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: 85 (1994)

Heft: 1

Artikel: Elektrische Speisung der Trolleybusse : die heute gültigen Vorschriften sollen geändert werden

Autor: Cavalli, Ugo / Salperwyck, Luc / Stalder, Michel

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-902526

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: 09.07.2025

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

Mit Berechnungen und Versuchen wurde nachgewiesen, dass durch eine Parallelschaltung der Speisegleichrichter eines Trolleybusnetzes die Energieverluste in den Fahrleitungen gegenüber dem heutigen Zustand mit einzelnen Speisebereichen beträchtlich reduziert werden können. Die Betriebsweise mit parallel geschalteten Speisegleichrichtern kann aber vagabundierende Ströme erzeugen. Im Aufsatz wird gezeigt, dass diese relativ klein sind oder durch geeignete Massnahmen sogar vollständig vermieden werden können. Gegenüber der jetzigen Betriebsart der Trolleybusnetze könnte mit der vorgeschlagenen Zusammenschaltung aller Speisegleichrichter Energie gespart werden.

Elektrische Speisung der Trolleybusse

Die heute gültigen Vorschriften sollten geändert werden

■ Ugo Cavalli, Luc Salperwyck, Michel Stalder, Ferdinand Stalder und Pierre Pauchard

Theoretische Berechnungen zeigen, dass in den mit Gleichspannung gespeisten Trolleybusnetzen die Verluste in den Fahrleitungen um einen Faktor 0,5–0,6 verringert werden können, wenn eine Betriebsart mit Parallelschaltung der Unterwerke, anstelle der verwendeten Betriebsart mit einseitiger Anspeisung, gewählt wird. Versuche in situ auf dem Netz der Transports en commun de Fribourg (TF) im Jahre 1991 haben die Theorie bestätigt. Diese Betriebsart erlaubt eine Energieeinsparung von 10 bis 20%, je nach Fall, sowie eine Reduktion der Investitionskosten bei Netzerweiterungen.

Der Nutzen der bei dieser Studie gewonnenen Resultate [1] veranlasste das Bundesamt für Energiewirtschaft (BEW), der Elec-Engineering SA – Ingénieurs-Conseils – ein Forschungsmandat zu vergeben. Der Auftrag bezog sich auf die theoretische und experimentelle Ermittlung der vagabundierenden Ströme, die durch den Parallelbetrieb von zwei oder mehr Gleichrichterwerken mit je einem geerdeten Pol entstehen.

Die TF hatten vorgängig ihr Einverständnis für die Durchführung der Versuche auf ihrem Netz gegeben, und sie waren auch bereit, einen Trolleybus und das not-

Dieser Aufsatz ist hervorgegangen aus einem Forschungsprojekt, welches durch das Bundesamt für Energiewirtschaft (BEW) finanziert wurde. Der Originaltext auf Französisch ist bei den Autoren erhältlich.

Adressen der Autoren:
Ugo Cavalli, ing. él. SIA,
Luc Salperwyck, ing. él. dipl. INPG-SIA,
Michel Stalder, ing. él. dipl. EPFL-SIA,
alle bei Elec-Engineering SA – Ingénieurs-Conseils,
6, chemin de la Fruitière, 1239 Collex, und
22, rue Juste-Olivier, 1260 Nyon, sowie
Ferdinand Stalder, Dr. sc. techn. ETHZ,
Schweizerische Gesellschaft für Korrosionsschutz – SGK, Technopark, Pfingstweidstrasse 30,
8005 Zürich, und
Pierre Pauchard, ing. él. ETS,
Chef de la section des installations électriques
GFM/TF, Transports en commun de Fribourg,
3, rue des Pilettes, 1700 Fribourg.

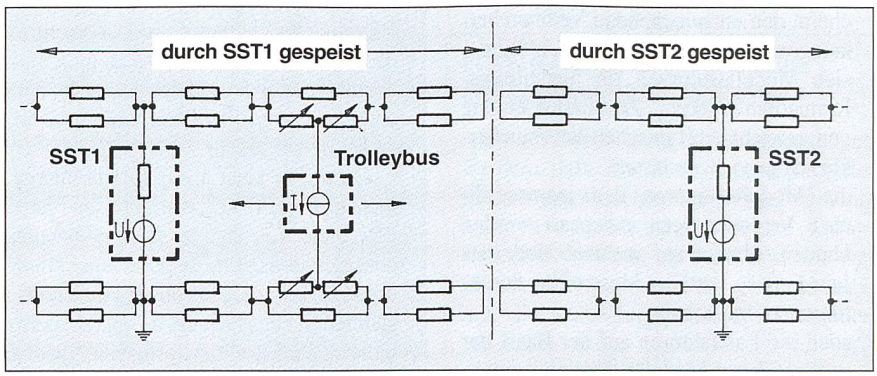

Bild 1 Elektrisches Ersatzschaltbild eines Trolleybusnetzes mit einseitiger Einspeisung
SST1, SST2 Unterwerke *1* und *2*

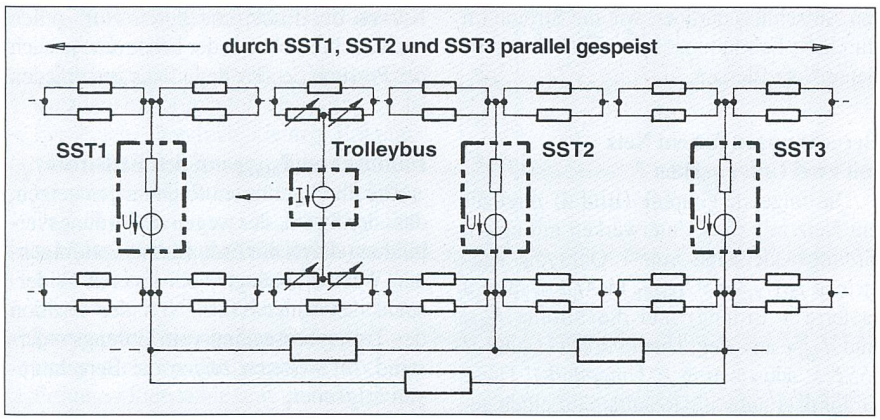

Bild 2 Elektrisches Ersatzschaltbild eines Trolleybusnetzes mit zweiseitiger Einspeisung
ST1, SST2, SST3 Unterwerke *1, 2* und *3*

wendige Betriebspersonal zur Verfügung zu stellen. Im weiteren war die Schweizerische Gesellschaft für Korrosionsschutz (SGK) an diesen Vorhaben sehr interessiert und hat sich seit dem Beginn dieser Arbeit an der Vorbereitung und der Durchführung der Versuche beteiligt.

