

Fahrstromversorgung moderner Gleich- und Wechselstrombahnen und ihre Auswirkung auf erdverlegte Rohrleitungen

Vortrag, gehalten von Herrn Dipl.-Phys. Hans Kampermann am 3. Mai 1996
auf der Tagung des Fachverbandes Kathodischer Korrosionsschutz e.V. in Köln.

1. Historie

Die erste elektrische Bahn, erfunden und gebaut von Werner v. Siemens, fuhr im Jahre 1879 auf der Gewerbeausstellung in Berlin als Attraktion auf einem Kreis von 300 m Länge. Die kleine Lokomotive wurde angetrieben von einem Reihenschlußmotor und wies als Besonderheit ein Wendegetriebe auf, da Siemens zunächst nicht wußte, daß und wie die Drehrichtung eines solchen Motors umzukehren ist. Versuche mit Bürstenverstellung brachten ihm dann im Jahre 1881 die Erkenntnis, daß Vertauschen der Kabelanschlüsse an Kommutator oder Feld zum Ziel führt. Damit war der Wendeschalter erfunden, und seither kann die elektrische Eisenbahn rückwärts fahren.

Die Fahrspannung betrug 160 V=. Der Fahrstrom wurde über eine Mittelschiene zugeführt und über die Fahrschienen zurückgeleitet (wie das heutige System „Märklin“ bei Modellbahnen). Die Originallok steht im Deutschen Museum in München. Eine Nachbildung fuhr im Jahre 1979 zum Jubiläum „Hundert Jahre elektrische Bahnen“, allerdings aus Sicherheitsgründen mit 24 V=.

Bereits 1881 verkehrte in Berlin-Lichterfelde die erste elektrische Straßenbahn. Die Stromzuführung erfolgte über die voneinander isolierten Fahrschienen und auf den Achsen isoliert angebrachte Räder (wie bei den heutigen Modellbahnen genormt). Die Bahnübergänge wurden stromlos mit Schwung überfahren, da es häufig zum Scheuen von Kutschenpferden gekommen war.

Nach Versuchen mit einer zweipoligen Fahrleitung und mit einer Stromschiene in einem geschlitzten Kasten unter einer Fahrschiene setzte sich schließlich die Stromzuführung über einen in ausreichender Höhe nicht berührbar aufgehängten Fahdraht (Oberleitung) durch. Die Firma Siemens erfand den Bügel zur Stromabnahme und ließ ihn patentieren. Es war zunächst der sogen. „Lyra-Bügel“ und dann endlich der Scherenstromabnehmer (Pantograph), der bis heute benutzt wird. Wegen des Patents waren andere Unternehmen gezwungen, einen Stangenstromabnehmer mit Rolle (Trolley) zu verwenden. Das spöttische Schlagwort lautete: „Die AEG rollt und Siemens bügelt“.

Die Stromrückleitung erfolgte nunmehr immer über die Schienen.

Schon bald zeigte sich, daß der an ihnen auftretende Spannungsfall zu „vagabundierenden“ Strömen und damit zu elektrolytischer Korrosion mit erheblichen Schäden an erdverlegten Versorgungsleitungen führte. Hiergegen wurden vielerorts Schutzmaßnahmen ergriffen. Am bekanntesten ist die erste Streustromabsaugung von Geppert in Karlsruhe im Jahre 1906.

Auch bahnsseitig versuchte man, diesem Übel abzuweichen. So wurde für die Elektrifizierung der Londoner Untergrundbahn ein Drehstrom-System vorgeschlagen, um diese Schäden zu vermeiden. Wegen dessen sonstiger Nachteile wählte man schließlich doch Gleichstrom, verlegte jedoch zwei Stromschienen und benutzte die Fahrschienen nicht zur Stromrückleitung. Dieses Vierschienen-System hat sich bis heute in London gehalten.

Es war mithin bekannt, daß Wechselstrom keine Korrosion verursacht. Der wesentlichste Vorteil des Einphasen-Wechselstromes beim Betrieb elektrischer Bahnen ist aber die hohe Fahrdrahtspannung, die mittels Transformator auf dem Triebfahrzeug auf einen für die Motoren zulässigen Wert herabgesetzt wird. Hieraus folgen ein niedriger Fahrleitungsstrom und damit wesentlich geringere Verluste trotz größerer Unterwerksabstände. Für den Laien erstaunlich ist, daß Wechselstrombahnen eine langwierige von vielen Mißerfolgen begleitete Entwicklung durchmachten und erst verhältnismäßig spät gebaut wurden. Die Localbahn Murnau-Oberammergau machte den Anfang im Jahre 1905.

