, sondern durch die Änderungen und die Spitzenwerte der Streuströme beeinflusst.

Eine Bekämpfung der Streuströme an der Quelle – anstatt eine Verlagerung ihrer Auswirkungen – drängt sich auf.

Für die Lösung der Streustromproblematik müssen andere Ansätze weiter bearbeitet werden, zum Beispiel konsequente Rückführung der Traktionsströme über bahneigene Rückleitersysteme, (teil-)isolierte Schienen usw.

Um die geforderte Versorgungsqualität für seine Stromkunden auch künftig sicherstellen zu können, lehnt das EWZ zusätzliche Drainagen zwischen PEN-Leiter und Minuspol der Gleichrichter für Traktionsbetrieb sowie Drainagen unter Verwendung des PEN-Leiters in seinem Versorgungsnetz ab.

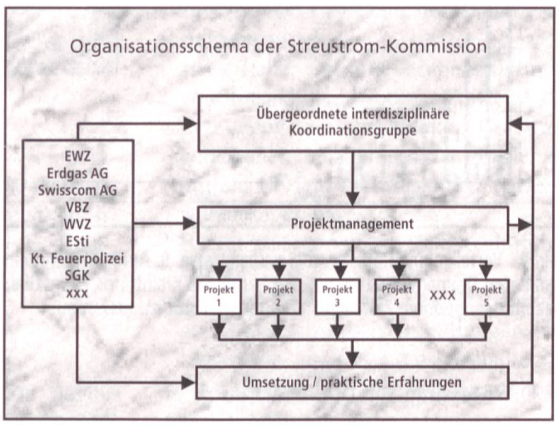
Des perturbations dues à des courants vagabonds de tramways

Une partie des courants de retour de tramways entraînés en courant continu retourne sous forme de courant vagabond par des lignes de l'entreprise au redresseur d'alimentation. Des tubes en matière plastique étant souvent utilisés pour les conduites de gaz et d'eau, celles-ci voient diminuer de plus en plus leur conductivité longitudinale. On a étudié à Zurich des perturbations électriques dans les réseaux dues à des diodes (drainages) reliant le conducteur PEN (conducteur de protection et conducteur neutre) du réseau d'approvisionnement en énergie et le pôle négatif du redresseur de courant du tramway. De tels drainages sont à refuser rigoureusement, compte tenu de leurs effets négatifs sur la qualité de l'approvisionnement et pour des raisons de sécurité.

Aufgaben der Streustrom-Kommission der Stadt Zürich

Ungeschützte oder mangelhaft geschützte metallische Infrastrukturen werden im Erdboden angegriffen. Die Streuströme sind die Hauptverursacher der Korrosionserscheinungen. Das Wasserrohrnetz wurde durch die rund 110 Jahre dauernde sogenannte Schutz-Erdung am meisten beeinträchtigt. Um das Phänomen «Aussenkorrosion» in Griff zu bekommen, arbeitet in Zürich die «Streustrom-Kommission». Sie koordiniert einschlägige Untersuchungen und daraus folgende Massnahmen. Kurzfristige und langfristige Projekte werden initiiert, geplant und ausgeführt. Sachkonflikte werden ausgetragen. Das gewonnene Know-how und die Kosten werden gepoolt. Ein vermehrter Erfahrungsaustausch im In- und Ausland wird angestrebt.

«Der Streustrom ist der unbeabsichtigt aus stromführenden Leitern elektrischer Anlagen in den Erdboden übertretende Strom.» Streuströme werden durch eine inhomogene Bettung der Wasserleitungen (Milliampère-Bereich), durch sogenannte Fremdkathoden (Ampère-Bereich) und durch Gleichstrombahnen (Spitzenwerte über 100 Ampère) erzeugt. Weitere Korrosionsverursacher sind auch Wechselströme, welche durch Induktion aus den Speiseleitungen von Wechselstrombahnen oder aus Hochspannungsfreileitungen und -kabel sowie durch die Einwirkung von Fehlerströmen aus der Erdungsanlage entstehen. Die meistleidenden unterirdischen Anlagen sind die Wasserrohrnetze. In der Schweiz wurde bis 1991 die Schutz-Erdung daran angeschlossen. Die tatsächlichen und die potentiellen Schadenauswirkungen der langen Zeit dieser Doppelfunktion sind gross. Allein in Zürich kommt es im Schnitt zu zwei Rohrschäden pro Tag, und die Behebungskosten belaufen sich auf rund 7 Millionen Franken im Jahr.



Die Streustrom-Kommission koordiniert sämtliche Untersuchungen bezüglich Ursachen und Schutzmethoden gegen Aussenkorrosion an unterirdischen metallischen Infrastrukturen in der Stadt Zürich. Ihre Zielsetzung ist es, geeignete wirtschaftliche Schutzmassnahmen einzuleiten, ihre Durchführung zu überwachen und das gewonnene Know-how und die Kosten zu poolen. Sämtliche Vorhaben werden im Projektmanagement durchgeführt. 1999 und in den nächsten Jahren werden folgende langfristige Projekte bearbeitet:

- **Erhaltung und Optimierung der Schutzfunktion von Streustromdrainagen bei Strassenbahnen;**
- **Abtrennung der Erdung von der Wasserleitung an etwa 800 Trafo-/Hochspannungsanlagen;**
- **Abtrennung der Erdung von der Wasserleitung an einzelnen grossen Eisenbetonkomplexen;**
- **Abtrennung der rund 5000 Erdungskabel von den Wasserleitungen (bestehende Überbrückungen der Hausanschlüsse aus Polyethylen);**
- **Sanierung und Verstärkung der strassenbahneigenen Rückleitersysteme;**
- **Entwicklungsprojekt «Isolierte Schiene»;**
- **Entwicklungsprojekt «Intelligenter Molch zur direkten Messung der effektiven Wandstärken an erdverlegten Gussleitungen»;**
- **Arbeitssicherheit im Leitungsgraben, auch in bezug auf Streuströme.**

In der Kommissionsarbeit tauchen selbstverständlich auch Sachkonflikte auf. Messungen der über das PEN-Leiter-Netz der Elektrizitätsversorgung fliessende Streuströme, herrührend von mit Gleichstrom betriebenen Strassenbahnen, zeigen auf, dass diese die Qualität des Wechselstromes beeinflussen. Lässt man die Gleichströme weiter ansteigen, können die internationalen Standards gemäss EN 50160 nicht mehr eingehalten werden. Ein Beispiel dafür sind Bildstörungen an Computer-Bildschirmen. Diese Erfahrung wird im Artikel Pfister/Rist publiziert. Ziel ist eine vernünftige Balance zwischen den Korrosionsschutzmassnahmen und den schädlichen Netzrückwirkungen (Versorgungsqualität!) sowie den allgemeinen Sicherheitsaspekten zu gewährleisten.

B.C. Skarda, dipl. Ing., Vizedirektor Wasserversorgung Zürich
Präsident der Streustrom-Kommission, Postfach, CH-8023 Zürich