Simulationsprogramm

Das Simulationsprogramm, das hier erwähnt wird, ist eine Erweiterung desjenigen, welches im Jahre 1991 erstellt und experimentell geprüft wurde und heute unverändert im Einsatz steht [1]. Das heutige Programm berücksichtigt ferner den zu einem der beiden Pole der Fahrleitungen parallelen Erdungskreis.

Ein Trolleybusnetz besteht unter anderem aus Speisegleichrichterwerken, und es wird angenommen, dass in jedem Unterwerk der eine der beiden Pole geerdet wird. Aus den Unterwerken gehen doppelte Fahrleitungen (+ und –) ab. Jeder Pol wird in zwei Speiseleitungen zerlegt, welche in variablen Abständen miteinander verbunden werden. Der sich bewegende Trolleybus wird von einer der beiden parallel geschalteten Fahrleitungen gespeist. Das Netz mit einseitiger Einspeisung kann nach Bild 1 modelliert werden. Im Falle einer parallelen Speisung kommt, gemäss Bild 2, eine Impedanz zwischen den beiden Erdungspunkten dazu.

Modellierung des Netzes

Die Hauptaufgabe besteht in der Erstellung eines Simulationsprogrammes, das die Berechnung der Ströme und Spannungen in allen Elementen des Netzes in Funktion der Position eines oder zweier Trolleybusse für verschiedene Topologien und Speisungsarten erlaubt. Die gewählte Lösungsmethode beruht auf der Berechnung der Knotenpotentiale und bedingt die Lösung der matriziellen Gleichung

$$\boldsymbol{u} = \boldsymbol{Y}^{-1} \cdot \boldsymbol{i},$$

wobei $\boldsymbol{u}$ der Vektor der Knotenpotentiale, $\boldsymbol{i}$ der Vektor der in den Knoten eingespeisten Ströme und $\boldsymbol{Y}$ die Matrix der Knotenadmittanzen ist. Dazu sind folgende Bemerkungen notwendig:

- die Werte der Matrixelemente der Knotenadmittanzen $\boldsymbol{Y}$ sind von der Position des Trolleybusses abhängig,
- die Werte der eingespeisten Ströme sind nicht nur von der Trolleybusposition, sondern auch vom Betriebszustand der Unterwerke abhängig,
- die Dimensionen der Matrix und der Vektoren sind von der Position der Trolleybusse abhängig.

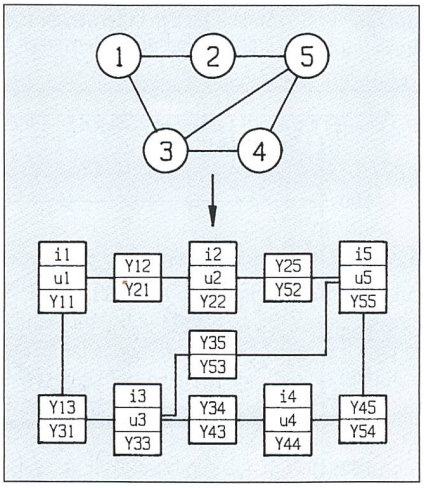

Bild 3 Mathematisches Modell des Trolleybusnetzes
Modellierung der Matrix der Knotenadmittanzen, der Vektoren der eingespeisten Ströme und der Knotenspannungen eines Kreises in Form eines Graphen

In Anbetracht dieser Tatsachen wurde es als sinnvoll erachtet, eine Datenstruktur zu verwenden, die die Variabilität der Elemente berücksichtigt, ohne die Verwaltung der Matrizen und Vektoren, welche für jeden Fall der Trolleybusposition oder des Betriebszustandes der Unterwerke neu zu bilden wären, zu komplizieren. Diese Struktur beruht auf der Graphenmethode und wurde bereits mit Erfolg für die Berechnung der Leistungsverteilung in einem Höchstspannungsnetz angewendet. Sie erlaubt, die Schaltungsdaten in einem Graphen zu speichern, wobei die Komponenten der Vektoren der eingespeisten Ströme und der Knotenspannungen durch die Ekken und die Nicht-Diagonal-Elemente der Admittanzmatrix durch die diese Ecken verbindenden Kanten dargestellt werden. Die diagonalen Elemente der Admittanzmatrix werden ebenfalls in den Ecken gespeichert (Bild 3).

Dieser Graph hat nicht nur den Vorteil, auf natürliche Art die Schalttopologie wiederzugeben, sondern auch die zu speichernden Terme auf ein Minimum zu begrenzen. Schliesslich besteht das Rechenprogramm aus einer Anzahl auf den Graph wirkender Algorithmen; es erlaubt, alle notwendigen Operationen durchzuführen:

- Lösung der Gleichung $\boldsymbol{u} = \boldsymbol{Y}^{-1} \cdot \boldsymbol{i}$
- Änderung des Graphen in Funktion der Trolleybusposition
- Änderung des Graphen in Funktion des Betriebszustandes der Unterwerke.

Es sei erwähnt, dass dieses Programm in der Sprache C geschrieben ist, was erlaubt, auf einfache Art eine solche Struktur mittels dynamischer Zeiger zu verwirklichen.