Der Grund hierfür ist, daß der Reihenschlußmotor bei Speisung mit Wechselstrom sehr starkes Bürstenfeuer zeigt und seine Drehzahl schlecht regulierbar ist. Man muß sich hierzu klarmachen, daß er einen Transformator mit beweglichem Eisenkern darstellt und das Feld im Anker eine Spannung induziert, die phasenverschoben zur eingepprägten Speisespannung ist. Mithin entsteht ein Kurzschluß. Der Kurzschlußstrom wird ständig über Bürsten und Kollektor geschaltet.

Erst die Anwendung der verminderten Frequenz von 16 $\frac{2}{3}$ Hz und die von Behn-Eschenburg in der

Schweiz erfundene Shuntung des Feldes mit einem ohm'schen Widerstand zwecks Phasenverschiebung brachten den Durchbruch. Im Jahre 1912 wurde das heutige System 15 kV / 16 ⅔ Hz vertraglich festgelegt.

Insofern wurden auch bei den berühmten Schnellfahrversuchen auf der Strecke Marienfelde-Zossen bei Berlin Drehstrom und eine dreipolige, für den praktischen Betrieb unbrauchbare Fahrleitung benutzt. Am 28. Oktober 1903 erreichte ein Triebwagen die Rekordgeschwindigkeit von 210,2 km/h. Übertroffen wurde diese erst im Jahre 1955 in Frankreich, interessanterweise allerdings von einer Gleichstrom-Lokomotive.

Allgemein hat sich bei elektrischen Triebfahrzeugen heute der Drehstrom-Asynchronmotor wegen seines robusten und wartungsarmen Aufbaus durchgesetzt. Er bezieht seine Energie aus einem statischen Umrichter, der eine variable Spannung für die Einstellung der Zugkraft und eine variable Frequenz für die Einstellung der Geschwindigkeit liefert. Stromart und Spannung im Fahrdraht haben damit nur noch untergeordnete Bedeutung. Ein markanter Vertreter dieser Bauart ist der Triebwagen der Karlsruher Straßenbahn, der innerstädtisch mit 750 V= und auf den Fernstrecken bis Rastatt und Pforzheim mit 15 kV / 16 ⅔ Hz fährt.

Nach diesem historischen Abriss wird in der Folge die Stromversorgung von Gleich- und Wechselstrombahnen getrennt dargestellt.

2. Gleichstrombahnen

Zunächst herrschte die zentrale Stromversorgung vor. Wie aus dem Buch „Die Bahnen der Stadt Cöln“, erschienen 1912, hervorgeht, arbeiteten dort linksrheinisch 2 Umformerwerke, die mit Drehstrom 6 kV gespeist wurden und nah beieinander in der Innenstadt lagen. Rechtsrheinisch lieferte ein Dampfkraftwerk den Fahrstrom. Der maximal abgegebene Strom betrug insgesamt 11,5 kA. Die Motorleistung der Triebwagen lag bei 2 x 30 kW, mithin der Fahrstrom bei 100 A für die Fahrdrachtspannung von im Mittel 600 V.

Da es in Köln als Besonderheit Vorortbahn-Linien bis in die Nachbargemeinden gab, war der Speisebezirk entsprechend groß. Die Endpunkte der Strecken lagen bis zu 18 km von den Zentralen entfernt. Der Spannungsverlust war derart hoch, daß dort Batterien aufgestellt wurden. Wie es heißt, wurden diese jedoch nur bei Dunkelheit benutzt „zum Komfort der Reisenden“, die sich sonst beschwerten, wegen der schlechten Beleuchtung nicht lesen zu können.

Der Querschnitt der Rückleiterkabel betrug 1000 mm², und die Rückleitungspunkte waren so angelegt, daß möglichst geringe Streuströme auftraten. Ferner waren von diesen Punkten Meßkabel zur Minus-Schalttafel im Unterwerk geführt. Hierüber konnten die Spannung zwischen diesen Punkten und die Spannung Gleis Erde überwacht werden. Dies ist die erste belegte Fernmessung für den kathodischen Korrosionsschutz.