Lösung der Gleichungen

Verschiedene Lösungsmethoden erlauben, die gewünschten Resultate zu erhalten. Gewählt wurde schliesslich eine Methode der Bifaktorisation, die direkt aus dem gaussischen Eliminationsverfahren abgeleitet ist. Diese Methode erlaubt, die inverse Matrix der Matrix $\boldsymbol{Y}$ in eine Multiplikation von Untermatrizen zu zerlegen:

$$\boldsymbol{Y}^{-1} = \boldsymbol{R}^{(1)} \cdot \boldsymbol{R}^{(2)} \cdot \ldots \cdot \boldsymbol{R}^{(n-1)} \cdot \boldsymbol{R}^{(n)} \cdot \boldsymbol{L}^{(n)} \cdot \boldsymbol{L}^{(n-1)} \cdot \ldots \cdot \boldsymbol{L}^{(2)} \cdot \boldsymbol{L}^{(1)},$$

wobei $\boldsymbol{L}$ als linke Matrix bezeichnet (left) und $\boldsymbol{R}$ als rechte Matrix bezeichnet (right) wird. Die Matrizen $\boldsymbol{L}$ und $\boldsymbol{R}$ werden schrittweise durch den direkt auf dem Schaltungsgraph arbeitenden Lösungsalgorithmus gebildet.

Modellierung der Schaltungselemente

Für die gewählte Lösungmethode (Methode der Knotenpotentiale) muss die Schaltung durch die Gesamtheit der Zweige, deren Admittanzen die Matrix $\boldsymbol{Y}$ bil-

den, und die Gesamtheit der in den Knoten eingespeisten Stromquellen modelliert werden. Die Unterwerke werden durch eine Nortontransformation in Stromquellen umgewandelt. Die Trolleybusse werden entsprechend den zu einem gegebenen Zeitpunkt entnommenen Strömen als Stromquellen modelliert, welche sich entsprechend den Eingabedaten in den verschiedenen Zweigen bewegen.

Simulation

Die für das Simulationsprogramm notwendigen Eingabedaten werden mittels einer ASCII-Eingabedatei übergeben. Diese Datei beschreibt insbesondere die Zusammensetzung des untersuchten Netzes (Knoten und Zweige) und die Bewegungsvorgabe des Trolleybusses im Netz.

Die Wahl der zur Darstellung vorgesehenen Grössen, graphisch oder als Wertetabellen, wird mittels Messobjekten, die ebenfalls in der Eingabedatei definiert sind, gesteuert. Diese Messobjekte erlauben, der gemessenen Grösse einen Namen, den Typ (Strom, Spannung, Position usw.), den Massstab und den betroffenen Zweig oder Knoten zuzuordnen.

Diese Objekte erlauben ebenfalls Summen oder Differenzen zwischen mehreren Grössen zu bilden (z.B.: Summe der Ströme aus verschiedenen Zweigen oder Spannungsdifferenz zwischen zwei Knoten). Das Programm kann diese Resultate entweder in einer binären Datei für eine graphische Darstellung (am Bildschirm oder auf dem Papier) oder in einer ASCII-Datei erzeugen. Diese Datei kann für eine weitere Bearbeitung in eine Tabellenkalkulation übernommen werden.

Theoretische Näherungsrechnungen

Für die verschiedenen Parameter wurden Werte eingesetzt, welche ungefähr jenen des TF-Netzes entsprechen.

Für den Erdungswiderstand der Unterwerke wurden in diesen Näherungsrechnungen die Werte 0, 0,3, 1 und 10 Ohm gewählt, um die Extremwerte des Problems zu bestimmen. Der interne Widerstand eines Unterwerkes wurde willkürlich mit 0,1 Ohm festgelegt, und für die Leerlaufspannung wurden 600 V eingesetzt. Hinsichtlich Geometrie wurde ein symmetrisches Netz mit drei Unterwerken gewählt, damit in einzelnen Fällen auf einfache Art von Hand gewisse Resultate überprüft werden können.

In diesem Stadium der Studie sind die numerischen Resultate nur grössenordnungsmässig richtig, geben aber einen guten Aufschluss darüber, wie die Ströme im durch die Fahrleitungen und die Erde gebildeten Netz fliessen.

Berechnungen für ein Netz mit zwei Unterwerken

Die folgende Graphik (Bild 4) zeigt für ein Netz mit zwei Unterwerken mit einem Erdungswiderstand von 1 Ohm die Erdströme I_{MALT1} und I_{MALT2} (*MALT* = mise à la terre = Erdung) und die Ströme I_{SST1} und I_{SST2} aus den Unterwerken *1* und *2* (*SST* = sous-station = Unterwerk). Diese Graphik erlaubt alle Resultate für einen gegebenen Ort herauszulesen.

Berechnungen für ein Netz mit drei Unterwerken

Wie für das vorhergehende Bild zeigt die folgende Graphik (Bild 5) die gleichen Grössen, aber für den Fall dreier Unterwerke. In beiden Fällen sieht man, dass die Kurven der Erdströme durch Null gehen und dass die Polarität der Erdströme je nach der Position des Trolleybusses verschieden ist.

Einfluss von R_{MALT} auf den Erdstrom

Die durchgeführten Rechnungen zeigen, dass der Strom, der wegen der Erdungsverbindung durch die Erde fliesst, von folgenden Werten abhängt: vom inneren Widerstand des Unterwerkes, von der Position des Trolleybusses und vom Erdungswiderstand. Im weiteren zeigen die Berechnungen folgendes:

- In der «elektrischen Mitte» der Strecke, zwischen zwei Unterwerken, ist der Strom I_{MALT} Null. Aufgrund der gewählten Parameter ist die «elektrische Mitte» auch die «geometrische Mitte».
- Fährt ein Trolleybus bei einem Unterwerk vorbei, ist der Strom I_{MALT} am grössten.