Etwa ab 1920 kamen Quecksilberdampf-Gleichrichter zum Einsatz, die weniger Personal und Betriebsraum erforderten. Entsprechend wurde die Zahl der Unterwerke erhöht und das Netz in einzelne elektrisch

getrennte Speiseabschnitte aufgeteilt (dezentrale Stromversorgung). Der Spannungsfall auf den Strecken und damit auch die Streuströme verringerten sich trotz zunehmender Leistung der Triebfahrzeuge.

Heute liegt der Maximalstrom eines schweren Stadtbahnwagens bei 1 kA und eines Zuges in Doppeltraktion mit Vielfachsteuerung bei 2 kA. Der mittlere Fahrstrom im Netz beträgt 2,5 kA und der Nennstrom eines ferngesteuerten Unterwerks mit Silizium-Gleichrichter 5 kA. Der Unterwerksabstand wurde ganz wesentlich auf 2 km verringert. Beispielsweise besitzt Köln jetzt insgesamt 41 Unterwerke.

Eine wesentliche Verringerung der Streustrom-Beeinflussung wird bei modernen Stadtbahnen durch den Gleisbau erzielt. Ein eigener Bahnkörper mit Holz- oder Betonschwellen sowie eine saubere trockene Schotterbettung bewirken einen niedrigen Ableitungsbelag, d.h. einen hohen Ausbreitungswiderstand der Schienen gegen Erde. Bei Tunnelbahnen werden sie weitgehend gegen die Betonbewehrung (Tunnelerde) isoliert gehalten. Die Wirksamkeit dieser Maßnahmen wird durch Messungen überprüft.

Im Mittel beträgt der Widerstandsbelag (Schienenlängewiderstand) einer zweigleisigen Strecke 7 mOhm/km. Das ergibt bei dem genannten Fahrstrom einen Schienenspannungsfall von 7 – 15 V/km, der wiederum eine entsprechend hohe Spannung Gleis-Erde hervorruft. Das Erdreich als paralleler Stromweg fehlt ja im Gegensatz zu den früher üblichen Rillenschienen im Straßenplanum. Schutzanlagen für erdverlegte Rohrleitungen sollten dann nicht mehr als Streustromabsaugung (+Pol des Schutzstromgerätes am Gleis) geschaltet werden, da an den nur noch wenigen, geringflächigen erdfühligen Punkten der Gleisanlage erheblicher Verschleiß durch Korrosion auftritt. Auch können diese Punkte weit entfernt vom Schutzobjekt liegen, so daß es leicht zu schädlichen Beeinflussungen fremder Installationen kommt. Es empfiehlt sich dann, normale kathodische Schutzanlagen mit Fremdstrom-Anoden einzurichten. Da wegen der erwähnten hohen Spannung Schiene-Erde Schutzstromgeräte bei Streustromabsaugung eine entsprechend hohe Ausgangsspannung aufweisen müßten, ist auch in dieser Hinsicht der Anschluss ans Gleis nicht günstiger als eine Anodenanlage.

Schließlich ist in der Stromversorgung der Gleichstrombahnen eine umfassende Veränderung durch die Einführung der sogenannten Nutzbremse eingetreten, bei der von einem bremsenden Fahrzeug Energie ins Netz zurückgespeist wird. Dies ist in befriedigender Weise erst durch den Einsatz der bereits erwähnten Umrichter möglich geworden. Zwar wird damit jedes Fahrzeug gewissermaßen zu einem ortsveränderlichen Unterwerk. Hierdurch tritt aber bei der Streustrombeeinflussung keine merkliche Veränderung ein, da die Bremsvorgänge nur kurz sind.

Dagegen ist ganz wesentlich, daß zur Funktion der Nutzbremse ein aufnahmefähiges Triebfahrzeug in dem jeweiligen Speiseabschnitt fahren muß. Das ist jedoch bei langem Fahrplankontakt nicht immer gegeben. Deshalb werden neuerdings die Speiseabschnitte parallel geschaltet, denn im Gesamtnetz ist mit großer Wahr-

scheinlichkeit stets ein Verbraucher vorhanden. Damit sind dann alle Unterwerke mehr oder weniger an der Speisung jedes Zuges beteiligt.

Eingehende Untersuchungen, auch an einem Modell bei der Technischen Akademie Wuppertal, haben ergeben, daß sich durch diese sogenannte zweiseitige Speisung die Streustrombeeinflussung eher verringert. Sie verändert sich aber ganz merklich, da die negativsten Schienenpotentiale nicht mehr bei jedem Unterwerk liegen, sondern je nach Belastungszustand an anderen Punkten anzutreffen sind.

Das bedeutet, daß ein bereits bestehendes System von Schutzanlagen nicht mehr einwandfrei arbeitet und einige dieser Anlagen überflüssig werden bzw. an einen anderen Standort versetzt werden müssen. Umfangreiche Messungen und danach eine völlige Neuplanung werden erforderlich.

Mit dieser tiefgreifenden Veränderung bei der Stromversorgung von Gleichstrombahnen und der Streustrom-Beeinflussung erdverlegter Rohrleitungen ist eine fast 120jährige Entwicklung zum Abschluß gekommen.

3. Wechselstrombahnen

Bei der Stromversorgung von Wechselstrombahnen haben keine derart grundlegenden Veränderungen stattgefunden. Doch ist die Leistung der Lokomotiven im Laufe der Zeit erheblich angestiegen. Sie betrug zunächst 400 – 800 kW, dann bis zu 2000 kW, sodaß der Fahrstrom 150 A kaum überschritt. Heute beträgt sie bei schweren Anfahrten maximal 12000 kW. Damit kann der Fahrstrom kurzzeitig bis zu 800 A betragen.

Der Unterwerksabstand beträgt 50 – 70 km, in Ballungszentren mit S-Bahnbetrieb wie Stuttgart, München und Frankfurt nur 20 – 30 km. Hier kann der Kurzschlußstrom durchaus 40 kA erreichen. Beeinflussungen durch Wechselstrombahnen traten zunächst nur an Fernmeldeleitungen durch Induktion auf. Sie waren allerdings durch die verursachten Geräusche und Überspannungen sehr störend. Bereits ab 1920 wurden umfangreiche Untersuchungen und Messungen auf diesem Gebiet durchgeführt. Mit der Entwicklung hochwertiger Rohrumhüllungen aus Kunststoff trat dann ab etwa 1962 das Problem der Wechselstrom-Beeinflussung von Rohrfernleitungen bei Parallelführung mit elektrischen Bahnstrecken auf.

Einerseits bewirkt die geometrische Unsymmetrie Fahrdrabt-Schiene eine starke induktive Beeinflussung. Andererseits führt die Induktivität der Stahlschienen zu einer hohen Impedanz selbst bei der niedrigen Frequenz von $16 \frac{2}{3}$ Hz. Sie beträgt bei einer 2-gleisigen Strecke etwa 70 mOhm/km, mithin das 10fache des Gleichstrom-Widerstandes. Dadurch fließen bis zu 60 % des Rückstromes über „Erde“, und es kommt auch zu einer starken ohm'schen Beeinflussung erdverlegter Rohrleitungen. Die Spannung Rohr-Erde kann bei gut umhüllten Leitungen und hohem Fahrstrom durchaus 50 – 100 V erreichen.

Maßnahmen gegen zu hohe Berührungsspannung bei Dauerbeeinflussung und Kurzzeitbeeinflussung, her-

vorgerufen durch Fahrleitungskurzschluß, der ja immer ein Erdschluß ist, werden in der AfK-Empfehlung Nr. 3 eingehend beschrieben.

Bei einer sehr nah an einer Bahnstrecke liegenden Wasserleitung DN 600 wurde ein Rohr-Wechselstrom von im Mittel 15 A mit Spitzen bis 33 A gemessen und daraus der bei Bahnkurzschluß auftretende Rohrstrom zu 1000 A abgeschätzt. Damit wurde verständlich, daß hin und wieder die zur Überbrückung von Isolierkuppelungen dienenden Drahtverbindungen in Meßkontaktpfählen abbrannten. Sie sollten in derartigen Fällen einen Mindestquerschnitt von 10 mm²Cu haben.