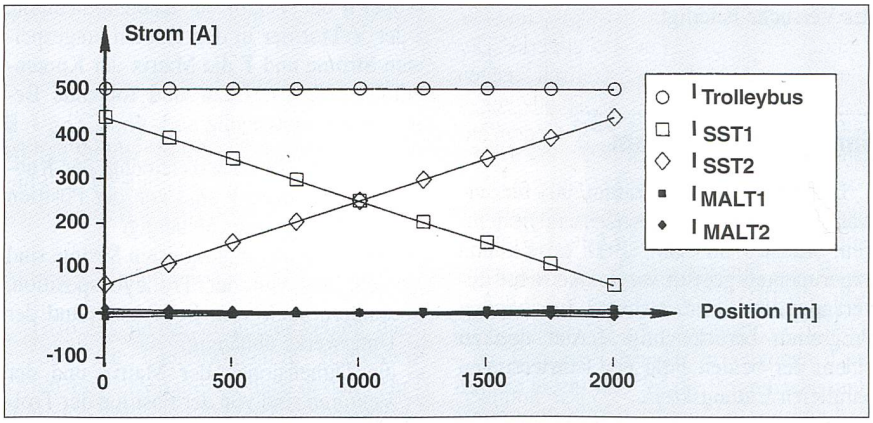

Bild 4 Stromverläufe in Funktion der Fahrzeugposition für den Fall zweier Unterwerke

$I_{Trolleybus}$ vom Trolleybus der Fahrleitung entnommener Strom
I_{SST1}, I_{SST2} Ströme aus den Unterwerken *1* und *2*
I_{MALT1}, I_{MALT2} Erdströme bei den Unterwerken *1* und *2*

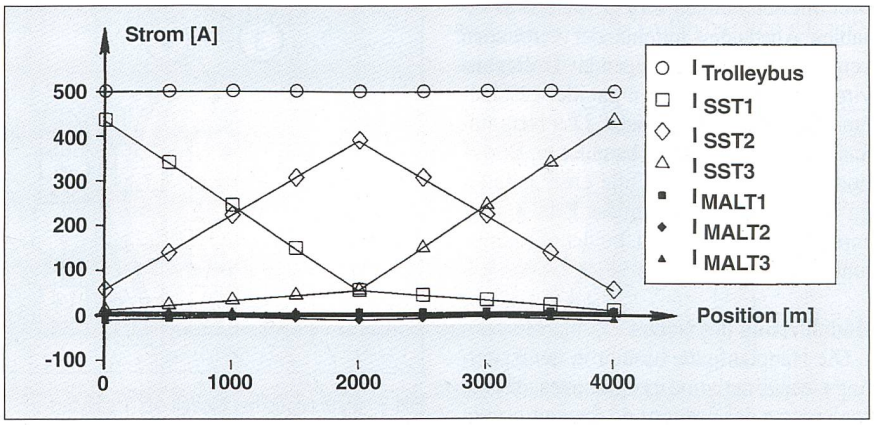

Bild 5 Stromverläufe in Funktion der Fahrzeugposition für den Fall dreier Unterwerke

$I_{Trolleybus}$ vom Trolleybus der Fahrleitung entnommener Strom
I_{SST1}, I_{SST2}, I_{SST3} Ströme aus den Unterwerken *1–3*
I_{MALT1}, I_{MALT2}, I_{MALT3} Erdströme bei den Unterwerken *1–3*

- Für einen unendlich grossen Erdungswiderstand ($R = \infty$) ist der Erdstrom selbstverständlich Null, dies wurde trotzdem experimentell überprüft.
- Für einen unendlich kleinen Erdungswiderstand ($R = 0$) variiert der Erdstrom zwischen Null und einem definierten Teil des Fahrleitungsstromes in Funktion der Position des Trolleybusses. Für Unterwerke mit normalen internen Widerständen (0,020 Ohm) liegt dieser Prozentsatz bei ungefähr 6%.
- Unter gleichen Bedingungen und für Erdungswiderstände mit jeweils ungefähr 1 Ohm schwankt der Erdstrom zwischen 0 und ungefähr 0,5% des Fahrleitungstromes.
- Mit zunehmenden Erdungswiderständen R von 2 bis 10 Ohm nimmt der Erdstrom stark ab und schwankt nur noch zwischen Null und einigen zehntel oder hundertstel Prozent des Fahrleitungsstromes.

Die nächste Graphik (Bild 6) zeigt die Veränderung des Erdstromes I_{MALT} in Funktion des Widerstandes R_{MALT} und des inneren Widerstandes der Unterwerke. Der Erdstrom tendiert asymptotisch gegen Null, wenn die inneren Widerstände gegen Null gehen, dies unabhängig von jedem anderen Parameter.

Das Bild 6 zeigt den Strom I_{MALT} für jene Orte, wo er am stärksten ist, das heisst vor den Unterwerken. Das erhaltene Resultat ist sehr interessant und nicht offensichtlich. Eine weitere Studie in Form einer Sensitivitätsanalyse, welche diese Abhängigkeit genauer untersucht, wäre lohnenswert.

Durch weitere Sensitivitätsrechnungen wurde gezeigt: Wenn in der Simulation der Fahrleitungswiderstand erhöht wird, während alle anderen Parameter unverändert bleiben, geht der Erdstrom zurück. Die Erklärung dieses nicht offensichtlichen Phänomens muss im folgenden Faktum gesucht werden: Eine Erhöhung des Fahrleitungswiderstandes wird im mathematischen Modell wie eine relative Verminderung des inneren Widerstandes der Unterwerke betrachtet. Diese Interpretation deckt sich mit allen erhaltenen Resultaten.

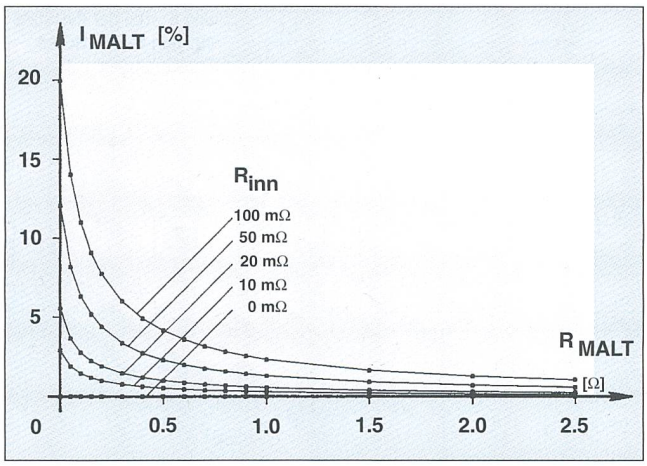

Bild 6 Erdströme in Funktion des Erdungswiderstandes und des inneren Widerstandes der Unterwerke

Fall dreier Unterwerke; der Trolleybus steht vor dem *UW1*; Strom des Trolleybus $I_{Trolleybus}$ = 500 A

I_{MALT} Erdstrom beim Unterwerk *1* in Prozent von $I_{Trolleybus}$

R_{MALT} Erdungswiderstand von Unterwerk *1*

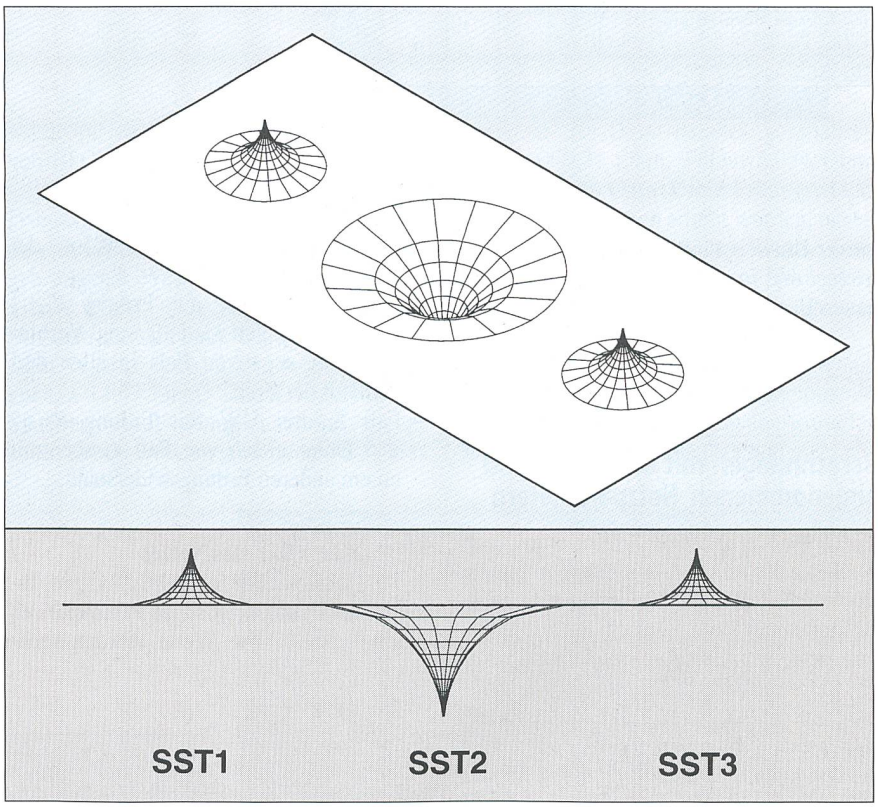

Bild 7 Bei den Unterwerken durch die ein- oder austretenden Erdströme erzeugte Potentialtrichter

Der Trolleybus steht vor dem Unterwerk *2*

SST1, SST2, SST3 Position der Unterwerke *1*, *2* und *3*

Potentialtrichter

Wie aufgrund von Berechnungen für ein Trolleybusnetz mit parallel geschalteten Unterwerken mit den für einen solchen Netztyp üblichen Parametern gezeigt wurde, beträgt der Erdstrom höchstens einige Prozent des Netzstromes. Dieser Strom fliesst ins Unterwerk hinein oder aus ihm heraus und verursacht eine Potentialerhöhung der *MALT*-Zone des Unterwerkes im Wert von $R \cdot I$.

Diese Potentialerhöhung ist wohl klein, könnte aber den Wert von 50 V überschreiten, insbesondere im Falle eines Kurzschlusses. Es besteht aber keine Gefahr, sofern die Erdung gut ausgeführt ist, das heisst wenn die Schritt- und Berührungsspannungen innerhalb der in den einschlägigen Vorschriften festgelegten Grenzen gehalten werden. Bezüglich Korrosion ist dieses Potential recht hoch, trotzdem bleibt es vergleichsweise klein gegenüber jenem in Netzen von Strassenbahnen oder in gemischten Netzen für Strassenbahnen und Trolleybussen, bei welchen dieses Potential um einige Zehnfache grösser ist.

Es ist wichtig zu vermerken, dass, im Gegensatz zur Strassenbahn, der Eintritts- und der Austrittsort des Erdstromes auf einen einzigen und definierten Ort beschränkt bleibt. Entsprechende Massnahmen, die den Eintritt oder (inklusive) den Austritt des Stromes verhindern würden, könnten also angewendet werden.

Das Bild 7 zeigt dieses Phänomen dreidimensional für einen genauen Berechnungsfall. Diese Graphik gilt hier als quali-