Befindet sich eine Schutzanlage in einem beeinflussten Leitungsabschnitt, so fließt ein Strom über den Ausgang des Schutzstromgerätes und die Anodenanlage nach Erde. Er erfährt in der Gleichrichter-Brücke eine Einweg-Gleichrichtung und erzeugt einen zusätzlichen mehr oder weniger starken Schutzstrom. Infolgedessen schwankt das Rohr/Boden-Potential. Als Abhilfe hat sich bewährt, einen Elektrolyt-Kondensator von mindestens 10.000 µF, Betriebsspannung 100 V, parallel zum Ausgang des Schutzstromgerätes zu schalten. Damit wird gleichzeitig eine wirksame Erdung der Rohrleitung für Wechselspannung erzielt.

Eine Besonderheit bei Wechselstrombahnen hoher Fahrdrabtspannung ist die sogenannte Bahnerdung. Hierbei werden alle metallenen Bauteile, die bei Fahrleitungsbruch Spannung annehmen können, leitend mit dem Gleis verbunden (geerdet). Es kommt dann im Fehlerfall zum Kurzschluß und damit zur sofortigen Ausschaltung der Fahrleitung. In Sonderfällen, wenn z.B. eine Gleichstrombahn auf einer Straßenbrücke eine Wechselstrombahn kreuzt, würde durch die Bahnerdung des Brückenbauwerks ständig Streuströme in deren Gleisnetz verschleppt. und von diesem weitergeleitet. Dann wendet man die „offene“ Bahnerdung an, d.h. in die Verbindung wird eine Durchschlagsicherung geschaltet, die bei Gefahr anspricht. Sie muß regelmäßig überwacht und bei Bedarf sogleich ausgewechselt werden, da es sonst zu meist zunächst unerklärlichen Streustrombeeinflussungen kommt.

In Gemeinschaftsbauwerken, die von Gleich- und Wechselstrombahnen befahren werden, sind immer die Rückleitungs-Systeme streng elektrisch getrennt.

4. Messtechnik

Messungen an Rohrleitungen, die von elektrischen Bahnen beeinflusst werden, müssen immer mit zeitabhängiger Registrierung der Meßwerte durchgeführt werden. Hierzu wurden früher Linienschreiber benutzt. Heute sollten nur noch rechnergestützte Meßsysteme eingesetzt werden. Nur dann ist mit Daten-Loggern eine exakt zeitsynchrone Aufzeichnung und damit fachgerechte Auswertung und Beurteilung möglich. Bei Gleichstrom-Messungen an wechsellspannungsbeeinflussten Rohrleitungen dürfen nur Meßgeräte benutzt werden, die für die Störfrequenz hinreichend unempfindlich sind.

Das Personal muß mit allen Besonderheiten der Datenverarbeitung vertraut sein, aber auch immer beachten, daß sie kein Ersatz ist für die beim kathodi-

schen Korrosionsschutz seit je so wichtigen Kenntnisse der elektrischen Meßtechnik.

Stromkabel im Tunnel

Bewag rechnet mit hohen Kosteneinsparungen

Die Berliner Kraft- und Licht-AG (Bewag) will erstmalig eine 380-Kilovolt-Leitung durch einen gut begehbaren Tunnel führen. Dabei werde ein neuartiges Kunststoffkabel verwendet. Bisher gab es Kunststoffkabel nur für 110-Kilovolt-Netze. Der 6,4 Kilometer lange Tunnel verläuft quer durch die zur Zeit stark bebaute Berliner Innenstadt in einer Tiefe von 20 bis 30 Metern. Der Innendurchmesser wird mit rund 3 Metern angegeben.

Wie die Bewag (Puschkinallee 52, 12435 Berlin, Tel.: 030/267-10 800) dazu weiter ausführt, sollen die auf 400 Millionen DM bezifferten Kosten um mindestens 20 Prozent geringer ausfallen als bei der herkömmlichen Schachtverlegung, weil die direkte Streckenführung zu einer beträchtlichen Materialeinsparung führe.