SOUS-STATION DE VIGNETTAZ	Essai N° 1 2 s/s sans MALT			Essai N° 2 2 s/s avec MALT R s/s + 10 ohms			Essai 3 s/s s
Courants calculés	A			A			
Lieux des Arrêts/Départs	I+	I-	I MALT	I+	I-	I MALT	I+
VIGNETTAZ-TILLEUL							
Pos. 8 : Arrêt Villars-Vert	535	535	-	535	535	0.18	526
Pos. 7 : Arrêt juste après le sectionnement côté terminus Moncor	535	535	-	535	535	0.18	526
Pos. 6 : "Vignettaz"	496	496	-	496	495	0.15	463
Pos. 5 : "Bethléem"	457	457	-	457	457	0.12	401
Pos. 4 : Arrêt "Beauregard"	421	421	-	421	421	0.10	343
Pos. 3 : Arrêt après Pl Gare CFF	366	366	-	366	366	0.05	253
Pos. 2 : Arrêt devant l'accès au Parking des Alpes (rte des Alpes)	251	251	-	251	251	-0.01	
Pos. 1 : Arrêt juste après le sectionnement côté gare	221	221	-	221	221	-0.0	
TILLEUL-STADTBERG							
Pos. 1a : Arrêt "Bourg"	180	180	-	180	180	-0.06	
Pos. 2a : Arrêt sur pont "Zaehringen" avec les perches à la hauteur du 3ème support de lignes	138	138	-	138	138	-0	
Pos. 3a : Arrêt "Pont Zaehringen" kiosque	98	98	-	98	98		
Pos. 4a : Arrêt "Stadtberg" juste après le sectionnement côté terminus Schöenberg	15	15	-	15	15		
Pos. 5a : Arrêt St-Barthèlemy côté terminus Schöenberg	15	15	-	15			

Bild 8 Teil der Resultate aus den theoretischen Berechnungen

tativer Hinweis für die Form der Potentialtrichter und ist nicht das Resultat einer genauen Berechnung.

Berechnungen mit effektiven und angenommenen Netzparametern

Die Berechnung aller Ströme wurde aufgrund von effektiven und angenommenen Werten des Netzes der TF für alle dreizehn Abfahrtsstellen des Versuchstrolleybusses, und zwar für alle fünf vorgesehenen Versuche, durchgeführt. Damit, soweit wie möglich, auf den Messwert des Erdungswiderstandes der Unterwerke (UW) verzichtet werden konnte, wurde beschlossen, für die Messungen einen Serieshunt von 5 und 10 Ohm zwischen der Erde und dem negativen Pol des Gleichrichters einzusetzen. Selbstverständlich berücksichtigen die Berechnungen diese Zusatzwiderstände. Die Berechnungen wurden also für folgende fünf Fälle durchgeführt:

- Fall *1*, zwei UW ohne Erdung: die UW Stadtberg und Vignettaz laufen parallel ohne Verbindung des negativen Pols in beiden UW mit der Erde (das UW Tilleul ist vom Netz getrennt).
- Fall *2*, zwei UW mit Erdung R_{MALT} + 10 Ohm: gleich wie Fall *1* mit geerdetem negativem Pol in beiden UW (das UW Tilleul ist vom Netz getrennt).
- Fall *3*, drei UW ohne Erdung: die drei UW Stadtberg, Tilleul und Vignettaz laufen parallel ohne Verbindung des negativen Pols in allen drei UW mit der Erde.
- Fall *4*, drei UW mit Erdung R_{MALT} + 10 Ohm: gleich wie Fall *3* und Verbindung des negativen Pols in allen drei UW mit der Erde.
- Fall *5*, drei UW mit Erdung R_{MALT} + 5 Ohm: gleich wie Fall *4*, aber mit einem anderen Erdungswiderstand.

Charakteristiken des Netzes

Sorgfältig wurde ein vollständiges Inventar der charakteristischen Parameter des Netzes erstellt. Die Werte wurden rechnerisch oder durch direkte Messungen ermittelt. Der Erdungswiderstand der Unterwerke wurde mittels Einspeisung eines hohen Stromes in die Fahrleitungen gemessen, wobei das Potential gegenüber einer entfernten Erdung gemessen wurde. Zu diesem Zweck wurde eine PTT-Schlaufe gemietet. Der innere Widerstand des Unterwerkes (Block bestehend aus Transformator und Gleichrichter) war durch die Typenprüfung im Herstellerwerk bekannt. Der Fahrleitungswiderstand wurde rechnerisch ermittelt, und der Anfahrstrom des Trolleybusses betrug 550 A (konstanter Wert während mehrerer Sekunden).

Ergebnisse der Berechnungen

Die Ergebnisse aus den Berechnungen wurden mit Hilfe einer Tabellenkalkulation tabellarisch dargestellt und ausgedruckt. Wie bei den experimentellen Versuchen wurde je eine Tabelle pro Unterwerk und eine für den Trolleybus erstellt. Diese theoretischen Resultate können direkt mit den entsprechenden Messresultaten verglichen werden.

Das Bild 8 stellt einen Ausschnitt einer Tabelle dar, die später auch für die Ermittlung der Ströme bei den Versuchen benützt wurde, indem die Werte aus den entsprechenden Aufzeichnungen abgelesen und von Hand eingetragen werden.

Experimentelle Überprüfung der Berechnungen

Die Versuche hatten zum Zweck, die durch einen Trolleybus verursachten vaga-

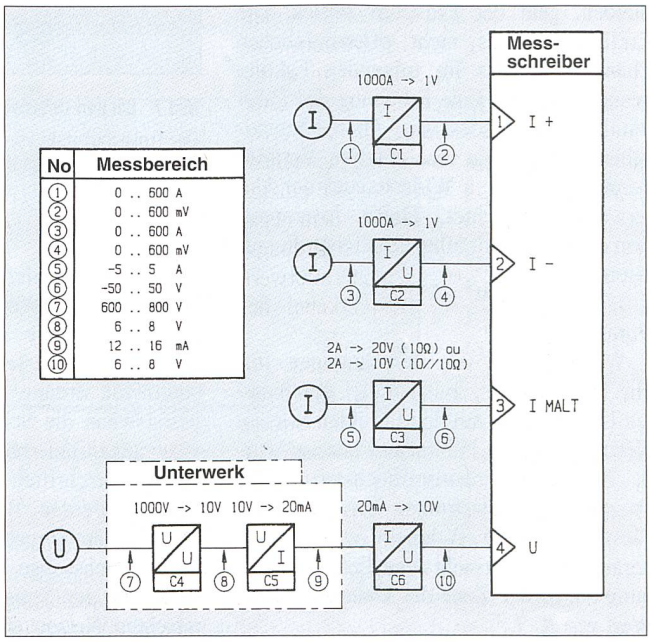

Bild 9 Schematische Darstellung der Messeinrichtungen in einem Unterwerk

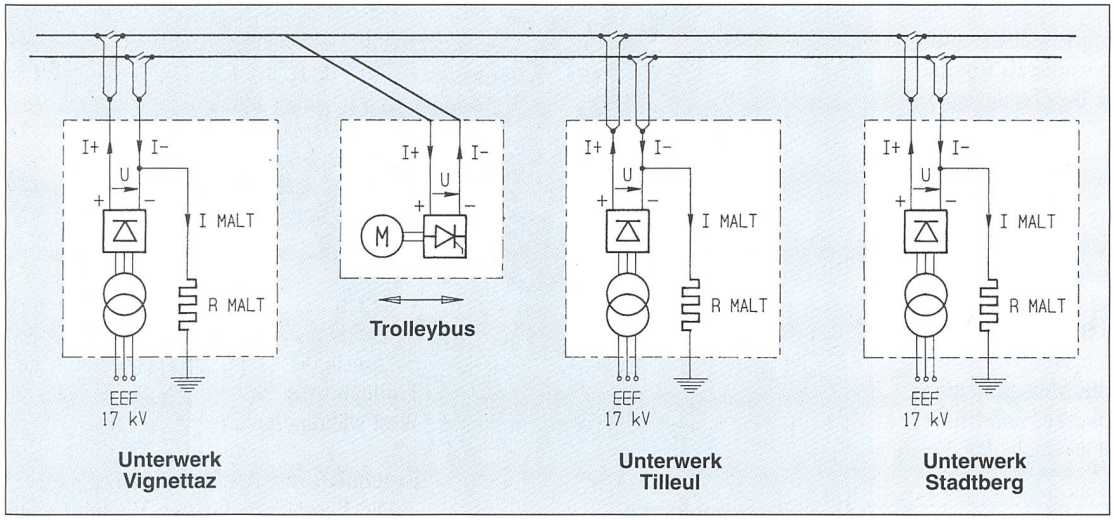

Bild 10 Schematische Darstellung der durchgeführten Messungen

bundierenden Ströme experimentell zu bestimmen. Dabei verkehrte der Trolleybus zwischen den zwei oder drei parallel geschalteten Unterwerken, wobei in den Unterwerken entweder beide Pole gegenüber der Erde isoliert waren oder je einer der Pole geerdet war, entsprechend den fünf oben beschriebenen Konfigurationen, für welche theoretische Berechnungen mit effektiven und angenommenen Werten durchgeführt worden waren.

Vorbereitungsarbeiten

Bevor die Versuche durchgeführt werden konnten, war es unerlässlich, das Netz, die drei Unterwerke und den Trolleybus so vorzubereiten, dass sie für die Versuche tauglich waren. Mit Ausnahme der Fahrleitungen, welche die drei Unterwerke verbinden, wurden alle Fahrleitungen ausgeschaltet. Die beiden Pole der Fahrleitung konnten auf der ganzen Strecke als isoliert betrachtet werden; ihr Isoliervermögen wurde zudem vor den Versuchen mit einem Megaohmmeter bei von der Erde isolierten Unterwerken gemessen. Bei diesen Vorbereitungsarbeiten wurde durch entsprechende Messungen verifiziert, dass die einzige mögliche Verbindung zwischen dem negativen Pol und dem allgemeinen Erdungspunkt nur aus einem in jedem Unterwerk vorhandenen isolierten Kupferkabel bestand.

Für die Versuche mit geerdetem Pol wurde der negative Pol in allen Unterwerken geerdet; die vagabundierenden Ströme konnten in diesen Falle nur zwischen den Unterwerken zirkulieren. Ein Shunt für die Strommessung wurde zwischen dem äusseren Punkt des Erdungstrenners und dem Punkt, wo das isolierte Kupferkabel mit der allgemeinen Erdung verbunden war, montiert. Aus den bereits erwähnten Gründen wurde für den Shuntwiderstand ein Wert von 10 Ohm gewählt.

Die durch die Entreprises Electriques Fribourgeoises (EEF) und die TF durchgeführten Messungen der Erdungswiderstände gab folgende Werte: Vignettaz 4,37 Ohm, Tilleul 0,054 Ohm, Stadtberg 4,39 Ohm. Mit dem zusätzlichen Widerstand von 10 Ohm ergaben sich folgende Werte: Vignettaz 14,37 Ohm, Tilleul 10,054 Ohm, Stadtberg 14,39 Ohm und mit einem zusätzlichen Widerstand von 5 Ohm (zweimal 10 Ohm parallel geschaltet): Vignettaz 9,37 Ohm, Tilleul 5,054 Ohm, Stadtberg 9,39 Ohm. Diese Erdungswiderstände sind künstlich erhöht worden, haben aber immer noch übliche Werte, denn bekanntlich ist der intrinsische Wert eines Erdungswiderstandes nicht von grosser Bedeutung.

Schliesslich wurde auch der Trolleybus mit dem Megaohmmeter geprüft, obwohl es sich hier zur Definition um überisoliertes Material handelt und das Gehäuse nicht mit