Wirtschaftlich sei die Tunnelung auch deshalb, weil die Kabelverlegung sowie Wartungsarbeiten und eventuelle Reparaturen von äußeren Bedingungen (Umweltbeeinträchtigung, Behinderung durch innerstädtische Baustellen, notwendige Verkehrseinschränkungen, erforderliches Grundwassermanagement) unabhängig seien. Außerdem seien Kabelbeschädigungen durch äußere Einflüsse nicht zu erwarten, wie sie in Berlin fast an der Tagesordnung seien, erklärt das Unternehmen.

Anders als bei den 110-Kilovolt-Kabeln wird nicht der Kunststoff Polyethylen (PE) verwendet, sondern eine modifizierte Variante, das vernetzte Polyethylen (VPE). Das Material soll Temperaturen bis zu 90 Grad Celsius ohne Probleme überstehen und elektrische Durchschläge verhindern, die in der Luft rund 3 Meter überbrücken.

Insgesamt sollen sechs Kabel mit einem jeweiligen Durchmesser von 150 Millimetern für zwei Systeme im Tunnel verlegt werden. Die Übertragungsleistung je System wird mit 1100 Megawatt angegeben. Die Kabel werden von ABB und Siemens gebaut und der Tunnel von Soletanche GmbH, Berlin. Diese Tochtergesellschaft des gleichnamigen französischen Konzerns werde den Tunnel nach einem neuen Schildvortriebsverfahren graben. *Blick durch die Wirtschaft, 6.1.1997*

E 13001 F

Pressepost

Impressum: Die Mitteilungen des Fachverbandes Kathodischer Korrosionsschutz e.V. werden vom Fachverband Kathodischer Korrosionsschutz e.V., Sitz Esslingen a. N., Postfach 60 50, 73717 Esslingen, Telefon (07 11) 91 99 01-0, Telefax (07 11) 91 99 01-11 herausgegeben und erscheinen vierteljährlich. Der Bezugspreis ist durch den Mitgliedsbeitrag abgegolten. Für den Inhalt verantwortlich: Hans J. Spieth, Postfach 60 50, 73734 Esslingen. Redaktion: Dipl.-Phys. W. v. Baeckmann, Essen, Hans J. Spieth, Esslingen. Für namentlich gekennzeichnete Beiträge trägt der Verfasser die Verantwortung. Nachdruck mit Quellenangabe und Übersendung von zwei Belegexemplaren erwünscht.

Neue Normen und Normentwürfe

Folgende Normen und Normentwürfe sind erschienen und können über den Beuth Verlag bezogen werden:

- DIN EN 10208-2 „Stahlrohre für Rohrleitungen für brennbare Medien – Technische Lieferbedingungen – Teil 2: Rohre der Anforderungsklasse B“ (1996-08, Ersatz für DIN 17172/1987-05),
- E DIN EN 10284 „Tempergußfittings mit Klemmanschlüssen für Kunststoff-Rohrleitungssysteme“ (1996-08),
- E DIN 10285 „Stahlrohre und -formstücke für erd- und wasserlegte Rohrleitungen – Im Dreischicht-Verfahren extrudiertes Polyethylen (PE)“ (1996-10),
- E DIN EN 12086 „Stahlrohre und -formstücke für erd- und wasserlegte Rohrleitungen – Im Dreischicht-Verfahren extrudierte Polyethylenbeschichtungen“ (1996-10),
- E DIN EN 12287 „Stahlrohre und -formstücke für erd- und wasserlegte Rohrleitungen – Aufgeschmolzene Polyethylenbeschichtungen“ (1996-10),
- E DIN EN 12308 „Anlagen und Ausrüstung für Flüssigerdgas – Eignungsprüfung von Flachdichtungen für Flanschverbindungen in Flüssigerdgas-Rohrleitungen; Deutsche Fassung prEN 12308:1996“ (Entwurf 1996-06).

Zu guter Letzt

Moralisten sind Menschen, die sich dort kratzen, wo es andere juckt.

Aus dem Verbandsleben

In Rahmen der diesjährigen Wasserfachlichen Aussprachetagung, die parallel zur Jahreshauptversammlung 1997 des Fachverbandes vom 22. bis 25. April 1997 in Berlin stattfand, erhielt Herr Dipl.-Ing. Klaus Horras aus den Händen des Vizepräsidenten Wasser des DVGW, Herrn Prof. Dr. Flinspach, die vom Fachverband gestiftete Kuhn-Ehrenmedaille. Wir gratulieren herzlich.