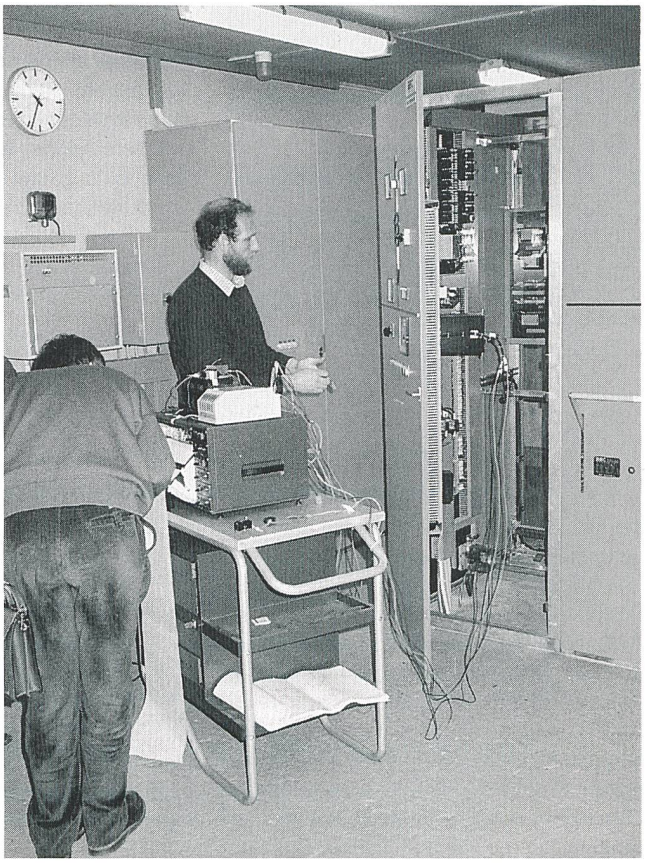

Bild 11 Messeinrichtungen in einem Unterwerk

Speiseunterwerks. Bei einem inneren Widerstand von Null können keine vagabundierenden Ströme entstehen, selbst wenn die Erdungswiderstände ebenfalls gegen Null gehen. Umgekehrt können aber bedeutende vagabundierende Ströme entstehen, wenn Unterwerke mit eher hohen und unterschiedlichen inneren Widerständen parallel geschaltet werden.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass bei einem normalen Netz (innerer Widerstand der Speiseunterwerke etwa 0,020 bis 0,050 Ohm, Erdungswiderstand grösser als 2 Ohm) die entstehenden vagabundierenden Ströme klein sind und im Maximum einige zehntel Prozent des Fahrstromes betragen. Trotzdem müssen gegen diese vagabundierenden Ströme Schutzmassnahmen ergriffen werden, denn die korrosiven Auswirkungen der vagabundierenden Ströme dürfen nicht unterschätzt werden. So löst schon ein Strom von 1 mA in einem Jahre 10 g Eisen auf. Auf einer Wasserleitung würde das ausreichen, um ein kraterförmiges Loch zu erzeugen. Bei den Fundamenterdern muss daher mit den Jahren mit einem Reissen des Betons gerechnet werden, da der entstehende Rost ein etwa dreimal grösseres Volumen hat als das wegkorrodierte Eisen.

Ideen für Massnahmen zur Verhinderung vagabundierender Ströme sind vorhanden. Sie müssen aber noch überprüft und in die Praxis umgesetzt werden. Die Erkenntnisse aus diesen Untersuchungen und aus jenen, welche 1991 [1] durchgeführt wurden, legen nahe, dass eine Revision der Verordnung über elektrische Anlagen von Eisenbahnen (VEAB) (Bearbeitung beim Bundesamt für Verkehr) sowie in den Richtlinien zum Schutz gegen Korrosion durch Streuströme von Gleichstromanlagen (Bearbeitung bei der SKG) vorgenommen werden sollte. Dieser Vorschlag deckt sich mit der Leitidee eines qualitativen Wachstums, wie sie der Bundesrat im Programm «Energie 2000» formuliert hat.

Ferner wäre es dringend notwendig, beim Neubau, bei Erweiterungen oder bei der Erneuerung von Strassenbahnnetzen oder anderer Netze schienengebundener städtischer Verkehrsmittel und gemischter Netze (Strassenbahn und Trolleybus), welche mehrere hundertmal höhere vagabundierende Ströme erzeugen als Trolleybusnetze – mit den entsprechenden elektrochemischen Korrosionsschäden –, ebenfalls mittels grundlegender Überlegungen, Studien und experimenteller Messungen adäquat zu untersuchen. Schliesslich ist es notwendig, dass in Zukunft alle durch solche Anlagen hervorgerufenen Probleme auf objektive Art, ohne Rücksicht auf heute veraltete Kriterien, welche seit Jahrzehnten nicht mehr angewendet werden dürften, untersucht werden.

Bibliographie

[1] *Ugo Cavalli, Luc Saperwyck* et *Pierre Pauchard*: Transports publics et économies d'énergie – Alimentation électrique des trolleybus. Bull. ASE/UCS 82(1991)19, pp. 22–26.

Alimentation électrique des trolleybus

Les dispositions normatives en vigueur devraient être changées

Des calculs théoriques ont montré que, en adoptant un fonctionnement en parallèle des sous-stations plutôt que celui en antenne utilisé à présent dans les réseaux de trolleybus, les pertes dans les lignes de contact peuvent être réduites de manière considérable et que des appréciables économies d'énergie peuvent être réalisées. Des essais sur le réseau des Transports en commun de Fribourg (TF) ont confirmé cela [1]. Ce mode de fonctionnement peut néanmoins, suivant les cas, engendrer des courants vagabonds, car selon les normes une polarité des redresseurs doit être mise à la terre. La présente contribution fait état des calculs théoriques effectués et des essais réalisés qui ont permis de valider les calculs et d'identifier et de quantifier ces courants vagabonds, lesquels se sont révélés relativement faibles. Des dispositions adéquates permettraient la suppression totale des courants indésirables, bien que faibles, qui circulent dans le sol. Contrairement aux dispositions normatives en vigueur, les résaux de trolleybus pourraient ainsi avantageusement fonctionner en parallèle en économisant l'énergie électrique.

SEV/ASE

Kennen Sie die ITG?

Die Informationstechnische Gesellschaft des SEV (ITG) ist ein *nationales Forum* zur Behandlung aktueller Probleme im Bereich der Elektronik und Informationstechnik. Als *Fachgesellschaft des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins* (SEV) steht sie allen interessierten Fachleuten und Anwendern aus dem Gebiet der Informationstechnik offen.

Auskünfte und Unterlagen erhalten Sie beim Schweizerischen Elektrotechnischen Verein, Seefeldstrasse 301, Postfach, 8034 Zürich, Telefon 01/384 91 11.